



国家卫生健康委员会“十三五”规划教材配套教材
全国高等学校配套教材
供基础、临床、预防、口腔医学类专业用

第**3**版

核医学 实习指导

主 编 王荣福 安 锐

副主编 王跃涛 闫 平



人民卫生出版社
PEOPLE'S MEDICAL PUBLISHING HOUSE



国家卫生健康委员会“十三五”规划教材配套教材
全国高等学校配套教材
供基础、临床、预防、口腔医学类专业用

核医学 实习指导

第③版

主 编 王荣福 安 锐

副主编 王跃涛 闫 平



人民卫生出版社

图书在版编目(CIP)数据

核医学实习指导 / 王荣福, 安锐主编. —3版. —
北京: 人民卫生出版社, 2019
全国高等学校五年制本科临床医学专业第九轮规划教
材配套教材
ISBN 978-7-117-28575-9

I. ①核… II. ①王…②安… III. ①核医学 - 高等
学校 - 教学参考资料 IV. ①R81

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 103044 号

人卫智网	www.ipmph.com	医学教育、学术、考试、健康, 购书智慧智能综合服务平台
人卫官网	www.pmph.com	人卫官方资讯发布平台

版权所有, 侵权必究!

核医学实习指导

第 3 版

主 编: 王荣福 安 锐
出版发行: 人民卫生出版社 (中继线 010-59780011)
地 址: 北京市朝阳区潘家园南里 19 号
邮 编: 100021
E - mail: pmph@pmph.com
购书热线: 010-59787592 010-59787584 010-65264830
印 刷: 天津安泰印刷有限公司
经 销: 新华书店
开 本: 787 × 1092 1/16 印张: 12 插页: 16
字 数: 315 千字
版 次: 2008 年 6 月第 1 版 2019 年 8 月第 3 版
2019 年 8 月第 3 版第 1 次印刷 (总第 3 次印刷)
标准书号: ISBN 978-7-117-28575-9
定 价: 45.00 元
打击盗版举报电话: 010-59787491 E-mail: WQ@pmph.com
(凡属印装质量问题请与本社市场营销中心联系退换)

编者

(以姓氏笔画为序)

于明明 (青岛大学附属医院)

王荣福 (北京大学第一医院)

王雪鹃 (北京大学肿瘤医院)

王跃涛 (苏州大学附属第三医院)

卢霞 (首都医科大学附属北京安贞医院)

申强 (北京大学国际医院)

朱小华 (华中科技大学同济医学院附属同济医院)

刘纯 (兰州大学第一医院)

刘志翔 (潍坊医学院附属医院)

闫平 (北京大学第一医院)

安锐 (华中科技大学同济医学院附属协和医院)

孙希刚 (聊城市第二人民医院)

李勇 (哈尔滨医科大学附属第一医院)

李小东 (北京大学国际医院)

李林法 (浙江省肿瘤医院)

李雪娜 (中国医科大学附属第一医院)

杨吉刚 (首都医科大学附属北京友谊医院)

吴湖炳 (南方医科大学南方医院)

邸丽娟 (北京大学第一医院)

宋少莉 (复旦大学附属肿瘤医院)

张万春 (山西医学科学院 山西大医院)

张卫方 (北京大学第三医院)

陈文新 (福建省立医院)

邵晓梁 (苏州大学附属第三医院)

范岩 (北京大学第一医院)

罗云霄 (吉林大学第二医院)

赵倩 (宁夏医科大学总医院)

胡硕 (中南大学湘雅医院)

徐浩 (暨南大学附属第一医院)

彭志平 (重庆医科大学)

褚玉 (中国科学院大学宁波华美医院)

编写秘书

邸丽娟 (兼)

为全面贯彻落实“全国医学教育改革发展工作会议”及《关于深化医教协同进一步推进医学教育改革与发展的意见》(国办发〔2017〕63号)的精神,人民卫生出版社精心策划和组织全面启动全国高等学校五年制本科临床医学专业第九轮规划教材修订工作,“十三五”规划教材《核医学》主干教材,已由人民卫生出版社出版发行。这是在各医药院校的大力支持下与人民卫生出版社精心策划并组织全国高等医药院校长年从事核医学医疗、教学和科研的一线教师联合编写并被誉为中国医学教育的“干细胞”《核医学》教材,本教材充分体现了权威性、实用性和科学性。

为了广大师生能更深入地领会教和学好本教材,遵循五年制临床医学专业培养目标,体现以“5+3”(5年本科教育+3年临床规培实践)为主体的临床医学教育综合改革精神,借助现代教育手段优势,帮助学生“早临床、多临床、反复临床”,注重强化创新能力与实践能力的培养,加强培养医学生灵活运用核医学知识解决临床实际问题能力,为学生知识、能力、素质协调发展创造条件。我们在《核医学》主干教材基础上编写了配套教材《核医学实习指导》和《核医学学习指导与习题集》。

为了给任课教师的教学提供方便,使学生能更好理解和全面掌握核医学大课传授的理论知识,理论紧密结合临床实践,《核医学实习指导》教材再版,克服和改变传统的灌输式的教育方法,遵循“以问题为中心”,调动学生的积极性,营造学生自主学习的氛围。该教材内容全面而精练,概念准确、层次清晰,重点突出,注重实用。它不完全是《核医学》主干教材学生用书的翻版与压缩,而是来自全国高等医学院校奋战在教学一线的老教师们多年来从事临床医学教育的集体智慧结晶,书中字字句句都凝练了老师们宝贵的临床教学经验和体会。本书是一本目前临床医学生难得的核医学教科书。

《核医学实习指导》全书共24章,其章次顺序、内容与《核医学》主干教材相匹配。每一章包括五部分内容:①实习目的与要求,以掌握、熟悉和了解的表述方式明确告知学生学习该章节的重点和难点。②实践学时,本书中列出的实践学时数供各院校参考,建议各院校根据本单位教学大纲和具体要求作相应的调整。③实习内容,是本教材的重中之重和精髓,亦是主干教材的核心部分。主要内容为相关检查的原理、方法、检查结果分析与判断、适应证和临床应用意义等。④病历分析或知识拓展。⑤为了便于学生了解和掌握本章节知识,分别进行了小结。第一章到第八章基础篇为核医学基础知识、体外分析技术和放射防护,这部分内容主要涉及相关领域应用进展与前景。第九章到第二十四章为临床篇,其中第九章到第十八章主要内容为诊断核医学,通过病例分析与思考,主要检测学生通过学习本篇内容并结合相关专业对疾病进行诊断、鉴别诊断的分析和解决问题的能力,部分病例分析还包括放射性核素显像的影像分析、体外分析、功能测定及相关影像学技术应用比较等;第十九章到第二十三章为治疗核医学,注重培养学生充分了解核素示踪技术在疾病靶向治疗中的临床应用价值,了解各学科之间的交叉融合,掌握各种治疗手段的综合运用

是核医学放射性核素治疗的主要发展趋势;第二十四章为核医学在儿科疾病中的应用,是本版的新增内容,随着核医学受检人群的扩展,需要学生掌握核医学在儿科骨骼、消化、泌尿系统疾病中的临床应用。为了教与学的相互配合和相互促进,进一步调动学生学习兴趣与再提高,书中还编入了核医学发展历史和新进展。将《核医学》融合教材、《核医学实习指导》《核医学学习指导与习题集》配套教材有机集为一体的系统和规范教材的问世,将极大地方便教师教学,有利于学生复习与巩固,同时为核医学专业资格、核医学技术专业资格晋升考试提供了很好的复习素材。

编写过程中得到有关高等医学院校领导的鼎力支持和各位编写者的通力合作,本书编写秘书邸丽娟副主任医师在统稿过程中做了大量工作,在此一并致谢。

编写本书要求高、时间短、内容丰富精练、简明扼要。教材新编,难免存在错误和不妥之处,真诚地希望广大读者批评指正。

王荣福 安锐

2019.1

目 录

绪论	1
基础篇	7
第一章 核医学物理基础	7
第二章 核医学仪器	14
第三章 放射性药物	22
第四章 核素示踪与核医学显像技术	30
第五章 核医学分子影像	35
第六章 体外分析技术	40
第七章 计算机技术在核医学中的应用	52
第八章 辐射防护	54
临床篇	67
第九章 肿瘤显像	67
第十章 心血管系统	83
第十一章 神经系统	87
第十二章 骨骼系统	94
第十三章 内分泌系统	102
第十四章 泌尿系统	111
第十五章 消化系统	121
第十六章 呼吸系统	130
第十七章 造血与淋巴系统	134
第十八章 炎症显像	143
第十九章 放射性核素治疗概论	148

第二十章 ^{131}I 治疗甲状腺疾病	151
第二十一章 放射性核素治疗恶性肿瘤骨转移	161
第二十二章 放射性粒子植入治疗	166
第二十三章 其他放射性核素治疗	169
第二十四章 核医学在儿科疾病的应用	173

绪 论

一、目的与要求

1. 掌握 核医学的定义、内容和特点。
2. 熟悉 现代核医学与分子影像学的新技术应用及其进展。
3. 了解 核医学发展历史与现状。

二、实践学时

0.5 学时。

三、实习内容

(一) 核医学定义、内容

1. 核医学是利用核素示踪技术 (radionuclide tracing technique) 实现分子功能显像 (molecular functional imaging) 诊断和靶向治疗 (targeted therapy) 的最具有新时代的专业学科特色, 其主要利用核素示踪进行生物医学基础理论的研究, 探索生命现象本质和物质变化规律, 为认识正常生理、生化过程和病理过程提供新理论和新技术, 其与分子生物学技术 (molecular biological technique) 紧密有机结合衍生了分子核医学 (molecular nuclear medicine)。分子核医学应用核素示踪技术从分子和细胞水平认识疾病, 阐明病变组织受体密度与功能的变化、基因的异常表达、生化代谢变化及细胞信息传导异常等探索生命现象本质和物质变化规律, 为认识正常生理、生化过程和病理过程提供新理论和新技术, 为临床诊断、治疗和疾病的研究提供分子水平信息的核医学分支学科。

2. 核医学是利用核素及其标记化合物 (labeled compound) 用于诊断和治疗疾病的临床医学学科, 包括诊断核医学 (diagnostic nuclear medicine) 和治疗核医学 (therapeutic nuclear medicine)。

诊断核医学包括放射性核素显像 (radionuclide imaging, RI) 及脏器功能测定为主的体内 (in vivo) 诊断法以及体外放射分析为主的体外 (in vitro) 诊断法。

放射性核素显像是利用放射性核素及其标记化合物进行脏器或病灶功能显像的方法, 是一种独特的分子功能影像, 是核医学的重要特征之一。

脏器功能测定利用核素示踪方法获得机体或器官血流、生理或生化等功能参数的检测技术, 若以时间 - 放射性曲线 (time-activity curve, TAC) 等显示形式进行脏器功能测定的方法则称为非显像检查法。

体外分析是以放射免疫分析 (radioimmunoassay, RIA) 为代表的体内微量生物活性物质定量分析技术, 是将核医学的相关核技术应用于医学检验领域, 是现代医学检验学的重要组成部分, 已成

为医学检验技术现代化的重要标志之一。

治疗核医学是通过高度选择性聚集在病变部位的放射性核素或其标记化合物所发射出的射线很短的核射线,对病变部位进行内照射治疗。

(二) 核医学特点

核医学分子功能显像是放射性核素本身、放射性核素标记的分子探针(molecular probe)和/或显像剂(imaging agent)、示踪剂(tracer)引入机体后,探测并记录引入体内靶组织或器官的放射性示踪剂发射的 γ 射线或 γ 光子,以影像的方式显示出来。这不仅可以显示脏器或病变的位置、形态、大小等解剖学结构,更重要的是可以同时提供有关脏器和病变的血流、功能、代谢和受体密度的信息,甚至是分子水平的化学信息。

此外,放射性核素显像为无创性检查。所用的放射性核素物理半衰期(physical half life, $T_{1/2}$)短,化学量极微,患者所接受的辐射吸收剂量(absorbed dose)低,因此发生毒副作用的概率极低。

综上,核医学特点可归纳为:①灵敏度高:可以精确探测出极微量的物质,一般可达 $10^{-18}\sim 10^{-14}$ g;②方法简便、准确:由于探测的是核射线,不受其他物理或化学因素的影响,同时不受反应体系中其他非放射性物质的干扰,减少了许多可能导致误差的分离、提纯等步骤;③合乎生理条件:由于放射性核素技术方法灵敏度高,所需化学量很少,不至于干扰和破坏体内生理过程的平衡;④定性、定量、定位研究的相结合;⑤专业技术性强:放射性核素示踪技术涉及核物理、核化学与放射化学、数学、核医学、放射医学、生物医学工程和计算机等多学科,同时需要具有一定专业训练和素质的技术人员。

(三) 核医学发展与现状

核医学的发展历经了放射性的发现、人工产生放射性核素、放射性药物研发、核医学显像仪器的研制、临床核医学与分子核医学、人工智能与影像组学应用研究等过程。

1. 放射性的发现 1896年 Becquerel 发现铀[^{238}U]的天然放射性,从而打开了核物理学的大门。为表彰其贡献,国际制放射性活度单位就是以 Becquerel 命名(Bq)。

2. 人工生产放射性核素 1898年 Curie 夫妇成功提炼出镭[^{226}Ra]和钋[^{218}Po]放射性核素,并用于治疗疾病,从此放射性核素 ^{226}Ra 治疗方法揭开了核医学的序幕。同样为表彰 Curie 夫妇的巨大贡献,现采用的习惯制放射性活度单位就是以 Curie 命名(Ci)。1923年 Hevesy 应用天然的放射性同位素铅[^{212}Pb]研究植物不同部位的铅含量,后来又应用磷[^{32}P]研究磷在活体的代谢途径等,提出了“示踪技术”(trace technology)的概念。1930年 Lawrence 发明了医用回旋加速器(cyclotron)。1934年 Joliot 和 Curie 应用人工核反应堆生产出放射性核素。1939年 Hamilton、Solley 和 Evans 首次用碘[^{131}I]诊断甲状腺疾病。1942年 Fermi 等人建立了第一座核反应堆。20世纪70年代,钼[^{99}Mo]-锝[$^{99\text{m}}\text{Tc}$]发生器(generator)的研制成功和广泛应用。

3. 放射性药物研发 随着核反应堆、医用回旋加速器、裂变产物提取和放射性核素发生器等不同途径生产各种放射性核素,诸如 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、镓[^{67}Ga]、铊[^{201}Tl]、铟[^{111}In]、 ^{123}I 、碳[^{11}C]、氮[^{13}N]、氧[^{15}O]、氟[^{18}F];随着核化学(nuclear chemistry)与放射化学(radiochemistry)不断合成产出新的前体(precursor)和被标记的化合物(labeled compounds)以及放射性药理学(radiopharmacology)的标记方法和制药工艺改进,尤其医用回旋加速器制备超短半衰期正电子放射性核素,如[^{11}C]、[^{13}N]、[^{15}O]和[^{18}F],配套全自动放射性药物合成仪,建立快速标记法,研制一系列新型血流、代谢、受体、基因显像剂。

4. 核医学显像仪器的研制 1951年 Cassen 研制出第一台逐点打印获得脏器放射性分布图像的扫描机(scanner),20世纪70年代初我国自主研发出长城扫描机。1952年和1959年 David Kuhl

先后设计了扫描机光点打印法和研制了双探头的扫描机进行断层扫描,并首先提出了发射重建断层的技术,从而为日后 SPECT 和 PET 的研制奠定了基础。1957 年 Anger 研制出第一台 γ 照相机(γ camera)。20 世纪 80 年代,SPECT 广泛应用于临床,90 年代 PET 应用于临床,直到 21 世纪 SPECT/CT、PET/CT、PET/MR 的广泛应用。

我们国家十分重视研发具有我国自主知识产权国产化核医学显像设备,迄今,我们国家已有 7 个企业厂家生产 PET、PET/CT,其中 6 个厂家的 PET/CT 已获得国家医疗器械注册证。上海联影医疗科技有限公司(简称“上海联影”)生产的 PET/CT、PET/MR 等具有代表性核医学设备与国外厂家的同类产品可媲美。近年来,上海联影与美国加州大学 UC DAVIS 联合申报全景 PET/CT《Total-body human PET scanner (2 meters in axial)-EXPLORER》项目获美国 NIH 批准,有望 2019 年问世并即将推广临床应用。全身 PET/CT 不但解决了目前 PET/CT 的局限性,还可以提供更加符合人体生理、生化的代谢功能信息。

5. 临床核医学与分子核医学

(1) 放射性核素显像和功能测定:近年来特别是 ^{18}F -FDG PET/CT、PET/MR 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、不明原因发热探测和寻找原发灶、疗效和预后判断及辅助放射治疗生物靶区勾画等方面具有独特优势,并得到临床认可。

随着正电子放射性药物(positron radiopharmaceuticals)的广泛应用,以肿瘤代谢、乏氧、受体等为对象的肿瘤分子功能显像展示了美好的前景。代谢显像中除葡萄糖代谢显像外,核苷酸和氨基酸代谢显像等临床应用研究已彰显出重要临床价值。放射免疫显像(radioimmunoimaging, RI)临床应用至今检查患者超过数万例,尤其近年来镓[^{68}Ga]/镥[^{177}Lu]/锆[^{89}Zr]标记的前列腺特异膜蛋白抗原(prostate specific membrane antigen, PMSA)在前列腺癌诊治及早期检测淋巴结转移提供了一种新的手段。近期,抗程序性死亡分子 1(programmed death-1, PD-1)/PD-1 配体(PD-1ligand, PD-L1)单抗作为抗肿瘤新型药物备受人们关注和期待,其在晚期肿瘤的治疗中纷纷取得了突破性进展,可以预测利用放射性核素标记 PD-1 和 / 或 PD-L1 的放射免疫治疗(radioimmunotherapy, RIT)技术即将到来,为攻克晚期肿瘤治疗提供又一个新疗法。

甲状腺摄碘率(rate of thyroid iodine taken)和有效半衰期(effective half life, T_e)测定、肾动态显像肾小球滤过率(glomerular filtration rate, GFR)、肾有效血浆流量(effective renal plasma flow, ERPF)测定和获取肾图相关参数、平衡法心室显像(equilibrium ventricular imaging)测定心室功能获得心室收缩和舒张功能参数等脏器功能测定技术的发展和运用,为临床诊治提供了重要的参考依据。

(2) 放射性核素治疗: ^{131}I 治疗甲状腺功能亢进症和分化型甲状腺癌术后残留、局部淋巴结转移或肺转移灶,利用 3D 打印技术开展 ^{125}I 粒子植入近距离治疗难治性恶性肿瘤的临床价值已得到肯定, ^{131}I -MIBG 治疗嗜铬细胞瘤等仍然是临床治疗的有效手段。迄今已有核医学 ^{131}I 治疗甲状腺疾病的规范、临床路径和专家共识。近年来,锶[^{89}Sr]Cl₂、镭[^{223}Ra]Cl₂、钐[^{153}Sm]-EDTMP 和铼[^{188}Re]-HEDP 等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。国家 I 类新药 ^{131}I -美妥昔单抗注射液治疗原发性肝癌和 ^{131}I -chTNT 抗肿瘤坏死单克隆抗体药物治疗肺癌、宫颈癌、脑胶质瘤的临床应用在深入开展。

(3) 体外放射分析:1959 年美国科学家 Berson 和 Yalow 建立了放射免疫分析法并获得诺贝尔生理学或医学奖,Berson 和 Yalow 首先用于测定血浆胰岛素浓度,后来人们将其逐步发展到能测定人体各种激素或微量物质,阐明了人体各种激素的分泌、调节及其规律。20 世纪 90 年代开始,在放射免疫分析技术基础上建立起来的化学发光、时间分辨荧光等非放射标记免疫分析技术广泛应

用于临床,大大推动了免疫学和检验学科发展。

6. 人工智能与影像组学 人工智能(artificial intelligence, AI)是研究、开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用系统的一门新的技术科学。人工智能领域的研究包括机器人、语言识别、图像识别、自然语言处理和专家系统等。影像组学(radiomics)的深层次含义是指从影像(CT、MRI、PET等)中高通量地提取大量影像信息,实现肿瘤分割、特征提取与模型建立,凭借对海量影像数据信息进行更深层次的挖掘、预测和分析来辅助临床医师作出更准确的诊断。影像组学技术来源于计算机辅助诊断(computer aided diagnosis, CAD),是医工交叉协同的产物。近年来大数据技术与医学影像辅助诊断的有机融合产生了新的影像组学方法,其通过从影像中提取海量特征来量化肿瘤等重大疾病,可以有效解决肿瘤异质性难以定量评估的问题,具有重要的临床应用价值。核医学分子影像技术、算法技术、深度学习人工智能技术等必将引领未来影像学的前沿进展,深入探讨人工智能的挑战和实用价值及其人工智能加影像组学的研究进展,进而从影像组学到影像基因组学(image genomics)前沿性探索具有重要意义。

7. 学科发展与人才培养 国家卫生健康委员会临床重点专科及住院医师规范化培训基地核医学专业基地标准相关文件明确规定核医学科室为独立科室,具备放射性核素显像、功能测定、体外分析和放射性核素治疗功能,因此切实做好核医学学科建设发展和人才培养极为重要。学科应具备高层次人才和优秀团队,目前我国核医学科处于可持续性稳定发展,尤其211和985高校附属医院涌现出一批核医学学科的长江学者、国家杰出青年科学基金项目、青年千人计划项目、优秀青年科学基金项目获得者等拔尖人才;一些医院还获批教育部“放射性药物重点实验室”,以及国家、省部级核医学与分子影像临床转化重点实验室;多家医院核医学科承担了国家、省部级基金项目,制定和撰写了国家和地方疾病预防和诊治标准、规范、指南和专家共识,还组建了核医学质量控制和改进中心,编写了研究生、长学制、本科、住院医师规范化培训和专科培训等教材及核医学与分子影像的专著,建立了核医学专业博士后流动站、博士点和硕士点,培养了一批优秀核医学专业青年学者,他(她)们各自在不平凡工作岗位发挥重要作用。这些多是目前我国核医学得以稳定可持续性发展的重要保证。国内多所高校及各家附属医院与相关核医学分子影像设备生产厂家或企业合作,共同建设“分子影像中心”。通过高水平基础学科研究与临床应用研究、技术转化和工业化生产的有机结合,促进医学教育、研究、开发和产业化的高效链接,推动“产、学、研、用”相结合的技术创新体系建设,形成一个分子功能影像研究、开发、应用一体化的分子影像中心,推动我国心脑血管病、肿瘤等重大疾病的精准医疗和个性化医疗的发展,彰显核医学在医学应用的重要地位和独特优势。

8. 我国核医学状况 “中国核医学之父”王世真先生于1956年在西安第四军医大学创办生物医学同位素应用训练班,标志着我国核医学的诞生。此后1958年在北京开办第一个同位素临床应用学习班,20世纪60年代我国放射性药物研发和放射性探测器研制成功以及SPECT和PET问世, ^{99m}Tc 为代表的短半衰期和具有优良的物理性能放射性核素标记药物的研发和体外放射免疫分析技术的推广应用等大大促进我国核医学的发展。目前我国从事核医学专业人员近万人;全国900多个科室,其中260个科室开设核素病房达5000多张床位;SPECT/CT和SPECT 800多台(各自400多台),每年检查达200多万人次;PET/CT 300多台,每年检查达80万人次;PET/MR 7台,每年检查人次不断增加;医用回旋加速器及自动放药合成仪近110套,其生产的多种正电子放射性药物为临床常规检查和开展临床研究提供了基本保证;体外分析每年检测超过1亿人次。

核医学在临床工作中已成为诊治疾病和医学研究不可缺少的独立医学学科,真诚期待同学们

通过绪论的学习,进一步了解核医学、学好核医学、热爱核医学和用好或从事核医学,掌握核科学技术在医学应用的基本理论知识和临床技能本领,实现人生价值观和从医历史赋予的使命。

四、思考题

请简述核医学特点。

(邴丽娟 王荣福)

基础篇

第一章

核医学物理基础

一、目的和要求

掌握 核物理的基本概念,核衰变的类型,射线与物质的相互作用(物理效应)。

二、实践学时

本章节实践 2 学时。

三、实习内容

(一) 核物理的基本概念

1. 原子结构 物质都是由原子组成的,不同元素的原子具有不同的性质,但是原子的基本结构大致相同。1869 年门捷列夫(Mendeleev)发现元素周期表。1895 年伦琴(Roentgen)发现 X 射线,1896 年贝克勒尔(Becquerel)发现放射性物质,1901 年他发现从铀原子中发射出的高速电子流(β 射线)。1911 年,卢瑟福(Rutherford)提出了原子的核式模型,即原子是由一个原子核(带有正电荷)和若干个绕核运动的电子所组成。1913 年,玻尔(Bohr)在卢瑟福的核式模型基础上,提出了众所周知的玻尔原子模型。现在我们知道原子由处于原子中心的原子核和带负电荷的核外电子组成。

2. 核素、同位素、同质异能素

(1) 核素:原子核的质子数、中子数和原子核所处的能量状态均相同的原子属于同一种核素(nuclide)。例如氢[${}^1_1\text{H}$]、碳[${}^{12}_6\text{C}$]、金[${}^{198}_{79}\text{Au}$]表示不同的核素。

(2) 同位素:凡原子核具有相同的质子数而中子数不同的元素互为同位素(isotope)。如碘[${}^{125}\text{I}$]、 ${}^{131}\text{I}$ 、 ${}^{132}\text{I}$ 在元素周期表中处于同一位置,是同一元素碘元素。一种元素往往有几种甚至几十种同位素。一种元素所有同位素的化学和生物性质几乎都一样,但物理性质可能有所不同。

(3) 同质异能素:核内中子数和质子数都相同但能量状态不同的核素彼此称为同质异能素(isomer)。原子核可以处于不同的能量状态,最低能量状态为基态,激发态是继发于某些核反应、核裂变及放射性衰变后形成的。对于激发态的核素,在原子质量数的后面加一个小写的“m”来表示,例如锝[${}^{99\text{m}}\text{Tc}$]是 ${}^{99}\text{Tc}$ 的激发态,二者互为同质异能素。

(二) 核衰变

原子核分为两大类,一类为稳定原子核,即原子稳定存在。原子核只有当中子和质子的数目保持一定的比例,才能稳定结合,相应的核素称为稳定核素(stable nuclide)。另一类原子核则是不

稳定的,会自发转变成别的原子核,或自发地发生核能态变化,并伴有射线的发射,这类原子称为放射性原子,相应的核素称为放射性核素(radioactive nuclide)。放射性核素发生上述变化的过程称为放射性核衰变(radioactive decay),常简称核衰变。用人工的方法改变质子和中子的比例,可以使稳定性原子核变成不稳定的放射性核素。

1. 放射性衰变的类型

(1) α 衰变:不稳定原子核自发地放射出 α 粒子,而变成另一个核素的过程称为 α 衰变(alpha decay)。 α 粒子实际上就是氦原子核 ${}^4_2\text{He}$ 。

α 衰变发生在原子序数大于 82 的重元素核素。 α 射线射程短,很容易被物质吸收,一张纸就能阻挡 α 粒子的通过,因而不能用于核医学显像。由于其对局部组织的电离作用强,而不损害远处组织,故可用于恶性组织的放射性核素内照射治疗。

(2) β 衰变:核衰变时放射出 β 粒子或俘获轨道电子的衰变称为 β 衰变(beta decay),其分为 β^- 、 β^+ 和电子俘获三种。

1) β^- 衰变:放射性核素的核内放射出 β^- 射线的衰变方式称为 β^- 衰变。发生在质量较轻、中子过多的原子核。

β^- 射线的本质是高速运动的负电子流, β^- 粒子穿透力较弱,不能用于核素显像。 β^- 粒子在空气中射程比 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。临床上常用 β^- 衰变核素,例如 ${}^{131}\text{I}$ 、 ${}^{32}\text{P}$ 、 ${}^{89}\text{Sr}$ 等进行核素治疗。

2) β^+ 衰变:由于核内中子缺乏而放射出正电子的衰变,称为正电子衰变,也叫 β^+ 衰变。

β^+ 衰变的核素,都是人工放射性核素,天然的核素不发生 β^+ 衰变。正电子与其邻近的电子(β^-)碰撞而发生湮灭辐射(annihilation radiation),失去电子质量,转变成两个方向相反、能量皆为 511keV 的 γ 光子。正电子发射断层成像(positron emission tomography, PET)能探测方向相反的 511keV 光子,进行机体内的定量、定性分析和代谢显像。

3) 电子俘获衰变:原子核俘获一个核外轨道电子使核内一个质子转变成一个中子和放出一个中微子的过程称为电子俘获衰变(electron capture, EC)。EC 发生在缺中子的原子核,与正电子衰变时核结构的改变相似。

(3) γ 衰变和内转换

1) γ 衰变:激发态的原子核以放出 γ 射线(光子)的形式释放能量而跃迁到较低能量级的过程称 γ 衰变(gamma decay)。

γ 射线的本质是中性的光子流,电离能力很小,穿透能力强,适合核素显像。例如核素钼 [${}^{99}\text{Mo}$],衰变时放出 β 射线,产生子体放射性核素 ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$, ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发射能量为 141keV 的纯 γ 射线回复到基态 ${}^{99}\text{Tc}$, ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ 已广泛用来标记各种显像剂。而 ${}^{131}\text{I}$ 衰变可同时放出 β 射线和 γ 射线,故它既可用于治疗也可用于显像。

2) 内转换:核素的原子核由激发态向基态或由高能态向低能态跃迁时,将多余的能量直接传给核外电子,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,这一过程称为内转换(internal conversion)。因内转换放射出的自由电子称为内转换电子。

2. 核衰变的基本定律

(1) 衰变规律:放射性核素的衰变是遵循一定的指数规律衰减的,不同放射性核素有不同的衰变常数,以 λ 表示。放射性核素单位时间内衰变的原子核数(即衰变率 $\frac{dN}{dt}$)与现有的原子核总数

N 成正比,即 $\frac{dN}{dt} = -\lambda N$,式中负号表示原子核由于衰变而逐渐减少。将上式积分,得 $N = N_0 e^{-\lambda t}$ 。式

中 N, N_0 分别是经过时间 t 衰变后剩下的原子核数和 $t=0$ 时的原子核数。

(2) 半衰期:半衰期在实际工作中是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(physical half life, $T_{1/2}$)、生物半衰期(biological half life, T_b)和有效半衰期(effective half life, T_e)。

1) 物理半衰期:系指放射性核素数目因衰变减少到原来的一半所需的时间,其是每一种放射性核素所特有的,可通过测定半衰期确定核素种类,甚至推断放射性核素混合物中核素种类。

各种放射性核素的半衰期长短不一,可长达 10^{10} 年,可短至 10^{-10} 秒;一般把半衰期短于 10 小时的核素称为短半衰期核素,短半衰期核素在临床诊断和医学研究中的应用是核医学发展的重要研究内容。

2) 生物半衰期和有效半衰期:进入生物体内的放射性核素或其化合物,由于生物代谢从体内排出到原来的一半所需的时间,称为生物半衰期;由于物理衰变与生物的代谢共同作用而使体内放射性核素减少一半所需要的时间,称有效半衰期。三者关系如下:

$$\frac{1}{T_e} = \frac{1}{T_{1/2}} + \frac{1}{T_b} \quad \text{式(1-1)}$$

$$T_e = \frac{T_{1/2} \times T_b}{T_{1/2} + T_b} \quad \text{式(1-2)}$$

许多放射性核素并非一次衰变就达到稳定,有些放射核素衰变后形成的子核仍为放射性核素,子核又以本身的规律继续衰变,直至衰变成稳定性核素,即所谓连续衰变。临床核医学使用的钼-锝核素发生器是连续衰变之一。 $^{99}\text{Mo}(t_{1/2}=66.02\text{小时}) \rightarrow ^{99\text{m}}\text{Tc}(t_{1/2}=6.02\text{小时}) \rightarrow ^{99}\text{Tc}(t_{1/2}=2.12 \times 10^5\text{年}) \rightarrow ^{99}\text{Ru}$ 。

当母核半衰期很长,而子核的衰变远比母核快,经过一定时间衰变后,子体核素与母体核素的原子核数以一定的比例达到平衡,两者的衰变率基本相等,称为长期平衡。例如锡-铟核素发生器等属于这一类。



(3) 放射性活度:放射性活度(radioactivity, A)是表示单位时间内发生衰变的原子核数。过去惯称放射性强度。

在新的国际制单位(英文全称,SI)中,放射性活度的单位是贝克(Becquerel, Bq),定义为每秒一次衰变。即 $1\text{Bq}=1\text{S}^{-1}$

放射性活度的旧制单位是居里(Curie, Ci),1居里表示每秒 3.7×10^{10} 次核衰变。居里与贝克的换算关系是

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

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

居里的单位较大,为方便使用,通常采用较小的单位,如 mCi、 μCi 等;贝克相对太小,通常用 kBq、MBq、GBq 等。

$$1\text{mCi}=37\text{MBq}$$

$$1\mu\text{Ci}=37\text{kBq}$$

为了表示各种物质中的放射性核素含量,通常还采用比活度(specific radioactivity)及放射性浓度(radioactive concentration)。比活度定义为单位质量或单位摩尔物质中含有的放射性活度,单位是 Bq/g, MBq/g、MBq/mol。放射性浓度定义为单位体积溶液中所含的放射性活度,单位是 Bq/ml、mCi/ml 等。临床核医学使用放射性浓度较多。