

国家卫生和计划生育委员会“十三五”规划教材配套教材
全国高等学校配套教材
供医学影像学专业用

医用放射防护学

第 **2** 版

主 编 洪 洋 谢晋东
副主编 王亚平 仇 惠



人民卫生出版社
PEOPLE'S MEDICAL PUBLISHING HOUSE

国家卫生和计划生育委员会“十三五”规划教材配套教材
全国高等学校配套教材
供医学影像学专业用

医用放射防护学

第2版

主 编 洪 洋 谢晋东

副主编 王亚平 仇 惠

编 委 (以姓氏笔画为序)

王 岚 (哈尔滨医科大学)

王亚平 (锦州医科大学)

仇 惠 (牡丹江医学院)

石继飞 (包头医学院)

吉 强 (天津医科大学)

刘东华 (新乡医学院)

吴 昊 (南京医科大学)

吴小玲 (南京医科大学)

张瑞兰 (北华大学)

李 杭 (大连医科大学)

周 玲 (中国医科大学)

单晶心 (辽宁何氏医学院)

侯淑莲 (华北理工大学)

洪 洋 (中国医科大学)

高 扬 (牡丹江医学院)

盖立平 (大连医科大学)

谢晋东 (泰山医学院)

人民卫生出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

医用放射防护学 / 洪洋, 谢晋东主编. — 2版. — 北京: 人民卫生出版社, 2018

(临床诊断影像系列)

本科医学影像学专业第四轮规划教材配套教材

ISBN 978-7-117-26343-6

I. ①医… II. ①洪… ②谢… III. ①放射医学-辐射防护-医学院校-教材 IV. ①R14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 065242 号

人卫智网	www.ipmph.com	医学教育、学术、考试、健康, 购书智慧智能综合服务平台
人卫官网	www.pmph.com	人卫官方资讯发布平台

版权所有, 侵权必究!

医用放射防护学

第 2 版

主 编: 洪 洋 谢晋东

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: 三河市宏达印刷有限公司 (胜利)

经 销: 新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 13.5

字 数: 320 千字

版 次: 2011 年 3 月第 1 版 2018 年 3 月第 2 版

2018 年 3 月第 2 版第 1 次印刷 (总第 7 次印刷)

标准书号: ISBN 978-7-117-26343-6/R·26344

定 价: 43.00 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)



洪 洋

洪洋, 教授, 辽宁省教学名师, 硕士研究生导师。现任学术任职: 国家科技奖励评审专家; 中国辐射防护学会委员; 中国医学物理学会常务委员; 中国医学物理学会生物物理专业委员会副主任委员; 辽宁省认知科学学会副理事长。辽宁省级精品课《医用物理学》负责人。

主要从事“大学物理学”“医用物理学”“医学影像物理学”“生物物理学”“血流动力学与血液流变学”“放射卫生及放射防护学”等课程教育和研究。已主编、副主编出版了 20 余部教材, 包括主编出版国家级电子书包《医学物理学》; 主编出版国家级“十一五”规划教材《医用物理学》; 主编出版规划教材《医学影像物理学》; 以及主编出版《放射物理与防护学》《医用放射防护学》《医用物理学实验》等。承担国家级、省级教学改革立项课题 4 项; 主持并获得了教育部教学质量工程优秀结题项目; 主持研究的省教改项目获辽宁省教学成果二等奖。作为学科带头人, 承担或分支负责国家自然科学基金、辽宁省各类科学基金项目 6 项; 共发表学术论文 60 余篇, 包括 SCI、EI 科研论文 20 篇。在生物物理学与新药分子生物学机制研究的交叉领域, 共获得教育部自然科学二等奖两项、辽宁省科学技术二等奖两项、三等奖两项。



谢晋东

谢晋东, 男, 山东滕州人, 理学博士, 泰山医学院教授。现任中国医学装备协会医用辐射装备防护与检测专业委员会委员。

从事教学与科研工作 26 年。主讲的课程有: 放射物理与防护、医学影像质量评价与管理、放射诊疗质量保证、现代物理学导论等课程。获山东省教学成果二等奖 1 项, 山东省科技进步三等奖 1 项, 发表学术论文 40 余篇。

这部《医用放射防护学》自 2011 年第 1 版发行以来,受到许多高等院校师生、同行专家和相关读者的欢迎。同时在教材使用过程中,专家和编委们也针对如何更好地融合发展,适应新形势下的课程设置,满足不断更新的专业需求,提升该领域教材建设质量和水平等方面提出了宝贵意见和建议。为此我们对第 1 版《医用放射防护学》教材进行了认真的修订完善并再版,使第 2 版教材更适应高等医学教育中现代医用放射防护的理论、实践及其应用的发展;内容编辑更适合在校医学各个专业学生和临床广大医护人员,以及从事医用放射防护工作的读者群学习、理解和应用。

新版教材仍由中国医科大学洪洋教授、泰山医学院谢晋东教授共同主编,扩充全国 13 所高等医学院校的 17 位一线专业教师共同参与编写。全书根据新时期科学发展对医学影像和预防医学专业人才的要求,从新的视角全面介绍了放射卫生学基础理论和医学影像中的辐射防护知识。包括:放射物理学的基本概念和规律;电离辐射与物质作用的特征性质;放射防护中的电离辐射评价与测量;电离辐射的生物学效应;放射防护法律法规及其基本原则和方法,以及医疗放射的防护等内容。该书从辐射发生的原子物理学和核物理基础理论出发,一直延伸到国际放射防护委员会第 103 号出版物及其后续建议书颁布的最新放射防护体系。其内涵集基础理论、实验技术和法规标准于一体,为医学物理、影像技术、核医学、预防医学和监审管理多学科交叉的专业性及综合性教材。这种基础与前沿同位并重的专业特征要求我们尽可能拓宽知识广度,注重理论与实践相结合,以完成培养相应专业合格的应用技术人才的目标。

在新版教材的编写过程中,我们对第 1 版教材主要做出如下修改:

1. 压缩了放射性物理基础的原子物理与核物理基本理论内容;删除了原子结构、X 线的发生装置等物理学重复性内容。
2. 根据辐射特征、应用类别和理论实践需求系统调整和完善了教材的结构、框架,按知识模块由浅入深的条理性和知识系统的完整性重组内容,使之更为清晰、合理。
3. 对于放射防护中较陈旧、已过时的内容、数据和法规标准进行了删除和更新。
4. 新增加一个章节,即第九章“医疗照射防护”的内容。
5. 增加了《医学放射防护学》专业词汇与短语的中英文翻译对照和名词索引,为广大学生与读者继续学习拓宽国际化视野;为不断掌握国际放射防护委员会、国际原子能委员会颁发新的防护标准以及研究国际发展动态奠定基础。

此间编委们认真探讨了现代医用放射防护实践与应用的发展内涵,并将此融入本教材编写中,包括一些新定义、新方法和新数据,希望能体现出电离辐射防护的时代特征。全书着力体现“教材”的模式,更适合于课堂教学和学生阅读理解。比如在书中各章的前面都分三个层次(即熟练掌握、掌握理解和了解)介绍了本章的教学基本要求;每章的后面都加设了相应的习题及其参考答案,以便于学生消化理解和复习应用。该部教材内容由浅入深,循序渐进,既考虑到学生的起点,又注重了新知识的介绍。

新版《医用放射防护学》教材更高的质量和水平提升是加入了数字化平台。这使得广

大师生和读者在全新教材模式下,通过创新媒体形式,融合图片、视频、动画、色彩辅助等多种手段,更加快捷、全面、准确地掌握该领域专业基础知识,以及学科交叉和前沿拓展的延伸;并为实现理论学习与操作能力培养并重创造条件。

《医用放射防护学》教材所适用的理论课教学时数范围为 20~48 学时,用书单位可根据本学校、本专业特色以及与其他课程的总体知识分布格局进行调整。该教材适用于医学影像专业和预防医学专业的本科及高职技术专科学生专业必修课教材,也可以作为临床医学和生物工程或生物技术等专业的学生选修课教材,以及医护人员和生物医学技术人员作为参考用书使用。

本书作为新时期医学院校放射防护教学改革的一种尝试,得到各位专家、教授、同行以及所在院校教学管理部门的大力支持与帮助,在此一并致谢!新版教材中仍可能存在不足,甚至不当之处,恳请专家、教授及广大读者惠予指正。

洪 洋 谢晋东

2017 年夏

第一章 放射物理基础

1

第一节 放射性与核衰变	1
一、原子的基本特征	1
二、放射衰变的基本规律	3
三、放射衰变类型	7
四、人工放射性核素的产生	10
第二节 X 线的产生	12
一、X 线的基本特性	12
二、X 线的产生机制	14
三、X 线辐射场的空间分布	18
第三节 X 线的准直与滤过	22
一、准直器与光野	22
二、固有滤过	23
三、附加滤过	24
第四节 X (γ) 射线在物质中的衰减	25
一、X (γ) 射线在物质中的衰减系数	25
二、X (γ) 射线在物质中的衰减规律	28
习题一	31

第二章 电离辐射与物质的相互作用

34

第一节 电离辐射的来源与分类	34
一、电离辐射来源	34
二、电离辐射的分类	35
第二节 带电粒子与物质的相互作用	36
一、带电粒子与物质相互作用的主要方式	36
二、总质量阻止本领	38
三、质量角散射本领	38
四、射程	38
五、传能线密度	39
第三节 X (γ) 射线与物质的相互作用类型	40
一、X (γ) 射线在人体内的衰减	40
二、光电效应	42

三、康普顿效应·····	44
四、电子对效应·····	47
五、相干散射·····	48
六、光核反应·····	48
七、各种相互作用的重要性·····	48
第四节 中子与物质的相互作用·····	49
一、中子特性·····	49
二、中子与物质的相互作用·····	50
习题二·····	51

第三章 剂量学基础

52

第一节 描述电离辐射的量·····	52
一、粒子注量·····	52
二、能量注量·····	53
三、粒子注量与能量注量的关系·····	54
四、谱分布·····	54
第二节 描述电离辐射与物质相互作用的量·····	55
一、照射量·····	55
二、比释动能·····	56
三、吸收剂量·····	57
第三节 带电粒子平衡·····	60
一、带电粒子平衡·····	60
二、吸收剂量与比释动能的关系·····	61
第四节 空腔理论·····	62
一、Bragg-Gray 空腔理论·····	63
二、Spencer-Attix 空腔理论·····	63
三、空腔理论计量吸收剂量的基本原理·····	64
习题三·····	67

第四章 电离辐射的基本测量

68

第一节 电离室工作的基本原理·····	68
一、自由空气电离室·····	68
二、指形电离室·····	70
三、电离室的工作特性·····	70
四、特殊电离室·····	74

第二节 吸收剂量的测量方法..... 74

一、量热法..... 74

二、化学剂量计法..... 75

三、热释光剂量计法..... 76

四、胶片剂量测定法..... 77

五、半导体剂量仪..... 78

第三节 放射性计数测量..... 79

一、放射性探测器..... 79

二、GM 计数管 79

三、闪烁计数器..... 81

习题四..... 82

第五章 电离辐射的生物效应 84

第一节 电离辐射损伤机制..... 84

一、直接作用与间接作用..... 84

二、原发生物过程与继发生物过程..... 86

三、辐射与自由基..... 87

四、靶理论..... 88

五、生物靶的调节作用..... 89

第二节 辐射对人体的影响..... 92

一、随机效应和确定效应..... 92

二、躯体效应和遗传效应..... 94

三、近期效应和远期效应..... 96

四、小剂量电离辐射的生物效应..... 97

五、辐射危险性的估计..... 98

第三节 辐射损伤效应及影响因素..... 99

一、胎儿出生前的受照影响..... 100

二、急、慢性放射病..... 101

三、外照射致放射损伤..... 102

四、影响辐射损伤的物理、化学因素..... 104

五、影响辐射损伤的生物学因素..... 106

习题五.....108

第六章 电离辐射防护的基本原则和标准 110

第一节 放射防护法规与标准.....110

一、放射防护法规..... 110

二、放射防护标准..... 111

第二节 放射防护中使用的量.....114

一、放射防护量..... 114

二、运行实用量..... 118

第三节 放射防护体系.....119

一、照射情况分类..... 119

二、放射防护原则..... 121

三、剂量约束和参考水平..... 123

习题六.....124

第七章 外照射防护 125

第一节 外照射防护基本方法.....125

一、时间防护..... 125

二、距离防护..... 125

三、屏蔽防护..... 126

第二节 电离辐射的屏蔽防护类型.....126

一、辐射类型..... 126

二、对 X (γ) 射线的屏蔽防护 127

三、对 β 射线的屏蔽防护..... 128

四、对中子的屏蔽防护..... 128

第三节 外照射防护的屏蔽设计.....129

一、屏蔽材料..... 129

二、影响屏蔽厚度的因素..... 131

三、计算屏蔽厚度的方法..... 133

习题七.....138

第八章 内照射防护 139

第一节 内照射剂量特征.....139

一、放射治疗使用的源及照射方式..... 139

二、核医学用放射性核素特点 140

三、体内照射——近距离放射治疗的剂量分布..... 141

第二节 内照射剂量的估算.....142

一、内照射途径..... 143

二、放射性核素摄入量的估算方法..... 143

三、内照射剂量的估算方法..... 147

第三节 内照射防护基本措施与方法	147
一、内照射防护基本措施	147
二、放射性工作场所及工作条件	148
习题八	151

第九章 医疗照射防护

152

第一节 医疗照射防护的原则	152
一、医疗照射防护的发展及现状	152
二、医疗照射的正当性	153
三、医疗照射防护最优化	155
四、诊断参考水平	157
第二节 医用诊断 X 线的防护	159
一、受检者剂量评估与控制	159
二、职业照射的防护	161
三、X 线防护设施	162
第三节 放射治疗中的防护	163
一、肿瘤放射治疗防护的特殊性	163
二、实施放射治疗的防护一般要求	164
第四节 介入放射学的安全与防护	166
一、介入放射学环境的辐射剂量及估算方法	166
二、介入放射学的防护内涵	170
第五节 核医学诊疗中的防护	172
一、核医学的概念	172
二、核素进入人体途径与主要危害因素	173
三、核医学诊疗防护的基本原则及核医学操作防护要求	173
四、核医学诊断参考水平	175
习题九	178

第十章 放射防护的监测与管理

179

第一节 放射防护监测	179
一、医疗照射场所的防护监测	179
二、个人剂量监测	179
三、剂量监测方法	180
第二节 辐射事故与应急处理	181
一、辐射事故的分级与分类	181
二、辐射事故的照射途径与防护	183

三、辐射事故的应急准备及其响应..... 185

第三节 申请许可制度和管理机构.....187

一、许可登记管理制度..... 187

二、从事放射工作单位的必备条件..... 188

三、放射防护管理机构..... 188

第四节 放射防护管理的内涵.....189

一、放射防护知识培训..... 189

二、放射器材的使用与管理..... 189

三、放射工作人员健康追踪..... 190

四、质量保证..... 192

五、档案管理..... 193

习题十.....194

参考文献	195
-------------	------------

中英文名词对照索引	197
------------------	------------



教学基本要求

1. 熟练掌握放射性衰变的基本类型和基本规律, X 线谱的产生机制, X(γ) 线在物质中的衰减系数及衰减规律。
2. 理解 X 线辐射场的空间分布规律, X 线的准直与滤过。
3. 了解 X 线的基本性质。

电离辐射是一切能引起物质电离的辐射总称。自古以来人类就受到天然存在的各种电离辐射源照射, 随着自然科学发展, 直到 19 世纪末人类才认识到了电离辐射的存在。

1895 年德国物理科学家伦琴发现了 X 线(伦琴射线), 第二年法国物理学家贝可勒尔在研究含铀矿物质的荧光现象时, 偶然发现铀盐能自发地放射出穿透力很强、可使照相底片感光的不可见射线。其后不久, 法国物理学家居里夫人发现了两种新的放射性元素钋和镭, 并首次提出了“放射性”概念。

随着 X 线和核能的发展和应用, 人们在生活、生产和科学研究活动中与放射性物质接触机会日益增多。如果不注意防护或使用不当, 会使一些从事放射性工作的人员和接受射线诊治的患者受到大剂量射线照射而发生严重的电离辐射损伤, 甚至造成死亡。

电离辐射具有物理性致害因素, 要想对电离辐射的生物效应、致病机制及辐射防护进行深入研究, 首先要掌握一定的放射物理基础知识。本章主要介绍原子的基本性特征、放射衰变的基本规律和衰变类型、X 线的产生和 X 线的准直与滤过、X(γ) 线在物质中衰减的相关知识。

第一节 放射性与核衰变

放射线是怎样产生的? 为什么有些物质具有放射性, 而有些物质没有? 这些均取决于组成物质最基本单元的结构、状态等物理性质。自然界的物质都是由分子组成, 而分子是由原子组成, 原子是元素的最小单元。

一、原子的基本特征

1. 原子结构 原子是由原子核和核外电子组成。原子核带正电荷, 核外电子带负电荷, 通常原子核所带的正电荷数与核外电子数相等, 所以整个原子是呈中性的。电子按一定轨道绕原子核不停地运动。不同的元素, 其原子的核外电子数不同。



原子系统的能量是不连续的, 即原子系统只能处于一系列分立的能量状态, 其能量量子化, 这些量子化的能量值称为能级(energy level)。原子在这些状态下, 核外电子绕核作加速运动, 但并不辐射电磁波, 这些状态称为原子系统的稳定状态, 简称定态(stationary state)。因此电子的轨道分布也是不连续的。原子核外的每个电子都有一定的轨道, 几条轨道又形成一个壳层。电子壳层可用主量子数 n 表示, n 取 1、2、3、4、5、6、7 等值时, 相应的电子壳层可用 K、L、M、N、O、P、Q 等符

知识链接 1
原子结构

号表示, n 值愈大, 说明电子距核愈远。各壳层所容许的电子数有一定限度, 对于主量子数为 n 的壳层, 可容纳的最多电子数为 $2n^2$ 。同一层的电子能量相近, 也可以说同一层电子处于同一能级上。K 壳层轨道上的电子能量最低, 越是靠外层的轨道上电子能量越高, 原子的能级愈高。因此, 主量子数是决定原子能级的主要因素。

在正常情况下, 电子在原子核外排布时, 要尽可能使电子的能量最低, 核外电子先填满原子内壳层的低能级轨道, 然后依次向外填充。原子处于最低的能量状态, 称为基态 (ground state), 处于基态的原子最稳定。当原子吸收一定大小的能量, 且吸收能量等于某两个能级之差时, 电子将跃迁到某一较高的能级 (激发态, excitation state) 上, 这一过程称为原子的激发 (excitation)。如果外来的能量足够大, 使电子脱离原子的束缚、离开原子成为自由电子, 这个过程称为电离 (ionization)。

原子核对核外电子具有很强的吸引力。离核最近的 K 层电子所受核引力最大, 因此, 要把内层 (K 层) 电子从原子中电离所需能量最多。而外层电子受核的引力较小, 电离外层电子所需的能量也较小。通常把电离原子某壳层电子所需的最小能量称为该壳层电子在原子中的结合能 (binding energy)。显然, 原子的能级是结合能的负值, 二者绝对值相等而符号相反。原子中 K 层电子的结合能最大, 其能级最低; 外层电子的结合能较小, 能级则较高。

2. 原子核 1932 年中子 (neutron) 被发现以后, 理论和实验证明原子核是由带正电荷的质子和不带电的中子组成。质子和中子统称为核子 (nucleon)。原子核内的质子带正电, 其所带正电荷与核外电子的负电荷数值相等。原子的质量数 A 等于核内的核子数, 而原子序数 Z 等于核内质子数。通常把质量数为 A , 质子数为 Z , 中子数为 N 的原子核或原子, 标记为 ${}_Z^AX$, 其中 X 为元素符号, 这种方式表示亦可称为核素 (nuclide)。

原子核接近球形, 通常用核半径来表示原子核大小。核半径是指核力 (nuclear force) (短程强相互作用力) 的作用范围。原子核的半径与质量数关系为: $R=r_0A^{1/3}$, r_0 是个常数, 精密测定为 $1.20 \times 10^{-15}\text{m}$ 。

原子核的质量小于组成它的核子质量之和, 这个差值称为原子核质量亏损 (mass defect)。若忽略原子核与核外电子结合成原子时的质量亏损, 则原子核的质量亏损为

$$\begin{aligned}\Delta M &= Zm_p + Nm_n - [M({}_Z^AX) - Zm_e] \\ &= Z(m_p + m_e) + Nm_n - M({}_Z^AX) \\ &\approx ZM({}_1^1\text{H}) + Nm_n - M({}_Z^AX)\end{aligned}\tag{1-1}$$

式中 $M({}_1^1\text{H})$ 、 m_p 、 m_n 、 $M({}_Z^AX)$ 分别为氢原子、质子、中子和 ${}_Z^AX$ 原子的质量。

与质量亏损 ΔM 相联系的能量为 ΔMc^2 , 表明自由状态的单个核子结合成原子核时有能量放出, 这称为原子核的结合能。

原子核的结合能也可以这样理解: 如果将一个原子核拆散, 使组成它的那些核子成为自由状态的核子, 外界必须做数量等于结合能的功。

从上述理论分析, 似乎结合能愈大, 原子核愈稳定。然而以原子核的结合能大小判定原子核的稳定性并不充分。自然界中, 核子越多的原子核结合能越大, 但并不是越稳定, 相反更容易以多种形式衰变。因此原子核的稳定性通常用比结合能 (specific binding energy) 来描述, 即把原子核的结合能除此核内的总核子数 A 就得到每个核子的平均结合能 ε

$$\varepsilon = \frac{E_b}{A}$$

式中 E_b 和 A 分别表示原子核的结合能和核子数。比结合能越大的核越稳定。

实验表明原子核的稳定性还与核内质子和中子之间的比例有着密切的关系。对于较轻的核 $A < 20$, 比结合能随 A 的增加而增加。对于中等质量的核 $A = 40 \sim 100$, 原子核的比结合能最大, 几乎是一常数, $\varepsilon \approx 8.6 \text{ MeV}$ 。对于 $A > 120$ 的重核区, 比结合能明显开始减小。

原子核的稳定性会随着核内质子数和中子数的增加而出现周期性变化。当质子数或中子数为 2、8、20、28、50、82、126 等数值时, 核是稳定的, 这些数被称为幻数。这是因为当核外电子分布刚好填满一个壳层时, 它们彼此结合得比较紧密, 此核就比较稳定。而当质子或中子数为幻数时, 刚好填满一个壳层, 此时核具有较大的稳定性。

原子核的稳定性还与核内质子和中子的奇偶性有关, 偶偶核最稳定, 稳定核素最多; 其次是奇偶核和偶奇核; 奇奇核最不稳定, 稳定核素最少。

二、放射衰变的基本规律

在自然界已知的原子核中, 只有少数原子核是稳定的, 而大多数原子核不稳定。不稳定原子核能自发地放出射线而变成另一种元素的原子核, 这种现象称为放射衰变 (radioactive decay)。具有这种放射性的核素称为放射性核素 (radioactive nuclide)。放射性核素又分为天然和人工两种。实验表明, 放射衰变是放射性核素本身的特性, 通常的外界作用, 如加温、加压、电磁场等, 甚至改变化学状态, 都不能改变放射性核素的衰变性质及其衰变速度。放射性核素又有共同的规律性, 它严格遵守质量和能量守恒定律、动量守恒定律、电荷守恒定律和核子数守恒定律等。

1. 衰变规律 原子核发生衰变时, 母体核不断地变成子体核。随着时间 t 的增长, 母核数目不断减少。虽然任何一种具有放射性的核素都能衰变, 但衰变的时间却有先有后, 完全是随机的。对大量的原子核来说, 其衰变遵循统计规律。实验测量和理论推导都可以证明, 放射性核素衰变随时间变化呈指数衰减。

如在时间 t 到 $t + dt$ 内, 有 dN 个原子核发生衰变或跃迁, dN 与处于 t 时刻尚未衰变的原子数目 N 及时间间隔 dt 成正比, 并且 dN 还与发生衰变的原子核的种类有关。引入衰变常数 (decay constant) λ 来表征此性质, 可写出如下等式

$$dN = -\lambda N dt \quad (1-2)$$

负号表示放射性核数 N 随时间 t 的增加而减少。将式 (1-2) 积分, 并根据初始条件: $t=0$ 时, $N=N_0$, 可得

$$N = N_0 \exp(-\lambda t) \quad (1-3)$$

这就是放射性核素的衰变规律。

从式 (1-2) 可见衰变常数 λ 表示任一放射性核在单位时间内的衰变概率, 即单位时间内衰变的核数与当时存在的核数之比, 单位为 s^{-1} 。

放射性核的数量因发生自发核衰变而减少到原来核数一半所需的时间称为半衰期 (half-life), 用 $T_{1/2}$ 表示, 它是表征放射性核自发衰变的另一参数, 单位用年 (a)、天 (d)、小时 (h)、分 (min)、秒 (s) 表示。不同的放射性核素半衰期差别可能很大, 例如天然铀中的

核素 $^{238}_{92}\text{U}$, 其半衰期为 $T_{1/2}=4.47 \times 10^9 \text{a}$; 而核素 $^{132}_{53}\text{I}$ 的半衰期为 $T_{1/2}=2.28\text{h}$ 。

根据式(1-3)和半衰期定义, 可求出半衰期 $T_{1/2}$ 与衰变常数 λ 的关系。当 $t=T_{1/2}$ 时,

$$N(T_{1/2}) = \frac{N_0}{2} = N_0 \exp(-\lambda T_{1/2}), \text{ 即}$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (1-4)$$

可见 $T_{1/2}$ 与 λ 成反比关系。衰变常数越小, 半衰期就越长; 反之, 衰变常数越大, 半衰期越短。

放射性核发生衰变具有随机性, 但同种核素有一个平均的存活时间, 称作平均寿命 (average lifetime) τ 。它是指核在衰变前存在时间的平均值, 即

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^\infty \lambda N t dt = \frac{1}{\lambda} \quad (1-5)$$

平均寿命是衰变常数的倒数, 衰变常数越大, 衰变越快, 平均寿命也越短。

在核医学中, 放射性核引入人体内时, 核数目除按自身的衰变规律减少外, 还会由人体的代谢不断排出体外而减少。因此, 生物机体内放射性核数目的减少比单纯的核衰变要快。我们将各种由人体代谢而产生的放射性核数目减少一半所需的时间称为生物半衰期 (biological half-life), 用 T_b 表示。相应的衰变常数称为生物衰变常数 (biological decay constant), 用 λ_b 表示, $\lambda_b = \ln 2 / T_b$ 。

将生物机体内放射性核实际数目减少一半所需的时间, 称为有效半衰期 (effective half-life) T_e 。对应的衰变常数为有效衰变常数 (effective decay constant) λ_e 。则可分别表示为

$$\lambda_e = \lambda + \lambda_b \text{ 和 } \frac{1}{T_e} = \frac{1}{T} + \frac{1}{T_b} \quad (1-6)$$

根据式(1-6)则衰变规律可改写为

$$N = N_0 e^{-(\lambda + \lambda_b)t} = N_0 e^{-\lambda_e t} \text{ 或 } N = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T_e}} \quad (1-7)$$

例 1-1 给患者服用 $^{59}_{26}\text{Fe}$ 标记的化合物来检查血液的病理状况。已知 $^{59}_{26}\text{Fe}$ 的半衰期为 46.3 天, 9 天后测得人体内放射性原子核数量的相对残留量为 79%, 求 $^{59}_{26}\text{Fe}$ 的生物半衰期。

解: 根据式(1-7)得

$$\frac{N}{N_0} = \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T_e}} = \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{9}{T_e}} = 79\%$$

则有效半衰期为

$$T_e \approx 27\text{d}$$

$$\text{由式(1-6)得 } \frac{1}{T_b} = \frac{1}{T_e} - \frac{1}{T} = \frac{1}{27} - \frac{1}{46.3} = 0.0154\text{d}^{-1}$$

因此可以求得 $^{59}_{26}\text{Fe}$ 的生物半衰期为 $T_b = 65\text{d}$

2. 放射性活度 由于放射性核素只有当核在衰变时才放出射线, 所以我们定义单位时间内衰变的原子核数为该放射性样品的放射性活度 (radioactivity), 用 A 表示。即

$$A = \frac{-dN}{dt} = \lambda N = \lambda N_0 \exp(-\lambda t) = A_0 \exp(-\lambda t) \quad (1-8)$$

式中 A_0 为 $t=0$ 时刻的放射性活度, $A_0 = \lambda N_0$ 。由式(1-8)可知, 若某时刻母核数为 N , 则该时刻的放射性活度就是 λN , 放射性活度随时间变化的规律也是指数衰减规律。

放射性活度 A 的 SI 制单位为贝可(勒尔), 符号为 Bq, $1\text{Bq} = 1\text{s}^{-1}$ 。旧专用单位名称是居里, 符号为 Ci, $1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10}\text{Bq}$ 或 $1\text{Bq} = 2.703 \times 10^{-11}\text{Ci}$, 此外还有毫居里(mCi)和微居里(μCi)。

例 1-2 一个放射源在 $t=0$ 时的放射性活度为 8000Bq , 10 分钟后放射性活度为 1000Bq , 求: ①该放射源的衰变常数和半衰期; ② 1 分钟后的放射性活度。

解: ①由衰变式 $A = \lambda N$, 有

$$t=0 \text{ 时}, A_0 = \lambda N_0 = 8000\text{Bq} \quad (1)$$

$$t=10\text{min} \text{ 时}, A = \lambda N = \lambda N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{10}{T}} = 1000\text{Bq} \quad (2)$$

将式(1)代入式(2), 有
$$\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{10}{T}} = \left(\frac{1}{2}\right)^3 \quad (3)$$

由式(3)解得该放射源半衰期为
$$T = \frac{10}{3} \text{ min} = 200\text{s}$$

衰变常数为
$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} = 3.47 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

② 1 分钟后的放射性活度为

$$A = A_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}} = 8000 \times \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{60}{200}} = 6498\text{Bq}$$

例 1-3 计算经过多少个半衰期某种放射性核素可以减少到原来的 0.1%?

解: 由公式
$$N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$$

$$\frac{N}{N_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$$

得
$$\frac{t}{T} = \frac{\ln \frac{N}{N_0}}{\ln \frac{1}{2}}$$

当 $\frac{N}{N_0} = 0.1\%$ 时,
$$\frac{t}{T} = \frac{\ln 1000}{\ln 2} = \frac{6.908}{0.693} = 9.97 \approx 10$$

3. 放射性统计涨落 放射性衰变是一种符合统计规律的随机现象。这种随机性主要表现在衰变方式、衰变时刻、辐射粒子到达的空间位置、定点测量辐射粒子的数目大小, 即计数的多少上。因此, 在相同条件相同时间间隔 Δt 内, 进行重复测量, 每次测得值 N_i 均不相同, 且会在一个数值上下起伏, 这种现象称为统计涨落(statistical fluctuation)。辐射源在空间位置上的随机性在核素显像中表现为图像上出现“斑点”, 这是一种噪声, 会