

全国普通高等教育医学类系列教材

核医学

(第二版)

Nuclear Medicine

陈绍亮 主编



科学出版社

www.sciencep.com

全国普通高等教育医学类系列教材

核 医 学

(第二版)

陈绍亮 主 编

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书在第一版的基础上,力图反映核医学的基本理论和最新的进展与特色,全书包括绪论在内共二十一章,涵盖了核物理基础、核医学仪器、放射性药物、辐射防护、体外标记免疫分析及受体放射分析、放射性核素显像和放射性核素功能测定基础知识等核医学的基本内容,也对核医学在临床的运用作了深入浅出的阐述。对核医学的最新进展作了总结。

本书可供高等医学院校核医学的教材,也可供教师、科研人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

核医学 / 陈绍亮主编. —第二版. —北京: 科学出版社,
2009

全国普通高等教育医学类系列教材
ISBN 978-7-03-025611-9

I. 核… II. 陈… 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(2009)第 168143 号

责任编辑: 潘志坚 / 责任校对: 刘珊珊
责任印制: 刘 学 / 封面设计: 殷 颀

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>

南京展望文化发展有限公司排版

上海敬民实业有限公司长阳印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004 年 1 月第 一 版 开本: 889×1194 1/16

2009 年 11 月第 二 版 印张: 22 1/4

2009 年 11 月第二次印刷 字数: 684 000

印数: 4001—7300

定价: 39.00 元

全国普通高等教育医学类系列教材

《核医学》(第二版)编委会名单

主 编 陈绍亮

编 委 (以姓氏笔画为序)

- | | |
|----------------------|---------------------|
| 马庆杰(吉林大学中日联谊医院) | 马宏星(同济大学附属同济医院) |
| 王卫东(无锡第一人民医院) | 王雪梅(内蒙古医学院附属医院) |
| 方圣伟(浙江大学附属第二医院) | 左书耀(山东青岛大学医学院附属医院) |
| 左传涛(复旦大学附属华山医院) | 冯 珏(河北医科大学第二医院) |
| 吕中伟(同济大学附属第十人民医院) | 朱汇庆(复旦大学附属华山医院) |
| 朱建华(复旦大学药学院) | 朱瑞森(上海交通大学附属第六人民医院) |
| 刘文平(苏州大学附属第一医院) | 刘兴党(复旦大学附属华山医院) |
| 刘保平(郑州大学第一附属医院) | 刘增礼(苏州大学附属第二医院) |
| 关晏星(南昌大学第一附属医院) | 杜雪梅(大连医科大学附属第一医院) |
| 李广宙(潍坊医学院) | 李小东(天津医科大学附属第二医院) |
| 李亚明(中国医科大学附属第一医院) | 李红梅(河北医科大学) |
| 李林法(浙江大学医学院附属第一医院) | 李建国(重庆医科大学附属第一医院) |
| 李 娟(宁夏医学院) | 李雪娜(中国医科大学附属第一医院) |
| 李 彪(上海交通大学医学院附属瑞金医院) | 李蓓蕾(复旦大学附属中山医院) |
| 吴翼伟(苏州大学附属第一医院) | 何 薇(复旦大学附属华东医院) |
| 张世益(包头医学院第一附属医院) | 张延军(大连医科大学附属第一医院) |
| 张 宏(浙江大学附属第二医院) | 张 琦(温州医学院) |
| 陆汉魁(上海交通大学附属第六人民医院) | 陈绍亮(复旦大学附属中山医院) |

第二版前言

高等医学院校新世纪教材(科学版)《核医学》自 2004 年出版以来,经广大医学院校临床医学专业师生作为核医学教学用书和研究生、临床各科医生作为参考书使用,取得了很好的效果。正如本书第一版前言所提到的,近年来临床核医学发展迅速,涉及范围日益广泛和深入,知识和技术更新快速,内容含量明显增加,在医学领域的重要性也日益提高。为了反映核医学近年来的发展,也为了让医学生和医学工作者在较短的时间内掌握和应用核医学的方法来诊断和治疗疾病,了解核医学能为各个临床科室解决哪些问题,并了解核医学今后的发展方向,在医学实践中运用核医学,我们组织全国医学院校近 60 名具有多年教学经验的核医学工作者,共同编写了这本《核医学》第二版。

《核医学》第二版更新了原版本 90% 以上的内容,力图反映核医学的基本理论和 21 世纪的最新进展和特色。与第一版相同,第二版的写作尽量突出“新、深、精、少”原则,以“科学性、先进性、针对性、实用性”为目标。以好的编写风格,好的编写模式,博采众长,介绍核医学的基本原理和最新的技术及方法,使本书既能适合学生学习,又能有效地解决核医学工作中的实际问题。《核医学》第二版含绪论在内共二十一章。前面二十章为核医学的基本内容,每章后面附有思考题,以便学生掌握基本概念和知识。最后一章系核医学的新进展,包括分子影像、小动物显像和核医学的新方法等,供学生学习时参考,我们期望本书的读者对我们的努力作出评价。

陈绍亮
复旦大学附属中山医院
2009 年 8 月

目 录

第二版前言

绪 论

1

- 第一节 核医学的定义与内容 /1
- 第二节 核医学的必备物质条件 /2
- 第三节 核医学的特点 /2
- 第四节 核医学的简要发展历史 /2
- 第五节 学习临床核医学的方法 /3

第一章 核物理基础

5

- 第一节 原子核物理基础知识 /5
- 第二节 放射性核素的核衰变类型 /6
- 第三节 核衰变规律 /7
- 第四节 射线与物质的相互作用 /8

第二章 核医学仪器

12

- 第一节 放射性测量的原理 /12
- 第二节 体外放射性分析测定仪 /12
- 第三节 脏器功能测定仪 /13
- 第四节 γ 照相机 /14
- 第五节 单光子发射型计算机断层仪 /15
- 第六节 正电子发射型计算机断层仪 /16
- 第七节 PET-CT 和 SPECT-CT /17

第三章 放射性药物

19

- 第一节 有关放射性药物的基本概念 /19
- 第二节 医用放射性核素的来源 /20
- 第三节 诊断用放射性药物 /21
- 第四节 治疗用放射性药物 /25
- 第五节 放射性药物的质量控制 /27

第四章 辐 射 防 护

29

- 第一节 辐射生物效应 /29
- 第二节 辐射防护的原则和措施 /31

第五章 体外标记免疫分析及受体放射分析

35

- 第一节 体外标记免疫分析的基本原理 /35
- 第二节 体外标记免疫分析的基本试剂和基本技术 /36
- 第三节 体外标记免疫分析的类型 /36
- 第四节 体外标记免疫分析的质量控制 /39
- 第五节 受体放射分析的基本方法 /41

第六章 放射性核素显像和放射性核素功能测定基础知识

45

- 第一节 放射性核素显像基础 /45
- 第二节 放射性核素显像的质量控制 /49
- 第三节 放射性核素功能测定 /51

第七章 中枢神经系统

52

- 第一节 脑灌注显像 /52
- 第二节 放射性核素脑灌注显像介入试验 /61
- 第三节 PET 脑代谢显像 /62
- 第四节 脑受体显像 /67
- 第五节 血脑屏障功能显像 /70
- 第六节 脑脊液间隙显像 /73
- 第七节 PET 脑肿瘤显像 /74

第八章 内 分 泌 系 统

82

- 第一节 甲状腺功能测定 /82
- 第二节 甲状腺显像 /86
- 第三节 甲状旁腺显像 /93
- 第四节 肾上腺显像 /95

第九章 心 血 管 系 统

99

- 第一节 心肌灌注显像 /99
- 第二节 心肌代谢显像 /109
- 第三节 放射性核素心血池显像和心功能测定 /112
- 第四节 亲心肌梗死显像 /116
- 第五节 心脏神经受体显像 /117
- 第六节 心脏大血管动态显像 /118
- 第七节 静脉血栓探测 /119
- 第八节 核医学在防治冠状动脉再狭窄中的应用 /121

第十章 消化系统

124

- 第一节 消化道出血显像 /124
- 第二节 异位胃黏膜显像 /127
- 第三节 唾液腺显像 /129
- 第四节 消化道动力学研究 /131
- 第五节 门静脉压力测定 /133
- 第六节 消化系统核医学中的非影像学方法 /134

第十一章 肝胆显像

137

- 第一节 肝胶体显像 /137
- 第二节 肝血流灌注与血池显像 /140
- 第三节 放射性核素肝胆动态显像 /145
- 第四节 肝肿瘤阳性显像 /149
- 第五节 肝受体显像 /151
- 第六节 肝动脉灌注显像 /152

第十二章 呼吸系统

156

- 第一节 肺灌注显像 /156
- 第二节 肺通气显像 /159
- 第三节 肺灌注显像和肺通气显像的临床应用 /161
- 第四节 肺肿瘤显像 /163

第十三章 骨、关节系统

171

- 第一节 骨显像 /171
- 第二节 关节显像 /182
- 第三节 骨密度测定 /183
- 第四节 骨骼系统比较影像学 /184

第十四章 血液和淋巴系统

188

- 第一节 骨髓显像 /188
- 第二节 脾显像 /191
- 第三节 淋巴系统显像 /194
- 第四节 前哨淋巴结显像和探查 /196

第十五章 泌尿系统显像和功能测定

198

- 第一节 肾动态显像 /198
- 第二节 肾静态显像 /204
- 第三节 肾功能测定 /205
- 第四节 膀胱显像 /209
- 第五节 阴囊血流及血池显像 /210

第十六章 肿瘤显像

213

- 第一节 核素肿瘤显像的基础 /213
- 第二节 肿瘤代谢显像 /215
- 第三节 肿瘤受体显像 /218
- 第四节 肿瘤放射免疫显像 /231
- 第五节 PET-CT 肿瘤显像 /236
- 第六节 肿瘤非特异性阳性显像 /244

第十七章 炎症显像

248

- 第一节 ^{18}F -FDG 炎症显像 /248
- 第二节 放射性标记白细胞和 ^{67}Ga 枸橼酸盐炎症显像 /250
- 第三节 放射性核素标记人非特异性免疫球蛋白(IgG)显像 /254
- 第四节 抗人粒细胞单克隆抗体(AGAB)显像 /256

第十八章 儿科核医学

259

- 第一节 儿科核医学的特点 /259
- 第二节 消化系统 /260
- 第三节 骨骼系统 /266
- 第四节 泌尿系统 /267
- 第五节 心脏和肺 /270

第十九章 放射性核素治疗

272

- 第一节 放射性核素治疗概论 /272
- 第二节 甲状腺功能亢进症的放射性核素治疗 /273
- 第三节 甲状腺癌转移灶的放射性核素治疗 /276
- 第四节 肿瘤的放射性核素治疗 /282
- 第五节 骨转移癌的止痛治疗 /285
- 第六节 ^{131}I -MIBG 治疗神经内分泌肿瘤 /290
- 第七节 放射性核素治疗增生性血液系统疾病 /293
- 第八节 放射性核素敷贴治疗 /295
- 第九节 近距离治疗 /299

第二十章 核医学新进展

305

- 第一节 分子核医学研究进展 /305
- 第二节 分子核医学的发展前景 /308
- 第三节 小动物正电子发射计算机断层和单光子发射计算机断层的新进展及应用 /311
- 第四节 标记免疫分析研究进展 /315
- 第五节 放射免疫治疗和放射受体治疗的新进展 /320
- 第六节 放射免疫显像的新进展 /323
- 第七节 医学图像融合技术新进展和临床应用 /333
- 第八节 核医学影像在肿瘤治疗计划系统中的应用 /335
- 第九节 肺栓塞核医学诊断的新观点 /340

选择题答案

346

绪 论

第一节 核医学的定义与内容

核医学(nuclear medicine)是研究核技术在医学诊断、治疗和科学研究中的应用及其理论的学科。它是一门边缘学科,涉及多个学科领域,是医学与核物理、电子学、化学、生物学、计算机技术等相关学科相结合的产物,是集医学诊断、治疗以及医学科学研究为一体的临床医学学科。

随着医学事业和核技术的迅速发展,特别是近年来电子计算机技术、核电子学、核药学、细胞杂交瘤技术、分子生物学和加速器微型化等现代科学技术的迅速发展和渗透,使核医学成为一门涉及面广,整体性较强的综合性学科。它通常以应用和研究的范围分为基础核医学(basic nuclear medicine)和临床核医学(clinical nuclear medicine)两大部分。临床核医学的内容包括疾病诊断和治疗两大方面。诊断核医学又可根据是否将放射性药物引入体内分为体外诊断核医学和体内诊断核医学。后者在检查过程中通过成像的方法来诊断疾病的称为放射性核素显像(radionuclide imaging),区别于非影像的功能检查法。因此临床核医学包含体外分析、功能测定、核素成像和核素治疗四大范畴。

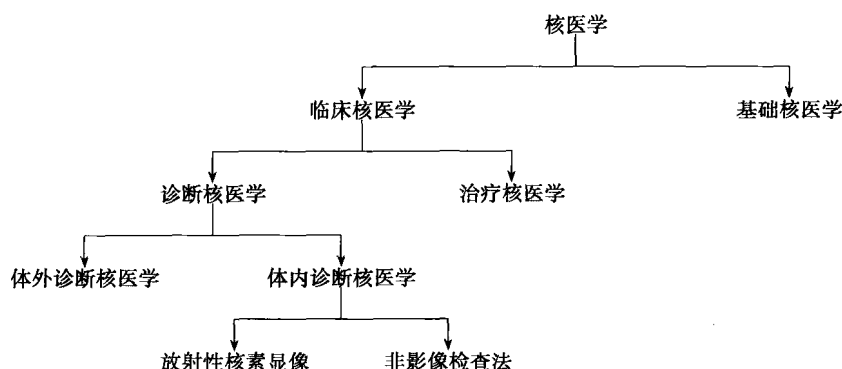


图 0-1-1 核医学的范畴和分类

体外诊断核医学以标记免疫分析为代表,其本质是放射配体结合分析,是以竞争性抑制为基础的,可用于在体外测定血液、尿液及其他体液中的微量激素、药物、肿瘤标志物含量,具有灵敏度高、特异性强等特点。目前在临床上广泛用于内分泌、肿瘤疾病的诊断和药物浓度监测。

核素功能测定是放射性核素体内诊断法的一种,其基本原理是放射性核素示踪法。放射性核素示踪剂被引入体内后,在体内某些特定器官的摄取、浓聚、分布、排泄过程可通过放射性仪器探测并加以记录,以时间-放射性曲线或百分比的形式反映这些器官的功能状态。临床上常用来进行甲状腺功能测定,肾功能测定等。功能测定和放射性核素显像多数使用发射 γ 射线的放射性药物。

放射性核素显像是临床核医学最重要、最丰富的内容,它的原理是特定器官或组织选择性地摄取、浓集某种放射性药物,于是该器官或组织成为“放射源”,它所发射的射线被放射性成像仪器所探测并形成核医学影像。由于这些器官或组织选择性摄取、浓集放射性药物的过程与其功能、代谢和血流状况直接相关,所以核医学影像除了提供解剖图像外,更特异的是能提供生理、代谢的影像,因而有“功能影像”之称。

核素治疗通过放射性核素发射的射线,在病灶局部产生电离生物效应,从而破坏或抑制病变组织。治疗核医学分为内照射治疗和外照射治疗两类。进行内照射治疗的前提是放射性药物必须选择性地高度浓聚在病变部位,且多数选择射程很短的 β 或 α 粒子。甲状腺功能亢进、甲状腺癌转移灶等都可用放射性核素治疗。

基础核医学又可称为实验核医学,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、体外放射分析、活化分析、放射自显影以及稳定性核素分析等,既是核医学的理论基础,又为临床核医学提供了技术手段。

临床核医学发展十分迅速,逐步发展形成了心血管核医学(核心脏病学)、内分泌核医学、神经核医学、肿瘤核医学、消化核医学、呼吸核医学、造血系统核医学、泌尿核医学、治疗核医学等系统学科,并与相应的临床学科有着密切的联系。

第二节 核医学的必备物质条件

实施核医学检查和治疗有两个必备的物质条件,一是灵敏而精确的核仪器,二是适当的放射性药物或放射性试剂。核医学的发展就是通过核仪器和核药物的不断完善而发展起来的。有关核仪器和核药物本书将有专章介绍。

第三节 核医学的特点

首先,我们强调一下“核”的概念。所谓“核”指的是“原子核”。伴随着原子核的核衰变放射性核素发射出射线。因此核医学有别于其他医学影像成像的原理和方法。

第二,要理解“示踪”原理在核医学诊疗中的重要性。能被“示踪”要符合两方面的条件。第一方面是作为一种标志,便于检测,便于跟踪,便于显示,便于了解其运转途径和分布。这一方面可以通过放射性核素发出的射线与探测仪器的相互作用来实现,这也就是放射性药物在以往统称为“示踪剂”的原因。第二方面是其运转途径和分布都必须按照一定的方式和规律,这就引入了核医学诊疗的另一个,也就是最主要的特点:只有在活体中才能进行。

第三,所谓的“示踪”,反映的是活体的运转过程、代谢过程,反映的是活体的功能。在核医学的许多诊疗过程中,都需要把放射性药物引入体内,通过血液(或体液)循环、特异性结合、细胞摄取、离子交换等生理、生化、代谢途径,显示特定器官的功能。由于病变过程中功能的变化、代谢的变化往往早于形态的变化,因此一些疾病能被核医学检查早期发现。

最后,由于放射性核素要引入体内,需要重视和保证受检者的安全。核医学检查项目患者所受的辐射剂量都控制在安全范围内。同时由于操作者要进行放射性核素的工作,更需要掌握射线防护等专门技术知识。

第四节 核医学的简要发展历史

严格或者确切地说,核医学直到1938年后才初显端倪。该年Hertz、Hamilton和Soley用放射性碘作甲状腺功能检查。直到1951年Mayneord和Cassen发明闪烁扫描机,开始形态学的检查。1957年Anger发明了 γ 照相机,能一次成像。而1959年Yalow和Berson发明放射免疫测定,开创了微量物质测定的新时代。

经过几十年的努力,核医学得以进步和发展到现阶段,离不开放射性药物的研制和放射性仪器的不断发展。 $^{99}\text{Mo}-^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器和一大批新的放射性药物研制成功推动了核医学的快速发展。而目前的显像仪器,从只能进行平面显像的 γ 相机发展到能做断层显像的发射型计算机断层仪(emission computed tomography, ECT),后者又包括单光子发射型计算机断层仪(single-photon emission computed tomography, SPECT)和正电子发射型计算机断层仪(positron emission computed tomography, PET),并且进展到与放射科穿透型计算机断层仪(computed tomography, CT)融合在一个机器上的SPECT-CT和PET-CT。还有专供进行小动物成像的小动物SPECT和PET,及小动物SPECT-CT和PET-CT。核医学进入分子影像的新时代,核医学的进展已经使其成为医学现代化的标志。

我国的核医学事业起步于20世纪50年底末,经过50余年的发展,逐渐缩短了与先进国家的差距,为疾病的诊断和治疗做了不少工作和贡献。

第五节 学习临床核医学的方法

学习临床核医学,可以从以下几个方面着手。

一、掌握基础

- (1) 复习掌握核物理的有关基础知识,如了解核的不稳定性、衰变规律和射线种类及其特性,掌握核素,半衰期、放射性活度等概念。
- (2) 了解核医学成像仪器和探测仪器。
- (3) 了解放射性药物的特点并熟悉有关放射性药物。

二、善于学习

- (1) 首先弄清原理和方法学,了解其特点。
- (2) 结合生理、生化、病理及解剖知识解释所观察到的变化。
- (3) 掌握正常的影像特征,并了解异常变化。
- (4) 多利用书本中的例图,加深理解和印象。

三、善于联系

- (1) 对各个系统的疾病的检查方法,要联系正在学习的或已经学习的内科基础和内、外科知识。
- (2) 在理解的基础上掌握有关的核医学检查和治疗的临床适应证。

四、勤于比较

学会与 CT、MRI、B 超等影像学资料比较,理解各种影像方法的长处和不足,善于取长补短,综合应用。

期望通过学习临床核医学,使医学生在以后的临床实践中记得核医学可以诊断和治疗什么疾病,什么时候应该选用核医学方法,是否首选。也希望医学生通过临床核医学的学习,能理解边缘学科是如何形成的,具有哪些特点。扩展思路,利于今后在科研、医学实践中学会如何借鉴其他新的科学技术来促进医学研究和实践的发展。

(陈绍亮)

思考题

一、问答题

1. 核医学是研究什么的,它的特点是什么?
2. 临床核医学包含哪四大范畴?
3. 临床核医学与哪些基础知识相关?
4. 核医学发展的关键是什么?
5. 核医学的发射型计算机断层仪(ECT)和放射科的穿透型计算机断层仪(CT)有什么异同?
6. 发射型计算机断层仪(ECT)包括哪些仪器?

二、多选题

1. 临床核医学包含

A. 功能测定、核素成像和核素治疗	B. 体外分析、核素成像和核素治疗
C. 体外分析、功能测定、核素成像	D. 体外分析、功能测定、核素成像和核素治疗
E. 功能测定、核素成像和核素治疗	
2. 核医学是研究

A. 医学诊断的学科	B. 医学治疗和科学研究的学科
C. 医学诊断、治疗和科学研究的学科	D. 核技术在医学诊断、治疗的学科
E. 核技术在医学诊断、治疗和科学研究的学科	
3. 实施核医学检查的必备条件是

- A. 核仪器和医生
 - B. 放射性药物和患者
 - C. 核仪器和放射性药物
 - D. 医生和患者
 - E. 核仪器,放射性药物和患者
4. 核医学影像反映的是
- A. 放射性药物在活体的运转、代谢过程和器官功能
 - B. 放射性药物的运转、代谢过程和器官功能
 - C. 放射性药物体外的运转、代谢过程和功能
 - D. 放射性药物的活体功能
 - E. 组织解剖结构

第一章 核物理基础

第一节 原子核物理基础知识

一、原子结构

自然界中的物质都由元素组成,组成元素的基本单位是原子(atom),原子结构与元素的性质有密切关系。所有的原子都是由原子核(atomic nucleus)和核外电子(electron)组成(图 1-1-1)。

原子核由质子(proton)和中子(neutron)组成,带正电荷的质子和电中性的中子统称为核子(nucleon)。核子之间有一种强大的短程引力,称为核力(nuclear force),核力能使核子结合在一起。带正电荷的质子之间又存在着一种静电斥力。原子核中的静电斥力与核力是否平衡,关系到核素的稳定性。

核外电子按照电子层半径由小到大的排列顺序,在一定的轨道上围绕原子核高速旋转。不同的原子有不同

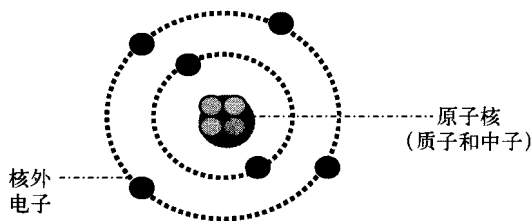


图 1-1-1 原子结构

核外电子数和电子层数,一般用 n 表示核外电子层数, n 的数值越大电子层的能级越高。用 K、L、M、N、O、P、Q 等符号表示从内向外不同能级的电子层。如 $n=1, n=2$, 分别表示 K、L 电子层,L 电子层半径大于 K 层,所以,L 层的电子能级比 K 层电子高。

通常用 ${}_Z^AX_N$ 表达原子核的结构,X 代表元素符号,A 表示原子核的质量数,Z 表示核内质子数,N 表示核内中子数。因为元素符号 X 确定了每种核素的化学性质和核内质子数、原子序数,故可将原子核结构直接简写为 AX ,例如: ${}_{18}^{19}\text{F}_9$ 和 ${}_{53}^{131}\text{I}_{78}$ 可以分别简写为 ${}^{18}\text{F}$ 和 ${}^{131}\text{I}$ 。

二、核素、同位素和同质异能素

1. 核素 质子数、中子数及核能态均相同的一类原子称之为一种核素(nuclide)。如 ${}^{15}\text{O}$ 、 ${}^{11}\text{C}$ 、 ${}^{89}\text{Sr}$ 分别属于不同的核素。

2. 同位素 具有相同的质子数、原子序数和化学性质,而中子数不同的一类核素互称为同位素(isotope)。如 ${}^{131}\text{I}$ 、 ${}^{125}\text{I}$ 、 ${}^{124}\text{I}$ 、 ${}^{123}\text{I}$ 互为碘元素的同位素。

3. 同质异能素 核内质子数、中子数均相同,而核能态不同的一类核素称之为同质异能素(isomer)。如 ${}_{43}^{99\text{m}}\text{Tc}$ 和 ${}_{43}^{99}\text{Tc}$ 二者质子数和中子数完全相同,但所处的核能态不同。前者为激发态(“m”表示激发态),后者为基态,它们互称为同质异能素。

三、稳定性核素与放射性核素

核素分为稳定性核素和放射性核素两种类型。核素原子核的稳定性又取决于核内中子数与质子数的比例,两者之比基本相同时原子核处于稳定状态。当核内中子数或质子数过多时,原子核处于不稳定状态。因此,稳定性核素和放射性核素与核内中子数和质子数的比例有关。

1. 稳定性核素 原子核不能自发地发生核衰变,处于稳定状态的核素,称为稳定性核素(stable nuclide)。

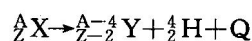
2. 放射性核素 不稳定状态的原子核,经过核内结构或能级调整,自发地释放出射线同时转变为另一种原子核,这种核素称为放射性核素(radionuclide)。放射性核素分为天然和人工生产两种类型,人工生产的放射性核素多数由核反应堆、回旋加速器及核素发生器中获得。

第二节 放射性核素的核衰变类型

放射性核素的原子核自发地释放出射线转变成成为另一种核素的过程,称之为核衰变。衰变前的核素原子核称母核,衰变后转变为另一种核素的原子核称为子核。放射性核素的核衰变可分为以下几种类型。

一、 α 衰变

核衰变时释放出 α 粒子的衰变称为 α 衰变(alpha decay)。经过 α 衰变后的母核(X)失去 2 个中子和 2 个质子,相当于一个氦核(${}^4_2\text{He}$) (图 1-2-1)。因此,衰变后产生的子核(Y)质量数减少 4,原子序数减少 2,同时释放出衰变能(Q),单位用电子伏(eV),还可用于千电子伏(keV)或百万电子伏(MeV) 表示。 α 衰变的反应式如下:



如,

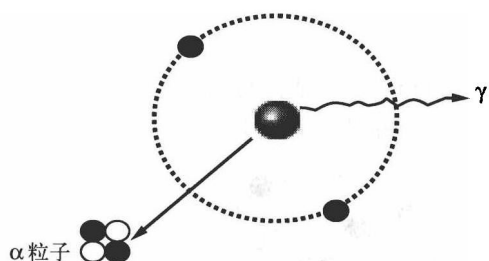
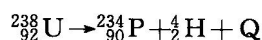


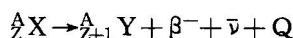
图 1-2-1 α 衰变

α 衰变多发生在原子序数 > 82 的核素,由于 α 粒子带有电荷,电离能力强,但其质量大,射程短,穿透能力弱,故一张纸就可以阻挡 α 粒子的通过。鉴于 α 粒子的这一物理特性,核医学领域试验将 ${}^{211}\text{At}$ 、 ${}^{212}\text{Bi}$ 等释放 α 粒子的核素引入肿瘤细胞内治疗疾病。

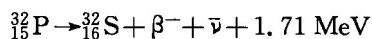
二、 β 衰变

核衰变中仅发生原子序数改变,而质量数不变的核衰变方式为 β 衰变(beta decay)。 β 衰变包括 β^- 衰变、 β^+ 衰变和电子俘获三种核衰变方式。

1. β^- 衰变 核衰变时释放出 β^- 粒子的衰变被称为 β^- 衰变(negative beta decay)。这种衰变常发生于中子过多的核素,由于核内的一个中子转化为质子,同时释放出 β^- 粒子、反中微子(antineutrino, $\bar{\nu}$)和能量,使原子核内的中子和质子达到平衡(图 1-2-2)。 β^- 衰变后子核的质量数不变,原子序数增加 1。 β^- 衰变的反应式如下:



如,



β^- 粒子与负电子相同,带有 1 个负电荷,有较强的电离能力。与 α 粒子相比,电离能力弱于 α 粒子,但穿透能力大于 α 粒子。目前,临床治疗大多用释放 β^- 粒子的放射性核素。例如 ${}^{89}\text{Sr}$ 用于多发性骨转移灶疼痛的治疗。

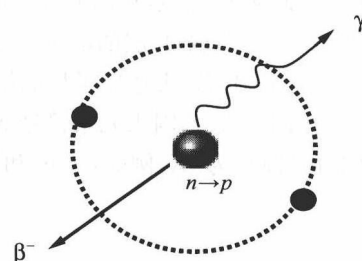


图 1-2-2 β^- 衰变

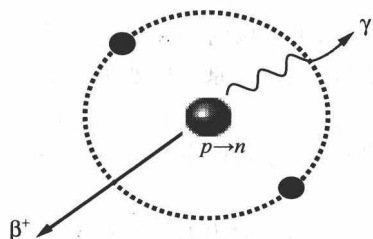
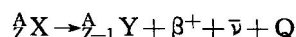
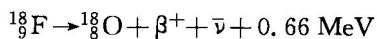


图 1-2-3 β^+ 衰变

2. β^+ 衰变 核衰变时释放出 1 个正电子的衰变称为 β^+ 衰变(positive beta decay), β^+ 衰变又称为正电子衰变。这种衰变多发生于核内质子过多的核素,衰变时核内 1 个质子转变为 1 个中子,同时释放出 1 个正电子、1 个中微子和能量(图 1-2-3)。正电子衰变后母核与子核的质量数不变,原子序数减少 1。正电子衰变的反应式如下:



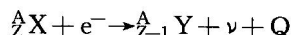
如,



正电子衰变只发生于人工生产的放射性核素,天然的核素不发生正电子衰变。

由于核衰变释放出的正电子不能长时间存在,正电子瞬间又与物质中的负电子结合发生湮没辐射(见本章第四节)。核医学显像设备 PET(正电子发射型计算机断层)或 PET-CT 就是利用 β^+ 衰变与湮没辐射这一物理现象作为成像探测的基础。

3. 电子俘获 原子核衰变时从核外 K 层轨道俘获 1 个电子,使核内的 1 个质子转变成 1 个中子,同时释放出 1 个中微子的过程称之为电子俘获(electron capture, EC)(图 1-2-4)。电子俘获后产生的子核的质量数不变,但原子序数减少 1。衰变反应式如下:



如:

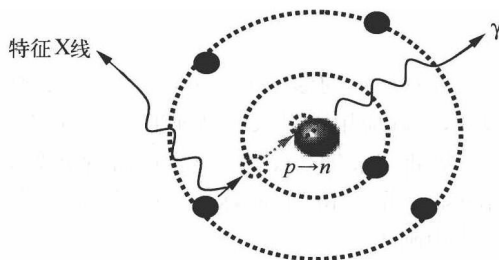
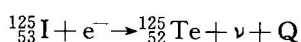
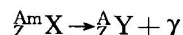


图 1-2-4 电子俘获

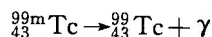
电子俘获发生时,因为内层轨道的电子缺失,外层电子向内层轨道跃迁补充内层电子空缺,外层电子多余的能量则以特征 X 射线释放。若电子跃迁后多余的能量不以特征 X 射线释放,而将能量传递给更外层电子,使其脱离原子核的束缚成为自由电子,此电子称为俄歇电子(Auger electron)。

四、 γ 衰变

1. γ 衰变 处于高能态或激发态的原子核跃迁到低能态或基态时,释放出 γ 光子的过程称为 γ 衰变(gamma decay);又称为 γ 跃迁(gamma transition)或同质异能跃迁(isomeric transition, IT)(图 1-2-5)。经 γ 衰变后的子核与衰变前母核的质量数、原子序数均相同,只有核素的能量状态发生变化。 γ 衰变的反应式如下:



如,



γ 光子是一种不带电的光子流,电离能力较 α 射线和 β^- 射线弱,穿透能力较之为强。因此,释放 γ 光子的核素适合于放射性核素脏器显像和功能诊断。

2. 内转换 高能态或激发态的原子核向低能态或基态跃迁时,所释放的能量不是 γ 光子,而是将多余的能量直接传递给核外电子,使之脱离轨道成为自由电子的过程称内转换(internal conversion),该自由电子称为内转换电子(internal conversion electron)(图 1-2-5)。

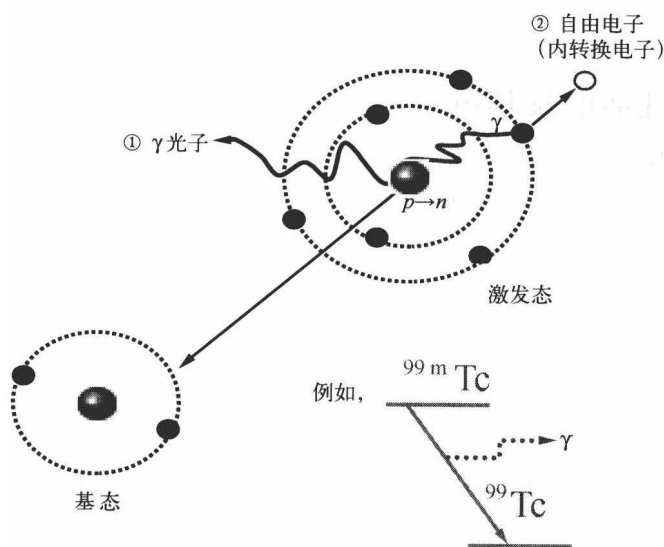


图 1-2-5 ① γ 衰变和② 内转换

第三节 核衰变规律

一、核衰变公式与衰变常数

任何放射性核素都在不停地自发地进行核衰变,但是原子核的衰变不是同时发生的,也不受周围环境因素的影响,而是遵循指数规律衰减。这种衰变规律可用公式表达:

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