



全国高等学校教材 | 供医学影像学专业用

影像核医学

主 编 黄 钢
副主编 左书耀

人民卫生出版社
People's Medical Publishing House

面向 21 世纪课程教材

影像核医学

主 审 林祥通 朱承谟

主 编 黄 钢

副主编 左书耀

编 者 (以姓氏笔画为序)

蒋宁一 (中山大学医学院)

李亚明 (中国医科大学)

黄 钢 (上海交通大学医学院)

李 龙 (江苏大学医学院)

崔亚利 (哈尔滨医科大学)

吴锦昌 (苏州大学医学院)

高 硕 (天津医科大学)

关晏星 (江西医学院)

金龙云 (牡丹江医学院)

左书耀 (青岛大学医学院)

李林法 (浙江大学医学院)

王全师 (第一军医大学)

人 民 卫 生 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

影像核医学/黄钢主编. —北京:
人民卫生出版社, 2005.7

ISBN 7-117-06875-2

I. 影... II. 黄... III. 原子医学 IV. R81

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 050696 号

影 像 核 医 学

主 编: 黄 钢

出版发行: 人民卫生出版社 (中继线 67616688)

地 址: (100078) 北京市丰台区方庄芳群园 3 区 3 号楼

网 址: <http://www.pmph.com>

E - mail: pmph@pmph.com

邮购电话: 010-67605754

印 刷: 中国农业出版社印刷厂

经 销: 新华书店

开 本: 850×1168 1/16 印张: 17.25

字 数: 425 千字

版 次: 2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

标准书号: ISBN 7-117-06875-2/R·6876

定 价: 53.00 元

著作权所有, 请勿擅自用本书制作各类出版物, 违者必究
(凡属质量问题请与本社发行部联系退换)

全国高等学校医学影像学专业规划教材

第二轮修订说明

为适应我国高等医药院校医学影像学专业教育的改革和发展,满足教学需要,经全国高等医药教材建设研究会和卫生部教材办公室审议,决定从 2004 年开始进行医学影像学专业规划教材第二轮的修订。此次修订以《中国医学教育改革和发展纲要》为指导思想,强调三基(基础理论、基本知识和基本技能)、五性(思想性、科学性、先进性、启发性和适用性)原则,遵循医学影像学专业的培养目标,即培养具有基础医学、临床医学和现代医学影像学的基本理论知识及能力,能在医疗卫生单位从事医学影像诊断、介入放射学和医学成像技术等方面工作的医学高级专门人才的要求。本套教材是教育部《面向 21 世纪课程教材》。

此次修订增加《影像核医学》、《肿瘤放射治疗学》两种。本套教材共 9 种。

第二轮教材目录

- | | |
|---------------------|-----------------|
| 1. 人体断面解剖学(第 2 版) | 主 编 姜树学 |
| | 副主编 段菊如 |
| 2. 医学影像物理学(第 2 版) | 主 编 张泽宝 |
| | 副主编 吉 强 |
| 3. 医学电子学基础(第 2 版) | 主 编 陈仲本 |
| | 副主编 况明星 |
| 4. 医学影像设备学(第 2 版) | 主 编 徐 跃 梁碧玲 |
| 5. 医学影像检查技术学(第 2 版) | 主 编 张云亭 袁聿德 |
| 6. 医学影像诊断学(第 2 版) | 主 编 白人驹 |
| | 副主编 马大庆 张雪林 李建丁 |
| 7. 介入放射学(第 2 版) | 主 编 郭启勇 |
| | 副主编 申宝忠 |
| 8. 影像核医学 | 主 编 黄 钢 |
| | 副主编 左书耀 |
| 9. 肿瘤放射治疗学 | 主 编 王瑞芝 |
| | 副主编 樊锐太 |

以上教材均由人民卫生出版社出版

全国高等医药教材建设研究会
卫生部教材办公室

前言

本书是为了适应 21 世纪影像医学专业教学建设的需要, 根据卫生部全国高等医学院校规划教材编写指导思想和基本要求, 以高等医学院校影像专业本科五年制学生作为培养目标, 在坚持“三基”(理论、知识、技能); “五性”(思想性、科学性、先进性、启发性和适用性); “三特定”(对象、要求和限制) 原则的基础上, 力求淡化学科界限, 强化大影像概念, 做到系统、完整、先进、科学的统一, 以达到满足 21 世纪医学影像教学及临床需要。

全书内容共分为 13 章, 主要内容包括影像核医学基础和临床应用两部分, 并强调在临床应用中体现循证概念。前 3 章主要介绍了与影像核医学相关的物理概念、仪器设备、示踪剂和辐射防护等。通过简要介绍, 使学生初步了解和领会影像核医学所涉及的成像原理及基本技术, 对影像核医学所研究的内容具有一定认识; 第 4 章主要通过与其它影像技术比较及介绍影像核医学的一些极具潜力或已经开展的一些研究成果, 使学生了解和熟悉未来影像核医学在分子医学时代的应用发展前景与价值; 最后 9 章主要是影像核医学临床部分, 包括神经、内分泌、心脏、肿瘤等各个脏器显像, 重点强调基本原理和图像分析, 通过对各种影像表现进行不同描绘, 使用各种典型图像, 使学生对影像核医学在疾病诊断中的作用及适应范围能够充分掌握和理解。本书编者在编写中试图在以下几方面作出探索: ①按照卫生部统编教材编写原则与要求, 突出影像医学专业特点, 并力求强化分子影像和大影像概念。②编写内容力求图文并茂, 图表直观, 图表约占全书内容的 35%, 体现影像核医学的特点, 提高可读性。③编写时在保持整个影像医学整体风格的延续性与关联性中, 适时体现核医学在功能、代谢、受体与基因显像中的独特优势及其与其他影像技术的互补互融, 力求推动学科间相互认识并合作提升, 培养学生综合掌握影像医学知识、客观理解各种影像的优势, 根据循证理论灵活运用, 提升影像医学各项技术在临床中的价值。④在突出分子影像等先进性的同时, 强调教科书的完整性与系统性。对影像核医学的重要发展独立成章, 便于学生重点掌握影像核医学的发展趋势。

由于影像核医学发展历程较短, 发展速度很快, 其核心是生理与生化过程的活体影像显示, 并引入了分子医学及分子生物学的最新研究成果, 全面反映人体的生理及病理过程, 并揭示机体从微观基因结构与功能改变到宏观疾病的发生发

展过程的评价,因此,广泛了解此学科内容有较大局限,书写过程也颇感难度。但影像核医学在推动医学进步中已经并将发挥着关键的作用,尤其是不同影像技术的融合应用如 PET/CT、SPECT/CT 等设备相继问世,使核医学影像更是进入一个新的发展阶段,为现代分子医学研究提供了最为先进可靠的手段和方法,对临床医学的发展具有不可替代的贡献。因此,本书将力求通过体现现代科技与分子医学最新发展成果在医学临床中的应用,使学生在掌握影像核医学基础知识、基础理论及基本技能基础上,对现代分子医学的发展前沿亦具有一定的了解。虽然本书的主要使用对象是医学影像专业五年制本科学生,但因本书所具有的特点与内容的先进性,因此也可以作为核医学研究生入学考试和执业医师考试的参考书。

为集思广益并体现 21 世纪影像核医学的新进展,同时兼顾我国影像核医学发展的现状与水平,人民卫生出版社与卫生部有关部门经专家推荐组织了由国内 10 余所医学院校具有较丰富临床教学和实践经验的专家教授参与本书编写。在编写过程中,参编专家严谨务实辛勤编著,彼此支持相互合作,在完成初稿后又汇聚了上海交通大学医学院附属仁济医院集体互审,再返回编者修改完善,随后由主编及几位编者全面统筹调整并再次修改补充,最后由复旦大学的林祥通教授和上海交通大学医学院的朱承谟教授审阅定稿;此外,上海交通大学医学院附属仁济医院核医学科孙晓光、刘建军、陈涛、马玉波、施一平、严维力、盛世乐等医师不辞辛苦协助完成了大量具体工作,尤其是刘建军医师承担了本书繁琐的编务工作,在此我们谨向所有直接或间接支持、关心、指导本书编写与出版的领导、专家和同仁们致以最衷心的感谢。

参加本书编写的所有人员有一个共同心愿,就是齐心协力精诚合作、严肃认真群策群力,力求做到系统、完整、先进、科学的统一,以达到满足 21 世纪医学影像教学及临床需要。但限于作者的水平,本书难免存在一些不足之处,恳请各医学院校的教师、同学、临床医师和读者给予斧正,在此先致谢意。

黄 钢

2005 年 2 月 18 日于上海

目录

总论	1
第一章 核医学影像设备	5
第一节 核物理基础	5
第二节 γ 闪烁探测	10
第三节 单光子发射断层显像	15
第四节 正电子发射断层显像	21
第二章 核医学显像原理与显像剂	27
第一节 核医学显像的基本原理	27
第二节 核医学显像诊断效能评价	35
第三节 放射性药品及质量控制	38
第四节 辐射效应与防护	45
第三章 核素显像靶向定位诊断技术	50
第一节 生物靶区	50
第二节 核医学生物靶区定位方法与应用	52
第三节 生物靶区定位在精确治疗中应用	54
第四章 现代核医学影像技术的应用进展	58
第一节 核素显像与其他影像技术比较	58
第二节 图像融合及其应用	61
第三节 图像存档和传输系统	64
第四节 核医学影像在分子医学中的应用	72
第五章 内分泌系统	79
第一节 概述	79
第二节 甲状腺显像	80
第三节 甲状旁腺显像	90
第四节 肾上腺显像	93

第六章 神经系统显像	100
第一节 概述	100
第二节 脑血流灌注显像	101
第三节 脑代谢显像	103
第四节 脑受体显像	104
第五节 其它显像	105
第六节 神经系统显像的临床应用	105
第七章 心血管系统	114
第一节 概述	114
第二节 心肌血流灌注显像	115
第三节 心肌代谢显像	124
第四节 其它心血管显像	127
第五节 负荷试验	129
第六节 临床应用	132
第八章 肿瘤和炎症显像	139
第一节 概述	139
第二节 非特异性亲肿瘤显像	140
第三节 肿瘤正电子显像	144
第四节 特异性肿瘤显像	167
第五节 炎症显像	171
第九章 骨与关节系统	174
第一节 概述	174
第二节 骨显像	175
第三节 关节显像	179
第四节 临床应用	180
第十章 消化系统	189
第一节 概述	189
第二节 肝胆显像	189
第三节 消化道出血显像	200
第四节 消化道动力显像	203
第五节 唾液腺显像	208
第十一章 呼吸系统显像	212
第一节 概述	212
第二节 肺灌注显像	213

第三节	肺通气显像·····	218
第四节	下肢深静脉显像·····	223
第十二章	泌尿系统显像·····	226
第一节	概述·····	226
第二节	肾动态显像·····	226
第三节	肾静态显像·····	235
第四节	其它显像·····	237
第十三章	血液和淋巴系统·····	241
第一节	概述·····	241
第二节	骨髓显像·····	241
第三节	脾脏显像·····	245
第四节	淋巴显像·····	249
第五节	前哨淋巴结显像·····	251
参考文献 ·····		255
中英文索引 ·····		257

总 论

近 30 年来,随着电子学与计算机技术的迅猛发展,医学影像学已形成了以 X-CT、MRI、影像核医学和超声影像等先进影像技术为主干的综合性临床学科。而影像核医学作为其中极为重要的组成部分,能够灵敏而准确地显示和分析机体脏器的功能、代谢、血流、受体密度和基因的分布和动态过程,在机体病理生理变化的检测中具有独特的作用,为全面揭示机体从分子结构与功能的改变到临床疾病的早期诊断、病程与疗效的客观评价及预后与转归的准确判断提供了准确量化的科学依据。

一、影像核医学的定义

影像核医学是一门研究利用放射性核素示踪技术进行医学成像诊断疾病并探索其机理与相关技术理论的医学学科,是现代分子医学研究的一个重要的可视化工具,是临床核医学的一个重要组成部分。

二、影像核医学的特点

影像核医学又称为放射性核素显像,其基本原理是将具有放射性核素标记的示踪剂引入体内,通过成像设备在体外对放射性核素发射的 γ 射线进行采集和处理后获得图像。由于可选择不同作用机制的放射性核素示踪剂,不仅能显示脏器和病变的位置、形态、大小,更重要的是同时提供有关脏器和病变的血流、功能、代谢和受体等方面的信息,可达到分子水平的诊断。其主要特点包括:

1. 功能性显像 与 CT、MR 及超声成像主要反映组织密度的差别不同,核素显像主要反映放射性核素示踪剂在体内脏器组织的分布与浓度的变化及异常,器官或组织及病灶的放射性浓集状况不仅与细胞的功能有关,也与血流量、细胞数量、代谢率及排泄状况有关。因此,核素显像不仅显示器官的形态、位置、大小及放射性分布,更重要的是提供有关脏器和病灶的功能、血流和代谢情况,故有功能显像之称。

2. 分子显像 放射性核素示踪剂不仅可以标记一般化合物,也可以通过对正常机体所具有的分子结构如葡萄糖、蛋白质、多肽等进行标记,不仅反映局部血流、细胞功能和放射性浓集的改变,而且反映组织细胞内分子与基因水平的改变,从分子水平的角度解释图像和诊断病变。如受体显像、基因显像等,这些在其它影像技术中还难以实现。

3. 动态显像 核医学影像可通过连续采集获得显像剂在体内随时间动态变化的图像。这些图像可以提供不同时间的信息,还能以电影形式显示靶器官的活动情况。由于引入了“时

间-放射活性曲线”的概念，非常适用于脏器功能的判断。

4. 定量分析 核医学显像可通过计算机处理获得一些局部定量或半定量参数。这些参数能客观的评价病灶部位的放射性变化，并获得病灶组织的量化信息，更为精确的分析病变性质。如脑葡萄糖摄取率、标准摄取比值 SUV、放射性受体密度等等。这也是核医学显像的独特优势。

三、影像核医学的组成和发展

临床核医学按照其功能分类可分为诊断核医学和治疗核医学。诊断核医学按放射性核素是否引入体内又可分为体外检查法如最有代表性的是放射免疫分析（radioimmunoassay）和体内检查法，后者根据是否成像又分为影像和功能测定两种。而影像核医学就是研究利用放射性核素示踪技术进行医学成像诊断疾病并探索其机理与相关技术理论的医学学科，是现代分子医学研究的一个重要的可视化工具，是临床核医学的一个重要组成部分。影像核医学至少应包括核医学显像设备与放射性示踪剂两个部分，随着影像核医学及相关影像技术的发展，智能图像处理系统和图像储存与传输系统、图像系统整合与智能判别系统等也将成为影像核医学重要的组成部分。

γ 相机、单光子发射计算机断层仪（SPECT）和正电子发射断层仪（PET）是影像核医学的主要成像设备。这些设备主要利用放射性核素发射 γ 射线照射到某些晶体时产生光闪烁效应，并通过光电转换及计算机处理而获得图像。随着工业技术的进步以及计算机技术的迅速发展，这些设备从探测系统到图像重建的软件系统都获得了空前的发展，显像系统的时间与空间分辨率进一步得到提高，如动物实验的微型 PET 分辨率可达 1.0mm。此外，随着融合技术的开发及临床应用，PET/CT、SPECT/CT 等融合显像设备大量应用于临床，将解剖、功能、灌注、代谢的图像融合成为影像核医学的一个重要内容。1951 年 Benedict Cassen 等应用闪烁探测器获得人体第一张甲状腺扫描图，象征着影像核医学的开始。1952 年 Newell 等人发明了聚焦准直器，与此同时，碘化钠晶体开始应用于扫描机，单道脉冲分析器等电子学线路也被采用，扫描机在临床被逐渐推广应用。1958 年 Hal Anger γ 照相机问世，推动了影像核医学技术出现革命性进步，使简单的静态显像进入到动态影像研究与诊断中。我国于 20 世纪 70 年代开始研制 γ 照相机，80 年代应用于临床，为核医学影像诊断提供了有效地显像设备，并迅速成为医学影像的一个重要组成部分。

20 世纪 70 年代由于计算机技术在核医学领域中的广泛应用，为影像核医学的发展创造了广阔的空间。1979 年 Kuhl 等在长期研究基础上研制出世界上第一台发射型计算机断层显像仪（SPECT），利用该技术可将扫描图像进行三维重建；随后 Tamaki 首次进行了三维门控血池显像。目前 SPECT 已成为影像核医学最主要的检测设备。在此之前的几年，美国华盛顿大学的几位核技术科学家经过不断设计与改进，研制出第一台用于临床人体正电子成像设备（PET），用于检测正电子核素标记的化合物显像。然而，由于 PET 造价极为昂贵，90 年代前其作为少有的研究设备主要安装在几所大学或研究所，用于神经和精神疾病、心脏疾病与肿瘤等的研究。90 年代以后，随着分子医学的进步以及人们对疾病机理的深入研究，PET 所具有的独特生物学优势逐步为医学界接受，尤其是 PET 在临床应用范围与数量的扩大及其在肿瘤学中的显著价值，促使欧美等国家的医疗保险相关机构密切关注 PET 的临床作用，并逐步将 PET 的各项检查项目列入到医疗保险的给付范围。

目前正电子检测技术与设备不断改进，而价格日趋下降，PET 中最重要的部分之一晶体

已由单纯的锗酸铋 (BGO) 晶体发展到 LSO、GSO 等晶体, 空间分辨率和灵敏度都得到大幅提高, 显像时间也大大缩短。90 年代中期, 随着配备分子符合显像的 SPECT 仪进入临床, 显示出正电子显像正努力加速向普及化的方向发展。新的技术与方法也是层出不穷, 包括以 3D 锥束性探测技术代替 2D 扇束性探测提高探测效率; 改善图像的质量与空间分辨率; 图像重建解析法与迭代重建术代替滤波反投影法降低系统噪声, 提高图像质量。特别是解剖与功能、代谢图像的融合技术如 PET 与 SPECT, PET 与 CT, SPECT 与 CT, PET 与 MRI 的融合等开发和应用, 影像核医学已经发展到功能解剖概念的时代; 而核医学 PACS 系统更是将核医学资源从局部利用扩展到影像医学间、医院内外和世界各地共享。

^{131}I -碘化物、 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ 标记放射性药物和 ^{18}F -FDG 是核医学历史上最重要的三种示踪剂, 它们影响了患者诊断和治疗的所有方面。1946 年 12 月 7 日, 纽约的 Seidlin, Marinelli 以及 Qshry 在美国医学会杂志上发表了题为“放射性碘治疗: 在功能性转移性甲状腺腺瘤中的作用”的经典文章, 被认为是核医学诞生的标志。60 年代初随着 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ 发生器系统首次被研制成功及商品化应用, 以及 70 年代初 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ 标记技术的开发应用, 为影像核医学在临床广泛应用开始了革命性的变化。80 年代开始应用的 ^{18}F -FDG 更是被誉为“世纪分子”, 对心脑血管疾病及肿瘤疾病的临床诊断具有重要价值。而随着新世纪生命科学研究的突飞猛进, 人类基因组工程草图的完成, 分子生物技术与核医学技术的全面结合, 新的示踪剂层出不穷。放射免疫显像、基因显像以及受体显像已逐步从科学研究阶段过渡到临床应用, 分子成像已经成为影像核医学在未来分子医学研究最具价值的一个组成部分。

影像核医学的临床应用也是随着显像设备及放射性示踪剂的开发应用而迅速发展, 目前已经涉及全身各大系统, 成为全身疾病诊断与鉴别诊断的关键工具, 有些都已经成为一个独立的边缘学科如心脏核医学、肿瘤核医学等。20 世纪 60 年代核医学影像突出表现在甲状腺扫描, 用于评价甲状腺形态与功能状况; 70 年代的临床应用已扩展到肝扫描和脑扫描, 反映肝脏与脑的功能、肝胆与脑脊液通道与分布等; 80 年代骨显像、心功能显像和心肌显像等成为临床核医学的主要项目, 90 年代随着仪器的发展和示踪剂进步肿瘤核医学又成为目前临床应用的主要项目之一。当今现代医学逐步进入分子医学时代, 影像核医学以其独特显示功能、代谢、血流、受体分布和基因定位的优势, 也逐步向分子影像学方向迅速发展和应用, 如心脏核医学中的动脉粥样硬化斑块显像、血栓栓塞显像、神经分布显像及乏氧心肌显像等; 肿瘤核医学中的小分子肽类显像、肿瘤药物显像、信号传导通路显像及报告基因与寡核苷酸显像等; 神经精神核医学中的脑代谢显像、脑受体显像等等均处于从基础研究到临床应用当中, 有些已在临床早期诊断、病程与病理机理、疗效与预后转归等方面成功应用于临床, 并显示出明确的价值。

四、我国影像核医学的发展现状

我国核医学起源于 1956 年, 近 50 年来经历了从无到有和从落后到在世界上占有一席之地的历程。最新的调查资料显示, 目前我国有核医学科室 518 个, 其中独立科室 426 个, 非独立科室 92 个。其中三级医院 406 个 (占 78.4%), 二级医院 95 个 (18.3%), 其它医院及专职工学、研究单位核医学室或教研室 (研究室) 17 个 (3.3%)。我国拥有 SPECT 272 台, 包括多探头 84 台, 另外有 γ 相机 52 台, 实际我国使用的 SPECT 应在 350 台以上。我国目前已投入或即将使用的 PET 有 25 台左右, 其中 PET/CT 为 10~12 台左右。我国年显像为 44 万多人次, 加上漏统计预计在 50 万人次左右。除了甲状腺等小脏器显像外, 骨骼显像占第一位,

其次分别为心脏、肾和脑。然而，我们也要看到，我们国家仍属发展中国家，我国核医学与国外相比有较大的差距，核素显像的临床应用价值还没有被广大的临床医师所接受，从事核医学技术人员的水平更是参差不齐。因此，如何不断提高我国核医学各领域临床工作的水平，努力做到进一步利用我国现有的核医学资源，充分发挥核医学的优势和潜力，提高常规检查项目特别是那些优势项目的诊断水平；主动适应新世纪相关影像设备、技术发展带来的机遇和挑战，使核素显像能够与其它影像诊断技术形成优势互补之势，是核医学新世纪发展所必须的一个重要方面。

(黄 钢)

第一章

核医学影像设备

核医学显像是通过对引入体内放射性核素衰变所释放的 γ 射线进行探测和成像的一种技术手段，自 Anger 发明 γ 相机首次应用临床以来，核医学成像技术与设备已经得到巨大发展，其应用也愈来愈广泛。

第一节 核物理基础

一、原子组成

原子是物质结构的基本组成单位，主要包括位于原子中心的原子核（nucleus, n）及核外带负电荷的高速旋转电子（electron, e）组成。其中原子核由带正电荷的质子（proton, p）和不带电荷的中子（neutron, n）组成。按国际统一规定，一般用 X 代表元素，用 A 代表原子质量数，用 Z 代表原子核质子数，用 N 代表中子数， $A=Z+N$ ，这一元素可写成 ${}_Z^AX$ ，通常 Z 可以省略不写。

二、元素；核素；放射性核素；稳定性核素

1. 元素（element） 凡质子数相同的同一类原子称为一种元素，是组成不同物质的基本单位。它们的原子序数相同，因此具有相同的化学特性，但其原子核中的中子数可以不同，因而物理特性可有某些差异。

2. 核素（nuclide） 质子数相同，中子数也相同，因而质量数相同，并处于同一能级状态的原子，称为一种核素，例如， ${}^1\text{H}$ 、 ${}^2\text{H}$ 、 ${}^3\text{H}$ 分别为三种不同的核素。每种元素可以包括若干种核素，目前已知的核素有 2 300 多种，分别属于 100 多种元素。核素可分为稳定性核素和放射性核素。

3. 放射性核素（radionuclide） 又称为不稳定性核素，它能够自发地发生核内结构或能级的变化，同时可放出某种射线而转变为另一种核素。这种自发性核内结构或能级变化的过程称核衰变（nuclear decay）。在衰变过程时释放的射线称为放射性（radioactivity）。核衰变时可释放多种射线，主要为 α 、 β 、 γ 射线等。

4. 稳定性核素（stable nuclide） 它能稳定地存在，不会自发地发生核内结构或能级的变化。在已经发现的 2 300 余种核素中稳定核素只有 297 种。

5. 同位素（isotope） 凡属同一种元素的不同核素，它们在元素周期表中处于相同的位置而中子数不同，称为元素的同位素，例如 ${}^3\text{H}$ 、 ${}^2\text{H}$ 和 ${}^1\text{H}$ 互为氢的同位素。

6. 同质异能素 (isomer) 核内质子数和中子数都相同但能级不同的核素互称为同质异能素, 如 ^{99}Tc 和处于激发状态的 $^{99}\text{Tc}^m$ 。

三、核衰变的类型

当原子核内质子和中子的数目失去一定比例时, 原子核就处于不稳定状态, 将自发地发生变化, 放出一种或多种的射线 (如 α 、 β 、 γ 射线), 这种现象称为核衰变 (nuclear decay), 通常把衰变前的核称为母体, 衰变后的核称为子体。放射性核素的核衰变主要包括 α 衰变、 β 衰变与 γ 衰变。

(一) α 衰变

α 衰变是放射性核素释放出 α 粒子的衰变过程, 并伴有能量的释放。 α 粒子具有射程短、能量高和电离能力强的特点, 临床主要用于治疗 (图 1-1)。

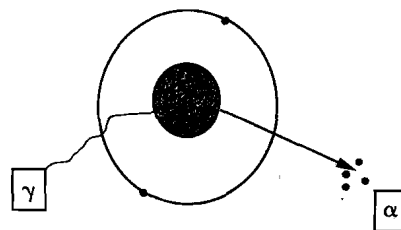
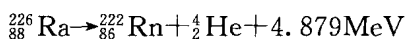
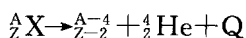


图 1-1 α 衰变模式图

(二) β 衰变

β 衰变分为 β^- 衰变、 β^+ 衰变和电子俘获三种形式 (图 1-2)。

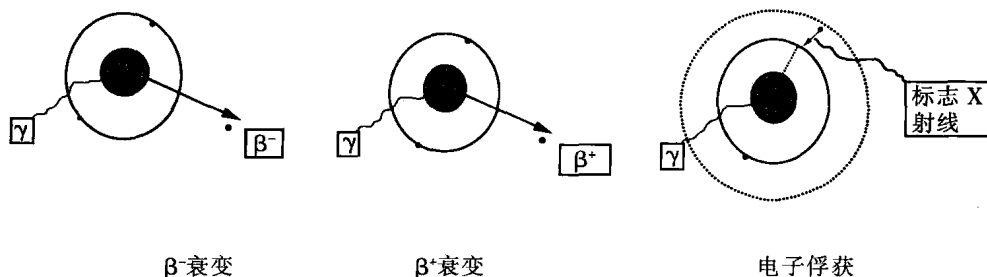
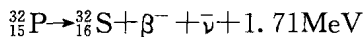
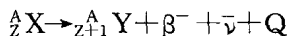
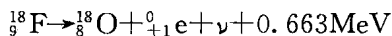
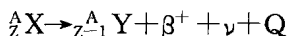


图 1-2 β 衰变模式图

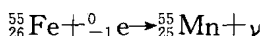
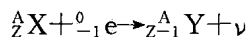
1. β^- 衰变 是由于原子核内中子相对过多而造成不平衡, 致使原子核释放 β^- 粒子即放出电子, 达到平衡, 下式中 $\bar{\nu}$ 为反中微子。



2. β^+ 衰变 是由于原子核内质子相对过多而使核内放射出 β^+ 粒子即正电子, 使原子核达到平衡, 下式中 ν 为中微子。



3. 电子俘获 (electron capture, EC) 是指原子从核外电子壳层中俘获一个电子, 而使核内的一个质子转变为中子和中微子的过程。

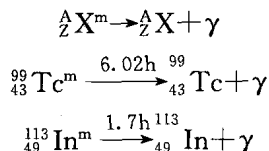


(三) γ 衰变

某些放射性核素在发生 α 衰变或 β 衰变以后, 仍处于不稳定的激发态, 它往往通过放出 γ

光子, 然后从激发态回到基态或低能状态, 这种过程称为 γ 衰变。

γ 光子是一种光子流, 电离能力弱, 穿透能力强, 临床主要应用于治疗 and 诊断。



四、核衰变规律

放射性核素的原子核不稳定, 并不断衰变但非同时进行, 而是按指数规律衰变。在衰变过程中初始母核数的减少遵循指数函数规律, 即放射性衰变定律 (decay law)。其核衰变规律若以公式表示时, 则为:

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

式中: N_0 为 $t=0$ 时的放射性核素的原子核数

N 为经过一定时间 t 后的放射性核素的原子核数

e 为自然对数的底 ($e \approx 2.718$)

λ 为衰变常数, 每种放射性核素都有自己的衰变常数, 其公式为

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

(一) 物理半衰期 (physical half life; $T_{1/2}$)

放射性活度因衰变而减少至原来一半所需要的时间称为物理半衰期。

(二) 生物半排期 (biological half life; T_b)

是指生物体内的放射性核素经由各种途径从体内排出一半所需要的时间。

(三) 有效半减期 (effective half life; T_{eff})

指生物体内的放射性核素由于从体内排出和物理衰变两个因素作用, 减少至原有放射性活度的一半所需要的时间。

(四) 放射性活度 (简称活度)

是用来描述放射性物质衰变强弱的物理量, 表示单位时间内发生衰变的原子核数。国际单位: 贝可 (Becquerel; Bq), 定义为每秒一次衰变。非许用单位是居里 (Curie; Ci)。两者换算关系:

$$1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{Bq} \quad 1\text{Bq} = 2.703 \times 10^{-11} \text{Ci}$$

(五) 比活度

指单位质量物质的放射性活度, 单位是 Bq/g。

(六) 放射性浓度

单位体积溶液内所含的放射性活度, 单位是 Bq/ml。

五、射线和物质的相互作用

电离辐射是由直接电粒子 (α 粒子、 β 粒子、电子、质子等) 或间接电粒子 (X 射线、 γ 射线、中子等) 射线所引起。射线的物理效应也称为射线与物质的相互作用, 它包括射线对物质的作用 (引起物质的电离、激发等) 和物质对射线的作用 (引起射线的减速、散射及吸收等) 两个相互联系的方面。

带电粒子与物质的相互作用

1. 电离 (ionization) 是指入射的带电粒子使物质中的原子失去轨道电子而形成正、负离子对,它是某些放射性仪器测量射线的物质基础,又是射线引起物理、化学变化及生物学效应的主要机制。电离作用的强弱常用射线在单位路程上产生的离子对数来度量,即电离密度 (ionization density) 或比电离 (specific ionization)。一般说,带电粒子的电荷量越大,速度越慢,所经过的介质的密度越大,则比电离越大。所以,带电粒子的能量损失也就越大。

2. 激发 (excitation) 指入射带电粒子使物质原子的轨道电子获得的能量较小时,吸能使轨道电子从低能量级跃迁至高能量级。当该电子退激时,能量以光子或热能形式释出。激发作用也是一些放射性仪器工作的物理基础,是射线引起物理、化学变化和生物效应的机制之一。

3. 散射 (scattering) 入射的带电粒子受到物质原子核库仑电场作用而发生方向偏折。散射作用对测量和防护都有一定的影响。 α 粒子由于质量大,其径迹基本上是直线进行的,散射一般不明显; β 粒子的质量较轻,其径迹是曲线进行的且散射较明显。

4. 韧致辐射 (bremsstrahlung) 粒子在介质中受到阻滞而急剧减速时能将部分能量转化为电磁辐射,即 X 射线。它发生的几率与 β 粒子的能量及介质的原子序数成正比。因此,防护 β 粒子的吸收体和屏蔽物应采用低密度材料,如有机玻璃、铝等。

5. 湮没辐射 (annihilation radiation) 当 β^+ 粒子与物质作用能量耗尽时和物质中的自由电子结合,正负电荷抵消,两个电子的静止质量转化为两个方向相反、能量各为 0.511MeV 的两个 γ 光子,这一过程称为湮没辐射或光化辐射。PET (正电子发射断层系统) 的探测原理就是利用符合电路对湮没辐射事件发生两个方向互为相反的 γ 光子进行空间定位。

6. 吸收作用 (absorption) 带电粒子与物质相互作用产生电离和激发等效应,使射线的能量逐渐消耗,称为被吸收。吸收前射线在物质中的运动走行的距离称射程。

(二) 光子与物质的相互作用

X、 γ 射线都是光子流,光子与物质的相互作用有三种方式:

1. 光电效应 (photoelectric effect) γ 光子与原子的内壳层轨道电子发生作用时,把其全部能量交给电子,使其脱离原子而成为自由电子,而 γ 光子被吸收,这种过程称为光电效应。脱离原子轨道的电子称为光电子。

2. 康普顿—吴有训效应 (Compton—WU You-Xun effect) 是指 γ 光子与外层电子发生弹性碰撞,将其部分能量传递给电子,使其脱离原子而运动,此电子称为康普顿电子, γ 光子本身能量减少,改变其运动方向而射出,称为康普顿散射。康普顿散射效应与光电子效应不同,主要发生在 γ 射线能量较大时,介质的密度越高,康普顿散射效应越明显。

3. 电子对生成 (electron pair production) 光电效应和康普顿—吴有训效应是随光子能量的增加而减弱,而电子对的生成则随光子能量的增加而显著。当入射 γ 光子的能量高于 1.022MeV 时, γ 光子在原子核电场的作用下,转化为一对正、负电子,称为电子对生成。

(三) 中子与物质的相互作用

中子不带电,它和 γ 射线一样都不能直接使物质电离,要通过与物质相互作用时产生的次级粒子才能使物质发生电离。中子与原子核的作用方式有弹性散射和核反应等。中子将一部分能量传递给被碰撞的原子核,使它受到反冲脱离壳层电子作用成为反冲核运动,从而引起物质