

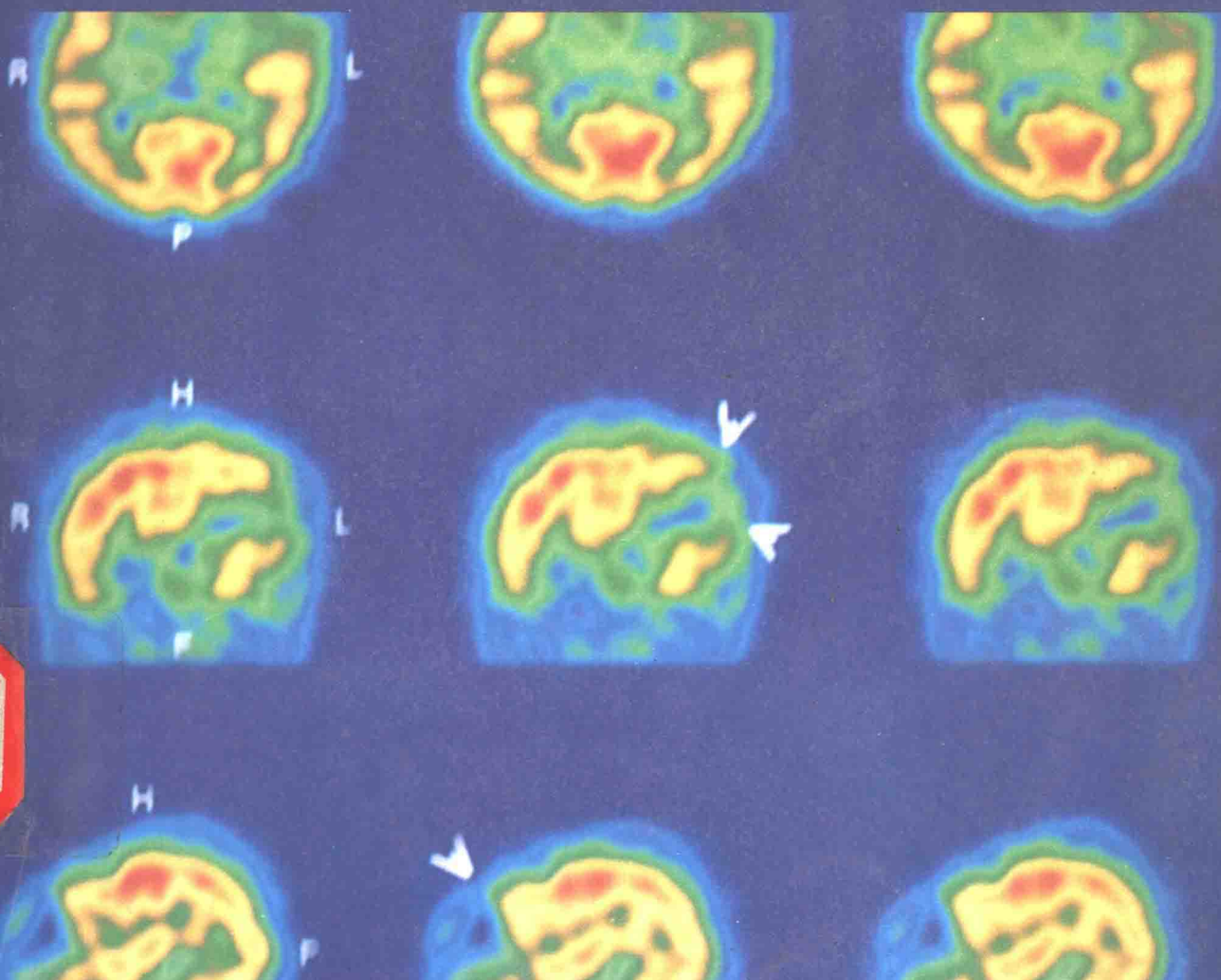
高等医药院校教材

供医学影像学专业用

影像核医学

第二版

裴著果 主编



人民卫生出版社

高等医药院校教材

供医学影像学专业用

影像核医学

第二版

裴著果 主编

张永学 副主编

主要编者（以姓氏笔画为序）

王 铁	首都医科大学	张永学	同济医科大学
叶维新	同济医科大学	徐竞英	协和医科大学
史蓉芳	中国医学科学院阜外医院	黄 钢	上海第二医科大学
朱承谟	上海第二医科大学	蒋长英	上海医科大学
匡安仁	华西医科大学	管昌田	华西医科大学
陈 方	协和医科大学	裴著果	中国医科大学
陈盛祖	中国医学科学院肿瘤医院	蔡锡麟	江西医学院
孟玉葆	河南医科大学		

人 民 卫 生 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

影像核医学 / 裴著果主编. - 2 版. - 北京: 人民卫生出版社, 1999

ISBN 7-117-03188-3

I. 影… II. 裴… III. 影像-原子医学-高等学校: 医学院校-教材 IV. R81

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 39570 号

影 像 核 医 学

第 二 版

裴 著 果 主 编

人民卫生出版社出版发行

(100078 北京市丰台区方庄芳群园 3 区 3 号楼)

三河市宏达印刷厂印刷

新 华 书 店 经 销

787 × 1092 16 开本 24.5 印张 571 千字

1993 年 11 月第 1 版 1999 年 3 月第 2 版第 2 次印刷

印数: 3 101—7 170

ISBN 7-117-03188-3/R·3189 定价: 27.00 元

(凡属质量问题请与本社发行部联系退换)

编写说明

为满足我国高等医药院校医学影像学专业教学需要，1990 年人民卫生出版社组织有关院校编写了第一套医学影像学专业教材（共 6 种），在 20 多所医学院校教学中使用。在当时，这套教材对发展我国医学影像学专业教育事业起到了重要作用。近年来，随着医学影像诊疗手段的飞速发展，教材中有些内容已较为陈旧，无法满足目前的教学需要，经卫生部教材办公室与开设医学影像学专业的主要院校共同研究，决定对第一版教材进行修订，确定了修订教材的品种，并在修订过程中着重强调了教材修订应紧紧围绕培养目标，突出各学科的基本理论、基本知识、基本技能，同时又反映学科的新进展。目前，卫生部教材办公室正在进行医学影像学专业规划教材编写的组织工作，本次修订的教材共三种，作为规划教材正式出版前的过渡品种，供医学影像学及相关专业选用。

教材目录如下：

- | | |
|----------------|--------|
| 1. 影像核医学（第二版） | 裴著果 主编 |
| 2. 超声诊断学（第二版） | 王纯正 主编 |
| 3. X 线摄影学（第二版） | 袁聿德 主编 |

以上教材均由人民卫生出版社出版。

卫生部教材办公室

前 言

本书是根据国家教委 1988 年关于批准建立医学影像专业的课程设置意见和 1998 年卫生部全国高等医药院校临床医学专业教材评审委员会推荐教材的意见和要求; 依据临床医学影像专业五年制本科生的培养目标, 总结近 10 年来医学影像专业教材建设的成果和经验的基础上编写而成。

全书内容分上中下三篇, 共 19 章。上篇基本技术篇(第 1~7 章)为本书的总论, 共七章, 着重从核医学影像基本技术和理论的角度, 全面概要地介绍核物理基础、影像核医学仪器、放射性药物、放射性核素的示踪技术、体外放射分析技术、放射性核素的显像原理和方法及核医学检查的效能评价; 中篇(第 8~18 章)为影像诊断篇, 属于临床核医学影像诊断的各论, 按临床医学系统影像分类的内容, 详实而深入地介绍核医学影像诊断的理论和技術方法及临床上的应用与评价, 包括神经、内分泌、循环、骨骼、肿瘤与炎症、消化、呼吸、泌尿、血液、淋巴系统及其它器官的显像诊断和小儿核医学等的应用; 下篇核素治疗篇(第 19 章)本着总结当代核医学治疗学的成果和经验, 拓宽核素治疗的应用范围, 较详尽地阐明了有关疾病的核素治疗学的理论和实践及特点。为便于学生自学和查阅, 书后编排放射性核素主要物理常数等附录 3 节。

影像核医学(imaging of nuclear medicine)是以核科学技术和手段, 研究医学影像学的应用及其理论的学科, 是医学影像学 and 核科学的重要组成部分, 是现代医学的重要内容。近 20 年来医学影像学伴随着电子技术和计算机技术的迅速发展而发展, 全面地形成了以四大影像手段(X-CT、MRI、B 超、核医学)为支柱的新的综合性临床学科。四种技术的完善和配合, 为全面认识人体的生理与病理过程, 揭示器官解剖形态和功能代谢过程提供了科学的依据。尤其是影像核医学在反映器官或组织代谢方面, 更有其独特的优势和活力, 为当代医学研究提供了崭新的手段和途径, 对临床医学的发展作出了重要贡献。早在 1984 年 Thomas 等曾编著出版了影像核医学专著, 命名为 Nuclear Imaging(第二版), 在国外首次全面系统地叙述了放射性核素显像在临床各系统疾病诊断方面的应用, 初步形成了影像核医学的学科体系。国内近年来相继有各种版本的临床核医学教材、手册及参考书面世, 各有建树和所长, 基本上形成了核素显像学的学科体系。由此可见, 影像核医学是适应近代医学影像学的飞速发展应运而生的新兴学科。

为了适应医学影像专业教学建设的需要, 1990 年中国医科大学曾配套完成了影像专业系列教材, 曾于 1993 年编著出版了医学影像专业协编教材《影像核医学》(裴著果、蔡锡麟主编, 人民卫生出版社, 1993), 在国内 20 多所医学院校(影像专业本科和其它医学专业)历经 5 年来教学实践的推广应用, 博得广大师生和专家的认可与好评。自 1997 年以来, 我们通过全国医学影像教学研讨会和广泛听取各地院校使用该教材的反馈意见和要求, 特别是为了加快医学影像专业的学科建设, 面向 21 世纪, 实现高起点、高标准、高素质的医学影像专业人材培养目标, 本着探索深化教学改革和教材建设的新思路, 在原协编《影像核医学》教材的基础上全面制定编写计划, 并决定重新编写

这本《影像核医学》教材，以适应当代医学影像发展与改革的需要。

为了着力反映当代核医学发展和水平，吸收和总结国内外新进展、新成果和新经验，全面提高本书的编写水平，发挥集体的智慧和力量，1997年6月中国医科大学在人民卫生出版社（北京）召开编写工作会议，邀请了国内14所院校20余名有丰富教学经验和专长的知名核医学专家教授与会，共同对编写内容和计划进行了认真讨论。中科院院士王世真教授和周前、刘秀杰、屈婉莹教授应邀到会，对本书编写给予热情的关怀、鼓励和指导。

在编写过程中，参编专家严谨求实、辛勤工作、分别执笔、大力协同，完成初稿后在江西医学院召开集体审稿会议。经编委会集体初审后，再经编者修改，分别完成修改稿。其后由主编统筹调整、全面修改最后完成审定稿。在审定稿方面，承蒙华西医科大学谭天秩教授、上海医科大学蒋长英教授、上海第二医科大学朱承谟教授等给予热情支持并提出许多宝贵意见和建议。

本书编者的共识和期望的目标是力求在以下几方面作出探索和有所突破：①遵照国家教委对教材的“五性”要求，突出医学影像专业的特点和内容，以着力反映近年国内外新水平、新成果为主线，全面提高教材的编写水平；②务实求新，探索改革，不断拓宽核医学的专业内容，充实SPET应用技术和手段，适当引进PET的优势项目，加强形态影像与功能的对比分析及断层解剖的相关知识，推进学科间的相互渗透与互融；③充分兼顾本学科与其它影像技术的横向对比与内在联系，重视不同技术影像手段与比较影像学的教学研究，增强学生综合影像分析能力的培养，以适应影像专业教学改革和发展的需要；④强化核素治疗学的临床应用，力求诊断与治疗并重，培养知识结构全面和高素质的影像专业高级人才。综上所述，尽管本书认真总结10年来影像专业教学改革与教材建设的经验与成果，在教材内容的思想性、科学性、启发性、先进性和适用性方面作出了努力和尝试，但在许多方面我们仍深感不足，有待今后继续改进和提高。

在本书编写过程中，中国医科大学领导、教务处、医大二院（系）领导给予大力支持和鼓励。核医学科李志杰、李剑明、王宁和计算机中心薛惠等同志不辞辛苦完成了许多具体、细致的编务工作和打字任务。在此我们谨向所有支持、关怀、指导本书编写与出版工作的领导和同志们致以最深切的谢意。

编写这本《影像核医学》教材，要求高、时间紧、任务重、工作难度较大。由于主编和编者水平所限，加之时间仓促，本书不足乃至错误之处在所难免，诚望各院校在使用中提出宝贵意见，以便修订时改进。

裴 著 果

1998年5月

内 容 简 介

本书是供高等医药院校医学影像专业本科生教学使用的教科书,由国内 14 所高等医药院校 20 余名有丰富教学经验与专长的知名核医学专家教授共同编写而成。全书分基本技术、影像诊断和核素治疗三篇。上篇共七章(第 1~7 章),为本书的总论,着重从核医学影像基本技术与理论角度,全面概要地介绍核物理基础、影像核医学仪器、放射性药物、放射性核素的示踪技术、体外放射分析、放射性核素显像原理和方法及核医学检查的效能评价;中篇(第 8~18 章)为影像诊断篇,为影像诊断技术的各论,按临床医学系统医学分类的内容,详实地介绍核医学诊断的理论与技术方法在临床上的应用与评价,包括神经、内分泌、循环、骨骼、肿瘤与炎症、消化、呼吸、泌尿、血液、淋巴及其它器官的显像诊断和小儿核医学的应用;下篇核素治疗篇(第 9 章)集中阐述核素治疗学的理论与实践,评述了核素在各有关疾病治疗中的特点与价值。全书共 65 万字,附插图与照片 160 余幅,可谓图文并茂。书中着力反映了国内外以影像为手段的近代核医学的最新进展和我国的现状及水平,突出影像专业的教学内容、核医学的特色与优势,兼顾核影像技术与其它影像学手段(X-CT、超声显像、MRI)之间的横向与内在联系,内容上具有简明性、系统性、实用性和可读性。

本书以高等医药院校医学影像专业本科生为主要读者对象,也适用于核医学研究生、核医学工作者及临床各科医技人员参考。

目 录

基本技术篇

第一章 核物理基础	(1)
第一节 原子核及核外轨道电子.....	(1)
第二节 核衰变类型及其规律.....	(1)
第三节 核射线与物质的相互作用.....	(7)
第四节 电离辐射量及其单位.....	(9)
第二章 影像核医学仪器	(12)
第一节 概况	(12)
第二节 γ 照相机	(12)
第三节 发射型计算机断层仪	(16)
第四节 核素显像仪器的正确使用和质量控制	(21)
第三章 放射性药物	(23)
第一节 引言	(23)
第二节 基本概念	(23)
第三节 医用放射性核素的来源	(24)
第四节 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器.....	(26)
第五节 放射性药物标记方法	(27)
第六节 放射性药物质量控制	(29)
第七节 临床核医学常用的放射性诊断药物	(31)
第八节 常用放射性治疗药物	(38)
第九节 放射性药房	(40)
第十节 放射性药物的管理	(42)
第四章 放射性核素示踪技术	(44)
第一节 概述	(44)
第二节 放射性核素示踪技术的基本环节	(45)
第三节 放射性核素示踪技术的主要类型及方法	(47)
第四节 细胞动力学分析	(54)
第五节 稳定性核素在示踪技术中的应用	(55)
第六节 放射性核素示踪动力学	(55)
第五章 体外放射分析技术	(61)
第一节 不同类型体外放射分析系统的共性基础	(61)
第二节 不同类型体外放射分析系统各自特点及其技术方法	(62)
第三节 临床应用	(72)

第六章 放射性核素显像原理与方法	(80)
第一节 放射性核素显像的基本原理	(80)
第二节 放射性核素显像的基本方法	(82)
第三节 放射性核素显像的类型	(84)
第四节 放射性核素显像评价和分析	(85)
第七章 核医学检查的效能评价	(87)
第一节 判断矩阵的意义和效能指标	(87)
第二节 核医学检查判断阈的选择	(89)
第三节 核医学检查的结果分析	(91)
第四节 应用示例	(92)

影像诊断篇

第八章 神经系统显像	(94)
第一节 脑的解剖与生理概述	(94)
第二节 脑血流灌注显像	(102)
第三节 脑肿瘤显像	(114)
第四节 核素脑血管动态与静态显像	(118)
第五节 脑脊液间隙显像	(122)
第六节 PET 脑显像	(126)
第七节 脑受体显像	(132)
第九章 内分泌系统显像	(136)
第一节 解剖与生理概述	(136)
第二节 甲状腺显像	(137)
第三节 甲状腺功能试验	(146)
第四节 甲状旁腺显像	(151)
第五节 肾上腺显像	(152)
第十章 循环系统显像	(162)
第一节 心脏解剖和生理	(162)
第二节 放射性核素心血管显像	(163)
第三节 门电路心血池(平面)显像	(168)
第四节 门电路心血池断层显像	(178)
第五节 心肌灌注显像	(178)
第六节 心肌梗死灶显像	(197)
第七节 PET 心肌显像	(201)
第八节 放射性核素动脉显像	(207)
第九节 放射性核素静脉显像	(209)
第十一章 骨、关节系统显像	(213)
第一节 解剖和生理概述	(213)
第二节 静态骨显像	(213)

第三节	动态骨显像·····	(222)
第四节	断层骨显像·····	(224)
第五节	关节显像·····	(226)
第六节	骨矿物质含量测定·····	(229)
第十二章	肿瘤与炎症显像·····	(233)
第一节	肿瘤核医学简介·····	(233)
第二节	各种肿瘤 ²⁰¹ Tl 和 ^{99m} Tc-MIBI 显像 ·····	(234)
第三节	⁶⁷ Ga 肿瘤及炎症显像 ·····	(237)
第四节	^{99m} Tc (V) -DMSA 肿瘤显像 ·····	(240)
第五节	放射性核素标记抗肿瘤药物显像·····	(243)
第六节	肿瘤放射免疫显像·····	(244)
第七节	肿瘤正电子发射断层显像·····	(247)
第八节	受体显像·····	(250)
第九节	基因显像·····	(252)
第十节	炎症显像·····	(252)
第十三章	消化系统显像·····	(255)
第一节	解剖与生理概述·····	(255)
第二节	食管、胃肠道运动功能显像·····	(256)
第三节	肝显像·····	(263)
第四节	胆系显像·····	(270)
第五节	尿素呼气试验·····	(272)
第十四章	呼吸系统显像·····	(277)
第一节	解剖与生理概述·····	(277)
第二节	肺灌注显像·····	(279)
第三节	肺通气显像·····	(286)
第四节	气溶胶吸入显像·····	(289)
第十五章	泌尿系统显像·····	(293)
第一节	解剖与生理概述·····	(293)
第二节	肾动态显像·····	(293)
第三节	肾图·····	(301)
第四节	介入试验·····	(305)
第五节	肾静态显像·····	(307)
第六节	肾小球滤过率 (GFR) 测定·····	(310)
第七节	肾有效血浆流量 (ERPF) 测定 ·····	(310)
第八节	膀胱尿逆流显像·····	(311)
第十六章	血液和淋巴系统显像·····	(313)
第一节	解剖与生理概述·····	(313)
第二节	骨髓显像·····	(314)
第三节	脾显像·····	(318)

第四节	淋巴显像·····	(322)
第十七章	唾液腺、泪腺、睾丸显像·····	(327)
第一节	唾液腺显像·····	(327)
第二节	泪腺显像·····	(332)
第三节	睾丸显像·····	(333)
第十八章	小儿核医学·····	(337)
第一节	儿科检查中的基本问题·····	(337)
第二节	临床应用·····	(339)

核素治疗篇

第十九章	核医学治疗·····	(346)
第一节	^{131}I 治疗 Graves 病·····	(346)
第二节	^{131}I 治疗自主功能性甲状腺结节·····	(358)
第三节	^{131}I 治疗甲状腺癌·····	(360)
第四节	^{131}I -MIBG 治疗肾上腺素能肿瘤·····	(366)
第五节	^{32}P 治疗血液疾病·····	(370)
第六节	放射性胶体治疗·····	(374)
第七节	其它核素治疗·····	(376)
附录	·····	(382)
一、	国际单位制词头·····	(382)
二、	常用单位换算·····	(382)
三、	常用放射性核素主要物理常数·····	(383)

基本技术篇

第一章 核物理基础

第一节 原子核及核外轨道电子

自然界的所有物质都是由元素 (element) 组成的。原子是元素的最基本单位, 各种元素的原子组成虽然不同, 但原子的结构都是由位于原子中心的原子核 (atomic nucleus) 及按一定轨道围绕原子核运行的核外轨道电子 (orbit electron) 所组成。

原子核是由质子 (proton) 和中子 (neutron) 组成, 两者统称为核子 (nucleon)。中子不带电, 质子带正电, 其电量与电子电量相等。质子数和中子数之和即为原子核的质量数 (mass number), 用 A 来表示。原子序数 (atomic number) 用 Z 来表示, 相当于原子核的电荷数即质子数。国际上通常以符号 ${}_Z^AX$ 表示原子的结构。其中 X 表示某元素的化学符号, Z 为该元素的原子序数, A 为该元素原子核的质量数, 通常 Z 可以省略不写, 如 ${}^{14}\text{N}$ 、 ${}^{16}\text{O}$ 、 ${}^{131}\text{I}$ 、 ${}^{198}\text{Au}$ 等。

核外电子按一定轨道高速绕核运行。通常每个轨道上只有一个电子, 由于其运行受到多个参数的影响, 故参数相近的电子近乎在同样的空间运行, 这个容纳多个轨道的空间范围称为电子层。距原子核由近至远依次可分为 K 、 L 、 M 、 N 、 O ……层。各层轨道电子均有特定的能量。轨道电子运行时如既不辐射也不吸收能量, 称为定态 (stationary state), 能量最低的定态称为基态 (ground state), 能量较高的定态称为激发态 (excited state)。

凡具有特定的质子数、中子数及核能态的一类原子称为核素 (nuclide)。同一种元素的原子, 可以是不同核素。凡具有相同的原子序数, 但质量数不同的核素称为同位素 (isotope)。例如: ${}^1\text{H}$ 、 ${}^2\text{H}$ 、 ${}^3\text{H}$ 在元素周期表中处于同一位置, 均属氢元素, 因质量数不同, 应为三种核素。但它们的原子序数相同, 可互称同位素。凡具有相同的质量数和原子序数, 但核能态不同的一类核素称为同质异能素 (isomer)。例如: ${}^{99m}_{43}\text{Tc}$ 和 ${}^{99}_{43}\text{Tc}$ 两者可互称同质异能素。通常在元素质量数 A 后面加一个字母 m 表示该核素处于亚稳态或激发态。

第二节 核衰变类型及其规律

核素可分为稳定性核素 (stable nuclide) 和放射性核素 (radionuclide)。稳定性核素能够稳定存在, 不会自发地发生核内结构或能级的变化。放射性核素则不稳定, 能自发地发生核内结构或能级的变化, 同时能自发地放出某种射线而转变为另一种核素。这种由放射性核素自发地放出一种或一种以上的射线并转变为另一种核素的过程称为核衰变 (nuclear decay)。

核衰变的速率、方式及释放的射线种类、能量均取决于原子核内部的特征, 不受周围环境的影响。原子核中质子数与中子数的比例在一定的范围内才是稳定的。一般情况下, 在质子数小于 20 的核素中, 中子数与质子数之比为 1 的是稳定性核素。质子数大于 20 的核素中, 中子数与质子数之比大于 1 的也属稳定性核素。比例过大或过小都会发生

核衰变。核衰变的主要方式有： α 衰变、 β 衰变、核外电子俘获以及 γ 衰变和内转换。

一、核衰变类型

(一) α 衰变 (alpha decay)

核衰变时发射出 α 粒子的衰变称为 α 衰变。这种衰变方式主要发生于原子序数大于82的核素。衰变时母核X失去2个质子和2个中子，故子核Y Z-2、A-4。 α 粒子实质是氦核 ${}^4_2\text{He}$ 。用衰变反应式可表示为：



例如： ${}_{88}^{226}\text{Ra} \rightarrow {}_{86}^{222}\text{Rn} + \alpha + 4.937\text{Mev}$

α 粒子速度较慢，射程也较短，穿透力弱，用一张纸就可阻挡住。但 α 粒子的电离能力很强，故在核医学诊断和治疗中极少使用（图1-1）。

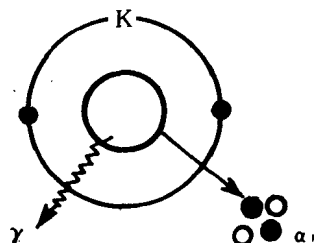
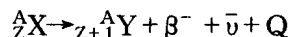


图 1-1 α 衰变模式图

(二) β 衰变 (beta decay)

原子核放射出电子而进行的衰变称为 β 衰变。 β 衰变时放射出的 β 射线分为 β^- 线和 β^+ 线，故 β 衰变又可分为 β^- 衰变和 β^+ 衰变。 β 衰变后的子核的原子序数可增加或减少，但子核的质量数不变。

1. β^- 衰变 核衰变时放射出 β^- 粒子。 β^- 粒子实质上是负电子。这种衰变方式主要发生在中子相对过剩的核素。当过剩的中子转化为质子时，放射出 β^- 粒子及反中微子 $\bar{\nu}$ ，此时，子核Y Z+1，A不变。用衰变方程可表示为：



例如： ${}_{15}^{32}\text{P} \rightarrow {}_{16}^{32}\text{S} + \beta^- + \bar{\nu} + 1.71\text{Mev}$

β^- 粒子的能量分布可从零到最大，形成一个连续能谱。 β^- 粒子穿透能力较 β^+ 粒子强，在空气中的射程可比 α 粒子大。但电离能力较 α 粒子弱，能被铝箔和机体组织吸收（图1-2a）。

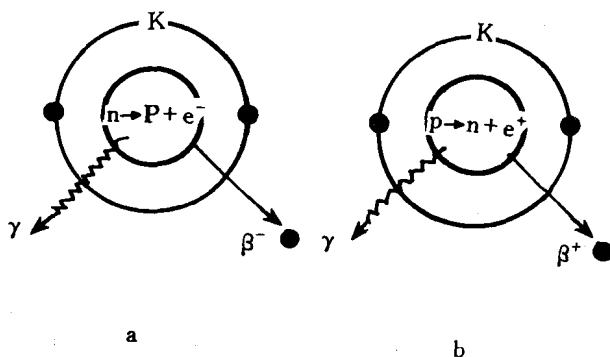
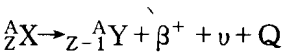


图 1-2 β 衰变模式图

a. β^- 衰变 b. β^+ 衰变

2. β^+ 衰变 核衰变时放射出 β^+ 粒子， β^+ 粒子实质上是带正电荷的电子。这种衰变方式主要发生在中子相对不足的核素。当质子转化为中子时，同时放射出 β^+ 粒子及一个中微子 ν ，此时，子核Y Z-1，A不变。用衰变方程可表示为：

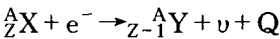


例如： ${}^{18}_9\text{F} \rightarrow {}^{18}_8\text{O} + \beta^+ + \nu + 0.66\text{MeV}$

β^+ 粒子的能量分布也是一个连续能谱。天然的核素不发生 β^+ 衰变，只有人工放射性核素衰变时可发生 β^+ 衰变（图 1-2b）。

(三) 电子俘获 (Electron Capture; EC)

核衰变时从原子核外最内层的电子轨道上俘获一个轨道电子，使核内一个质子转化为中子，同时放射出一个中微子 ν 。故子核 Y $Z-1$ 、 A 不变。用衰变方程可表示为：



例如： ${}^{55}_{26}\text{Fe} + e^- \rightarrow {}^{55}_{25}\text{Mn} + \nu + 0.231\text{MeV}$

由于内层的轨道电子被俘获，则核外内层轨道缺少了电子，外层的轨道电子跃迁到内层，跃迁的同时、多余的能量以 X 线形式射出，称为标识 X 线；或者将多余的能量传给外层的轨道电子，使其脱离轨道成为自由电子放出，称此电子为俄歇电子 (auger electron)。(图 1-3)

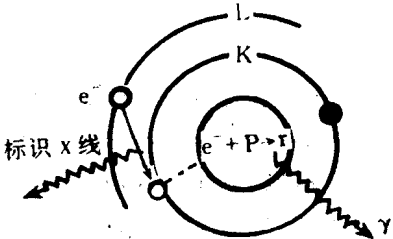
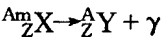


图 1-3 电子俘获模式图

(四) γ 衰变 (γ decay) 及内转换 (internal conversion)

1. γ 衰变 又称 γ 跃迁 (γ transition)，核衰变时放射出 γ 射线。这是核素由激发态或高能态向基态或低能态跃迁时，多余的能量以 γ 光子的形式射出。故子核的 Z 、 A 均不变，仅仅该核素的能量状态发生改变。用衰变方程可表示为：



例如： ${}^{99m}_{43}\text{Tc} \rightarrow {}^{99}_{43}\text{Tc} + \gamma$

γ 射线是一种电离辐射或称光子流，具有一定的质量和能量。虽不带电，但其具有穿透力强、电离能力弱的特点。

2. 内转换 核素由激发态或高能状态向基态或低能态跃迁时，其多余能量传给核外轨道电子，使其获得足够能量后脱离轨道成为自由电子，这一过程称为内转换。发射出的自由电子称内转换电子(图 1-4)。

上述核衰变方式中，单个原子以其中一种方式进行核衰变，但对有些核素以及众多原子来说，可能以两种或两种以上的核衰变方式进行衰变。但各种方式衰变均有一定的概率。

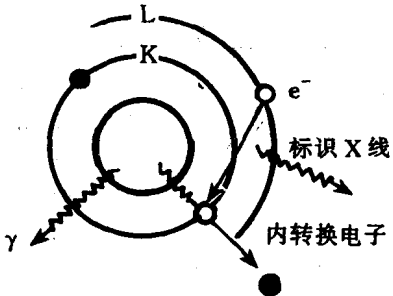


图 1-4 γ 衰变及内转换模式图

核衰变产生的射线又称为核射线。 α 、 β 、 γ 三种核射线的性质如表 1-1。

表 1-1 α 、 β 、 γ 三种核射线的性质

性 质	α 射线	β 射线	γ 射线
本质	带电粒子流	电子流	光子流
能谱	单能	连续能谱	单能
穿透力	弱	较强	最强

续表

性 质	α 射线	β 射线	γ 射线
射程 (空气中)	3~4cm	10~20m	无限大 (理论上)
电离能力 (空气中)	10000~70000 对/cm	60~7000 对/cm	很小
内照射危害	最大	大	最小
外照射危害	几乎无	大	最大

二、核衰变规律

(一) 衰变常数与衰变公式

任何放射性核素的原子在核衰变时,并非同时瞬间完成的,而是按一定的几率进行衰变,各种放射性核素有其各自的衰变常数。放射性核素的原子在单位时间内发生核衰变的比率,称为衰变常数(decay constant)。衰变常数以 λ 表示,即同一种放射性核素在单位时间内,母核的衰变核数占当时的总核数的百分比,反映了该放射性核素衰变的速率。

实验证明:

$$\frac{dN}{dt} \propto N \text{ 或 } \frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N$$

式中 λ 衰变常数;

N 总核数;

dt 单位时间; dN 单位时间内衰变的核数

将上式积分, 得 $N_t = N_0 e^{-\lambda t}$

上式中 N_0 是放射性核素初始总的原子核数, N_t 是经过时间 t 后剩余的原子核数。衰变公式表明: 随时间增长, 放射性核素的原子核数呈指数规律递减。

(二) 放射性活度 (radioactivity) 及比放射性活度 (specific activity)

单位时间内原子核衰变的数目称为放射性活度, 简称活度。可表示为:

$$A = \frac{dN}{dt} \text{ 式中 } A \text{ 放射性活度}$$

$$\frac{dN}{dt} \text{ 核衰变数}$$

$$dt \text{ 单位时间}$$

上式表明: 放射性活度的含义是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。放射性活度的单位是秒⁻¹ (s⁻¹), 专用名称为贝可 [勒尔] (Becquerel), 简称贝可 (Bq)。

1Bq 表示: 在 1 秒内发生一次核衰变, 即 1Bq = 1s⁻¹。放射性活度的旧制单位是居里 (Ci)。一居里表示在 1 秒内发生 3.7×10^{10} 次核衰变。1 居里 (Ci) = 10^3 毫居里 (mCi) = 10^6 微居里 (μ Ci)。居里与贝可的换算关系是:

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

$$1\text{mCi} = 3.7 \times 10^7 \text{Bq} = 37\text{MBq}$$

$$1\mu\text{Ci} = 3.7 \times 10^4 \text{Bq} = 37\text{kBq}$$

单位质量或容积的放射性制剂中的放射性活度称为比放射性活度, 简称比活度。

如：Bq/mg、Bq/ml、Bq/mol 等。

通常在核医学的临床诊断、治疗工作中，所使用的放射性制剂的活度，一般均在 10^8Bq 或以上，为方便使用习惯上以 10^3Bq (kBq)、 10^6Bq (MBq)、 10^9Bq (GBq)、 10^{12}Bq (TBq) 作为度量单位。

(三) 半衰期 (halflife)

半衰期是实际工作中描述放射性核素衰变速率的指标。常用的半衰期指标有：物理半衰期 (physical halflife, $T_{1/2}$)，生物半衰期 (biological halflife, T_b)，有效半衰期 (effective halflife, T_e)。

1. 物理半衰期 放射性核素由于自身的衰变，其活度减小到原有值一半所需的时间，称为物理半衰期，简称半衰期 (图 1-5、1-6)。半衰期与衰变常数的关系为：

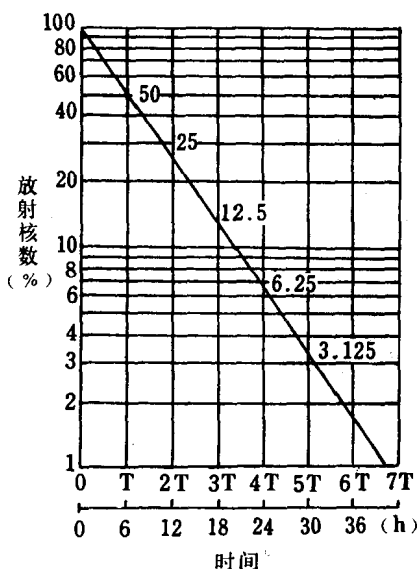


图 1-5 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 衰变曲线
(普通坐标)

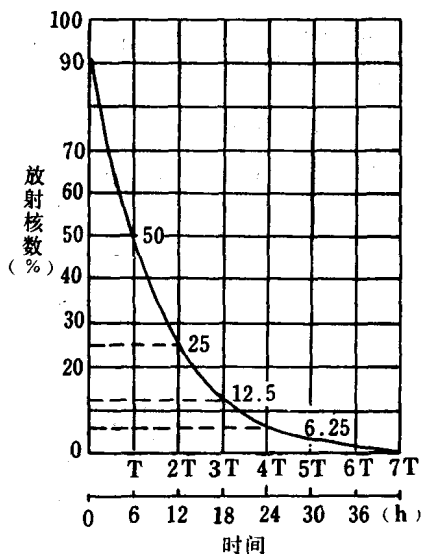


图 1-6 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 衰变曲线
(半对数坐标)

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

由于放射性活度 (A) 与原子核数和衰变常数成正比关系，故当 $t=0$ 时，初始活度为 A_0 时，则衰变公式可为：

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

引入 $\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}}$ ，则上式可为：

$$A = A_0 \cdot e^{-\frac{0.693t}{T_{1/2}}}$$

利用上述公式及“通用放射性核素衰变计算表”对已知初始浓度的放射性核素，可简便快速地计算出使用时的放射性活度。

例如：1997 年 12 月 1 日出厂的放射性 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 18.5GBq，1997 年 12 月 4 日使用时，求 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 此时的活度。

(1) 利用上述公式，先求出 $t/T_{1/2}$ ，值为 $3/6.02 = 0.498$ 。

(2) 查“通用放射性核素衰变计算表”得到 0.498 的 $e^{-\lambda}$ 值为 0.707。

(3) 则 12 月 4 日时 ^{99m}Tc 的活度 $A = 18.5\text{GBq} \times 0.707 = 13.08\text{GBq}$ 。

2. 生物半衰期与有效半衰期 当某生物体内的放射性核素由于生物代谢等作用, 使该放射性核素在此系统中的量减小一半所需的时间称为生物半衰期。生物体内的放射性核素由于放射性衰变及生物代谢的共同作用, 该放射性核素的活度减小到一半所需的时间称为有效半衰期。

物理半衰期 ($T_{1/2}$)、生物半衰期 (T_b) 及有效半衰期 (T_e) 三者的关系是:

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

$$T_e^{-1} = T_{1/2}^{-1} + T_b^{-1}$$

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

(四) 衰变图、放射系列及放射平衡

1. 衰变图 放射性核素的衰变过程方式, 用图解表示时可称为衰变图。图中给出母体核素名称、子体核素名称、半衰期、激发能量以及两种以上衰变方式时其不同衰变类型的几率等。原子序数增加的衰变 (β^-) 箭头向右, 原子序数减少的衰变 (α 、 β^+ 、EC) 箭头向左, 仅能量水平不同的 γ 射线箭头向下 (图 1-7)。

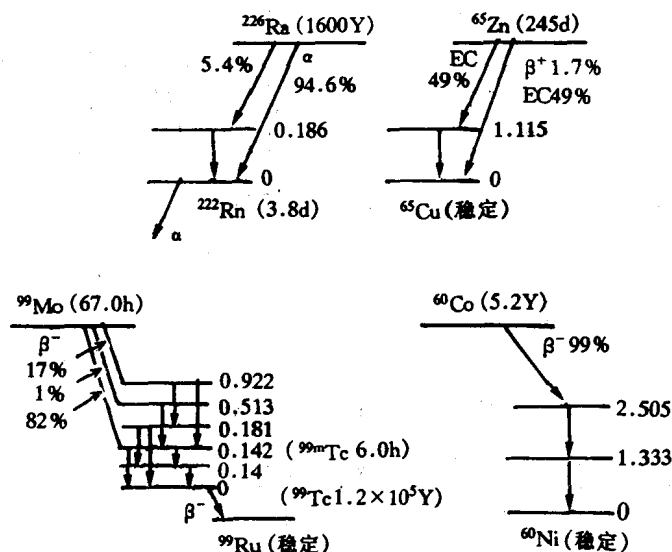


图 1-7 4 种核素衰变图

2. 放射系列及放射平衡 α 衰变、 β 衰变后生成的核素仍具有放射性, 后者又继续衰变。某一核素衰变后, 其子核按自身规律继续衰变, 这一连续过程称为放射系列。放射系列有 4 种, 其中自然界存在 3 种, 分别称为铀系、钍系、釷系, 以 ^{238}U 、 ^{235}U 、 ^{232}Th 为母核, ^{226}Ra 在铀系中。镎 (Np) 系是人工生产的。另外, 如 $^{99}\text{Mo} \xrightarrow{67\text{h}} ^{99m}\text{Tc} \xrightarrow{6\text{h}} ^{99}\text{Tc} \xrightarrow{2 \times 10^5\text{y}} ^{99}\text{Ru}$ 分为数阶段衰变的系列也不少。各个系列最终都形成稳定核素。

母核和子核都具有放射性, 当母核的 λ 小于子核的 λ 时, 即母核的半衰期比子核的半衰期长时, 经过一定时间后, 两种核素的原子数之比可达一定的平衡, 称为放射平衡