

高等医学院校教材

(供医学、儿科、口腔、卫生专业用)

核医学

叶维新 主编

武汉大学出版社

高等医学院校教材
(供医学、儿科、口腔、卫生专业用)

核 医 学

R81
15

主 编 叶维新

编著者 (以姓氏笔划为序)

叶维新 刘保平 刘道生 张永学
陈建章 李美颖 范光灿 蔡锡麟

武汉大学出版社

1986·武汉

内 容 提 要

本书内容分三大部分,第一部分介绍必要的基础理论,如核物理、放射性药物、放射生物效应及放射防护等。第二部分为实验核医学,重点介绍现代核医学检测技术,如放射性核素示踪技术、体外放射分析、放射自显影术、活化分析、放射性核素动力学分析、放射性核素显象检查等。第三部分为临床核医学,按人体系统分为十章,结合临床医学对核医学的需要,对各种常用核医学检测技术作了系统介绍和临床评价。

本书可作高等医学院校教材,也可供临床医师及技术人员参考。

核 医 学

主编 叶维新

责任编辑 金丽莉

*

武汉大学出版社出版

(武昌珞珈山)

新华书店湖北发行所发行 湖北科技出版社黄冈印刷厂印刷

*

787×1092毫米 1/16 16印张 382千字

1986年8月第一版 1986年8月第一次印刷

印数: 1—15,000

统一书号: 13279·27 定价: 3.00元

序 言

核医学是一门发展十分迅速的边缘学科，是现代医学教育的重要组成部分，也是临床医师必须掌握的知识。

本书以高等医学院校各专业的培养目标及教学计划为依据，参照本科医学专业教学大纲从医科学生和临床医师对核医学的需要出发，按照核医学的学科体系和内容编写而成，适于高等医学院校作为教材使用。本书分三个部分共二十章，第一部分为核医学基础，第二部分为实验核医学，第三部分为临床核医学。在编写过程中，我们从国内的实际出发，借鉴国内外核医学教材中的有益经验，进一步明确了现代核医学的学科体系和学科范围，力求概念准确、严谨，尽量采用法定文件所推荐的数据和权威资料，努力反映核医学的现代水平，在体现核医学学科体系的前提下，注意处理好核医学与放射医学和放射卫生学等邻近学科的关系。但是，由于我们的认识能力有限，在这一尝试中，不足之处在所难免，敬请同行及读者指正。

本书由同济医科大学、山西医学院、江西医学院、河南医科大学四校部分核医学教师集体编写。在编写过程中，四校领导给予了大力支持，同济医科大学有关科室的同志积极协助工作，绘制图表，抄写书稿，在此一并表示衷心感谢。

编 者

1986年8月

目 录

绪论	1	放射性核素	18
第一章 核物理学	3	第三节 放射性药物的制备	19
第一节 原子结构	3	一、标记方法的主要类型	19
第二节 放射性核素的核衰变		二、常用标记方法及放射性药物	20
类型及规律	3	三、影响放射性药物质量的因素	22
一、核衰变类型	3	第四节 亲肿瘤放射性药物	22
二、核衰变规律	5	一、原理	22
三、放射性活度及其单位	6	二、选择亲肿瘤放射性药物的条件	23
第三节 射线与物质的相互作用	7	三、亲肿瘤放射性药物的应用	24
一、带电粒子与物质的相互作用	7	第五节 放射性药物的管理	25
二、 γ 光子与物质的相互作用	8	第三章 放射生物效应	26
三、中子与物质的相互作用	8	第一节 放射生物效应的基本	
第四节 常用辐射量	8	原理和基本规律	26
一、照射量	8	一、放射生物效应的基本原理	26
二、吸收剂量	9	二、放射生物效应的基本规律	28
三、照射量与吸收剂量的区别与关系	9	第二节 放射生物效应	30
四、剂量当量	11	一、电离辐射的生化效应	30
五、有效剂量当量	11	二、电离辐射的细胞效应	31
第五节 常用核探测仪器的基		三、电离辐射对造血细胞的影响	32
本性能与用途	13	四、电离辐射对性腺的影响	33
一、闪烁计数器	14	第三节 临床放射生物效应	33
二、液体闪烁计数器	14	一、放射损伤	33
三、脏器功能测定仪	14	二、内照射时的放射生物效应	33
四、闪烁扫描机	14	三、小剂量照射时的放射生物	
五、闪烁照相机	15	效应	34
六、放射性核素发射式计算		第四章 放射卫生防护	36
机断层照相机	15	第一节 放射卫生防护的标准	36
七、放射性活度测量仪	15	一、作用于人体的电离辐射源	36
八、放射防护监测仪器	15	二、放射生物效应的分类	37
第二章 放射性药物	17	三、放射防护的目的和基本原则	37
第一节 放射性药物概述	17	四、放射工作人员的剂量限值	37
第二节 放射性核素的生产		五、公众中个人剂量限值	39
和来源	18	六、基本限值的危险度分析	39
一、核反应堆生产放射性核素	18	七、放射性物质污染表面的导出	
二、医用回旋加速器生产放射性核素	18	限值	39
三、放射性核素发生器生产		第二节 开放型放射性工作的放射	

防护	40
一、开放型放射性工作单位的 分类和放射性工作场所的分级	41
二、放射性工作单位及工作场所 的选址	42
三、放射性工作场所的放射防护 要求	42
四、外照射防护	42
五、放射性废物、废液及废气的 处理	46
六、物体表面放射性污染的清除	47
七、人体表面放射性污染的清除	48
第三节 放射卫生防护的管理	49
一、放射性工作场所的划分	49
二、地区性放射卫生防护部门对 放射工作的管理	49
三、放射工作单位对放射工作的 管理	49
四、放射工作场所的放射防护管 理	50
五、放射工作人员的放射防护管 理	50
第五章 放射性核素示踪技术	51
第一节 基本概念	51
一、定义	51
二、基本原理	51
三、主要优缺点	51
第二节 基本方法	52
一、放射性核素及其标记化合物	52
二、实验技术	52
第三节 放射性核素示踪技术的常 用类型及其应用概况	53
一、稀释法	53
二、动态平衡的示踪研究	54
三、功能测定	54
四、显象检查	55
五、放射自显影术	55
六、体外放射分析	55
第六章 体外放射分析	56
第一节 体外放射分析的基本原理 及类型	56
一、基本原理	56

二、基本步骤	59
三、基本类型	59
第二节 体外放射分析的基本 方法	60
一、纯化配体	60
二、示踪配体	61
三、结合剂	63
四、生物样品的制备	66
五、分离技术	67
六、结合反应最佳工作条件的选择	68
七、标准曲线的拟合方式	69
八、质量控制	69

第七章 放射自显影术

第一节 放射自显影术的原理

第二节 放射自显影术的方法

一、感光材料的选择	74
二、放射性核素的选择	75
三、放射自显影术的分辩力及效率	75
四、制备放射自显影片的基本方法	76

第三节 放射自显影术的类型

一、宏观放射自显影术	76
二、微观放射自显影术	77
三、放射自显影片的结果分析	77

第四节 放射自显影术的医学应用

一、在药理学及毒理学中的应用	78
二、在细胞学中的应用	78
三、在血液学上的应用	78

第八章 活化分析

第一节 活化分析的原理及方法

一、原理	79
二、活化分析的类型	80
三、活化分析的步骤	80

第二节 活化分析应用简况与优 缺点

缺点	82
----	----

第九章 放射性核素动力学分析

第一节 放射性核素动力学分析 的基本概念

一、基本原理	83
二、基本环节	83

第二节 常用的放射性核素动力学 分析方法

分析方法	84
------	----

一、药物代谢的动力学分析·····	84	六、临床评价·····	135
二、增殖性细胞的细胞周期时间测定·····	89	第二节 放射性核素脑血管造影·····	136
三、脏器功能测定·····	91	一、原理和方法·····	136
第十章 放射性核素显象检查·····	92	二、图象分析·····	137
第一节 核素显象的基本原理·····	92	三、临床评价·····	138
一、合成代谢·····	92	第三节 脊髓蛛网膜下腔、脑池和 脑室显象·····	139
二、细胞吞噬·····	92	一、原理·····	139
三、循环通路·····	93	二、显象剂和方法·····	139
四、选择性排泄·····	93	三、正常图象·····	140
五、通透弥散·····	93	四、异常图象及临床评价·····	140
六、化学吸附和离子交换·····	94	第十三章 循环系统·····	142
七、腔隙灌注·····	94	第一节 放射性核素心脏、大血管 造影·····	142
八、选择浓聚·····	94	一、原理·····	142
第二节 放射性核素显象的基本方 法·····	94	二、显象剂和方法·····	142
一、 γ 闪烁扫描·····	94	三、图象分析·····	142
二、 γ 闪烁照相·····	95	四、稀释曲线·····	144
三、发射式计算机断层摄影·····	95	五、先天性心脏大血管病的诊断·····	145
四、显象条件的选择·····	95	六、获得性心脏大血管病的诊断·····	149
第三节 显象的主要类型和图象分 析的基本要素·····	96	第二节 心脏功能·····	150
一、显象类型·····	96	一、收缩期功能——射血分数和 室壁运动·····	150
二、图象分析的基本要素·····	97	二、舒张期功能——高峰充盈率 和高峰充盈时间·····	154
第十一章 内分泌系统·····	99	第三节 心肌显象·····	155
第一节 甲状腺·····	99	一、正常心肌显象·····	155
一、基础知识·····	99	二、急性心肌梗塞显象·····	158
二、常用的核医学检测方法·····	101	第四节 心脏血池显象·····	160
三、常见的甲状腺病核医学检测 方法的选择·····	114	一、原理·····	160
四、几种常见甲状腺病的核医学·····	116	二、显象剂和方法·····	160
第二节 肾上腺·····	124	三、正常影象·····	160
一、基础知识·····	124	四、临床评价·····	161
二、常用的核医学检测方法·····	125	第五节 体外放射分析·····	161
三、常见肾上腺疾病核医学诊断 指标的选择及评价·····	127	一、肌红蛋白测定·····	161
第十二章 神经系统·····	129	二、磷酸肌酸激酶测定·····	162
第一节 脑静态显象·····	129	三、地高辛测定·····	162
一、原理·····	129	第十四章 呼吸系统·····	164
二、显象剂·····	129	第一节 肺静态显象·····	164
三、方法·····	129	一、肺灌注显象·····	164
四、图象分析·····	130	二、肺气溶胶吸入显象·····	165
五、临床应用·····	132	三、肺肿瘤显象·····	166

第二节 肺动态显象	166	六、临床评价	203
一、 ^{135}Xe 肺动态显象	166	第三节 体外放射分析	203
二、扩散性气体肺放射图检查	167	一、肾素-血管紧张素系统	203
三、肺通气/灌注显象及局部肺 通气/灌注指数测定	168	二、 β_2 -微球蛋白	204
第三节 几种常见呼吸系统疾病检 测方法的选择及评价	169	第十七章 生殖系统	206
一、慢性阻塞性肺疾病	169	第一节 有关基础知识	206
二、肺栓塞	169	一、男性	206
三、肺癌	170	二、女性	206
第十五章 消化系统	171	第二节 常用的核医学检测方法	207
第一节 肝脏	171	一、人绒毛膜促性腺激素(hCG)测定	207
一、肝实质显象	171	二、雌二醇及雌三醇测定	208
二、肝血池显象	177	三、孕酮测定	209
三、肝内肿瘤显象	178	四、雌激素受体及孕激素受体测定	209
四、肝脏血流指数测定	178	五、睾酮及二氢睾酮测定	211
五、血清甲种胎儿蛋白测定	179	六、促卵泡激素及促黄体激素测定	211
六、乙型肝炎病毒抗原及抗体的 测定	180	七、人胎盘催乳素测定	212
第二节 胆道及胰腺显象	181	八、催乳素测定	212
一、胆道显象	181	九、催产素测定	212
二、胰腺显象	184	十、促性腺激素释放激素测定	213
第三节 常见肝、胆疾病核医学检 测指标的选择及评价	186	十一、前列腺素测定	213
一、肝脏占位性病变	186	第三节 几种常见生殖系统疾病核 医学检测指标的选择及评价	214
二、肝炎	186	一、肿瘤性疾病	214
三、肝硬化	186	二、妊娠	214
四、黄疸	187	三、生殖生理学研究	215
五、急性胆囊炎	187	四、性腺功能异常及不育	215
第四节 消化道	187	第十八章 造血系统	216
第十六章 泌尿系统	192	第一节 常用的核医学检测方法	216
第一节 肾脏功能测定	192	一、铁代谢	216
一、邻碘马尿酸钠放射性肾图	192	二、红细胞寿命测定	218
二、有效肾血流量测定	196	三、红细胞破坏部位测定	219
三、肾小球滤过率测定	197	四、维生素 B_{12} 吸收试验	220
四、膀胱残余尿量测定	198	五、粒细胞的动力学分析	220
第二节 肾脏显象	199	六、血小板的研究	221
一、原理	199	七、血容量测定	222
二、适用范围	199	八、骨髓显象	224
三、肾显象剂	199	九、脾显象	225
四、检查方法	200	十、淋巴显象	225
五、图象分析	200	第二节 常见造血系统疾病核医学 诊疗方法的选择与评价	226
		一、贫血	226
		二、真性红细胞增多症	227

三、造血系统恶性肿瘤·····	229	一、原理及方法·····	237
四、原发性血小板增多症·····	229	二、正常图象·····	237
五、其他疾病·····	229	三、临床意义及评价·····	237
第十九章 运动系统·····	230	第三节 β射线敷贴治疗皮肤病·····	237
第一节 骨骼显象·····	230	一、原理·····	237
一、原理·····	230	二、适应症和禁忌症·····	238
二、显象剂和显象方法·····	230	三、敷贴器的制备与治疗剂量的 确定·····	238
三、图象分析·····	231	四、疗效评价和随访·····	238
四、临床评价·····	233	五、注意事项·····	239
第二节 肌肉疾病·····	234	第四节 β射线敷贴治疗眼科疾病·····	239
一、多发性肌炎·····	234	一、原理·····	239
二、进行性肌营养不良·····	235	二、敷贴器结构·····	239
第二十章 其他脏器及组织·····	236	三、适应症·····	239
第一节 唾液腺显象·····	236	四、疗效·····	240
一、原理·····	236	附录一 常用放射性主要物理常数·····	241
二、方法·····	236	附录二 通用放射性核素衰变计算表·····	243
三、正常图象·····	236	附录三 射线有关单位及换算表·····	245
四、临床意义及评价·····	236		
第二节 泪道显象·····	237		

绪 论

核医学 (nuclear medicine) 是一门研究核科学技术在医学中的应用及其理论的学科。

早在十九世纪末期, Becquerel(1896)发现了铀盐的放射现象, 居里夫妇(Curie 1898)成功地提取了放射性钋及镭。这些先驱者的卓越成就揭开了核医学的序幕。然而, 直到1934年, 第一次用人工方法获得放射性 ^{30}P 后, 才使核医学进入初创阶段。应用放射性核素研究生命现象, 特别是它与医学的相互渗透和相互促进, 又大大开阔了人们的视野。1946年, 核反应堆建成并投入使用, 人工放射性核素的大量生产以及放射性核素标记化合物的研制, 为核医学的发展奠定了物质基础。而各种核仪器的进步, 如闪烁计数器、闪烁扫描机、功能测定仪、闪烁照相机、液体闪烁计数器, 直至发射式计算机断层照相机的相继投入使用, 为核医学的发展提供了重要的、先进的检测手段。现在, 应用医用回旋加速器生产的少中子短半衰期的放射性核素, 迅速地改变着放射性核素应用的品种和用量, 为研究生命现象提供了极为有用的放射性核素来源; 由放射性核素发生器产生的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$, 已经成为临床核医学中最常用的放射性核素。新型放射性药物的不断出现, 有效地提高了核医学的检测质量, 扩大了核医学的应用范围。体外放射分析业已成为核医学的重要组成部分, 并能检测三百余种微量物质。稳定核素及活化分析, 在解决了生产及检测设备等技术之后, 可以预期, 它将在核医学领域内得到广泛应用。

根据核医学的发展和现代水平, 核医学由三个部分组成, 即核医学基础、实验核医学及临床核医学。它们各有侧重但又有机地形成一个完整的学科体系。

核医学基础包括核物理学、放射化学、放射生物学、放射卫生防护学、核电子学、核辐射测量学等。这些学科都是核科学中的独立分支学科, 又都是核医学赖以工作的基础。不言而喻, 医学也是核医学的重要基础。如果没有这些学科作为它的基础, 核医学将无法成为一门真正的科学, 而核医学工作者如果缺乏这些基础学科的知识及技能, 他也将无法从事核医学工作。

实验核医学是核医学的重要组成部分。它的主要任务是根据核医学本身的特点和需要, 摄取和融合有关学科的最新成就, 探索和创立适于医学研究用的核医学理论和技术, 为核医学本身及有关学科提供更好的核科学技术, 开辟新的学科领域, 促进医学进步。实验核医学中常用的基本核技术有: (1) 放射性核素示踪技术, 是以放射性核素或其标记化合物为示踪剂, 应用放射探测仪器来追寻示踪剂, 进而研究物质在生物体系及环境中的运动规律的核技术, 也是核医学中许多核技术的共同基础。(2) 体外放射分析, 是以放射性核素标记配体为示踪剂, 以结合反应原理为基础, 在体外条件下进行微量物质定量测量的核技术。因而更宜称为放射配体结合分析。这类分析技术主要用于生物活性物质的定量, 应用范围十分广泛。(3) 放射性核素动力学分析, 是以放射性核素示踪原理为基础, 动态地研究机体的系统、脏器、组织或细胞的功能状态及物质体内过程量变规律的核技术。主要用于研究物质转化、物质代谢以及脏器功能、细胞增殖等方面。(4) 放射自显影技术, 以放射性核素示踪原

理为基础，利用射线可使感光材料感光的特点，借助光学摄影技术用以研究物质在样品中分布状态的核技术。它有很好的定位能力，广泛应用于研究物质的定位。（5）活化分析，是应用射线照射物质使之活化再进行放射分析，从而获得物质组成元素的定性定量结果的核技术，医学上主要用于痕量元素的测量。

临床核医学是核医学的主要部分，其基本任务是：根据临床核医学的特点和需要，应用核医学的基础学科和实验核医学提供的理论和技术，探索和建立适于临床诊断及治疗应用的理论和技术，总结、改进和评价核技术的临床应用价值，不断丰富和提高临床核医学的水平，促进临床医学的进步。从研究性质上分，它也包括开发性研究和应用性研究两种类型。虽然应用性研究工作是大量的，但开发性研究工作却是重要的。

如同其他临床学科一样，随着科学的发展，临床核医学已从以技术方法为体系基础的阶段演变到以学科体系为基础的阶段。在临床核医学内逐步形成了各系统核医学，它反映了核医学的成熟程度。在不久的将来，这些分支学科也将得到迅速发展。

核医学是一门边缘科学，具有很强的生命力。核医学的立足点是医学，而工作的手段是核技术，是用核技术来研究医学的科学。形象地说，核医学是用核射线贯穿起来的医学。因此，医学及核科学中的任何进展和成就，都可以是核医学赖以发展的基础和继续进步的源泉。例如，人工放射性核素生产技术的发展，为核医学提供了适于医用的多种少中子短半衰期的放射性核素；放射化学的成就为核医学提供了高质量的放射性药物；放射生物学的知识为核医学合理地应用核射线提供了理论基础；放射卫生防护学方面的成果为从事放射性工作提供了安全保障；核电子学的进展使我们的工作得以建立在定量的基础之上，医学领域中的成就对核医学的提高起着重要作用，例如单克隆抗体技术的发展，不仅使放射免疫分析的质量得到进一步的提高，而且，还将促进放射免疫定位诊断，放射免疫治疗等领域的发展。分子生物学的进步，促进了核医学向分子水平领域的纵深发展。

尽管核医学如同其他所有的自然科学一样，面临着严重的竞争和挑战，例如在临床医学显象技术方面，遇到了X线计算机断层显象、B型超声显象，磁共振显象等的挑战；在体外放射分析方面，面临着非核技术如酶免疫分析等的竞争，实际上这是科学中普遍存在的现象。任何科学，当然也包括核医学，都是在推陈出新的过程中前进的。学科内容不可能自始至终一成不变。核医学的当今水平，也正是在不断以新颖的、先进的内容来取代陈旧的、落后的内容的过程中提高的。为了更好地促进核医学的发展，要根据客观需要，结合本学科的基础和特点，努力进行开发性研究工作，积极探索和创立新的核医学理论和技术，才是最根本的方向。

核医学的学科内容十分丰富。本教材为适应本科医学生及临床医师学习核医学的特点，在编排体系上，将核医学分为总论及各论两部分，总论里包括核医学基础及实验核医学两方面的内容，比较系统地介绍了核医学的基本理论、基础知识及基本技术，为学好核医学奠定基础；各论是系统核医学，按系统介绍了核医学的基本诊疗方法，为适应非核医学人员学习核医学的需要，着重介绍了各种诊疗方法的工作原理、适用范围、结果分析及临床评价等方面的知识，为在医学实践中正确地运用核医学奠定基础。

（同济医科大学 叶维新）

第一章 核物理学

第一节 原子结构

人类生活的世界是物质的世界。在这个世界中存在着各式各样的物质,而每种物质都有各自的物理及化学性质。在自然界中,现已发现109种元素(element)。其中,93种是天然的,另16种是人工生产。不同元素的原子,性质虽不相同,但原子的基本结构是相同的。原子的质量很轻,例如氢原子的质量为 $1.6736 \times 10^{-27} \text{kg}$ 。为了方便,1960年,国际上规定以 $^{12}_6\text{C}$ 原子质量的 $1/12$ 定义为1个原子质量单位(atomic mass unit, a.m.u.)这样, $1 \text{ a.m.u.} = 1.660566 \times 10^{-27} \text{kg}$ 或 $1 \text{ kg} = 6.022045 \times 10^{26} \text{ a.m.u.}$ 。不同的元素,通常以下列方式表示: ^A_ZX ,这里,X表示某元素符号,A表示该元素的质量数。它近似地等于质子数与中子数的总和,Z表示原子序数,也等于核外的电子数。

核素(nuclide)是指具有一定数目的中子、质子及特定能量状态的原子。例如 $^{100}_{44}\text{Ru}$ 及 $^{100}_{45}\text{Rh}$ 是两种不同的核素。

同位素(isotope)是指原子核的质子数相同而中子数不同的核素。例如 ^1_1H , ^2_1H , ^3_1H ,由于它们含有相同的质子数,原子序数相同,在元素周期表上占有同一位置,因而互称同位素。同位素中各种核素天然含量的百分比称为同位素丰度(isotopic abundant)

同质异能素(isomer)是指质量数和原子序数相同但能量状态不同的核素,处于激发态的原子是基态原子的同质异能素。例如 $^{99\text{m}}_{43}\text{Tc}$ 及 $^{99}_{43}\text{Tc}$,前者是后者的同质异能素。

稳定性核素(stable nuclide)是指原子核不会自发地发生核转变的核素。例如 $^{12}_6\text{C}$, $^{16}_8\text{O}$ 。

放射性核素(radionuclide)是指原子核会自发地发生核衰变并发射射线,由一种核转变成另一种核的核素。

第二节 放射性核素的核衰变类型及规律

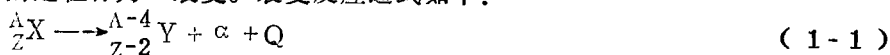
根据原子核是否稳定,核素可以分为稳定性核素和不稳定性核素两大类。不稳定性核素不受温度、压力、电磁场及化合物状态等因素的影响,自发地发生核转变并发射出一定的射线,然后衰变为另一种核素,因而称为放射性核素。

放射性核素既有天然的,也可人工生产,例如应用核反应堆、加速器、放射性核素发生器等,都可以获得适于医学应用的各种放射性核素。天然放射性核素及核反应生产的人工放射性核素在发生衰变时同样遵守电荷守恒、质量守恒、能量守恒等自然界的普遍规律。

一、核衰变类型

不同类型的放射性核素的衰变方式各不相同,但就核衰变类型看主要有 α 、 β 、 γ 三种。

(一) α 衰变 放射性核素的原子核发射出 α 粒子而转变为质量数减 4，原子序数减 2 的子体核素的过程称为 α 衰变。衰变反应通式如下：



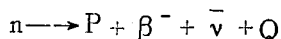
例如 ${}^{226}_{88} \text{Ra} \longrightarrow {}^{222}_{86} \text{Rn} + \alpha + 4.785 \text{MeV}$

α 粒子由两个质子和两个中子组成，带有二个正电荷，其本质是氦的原子核。母体放射性核素经过 α 衰变后形成的子体核，其质量数减 4，原子序数减 2，在元素周期表上前移 2 位。Q 表示衰变能。

α 衰变多发生于原子序数在 82 以后的天然放射性核素。

(二) β 衰变 一般有三种类型： β 衰变、 β^+ 衰变及电子俘获。

1. β 衰变 放射性核素的原子核发射出 β 粒子而转变为原子序数增加 1 但质量数不变的子体核素的过程称为 β 衰变。 β 粒子的本质是电子，因此也称 β^- 衰变。 β^- 衰变也可看作是母体放射性核素的原子核中的一个中子转变为一个质子的结果，即



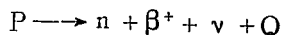
衰变的反应通式为：



例如 ${}^{32}_{15} \text{P} \longrightarrow {}^{32}_{16} \text{S} + \beta^- + \bar{\nu} + Q$

式中 $\bar{\nu}$ 表示反中微子 (antineutrino)，是一种静止质量近似地看作为零的中性粒子。在 β^- 衰变过程中有三个生成物即 ${}^{A}_{Z+1} Y$ 、 β^- 及 $\bar{\nu}$ 。在衰变过程中的衰变能，则为这三个生成物所分有；由于这三种生成物的发射方向是任意的，因而每一生成物所分有的能量也是任意的。其中，子体核素的质量最大，分有的能量最少，所以衰变能 Q 主要为 β^- 及 $\bar{\nu}$ 两者任意分有。对于一次 β^- 衰变所产生的 β^- 粒子来说，只能分有从零到全部衰变能中的某一具体的能量值；但在群体发生 β^- 衰变时，在单位时间里，则会出现由零到全部衰变能的各种能量值的连续能谱。

2. β^+ 衰变 (β^+ decay) 放射性核素的原子核发射出 β^+ 粒子而转变为原子序数减少 1，但质量数不变的子体核素的过程称为 β^+ 衰变。 β^+ 粒子的本质就是正电子。 β^+ 衰变可以看作是母体放射性核素的原子核中一个质子转变为一个中子的结果。即



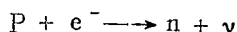
衰变的反应通式为：



例如 ${}^{13}_7 \text{N} \longrightarrow {}^{13}_6 \text{C} + \beta^+ + \nu + Q$

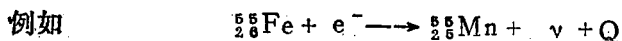
如同 β^- 衰变一样， β^+ 粒子也具有连续能谱。正电子被物质阻止而失去动能时，与物质中的自由电子结合，转化为电磁辐射，形成能量为 0.511 MeV 的两个光子，这个过程称为光化辐射 (actinic radiation)。

3. 电子俘获 (electron capture) 电子俘获是指母体放射性核素的原子核俘获其轨道上的一个电子而使核中的一个质子转变为一个中子，同时放出中微子的过程。即



电子俘获的反应通式为：



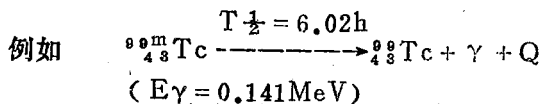
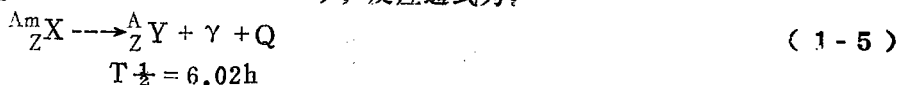


在发生电子俘获后，轨道上缺少了一个电子，留下空位。此时，外层轨道上的电子将发生跃迁来填补空位，其多余的能量或者以标志X射线发射出来，或者传给另一个电子使之获得足够的能量而脱离轨道的束缚成为自由电子，这种现象称为俄歇效应(Auger's effect)。这种电子称为俄歇电子(Auger's electron)。俄歇电子的能量是单能的。

(三) γ 衰变(γ decay)和内转换(internal conversion)

1. γ 衰变 γ 衰变是指放射性核素的原子核发射 γ 射线的衰变过程。 γ 射线的本质是电磁辐射。有些放射性核素在发生 α 或 β 衰变后，形成的子体核素处于激发态，这种状态的核是不稳定的，当它跃迁到基态或较低能级状态时，其多余的能量以发射 γ 射线的方式释放出来，这个过程也称为 γ 跃迁(γ transition)。 γ 射线不带电其速度为光速。

当处于激发态的子体核素停留的时间较长，其半衰期大于 10^{-11} s时，则这种 γ 跃迁称为同质异能跃迁(isomeric transition)，反应通式为：



2. 内转换 处于激发态的原子核在向较低能态跃迁时，也可把多余的能量直接交给核外的壳层电子，使轨道上的电子获得足够的能量而脱离轨道成为自由电子，这种现象称为内转换，这种电子称为内转换电子。在发生内转换之后，由于轨道上出现了空位，外层电子在跃迁过程中还会发生标志X射线或俄歇电子。

二、核衰变规律

放射性核素的原子核发生衰变的类型虽有很大差异，但却具有共同的衰变规律。大量的实验研究证明，放射性核素的原子核虽然都要发生衰变，但却不是在同一时间发生，而是各自先后独立出现的。假定某放射性核素在零时间的原子核数为 N_0 ，到 t 时间尚有 N 个原子核未衰变，那么，从 t 到 $t+dt$ 的时间间隔内发生衰变的原子核数 dN 应与 N 和 dt 成正比，即：

$$-dN \propto Ndt$$

或 $-dN = \lambda \cdot N \cdot dt \quad (1-6)$

式中，等号左侧的负号表示原子核数目将随时间的增加而减少， λ 为衰变常数，将上式积分后得：

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1-7)$$

这是核衰变规律的基本公式，适用于任何一种单一存在的放射性核素。只是 λ 值随不同的放射性核素而有差异。核衰变越快， λ 值越大。在这里，衰变常数 λ 的物理意义是表示在放射性核衰变过程中，每个原子核在单位时间内发生衰变的机率。衰变公式还表明放射性原子核数目的减少遵从指数规律，在半对数坐标系上呈一直线。其斜率随 λ 值而变。如果说指数衰变规律反映了放射性原子核衰变的“共性”，那么，衰变常数 λ 则反映了每种放射性核素的“个性”。因为，迄今为止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 λ 值也就成为放射性核素的一个特征参数。

除采用衰变常数表示放射性核素的衰变速度外，实际工作中更多的是采用半衰期这个概念。半衰期（half-life）是指放射性核素的原子核数目衰变原有的一半所需要的时间。常以符号 $T_{1/2}$ 或 T 表示。它与衰变常数有如下关系：

$$T_{1/2} = 0.693 / \lambda \quad (1-8)$$

在医学领域还经常使用生物半衰期及有效半衰期这两个概念。生物半衰期（biological half-life, T_b ）是指生物体内的放射性核素由于生物代谢过程从体内排除一半所需要的时间。有效半衰期（effective half-life, T_{eff} ）则是指放射性核素由于放射性衰变和生物代谢过程两者共同的作用，使体内的放射性减少一半所需要的时间。三种半衰期的关系式为

$$\lambda_{eff} = \lambda + \lambda_b \quad (1-9)$$

$$T_{eff} = T_{1/2}^{-1} + T_b^{-1} \quad (1-10)$$

$$T_{eff} = T_{1/2} \times T_b \times (T_{1/2} + T_b)^{-1} \quad (1-11)$$

三、放射性活度及其单位

（一）放射性活度（activity）的定义 由于放射性核素只是在它发生核衰变时才发射射线，所以在单位时间内发射射线的多少，与衰变常数的大小直接有关。因此，在衡量某放射源的放射性强弱时，不能用拥有的放射性总原子数目来表示，而应当用在单位时间内发生核衰变的原子数目来表示。放射性活度就是指在单位时间内衰变掉的原子数目。用符号 A 表示。

（二）放射性活度的单位 根据放射性活度的定义，放射性活度的国际制单位是秒⁻¹（ S^{-1} ），放射性活度的专用名称是贝可勒尔（Becquerel）简称贝可（Bq）

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ S}^{-1} \quad (1-12)$$

目前仍在沿用的专用单位是居里（Curie, Ci）

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ decay} \cdot \text{S}^{-1} \quad (1-13)$$

其导出单位是毫居里（mCi）及微居里（ μCi ）

贝可与居里的换算关系为

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ S}^{-1} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq} \quad (1-14)$$

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ S}^{-1} = 2.703 \times 10^{-11} \text{ Ci} \quad (1-15)$$

应当注意的是，根据放射性活度的定义，放射性活度相等的两种不同的放射性核素，只表示这两种放射性核素在单位时间内发生的核衰变数目相等，并不表示两种放射性核素所发射的射线数相等，这是因为各放射性核素的衰变类型不一定相同，因而发射的射线的类型和数目也不一定相同，同样道理，它也不表示两者所拥有的放射性原子核数目相等。

在核医学领域里，还经常使用比放射性及放射性浓度这两个概念。

放射性比度或比放射性（specific activity）是指一摩尔的放射性物质中所含的放射性活度。常用单位有 $\text{Bq} \cdot \text{mol}^{-1}$ 、 $\text{mCi} \cdot \text{mmol}^{-1}$ ，当分子量无法确定时，也可用单位质量的放射性物质所含有的放射性活度来表示。如 $\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $\text{mCi} \cdot \text{g}^{-1}$ 等。

放射性浓度（radioactive concentration）是指单位容积的放射性物质中所含有的放射性活度。多用于液体或气体。常用单位有 $\text{Bq} \cdot \text{ml}^{-1}$ 、 $\text{mCi} \cdot \text{ml}^{-1}$ 。

（三）放射性活度的计算 因为放射性活度 A 等于放射性原子核数 N 与衰变常数 λ 的

乘积。即 $A = \lambda N$

代入 (1-7) 式, 即得

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (1-16)$$

可见, 放射性活度也随时间的增长而呈指数规律减弱。至于减弱的快慢, 则随衰变常数 λ 的大小而定, 衰变常数大即半衰期短的放射性核素, 放射性活度减弱得很快。由此可知, 放射性物质即使放置未用, 其化学量虽未改变, 可是放射性活度却随时间的增长而逐渐减弱。例如放射性活度 A_0 为 10 mCi 的 ^{131}I ($T_{1/2} = 8.03\text{d}$), 问放置 7 天后还剩下的放射性活度 A 。

根据 (1-16) 及 (1-8) 式, 代入上述数值

$$\begin{aligned} A &= A_0 e^{-\lambda t} = 10 e^{0.693 \times 7 \times 8.03^{-1}} = 10 \times 0.5466 \\ &= 5.466 \text{ mCi} \end{aligned}$$

也可查阅放射性核素衰变计算通用表获得 A 值。

第三节 射线与物质的相互作用

放射性核素的原子在核衰变时所发射的各种射线, 通过周围介质时会发生不同类型的相互作用。研究射线与物质的相互作用规律不仅有助于进一步了解原子的结构和射线的本质, 更重要的是, 它是研究辐射生物效应的理论基础, 也是核科学与医学发生联系的重要桥梁之一。

根据射线的本质及特性, 射线与物质的相互作用可分为三种类型

一、带电粒子与物质的相互作用

带电粒子包括电子、正电子、 α 粒子等。

(一) 电离和激发 当入射的带电粒子通过介质的原子时, 由于入射的带电粒子与壳层电子之间的静电库仑作用, 使壳层电子获得能量而入射的带电粒子失去能量。如果壳层电子获得的能量, 足以克服原子核的束缚而脱离轨道, 便形成一个带负电荷的自由电子, 后者与失去一个轨道电子成为带正电荷的原子组成离子对, 这种现象称为电离 (ionization)。形成一对离子所消耗的能量平均为 33.85 eV。如果壳层电子获得的能量比较小, 只能使壳层电子由能量较低的轨道过渡到能量较高的轨道, 这种现象称为激发 (excitation)。处于激发状态的原子是不稳定的, 将自发地退回到基态, 其多余的能量将以光子的形式释放出来, 这种现象称为原子的退激。

带电粒子引起电离作用的结果是在它经过的路径四周形成许多离子对。在单位路径长度上形成的离子对数目称为电离密度 (ionization density) 或称比电离 (specific ionization), 它是衡量射线粒子电离能力的指标。射线的生物效应主要由电离作用所致, 射线的检测原理和防护原理都与电离作用有关。

(二) 轫致辐射 (bremsstrahlung) 当快速运动的入射粒子通过介质时, 由于受到原子核库仑场的作用, 运动速度突然降低, 这时入射粒子能量的一部分将转变为具有连续能谱的电磁辐射, 这种辐射称为轫致辐射。

(三) 散射 (scattering) 当入射粒子通过介质的原子时, 受原子核库仑场的作用, 使入射粒子的运动方向发生偏转, 这种现象称为散射。

二、 γ 光子与物质的相互作用

主要有三种类型:

(一) 光电效应 (photoelectric effect) 当入射光子与物质原子中的壳层电子作用时, 光子把全部能量移交给某个壳层电子使之成为光电子, 然后脱离轨道发射出去, 而 γ 光子本身被消失掉, 这种现象称为光电效应。光电子发射出去后遗留下的空位, 还可能发生标志X射线或俄歇电子。

(二) 康普顿效应 (Compton effect) 当入射光子和原子中的一个电子发生弹性碰撞时, 入射光子只将部分能量交给轨道电子并使其脱离轨道而释放, 而入射光子本身则改变频率成为能量较低的光子并与自己初始运动方向成 θ 角而运动。这种现象称为康普顿效应。

(三) 电子对 (positron-electron pair) 生成 当入射光子的能量大于两个电子的静止质量 (即大于 1.02MeV) 时, 在原子核库仑场作用下, 入射光子的能量可全部被吸收而产生一对电子 (正电子和负电子)。超过 1.02MeV 的多余能量将转化为正、负电子的动能。

负电子在物质中运行时因电离作用而逐渐耗尽动能, 最终在物质中停留下来成为自由电子; 而正电子逐步慢化之后, 在停止之前的一霎那, 很快地与物质中的自由电子复合而湮没, 形成两个运动方向相反的光子, 这种现象称为湮没辐射 (annihilation radiation), 湮没辐射的特征能量是 0.51MeV 。

三、中子与物质的相互作用

(一) 弹性散射 (elastic scattering) 中子与物质的原子核发生弹性碰撞, 使中子的运动方向发生改变, 部分能量丢失。经过多次弹性散射后, 中子逐渐丧失其能量。中子与轻原子核碰撞时, 中子丢失能量多, 而在与重原子核碰撞时, 中子丢失能量少。这种现象在中子防护时使用轻元素作防护材料是有意义的。

(二) 核反应 (nuclear reaction) 高能中子与原子核作用时, 能引起原子核反应, 形成新的核素, 而入射中子则被吸收。

第四节 常用辐射量

电离辐射剂量学是用定量方法研究和反映射线对物质作用规律的科学。人们为了研究和应用射线及其效应, 就需要对各种辐射的效应给予精确的定量。这里仅介绍几个最常用和最基本的辐射量。

一、照射量

照射 (exposure, X) 量是指X或 γ 射线在单位质量(dm)的空气中释放出来的所有次