

高等医药院校教材

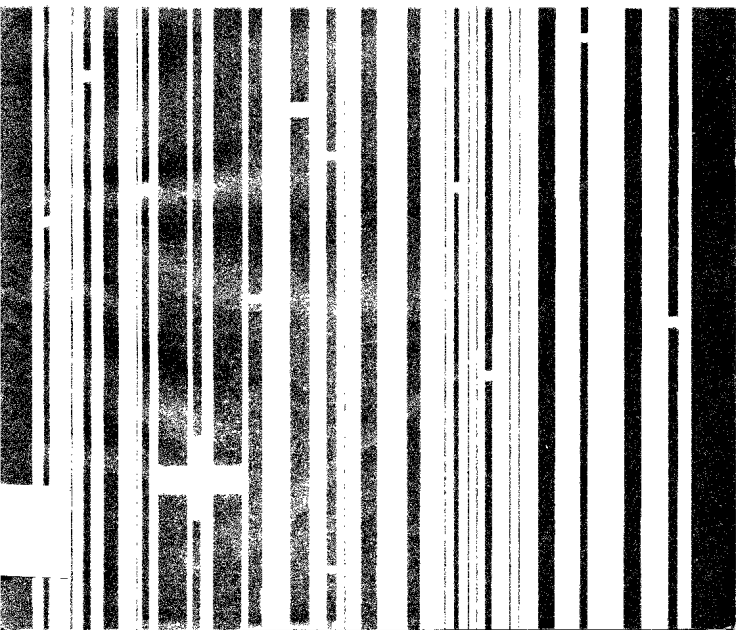
供基础、预防、临床、口腔医学类专业用

核医学

第三版

周 中 主编

人 民 卫 生 出 版 社



编写说明

本书是根据卫生部“关于修订高等医学院校医学专业教材的意见”，在第二版《核医学与放射防护》教材的基础上进行修订和编写的第三版教材。

在修订和编写的过程中，注重以高等医学院校医学专业本科生为主要读者对象，并根据医学专业的培养目标和核医学课程在教学计划中的地位、学时数的安排，确定本教材内容的取舍。内容上除阐明核医学的“三基”知识外，还注重反映80年代以来核医学的新进展和我国核医学的现状，以体现这一版教材在内容上的思想性、科学性、启发性、先进性和适用性。

全书共分16章，其中第1～8章为核医学基础（实验核医学）的内容，简要地介绍了有关核物理的基本知识、核医学仪器、放射性药物、放射防护，以及实验核医学和临床核医学的技术原理和方法。第9～16章为临床核医学的内容，按照现已逐渐形成的“系统核医学”分类方法，着重介绍机体主要系统常用的核医学诊断技术和放射性核素在治疗中的应用。为不断适应这门学科的发展和教学的需要，弥补教材不能收集的内容，编写组为本教材配置了一套教学幻灯片，以逼真的图像为学生提供临床教学中的内容，为今后进一步学习核医学和应用其技术打下扎实的基础。

《核医学》作为医学专业本科教学计划中的一门必修课，通过学习，要求学生能够了解核医学在现代医学中的地位，熟悉放射性核素在医学中应用的原理、方法、特点和意义，并掌握在医学中常用的一些核医学检测和诊治技术，学会对所得结果的分析、判断和评价。

在整个编写过程中，我们得到了山东医科大学、华西医科大学、同济医科大学和湖南医科大学各级领导的关怀、支持，以及上述院校核医学教研室和同位素中心实验室的一些同志的积极配合，特别是山东医科大学教务处给予了具体协助，电化教学研究室朱丽平同志为本教材绘制了部份插图，谨此致谢。

由于我们的水平所限，教材不足之处在所难免，深望各院校在使用时，结合教学中的经验提出宝贵意见，以便在今后修订时改进。

（周 申）

1989年3月

这套教材原为卫生部组织的统编教材, 选经修订, 现改为卫生部推荐教材, 供各地院校选用。全套教材共45种, 其中必修课教材37种, 选修课教材8种, 均经卫生部聘任的高等医学院校临床医学专业教材评审委员会审定。

必修课教材

- | | | | |
|-----------------|---------|-----------------|---------|
| 1. 《医用高等数学》 | 胡纪湘 主编 | 21. 《放射诊断学》第二版 | 吴恩惠 主编 |
| 2. 《医用物理学》第三版 | 邱华俊 主编 | 22. 《内科学》第三版 | 陈灏珠 主编 |
| 3. 《基础化学》第三版 | 丁绪亮 主编 | | 李宗明 副主编 |
| 4. 《有机化学》第三版 | 徐景达 主编 | 23. 《外科学》第三版 | 裘法祖 主编 |
| 5. 《医用生物学》第三版 | 李 璞 主编 | | 孟承伟 副主编 |
| 6. 《系统解剖学》第三版 | 郑思克 主编 | 24. 《妇产科学》第三版 | 郑怀美 主编 |
| 7. 《局部解剖学》第三版 | 徐恩多 主编 | 25. 《儿科学》第三版 | 左启华 主编 |
| 8. 《解剖学》 | 王永贵 主编 | 26. 《神经病学》第二版 | 黄友波 主编 |
| 9. 《组织学与胚胎学》第三版 | 成令忠 主编 | 27. 《精神病学》第二版 | 沈渔邨 主编 |
| 10. 《生物化学》第三版 | 顾天爵 主编 | 28. 《传染病学》第三版 | 彭文伟 主编 |
| 11. 《生理学》第三版 | 周衍椒 主编 | 29. 《眼科学》第三版 | 毛文书 主编 |
| | 张镜如 副主编 | | 孙信孚 副主编 |
| 12. 《医用微生物学》第三版 | 陆德源 主编 | 30. 《耳鼻咽喉科学》第三版 | 黄选兆 主编 |
| 13. 《人体寄生虫学》第三版 | 徐秉魁 主编 | 31. 《口腔科学》第三版 | 毛祖彝 主编 |
| 14. 《医学免疫学》 | 郑武飞 主编 | 32. 《皮肤性病学》第三版 | 王光超 主编 |
| 15. 《病理学》第三版 | 武忠弼 主编 | 33. 《核医学》第三版 | 周 申 主编 |
| 16. 《病理生理学》第三版 | 冯新为 主编 | 34. 《流行病学》第三版 | 耿贯一 主编 |
| 17. 《药理学》第三版 | 江明性 主编 | 35. 《卫生学》第三版 | 王翔朴 主编 |
| 18. 《医学心理学》 | 李心天 主编 | 36. 《预防医学》 | 顾学寅 主编 |
| 19. 《法医学》第二版 | 郭景元 主编 | 37. 《中医学》第三版 | 贺志光 主编 |
| 20. 《诊断学》第三版 | 戚仁铎 主编 | | |

选修课教材

- | | | | |
|---------------|--------|-------------|--------|
| 38. 《医学物理学》 | 刘普和 主编 | 42. 《临床药理学》 | 徐叔云 主编 |
| 39. 《医用电子学》 | 刘 璞 主编 | 43. 《医学统计学》 | 倪宗璜 主编 |
| 40. 《电子计算机基础》 | 华蕴博 主编 | 44. 《医学概论》 | 丘祥兴 主编 |
| 41. 《医学遗传学基础》 | 杜传书 主编 | 45. 《医学辩证法》 | 彭瑞聪 主编 |

以上教材均由人民卫生出版社出版, 新华书店总店科技发行所发行。

全国高等医学院校临床医学专业 第二届教材评审委员会

主任委员 裘法祖

副主任委员 高贤华

委员 (以姓氏笔画为序)

方 圻 毛文书 刘士杰 刘湘云 乔健天 沈渔邨
武忠弼 苏应宽 金有豫 南 潮 胡纪湘 顾天爵

目 录

绪 论	1
第一章 医用核物理基础	4
第一节 原子结构	4
第二节 放射性核素的核衰变及其规律	5
第三节 射线与物质的相互作用	9
第四节 常用辐射量及其单位	11
第二章 核医学仪器	14
第一节 基本原理、类型及仪器结构	14
第二节 常用的核医学仪器	16
第三章 放射性药物	22
第一节 放射性药物的分类	22
第二节 放射性药物的特点和使用要求	22
第三节 放射性药物制备的基本方法	24
第四节 放射性核素发生器	26
第四章 放射生物效应与放射防护	28
第一节 放射生物效应	28
第二节 放射卫生防护标准	31
第三节 放射防护措施	32
第五章 核素示踪技术	36
第一节 基本概念	36
第二节 放射性核素示踪技术的主要类型	38
第三节 细胞动力学分析法	42
第四节 稳定性核素在示踪技术中的应用	44
第六章 体外放射分析	46
第一节 基本原理和类型	46
第二节 基本技术	50
第七章 放射性核素示踪动力学	58
第一节 基本概念	58
第二节 基本步骤	63
第三节 在核医学中的应用	65
第八章 放射性核素功能测定及显象技术	67
第一节 放射性核素功能测定	67
第二节 放射性核素显象术	71
第九章 中枢神经系统	74
第一节 脑	74

第二节 脑脊液	84
第十章 内分泌系统	87
第一节 甲状腺	87
第二节 性腺	105
第三节 肾上腺	109
第四节 其它内分泌腺	113
第十一章 循环、呼吸系统	115
第一节 心脏及大血管	115
第二节 静脉	131
第三节 淋巴系	132
第四节 肺	135
第十二章 消化系统	141
第一节 肝脏	141
第二节 胆系	151
第三节 胃肠道	156
第四节 胰腺、唾液腺	160
第十三章 泌尿和生殖系统	163
第一节 肾脏	163
第二节 生殖器官	174
第十四章 血液系统	177
第一节 骨髓	177
第二节 脾脏	179
第三节 血细胞	181
第十五章 骨骼系统	187
第十六章 放射性核素治疗	193
第一节 概述	193
第二节 甲状腺疾病的核素治疗	194
第三节 血液系统疾病的核素治疗	199
第四节 放射性核素 β 射线敷贴治疗及其他核素疗法	200
附录	204
一、常用电离辐射量的单位换算	204
二、儿科应用核医学检查须知	204
三、常用放射性核素主要物理常数	205
四、英汉核医学常用词汇	207

绪 论

核医学是研究核技术在医学中的应用及其理论的科学。随着医学科学和核技术的迅速发展,特别是近年来核电子学、电子计算机技术、细胞杂交技术、加速器的微型化和自动化以及分子生物学等现代科学技术的迅速发展和渗透,使核医学已成为一门多学科的综合专业性。

核医学的内容,概括地分为两大部分,即核医学基础(包括实验核医学)和临床核医学。核医学基础主要包括放射性药物、放射性核素示踪原理、放射性示踪动力学、体外放射分析、活化分析、稳定性核素分析以及放射自显影等实验核医学技术和方法;同时也包括临床核医学功能检测和显象的技术及方法学。核医学基础和核科学中的一些分支学科有着密切的联系,例如核物理学、核电子学、放射剂量学、放射生物学以及放射防护学等。临床核医学主要是利用核医学的各种原理、技术和方法来研究疾病的发生和发展的转归,研究机体在病理生理、生物化学和功能结构上的变化,从而达到探讨病因和诊治疾病的目的。

核医学是现代医学的重要内容,也是核科学的重要组成部分。核医学技术在医学各个学科的应用,促进了医学科学的发展,引起了医学科学研究的划时代变化。例如在基础医学领域中,通过放射性核素示踪法,在生理情况下从分子水平动态地研究体内各种物质的代谢变化,细致地揭示了体内及细胞内代谢的内幕,改变了过去只能在非生理条件下进行实验和获得数据的情况。又如在临床医学各专业的诊断中,应用核医学的检查不仅能显示体内组织器官的形态,而且可以反映其功能,具有安全、可靠、快速、灵敏、特异性强,以及可进行动态和定量的观察等优点。总之,应用核医学的技术可以反映:

- ①机体功能和结构的变化,如各组织和器官的显象;
- ②机体物质代谢的变化,如应用正电子发射断层(PET)脑显象反映葡萄糖代谢的变化;
- ③体液容量的变化,如血容量及各器官的血流量测定;
- ④机体活性物质的数量变化,如体外放射分析对血液和体液中某些生物活性物质的含量测定,以及活化分析测定组织中微量元素的含量等;
- ⑤介质传递功能的变化,如受体显象等。

核医学虽是一门新学科,但和其他学科一样,有其自身发生和发展的历史。核医学是在核物理以及核化学的基础上逐步发展起来的,核医学的发展历史,可追溯到1896年Bequerel发现铀的放射性,1898年居里夫妇发现镭。然而直到20世纪40年代,由于核反应堆的建成、人工放射性核素的大量生产,以及核医学仪器的研制,才为核医学的发展提供了必要的条件。50年代闪烁扫描机的研制成功,促进了临床核医学脏器显象的发展。60年代,由于闪烁照相机和 ^{99m}Tc 的推广应用,进一步提高了临床核医学的诊断水平,同时随着体外放射分析等实验核医学技术在基础和临床医学中的应用,更加充实了核医学的内容。70年代电子计算机的应用和核医学仪器的改进,使核医学的发展更加迅速。进入80年代以后,在国外一些科学技术比较先进的国家中,核医学的发展都比较迅速。例如核医学在中枢神经系统和心血管系统中的应用,近年尤有突出的进展,过去几年脑血流量、受体和代谢等方面的核医学研究主要应用PET显象,但自1987年以来,以单光

子发射计算机断层 (SPECT) 显象研究脑血流量得到广泛应用。选用适当的示踪剂做脑 SPECT 显象, 在临床上可对一些脑血管性疾病做出判断。脑受体显象也已从实验研究逐步过渡到临床应用。又如在心血管系统方面, 异腈类心肌灌注显象的研制和临床应用是核医学的又一重要进展, 选用相应的示踪剂做心肌 SPECT 显象, 可减轻正常心肌对病变的掩盖, 并可降低肝脏放射性的干扰。受体显象不仅应用于中枢神经系统和心血管系统的临床诊断, 在消化系统、生殖系统以及其他系统的疾病诊断中也广泛被应用。如在消化系统对门脉高压患者进行 SPECT 显象, 能显示门脉系统的侧枝循环, 有助于对病程的判断。

在国内, 核医学的发展大致分为三个阶段:

1. 开创阶段 我国的核医学创建于本世纪 50 年代后期, 通过举办训练班, 有计划的培训专业干部, 以及在高等医学院校和一些省级医院建立同位素室, 各省市相继开展了核医学的教学和临床诊治工作。当时核医学的教学内容称为“放射性同位素在医学中的应用”, 作为放射医学专业教学内容的三大组成部分之一。而在临床上主要开展了用放射性¹³¹碘和³²磷诊断和治疗某些常见病。

2. 普及推广阶段 自 1958 年以后, 随着我国核技术的发展, 国产放射性核素开始成批供应, 加以定标器、肾图仪以及闪烁扫描机等国产核医学仪器的相继创制和批量生产, 为核医学的普及推广创造了条件, 使核医学的各种功能检查和脏器显象在临床诊断中得到逐步推广, 使核素示踪技术在一些基础医学学科中的应用陆续开展。

3. 提高发展阶段 自 70 年代以来, 在普及推广的基础上, 随着国产放射性核素的品种增多, 特别是一些短半衰期核素, 以及钼-钨、锡-钢发生器的研制和供应, 加以国产核医学仪器的结构更新和质量提高, 并由国外相继引进了一定数量的液体闪烁计数器、闪烁照相机, 以及 SPECT 等重要而新型设备, 从而有力地促进了我国核医学的发展和提高。核医学作为我国医学科学中的一门独立学科, 不仅成为高等医学院校本科教学中的一门必修课, 同时还建立了全国和各省的核医学学会, 出版了中华核医学杂志, 加强了国内外的学术交流, 而且结合我国国情, 并参照国外核医学的发展, 在专业内容上也逐渐形成了具有我国特色的一些分支专业和重点, 例如临床核医学中的心血管系统核医学、血液和造血系统核医学, 内分泌系统核医学, 以及神经系统核医学等。又如实验核医学, 随着基础医学与临床医学的相互交叉和渗透, 使一些实验核技术如体外放射分析, 不仅在基础医学中广泛应用, 而且受到了临床一些学科的重视, 成为研究病因, 检测诊断中的优选手段, 在一些高等医药院校和科研机构, 近年来也加强了对实验核医学理论、技术和应用的研究, 并在研究生和药学本科教学中相继开设了实验核医学课程, 受到学生的重视, 编写和出版了《实验核医学》、《实验核医学技术》和《放射免疫》等专著。目前我国的核医学工作不仅得到普及, 而且有了较大的提高, 已接近国外 80 年代初期核医学的水平, 在某些方面, 如脑血流显象剂、肝胆的吡哆醛类显象剂, 以及肾功能的示踪剂, 已达到国外同类放射性药物的质量水平。从 1983 年起, 我国有些单位已开始了放射免疫显象工作, 目前在一些单克隆抗体的质量上和放射免疫显象的临床评价上, 也已接近或达到国外先进水平。随着一些较为理想的脑功能显象剂的研制成功和核医学仪器性能的提高, 近年来脑功能的研究在国内核医学中占有比较突出的地位, 临床实践说明脑功能显象对神经系统疾患的诊断确有较好的价值。心血管核医学的研究, 在国内同样受

到了比较广泛的重视，除对心肌灌注显象剂加强研制外，还注意了临床应用的评价，如 ^{99m}Tc 潘生丁心肌灌注显象，能使不能进行足量运动的病人接受心肌显象，对冠心病诊断的符合率可达90%以上；且可用来估价心肌细胞活性和估计冠状动脉的狭窄程度。放射性核素心血管造影相位分析也已在临床上初步应用，能检测出心脏病人的心室舒缩异常，协助判断心肌梗塞的部位、范围和程度，并能鉴别充血性心肌病和冠心病。

此外核医学检查在其他系统中的应用也日趋广泛。例如骨显象对骨转移瘤的诊断，具有X线诊断无法比拟的重要价值。随着国内多种肝胆显象剂的研制成功，肝胆显象对胆道疾病的诊断提供了理想的手段。总之，核医学在促进我国医学向现代医学的发展中占有极其重要的地位。

(周 申 谭天秩 叶维新)

第一章 医用核物理基础

第一节 原子结构

一、原子与原子核

原子是元素的最基本单位,是用任何化学方法都不能分割的最小粒子。在自然界中,现有109种元素,其中93种是天然的,16种是人工制成的。虽然不同元素的原子、性质各不相同,但其基本结构都是由原子核和核外电子组成的。原子核位于原子的中心,所占空间较小,但其质量较大,几乎等于原子的质量。核外电子以一定的轨道围绕原子核运行,每个轨道只有一个电子,而一定数目的轨道形成一个电子壳层,核外可有几个电子壳层,最靠近核的电子壳层称K层,依次向外称为L、M、N、O……层。每个电子壳层可容纳的电子数为 $2n^2$ 个, n 表示第几壳层数。每个壳层上的电子分别具有一定的能量,距核越远,位能越高。

原子核带正电荷,核外电子带负电荷,当核外电子与核电荷数相等时,原子呈中性。实验和理论证明,各种元素原子核都是由质子(Proton)和中子(neutron)组成的。质子和中子统称为核子(nucleon)。质子带正电,其电量与电子的电量相等,而中子不带电。由于质子和中子的质量都极小,所以原子核内质子和中子数之和就是原子核的质量数(Mass number),用 A 表示。原子核内的质子数相当于原子的电荷数(nuclear charge),即原子序数(atomic number),用 Z 表示。而原子核内的中子数为 $A - Z$ 。通常用 X 表示某元素的化学符号,用 ${}_Z^AX$ 表示元素原子核的组成,如 ${}_{92}^{235}\text{U}$,表示铀元素的原子核,其质量数为235,原子序数是92,中子数为 $235 - 92 = 143$ 。由于质子数相当于原子序数,而原子序数可由元素来确定,故一般均省略不记,只记元素符号及其质量数,如 ${}^3\text{H}$ 、 ${}^{32}\text{P}$ 、 ${}^{99}\text{Tc}$ 、 ${}^{113}\text{In}$ 、 ${}^{125}\text{I}$ 等。

二、核素、同位素和同质异能素

1. 核素(nuclide) 具有特定质量数、原子序数和核能态,而且其平均寿命长得足以被观察的一类原子统称为核素。目前已知的元素虽仅109种,但核素却有近两千种。原子核内具有相同质子数的原子,属于同一种元素;同一种元素的原子,可能是不同的核素。

2. 同位素(isotope) 具有相同原子序数,但质量数(A)不同的核素称为同位素。同位素在元素周期表上处于同一位置,如 ${}^1\text{H}$ 、 ${}^2\text{H}$ 、 ${}^3\text{H}$ 为氢的三种同位素; ${}^3\text{He}$ 、 ${}^4\text{He}$ 、 ${}^5\text{He}$ 为氦的三种同位素。

3. 同质异能素(isomer) 具有相同质量数和原子序数,处在不同核能态的一类核素称为同质异能素。为表示某种核素的同质异能素,常在核素符号的左上角质量数后面或右上角加“m”表示。如 ${}_{43}^{99m}\text{Tc}$ 和 ${}_{43}^{99}\text{Tc}$ 两者的能级不同,前者是处于激发态,后者是处于基态的核素。

三、稳定性核素与放射性核素

核素分为两类：一类称稳定性核素，它能够稳定地存在，不发生自发的变化。在已发现的近两千种核素中，仅有274种为稳定性核素，其余均为不稳定的核素。不稳定的核素又称为放射性核素，它能自发地放出某种射线而转变为另一种核素。对放射性核素具有的这种现象称为核衰变（nuclear decay）。核衰变是由原子核内部的矛盾运动决定的。大量资料表明，每种元素的原子核，其质子数和中子数必须在一定的比例范围内才能稳定，比例过大或过小都要发生核衰变。

核衰变的速度、方式及释出的射线种类和能量取决于原子核内部的特征，不受周围环境的影响。

第二节 放射性核素的核衰变及其规律

一、核衰变的类型

（一） α 衰变(alpha decay) 原子核放射 α 粒子的放射性衰变称 α 衰变(图1-1)。一次 α 衰变后，该原子核的原子序数减少2，质量数减少4。 α 粒子即是核转变时放出的 ${}^4\text{He}$ 核。

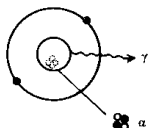
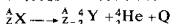


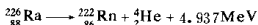
图1-1 α 衰变模式图

以衰变反应式表示为：



式中X表示衰变前的核素（母体），Y表示衰变后的核素（子体），Q表示衰变能，单位是MeV。

如：



α 粒子的速度约为光速的1/10左右，在空气中的射程约3~8cm，在水中和肌体内的射程为0.06~0.16mm。因其射程短，穿透力弱，一般用一张纸就可以阻挡它的通过。但 α 粒子的电离能力强，所以放射 α 粒子的放射性核素，在核医学诊断和治疗中应用较少。

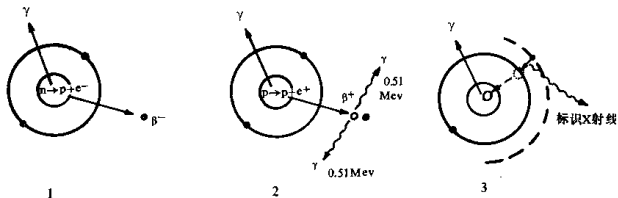


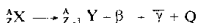
图1-2 β 衰变模式图

1. β^- 衰变 2. β^+ 衰变 3. 电子俘获

(二) β 衰变 (beta decay) 原子核放射 β 粒子或俘获轨道电子的放射性衰变称为 β 衰变。原子核的 β 衰变使原子序数增加或减少, 但不改变其质量数。 β 衰变有三种类型: β^- 衰变、 β^+ 衰变和电子俘获 (图 1-2)。

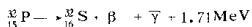
1. β^- 衰变 放射性核素的原子核放出 β^- 粒子变为另一核素的过程称 β^- 衰变。 β^- 粒子就是电子, 由于核内并无电子, 是在中子偏多的情况下由中子变成质子时产生的。

以衰变反应式表示:



式中 $\bar{\nu}$ 代表反中微子, 反中微子比电子的质量还小的多, 它不带电。

母体核素经 β^- 衰变后, 其质量数不变, 原子序加 1, 即在元素周期表中移后一个位置。如:



β^- 粒子的能量分布可以从零到最大衰变能, 形成一个连续的能谱。 β^- 粒子的穿透能力较 α 粒子强, 射程在空气中约在数米以内; 电离能力较 α 粒子弱, 比 γ 射线强。

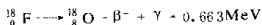
2. β^+ 衰变 放射性核素的原子核放射 β^+ 粒子, 变为另一核素的过程称 β^+ 衰变。 β^+ 粒子就是正电子, 是电子的反粒子。它的质量和电量与电子完全相同, 只是电性相反。

以衰变反应式表示为:



式中 ν 表示中微子, 亦是静止质量为零的中性粒子。

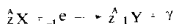
母体核素经 β^+ 衰变后, 其质量数不变, 原子序数减少 1, 即在元素周期表中移前一个位置。如:



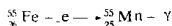
β^+ 粒子的能量与 β^- 粒子相似, 也是连续的。由于原子核中也无正电子, 是在质子偏多的情况下, 由质子转变为中子时产生的。

3. 电子俘获 放射性核素的原子核在衰变时不放出粒子, 由核外俘获一个轨道电子而变成另一种原子核的放射性转变过程称电子俘获 (electron capture)。由于原子核最容易从原子的内层 (即 K 层) 俘获电子, 因而常称其为 K 俘获。

以衰变反应式表示为:



母体核素经电子俘获后, 其质量数不变, 原子序数减少 1, 即元素周期表移前一个位置。如:

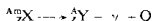


电子俘获时核内虽不放射粒子, 但由于核外电子壳层内层轨道缺少电子, 外层电子向内层补充, 其多余的能量将以光子形式放出 (称其为标识 X 射线); 若不以光子形式放出, 而把过剩的能量传给更外层的电子时, 则以自由电子的形式放出, 对此称为“俄歇电子” (Auger electron)。

(三) γ 衰变和内转换

1. γ 衰变 (γ decay) 放射性核素原子核由高能态向低能态跃迁时, 释放 γ 射线的衰变过程称 γ 衰变。也称为 γ 跃迁 (γ transition)。 γ 射线是一种电离辐射或光子流, 不带电。

以衰变反应式表示为:



在 γ 衰变时, 原子核的质量数和原子序数均不改变, 只是核的能量状态发生了改变。由于原子核处于激发态的时间极短, 因此一些 α 和 β 衰变可伴有 γ 衰变。但有些核素在处于激发态时, 可单独放出 γ 射线。

如:

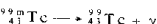


图 1-3 γ 衰变及内转换模式图

2. 内转换 (internal conversion) 处于激发态的原子核在向较低能态跃迁时, 把多余的能量直接交给核外的壳层电子, 使轨道上的电子获得足够的能量后脱离轨道成为自由电子, 这种现象称为内转换。通过内转换从原子内层电子轨道上发射的电子称为内转换电子 (图 1-3)。在发生内转换后留下的空轨道因外层电子的跃迁可继续产生标识 X 射线或俄歇电子。

二、核衰变规律

(一) 核衰变规律的特点 对于放射性核素而言, 虽然所有的核都可能发生衰变, 且就单个核来说衰变是偶然而无规律的; 但通过对由大量原子所组成的放射性样品进行的研究表明, 其衰变是遵循一种普遍的衰变规律进行的。即各种放射性核素其总放射性核的数目 (N) 都随时间 (t) 按指数规律衰减。例如: 假设某种放射性核素含有 N 个原子, 由于不断衰变, 母体原子的数量逐渐减少, 若在时间 dt 内衰变的原子数为 dN 。实验证明: dN 与当时存在的母体核素 N 和时间间隔 dt 成正比。

$$dN \propto -Ndt$$

$$\text{或 } dN = -\lambda Ndt$$

式中的负号表示母体核数随时间的增长而减少。 λ 称衰变常数 (decay constant), 其定义是: 某种放射性核素的一个核在单位时间内进行自发衰变的几率, 即 $\lambda = -\frac{1}{N} \frac{dN}{dt}$ 。

若将上式积分,

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

解之得 $\ln N = -\lambda t + C$

式中 C 为积分常数。当 $t = 0$ 时, 未衰变的核素为 N_0 即 $N = N_0$, 代入上式

$$C = \ln N_0$$

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

上式表明放射性核素按时间的指数规律衰减。这是表示核衰变规律的基本公式, 它适用于任何一种单一存在的放射性核素。

(二) 半衰期 是在实际工作中用来表示放射性核素衰变速率的指标。在核医学中,常用的半衰期有物理半衰期、生物半衰期和有效半衰期。

1. 物理半衰期(physical half life) 在单一的放射性衰变过程中,放射性活度降至其原有值一半时所需要的时间,称为物理半衰期,简称半衰期($T_{1/2}$) (图 1-4, 1-5)。

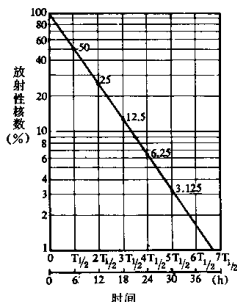


图 1-4 ^{99m}Tc 衰变曲线 (半对数座标)

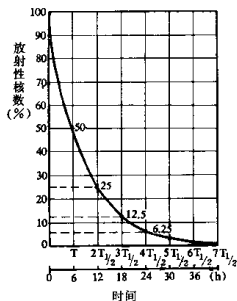


图 1-5 ^{99m}Tc 衰变曲线 (普通座标)

半衰期和衰变常数的关系为:

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

上式表明半衰期与衰变常数成反比,核素的衰变常数越大,其半衰期越短。各种放射性核素的半衰期长短不一。最长者可达 10^{10} 年,最短者仅有 10^{-10} 秒。核医学中常用的放射性核素如 ^{131}I $T_{1/2}=8.04$ 天, ^{32}P $T_{1/2}=14.3$ 天等。

2. 生物半衰期 (biological half life) 和有效半衰期 (effective half life) 生物半衰期(T_b)是指当某生物系统中,某种指定的化学元素的排出速率近似地按指数规律减少时,由于生物过程致使该元素在此系统中的量减少一半所需的时间。有效半衰期(T_e)是指当某生物系统中,某种指定的放射性核素的量,由于放射性衰变和生物排出的综合作用,而近似地按指数规律减少时,该核素的数量减少一半所需的时间。生物半衰期和有效半衰期表明放射性核素被引入人体或动物体内时,原子核的数量一方面按衰变规律减少,另一方面还会通过生物代谢排出体外。

在单位时间内,从体内排出的放射性核素数与当时存在的核素数之比,以及放射性核素每秒钟从体内实际减少的比率,分别称为生物衰变常数(λ_b)和有效衰变常数(λ_e)。故:

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

$$\frac{1}{T_e} = \frac{1}{T_{1/2}} + \frac{1}{T_b}$$

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

(三) 放射性活度及其单位

1. 放射性活度 (简称活度, activity) 是指一定量的放射性核素, 在一个很短的时间间隔内发生的核衰变数除以该时间间隔, 即

$$A = \frac{dN}{dt}$$

式中 A 代表一定量放射性核素的活度, dN 是在时间间隔 dt 内, 由该能态发生自发核衰变次数的期望值。 dN 所以是期望值, 是由于放射性衰变具有随机性。

放射性活度反映的是放射性核素的核衰变率。

2. 放射性活度的单位 在我国认定和采用的国际单位制 (SI) 中, 放射性活度的单位是 s^{-1} (S^{-1}), 其专用名为贝可勒尔 (Becquerel), 简称贝可, 符号为 Bq 。1 Bq 表示放射性核素在一秒内发生一次核衰变, 即

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ S}^{-1}$$

Bq 的实际含义是表示放射性核素每秒衰变次数。放射性活度的旧有单位为居里 (Ci), 派生单位为毫居里 (mCi, 1 mCi = 0.001 Ci)、微居里 (μCi , 1 μCi = 0.001 mCi)。

1 Ci 等于每秒 3.7×10^{10} 次衰变。 Bq 与 Ci 的换算关系是

$$1 \text{ Bq} = 2.7 \times 10^{-11} \text{ Ci}$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

在核医学中, 有时放射性核素混有该元素的非放射性核素, 为了表示其放射性活度, 通常还采用比活度 (specific activity)。比活度表示单位质量的某种物质的放射性活度。

第三节 射线与物质的相互作用

一、带电粒子与物质的相互作用

(一) 电离和激发 当带电粒子 (α 、 β 射线) 通过物质时, 和物质原子中的电子发生静电作用, 使电子脱离轨道形成一个带负电荷的自由电子。失去一个电子的原子则带有正电荷。自由电子和带有正电荷的原子形成一对离子。凡原子或原子团由于失去电子或得到电子而形成离子的过程称为电离 (ionization) (图 1-6)。自由电子具有一定的能量, 它又可引起其他原子电离, 由自由电子引起的这种电离称次级电离。

带电粒子从能量较低的轨道跃迁到能量较高的轨道, 这种现象称为激发 (excitation) (图 1-6)。

无论是电离还是激发, 所需要的能量都来自带电粒子, 所以电离和激发都可以使射线的能量转换。由于电离, 在带电粒子的路径上可形成一定数量的离子对。在单位路径长度上形成的离子对数, 称为电离密度 (ionization density)。它可用来表示带电粒子的电离能力的大小。一般它与带电粒子的电量、速度以及物质的密度有关。带电粒子的电量, 与物质原子中电子发生静电作用的范围和电离能力也大; 带电粒子的速度慢, 它与电子作用的时间长, 电离密度就大。反之, 带电粒子的电量小, 速度快, 它的电离密度就小。例如能量同为 1 MeV 的 α 和 β 粒子, 在通过同一物质时, 由于 α 粒子所带的电量为 β 粒子的 2 倍, 速度比 β 粒子慢, 因此 α 粒子比 β 粒子的电离密度要大 (图 1-6)。

(二) 轫致辐射 (bremsstrahlung) 电磁场使带电粒子动量改变时, 发射的电磁辐

射称轫致辐射。带电粒子通过物质时，由于受到物质原子核库仑场的作用，运动速度突然变慢，带电粒子能量的一部分以光子的形式辐射出来，这种辐射便是轫致辐射。轫致辐射和带电粒子的能量以及物质原子序数的平方成正比，和带电粒子的质量成反比。如 α 粒子的质量较大，其轫致辐射可忽略（图1-6）。

（三）散射（Scattering）入射粒子（包括电磁辐射）与粒子或粒子系统碰撞而改变运动方向与能量的过程称为散射。由于 α 粒子质量较大，散射不太明显，其径迹基本上可以看作是直线进行的； β 粒子的质量不及 α 粒子的千分之一，因而散射比较明显，在物质中的径迹是曲线进行的（图1-6）。

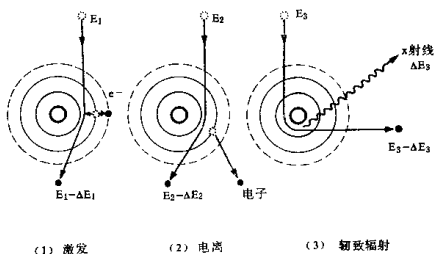


图1-6 带电粒子与物质相互作用

二、光子与物质的相互作用

（一）光电效应（photoelectric effect）X射线和 γ 射线都是光子流。当光子被原子吸收后，发射轨道电子的现象称为光电效应。也就是在光子与物质原子相互作用时，它将全部能量转移给原子中的K壳层或L壳层的电子，电子获得能量后，脱离原子而运动的现象（图1-7）。脱离原子而运动的电子称光电子。光电子所获得的能量，一部分消耗于克服原子核的束缚，其值相当于电子的结合能；另一部分为光电子的动能。光电子的动能可以引起物质其他原子发生电离，即次级电离。发射出光电子的原子，由于内壳层产生了电子空位而处于激发态，在其由激发态过渡到基态时，可发出标识射线。

（二）康普顿效应（Compton effect）当光子和物质原子相互作用时，它将部分能量传给原子中较外层的壳层电子，电子获得能量后脱离原子而运动，这种电子称康普顿电子，亦称反冲电子。光子由于本身能量减少，而改变运动方向射出，这种光子称为康普顿散射光子。对于光子被物质散射的这种效应，称为康普顿效应（如图1-7）。

（三）电子对效应（electron pair effect）能量大于两个电子的静止能量1.02MeV的光子当通过物质时，可能在物质原子核的库仑场作用下，转化成为一对正负电子，这种现象称为电子对效应（图1-7）。电子对效应通常发生在能量较大的 γ 光子，而X射线的能量一般较小，不足以引起电子对效应。

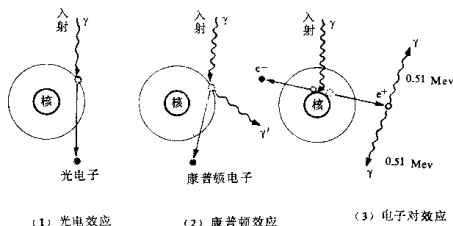


图 1-7 光子与物质的相互作用

综合上述,光子无论通过哪种效应与物质相互作用,都会使其能量在入射的方向上随着通过物质厚度的增加而减弱。实验表明,对单能光子强度的减弱是服从指数规律而减弱的。

三、中子和物质的相互作用

中子不带电,当它通过物质时,不容易直接引起电离和激发。由于中子和原子核之间没有静电力,故主要与原子核发生作用,作用方式有弹性散射和核反应等。

(一) 弹性散射 (elastic scattering) 中子将一部分能量传给被撞的原子核,使其脱开壳层电子而运动,称其为反冲核。反冲核能使物质的其他原子发生电离和激发,而中子本身的速度减慢并改变运动方向。这种现象称弹性散射。实验表明,当中子与其质量相近的原子核碰撞时,损失的能量最多,如当中子与氢核碰撞时,因其质量与中子相近,反冲核得到的能量较多,故中子很容易被含氢多的物质如水、石蜡等减速而吸收,这在防护上有一定意义。

(二) 核反应 (nuclear reaction) 高能中子和物质原子相互作用时,可穿入原子核然后放出一个质子或光子而形成新核,这种现象称核反应。新核可能是稳定性核素,也可能是放射性核素。如果是放射性核素,可继续衰变,这种现象称为感生放射性。其结果是可产生带电粒子或 γ 射线,继续使物质原子电离或激发。

第四节 常用辐射量及其单位

国际辐射单位与测量委员会 (ICRU) 成立于1925年,先后发表过若干报告书,以使辐射量及其单位日臻完善。1974年ICRU曾提出建议,要在若干年后取消辐射量的专用单位,代之以国际制单位 (SI)。目前,我国已接受这一建议,开始采用国际制单位。

常用的辐射量有放射性活度、照射量、吸收剂量和剂量当量等。其中放射性活度已在第二节中做了介绍,现仅就后三者简述如下。

一、照 射 量

照射量 (exposure) 是直接度量 X、 γ 射线对空气电离能力的量, 可间接反映 X、 γ 辐射场的强弱; 是用来度量辐射场的一种物理量。其定义是: X 或 γ 射线在单位质量 dm 的空气中, 与原子相互作用释放出来的次级电子完全被阻止时, 所产生的同一符号离子的总电荷 dQ , 与空气质量 dm 之比。即

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

照射量的 SI 单位为库伦 $\cdot$ 千克⁻¹ ($C \cdot Kg^{-1}$), 旧有专用单位为伦琴 (R), 伦琴的派生单位有毫伦琴 (mR, $1 mR = 0.001 R$), 微伦琴 (μR , $1 \mu R = 0.001 mR$)。两者换算关系如下:

$$1 R = 2.58 \times 10^{-4} C \cdot Kg^{-1}$$

$$1 C \cdot Kg^{-1} = 3.877 \times 10^3 R$$

照射量仅适用于能量在 $10 keV \sim 3 MeV$ 范围内的 X 和 γ 射线。

单位时间内的照射量称为照射量率 (exposure rate) 用 $\dot{X}$ 表示。

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt}$$

照射量率的 SI 单位为库伦 $\cdot$ 千克⁻¹ $\cdot$ 秒⁻¹ ($C \cdot Kg^{-1} \cdot s^{-1}$)

由上可知, 照射量是指 X 或 γ 射线给某一空气体积内次级电子用于电离的能量, 而不计这些电子是否把这部分能量都消耗于这一空气体积之内, 更不包括在指定的空气体积之外产生的次级电子所消耗的能量。

二、吸 收 剂 量

每单位质量被照射物质吸收任何电离辐射的平均能量称吸收剂量 (absorbed dose)。用 D 表示, 即

$$D = dE/dm$$

dm 为被照射物质的质量, dE 为其吸收的辐射能。吸收剂量的 SI 单位为戈瑞 (Gy), 1 戈瑞 (Gy) 等于 1 千克被照射物质吸收 1 焦耳 (J) 的辐射能量。即

$$1 Gy = 1 J \cdot Kg^{-1}$$

旧有专用单位为拉德 (rad), 其派生单位有毫拉德 (mrad, $1 mrad = 0.001 rad$)、微拉德 (μrad , $1 \mu rad = 0.001 mrad$) 等。两者换算关系如下:

$$1 Gy = 100 rad$$

$$1 rad = 0.01 Gy$$

单位时间内的吸收剂量为吸收剂量率, 其单位为戈瑞 $\cdot$ 秒⁻¹ ($Gy \cdot s^{-1}$)。

由以上看出, 吸收剂量与照射量不同, 吸收剂量是指任何射线并适用于任何物质, 衡量的指标是指被照射物质所吸收的辐射能量。而照射量只适用于 X 及 γ 射线, 被研究的对象是空气, 衡量的指标是在空气体积内所形成的次级电子所产生的离子总电荷量, 即 X 或 γ 射线通过该体积的空气时所放出的能量。