

高等医学院校教材

简明核医学教程

第2版

主 编 蒋宁一

副主编 张祥松 苏 敏 陈 萍 王全师

高等医学院校教材

简明核医学教程

第2版

主 编 蒋宁一

副主编 张祥松 苏 敏 陈 萍 王全师

编 委 (以姓氏笔画为序)

王全师 (南方医科大学南方医院)

卢献平 (中山大学孙逸仙纪念医院)

刘 生 (中山大学孙逸仙纪念医院)

苏 敏 (广东医学院附属医院)

杨 健 (广东医学院附属医院)

张 弘 (中山大学孙逸仙纪念医院)

张祥松 (中山大学附属第一医院)

陈 萍 (广州医科大学附属第一医院)

林 伟 (广州医科大学附属第二医院)

欧阳伟 (南方医科大学珠江医院)

岳殿超 (中山大学附属第一医院)

徐 浩 (暨南大学附属第一医院)

梁 宏 (中山大学附属第一医院)

梁九根 (中山大学孙逸仙纪念医院)

蒋宁一 (中山大学孙逸仙纪念医院)

程木华 (中山大学附属第三医院)

樊 卫 (中山大学附属肿瘤医院)

秘 书 饶国辉 (中山大学附属第一医院)

人民卫生出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

简明核医学教程 / 蒋宁一主编. —2 版. —北京:
人民卫生出版社, 2015

ISBN 978-7-117-21252-6

I. ①简… II. ①蒋… III. ①核医学 - 医学院校 -
教材 IV. ①R81

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 205995 号

人卫社官网	www.pmph.com	出版物查询, 在线购书
人卫医学网	www.ipmph.com	医学考试辅导, 医学数 据库服务, 医学教育资 源, 大众健康资讯

版权所有, 侵权必究!

简明核医学教程

第 2 版

主 编: 蒋宁一

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: 北京盛通印刷股份有限公司

经 销: 新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 17

字 数: 414 千字

版 次: 2012 年 2 月第 1 版 2015 年 10 月第 2 版

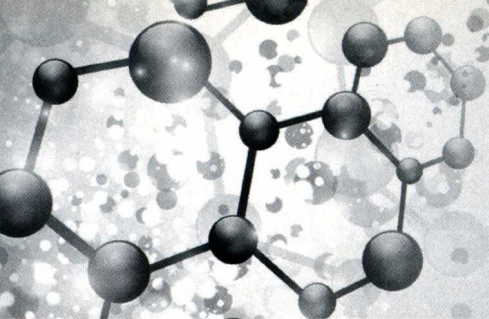
2015 年 10 月第 2 版第 1 次印刷 (总第 6 次印刷)

标准书号: ISBN 978-7-117-21252-6/R · 21253

定 价: 62.00 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)



前言

自 2012 年《简明核医学教程》出版发行以来,经过 3 年来的教学实践,听取部分授课教师及学生的意见和建议,结合日益进步和发展的核医学现状,经全体编委会讨论并报人民卫生出版社领导审核,决定修订和再版该教材。

该教材仍然秉承国家卫生计生委和教育部培养新型医学人才的要求,推动医学本科教育改革与发展,强化基础理论、基本知识和基本技能,突出学科特色,明确核医学的特点与其他相关学科的区别,以培养和提高医学生对核医学的了解与兴趣为目的。突出实用性、可操作性,强化经典、成熟、共识的内容。在精简基本理论、基础知识和基本方法的前提下,结合近年来核医学研究成果的精华,剔除陈旧内容,突出重点和实用性。注重核医学与临床联系,注重培养学生在临床实践中应用核医学技术与方法解决问题的能力。

全书共分 17 章,前 3 章主要介绍核医学的基础知识和基本技术,其中重点介绍分子影像学技术。第 4 章至第 12 章,全面介绍各系统核医学显像技术与临床应用。第 13 章至第 17 章主要介绍核素治疗技术与方法。

综合各位编委的意见,结合核医学最新发展,调整教材的重点,推陈出新,突出本专业的特色。同时对基本理论、基础知识和基本方法全面简要介绍。对影像部分提出各种影像学比较,对治疗部分重点介绍成熟、经典和实用性强的最新内容。

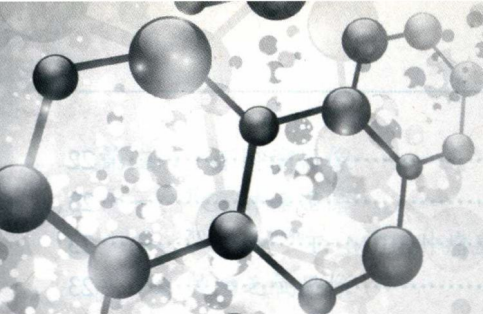
本书内容全面、文字精练、重点突出、实用性强,特别适合核医学本科教学特点。

由于主编水平有限,加上时间较仓促,本书难免存在许多缺点和错误,诚望广大师生在使用中提出宝贵意见。

祝核医学事业兴旺发达!

蒋宁一

2015 年 4 月 8 日于广州



目 录

第一章 核医学总论	1
第一节 核医学定义和内容	1
第二节 核物理基础知识	1
一、基本概念	1
二、放射性核衰变	2
三、射线与物质的相互作用	4
四、常用辐射剂量学单位	6
第三节 放射性药物	6
一、放射性药物的概念、分类及特点	6
二、放射性药物中的核素来源	7
三、放射性药物的体内聚集机制	8
四、放射性药物的制备	9
五、放射性药物质量要求	9
第四节 核医学常用仪器	9
一、射线探测的基本原理	9
二、 γ 闪烁探测器	10
三、显像核仪器	10
四、其他常用核仪器	13
第五节 辐射生物效应与防护	13
一、人类受到的电离辐射源	13
二、电离辐射的生物效应	14
三、辐射防护的原则和措施	15
四、核医学辐射防护相关知识	16
第二章 放射性核素示踪技术	18
第一节 放射性核素示踪技术的原理及特点	18
一、放射性核素示踪技术的基本原理	18
二、放射性核素示踪技术的特点	19
三、放射性核素示踪技术的基本类型	19
第二节 体外放射分析技术	20
一、放射免疫分析法	20
二、免疫放射分析法	22

三、其他放射竞争结合分析法·····	22
第三节 放射性核素显像技术·····	23
一、放射性核素显像技术的基本方法·····	23
二、放射性核素显像技术的类型及特点·····	23
三、放射性核素显像技术的图像分析要点·····	25
四、放射性核素显像技术与其他技术比较·····	27
第三章 分子影像学技术·····	29
第一节 核医学分子影像概要·····	29
一、分子影像的定义·····	29
二、分子探针·····	29
三、研究对象及设备·····	30
四、分子影像技术·····	30
五、核医学分子影像·····	34
六、各种分子影像技术比较·····	34
七、分子影像学研究的意义·····	35
第二节 分子影像与疗效评价及个性化治疗·····	35
一、分子影像与诊断·····	35
二、分子影像与治疗决策·····	36
三、分子影像与早期疗效评价·····	38
四、分子影像与肿瘤残余、复发和治疗后纤维瘢痕形成或坏死的鉴别·····	39
五、分子影像与放射治疗·····	40
六、分子影像与预后评估·····	41
七、分子影像与个性化治疗·····	41
第三节 核医学分子影像的进展·····	44
一、代谢显像·····	44
二、受体显像·····	45
三、基因显像·····	48
四、细胞凋亡显像·····	50
五、乏氧显像·····	51
六、放射免疫显像·····	51
七、分子影像应用前景·····	53
第四章 肿瘤显像·····	54
第一节 肿瘤代谢显像·····	54
一、肿瘤代谢·····	54
二、肿瘤代谢显像·····	54
三、肿瘤代谢显像的临床应用·····	59

第二节 亲肿瘤显像	66
一、 ^{67}Ga 肿瘤显像	66
二、 ^{201}Tl 和 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MIBI 肿瘤显像	67
三、肿瘤乏氧显像	68
四、放射免疫显像	69
第三节 前哨淋巴结显像	70
一、前哨淋巴结显像	70
二、前哨淋巴结显像或探测的临床应用	70
第四节 肿瘤影像技术比较与进展	71
第五章 心血管系统核医学	73
第一节 心肌血流灌注显像	73
一、显像原理	73
二、显像方法	74
三、适应证与禁忌证	85
四、临床应用评价	85
第二节 心肌活力的检测	89
一、心肌显像方法	90
二、心肌葡萄糖代谢显像方法	91
第三节 放射性核素心脏功能显像	93
一、显像原理	93
二、检查方法	93
三、适应证与禁忌证	96
四、临床应用	97
五、与相关学科的比较	98
第四节 梗死心肌阳性显像	98
一、显像原理	98
二、图像分析	99
三、临床应用	99
第五节 心血管系统核医学显像进展的简介	99
一、心脏受体显像	99
二、心肌乏氧显像	99
三、凋亡显像	100
四、动脉粥样斑块显像	100
五、血栓显像	100
第六章 神经系统	101
第一节 脑血流灌注显像	101
一、基本原理	101

二、显像方法	101
三、图像分析	101
四、临床应用	103
第二节 脑血流灌注显像介入试验	106
一、基本原理	106
二、介入方法	106
三、图像分析	107
四、临床应用	107
第三节 脑代谢显像	107
一、基本原理	107
二、显像方法	108
三、正常图像	108
四、临床应用	108
第四节 脑受体显像	111
一、基本原理	111
二、脑受体显像剂	111
三、显像方法	112
四、临床应用	113
第五节 血-脑屏障显像	114
一、放射性核素脑血管显像	114
二、脑静态显像	114
第六节 脑脊液显像	115
一、原理和方法	115
二、图像分析	116
三、临床应用	116
第七章 内分泌系统	118
第一节 甲状腺功能测定与显像	118
一、甲状腺功能测定	118
二、甲状腺核素显像	120
第二节 甲状旁腺核素显像	124
一、显像原理	124
二、显像方法	124
三、图像分析	125
四、临床应用价值	125
第三节 肾上腺显像	125
一、肾上腺皮质显像	125
二、肾上腺髓质显像	126

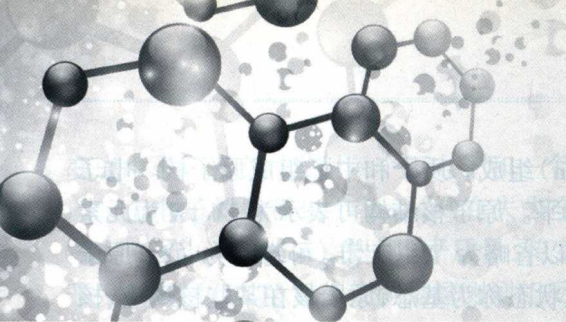
第八章 消化系统	128
第一节 唾液腺显像	128
第二节 肝与肝胆显像	130
一、肝胆动态显像	130
二、肝血流灌注和血池显像	133
三、肝胶体显像	135
第三节 消化道显像与呼气试验	137
一、胃-食管反流显像	137
二、胃黏膜异位显像	138
三、胃肠道出血定位显像	140
四、十二指肠-胃反流显像	141
五、 ^{14}C -尿素呼气试验	142
第九章 呼吸系统	145
第一节 肺灌注显像	145
一、显像原理	145
二、显像方法	145
三、影像分析	146
四、临床应用	149
第二节 肺通气显像	157
一、显像原理	157
二、显像方法	157
三、影像分析	158
四、临床应用	159
第十章 骨骼系统	161
第一节 骨显像	161
一、基本原理	161
二、显像剂	161
三、显像方法	161
四、图像分析	162
五、临床应用	167
第二节 关节显像	172
一、显像原理	172
二、显像剂	172
三、显像方法	172
四、图像分析	172
五、临床应用	173
第三节 骨密度测量	174

一、概述	174
二、双能 X 线吸收法	174
三、骨质疏松症的诊断标准	175
四、骨密度测量的临床价值	175
五、DXA 技术的其他临床应用	176
第十一章 泌尿生殖系统	177
第一节 肾动态显像与介入试验	177
一、肾动态显像	177
二、肾动态显像介入试验	182
第二节 肾静态显像	184
一、基本原理和方法	184
二、正常图像	184
三、临床应用	185
第三节 膀胱输尿管反流、阴囊与输卵管显像	185
一、膀胱输尿管反流显像	185
二、阴囊显像	186
三、子宫输卵管显像	186
第十二章 其他显像技术	188
第一节 淋巴显像	188
一、原理、药物和方法	188
二、适应证	190
三、图像分析	190
四、临床应用	190
五、与相关学科方法比较	192
第二节 炎症显像	192
一、标记白细胞炎症显像	192
二、葡萄糖代谢炎症显像	195
三、 ⁶⁷ Ga 炎症显像	195
第三节 骨髓显像	196
一、原理与常用显像剂	196
二、方法	198
三、适应证与禁忌证	198
四、图像分析	198
五、临床应用	198
六、与相关学科方法的比较	200
第四节 脾显像	201
一、原理、放射性药物和方法	201

二、图像分析·····	202
三、临床应用·····	202
第十三章 放射性碘(¹³¹I)治疗甲状腺疾病 ·····	203
第一节 ¹³¹ I 治疗 Graves 甲状腺功能亢进·····	203
一、概述·····	203
二、原理·····	203
三、适应证与禁忌证·····	203
四、治疗方法·····	204
五、治疗反应及处理·····	205
六、疗效评价·····	206
七、随访观察·····	206
八、Graves 甲状腺功能亢进合并症与 ¹³¹ I 治疗·····	207
九、与相关治疗方法比较及疗效分析·····	209
十、放射性碘治疗中的其他问题·····	210
第二节 ¹³¹ I 治疗分化型甲状腺癌转移灶·····	211
一、概述·····	211
二、 ¹³¹ I 治疗 DTC 原理·····	211
三、适应证和禁忌证·····	212
四、治疗方法·····	212
五、治疗反应及预防和处理原则·····	213
六、随访与管理·····	214
七、治疗效果·····	214
八、与相关治疗方法比较及疗效分析·····	215
第三节 ¹³¹ I 治疗其他甲状腺疾病·····	215
一、 ¹³¹ I 治疗功能自主性甲状腺结节·····	215
二、 ¹³¹ I 治疗非毒性甲状腺肿·····	216
第十四章 放射性药物治疗骨转移癌 ·····	218
第一节 放射性药物治疗骨转移癌的基本原理·····	218
第二节 适应证与禁忌证·····	219
第三节 放射性药物·····	219
一、 ⁸⁹ 锶(⁸⁹ Sr)·····	219
二、 ¹⁵³ 钐-乙二胺四甲撑膦酸(¹⁵³ Sm-EDTMP)·····	220
三、 ¹⁸⁸ 镱-羟乙二膦酸(¹⁸⁸ Re-HEDP)·····	220
四、 ^{117m} 锡-二乙烯三胺五乙酸(^{117m} Sn-DTPA)·····	220
五、正 ³² 磷酸盐(³² P-orthophosphate)·····	221
六、 ²²³ Ra(²²³ Radium)·····	221
第四节 治疗方法与疗效评价标准·····	221

一、患者准备	221
二、疗效评价标准	221
三、用量和剂量计算	222
四、给药方法	223
五、重复治疗	223
六、不良反应	223
第五节 临床应用与疗效评价	224
第六节 常用放射性骨转移癌治疗药物比较及内外放射治疗的关系	226
第十五章 放射性药物介入治疗	228
第一节 放射性粒子植入治疗	228
一、放射性粒子	228
二、粒子治疗计划系统	229
三、粒子植入治疗的临床应用	229
四、放射性粒子治疗的并发症	231
五、临床疗效判断标准(OTR)及临床受益反应(CBR)	231
第二节 放射性胶体腔内介入治疗	231
一、治疗方法	231
二、临床应用价值	232
第三节 放射性药物动脉介入治疗	232
一、治疗方法	233
二、临床应用价值	233
第十六章 放射性药物敷贴治疗	236
第一节 放射性药物敷贴治疗简介及基本原理	236
一、放射性药物敷贴治疗简介	236
二、放射性药物敷贴器的种类及特点	236
三、放射性药物敷贴治疗的原理	237
第二节 敷贴器制作及敷贴方法	238
一、 ^{32}P 敷贴器制作法	238
二、敷贴方法	239
三、治疗方法	239
四、注意事项	240
五、敷贴治疗的临床适应证及禁忌证	240
第三节 皮肤血管瘤的放射性核素敷贴治疗	241
一、皮肤血管瘤的分类	241
二、皮肤血管瘤的治疗方法	241
三、毛细血管瘤的放射性核素敷贴治疗	241
四、其他治疗法	243

第四节 其他皮肤病的放射性核素敷贴治疗·····	244
一、毛细血管瘤外的其他皮肤病的放射性核素敷贴治疗·····	244
二、尖锐湿疣的敷贴治疗·····	244
三、瘢痕的治疗·····	244
四、眼、耳、鼻、咽疾病的敷贴治疗 ·····	245
第十七章 其他放射性药物治疗技术·····	246
第一节 放射免疫治疗·····	246
一、原理·····	246
二、适应证与禁忌证·····	246
三、治疗方法·····	246
四、肿瘤受照射剂量的影响因素·····	247
五、疗效评价和 RIT 存在的问题 ·····	248
第二节 ^{32}P 治疗血液病 ·····	248
一、 ^{32}P 治疗真性红细胞增多症 ·····	248
二、 ^{32}P 治疗原发性血小板增多症 ·····	249
三、 ^{32}P 治疗慢性白血病 ·····	249
第三节 ^{131}I -MIBG 治疗嗜铬细胞瘤 ·····	250
一、原理·····	251
二、适应证与禁忌证·····	251
三、治疗方法·····	251
四、疗效评价·····	252
第四节 ^{131}I 治疗脊髓空洞症 ·····	252
一、适应证与禁忌证·····	252
二、治疗方法·····	252
三、疗效评价·····	252
第五节 放射性胶体局部注射治疗·····	252
一、 ^{32}P 胶体注射治疗皮肤血管瘤 ·····	253
二、 ^{32}P 胶体经皮穿刺注射治疗甲状腺囊肿和腺瘤 ·····	253
三、放射性核素关节腔注射治疗慢性滑膜炎·····	254
中英文名词对照索引·····	256



第一章 核医学总论

第一节 核医学定义和内容

核医学(nuclear medicine)是应用放射性核素或核素标记物进行临床诊断、治疗疾病及生物医学研究的学科。核医学是核技术与医学相结合的产物,其涉及范围和研究领域十分广泛,是一门独立医学学科,是现代医学的重要组成部分。

核医学可大致分为实验核医学和临床核医学两大部分。

实验核医学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、体外放射分析、活化分析、放射自显影、小动物 PET/CT、SPECT/CT 的应用与研究以及稳定性核素分析技术等。实验核医学的任务是应用核素及其核射线进行生物医学的基础理论研究,探索生命现象本质和物种变化规律,揭示生物化学进展过程,认识正常生理功能,了解病理生理发展过程,为临床医学提供新理论和新技术,促进医学科学的进步与发展。

临床核医学是利用放射性核素及核素标记物诊断和治疗疾病,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。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和外照射治疗两类,在外照射治疗中,主要是应用低剂量辐射源进行的局部外照射治疗,如敷贴治疗皮肤血管瘤和瘢痕等。内照射治疗是治疗核医学的主要内容,是通过高度选择性集聚在病变部位的放射性核素或其标记物发射较短射程的核射线,对病灶进行内照射而达到治疗效果。

实验核医学与临床核医学的划分是相对的,两者并没有明确的界限,实验核医学的研究成果不断推动临床核医学的发展,而临床核医学在实践中不断发现新问题并提出新的研究课题,两者相互融会贯通,互相促进,共同发展。

核医学既是一个独立的医学学科,也是一门医学技术,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,同时也为人类观测机体内物质代谢和生命活动的变化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,需要不断探索、推陈出新、扬长避短,不断汲取相关学科的先进成果和经验,丰富学科内容。

第二节 核物理基础知识

一、基本概念

1. 原子核结构组成自然界物质的最小单元称为该物质的分子。分子由原子组成,原子

由质子(proton)、中子(neutron)和核外电子(electron)组成。质子和中子组成原子核。电子绕核运行,处于不同轨道的电子具有不同的能量水平。原子核结构可表示为 ${}_Z^AX_N$,X为元素符号,A为质量数,Z为质子数,N为中子数,通常可以省略为 AX ,如 ${}_{53}^{125}\text{I}_{72}$ 可省略为 ${}^{125}\text{I}$ 。原子所具有的是不连续能量状态,处于最低的稳定能级状态称为基态,原子核在某些核反应、核裂变及放射性衰变后仍处于较高的能级状态,称为激发态。激发态是不稳定的状态,随即通过放出光子的形式释放过剩能量改变退激回到基态。

2. 核素(nuclide)是指质子数、中子数均相同,原子核处于能级状态也相同的原子称为一种核素。即质子数和中子数都相同而原子核所处的能量状态不同的原子就是不同的核素,大多数是放射性核素。目前发现元素仅百余种,但已知的核素多达2300种。

3. 同位素,凡具有相同质子数但中子数不同的核素互称为同位素(isotope),如 ${}^1\text{H}$ 、 ${}^2\text{H}$ 、 ${}^3\text{H}$ 在元素周期表中处于同一位置,它们互为氢元素的同位素。同位素具有相同的化学和生物学性质。如 ${}^{123}\text{I}$ 、 ${}^{125}\text{I}$ 、 ${}^{127}\text{I}$ 、 ${}^{131}\text{I}$ 等碘元素的同位素就有39种之多,它们在人体内甲状腺代谢途径都是相同的。

4. 同质异能素核内质子数和中子数都相同,但所处的能量状态不同的原子称为同质异能素(isomer)。激发态的原子和基态的原子互为同质异能素,在原子质量数的后面加一小写的“m”来表示处于激发态,如 ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ 是 ${}^{99}\text{Tc}$ 的激发态,两者互为同质异能素。

5. 稳定性核素与放射性核素,凡原子核稳定,不会自发地发出射线而衰变的核素称为稳定性核素。原子核由于中子、质子数过多或过少处于不稳定状态,能自发地放出射线并转变成另一种核素的过程称为放射性衰变(radiation decay)。因而不稳定核素会发出射线也叫放射性核素(radionuclide)。自然界中存在许多质子数大于82的核素均为放射性核素。

人工放射性核素的生产就是用人工的方法改变质子和中子的比例,使稳定性原子核变成不稳定放射性核素,而广泛应用于核医学中。

二、放射性核衰变

1. 核衰变类型

(1) α 衰变:放射性核衰变时释放出 α 射线的衰变称为 α 衰变(alpha decay)。 α 射线是带电 α 粒子,由两个带正电荷的质子及两个中子(质量数为4)的氦核(${}^4_2\text{He}$)组成,所以核衰变后放射性母核的质子数减少2,质量数减少4。

这种衰变方式主要发生于原子序数大于82的天然放射性核素中。由于 α 粒子的质量数、带电荷大,故射程短,穿透力极弱,在空气中只能穿透几厘米,一张薄纸就可屏蔽,因而不适用核医学显像, α 粒子电离能力强,在内照射治疗中有潜在优势。

(2) β^- 衰变:原子核释放出 β^- 射线的衰变方式称为 β^- 衰变(beta decay), β^- 射线实质上是 β^- 粒子,带一个单位的电荷、高速运动的负电子流。发生 β^- 衰变后质子数增加1,原子序数增加1,原子的质量数不变,原子核释放出一个 β^- 粒子和反中微子($\bar{\nu}$)。

β^- 衰变主要发生于中子过多的核素。 β^- 射线穿透力弱,也不能用于核医学显像。 β^- 射线在软组织中的射程仅为厘米水平,主要应用于核素治疗,如 ${}^{131}\text{I}$ 主要发射 β^- 射线为主用于甲状腺功能亢进和甲状腺癌治疗, ${}^{32}\text{P}$ 可用于真性红细胞增多症的治疗。

(3) 正电子衰变:原子核释放出正电子(β^+ 射线)的衰变方式称为正电子衰变(positron decay)。正电子衰变发生在中子过少的核素,因质子过多导致原子核不稳定,由一个质子转

变成中子。衰变时发射一个正电子和一个中微子(ν),质子数减少1,质量数不变。

正电子的射程仅1~2mm, β^+ 在失去全部动能的同时与介质中的负电子发生湮没辐射(annihilation radiation),失去电子质量,转变成两个能量为511KeV、方向相反的 γ 光子。正电子发射断层(PET)显像仪就是探测到相反方向的两个 γ 光子而成像。

(4) 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)。主要发生在贫中子的原子核。母核经电子俘获后,子核比母核中子数增加1,质子数减少1,质量数不变。

电子俘获导致原子核结构的改变同时可能伴随放出多种射线。在原子核外,内层电子被俘入核内,外层轨道能量较高的电子补入,两电子轨道之间的能量差转换成子核的特征X射线释放出来;或传给更外层轨道电子,使之脱离轨道束缚而释出,这种电子称为俄歇电子(auger electron);在原子核内,当质子转换成中子后,有时原子核还处于较高能量的激发态,其将通过放射出 γ 射线的形式回复到基态,或把能量转给一个核外轨道电子,使之脱离轨道发射出来,这种电子称为内转换电子(internal conversion electron)。因此,电子俘获衰变的核素可以释放出X、 γ 射线用于核医学显像、体外分析,也可以释放出俄歇电子、内转换电子用于放射性核素治疗。

(5) γ 衰变:原子核从激发态回复到基态时,以发射 γ 光子形式释放过剩的能量,这一过程称为 γ 衰变(gamma decay)。这种激发态的原子核常是在 α 衰变、 β 衰变或核反应之后形成的(图1-1)。

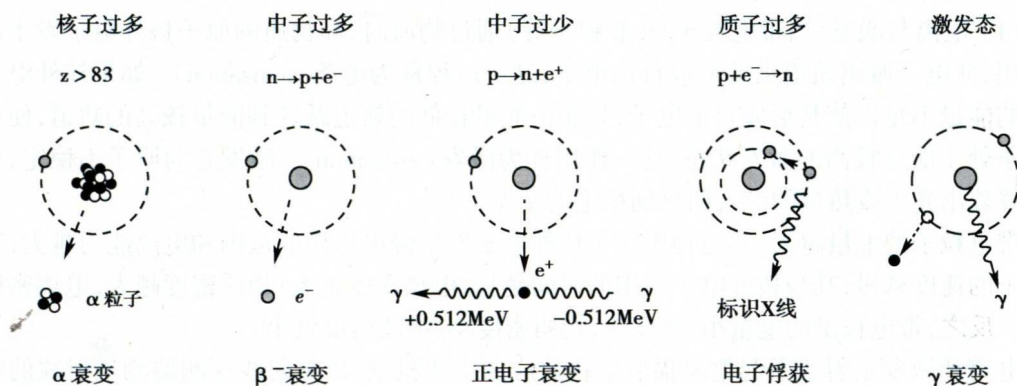


图 1-1 核衰变模式图

发生衰变后质子数和中子数都不变,仅能级状态发生改变,所以又称同质异能跃迁(isomeric transition, IT)。 γ 射线的实质是不带电荷的光子流,运动速度快,电离能力很小,穿透力极强,对机体组织的局部作用较 β^- 射线和 α 射线弱,主要用于放射性核素显像。例如, ^{99m}Mo 在 β 衰变时产生子体放射性核素 ^{99m}Tc , ^{99m}Tc 回复到 ^{99}Tc 基态时发射140keV γ 射线,放射性核素 ^{99m}Tc 容易标记各种化合物而常用做显像诊断性放射性药物。

2. 核衰变规律

(1) 衰变规律(decay law):核衰变是按一定的速率进行衰变,是随机的、自发的,并非在瞬间同时完成。因放出的射线种类及能量各不相同,其衰变速率也各有快慢,但都遵循共同的衰变规律。即放射性核素原子随时间而呈指数规律减少,其表达式为:

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

式中 N_0 是初始放射性原子数, N 是经 t 时间衰变后的原子数, e 是自然对数底数, λ 是衰变常数(decay constant)。表示放射性核素的原子在单位时间内发生衰变的比率。对于放射源, λ 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, λ 表示原子核发生衰变的几率概率, 即发生衰变的可能性。 λ 值越大, 放射性核素衰变越快。因此, λ 是反映放射性核素衰变速率的特征参数。

(2) 半衰期: 半衰期是指放射性核素由于核衰变减少一半所需要的时间, 又称物理半衰期($T_{1/2}$)。物理半衰期越短说明放射性核素核衰变越快。

当放射性核素应用于人体或生物体内时, 由于机体代谢, 放射性核素从体内排出一半所需要的时间称为生物半衰期(T_b); 生物体内的放射性核素由于机体代谢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的时间称为有效半衰期(T_{eff})。

(3) 放射性活度(radioactivity): 表示单位时间内原子核的衰变数量。单位时间内核衰变数量越多, 某物质的放射性活度越大。放射性活度与核衰变类型及射线种类无关。国际制单位是贝克(Bq), 1Bq 表示放射性核素在 1 秒钟内发生一次衰变。目前提倡使用新的国际制单位。旧制单位是居里(Ci), $1\text{Ci}=3.7 \times 10^{10}\text{Bq}$ 。

三、射线与物质的相互作用

射线通过物质时, 与物质发生一系列的相互作用, 这种相互作用称为射线的物理效应。

1. 带电粒子与物质的相互作用

(1) 电离与激发: 当带电粒子(α 、 β 粒子等)通过物质时, 和物质的原子核外电子发生静电作用, 使电子脱离轨道束缚形成自由电子, 这一过程称为电离(ionization)。如果核外电子获得的能量不足以使其形成自由电子, 只能由能量较低的轨道跃迁到能量较高的轨道, 使整个原子处于能量较高的激发状态, 这一作用称为激发(excitation)。激发态的原子不稳定, 很快以释放出光子或热量的形式回复到稳定的基态。

带电粒子的电量越大, 其与物质原子核外电子发生静电作用的范围和电离能力越大; 带电粒子的速度越慢, 其与核外电子作用的时间越长, 电离密度越大; 物质密度越大, 电离密度越大。反之, 带电粒子的电量小、速度快, 物质密度小, 电离密度就小。

电离和激发是射线引起电离辐射生物效应的主要机制, 也是射线探测器测量射线的物质基础。

(2) 散射: 带电粒子通过物质时, 受到物质原子核库仑电场的作用其运动方向和能量发生改变的过程称为散射(scattering)。其中仅运动方向改变而能量不变者称为弹性散射。 α 粒子由于质量大, 散射一般不明显, 粒子质量远小于 α 粒子, 散射较为明显。散射对射线探测和防护会带来一定影响。

(3) 轫致辐射: 带电粒子受到物质原子核电场的作用下, 运动速度和方向突然发生变化, 能量的部分或全部以 X 射线的形式发射出来, 这种过程称为轫致辐射(bremsstrahlung)。轫致辐射释放的能量与介质的原子序数的平方成正比, 与带电粒子的质量成反比, 并且随带电粒子的能量增大而增大。如粒子的轫致辐射在空气和水中很小, 因此, 在辐射防护中, 屏蔽射线通常使用如塑料、有机玻璃、铝等原子序数较小的物质效果好(图 1-2)。