

高等医学院校教材

核医学教程

(医学、儿科、口腔、卫生、放射医学专业用)

孝延龄 罗锡圭 李洪胜 主编

吉林科学技术出版社

106942

高等医学院校教材

核医学教程

(供医学、儿科、口腔、卫生、放射医学专业用)

主 编 孝延龄 罗锡圭 李洪胜

副主编 闵长庚 陈耀华 王殿羽

高凤桐 贾少微

审 阅 张永令

高等医学院校教材

核 医 学 教 程

《供医学、儿科、口腔、卫生、放射医学专业用》

主 编 李延龄 罗锡圭 李洪胜

副主编 闵长庚 陈耀华 王殿羽

高凤桐 贾少微

审 阅 张永令

责任编辑 齐向东 封面设计 马腾骥

吉林科学技术出版社出版 吉林省新华书店发行
长春市第五印刷厂印刷

787×1092毫米16开本 21.75印张 496 000字

1987年5月第1版 1987年5月第1次印刷

印数：1—7 240册

统一书号：14376·26 定价：3.98元

ISBN 7-5384-0054-0/R·5

88点

编写人员 (以姓氏笔划为序)

卜松樵	大连医学院
王玉玺	吉林医学院
王景美	大连医学院
王殿羽	佳木斯医学院
马世盐	白求恩医科大学
刘伟	核电子学与核探测技术编辑部
刘浩	中国医科大学
刘骥	哈尔滨医科大学
朱玉森	中国医科大学
朱德志	白求恩医科大学
孝延龄	白求恩医科大学
李洪胜	哈尔滨医科大学
李路平	佳木斯医学院
闵长庚	大连医学院
吕寅臣	佳木斯医学院
芮东红	哈尔滨医科大学
邢福琴	中国医科大学
宋振帮	齐齐哈尔医学院
罗锡圭	中国医科大学
陈耀华	锦州医学院
金茂雄	延边医学院
贾维国	中国医科大学
高凤桐	白求恩医科大学
高庆林	齐齐哈尔医学院
高登肖	哈尔滨医科大学
贾少微	哈尔滨医科大学
常御飘	中国医科大学

编写说明

本书为适应高等医学院校核医学教学的需要而编写,主要供医学、卫生、儿科、口腔、五官、临床检验、药学、放射医学等专业学生学习之用。亦可作为进修生、研究生及临床医师从事医疗、科研的参考书籍。教学时,各专业可根据教学对象、目的和时数,选择本书有关章节进行讲授。

近年来,核医学发展十分迅速,核医学技术已深入到基础医学、临床医学及预防医学各个领域,不但为其研究开辟了新途径,提供了主要手段和工具,而且对于认识生命现象的本质,阐明疾病的病因学,发病机理及药物作用原理等也做出了贡献。当前,核医学技术已经从解剖学的形态显像发展到以生理学功能显像为主要特征的新阶段,并正在向生化学、药理学的代谢受体显像发展,更加显示了体内核素示踪应用的突出特点。

本书共分二十一章。第一章至第八章着重介绍核医学的物理基础知识、核医学仪器、放射药物、体外放射分析、体内应用方法、电子计算机与数据处理、加速器核医学与核磁共振成像、核医学的放射防护等基本理论知识。第九章至第二十一章系统叙述了核医学理论和技术在神经、内分泌、呼吸、循环、消化、泌尿生殖、血液与造血、骨与关节、肿瘤与炎症、口腔、眼、耳鼻咽喉、皮肤和小儿等学科的应用。本书力求在有限的篇幅内反映核医学技术的新进展和现代水平,对计算机技术、单克隆抗体应用、正电子核素代谢性药物、ECT和稳定核素医学应用等亦做了必要的介绍。为便于自学,书后附有核医学常用放射核素表、通用放射核素衰变计算表、核医学常用名词英语缩略语等。

本书在编写过程中,承蒙东北地区九所医学院校领导的关怀和鼓励、北京医科大学潘中允教授为本书写了序言,有关兄弟院校核医学科同事们给予大力支持,第一汽车制造厂职工医院张萌萌医师为本书绘图、清稿,白求恩医科大学研究生王全师、吴珊、夏振雷和刘远光同志及罗云霄医师等参加了部分校对工作,对此谨致衷心谢意。

由于编者水平有限,加之编审时间仓促,书中难免有不妥之处,诚望各位读者给予批评和指正。

《核医学教程》编写组

1987年1月

序 言

核医学是一门利用开放性放射性核素进行疾病诊断、治疗和研究的新兴学科。由于它提供了众多生化物质的超微量测定方法和各种脏器生化、代谢与功能的显像技术,已成为临床医学和医学研究的重要学科之一。特别是在心脏疾病,脑神经生理和疾病、内分泌疾病、地方病和优生学等的诊断和研究方面,起着至为重要的作用。受国力和放射性核素及核医学仪器的生产水平所限,我国核医学从总体上看还相当落后。但随着两个文明建设的发展,在我国肯定会得到进一步的普及。检查项目会明显增多,质量会日益提高,效益将越来越显著。

根据当前和长远发展的需要,高等医学院校的学生有必要具备有关这一新兴学科的知识。卫生部于1978年及时地组织编写了核医学教材,为在各高等医学院校正式开设核医学课程准备了条件,也收到了预期的效果。近年来,随着教学改革的发展,各地区各院校核医学课程设置有了很多变化。以医学系为例,有的院校设为必修课(考试或考查),有的为选修课,有的院校授课时数为30多学时,有的院校授课内容较为全面,有的则从学生毕业后分配去向出发,选授部分内容。其它各系和新增设的核医学专业的核医学课程设置则更是各种各样。这种形势必然要求教材的多样化,实际上很多院校已经或正在编写和出版教材,其中包括本书。

本书由东北地区九所高等医学院校的各方面优秀人才27名联合编写,这在我国还是首次尝试,也是难能可贵。东北地区核医学不算发达,但各院校眼光远大,重视核医学的教学,注意核医学知识的普及工作,一般为医学生开设核医学课程30学时左右,内容也较为全面和丰富。并且在白求恩医科大学设立了我国唯一面向全国(招生和分配)的核医学专业,在佳木斯医学院设立了面向黑龙江省的核医学专业。他们编写本书的目的是明显的,即期望本书一举可以满足高等医学院校各专业各层次核医学课程的教学要求。避开这种设想是否可取的争论,依我看,他们的原有目的是基本上达到了。这是因为从总的来看,本书内容比较全面,基本上能反映当前世界核医学的广度和水平,比国内已经出版的各种核医学书籍有所丰富,故可以作为核医学专业学生的基本教材,其它非核医学专业则可根据需要选用其中部分内容讲授。

东北地区与日本有较好的信息和人员交流,本书在编写过程中参考了不少日本核医学名著,兼容了美日核医学的经验,应视为本书的特点。

不可避免,本书也存在不少不足之处。惜本人承邀评阅本书时,铅字排版大局已定,故只能在此提出一些弥补办法,供读者和用者参考。

1. 在临床应用方面,以疾病为中心如何综合应用有关核医学项目进行诊断的讨论不够,核医学方法与其它各种检查方法的确切比较也不够。教员讲授时宜作补充。

2. 一些较新进展的技术介绍略为简单,核仪器和放射性药物的基本应用技术(包括质量保证和质量控制的概念和方法)等方面的内容虽在《实习指导》中,但讲授核医学专业课程时,也应加以补充。

3. 在编写说明中,未对不同专业如何从本书中选用授课内容提出原则性建议。依我

见, 如对医学系学生, 核物理、核仪器、放射性药物、放射防护和放射免疫技术等只需概括性介绍, 主要内容应是临床各论。而临床各论中应以对各主要脏器疾病诊治确实有效的项目为主。讲述这些项目时, 又要以原理、最重要的适应症、正常和主要异常所见、有效性、综合使用、与非核医学检查方法的比较等为主。对其它专业学生, 也要根据特定的需要和课时恰当选用。本书当然可以作为一般医学生毕业后工作中的参考书。

4. 讲授时, 核医学名词应按王世真教授主编的《英汉核医学词汇》(1986, 原子能出版社, 北京) 统一核医学名词。

5. 关于放射性药物应重点讲授常用的或国内研制的新药, 对其它药物应根据各院校具体条件和应用情况适当加以取舍。

6. 有关内分泌的内容除专有两章外, 还散在其它一些章节中, 讲授时应加以说明。

感谢主编们的信任和厚望, 使我有幸作为本书的第一位读者。由于水平和时间所限, 以上意见未必妥当, 敬请批评指正。

衷心祝贺我国又增添了一本较好的核医学教材, 衷心希望东北地区的同志们为我国核医学事业和培养高质量的核医学专业人才进一步作出贡献, 衷心期望通过编写本书锻炼和显示出来的这批队伍日益成熟, 为迎接东北地区 and 全国核医学的发展做出更多的贡献!

潘中允

1987年2月21日于北京医科大学

目 录

第一章 核医学物理基础知识	1
第一节 原子与原子核	1
第二节 核衰变及其规律	2
一、核衰变	2
二、衰变规律	2
三、衰变方式	4
四、衰变图	5
五、放射系列	6
六、放射平衡	6
七、放射性活度	7
第三节 核反应与核素来源	8
一、核反应	8
二、核素来源	8
第四节 射线与物质的相互作用	9
一、带电粒子与物质的相互作用	9
二、光子与物质的相互作用	9
三、中子与物质的相互作用	10
第五节 辐射量及其单位	10
一、照射量	10
二、吸收剂量	11
三、剂量当量	11
四、照射量与吸收剂量的关系	12
第二章 核医学仪器	14
第一节 概述	14
一、射线探测的基本原理	14
二、核医学仪器基本结构和工作原理	14
第二节 样品测定装置	17
一、 γ 闪烁计数器	18
二、液体闪烁计数器	19
三、其他样品测定装置	20
第三节 动态功能测定装置	21
一、甲状腺功能测定仪	21
二、肾功能测定仪	22
三、 γ 心脏功能测定仪	22
四、多探头脏器功能测定仪	23
五、全身计数装置	23
第四节 核素显像装置	24

一、闪烁扫描机	24
二、 γ 照相机	24
三、发射型计算机断层装置 (ECT)	26
第五节 辐射防护仪器	26
一、场所辐射监测仪	26
二、个人剂量监测仪	27
三、表面污染监测仪	28
第三章 放射药物	29
第一节 放射药物概述	29
一、定义	29
二、特点	29
三、分类	30
第二节 医用放射核素发生器	32
第三节 放射药物的局部聚集	34
一、脏器选择性放射药物	34
二、病灶选择性放射药物	35
三、特异性结合放射药物	35
四、代谢检查放射药物	36
第四节 放射药物标记	36
一、标记方法	36
二、常用放射药物的制备	37
第五节 放射药物的质量检定	38
一、放射药物的不良反应	38
二、质量检定内容	39
第四章 体外放射分析	40
第一节 概述	40
第二节 直接饱和分析法	43
一、 ^{125}I - T_3 红细胞吸收试验	43
二、树脂吸收试验	43
三、游离甲状腺素指数	43
第三节 竞争性放射分析	44
一、放射免疫分析法	44
二、竞争性蛋白结合分析法	49
三、放射受体分析法	49
四、特殊类型的体外放射分析法	49
第四节 受体放射分析	50
一、原理	50

二、方法	50
三、应用	50
第五节 质量控制	51
第六节 体外放射分析的进展 及前景	52
第五章 体内应用方法	53
第一节 概述	53
一、核素临床应用	53
二、选择核素的要求	53
第二节 基本原理	54
一、示踪法	54
二、动态模型分析	54
第三节 样品测定	56
一、稀释法测定	56
二、代谢法测定	57
第四节 体表测定	57
一、移动速度测定	57
二、摄取能力测定	59
三、排泄能力测定	59
四、输送能力测定	59
第五节 全身测定	59
一、高水平全身计数器测定	59
二、中水平全身计数器测定	59
三、低水平全身计数器测定	60
第六节 核素显像检查	61
一、形态显像检查	61
二、功能显像检查	63
三、代谢显像检查	63
四、特异性显像检查	65
第七节 放射自显影检查	66
一、自显影检查的优缺点	66
二、自显影检查的种类	66
第八节 活化分析	67
一、样品活化分析	67
二、体内活化分析	67
第九节 稳定核素应用	68
一、稳定核素特点	68
二、稳定核素的临床应用	69
第十节 诊断效能评价	70
一、方法	70
二、指标	70

第十一节 核素治疗	71
一、核素治疗方法	71
二、核素治疗评价	72
三、核素治疗前景	72
第六章 电子计算机与数据处理	73
第一节 电子计算机的基本原理	73
一、模拟量与数字量	73
二、数字量的表示和信息量	74
三、计算机的硬件系统	74
四、计算机的软件系统	75
第二节 核医学的数据处理系统	76
一、数据处理系统的硬件	77
二、数据的采集和取样定理	77
三、统计涨落	78
第三节 核医学的图像处理	78
第四节 核医学的动态分析	79
第七章 回旋加速器、ECT与 NMR-CT	81
第一节 回旋加速器	81
一、回旋加速器的原理	81
二、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{18}F 的特点	82
三、自动化标记合成	82
第二节 ECT	83
一、PECT	83
二、SPECT	85
三、影像重建与数据处理	85
第三节 NMR-CT	86
一、成像原理	86
二、NMR的成像参数	87
三、临床应用	88
第四节 四种影像技术的比较	89
第八章 核医学的放射防护知识	90
第一节 放射物质的安全操作	90
第二节 电离辐射的生物效应和 剂量限值	90
一、电离辐射生物效应	90
二、剂量限值	91
第三节 防护管理	93
一、剂量限制制度的基本原则	93
二、外照射防护措施	93
三、个人防护	94

四、患者防护	95	四、图像分析	130
五、环境保护	96	五、临床应用	132
六、污染与除污染	98	第三节 体外放射分析	135
七、发生事故的紧急处理	99	一、甲状腺素 (T_4)	135
第九章 中枢神经系统	100	二、三碘甲状腺原氨酸 (T_3)	137
第一节 脑静态显像	100	三、三碘甲状腺原氨酸树脂吸收试验 (T_3RUR)	138
一、原理	100	四、甲状腺素结合球蛋白 (TBG)	139
二、方法	100	五、促甲状腺激素 (TSH)	139
三、适应症	101	六、促甲状腺素释放激素 (TRH) 刺激试验	140
四、图像分析	102	七、甲状腺球蛋白 (T_g) 抗体和甲状腺微粒体 (TM) 抗体	141
五、临床应用	102	八、降钙素 (CT)	142
第二节 放射核素脑血管造影	107	第四节 甲状腺疾病的核素治疗	142
一、原理	107	一、甲状腺功能亢进症的 ^{131}I 治疗	142
二、方法	107	二、 ^{131}I 治疗自主性功能亢进性甲状腺腺瘤	145
三、适应症	109	三、甲状腺癌及转移灶的 ^{131}I 治疗	145
四、图像分析	109	第十一章 内分泌系统 (二)	147
五、临床应用	110	第一节 肾上腺显像	147
第三节 脑脊髓腔显像	113	一、原理	147
一、原理	113	二、显像法	147
二、方法	113	三、适应症	148
三、适应症	114	四、图像分析	148
四、图像分析	115	五、临床应用	149
五、临床应用	116	第二节 甲状旁腺显像	150
第四节 局部脑血流量动态测定	117	第三节 体外放射分析	151
一、原理	118	一、生长激素 (GH)	151
二、方法	118	二、促肾上腺皮质激素 (ACTH)	151
三、适应症	120	三、催乳素 (PRL)	152
第五节 PECT应用	120	四、促卵泡激素 (FSH)	153
一、脑局部血容量	120	五、促黄体生成激素 (LH)	153
二、脑局部血流量	120	六、皮质醇 (cortison)	154
三、脑局部糖代谢	121	七、醛固酮 (aldosterone)	155
第六节 SPECT应用	122	八、甲状旁腺激素 (PTH)	155
第十章 内分泌系统 (一)	123	第十二章 呼吸系统	156
第一节 甲状腺功能测定	123	第一节 肺功能测定与肺功能显像	156
一、甲状腺吸 ^{131}I 率测定	123	一、原理	156
二、甲状腺激素抑制试验	126	二、方法	157
三、促甲状腺激素 (TSH) 兴奋试验	127	三、适应症	158
四、甲状腺 $^{99m}TcO_4^-$ 测吸收率定	128	四、图像分析	158
第二节 甲状腺显像	129		
一、原理	129		
二、方法	130		
三、适应症	130		

第二节 肺灌注显像	159	一、摄取法	190
一、原理	159	二、清除法	191
二、方法	159	第七节 末梢血管检测	191
三、适应症	160	一、末梢动脉检查	192
四、图像分析	160	二、末梢静脉检查	192
第三节 气溶胶吸入显像	161	第八节 体外放射分析	193
一、原理	161	一、肌红蛋白 (Mb)	193
二、方法	161	二、肌凝蛋白轻链 (CM-LC)	193
三、适应症	162	三、肌酸磷酸激酶 (CPK)	194
四、图像分析	162	四、地高辛	194
第四节 临床应用	163	五、心钠素	194
一、肺放射图测定意义	163	六、其他	194
二、闭合肺容量测定意义	163	第十四章 消化系统 (一)	195
三、肺癌	163	第一节 肝脏显像	195
四、肺栓塞症、闭塞性凝血性主 动脉炎	164	一、原理	195
五、慢性阻塞性肺部疾患	165	二、方法	195
六、肺动脉高压症	166	三、适应症	196
第十三章 循环系统	167	四、图像分析	196
第一节 心脏功能测定	167	五、鉴别诊断	202
一、非显像装置法	168	六、肝脏显像的分辨率	203
二、显像装置法	170	第二节 肝血池显像	203
第二节 心肌显像	174	一、原理	203
一、心肌灌注显像	174	二、方法	203
二、心肌热区显像	179	三、适应症	204
第三节 放射核素心血管 γ 闪烁 照相	182	四、图像分析	204
一、原理	182	五、临床应用	204
二、方法	183	第三节 恶性肿瘤阳性显像	205
三、适应症	183	一、原理	205
四、图像分析	183	二、方法	205
五、临床应用	184	三、适应症	205
第四节 心血池及大血管静态显像	185	四、图像分析	205
一、原理	185	五、临床评价	206
二、方法	185	第四节 各种诊断方法对肝占位性 病变检查的比较	206
三、适应症	186	第五节 肝脏SPECT检查	207
四、图像分析	186	第六节 肝胆动态显像	208
五、临床应用	186	一、原理	208
第五节 心肌断层显像	188	二、方法	208
一、SPECT	188	三、适应症	209
二、PECT	189	四、图像分析	210
第六节 心肌血流量测定	190	第七节 体外放射分析	215

一、乙型肝炎表面抗原 (HBsAg)	215	一、睾丸显像	233
二、血清胆酸 (CA)	215	二、胎盘显像	238
三、甲胎蛋白 (AFP)	216	三、乳癌显像	239
第十五章 消化系统 (二)	218	四、前列腺显像	239
第一节 胰腺显像	218	第五节 放射免疫分析	240
一、原理	218	一、肾素-血管紧张素	240
二、方法	218	二、睾酮 (T)	240
三、适应症	219	三、雌激素 (E)	241
四、图像分析	219	四、孕酮 (P)	242
五、临床应用	220	五、人绒毛膜促性腺激素 (HCG)	242
第二节 胃肠道吸收功能检查	220	六、人绒毛膜催乳素 (HCS)	243
一、蛋白质丢失试验	220	第十七章 血液、造血系统	244
二、脂肪吸收试验	221	第一节 脾脏显像	244
三、维生素 B ₁₂ 吸收试验	221	第二节 淋巴显像	247
第三节 胃肠道显像	222	第三节 骨髓显像	250
一、腹部肿物和炎症的诊断	222	第四节 样品测定检查	252
二、胃肠道出血的诊断	222	一、循环血容量测定	252
三、胃食道返流试验	223	二、红细胞寿命测定	253
四、Barrett 食道	223	三、血小板寿命及破坏部位测定	256
五、胃排空试验	223	四、白细胞检查	256
第四节 放射免疫分析	224	五、维生素 (Vit B ₁₂) 吸收试验	257
一、胰岛素	224	六、 ⁵⁹ Fe-铁代谢测定	257
二、胰高血糖素	225	七、 ³ H-TdR 掺入细胞试验	259
三、胰泌素	225	第五节 体外放射分析	259
四、胃泌素	225	一、不饱和铁结合能力	259
五、弹性硬蛋白酶 I	226	二、维生素 B ₁₂ 与叶酸	260
六、C-肽	227	三、β-血小板球蛋白 (β-TG)	260
七、其他	227	第六节 血液系统疾病的³²P 治疗	261
十六章 泌尿生殖系统	228	第十八章 骨、关节系统	262
第一节 肾脏功能测定	228	第一节 骨显像	262
一、 ¹³¹ I-邻碘马尿酸钠肾图	232	一、原理	262
二、放射核素肾血浆清除率测定	232	二、方法	262
三、放射性气体肾血流量测定	232	三、适应症	263
第二节 膀胱、尿路功能测定	233	四、图像分析	263
一、膀胱输尿管返流检查	233	五、临床应用	264
二、膀胱残余尿量测定	233	第二节 毛细血管显像	268
第三节 肾脏显像	233	第三节 钙动态分析	269
一、原理	233	一、概述	269
二、显像剂	233	二、方法	270
三、检查方法	234	三、结果分析	271
四、临床应用	235	第四节 钙吸收试验	272
第四节 生殖器官显像	238	第五节 骨盐 γ 吸收测定	272

一、概述	272
二、原理	273
三、方法	273
四、临床应用	273
第十九章 肿瘤与炎症	274
第一节 肿瘤显像	274
一、 ^{67}Ga 显像	274
二、 ^{201}Tl 显像	276
三、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -BLM显像	277
四、特异性显像	278
五、PECT显像	279
第二节 肿瘤标志物的放射免疫	
分析	279
一、鳞状上皮癌相关抗原 (SCC)	280
二、癌胚抗原 (CEA)	280
三、糖链抗原 (CA)	281
四、 β_2 -微球蛋白 (β_2 -MG)	281
五、铁蛋白 (Ferritin)	282
六、前列腺酸性磷酸酶 (PAP)	283
七、组织多肽抗原 (TPA)	283
八、肿瘤产生的激素	283
第三节 放射性胶体腔内治疗	283
一、原理	283
二、适应症与禁忌症	284
三、治疗方法	284
四、治疗反应与并发症	285
五、疗效评价	285
第四节 炎症显像	285
一、 ^{67}Ga 炎症显像	285
二、 ^{111}In -WBC显像	286
第二十章 口腔、眼、耳鼻咽喉、	
皮肤科	287
第一节 口腔科	287
一、恶性肿瘤诊断	287
二、骨疾病诊断	287
三、唾液腺疾病诊断	287
四、 ^{198}Au 胶体治疗颌骨囊肿	291
第二节 眼科	292
一、眼部肿瘤 ^{32}P 测定	292
二、眼球恶性黑色素瘤的特异性诊断	293
三、泪道显像	293

四、测定血浆皮质醇浓度研究单纯青光眼的病因	295
五、 ^{90}Sr 敷贴疗眼科疾病	295
第三节 耳鼻咽喉科	297
一、咽鼓管通畅检查	297
二、鼻粘膜纤毛功能检查	297
三、上颌窦肿瘤检查	298
四、乳突等骨病变检查	298
五、脑脊液鼻 (耳) 漏检查	299
六、鼻咽纤维血管瘤和中耳炎、上颌窦炎继发静脉窦血栓检查	299
七、其它检查	299
八、治疗应用	300
第四节 放射核素敷贴治疗皮肤病	300
一、原理	300
二、适应症与禁忌症	301
三、方法	301
四、临床应用	302
五、注意事项	303
第二十一章 儿科核医学	304
第一节 儿科核素检查的特点	304
一、核医学仪器	304
二、放射药物	304
三、给药途径和方法	309
四、镇静剂的应用	309
五、病人准备	310
第二节 儿科核素检查的应用	310
一、骨及骨髓显像	310
二、心血管显像	311
三、肝脾显像	311
四、甲状腺显像	312
附录一 核医学常用放射核素表	313
附录二 通用放射核素衰变计算表	316
附录三 常用放射核素衰变系数表	319
附录四 常用十进位前缀	326
附录五 时间单位换算	326
附录六 核医学常用名词缩写英汉对照表	327

第一章 核医学物理基础知识

第一节 原子与原子核

远在古代希腊就有人提出了物质的原子学说，认为原子是将复杂物质分割的最终结果，不可分割的最小单位。但那时，还只是停留在主观臆测上。19世纪末，随着化学和物理学的发展，确定了原子和分子学说，世界上任何单质性的物质都是由同样分子组成。千万种分子又都是由有限的若干种原子组成。原子是用任何化学方法都不能分割的最小粒子。化学上把同种原子叫元素。

至今，元素周期表列出 92 种天然元素，加上人工制造的元素，使元素的数目达到 100 多种。自然界存在的一切物质都是由元素组成。构成元素的最基本单位是该元素的原子。

各种元素的原子，其组成不同，但结构相似。原子的中心是原子核，其外围是绕核旋转并按一定轨道运行的电子。原子核带正电荷，核外电子带负电荷，当核外电子与核电荷数相等时，原子呈中性。

核外电子以固定轨道围绕着原子核运行，核外有几个电子壳层，每个壳层有一定数目的轨道，每个轨道只能有一个电子。电子的轨道半径按由小到大的顺序依次为 K, L, M, N, O, ……层，每层能容纳的电子数为 $2n^2$ 个 (n 表示第几壳层数)。各壳层上的轨道电子分别具有一定能量，距核越远，位能越高。

原子核不是最小粒子，它由若干种基本粒子或称核子 (nucleon) 组成，主要是由质子 (proton) 和中子 (neutron) 组成的。质子和中子质量数相近，质子带有一个正电荷，而中子不带电荷。以 A 表示原子的质量数， Z 表示原子核内的质子数 (原子序数)， N 表示原子核内的中子数，用 X 代表元素符号，则 ${}_Z^AX$ 可以表示原子核的质量数和质子数 ($A = Z + N$)。通常 Z 可以省略不写，因为它可以由元素符号 X 来确定，如 ${}^1\text{H}$, ${}^4\text{He}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^{131}\text{I}$ 等 (图 1-1)。

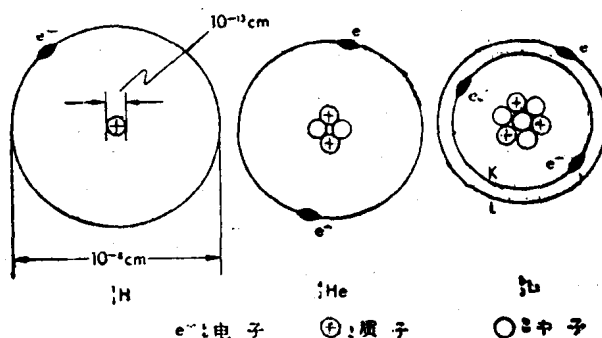


图1-1 原子的结构

原子直径约为 10^{-8}cm ，原子核直径只有 10^{-13}cm 左右。质子和中子的质量几乎相同，电子静止质量约为质子质量的 $1/1840$ 。因此原子核的质量几乎等于原子的质量。

国际上统一规定原子质量单位采用碳单位，即把 $^{12}_6\text{C}$ 的原子质量的 $1/12$ ，作为原子质量单位 (atomic mass unit, amu)， $1\text{amu} = 1.66 \times 10^{-24}\text{g}$ 。质子、中子及电子的质量分别为 1.007274 ， 1.008665 及 $5.4857 \times 10^{-4}\text{amu}$ 。

核内含有相同质子数的原子，属于同一种元素，同一种元素的原子，可能是不同的核素。凡核内质子数相同而中子数不同的核素，称为同位素 (isotope)。它们在元素周期表上占据同一位置，并具有相同的化学性质，例如 ^1H 、 ^2H 、 ^3H ，互称同位素。

核内质子数和中子数都相同而能量状态不同的核素，互称同质异能素 (isomer)。例如， $^{99\text{m}}_{43}\text{Tc}$ 和 $^{99}_{43}\text{Tc}$ 互称同质异能素。在元素质量数符号A的后面加一字母m，表示处于较高能态或亚稳态。

核内的中子数N和质子数Z之比，称为同位素的N/Z比值。如图1-2所示，原子序数在20以下时N/Z比值大致为1，随着原子序数增高N/Z比值也增大。因此，倘若核力大于质子间的库仑力时，原子核便稳定存在。

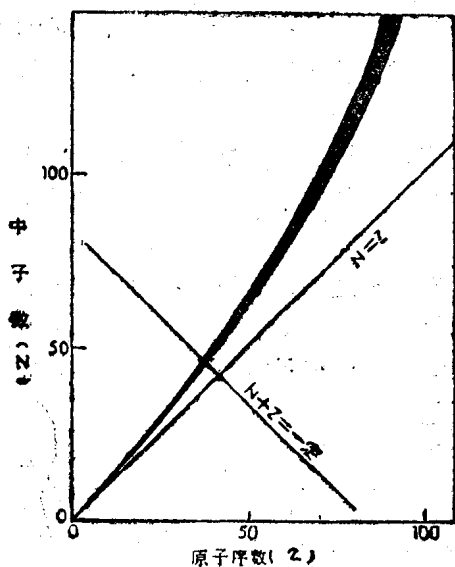


图1-2 同位素的N/Z比值

第二节 核衰变及其规律

一、核衰变

核素分为稳定核素和放射核素 (radionuclide, RN)。稳定核素能稳定存在，不会自发的变化，放射核素或放射性同位素 (radioisotopes, RI) 不稳定，能自发地放出某种射线而转变为别种核素。这种核转化过程，称为放射性衰变 (decay)，或

称核衰变。

稳定核素的核内中子和质子数保持一定比例 ($N/Z = 1 \sim 1.5$)。如果核子总数过多，或者中子数过剩或不足，原子核便不稳定。核子总数过多的核素常放射 α 粒子 (即 ^4_2He 核)，向稳定核素方向转化，称为 α 衰变。中子过剩核素放射 β^- 粒子即电子 (^-_1e)，转化为 $Z+1$ 、 $N-1$ 的核素，称为 β^- 衰变。中子不足核素，其中有的放射 β^+ 粒子即正电子 (^+_1e)，称为 β^+ 衰变；有的从核外掠入一个电子，称为电子俘获 (electron capture, EC)，这两种衰变都使核 $Z-1$ 、 $N+1$ ，向稳定核素方向转化。

二、衰变规律

放射核素在发生 α 或 β 衰变时，原来核素的原子核不断减少，产生新的核素，这

就是核素的衰变过程。

放射核素衰变与周围环境如温度、压力、湿度等无关，但它遵循一定规律即指数衰减规律，其函数曲线如图 1-3、图 1-4 所示。

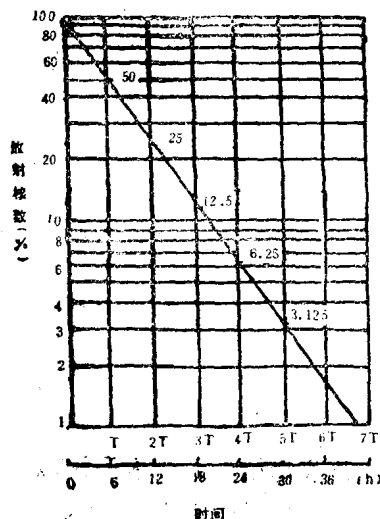


图1-3 ^{99m}Tc 衰变曲线 (半对数座标)

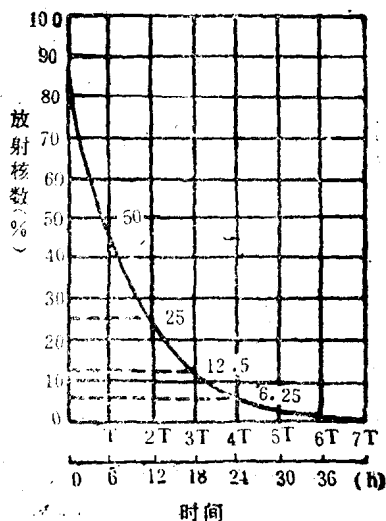


图1-4 ^{99m}Tc 衰变曲线 (普通座标)

衰变速度完全由核子组成不稳定的程度与不稳定核数目的多寡决定。任何放射核素的原子，不会一下子全部衰变。不同放射核素，有其不同的衰变常数 (decay constant)；以 λ 表示 (指每个原子核在单位时间内发生衰变的几率)。

设某一放射核素的原子核数为 N_0 个，经过时间 t 以后，由于放射性衰变的结果，只剩下 N 个，它与在相同的时间间隔 dt 内衰变的核数之间有如下关系：

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

$$\text{或} \quad \frac{dN}{N} = -\lambda N \quad (1-2)$$

若时间由 0 到 t ，则原子核数就由 N_0 衰变到 N ，经积分得：

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \quad \text{或} \quad \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \quad (1-3)$$

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} \quad \text{也即} \quad N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1-4)$$

又因放射性活度 (A) 与原子核数和衰变常数 (λ) 成正比关系： $A = \lambda N$

$$\text{则} \quad A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (1-5)$$

式中 A_0 为 $t = 0$ 时的初始放射性活度。

放射核素的衰变率常以物理半衰期 (physical half life, $T_{1/2}$) 或半衰期表示。 $T_{1/2}$ 系指放射核素的核数由于衰变而减少到原来的半数所需要的时间。

λ 与 $T_{1/2}$ 之间的关系为：

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}} \quad \text{或} \quad \lambda T_{1/2} = 0.693$$

式(1-5)可以改写成:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\frac{0.693}{T_{1/2}} t} \quad (1-6)$$

核医学中还常用生物半衰期(biological half life, T_b)和有效半衰期(effective half life, T_e)。 T_b 系指生物体内的放射核素由于生物代谢从体内排出到原来的半数所需要的时间。 T_e 系指放射性核素由于生物代谢和放射性衰变的共同作用,减少到原来的半数所需要的时间。它们的关系为:

$$\lambda_e = \lambda + \lambda_b \quad (1-7)$$

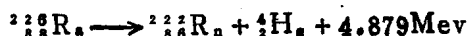
$$\frac{1}{T_e} = \frac{1}{T_{1/2}} + \frac{1}{T_b} \quad (1-8)$$

$$T_e = \frac{T_{1/2} \cdot T_b}{T_{1/2} + T_b} \quad (1-9)$$

三、衰变方式

放射核素的衰变种类或衰变方式如下(式中X代表母核, Y代表子核):

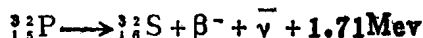
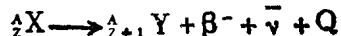
1. α 衰变:放射核素原子核放出 α 粒子后变成另一个核的过程称为 α 衰变。 α 粒子实际上就是氦原子核(${}^4_2\text{He}$),带有2个质子和2个中子,质量数为4。 α 衰变用下式表示:



式中Q代表衰变能,主要分配给 α 粒子和伴生的 γ 光子。 α 粒子的能谱是不连续的,系单能线谱。上式表明 α 衰变后,子核比母核少了2个中子和2个质子,因而 $Z-2$ 、 $A-4$ 。

α 粒子的速度约为光速的1/10左右,在空气中的射程约3~8cm。在水中和机体内的射程仅为0.06~0.16mm。用一张纸就可以挡住它。 α 粒子电离能力强,一旦进入体内是危险的。一般放射 α 粒子的放射核素几乎不用于核医学。

2. β^- 衰变: β^- 粒子实际上就是负电子(e^-),原子核内中子过多而造成不平衡时,即放出 β^- 粒子,用下式表示:



式中 $\bar{\nu}$ 为反中微子,系静止质量近似为零的中性粒子。由于衰变能Q随机分配给 β^- 和 $\bar{\nu}$,它们的能量分布都是由0到Q, β^- 具有连续能谱。 β^- 衰变可看作核内有一个中子转变为质子,因此核内 $Z+1$ 、 $N-1$ 、而A不变。

β^- 粒子的穿透力较 α 粒子强,空气中的射程在数m以内,可用数mm的铝箔屏蔽。其电离能力较 α 粒子小,比 γ 射线大。

3. β^+ 衰变: β^+ 粒子就是正电子(e^+),只有人工放射核素才有 β^+ 衰变,当原子核内质子相对过多而造成不平衡时,即放出 β^+ 粒子。可用下式表示: