

普通高等教育“十五”国家级规划教材



北京市高等教育精品教材立项项目



北京大学医学教材

核 医 学

Nuclear Medicine

● 主编 林景辉

Nuclear Medicine



内附光盘

北京医科大学出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材
北京市高等教育精品教材立项项目

北京大学医学教材

核 医 学

Nuclear Medicine

主 编 林景辉

副主编 王荣福

编 者 (以姓氏笔画为序)

王荣福 北京大学第一临床医学院

付占立 北京大学第一临床医学院

朱绍莉 北京大学第一临床医学院

杨宗于 北京大学第二临床医学院

张春丽 北京大学第一临床医学院

陈冠英 北京大学基础医学院

陈 曼 北京大学第三临床医学院

屈婉莹 北京大学第五临床医学院

范 岩 北京大学第一临床医学院

林景辉 北京大学第一临床医学院

霍 力 北京大学第一临床医学院

主编助理 胡怀湘 张春丽

北京医科大学出版社

HEYIXUE

图书在版编目 (CIP) 数据

核医学/林景辉主编. —北京: 北京医科大学出版社,
2002.3

全国医学院校教材

ISBN 7-81071-363-9

I. 核… II. 林… III. 原子医学 - 医学院校 - 教材 IV. R81

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 003518 号

北京医科大学出版社出版发行

(100083 北京市海淀区学院路 38 号 北京大学医学部院内)

责任编辑: 赵 蔚

责任校对: 李月英

责任印制: 张京生

莱芜市圣龙印务书刊有限责任公司印刷 新华书店经销

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 14 插页: 1 字数: 355 千字

2002 年 8 月第 1 版 2002 年 8 月第 1 次印刷 印数: 1-5000 册

定价: 31.00 元

版权所有 不得翻印

序 言

随着生命科学技术的日新月异,在我国高等教育体制改革的带动下,医学教育教学改革不断深入,医学教育逐渐由职业化教育转向具有职业特点的综合素质教育,着眼于二十一世纪,医学教育将更注重人才的综合培养,不仅要培养学生具有学科专业知识和能力,而且要具有知识面宽、能力强、素质高的特点,注重创新精神、创新意识、创新能力的培养。

1995年以来,通过教育部、卫生部及北京市等各级教育教学改革项目的研究与实践,我校着力于人才培养模式和课程体系的研究,实现融知识、能力、素质于一体的综合培养,拓宽专业口径,特别强调理论与实践的结合,培养学生自学和创新的精神和能力,树立终身学习的观念;进行了课程内容、教学方法和考核方法的研究和实践;改革教与学的方法,以学生为主体,以教师为主导,引导学生主动学习,注意因材施教,注重加强人文素质的培养,强调在教学过程中的教书育人。

在改革实践中我们深刻认识到教材建设在教学过程中起着重要的作用。但长期以来医学教育一套教材一统天下的局面,未能充分体现各医学院校的办学特点,未能及时反映教学改革及教学内容的更新。为此我们邀请了北医及部分兄弟院校各学科的专家教授编写了这套长学制教材。

这套教材的编写工作力求符合人才培养目标和教学大纲,体现长学制教学的水平,探索和尝试突破原有教材的编写框架;体现北医教育观念的转变、教学内容和教学方法改革的成果和总体水平,确立以学生为主体的人才培养模式,有利于指导学生学习 and 思考,有利于训练学生临床思维的能力,培养学生的创新意识;体现教学过程中的“双语”教学要求,将学生必须掌握的词汇编入教材之中,每本教材配有英语专业词汇只读光盘。

本套教材汇集了北医及部分兄弟院校的专家教授们多年来积累的知识和教学经验,在编写中也进行了大胆的尝试。衷心希望该套教材的出版能为我国的医学教育贡献一份力量,使医学教育的教材建设能够百花齐放。但是由于学科专业发展的不平衡,教材中难免存在不足之处,欢迎有关专家学者批评指正。

韩启德

2002年7月

前言

本书是由北京大学第一、二、三、五临床医学院及基础医学院八位多年从事核医学教学的教师并组织部分青年教师共同编写的,是供以长学制临床医学专业为主、兼顾其他专业医学生使用的一本教科书。本书也可作为非核医学专业的各科医师继续教育的参考书。

全书分核医学基础及临床核医学两篇共16章。核医学基础篇(1~4章)介绍核物理、放射性药物、核医学仪器与核医学检查法、电离辐射生物效应与放射防护等核医学基础知识。临床核医学篇(5~16章)是本书的重点,分系统介绍临床常用的体内核医学检查法的原理、诊断要点及临床应用。少数检查法与其他影像学相比已无明显优势,但仍有一定价值,故也做简要介绍。近年来分子核医学作为核医学的前沿发展迅速,虽然不少方法尚处于研究阶段,但已显示出其在医学研究与疾病诊治中的广阔应用前景;肿瘤核医学也随着核医学领域中新技术及新设备的应用、放射性药物的研制与开发而异军突起,成为核医学的重要分支;因此特将分子核医学与肿瘤核医学单独成章加以介绍。对非核医学专业医师而言不需要实施具体技术操作,故本篇未介绍具体技术细节,这一点与核医学专业书有所不同。本篇内容还包括放射性核素治疗及体外放射分析法。本书各章均注意引入了核医学诊治领域的新进展,并淘汰过时不实用的内容,体现了21世纪教材的创新性。鉴于核医学功能代谢显像特色,书中精选图106幅,便于学生理解教学内容,加深对各种疾病核医学影像的识别能力。为使学生掌握要领、调动学生学习兴趣与再提高,每章后附英文小结、思考题并列建建议学生阅读的参考书目。

本教材体现“双语”教学要求,强化学生对英文专业名词的记忆,将学生需要掌握的约400个词汇编入教材之中,原则上每一个新词在本书第一次出现时括注中文,以后只出现英文;书中的图表基本上采用英文,只有个别图表用英文不便阅读,故采用中文;全书各章后均附英文小结;书后附中英文专业词汇索引,并配英语专业词汇只读光盘。

在编写过程中得到上述各学院领导的大力支持和各位编写者的通力合作,书中各章英文小结均由美国亚利桑那大学医学中心Patton教授审阅,北京大学第一临床医学院医学教育中心在图像制作上也给予了大力支持,核医学科胡怀湘、范岩、付占立等医师在后期文字修饰、制图、核对等方面做了大量工作,何晓坤、赵光宇及进修医师史冰也做了部分工作,在此一并致谢。

本书为新编教材,编写要求高、时间短,难免存在错误和不当之处,真诚地希望广大读者给予批评指正。

林景辉 王荣福

2001年11月

目 录

绪 论	(1)
-----------	-----

第一篇 核医学基础

第一章 核物理基础	(5)
-----------------	-----

第一节 原子核的组成与稳定性	(5)
第二节 核衰变	(7)
第三节 射线与物质的相互作用	(9)
第四节 辐射剂量学基础	(11)

第二章 放射性药物	(15)
-----------------	------

第一节 放射性药物的体内定位机制	(15)
第二节 放射性药物的制备	(17)
第三节 放射性药物的质量控制	(19)
第四节 放射性药物应用的基本考虑	(20)
第五节 放射性药物临床应用与进展	(21)

第三章 核医学仪器与核医学检查法	(25)
------------------------	------

第一节 核医学仪器	(25)
第二节 核医学检查方法	(28)

第四章 电离辐射生物效应与放射防护	(33)
-------------------------	------

第一节 人类受到的电离辐射	(33)
第二节 电离辐射的生物效应	(34)
第三节 电离辐射的防护	(38)
第四节 医疗照射的防护	(42)

第二篇 临床核医学

第五章 体外放射分析	(46)
------------------	------

第一节 放射免疫分析	(46)
第二节 其他体外放射分析法	(53)

第三节	非放射标记免疫分析	(54)
第四节	放免检测的临床应用	(56)
第六章	内分泌系统	(61)
第一节	甲状腺功能测定	(61)
第二节	甲状腺显像	(69)
第三节	甲状旁腺显像	(73)
第四节	肾上腺皮质显像	(75)
第五节	肾上腺髓质显像	(77)
第七章	神经系统	(80)
第一节	脑血流灌注断层显像及局部脑血流量测定	(80)
第二节	脑代谢显像	(84)
第三节	中枢神经递质和受体显像	(87)
第四节	放射性核素脑血管显像	(88)
第五节	脑脊液显像	(89)
第八章	心血管系统	(93)
第一节	心室显像及心功能测定	(93)
第二节	心肌灌注显像	(98)
第三节	急性心肌梗死灶显像	(106)
第四节	心肌代谢显像	(107)
第五节	心脏受体显像	(109)
第六节	下肢深静脉显像	(109)
第九章	泌尿生殖系统	(113)
第一节	肾动态显像和非显像检查法	(113)
第二节	肾静态显像	(120)
第三节	膀胱输尿管反流显像	(121)
第四节	阴囊显像	(122)
第十章	呼吸系统	(125)
第一节	肺灌注显像	(125)
第二节	肺通气显像	(126)
第三节	其他肺功能检查	(128)
第四节	临床应用	(128)
第十一章	消化系统	(134)
第一节	肝脏显像	(134)
第二节	肝胆显像	(137)

第三节	胃肠道出血显像	(140)
第四节	异位胃黏膜显像	(141)
第五节	唾液腺显像	(142)
第六节	上消化道功能测定和显像	(142)
第十二章	骨骼系统	(146)
第一节	原理和方法	(146)
第二节	正常图像	(147)
第三节	临床应用	(149)
第四节	骨显像与其他医学影像技术的关系	(154)
第十三章	血液与淋巴系统	(157)
第一节	血容量测定	(157)
第二节	红细胞寿命及破坏部位测定	(158)
第三节	脾显像	(159)
第四节	骨髓显像	(160)
第五节	淋巴显像	(162)
第十四章	分子核医学	(166)
第一节	单克隆抗体放射免疫显像	(166)
第二节	受体显像	(167)
第三节	基因显像和基因治疗	(172)
第四节	前景与展望	(173)
第十五章	肿瘤核医学	(175)
第一节	肿瘤非特异性显像	(175)
第二节	肿瘤代谢显像	(178)
第三节	肿瘤放射免疫显像与放射免疫导向手术	(181)
第四节	肿瘤受体显像	(182)
第五节	肿瘤基因显像	(182)
第六节	肿瘤乏氧显像	(183)
第七节	肿瘤多耐药显像	(184)
第八节	肿瘤前哨淋巴结显像	(184)
第十六章	放射性核素治疗	(187)
第一节	甲状腺疾病核素治疗	(187)
第二节	肿瘤核素治疗	(191)
第三节	血液疾病核素治疗	(195)
第四节	放射性核素介入治疗	(197)
第五节	皮肤病核素治疗	(200)

第六节 其他核素治疗.....	(201)
索引	(204)

绪 论

一、核医学的定义、内容和特点

Nuclear medicine (核医学) 是一门研究 nuclide (核素) 和核射线在医学中的应用及其理论基础的学科, 它是核技术与医学结合的产物, 在内容上分为 experimental nuclear medicine (实验核医学) 和 clinical nuclear medicine (临床核医学) 两部分。

Experimental nuclear medicine 利用核技术探索生命现象的本质和物质变化规律, 已广泛应用于医学基础理论研究, 其内容包括核衰变测量、标记、示踪、体外放射分析、活化分析和放射自显影等。Clinical nuclear medicine 是利用开放型 radionuclide (放射性核素) 诊断和治疗疾病的临床医学学科, 由诊断和治疗两部分组成。诊断核医学包括以脏器显像和功能测定为主要内容的 in vivo (体内) 诊断法和以放射免疫分析为主要内容的 in vitro (体外) 诊断法; 治疗核医学利用 radionuclide 发射的核射线对病变进行内照射治疗。Experimental nuclear medicine 和 clinical nuclear medicine 是同一学科的不同分支, experimental nuclear medicine 的成果不断推动 clinical nuclear medicine 的发展; 反之, clinical nuclear medicine 在应用实践中不断向 experimental nuclear medicine 提出新的研究课题, 二者相互促进, 密不可分。本书将以 clinical nuclear medicine 作为重点内容进行介绍。

Nuclear medicine 是现代医学影像学的重要组成部分, 在医学领域中具有独特的地位和作用, 已成为重要的独立学科。与其他影像技术如 X ray、CT、MRI、超声等比较, nuclear medicine 不仅能显示脏器和病变组织的位置、形态、大小等解剖结构, 更重要的是能同时提供其血流、功能、代谢和受体等方面的信息, 因此有助于疾病的早期诊断, 但 nuclear medicine 影像的清晰度逊于 CT、MRI 和超声, 影响对细微结构的精确显示。

二、核医学发展现状

(一) 放射性药物

Radiopharmaceutical (放射性药物) 是 clinical nuclear medicine 发展的重要基石, 其中用于 radionuclide imaging (放射性核素显像) 的 radiopharmaceutical 种类繁多, 发展也非常迅速。 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ 是显像检查中最常用的 radionuclide, 目前全世界应用的显像药物中, $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ 及其标记的化合物占 80% 以上, 广泛用于心、脑、肾、骨、肺、甲状腺等多种脏器疾患的检查, 并且大多已有配套药盒供应。此外, ^{131}I 、 ^{201}Tl 、 ^{67}Ga 、 ^{111}In 、 ^{123}I 等 radionuclide 及其标记物也有较多应用, 在临床中发挥着各自的特性和作用。20 世纪 70 年代以来, 随着 positron emission computed tomography (PET, 正电子发射型计算机断层仪)、小型 cyclotron (回旋加速器) 和其他各种正电子显像仪器的问世及推广应用, ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 和 ^{18}F 等短半衰期 radionuclide 的应用也逐年增多, 在研究人体生理、生化、代谢、受体等方面显示出独特优势, 其中 ^{18}F -FDG 是目前临床应用最为广泛的正电子 radiopharmaceutical。治疗用 radiopharmaceutical 种类也很多, ^{131}I 目前仍是治疗甲状腺疾病最常用的 radiopharmaceutical; $^{89}\text{SrCl}_2$ 、 ^{153}Sm -EDTMP 和 ^{188}Re -HEDP 等 radiopharmaceutical 在骨转移癌的缓解疼痛治疗中也取得了较为满意的效果; 其他治疗性 radiopharmaceutical 还有 ^{32}P 、 ^{90}Y 、 ^{131}I -MIBG 等。我国对 radiopharmaceutical 的研究自 1985 年以后发展较快, 取得了令人瞩目的成果, 尤其是一批 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ 标记的 radiopharmaceutical

的研制和合成取得成功大大促进了 clinical nuclear medicine 的发展,如 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -sestamibi、 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -ECD、 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -DTPA 等已成为心肌灌注显像、脑血流灌注显像和肾动态显像的常用 imaging agent (显像剂)。此外, $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -N (NOEt) $_2$ 、 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -HL91、 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -TRADOT-1 等一批新型 radiopharmaceutical 也开始应用于临床。

(二) 核医学仪器

Nuclear medicine 仪器是 nuclear medicine 工作中必不可少的条件,它包括 nuclear medicine 诊疗工作中所使用的各种放射性探测仪器,其中显像仪器是最重要的组成部分。1958 年 Anger 发明了第一台 γ camera (γ 照相机),为 nuclear medicine 显像技术的应用奠定了基础,使 γ camera 成为最基本的显像仪器;80 年代推出了 single photon emission computed tomography (SPECT, 单光子发射型计算机断层仪),实现了全身显像和断层显像,从而大大提高了图像的空间分辨率和诊断的灵敏度及准确性,加速了 clinical nuclear medicine 的发展, SPECT 已成为目前核医学科最常用的显像仪器; PET 是目前 nuclear medicine 领域中最先进的显像仪器,被美国 2000 年《时代周刊》评为 20 世纪最具有创意且已商业化的三大发明之一,迄今为止,全世界已有 100 多个 PET 中心;近年来研制成功了双探头和三探头 coincidence circuit SPECT (符合线路 SPECT),它在 SPECT 基础上兼有部分正电子显像功能,又称为 SPECT/PET;此外,在 PET、SPECT/PET 基础上通过添加 CT 成像系统,实现了 attenuation correction (衰减校正)与同机 image fusion (图像融合),可同时获得病变部位的功能代谢状况和精确解剖结构的定位信息,已成功用于临床。目前,我国已有 PET 12 台、SPECT/PET 18 台、SPECT 300 余台、 γ camera 100 余台。

(三) 临床核医学

1. 放射性核素显像 Radionuclide imaging 是 nuclear medicine 的重要组成部分,其检查内容几乎涵盖了全身各个系统,在心血管系统、神经系统、内分泌系统、骨骼系统以及泌尿系统疾病中的应用更为广泛。

Nuclear cardiology (核心脏病学)是 clinical nuclear medicine 的重要组成部分之一。心肌灌注显像与心室显像已成为目前无创性诊断冠心病和评价心功能的灵敏而准确的方法;门控心肌灌注断层显像在观察心肌血供状况的同时可以评价左室室壁运动和左心功能状况,具有更大的实用价值。近年来,心肌代谢显像检测存活心肌、心脏神经递质和受体显像了解心脏神经支配功能完整性等新的显像技术的应用在冠心病治疗决策、心脏介入治疗及心脏移植术后的疗效评价等方面均有重要意义。

Nuclear neurology (神经核医学)在观察和研究脑血流分布、代谢、受体等方面有着重要作用。 $r\text{CBF}$ 显像 (局部脑血流显像)是研究脑局部血供状况的常用方法,合并应用负荷试验,可以显著提高对缺血性脑血管病的诊断灵敏度和准确性;脑 ^{18}F -FDG 显像在痴呆的鉴别诊断和脑功能研究方面有其独特优势。近年来脑神经递质和受体显像也从实验室研究进入临床应用,其中 ^{123}I 标记的多巴胺 D_2 受体 (IBZM) 显像、5-羟色胺转运蛋白 (β -CIT) 显像以及 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ 标记的多巴胺转运蛋白 (TRADOT-1) 显像已开始应用于帕金森病的诊断和疗效观察、精神分裂症患者的耐药筛选及药量选择。此外,在探索人类行为、情感等生理行为变化和脑部疾患上,神经递质和受体显像越来越受到重视。这方面的研究国外已进入临床应用阶段,国内则正在起步。目前,我国已成功合成了 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -TRADOT-1 并进行了猴帕金森病模型实验和临床前研究,结果令人满意。

近年来 nuclear oncology (肿瘤核医学)异军崛起,利用 ^{67}Ga 、 ^{201}Tl 、 ^{131}I 、 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ 和 ^{18}F 等

radionuclide 及其标记化合物进行非特异性或特异性肿瘤显像在肿瘤诊断和疗效观察等方面的价值日益受到临床的关注。特别是 ^{18}F -FDG 肿瘤代谢显像在肿瘤良恶性鉴别、分级和分期、治疗后复发和坏死的鉴别、疗效和预后判断等方面具有独特优势。

此外,其他各系统的 radionuclide imaging 在长期的临床应用中 also 得到不同程度发展和完善,这里不再一一列举。

2. 放射性核素治疗 Radionuclide therapy (放射性核素治疗) 安全、经济且疗效肯定,已成为治疗疾病的一种有效手段。Radionuclide therapy 始于 40 年代中后期,当时主要用于内分泌、血液系统疾患的治疗。经过几十年的发展,经典的 ^{131}I 治疗甲状腺功能亢进症和功能性甲状腺癌转移灶及 ^{131}I -MIBG 治疗嗜铬细胞瘤等仍然是临床治疗的有效手段。近年来, $^{89}\text{SrCl}_2$ 、 ^{153}Sm -EDTMP、 ^{188}Re -HEDP 用于治疗恶性肿瘤骨转移癌引起的骨痛取得了较为满意的效果。我国研制的 ^{99}Tc -MDP (亚甲基二膦酸盐,商品名“云克”) 对类风湿性关节炎、骨转移癌骨痛治疗的疗效逐渐得到肯定。肿瘤的核素导向治疗包括放射免疫治疗,受体导向治疗已经或正在进入临床研究阶段,具有广阔前景。 ^{125}I 籽粒源组织间植入方法治疗实体瘤等肿瘤新疗法也越来越受到人们的关注。另外,冠状动脉狭窄血管成型术后进行 radionuclide 内照射治疗来预防冠脉再狭窄的方法国内已开始试用于临床,并取得了较好效果。

3. 体外放射分析 Yalow 和 Berson 于 1960 年首创 radioimmunoassay (RIA, 放射免疫分析) 法,开辟了医学检测史上的新纪元,Yalow 并因此获得了诺贝尔奖。RIA 填补了定量测定体内极微量生物活性物质方法的空白,在其后 40 年来大大推动了内分泌学科的飞速发展。我国 RIA 起步于 1962 年,当时首次建立了胰岛素的 RIA 分析方法并应用于临床,之后 RIA 试剂药盒的生产、RIA 测试仪器的研制及其临床应用方面都逐渐发展起来。目前,全国各地的大中型医院和部分基层医院都建有 RIA 实验室或 RIA 中心,能够进行激素、蛋白、抗体等 300 余种生物活性物质的检测,每年检测数量约 5 000 万人次,收到极好的社会和经济效益。在原有的基础上,其他 in vitro radioassay (体外放射分析) 方法也得到了不断发展,如高灵敏的免疫放射分析法使检测的灵敏度大大提高。近年来,in vitro radioassay 正面临着酶免疫分析、化学发光免疫分析、时间分辨荧光分析等非放射性体外分析技术的挑战,这就需要不断改进标记和检测技术及开发新的检测项目,并充分发挥 in vitro radioassay 的优势,以适应临床医学的发展。

三、回顾与展望

1895 年 Roentgen 发现 X ray, 1896 年 Becquerel 发现铀盐的放射性, 1898 年 Curi 夫妇成功提取放射性钋和镭, 1939 年 Hamiton、Soley 和 Evans 首次用 ^{131}I 诊断疾病, 1958 年 Anger γ camera 问世,经过一代代科学工作者的努力,nuclear medicine 已发生了翻天覆地的变化。今天,nuclear medicine 在功能测定、in vitro radioassay、radionuclide imaging 和 radionuclide therapy 等方面已取得了令人瞩目的成就。我国的 nuclear medicine 经过了从无到有、从小到大的发展过程,在老、中、青三代核医学工作者几十年的共同努力下,我国 nuclear medicine 事业从规模到水平都得到了良好的发展,在某些领域已达到或接近国际先进水平,nuclear medicine 技术在临床工作中已成为诊治疾病和医学研究不可缺少的手段。

科学的发展日新月异,nuclear medicine 前进的步伐也在不断加快。21 世纪,radiopharmaceutical 的发展面临着新的机遇和挑战,临床需要更多的具有高特异性的 radiopharmaceutical,其中用于肿瘤诊断和治疗的 radiopharmaceutical 是最有希望和前途的研究

领域。Nuclear medicine 显像仪器的发展主要集中在晶体的研制、计算机性能和软件技术的更新和开发以及 image fusion 技术的进一步开发应用。最新问世的 PET/CT 使 PET 图像和 CT 图像完美结合，其推广应用无疑会大大促进医学影像学 with nuclear medicine 的发展。目前，nuclear medicine 正在迈进分子时代，单克隆抗体或基因工程抗体放射免疫显像和放射免疫治疗、受体显像、基因表达显像以及反义显像等领域研究活跃，显示出 molecular nuclear medicine（分子核医学）的勃勃生机，如在心脏方面已有用 radionuclide 标记的反义寡核苷酸测定细胞内核糖核酸表达来早期探测心血管系统疾病的研究报道；抗血栓基因工程抗体的血栓显像及动脉粥样硬化斑块显像等也已处在临床研究阶段；在肿瘤方面，肿瘤的乏氧显像、受体显像、反义显像和基因表达显像研究发展也非常迅速，可以预测，nuclear oncology 将在 21 世纪攻克癌症这一难关中发挥重要作用。

相信在未来的世纪里，nuclear medicine 在疾病诊断、治疗及疾病机制研究中将发挥越来越重要的作用，为医学发展与核能的和平利用谱写新的篇章，更好地造福于人类。

(王荣福)

第一篇 核医学基础

第一章 核物理基础

核物理是研究 atomic nucleus (原子核) 特性、结构及其相互转变的学科。在人类对物质结构深入研究的过程中, 每当基础理论有重大突破时, 都会给生产和技术带来巨大变革。核物理在 20 世纪的兴起和发展, 导致了原子能和 radionuclide (放射性核素) 的应用, radionuclide 在医学中的应用, 为基础医学研究、诊断和治疗开辟了新途径。本章着重讨论 nuclear decay (核衰变) 的规律和射线对物质的作用, 为学习 nuclear medicine 奠定理论基础。

第一节 原子核的组成与稳定性

一、原子核的组成与能级

原子由 atomic nucleus 和核外电子组成。Atomic nucleus 由 proton (质子) 和 neutron (中子) 组成, proton 带一个单位的正电荷, neutron 不带电, proton 与 neutron 的质量几乎相等。Proton 和 neutron 统称为 nucleon (核子)。

Atomic nucleus 由于 nucleon 不断运动而具有一定的能量。一般情况下, atomic nucleus 处于最低能量状态, 称为基态。当 atomic nucleus 获得能量时, 如发生放射性衰变后或受到高能粒子轰击, 可跃迁到能量较高的状态, 称为激发态。激发态是不稳定的状态, 会通过能态或核结构的改变退激回到基态。

二、元素、核素、同位素和同质异能素

(一) 元素 具有相同的 proton 数的一类原子称为一种 element (元素), 它们具有相同的原子序数, 因此具有相同的化学性质, 是组成物质的基本单位。

(二) 核素 Proton 数相同, neutron 数也相同, 因而质量数相同, 并处于同一能量状态的原子, 称为一种 nuclide (核素)。同一 nuclide 不仅化学性质相同, 而且核性质相同, 是某一原子固有的特征。同一 element 可包括若干种 nuclide, 目前 element 仅百余种, 但已知的 nuclide 则有 2300 多种。

国际上通常采用 ${}^A_Z\text{X}$ 表示 nuclide, X 为元素符号、Z 为 proton 数、A 为质量数, 质量数是 proton 数与 neutron 数 (N) 之和。常简写为 ${}^A\text{X}$, 如果 nuclide 处于激发态, 则在右上角加 m, 如 ${}^{99m}_{43}\text{Tc}$ 或 ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ 。

(三) 同位素 Proton 数相同, 但 neutron 数不同的 nuclide, 它们在元素周期表中占据相同的位置, 互称为 isotope (同位素)。Isotope 是表示同一 element 的 nuclide 之间相互关系的名

称, 例如 ^1_1H 、 ^2_1H 、 ^3_1H 互为 isotope。

(四) 同质异能素 具有相同的 proton 数和 neutron 数, 处于不同核能态的 nuclide 互称为 isomer (同质异能素)。基态的原子和激发态的原子互为 isomer, 如 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 和 ^{99}Tc 互为 isomer。

三、原子核的稳定性、放射性核素

Atomic nucleus 的质量总小于组成它的所有 nucleon 的质量之和, 称为质量亏损。亏损的质量转化为原子核的结合能, 结合能可通过爱因斯坦的质能关系式 $E = mc^2$ (E 为结合能, m 为质量, c 为光速) 求得。Atomic nucleus 中 nucleon 的平均结合能可达 8 MeV, 可见 nucleon 之间存在着很强的作用力, 这种作用力称为核力, 核力是一种与电荷无关的短程强作用力, 在 10^{-15} m 以内才能表现出来。

Atomic nucleus 的稳定性由 nucleon 之间的核力产生的稳定效应和 proton 之间的静电排斥力等不稳定效应的相对大小决定。导致 atomic nucleus 不稳定的原因非常复杂, 但存在以下规律:

1. Nucleon 数目过多或过少的 nucleus 不稳定。Nucleon 数目过多, proton 之间的静电排斥力大, 因此, 自然界中 proton 的数目大于 83 的 nuclide 均不稳定; nucleon 的数目过少, 核力小, 亦不稳定。

2. 稳定的 atomic nucleus 的 proton 与 neutron 的数目有一合适的比例。对于 $Z < 20$ 的轻核, $Z = N$ 的 nucleus 稳定, 对于 $Z \geq 20$ 的原子核, $N \approx 1.5Z$ 的 nucleus 稳定 (Fig.1-1)。Proton 与 neutron 的数目严重偏离这一比例的 atomic nucleus 不稳定, 会发生由 proton 转化为 neutron, 或 neutron 转化为 proton 的 nuclear decay。

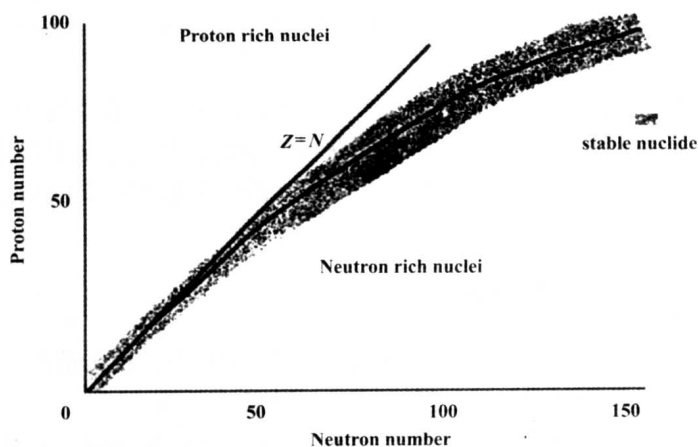


Fig. 1-1 Neutron - proton ratio with line of nuclear stability

3. Proton 与 neutron 的数目均为奇数的 nucleus (称为奇奇核) 的稳定性比 proton 与 neutron 的数目均为偶数的 nucleus (称为偶偶核) 的稳定性差。

Atomic nucleus 稳定, 不会自发衰变的 nuclide 称为 stable nuclide (稳定核素); Atomic nucleus 处于不稳定状态, 需通过核内结构或能级调整才能趋于稳定的 nuclide 称为 radionuclide, 在 2000 多种 nuclide 中, stable nuclide 仅 300 种左右, 其余均为 radionuclide。

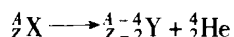
第二节 核衰变

一、核衰变方式

Radionuclide 由于核内结构或能级调整,自发地释放出一种或一种以上的射线并转化为另一种 nuclide 的过程称为 nuclear decay。Nuclear decay 的速度、方式以及释放出的射线种类和能量取决于 atomic nucleus 的特征,不受周围环境如温度、湿度以及压力等因素的影响。

Nuclear decay 的主要方式有:

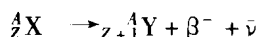
(一) α 衰变 释放出 α 射线的衰变方式称为 α decay (α 衰变)。 α 射线由 α 粒子组成,由于 α 粒子为带有两个单位正电荷、质量数为 4 的 ${}^4_2\text{He}$ 核,所以发生 α decay 后,proton 数减少 2,质量数减少 4,在元素周期表中子体的位置比母体左移两位,这就是 α decay 的位移法则。以衰变反应式表示为:



式中: X 表示母核(衰变前的 nuclide), Y 表示子核(衰变后的 nuclide)。

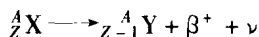
α decay 发生在原子序数 > 82 的 atomic nucleus。

(二) β^- 衰变 释放出 β^- 射线的衰变方式称为 β^- decay (β^- 衰变)。 β^- 射线由 β^- 粒子组成, β^- 粒子实质上是负电子,带一个单位的负电荷。 β^- decay 主要发生于富中子的 nuclide,因 neutron 过多致 atomic nucleus 不稳定,由 neutron 转化为 proton 而产生。发生 β^- decay 后 proton 数增加 1,质量数不变,在元素周期表中向右移动一个位置,这就是 β^- decay 的位移法则。以衰变反应式表示为:

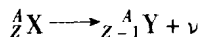


β^- decay 时释放出反中微子 ($\bar{\nu}$)。中微子 (ν) 和 $\bar{\nu}$ 是不带电荷、质量数基本为 0 的粒子,二者自旋方向相反,穿透力很强,一般探测器不能探测到。由于 $\bar{\nu}$ 带走部分能量,因此, β^- 粒子的能量分布从零到最大,形成一个连续能谱。

(三) β^+ 衰变 释放出 β^+ 粒子的衰变方式称为 β^+ decay (β^+ 衰变)。 β^+ 粒子是带一个单位正电荷、质量与电子相同的粒子,也叫 positron (正电子)。 β^+ decay 主要发生于贫中子的 nuclide,因 proton 过多致 atomic nucleus 不稳定,由 proton 转化为 neutron 而产生。发生 β^+ decay 后 proton 数减少 1、质量数不变,放出一个 ν ,在元素周期表中向左移动一个位置,这就是 β^+ decay 的位移法则。以衰变反应式表示为:



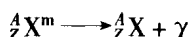
(四) 电子俘获 Electron capture (EC, 电子俘获) 就是 nuclear decay 时由核外俘获一个轨道电子。EC 也发生在贫中子的 nuclide,它是在核内 neutron 相对不足时从核外内层的电子轨道上俘获一个电子,使核内一个 proton 转化为 neutron,同时放出一个 ν 的过程。发生 EC 后,子核 proton 数减少 1、质量数不变,在元素周期表中向左移动一个位置。以衰变反应式表示为:



发生 EC 后,核外内层轨道缺少了电子,外层轨道电子填充到内层轨道上,外层电子比内层电子的能量大,多余的能量以 X ray 的形式释放,称为 characteristic X ray (特征 X 射线)。多余的能量也可以传递给更外层的轨道电子,使之脱离轨道而释出,此电子称为 Auger

electron (俄歇电子)。

(五) γ 衰变 Nuclide 由激发态向基态或由高能态向低能态跃迁时, 放出 γ 射线的衰变过程称为 γ decay (γ 衰变), 又称 γ 跃迁或同质异能跃迁。 γ 射线由光子组成, 又称为 γ 光子。因为 γ 射线不带电荷, 质量数为 0, 所以发生 γ decay 后 proton 数和质量数都不变, 只是能量状态发生改变。以衰变反应式表示为:



Atomic nucleus 的激发能也可以直接传递给核外的内层电子, 使之脱离轨道成为自由电子, 这一过程称为 internal conversion (内转换), 发射的电子叫做 internal conversion electron (IE, 内转换电子)。发生 internal conversion 后该层轨道的空缺随后也由外层电子填补, 从而发射 characteristic X ray 或 Auger electron。

二、核衰变的基本定律

任何 radionuclide 的 atomic nucleus 虽然都可能发生衰变, 但并非是同时衰变, 实验和理论证明, radionuclide 在单位时间内的衰变率 ($-dN/dt$) 与现有的原子数 N 成正比, 每一种 radionuclide 在单位时间内衰变的百分数是一个常数, 称为 decay constant (λ , 衰变常数), 即:

$$(-dN/dt) / N = \lambda$$

$$-dN/dt = \lambda N$$

对该式进行积分, 并且利用初始条件 $t=0$ 时, $N=N_0$, 得到:

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

这就是放射性衰变定律的表示式, 它表明放射性物质按指数规律衰减。

单位时间内 atomic nucleus 的衰变数量定义为 radioactivity (A , 放射性活度), 其国际制单位是 Bq (贝克), 1 Bq 表示 radionuclide 在一秒中内发生一次 nuclear decay。惯用单位是 Ci (居里), $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ 。由于 Bq 单位太小, 而 Ci 单位较大, 因此通常采用 kBq (10^3 Bq)、MBq (10^6 Bq)、GBq (10^9 Bq), 或 mCi (10^{-3} Ci)、 μCi (10^{-6} Ci) 为单位。Radioactivity 是核医学中常用的反映放射性强弱的物理量。 $A = -dN/dt = \lambda N$, 因此:

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

式中, A_0 为初始时间的 radioactivity, A 为经过 t 时间的 radioactivity。这一公式表明 radioactivity 随时间呈指数规律减少。

Decay constant 是反映 radionuclide 衰变速度的物理量, 是 radionuclide 的一个重要特征参数。除 decay constant 外, 反映 radionuclide 衰变速度的一个更常用的物理量是 physical half life ($T_{1/2}$, 物理半衰期), $T_{1/2}$ 是指 radioactivity 减少一半所需要的时间, $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ 。

Radionuclide 应用于人体或生物体内时, 还会遇到另外两种半衰期: biological half life (T_b , 生物半排期) 和 effective half life (T_{eff} , 有效半减期)。 T_b 是指生物体内的 radionuclide 经由各种途径从体内排出一半所需要的时间; T_{eff} 指生物体内的 radionuclide 由于从体内排出和物理衰变两个因素作用, 减少至原有 radioactivity 的一半所需的时间。Radionuclide 总的减少速率等于物理衰变速率与生物排泄速率之和, 即 $\lambda_{\text{eff}} = \lambda_b + \lambda$, 所以:

$$T_{\text{eff}} = T_{1/2} \cdot T_b / (T_{1/2} + T_b)$$

三、放射性活度与质量的关系

在 nuclear medicine 中, radioactivity (A) 可用核仪器测量得到, 通过 radioactivity 可求出