



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

全国高等医药院校规划教材

供临床、预防、基础、护理、影像、检验、麻醉、中医学、中西医结合、  
口腔、药学、法医等专业使用

# 核医学

第3版

主编 张永学 高再荣



科学出版社



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材  
全国高等医药院校规划教材

供临床、预防、基础、护理、影像、检验、麻醉、中医学、中西医结合、口腔、药学、  
法医等专业使用

# 核 医 学

第3版

主 编 张永学 高再荣

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书是“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材、面向 21 世纪课程教材, 由全国 28 所院校 37 位专家编写而成。内容选择和编写理念上都力求反映当前核医学发展的现状和近年来核医学的学术成就, 精简和删除一些应用较少的陈旧内容, 使重点更突出、实用性更强。注重核医学与临床的联系, 核医学影像与其他相关影像技术的联系和比较, 培养学生在临床实践中如何正确应用和认识核医学的技术与方法, 解决临床医学中的实际问题, 而不是掌握核医学技术本身。全书分为 24 章, 第一至六章主要介绍核医学的基础知识和基本技术, 包括核医学物理基础、核医学常用仪器、放射性药物、放射性核素示踪与显像技术、分子核医学及应用及体外分析; 第七至十七章主要介绍各系统的核医学显像与功能诊断, 包括神经、内分泌、心血管、消化道、肝胆与脾脏、呼吸、骨骼、造血与淋巴、泌尿、肿瘤与炎症等系统核医学; 第十八至第二十三章, 主要介绍核医学的治疗技术和方法, 包括放射性核素治疗概论及进展、甲亢的  $^{131}\text{I}$  治疗、分化型甲状腺癌的  $^{131}\text{I}$  治疗、转移性骨肿瘤的治疗、放射性粒子植入治疗与其他核素治疗等; 最后一章简要介绍了核医学相关的放射卫生防护知识。

本书是在充分反映近年核医学诊断、治疗和研究中的先进成果基础上, 为培养卓越医师和提高医学人才岗位胜任力需要而编写的本科生必修课教材, 也是核医学专业人员及临床医师的参考书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

核医学 / 张永学, 高再荣主编. —3 版—北京: 科学出版社, 2016.6

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材·全国高等医药院校规划教材

ISBN 978-7-03-048198-6

I. ①核… II. ①张… ②高… III. ①核医学—高等学校—教材 IV. ①R81

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 093745 号

责任编辑: 朱 华 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 赵 博 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2003 年 8 月第 一 版 开本: 850 × 1168 1/16

2016 年 6 月第 三 版 印张: 18 1/4 插页 8

2016 年 6 月第十三次印刷 字数: 575 000

定价: 55.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 《核医学》（第3版）编委名单

## 主 编

张永学 教授 华中科技大学协和医院  
高再荣 教授 华中科技大学协和医院

## 副 主 编

李思进 教授 山西医科大学第一医院  
吴 华 教授 厦门大学附属第一医院  
田 蓉 教授 四川大学华西医院  
韦智晓 教授 广西医科大学第一附属医院

## 编 委 （以姓氏笔画为序）

李亚明 教授 中国医科大学附属第一医院  
安 锐 教授 华中科技大学协和医院  
汪 静 教授 第四军医大学西京医院  
陈 跃 教授 西南医科大学附属医院  
李前伟 教授 第三军医大学西南医院  
石洪成 教授 复旦大学附属中山医院  
赵 军 教授 同济大学附属东方医院  
韩星敏 教授 郑州大学第一附属医院  
蒋宁一 教授 中山大学孙逸仙纪念医院  
王荣福 教授 北京大学第一医院  
胡 硕 教授 中南大学湘雅医院  
张雪峰 教授 北华大学附属医院  
罗章伟 主任医师 右江民族医学院附属医院  
张 青 主任医师 南昌大学第一附属医院  
武一军 副主任医师 山西医科大学汾阳医院  
陈建辉 副主任医师 南华大学第一附属医院  
秦永德 教授 新疆医科大学第一附属医院  
庞 华 主任医师 重庆医科大学附属第一医院  
王 攀 副教授 遵义医学院附属医院  
付 鹏 副教授 哈尔滨医科大学附属第一医院  
王志强 教授 湘南学院医学影像系  
兰晓莉 教授 华中科技大学协和医院  
杨卫东 教授 第四军医大学西京医院  
朱小华 副教授 华中科技大学同济医院  
崔邦平 主任医师 三峡大学附属中心人民医院  
杨 军 教授 江汉大学护理与医学技术学院  
刘 刚 主任医师 湖北医药学院附属十堰市太和医院  
苏 莉 副主任医师 武汉科技大学附属孝感医院  
谭庆玲 副主任医师 湖北民族学院附属民大医院  
梁 君 副教授 武汉大学人民医院  
陆涤宇 主任医师 华中科技大学附属武汉中心医院

## 主编助理

兰晓莉 教授 华中科技大学协和医院

# 前言

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材、面向 21 世纪课程教材《核医学》是经教育部批准，在科学出版社、华中科技大学及有关参编院校领导和专家的共同努力下，为适应新世纪高等医学教育和人才培养的需要，编写的本科生必修课核医学教材。本教材自 2003 年第一出版发行以来，已在全国数十所高等医药院校中使用，受到广大师生的普遍好评。但是，随着学科的飞速发展，许多新的诊疗技术相继应用于临床，也更加丰富了核医学的实践与理论。2012 年 11 月，被评为第一批“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。随着教学模式的改革，过去的教学方式和教材编写体系也不能适应现代核医学教学的需要，因此，在科学出版社和广大编委的支持下，通过再版对本教材内容进行了补充和更新，对各系统核医学的编写体系也更加强调以疾病为中心的教学模式。此外，为了吸取更多院校好的教学经验，第 3 版又邀请了一些新的院校参加编委会，以提高本教材的代表性和广泛性。

本教材在内容选择上以及编写理念上都力求反映当前核医学发展的现状和近年来核医学的学术成就，精简和删除一些应用较少的陈旧内容，使重点更突出、实用性更强。在编写过程中，注重核医学与临床的联系，核医学影像与其他相关影像技术的联系和比较，培养学生在临床实践中如何正确应用和认识核医学的技术与方法，解决临床医学中的实际问题，而不是掌握核医学技术本身。

全书共 24 章，第一至六章主要介绍核医学的基础知识和基本技术，包括核医学物理基础、核医学常用仪器、放射性药物、放射性核素示踪与显像技术、分子核医学及应用和体外分析；第七至十七章主要介绍各系统的核医学显像与功能诊断，包括神经、内分泌、心血管、消化道、肝胆与脾脏、呼吸、骨骼、造血与淋巴、泌尿、肿瘤与炎症等系统核医学；第十八至第二十三章，主要介绍核医学的治疗技术和方法，包括放射性核素治疗概论及进展、甲亢的  $^{131}\text{I}$  治疗、分化型甲状腺癌的  $^{131}\text{I}$  治疗、转移性骨肿瘤的治疗、放射性粒子植入治疗与其他核素治疗等；最后一章简要介绍了核医学相关的放射卫生防护知识。

近几年来，核素治疗发展很快，已成为核医学的重要内容之一，尤其是甲状腺功能亢进、分化型甲状腺癌的放射性碘治疗以及放射性粒子植入治疗已成为国内外常规的治疗手段。因此，本教材除了尽可能反映当今核医学发展的前沿领域外，也更加注重核医学方法在疾病治疗中的应用，特将上述 3 个主要内容分别列为一章，以体现当今核医学的发展是诊断与治疗并重的临床学科，充分体现核素治疗在新世纪核医学中的重要作用和地位。

另外，分子核医学也取得了较快的发展，成为分子影像学中发展最快、研究最深、应用最广的内容。本版教材除介绍了分子核医学的基本内容之外，还特别增加了在精准医疗、诊疗一体化、转化医学中的应用等内容。

本版教材参编人员均是长期从事核医学临床与教学工作的中青年教师，多数编委具有博士、硕士学位或博、硕士研究生导师，他们来自全国 32 所综合大学或医学院校，其中也包含了 10 所国家 985 和 211 重点大学，不仅具有较丰富的教学经验，也代表了不同类型的学校和我国不同的地区。许多编委曾参加了全国研究生规划教材和临床医学八年制规划教材《核医学》的编写工作，因此，能很好地针对本科生教学的特点和要求，把握编写的内容和深度。同时该教材也可作为核医学专业人员及临床医师的参考书。

由于主编水平所限，加上时间较仓促，编写中难免存在缺点和错误，诚望广大师生在使用中提出宝贵意见，以便再版时修订。

张永学 高再荣  
2016 年 3 月 于武汉

# 目 录

|                    |     |                                    |     |
|--------------------|-----|------------------------------------|-----|
| 前言                 |     | 第三节 异位胃黏膜显像                        | 113 |
| 绪论                 | 1   | 第四节 胃肠功能测定                         | 115 |
| 第一章 核医学物理基础        | 7   | 第五节 尿素呼气试验                         | 119 |
| 第一节 原子结构           | 7   | 第十一章 肝胆与脾脏显像                       | 121 |
| 第二节 放射性核衰变         | 8   | 第一节 肝胆动态显像                         | 121 |
| 第三节 射线与物质的相互作用     | 11  | 第二节 肝脾胶体显像                         | 126 |
| 第二章 核医学常用仪器        | 15  | 第三节 肝血流灌注和肝血池显像                    | 129 |
| 第一节 脏器显像仪器         | 15  | 第十二章 呼吸系统                          | 132 |
| 第二节 功能测定仪器         | 23  | 第一节 肺灌注显像                          | 132 |
| 第三节 放射性计数测量仪器      | 23  | 第二节 肺通气显像                          | 135 |
| 第三章 放射性药物          | 27  | 第三节 肺通气/灌注显像及 SPECT/CT 融合显像        | 138 |
| 第一节 基本概念           | 27  | 第四节 临床应用                           | 138 |
| 第二节 放射性核素的来源       | 27  | 第十三章 骨骼系统                          | 145 |
| 第三节 放射性药物的制备与质量要求  | 28  | 第一节 骨、关节显像                         | 145 |
| 第四节 放射性药物的分类       | 30  | 第二节 骨矿物质含量测定                       | 159 |
| 第四章 放射性核素示踪与显像概述   | 34  | 第十四章 造血与淋巴显像                       | 163 |
| 第一节 放射性核素示踪原理与特点   | 34  | 第一节 骨髓显像                           | 163 |
| 第二节 放射性核素显像技术      | 37  | 第二节 淋巴显像                           | 165 |
| 第五章 分子核医学及应用       | 42  | 第三节 前哨淋巴结探测                        | 169 |
| 第六章 体外分析           | 49  | 第十五章 泌尿系统                          | 172 |
| 第一节 体外放射分析         | 49  | 第一节 肾动态显像                          | 172 |
| 第二节 非放射标记免疫分析      | 51  | 第二节 肾静态显像                          | 182 |
| 第三节 核医学体外免疫分析的质量管理 | 52  | 第三节 膀胱输尿管返流测定                      | 184 |
| 第七章 神经系统           | 56  | 第四节 阴囊与睾丸显像                        | 187 |
| 第一节 脑血流灌注显像        | 56  | 第十六章 肿瘤显像                          | 189 |
| 第二节 脑代谢显像          | 61  | 第一节 PET/CT 肿瘤显像                    | 189 |
| 第三节 脑神经受体显像        | 67  | 第二节 肿瘤其他显像                         | 201 |
| 第四节 脑脊液间隙显像        | 71  | 第十七章 炎症显像                          | 206 |
| 第八章 内分泌系统          | 74  | 第一节 常用的炎症显像剂                       | 206 |
| 第一节 甲状腺            | 74  | 第二节 临床应用                           | 207 |
| 第二节 甲状旁腺显像         | 83  | 第十八章 放射性核素治疗概论及进展                  | 211 |
| 第三节 肾上腺髓质显像        | 85  | 第一节 放射性核素治疗的生物学基础                  | 211 |
| 第九章 心血管系统          | 87  | 第二节 放射性核素治疗的进展                     | 213 |
| 第一节 心肌灌注显像         | 87  | 第十九章 甲状腺功能亢进症的 $^{131}\text{I}$ 治疗 | 218 |
| 第二节 心肌代谢显像         | 99  | 第一节 甲状腺功能亢进症简介                     | 218 |
| 第三节 心肌存活评估         | 101 | 第二节 $^{131}\text{I}$ 治疗甲状腺功能亢进症    | 220 |
| 第四节 心脏功能显像         | 103 | 第二十章 分化型甲状腺癌的 $^{131}\text{I}$ 治疗  | 225 |
| 第五节 下肢深静脉血栓探测      | 108 | 第一节 甲状腺癌                           | 225 |
| 第十章 消化道显像          | 110 | 第二节 分化型甲状腺癌的 $^{131}\text{I}$ 治疗   | 227 |
| 第一节 唾液腺显像          | 110 | 第二十一章 转移性骨肿瘤治疗                     | 233 |
| 第二节 胃肠道出血显像        | 111 |                                    |     |



|                                            |     |                                       |     |
|--------------------------------------------|-----|---------------------------------------|-----|
| 第一节 常用的放射性药物 .....                         | 233 | 第六节 $^{90}\text{Y}$ -微球介入治疗恶性肿瘤 ..... | 255 |
| 第二节 临床应用 .....                             | 235 | 第七节 神经内分泌肿瘤放射性核素治疗 .....              | 256 |
| 第三节 疗效评价 .....                             | 237 | 第二十四章 核医学的放射卫生防护 .....                | 258 |
| 第二十二章 放射性粒子植入治疗 .....                      | 241 | 第一节 作用于人体的电离辐射源 .....                 | 258 |
| 第一节 原理及方法 .....                            | 241 | 第二节 辐射生物学效应及射线作用原理 .....              | 258 |
| 第二节 适应证与禁忌证 .....                          | 242 | 第三节 放射防护的目的及基本原则 .....                | 261 |
| 第三节 临床应用 .....                             | 242 | 第四节 放射防护的措施与方法 .....                  | 264 |
| 第四节 疗效评价 .....                             | 247 | 第五节 辐射量及其单位 .....                     | 266 |
| 第二十三章 其他核素治疗 .....                         | 248 | 附录 .....                              | 268 |
| 第一节 放射性核素敷贴治疗 .....                        | 248 | 参考文献 .....                            | 274 |
| 第二节 类风湿性关节炎的 $^{99}\text{Tc-MDP}$ 治疗 ..... | 251 | 索引 .....                              | 277 |
| 第三节 $^{32}\text{P}$ 治疗真性红细胞增多症 .....       | 252 | 彩图 .....                              |     |
| 第四节 $^{32}\text{P}$ 治疗原发性血小板增多症 .....      | 253 |                                       |     |
| 第五节 癌性胸腹水腔内介入治疗 .....                      | 254 |                                       |     |

# 绪论

核医学(nuclear medicine)是开展核技术在医学中的应用及其相关理论研究的学科,包括基础、临床(诊断、治疗)、实验和分子核医学等分支学科。随着民用核科学技术的发展和医疗技术的进步,应用放射性核素或核射线进行疾病的诊断、治疗和开展医学科学研究已成为当今核医学发展的重要内容,也是现代基础和临床医学的重要组成部分。核医学是一门涉及多学科领域的综合性、边缘性医学学科,也是核物理学、电子学、化学、生物学、计算机技术等相关学科与医学相互融合的结果。核医学的问世为解决医学中某些疑难问题提供了安全、有效的重要手段,也为医学科学的进步和发展作出了重要贡献。核医学涉及领域之多、应用范围之广、技术手段之先进、方法学内涵之丰富,而被誉为现代医学的重要组成部分是当之无愧的。从应用领域讲,核医学不仅包括了临床诊断和治疗,而且也广泛应用于医学科学研究,核医学的应用范围几乎涉及医学的各个学科和专业;从技术手段来讲,核医学不仅代表了当今核技术尖端科技发展产物,而且融入了生命科学等相关学科研究的重要成果;从学科内容上讲,核医学不仅包括有影像诊断、功能测定、骨矿物质测定,还包括了体外分析技术和核素治疗。因此,核医学不是一项简单的技术,而是涉及范围和研究领域都十分广泛的一门独立的临床医学学科。

## 一、核医学的学科内容

核医学以其应用和研究范围侧重点不同,可大致分为实验核医学和临床核医学两部分,其中实验核医学又称为核医学基础,主要包括放射性药理学、放射性核素示踪技术、放射性核素动力学分析、体外分析技术、活化分析、放射自显影以及临床前核医学分子影像研究等。实验核医学的主要任务是发展、创立新的诊疗技术和方法,利用其示踪技术进行医学研究,包括核医学自身理论与方法的研究以及基础医学理论与临床医学的研究,促进医学科学的进步。实验核医学既是核医学的理论基础,某些技术本身又是临床核医学的重要诊断手段,就像外科医师必需掌握解剖学和生理学知识一样,为正确应用核医学技术提供理论依据和方法学基础。

临床核医学是利用核医学的各种原理、技术和方法来研究疾病的发生、发展,研究疾病的病理生理、

生物化学和功能结构的变化,达到诊治疾病、提供病情、疗效及预后的信息。临床核医学是核医学的重要部分,根据其应用目的不同,临床核医学又分为诊断核医学和治疗核医学两大部分,其中诊断核医学包括脏器或组织影像学检查、脏器功能测定和体外微量物质分析等;治疗核医学分为内照射治疗、外照射治疗和放射性核素介入治疗。在外照射治疗中,尽管应用放射性 $^{60}\text{Co}$ 以及后装机等进行的治疗也是应用放射性核素或核射线治疗疾病,但这类大剂量的封闭放射源治疗已归属于肿瘤放射学范畴,只有部分应用低剂量辐射源进行的外照射治疗(如 $\beta$ 射线敷贴治疗、粒子植入治疗)仍属于核医学的内容;内照射治疗是治疗核医学的主要内容,目前已广泛应用于临床;放射性核素介入治疗其本质和原理也是外照射治疗的范畴,是将封闭的放射性粒子借助于介入手段永久性植入到病变组织内,利用其释放的射线达到治疗恶性肿瘤的目的。随着新的治疗药物和治疗方法的研究进展,治疗核医学必将成为临床上治疗某些疾病的重要方法之一。临床核医学是一门发展十分迅速的新兴学科,随着学科的不断发展和临床核医学又逐步形成了各系统核医学,如心血管核医学(又称心脏病学)、内分泌核医学以及神经系统、肿瘤疾病、消化系统、呼吸系统、造血系统、泌尿系统核医学等系统学科,它反映了核医学不断成熟与完善的过程。

实际上,实验核医学与临床核医学之间的划分是相对的,二者并没有明确的界限,其研究内容和应用领域是相互融合贯通的(图0-1)。

## 二、核医学与医学的发展

核医学是现代医学的重要内容,也是医学现代化的重要标志之一,核技术在医学中的应用,促进了医学科学的发展。众所周知,17世纪70年代显微镜的发明是人类历史上的一大创举,因为它使人们第一次看到了细胞和微生物,促进了细胞学和微生物学的建立,对物质世界的认识由宏观进入微观世界。然而,核技术在医学的应用,则使人们的眼界又更进一步由细胞水平进入到分子水平。通过放射性核素示踪法,可以在生理情况下,从分子水平动态地观察机体内各种物质的代谢变化,细致的揭示体内及细胞内代谢的内幕,这是迄今为止其他技术仍难以实现的。在历史上,应用核医学的示踪技术



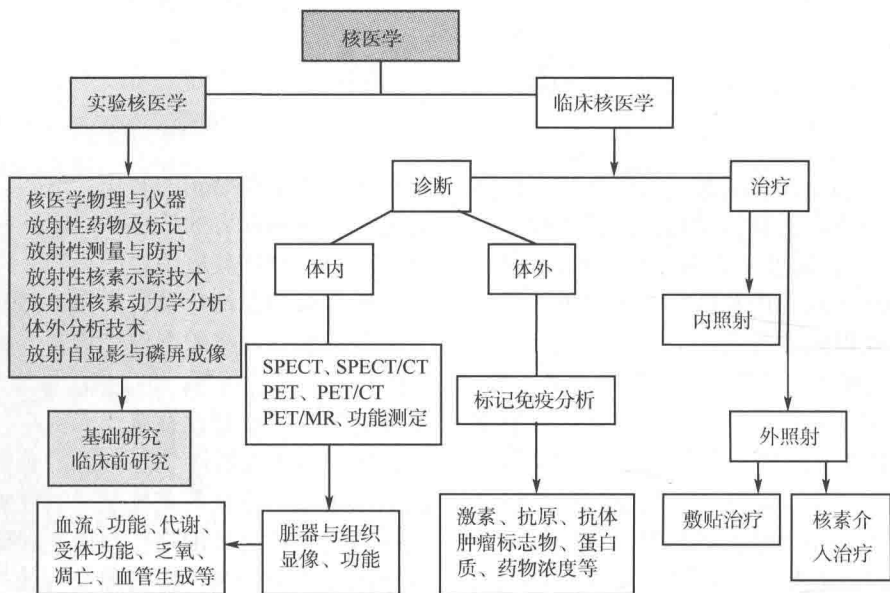


图 0-1 核医学内容组成示意图

阐明了医学中许多重大的理论和实践问题，如 RNA-DNA 逆转录、遗传密码、胆固醇的合成与代谢、细胞周期以及细胞膜受体、人体各种激素与微量物质的定量分析及变化规律等，为 20 世纪医学的发展作出了巨大贡献，也成为多学科合作研究的典范，为此，也获得了多项诺贝尔奖。可以想象，如果没有核医学的技术，医学中很多领域的发展将会晚很多年，甚至在某些方面还在经历漫长的探索之路。当然，医学本身的进步也促进了核医学的发展，例如，免疫学的发展导致了闻名于世的放射免疫分析技术的诞生，同时也促进了放射免疫显像与放射免疫治疗技术的形成，并由早期的多克隆抗体法发展为现今的单克隆抗体法和抗体片段的应用。放射免疫分析

技术自 20 世纪 50 年代末期诞生以来，至今仍然广泛应用于临床，测定的物质达数百种之多，直到 20 世纪 90 年代中期其他非放射标记免疫分析技术的相继发展，才结束了唯有放射免疫分析才能灵敏地测定人体内微量物质含量的历史，这是一个了不起的创举。可以说，放射免疫分析的应用，至少使得人类对内分泌激素的定量分析及其相关疾病的认识提前了近 40 年。近几年来，随着分子生物学技术的迅速发展以及与核医学技术的相互融合，形成了核医学又一新的分支学科，即分子核医学，使得核医学的影像学诊断从功能影像进入分子影像阶段，为 21 世纪“分子核医学与分子影像”时代的到来，迈出了可喜的第一步（图 0-2）。

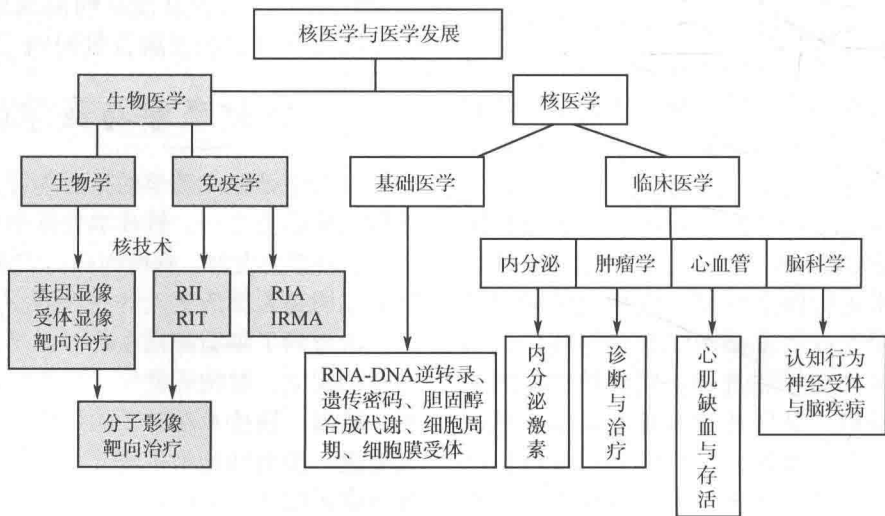


图 0-2 核医学发展与医学发展之间的关系

(RII= 放射免疫显像, RIT= 放射免疫治疗, RIA= 放射免疫分析, IRMA= 免疫放射分析)

核医学之所以成为现代医学的重要组成部分,就是因为该学科在发展中不断融入相关学科特别是医学科学最先进的研究成果,从而不断更新和完善自身的理论和方法,反过来又服务于相关学科。可以说,除了计算机技术以外,没有哪个学科像核医学技术应用如此之广泛,无论是基础医学、临床医学,还是药学、环境医学、法医学等,都与核医学技术有密切的联系。

### 三、核医学的发展历史

核医学与其他学科相比,是一门非常年轻的学科,从1896年首次发现放射现象至今也只有100余年的发展历史,而真正形成核医学学科的历史则更短。核医学的发展史是无数科学家为科学而奋斗甚至为科学而献身的不平凡历史,我们重温核医学的发展史,旨在激发人们在平凡的工作实践中,要勇于开拓、善于思维、敢于创新。在科学发展的历史上,许多重大发明和发现,都是在平凡的工作中所取得的。

1896年法国物理学家贝可勒尔(Antoine Henri Becquerel)在研究铀矿时,发现铀矿能使包在黑纸内的感光胶片感光,无论将它放在阳光下或是抽屉里,他发现冲洗后的感光片都有了蒙翳(潜影),由此断定铀能不断地自发地放射出某种肉眼看不见的、穿透力强的射线,这是人类第一次认识到放射现象,也是后来人们建立放射自显影的基础,但当时还没有“放射性”这一概念,直到两年后波兰化学家玛丽·居里(Marie·S·Curie)夫妇发现了Ra(镭),居里夫人将这种化合物放出的辐射现象取名为“放射性”,称铀的射线为贝可勒尔射线。

1898年玛丽·居里与她的丈夫皮埃尔·居里共同发现了Ra(88号元素),他们从30吨沥青铀矿中提取了2毫克Ra。此后又发现了钚(Pu)和钍(Th)等天然放射性元素。1903年居里和贝可勒尔共获诺贝尔物理学奖;1911年居里夫人又获得诺贝尔化学奖,成为世界上第一位两次获得诺贝尔奖(Nobel Prize)的科学家。

1921年英国科学家Frederick Soddy在放射性物质的化学和天然同位素研究中获诺贝尔化学奖,“同位素”一词也是他1913年与苏格兰物理学家Margaret Todd在一次午餐谈话中提出的;1935年,法国科学家Joliot和他的妻子Irène Joliot-Curie(即:玛丽·居里的女儿)用人工核反应方法合成了新的放射性元素获诺贝尔化学奖,他们用 $\alpha$ 粒子照射铝元素生成了半衰期只有两分钟的放射性 $^{30}\text{P}$ ,第一次用人工核反应方法生产了放射性核素;1938年,芝

加哥大学的费米(Fermi)应用中子辐照和慢中子核反应生产出新的放射性核素获得诺贝尔物理学奖,1942年费米等人又建立了世界上第一座核反应堆,使得人工放射性核素的大批量生产成为可能,为核医学的发展提供了必要的条件。1930年美国加州大学的Berkeley校园里,物理学家劳伦斯(Ernest Orlando Lawrence)生产出第一台回旋加速器,为人工生产短半衰期放射性核素创造了条件,也是目前PET使用的放射性药物的主要来源,于1939年获得诺贝尔物理学奖。1923年,化学家Hevesy应用天然的放射性同位素 $^{212}\text{Pb}$ 研究植物不同部位的铅含量,后来又应用 $^{32}\text{P}$ 研究磷在活体动物的代谢途径等,他是第一位应用放射性物质来进行示踪研究的科学家,并首先提出了“示踪技术”的概念,被后人尊称为“基础核医学之父”,并于1943年获诺贝尔化学奖。1959年美国科学家Berson和Yalow建立了放射免疫分析法,并首先用于测定人血浆胰岛素浓度,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含量,阐明了人体各种激素的分泌、调节及其规律,由于该技术对医学的巨大贡献,1977年Yalow获得了诺贝尔医学奖。放射免疫分析技术从20世纪60年代应用于临床至今近半个世纪。

在核医学100余年的发展史里,与核医学密切相关的领域就有近十位科学家获得了诺贝尔奖,然而也有许多科学家并没有这样的机遇,但是他们同样为核医学的创立和发展作出了许多开创性的工作。1901年,法国医师亨利·亚利山大·丹拉斯(Henri Alexander Danlos)将放射性镭与结核性的皮肤病变接触,试图达到治疗目的,首次尝试用放射性物质治疗疾病;1926年美国波士顿内科医师布卢姆加特(Blumgart)等首先应用放射性氢研究人体动、静脉血管床之间的循环时间,在人体内第一次应用了示踪技术,布卢姆加特也被誉为“临床核医学之父”。1938年塞格瑞(Segre)和西博格(Seaborg)发现了 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ),并于1957年由特克尔(Tucker)等人制造成发生器,使得这种性能优良的短半衰期核素能广泛应用于临床至今,为核医学常规影像诊断的普及创造了条件。

核医学仪器的研制取得了巨大成功。1951年美国加州大学的卡森(Cassen)研制第一台扫描机,通过逐点打印获得器官的放射性分布图像,促进了核医学显像的发展,为此美国核医学会专门设立了“Cassen奖”。1952年美国宾夕法尼亚(Pennsylvania)大学的一年级医学生戴维·库赫(David Kuhl)设计了扫描机光点打印法,1959年他又研制了双探头的扫描机进行断层扫描,并首先提出了发射式重建断层技术,从而为日后发射式计算机断层扫描机(ECT)

的研制奠定了基础,1972年库赫博士作为主要成员应用三维显示法和 $^{18}\text{F}$ -脱氧葡萄糖( $^{18}\text{F}$ -FDG)测定了脑局部葡萄糖的利用率,因而,打开了 $^{18}\text{F}$ -FDG应用的大门。可以认为,如果没有他的远见卓识,核医学将不可能发展到今天成为具有特色的学科。正是由于他的发明成为正电子发射断层显像(PET)和单光子发射计算机断层显像(SPECT)的基础,故人们称库赫博士为“发射断层之父”;1957年安格(Anger)研制出第一台 $\gamma$ 照相机,称安格照相机,也是当今SPECT的基础,核医学影像逐步走向现代化,并使得核医学的显像由单纯的静态逐点打印扫描进入快速动态成像阶段,20世纪60年代初广泛应用于临床,可以说,此时是核医学走向现代阶段的转折点。

由于放射性同位素不包括同质异能素,1953年罗伯特·纽厄尔(Robert Newell)首先提出了“Nuclear”一词。1968年美国霍普金斯医学院的瓦格纳(Wagner)教授在他的教科书中广泛地确立了“Nuclear Medicine”,从而取代了使用多年的“同位素”与“放射性物质”。1969年,“Nuclear Medicine”正式在“术语学手册”中作为放射性同位素在疾病诊断和治疗中应用的医学分支被确立,至此,同位素科也逐步更名为核医学科。

进入20世纪70年代,核医学发生了几个根本变化:一是电子计算机广泛应用于核医学领域,使得核医学成像由定性分析进入定量分析,由平面影像进入断层影像阶段;二是计算机的应用促进了发射式计算机断层显像(emission computed tomography, ECT)的发展,并逐步广泛应用于临床;三是以 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 为代表的短半衰期核素广泛应用于显像诊断;四是放射免疫分析技术得到普及,不仅扩大了核医学的学科领域,更促进了医学科学的发展。

我国放射性同位素的应用是从医学界开始的。1956年在军委卫生部的领导下,在西安第四军医大学举办了生物医学同位素应用训练班,这是我国第一个同位素应用训练班,也标志着我国核医学的诞生。1958年在北京举办了第一个放射性同位素临床应用训练班,成为核医学进入临床应用的起点,也被列为当时国家的一项重要任务,此后又在津、沪、穗举办了2~4期,为我国培养了第一代临床核医学工作者”。20世纪50年代后期,我国核医学进入了普及与推广阶段,在一大批高等医药院校、省级以上医院和医学研究机构中相继建立了教研室和专业科室,先后开展了教学、科研和临床诊治工作,至此,“放射性同位素在医学中的应用”也被纳入“放射医学”的教学内容之一。20世纪70年代以后,我国的核医学有了较大的提高,大多数省、市级医

院及部分地、市级医院均建立了核医学的专业科室,国产扫描机、功能测定仪器、 $\gamma$ 计数器、 $\gamma$ 照相机等探测仪器相继国产化,广泛开展了脏器扫描、脏器功能测定、放射性核素治疗和体外放射分析等工作。1977年“核医学”被教育部列入全国高等医药院校医学本科专业的必修课程,从而确立了核医学作为一门独立的医学学科的地位。在教育部和卫生部的组织下编写出版了本科生、七年制、八年制及研究生用核医学规划教材,相继在我国数十所院校建立了博士、硕士学位授权点和博士后流动站。

1980年我国成立了中华医学会核医学分会及各省、市核医学学会,1981年,创办了中华核医学杂志,2012年又更名为中华核医学与分子影像杂志。进入20世纪80年代后,我国核医学得到了迅猛发展,核医学队伍不断壮大,人员素质不断提高,大量先进的核医学仪器的引进、新的放射性核素及其标记化合物的研制成功,为我国核医学的发展创造了有利条件,我国核医学使用的仪器与发达国家处于同一水平。自1983年我国引进第一台单光子发射计算机断层显像仪(single photon emission computed tomography, SPECT)以来,目前我国大陆已拥有700多台SPECT,世界上最先进的单探头、双探头以及双探头多模式SPECT/CT得到广泛使用;1995年我国引进首台正电子发射断层显像仪(positron emission tomography, PET)以来,20余年我国已引进了239台世界上最昂贵的医疗仪器——正电子发射断层/计算机断层仪(positron emission tomography/computed tomography, PET/CT)及其配套的回旋加速器,而且PET/CT的增长十分迅猛,几乎每年以20台以上的速度增长,而且国产化PET/CT也已开始投入临床应用,打破了核医学影像设备几乎全部依赖进口的局面,世界上最先进的正电子发射断层/磁共振(positron emission tomography/magnetic resonance, PET/MR)显像也开始试用于临床,将高灵敏的PET分子影像与高分辨率的3T磁共振影像同机融合,成为核医学多模式分子影像发展新的里程碑。PET/CT和PET/MR等先进仪器的应用极大地推动了核医学的发展,也提高了核医学的地位,成为当今医学界关注的热点,也使得医学影像技术逐步由解剖影像向着分子功能影像发展。

我国目前有两座核反应堆生产医用放射性核素,还有多台大型回旋加速器、近百台小型回旋加速器生产超短半衰期核素,其品种达数百种之多,基本能满足核医学临床与研究工作的需要。我国自行研制生产的放免分析测定仪、功能仪等常规设备达到了国际先进水平。我国核医学水平与发达国家的差

距在逐步缩小,在某些方面已经形成中国特色甚至接近国际先进水平。

#### 四、核医学的现状与进展

核医学从初创阶段、发展阶段到现代阶段历经了漫长的历程。可以说当今的核医学既是发展的鼎盛时期,也是竞争最为激烈的时刻。随着医学技术及其相关科学领域的迅猛发展,核医学的许多优势正在被其他技术所取代,有些方法已不再是诊断某些疾病的唯一手段,然而核医学的某些新的诊疗技术也在不断诞生,并不断完善自身的研究手段和方法,向着更深、更新的领域迈进。

**1. 显像仪器的发展** 核医学的显像仪器从早期的直线扫描机,发展成为 $\gamma$ 照相机和目前广泛使用的 SPECT、SPECT/CT、PET/CT 和 PET/MR,仪器的功能和质量都发生了根本改变。目前引进的 SPECT 和 PET 大多配备了诊断级的 CT 装置, PET/CT 和 SPECT/CT 中的 CT 也从早期的单排发展到现在的 4~64 排,仪器的发展不仅改善了图像的质量,也提高了显像的效率;配备有符合线路的双探头 SPECT 还可进行部分正电子成像。由于核医学的 ECT 以显示脏器或组织血流、代谢和功能为优势,但解剖分辨率相对较差,而放射学的 CT 和 MRI 虽然具有较好的解剖分辨率,但对于代谢与功能的评价存在不足,因此, PET/CT、PET/MR 和 SPECT/CT 的广泛应用大大提高了核医学影像的解剖定位能力,一次显像不仅能清楚显示病变部位的解剖学结构的细微改变,同时还能观察该部位的代谢功能、受体密度或血流等变化,从而帮助病变的定位与定性,最大限度的发挥不同显像方法的优势,克服各自的不足。这些多模态成像仪器的应用不仅是真正意义上实现了解剖学结构影像与代谢、功能影像的同机图像融合 (image fusion),也是医学影像学科中不同专业的相互融合,是医学影像技术发展新的里程碑。

**2. 分子核医学 (molecular nuclear medicine) 与分子影像 (molecular imaging) 的发展** 分子医学是 21 世纪医学发展的方向,包括分子水平的基因诊断和分子治疗将成为现代医学的重要内容。分子核医学是应用核医学示踪技术从分子水平认识疾病,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以及开展以靶向治疗为基础的核素治疗等,为疾病的诊断、治疗和疾病的研究提供分子水平信息和分子水平的治疗手段。这些伴随生物学技术的发展而建立起来的新的显像方法,不仅促进了分子核医学的形成,也为医学影

像技术走向“分子影像”时代迈出了第一步,核医学分子影像是目前最为成熟的分子影像。尤其是 PET/CT 分子影像已经广泛应用于肿瘤的早期诊断、分期、复发与疗效监测等各个方面,是目前实施肿瘤精准医疗重要的评价手段。

分子影像的发展不仅促进了医学影像的进步,也带动了相关生物医学的发展和多学科的融合,不仅是不同模式的影像学之间的融合,也包括影像医学与生物学、化学、生物物理以及临床医学之间的融合。近十年来国内外的许多大学及研究机构相继建立了分子影像研究中心,各国政府也为此投巨资用于分子影像领域的基础和探索性研究,为临床前分子影像的发展以及临床转化创造了条件,也为生命科学的前沿领域研究奠定了基础。

**3. 治疗核医学的形成与发展** 1901 年 Danlos 应用放射性 Ra 试图治疗结核性皮肤病灶,从而揭开了核素治疗的序幕。1903 年 Alexander Graham Bell 利用 Ra 进行近距离肿瘤治疗。1905 年 Robert Abbe 利用 Ra 治疗突眼性甲状腺肿。1913 年 Frederic Proeschler 经静脉注射 Ra 进行各种疾病治疗的研究。进入 20 世纪 30 年代,随着人工放射性核素的研制成功,核素治疗得到了进一步发展,1939 年, $^{32}\text{P}$  用于白血病的治疗,1942 年  $^{131}\text{I}$  用于治疗甲状腺功能亢进症。当前, $^{131}\text{I}$  治疗甲状腺功能亢进症和分化型甲状腺癌已经成为临床不可缺少的主要手段。尽管核素治疗不像核素诊断的发展那样迅速,但随着核医学发展方向的转移、新的治疗药物的研制以及新的治疗方法的建立,核素治疗的应用范围将不断扩大,治疗核医学在整个核医学中的地位在不断提高。目前,应用核素治疗的疾病已达数十种之多,我国每年约有 80 多万人次接受核素治疗,其中  $^{131}\text{I}$  治疗甲状腺功能亢进症约 18 余万人次,甲状腺癌 3.7 万人次,近 200 家医院开设核素治疗病房。核素治疗与常规化学药物治疗或放疗有其本质的区别,一是核素治疗是利用核射线治疗疾病;二是核素治疗药品对病变组织具有选择性或靶向性;三是核素治疗作用持久;四是方法安全、简便、经济。

治疗核医学的发展方向主要集中在放射性核素的研究和携带放射性核素的载体研究两个方面。尤其是靶向性放射性药物载体是治疗核医学研究的重点课题。目前具有前景的研究领域主要有:放射免疫靶向治疗、受体介导的靶向治疗、放射性核素基因治疗、物理性能更加优异的重离子治疗以及放射性核素粒子肿瘤组织间定向植入治疗等。近几年来,应用即可发射  $\beta$  射线又发射  $\gamma$  射线的核素标记某些与肿瘤具有特异性亲和力的生物分子,进入体内后选择性的与肿瘤细胞结合,利用其  $\gamma$  射线可进行分



子显像,而 $\beta$ 射线可发挥内照射治疗作用,真正实现了肿瘤诊断与治疗一体化(theranostics)。可以预料,未来治疗核医学的发展,将会改变过去传统的疾病治疗思维与规范,尤其是肿瘤疾病,核素治疗将成为化学治疗、手术治疗及放射治疗等综合治疗中不可缺少的手段,在某些方面可代替外照射治疗或化疗,而具有特异性、靶向性的治疗方法以及介入性局部治疗手段终将取代全身损伤性治疗方法。治疗核医学的发展有可能超过诊断目的的应用,并将成为现代治疗学的重要部分。

纵观核医学的学科内容与任务表明,核医学科既是一个为医院临床科室提供诊疗服务的科室,自身又是一个能独立实施疾病诊断和治疗的临床学科,它为人类探索生命现象的本质提供了一项十分有效的工具,也为人类观测机体内物质代谢和生命活动规律提供了一个窗口。核医学是一门正在逐步走向成熟的年轻学科,随着相关学科的迅猛发展,核医学也面临激烈的竞争与严峻的挑战,某些曾经是临床或研究的重要方法正在被其他技术所取代,也有一些方法其临床重要性正在减弱,这是历史发展的必然规律,科学的发展就是在不断的探索和激烈的竞争中向前迈进。核医学的发展也一样,需要不断探索、推陈出新、扬长避短,不断吸取相关学科的先进成果,丰富其学科内容。一项技术即使获得过

诺贝尔奖,也不能说明该技术永远先进,不被淘汰;先进是相对的,是有时效性的。20世纪90年代以来,可以说每年都有新的科学名词在诞生,从PCR技术、细胞凋亡、克隆技术,直到纳米技术、干细胞移植、基因技术、3D打印、移动医疗、精准医疗、个体化医疗和诊疗一体化等,同时又有许多名词又逐步被人们冷落和遗忘,这就是现代科学发展的特征和规律,犹如不可阻挡的巨浪推动历史的前进。

在科学技术爆炸式发展的今天,作为新时代的医学生肩负着医学发展的历史使命,如何去面对、感受、适应、融入和实践科学技术的进步带给医学科学的大发展?是值得认真思考的问题。当今的医学教育如果仍然以传统的医学知识、认知和理念去面对全新的科学世界,我们将难以适应和分享先进科学技术带来的优秀成果,在医学科学发展的历史长河中,我们每一个人都将成为推动历史车轮前进的动力。

## 思考题

1. 核医学的定义是什么?
2. 核医学的学科内容主要有哪些?
3. 核医学的主要进展有哪些?

(张永学)

# 第一章 核医学物理基础

## 第一节 原子结构

### 一、原子和原子结构

物质都是由原子组成的。原子是很微小的粒子，半径为  $10^{-8}\text{cm}$  左右，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。即原子是由处于原子中心、带有正电荷的原子核 (nucleus) 和若干个绕核运动、带负电荷的核外电子 (electrons) 组成 (图 1-1)。原子核的半径不到原子半径的万分之一，但占有原子质量的 99.9% 以上。

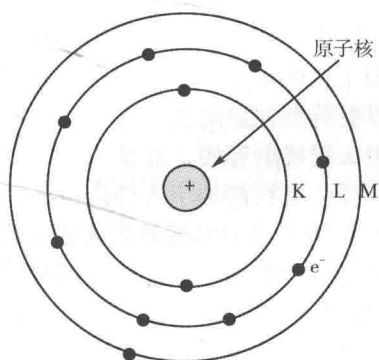


图 1-1 原子结构模式图

通常采用  ${}^A_Z\text{X}$  表示原子的核结构，其中 X 代表元素符号，Z 代表质子数，N 代表中子数，A 代表原子的质量数 (mass number)。因为元素符号本身就确定了质子数，并且  $N=A-Z$ ，故原子结构亦可简便地只标记元素符号和质量数，即  ${}^A\text{X}$ ，如  ${}^{131}\text{I}$ 、 ${}^{18}\text{F}$ 。质子带一个正电荷，中子呈电中性，核外电子带负电荷，原子核中质子所带的正电荷数目与核外电子所带的负电荷数目相等，所以原子本身呈电中性。

**1. 原子核** 原子核由质子 (proton) 和中子 (neutron) 组成，它们统称为核子 (nucleon)。原子核内部存在两种作用力：带正电荷的质子之间的静电排斥力和核子之间的核力 (nuclear force)。核力是短程力，只有在原子核尺度上才显现出来，作用范围在  $1.5 \times 10^{-15}\text{m}$  之内。核力在大于  $0.8 \times 10^{-15}\text{m}$  时表现为吸引力，且随距离增大而减小，超过  $1.5 \times 10^{-15}\text{m}$  时，核力急速下降几乎消失；而在距离小于  $0.8 \times 10^{-15}\text{m}$  时，核力表现为斥力，从而使核子既能紧密结合，又不会无限接近。核力能抗拒库仑斥力而使质子紧密结合在一起。核的稳定性除了与核子的数量有关外，还取决于核内质子和中子的比例。

**2. 核外电子** 电子环绕着原子核在一定的轨道上不断高速地旋转着，这些确定的轨道组成一系列壳层，用字母 K、L、M、N、O、P、Q、……来表示。一般说来，各壳层里能容纳的最大电子数目可以用  $2n^2$  来表示，其中  $n=1$  代表 K 壳层， $n=2$  代表 L 壳层，依次类推。不同壳层上的电子所具有的能量不同。K 层电子离核最近，与原子核的相互吸引力最强，其电子带有的位能最低，L 层次之，愈外层受到原子核的吸引力愈小，故其位能也愈高。

核外电子都首先占据着能量低的轨道，这种状态即称为基态 (ground state)。当原子中的电子从外界吸收光子或与其他粒子相互作用而获得能量时，内层电子会跃迁到较高能级的外层轨道上，这种电子被激发到较高能级但尚未电离的状态称为激发态 (excited state)。处于激发态的原子不稳定，会通过放出光子释放能量，使外层电子跃迁到内层，整个原子即从激发态回到基态。

**3. 原子质量单位与能量单位** 自然界中质子、中子和电子的质量都十分微小，如一个氢原子质量只有  $1.6773 \times 10^{-24}\text{g}$ ，一个铀原子质量也不过  $3.915 \times 10^{-22}\text{g}$ ，用 g 做单位不方便，因此采用原子质量单位 (atomic mass unit)，用 u 来表示，它的定义是规定自然界中最丰富的同位素  ${}^{12}_6\text{C}$  原子质量的 1/12 为原子质量单位，约为  $1.660540 \times 10^{-27}\text{kg}$ 。

在核物理中，能量的基本单位是电子伏特 (eV)，即 1 个电子在电势差为 1 伏特的电场中加速可获得的能量，称为 1eV。质量和能量的关系由爱因斯坦质能联系方程  $E=MC^2$  计算。C 是光在真空中的传播速度，根据这个公式， $1\text{u} = 931.478\text{MeV}$ 。

## 二、同位素、核素、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  ${}^1_1\text{H}$ 、 ${}^{12}_6\text{C}$ 、 ${}^{14}_6\text{C}$ 、 ${}^{198}_{79}\text{Au}$  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  ${}^{125}\text{I}$ 、 ${}^{131}\text{I}$ 、 ${}^{132}\text{I}$  均有 53 个质子，但中子数不同，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。一个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)。原子核与核外电子一样, 也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, 原子核可暂时处于较高能量的状态。对于激发态的核素, 在原子质量数的后面加一小写的“m”来表示, 例如 $^{99m}\text{Tc}$ 是 $^{99}\text{Tc}$ 的激发态,  $^{99m}\text{Tc}$ 与 $^{99}\text{Tc}$ 互为同质异能素。

## 第二节 放射性核衰变

原子核分为两大类, 一类原子核稳定存在, 不会自发地发生核内成分或能级的变化, 或发生概率非常小, 此类核素称为稳定性核素 (stable nuclide), 另一类原子核为不稳定性原子核。不稳定的原子核能够自发地转变成别的原子核或者发生核能态变化, 在这个过程中伴有各种射线的发射, 这类核素称为放射性核素 (radioactive nuclide)。放射性核素的原子核自发地放出射线, 同时转变成另一种原子核的过程称为放射性核衰变 (radioactive decay), 简称核衰变 (decay)。

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。对于原子量较小的核素,  $Z/N=1$  时原子核是稳定的。当质子数较多时 (一般为  $Z > 20$ ), 质子数多了, 斥力增大, 必须有更多的中子使核力增强, 才足以克服斥力, 保持核稳定。如果原子核中质子数过多或过少, 或者中子数过少或过多, 原子核便不稳定。因此, 核衰变具有自发性, 是由原子核内部因素决定的, 不受核外因素影响。人工放射性核素的制备就是用核反应堆或加速器产生的高能中子或带电粒子轰击稳定性核素, 引起核反应, 改变其核内质子与中子的比例, 从而使之变为放射性核素。

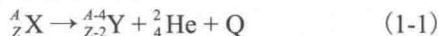
### 一、核衰变的方式

不稳定的原子核能自发地放出射线并转变成另一种核素。衰变前不稳定的核素常被称为母核, 衰变后生成的新的核素称为子核。有的子核也是不稳定的, 将继续衰变, 直至转变成稳定性核素, 即  $A \rightarrow B \rightarrow C$ 。衰变前后的核子数、电荷数和质能转换都遵守守恒定律。核衰变时释放的衰变能, 大部分由衰变过程中发射出的粒子携带, 少部分为子核所具有。

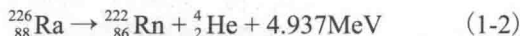
#### (一) $\alpha$ 衰变 (alpha decay)

不稳定原子核自发地放射出  $\alpha$  粒子而变成另一

个核素的过程称为  $\alpha$  衰变。 $\alpha$  粒子是由两个质子和两个中子组成, 实际上就是氦原子核 $^4_2\text{He}$ 。 $\alpha$  衰变可用反应式 (1-1) 表示:



式中: X 表示衰变前的核素, 即母核; Y 表示衰变后的核素, 即子核; Q 为衰变过程放出的能量 (以 MeV 为单位), 称为衰变能, 它在数值上等于  $\alpha$  粒子的动能与子核反冲动能之和。母核放出  $\alpha$  粒子后, 转变成原子序数减少 2、质量数减少 4 的子核, 同时放出结合能 - 衰变能 Q, (图 1-2)。例如, 反应式 (1-2):



$\alpha$  衰变发生在原子序数大于 82 的重元素核素。 $\alpha$  粒子的速度约为光速的 1/10 左右, 在空气中射程 3~8cm, 在水中和机体内的射程为 0.06~0.16mm。其质量大且带 2 个单位正电荷, 穿透力弱、射程短, 很容易被物质吸收, 一张纸就能阻挡  $\alpha$  粒子的通过, 因而不能用于核医学显像。由于其能量容易传递给物质, 所以要特别注意防止  $\alpha$  衰变的放射性物质进入体内。但  $\alpha$  射线射程短, 能量单一, 对局部组织的电离作用强, 有目的地引入体内后, 可以对核素附近的生物组织产生破坏而不损害远处组织。故  $\alpha$  射线在体内恶性肿瘤的放射性核素内照射治疗方面具有潜在的优势。

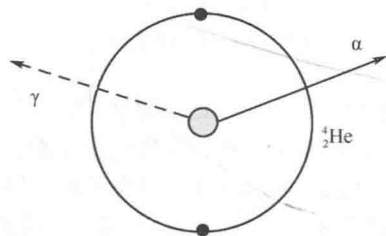
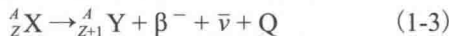


图 1-2  $\alpha$  衰变模式图

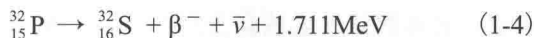
#### (二) $\beta$ 衰变 (beta decay)

核衰变时放射出  $\beta$  粒子或俘获轨道电子的衰变称为  $\beta$  衰变。 $\beta$  衰变后的核素原子序数可增加或减少, 但其质量数不变。 $\beta$  衰变可分为  $\beta^-$  衰变、 $\beta^+$  衰变和电子俘获三种。

**1.  $\beta^-$  衰变** 放射性核素的核内放射出  $\beta^-$  射线的衰变方式称为  $\beta^-$  衰变。 $\beta^-$  衰变时放出一个  $\beta^-$  粒子 (电子) 和反中微子 (antineutrino,  $\bar{\nu}$ ), 核内一个中子转变为质子 (图 1-3)。因而子核比母核中子数减少 1, 原子序数增加 1, 原子质量数不变, 可用反应式 (1-3) 表示:



例如:  $^{32}\text{P}$  衰变可表示为:



反中微子 ( $\bar{\nu}$ ) 是一种静止质量几乎为零的中性粒子, 在  $\beta^-$  衰变中总是有反中微子伴随放射出来。

$\beta^-$  射线的本质是高速运动的负电子流。衰变能量  $Q$  随机分配给  $\beta^-$  粒子和反中微子, 因而  $\beta^-$  粒子的能量分布从零到最大形成连续的能谱。一种  $\beta^-$  衰变核素发射  $\beta^-$  粒子的平均能量约等于其最大能量的三分之一。 $\beta^-$  粒子穿透能力虽然较  $\alpha$  粒子强, 但是在组织中的射程仅为数毫米, 能被铝箔和机体组织吸收, 因而不能用于核素显像。核素治疗常用的放射性核素多是  $\beta^-$  衰变核素, 例如  $^{131}\text{I}$ 、 $^{32}\text{P}$ 、 $^{89}\text{Sr}$  等核素。

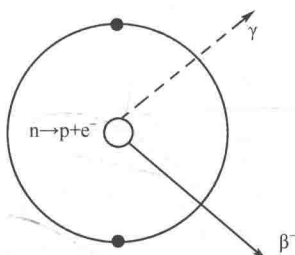
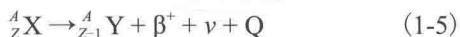
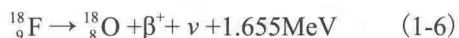


图 1-3  $\beta^-$  衰变模式图

**2.  $\beta^+$  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  $\beta^+$  衰变。衰变时发射一个正电子 (positron) 和一个中微子 (neutrino,  $\nu$ ), 原子核中一个质子转变为中子, (图 1-4)。 $\beta^+$  衰变时母核和子核的质量数无变化, 但子核的核电荷数减少一个单位, 原子序数减少 1 位。 $\beta^+$  衰变可用反应式 (1-5) 表示:



例如,  $^{18}\text{F}$  衰变可表示为反应式 (1-6):



$\beta^+$  粒子与  $\beta^-$  粒子相似, 都是连续能谱。 $\beta^+$  衰变的核素, 都是人工放射性核素, 天然的核素不发生  $\beta^+$  衰变。正电子射程仅 1~2mm, 在与物质相互作用并完全耗尽其动能前, 与物质中的自由电子结合, 正负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  $\gamma$  光子而自身消失, 这一过程称为湮灭辐射 (annihilation radiation)。正电子发射断层显像仪 (positron emission tomography, PET) 的显像原理就是通过探测湮灭辐射事件中产生的两个方向相反、能量皆为 511keV 的  $\gamma$  光子, 并借助符合电路对这一事件进行空间定位, 从而显示正电子核素及其标记化合物在体内代谢分布。

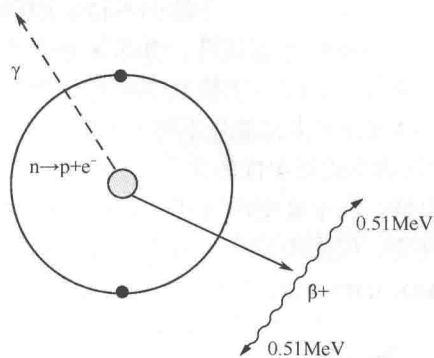
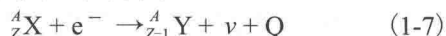
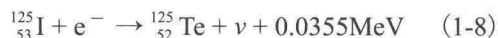


图 1-4 正电子衰变模式图

**3. 电子俘获** 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 (electron capture, EC) 衰变。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。一个质子俘获一个核外轨道电子转变成一个中子并放出一个中微子, 子核的原子序数比母核减少一个单位, 质量数不变, (图 1-5)。其衰变过程可用反应式 (1-7) 表示:



例如:



电子俘获衰变时, 核结构的改变可能伴随其他射线的放出。因为内层电子最靠近核, 被俘获的概率最大。当发生电子俘获衰变时, 内层轨道少了一个电子出现空位, 使原子处于激发态。外层轨道电子向内层补充, 两层轨道之间的能量差转换成特征 X 射线 (characteristic X ray), 或者将能量传递给一个更外层轨道的电子, 使之脱离轨道而释出成为自由电子, 这种电子称为俄歇电子 (Auger electron)。

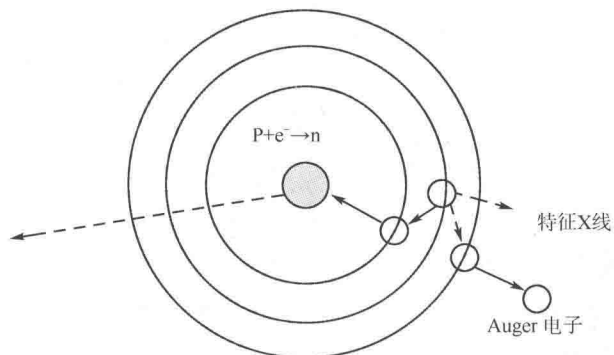


图 1-5 电子俘获衰变图

### (三) $\gamma$ 衰变和内转换

**1.  $\gamma$  衰变 ( $\gamma$  decay)** 激发态的原子核以放出  $\gamma$  射线 (光子) 的形式释放能量而跃迁到较低能量级的过程称为  $\gamma$  衰变。有些放射性核素在发生  $\alpha$  衰变、

$\beta$  衰变或核反应之后,核仍处于不稳定的激发态,并即刻向基态或低能态跃迁,并以  $\gamma$  光子的形式放出多余的能量。有时一次核衰变要经过多次跃迁才回基态,因此就有多组能量不同的  $\gamma$  射线。

$\gamma$  射线的本质是中性的光子流,电离能力很小,穿透能力强。在  $\gamma$  衰变的过程中核的原子序数和质量均不改变,仅能级改变,所以又称为同质异能跃迁 (isomeric transition, IT),用下式表示:



例如,  ${}^{99m}\text{Tc}$  衰变可表示为:



核素  ${}^{99}\text{Mo}$  衰变时放出  $\beta$  射线,半衰期为 66.02h,产生子体放射性核素  ${}^{99m}\text{Tc}$ ,  ${}^{99m}\text{Tc}$  发射  $\gamma$  射线回复到基态  ${}^{99}\text{Tc}$ ,半衰期为 6.02h。在多数情况下,原子核处在激发态的时间不到 1 微秒,甚至无法测出其时间间隔,可认为这两种衰变是同时进行的。例如  ${}^{131}\text{I}$  衰变可认为同时放出  $\beta$  射线和  $\gamma$  射线,放出能量合适的、单纯  $\gamma$  射线的核素最适合单光子发射计算机断层显像 (single photon emission computed tomography, SPECT);  ${}^{99m}\text{Tc}$  发生  $\gamma$  衰变时,发射能量为 141 keV 的纯  $\gamma$  射线,已广泛用来标记各种显像剂。

**2. 内转换 (internal conversion)** 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壳层电子,使壳层电子获得足够的能量后发射出去,这一过程称为内转换, (图 1-6)。因内转换放射出的电子称为内转换电子 (internal conversion electron)。内转换发生后,在原子的 K 层或 L 层留下空位,还会产生特征 X 射线和俄歇电子。

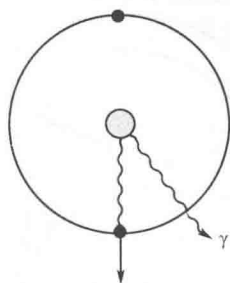


图 1-6 内转换模式图

## 二、核素衰变的基本定律

### (一) 衰变规律 (decay laws)

放射性核素的衰变是一种自发的过程,放射性核素的衰变与周围环境如温度、压力、湿度等无关,也不是瞬间同时完成的。就放射性核素的单一个体

而言,什么时候发生核衰变完全是随机的,但是对大量放射性样品的整体来说,是遵循指数递减规律进行衰变的,核衰变速度完全由核子组成不稳定程度和不稳定核数目的多少决定。不同放射性核素每个原子核在单位时间内发生衰变的概率不同,即有不同的衰变常数,以  $\lambda$  表示。对整个放射源, $\lambda$  表示发生衰变的原子核数占当时总核数的百分数;对单个原子核, $\lambda$  表示原子核发生衰变的概率,即可能性。

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,即式 (1-11):

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (1-11)$$

将式 (1-11) 积分,得:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1-12)$$

式 (1-12) 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, $\lambda$  为衰变常数,负号表示原子核由于衰变而逐渐减少。从上式可以看出放射性核素是按指数规律衰减的。

如果说呈指数递减的衰变规律反映了放射性原子核衰变的“共性”,那么衰变常数  $\lambda$ ,则反映了每种放射性核素的“个性”。迄今尚未发现任何两种放射性核素具有相同的衰变常数值,因此  $\lambda$  值也就成为表征放射性核素衰变速率的一个特征参数。

### (二) 半衰期

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** 放射性核素的衰变速率通常以物理半衰期 (physical half life,  $T_{1/2}$ ) 表示,  $T_{1/2}$  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。 $\lambda$  与  $T_{1/2}$  之间的关系见式 (1-13):

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}} \quad \text{或} \quad T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (1-13)$$

各种放射性核素的半衰期长短不一,半衰期长的核素衰变得慢,可长达  $10^{10}$  年,半衰期短的核素衰变得快,可短至  $10^{-10}$  秒;衰变常数大的放射性核素衰变得快,衰变常数小的衰变得慢。一般把半衰期短于 10 h 的核素称为短半衰期核素,短半衰期核素是临床诊断中应用最为广泛的放射性核素,如  ${}^{99m}\text{Tc}$ 、 ${}^{18}\text{F}$  等。

物理半衰期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。

衰变常数和半衰期都是描述放射性核素衰变速率的特征量,衰变常数大或者半衰期短的放射性核素衰变得快,而衰变常数小或半衰期长的放射性核