

医学放射生物学基础

主 编 苏燎原 刘芬菊
副主编 周平坤

中国原子能出版社

医学放射生物学基础

主 编 苏燎原 刘芬菊

副主编 周平坤

编 者 (按姓氏笔画为序)

从玉文 朱 巍 刘芬菊 江家贵

苏燎原 杨 巍 陈 秋 周平坤

中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

医学放射生物学基础 / 苏燎原, 刘芬菊主编. —北京: 中国原子能出版社, 2013. 1
ISBN 978-7-5022-5829-0

I. ①医… II. ①苏… ②刘… III. ①放射医学-放射生物学-高等学校-教材 IV. ①R811.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 023156 号

内 容 简 介

本书是介绍医学放射生物学的基础理论。全书共分十一章。阐述了电离辐射的理化基础及其对分子、细胞、器官和系统的作用, 以及低剂量辐射的兴奋效应和放射肿瘤学基础。其内容融入学科的最新进展并切合学生的实际需要。

本书为高等医学院校的放射医学本科及相关专业提供教材, 亦可供从事放射医学与防护的工作人员及研究生参考。

医学放射生物学基础

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 肖 萍

技术编辑 冯莲凤

责任印制 潘玉玲

印 刷 中国文联印刷厂

经 销 全国新华书店

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 17.25 字 数 430 千字

版 次 2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-5829-0 定 价 48.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

E-mail: atomep123@126.com

发行电话: 010-68452845

版权所有 侵权必究

放射医学专业系列教材出版序言

自 1895 年伦琴(W. C. Roentgen)发现 X 射线以来,人类对核能和核技术的研究和利用已经历了近 120 年的发展历程。诚如一切事物均具有两面性,核能和核技术也不例外,利用它们在为人类带来巨大裨益的同时,其产生的电离辐射也对人类生物机体产生不同程度的健康危害,同时也对人类的及其生存环境造成一定的负面影响。为了更好地利用核能和核技术为人类造福,又能保护辐射从业人员和公众免受或少受电离辐射照射的影响,放射医学与防护学科应运而生,并随着人类对电离辐射的认识和应用不断深入和扩展应用,放射医学和防护学科获得相应发展。经历一个多世纪后,放射医学和防护现已形成了系统的学科体系,其主要内涵是研究电离辐射对人体的作用、损伤、修复及其机制;发展放射损伤的诊断、治疗和预防技术;为放射性工作人员的卫生防护、医学监督和保健工作提供科学依据和措施;同时,肿瘤放射治疗和核医学诊疗的基础与应用研究也已构成放射医学的重要研究内容。

我国放射医学与防护学科发展和专业的建立与发展,是与我国核技术利用和核能事业的发展,尤其是 20 世纪中叶的核试验,息息相关。起步于 20 世纪 50 年代末,发展于 60 年代中期,因核试验要求,当时放射医学的主要目标是急性放射病诊断和实验治疗研究,到 80 年代,各地放射医学和防护机构和队伍都根据核电发展的需求作了相应调整,主要为临床放射治疗和诊断、放射卫生评价和放射防护监督等方向培养学生和开展相关研究。

苏州大学医学部放射医学与防护学院前身是创建于 1964 年,隶属于原核工业部的苏州医学院放射医学系。虽然由于各种原因,20 世纪 80 至 90 年代我国放射医学和防护学科发展缓慢,但苏州大学仍然坚持进行放射医学和防护本科人才的培养,仍然坚持放射医学的学科建设,并取得了一定的发展,成为国家重点学科,学院已成为我国培养放射医学专业人才和开展放射医学科学研究的主要基地,放射医学专业也已成为国家特色专业建设点、江苏省特色专业和苏州大学品牌专业,为国防、核电、军队、医疗卫生等机构培养了一大批放射医学和防护专业人才。

在放射医学专业 50 年的漫长办学历程中,苏州大学相关教师主编了放射医学领域中大部分全国统编教材,如:《医用核物理》、《放射化学》、《电离辐射剂量学》、《放射卫生学》、《放射毒理学》、《放射医学教程》、《核环境学基础》、《实验核医学》、《核药理学教程》、《放射治疗技术》、《放射治疗物理学》等,多次获得国家 and 省部级优秀教材奖,相关课程被评为江苏省优秀课程群。但是,近年来,随着物理、化学、核技术、计算机科学、纳米技术、特别是分子生物学等交叉学科的发展,在急性放射病的预防、诊断、治疗,辐射损伤机制研究,辐射防护剂应用,辐射剂量学与生物计量学在医疗诊断上的应用,辐射危害流行病学调查与评价,核事故医学应急处理等方面都取得了迅猛进展。原有的放射医学系列教材已不能反映放射医学学科的最新进展和成果,影响了放射医学专业人才培养的质量。经过各方努力,在放射医学国家特色专业建设项目、江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD,特种医学)的支持下,苏州

大学组织国内高校相关专业教师,在原有教材的基础上,编写一套全新的放射医学专业系列教材,供国内放射医学及其相关专业本科学生使用。相信这一系列教材的出版,必将促进我国放射医学学科的发展,有利于放射医学专业人才的培养,也必将为我国国家安全、核能建设、人民健康和社会经济的进步发挥积极作用。

此为序。

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters, likely the name of the author or editor.

2013. 6. 1

序

《医学放射生物学基础》出版了,它是一本适合放射医学、核医学、核工程与核技术、辐射防护等本科专业用的专业基础教材,也为核相关专业的科技工作者提供了一本好的参考书。核能开发及核技术应用是 20 世纪最伟大的成就之一。核武器仍然是全球关注的焦点;全球核电的发电份额转为发电总量的 16%;非武力民用核技术已深入到国民经济的各个领域,在美、日、欧等发达国家,其产值约为国民生产总值的 2%~4%;在我国,百十个领域、100 多种产品与技术同核技术应用有关,至 2010 年年底,我国已建的 30 万 Ci(11.1 PBq)以上的钴源装置已达 128 座,已建功率在 5 kW 以上电子加速器达到 171 台,总产值已达到 1 000 亿元。综上所述,核能开发的进展,对从事放射医学与防护的科技工作者也提出了更高的要求。

本书的作者是长期从事医学放射生物学教学和科研的学者。苏燎原、江家贵、刘芬菊教授治学严谨,论著甚丰,教书育人,备受学子爱戴;军事医学科学院的周平坤、从玉文教授均是杰出的学科带头人;陈秋、杨巍、朱巍博士均是年轻学者。本书既全面地阐述了电离辐射的物理、化学和生物效应,也充实了医学放射生物学领域的最新科研成果。

本书编者参考了刘树铮教授主编的《医学放射生物学》教材的部分内容,在此也感谢以刘树铮教授为首的团队在医学放射生物学领域作出的杰出贡献。

朱南康
2012 年 8 月

前 言

人类生存在地球上,受到环境的天然放射性的照射,核爆炸或放射性事故,以及和平利用原子能,人们与辐射接触的机会日益增多。电离辐射与人类生活的关系非常密切,因此放射生物效应受到普遍关注。大剂量电离辐射对机体的损伤如何?核医学及放射治疗对人们有什么作用?小剂量电离辐射对人体有什么影响?为了有效应用核能和核技术以增进人类的福祉,人们必须了解放射生物学的基本知识,才能保证放射性工作人员和公众的健康。

本书是医学放射生物学的基础理论,编写的目的是为高等医学院校的放射医学及相关专业提供教材,也可作为其他专业的参考书。本书共分十一章。其中:第一章为电离辐射的种类、基本特性及其生物学作用的理化基础;第二章为电离辐射的分子生物学效应;第三章为电离辐射生物剂量计;第四章为电离辐射的细胞效应;第五章为电离辐射对神经和内分泌系统的作用;第六章为电离辐射对造血系统的作用;第七章为电离辐射对免疫系统的作用;第八章为电离辐射所致的感染和出血并发症;第九章为电离辐射对消化系统的作用;第十章为电离辐射对其他系统和器官的作用;第十一章为肿瘤放射生物学基础。各章节分别由相关领域的教学、科研的教师编写,李明博士参加部分编写工作。特邀军事医学科学院周平坤、从玉文教授撰写电离辐射的细胞效应及感染、出血部分。苏燎原教授对全书内容进行了审阅和修改;周平坤、刘芬菊教授审阅了部分稿件;刘芬菊教授负责教材编写的组织和修改工作。

本书编写内容融入学科的最新进展,篇幅适中,切合学生的学习需要。由于编者的水平有限,可能编写不当或叙述不妥,望读者指正。

朱南康教授曾长期领导放射医学学科的建设,他热心为本书作序,深表敬意!

编 者

2012年8月

目 录

第一章 电离辐射的种类、基本特性及其生物学作用的理化基础	1
第一节 电离辐射的种类和基本特性	1
一、电磁辐射	1
二、粒子辐射	2
第二节 电离辐射生物学作用的理化基础	4
一、电离作用和激发作用	4
二、传能线密度和相对生物学效率	6
第三节 原发作用与继发作用	8
第四节 直接作用和间接作用	9
一、直接作用	9
二、间接作用	10
三、电离辐射生物学作用中的四种效应	10
第五节 自由基	14
一、自由基的基本概念	14
二、自由基的特性	14
三、活性氧与氧自由基	15
四、自由基对生命大分子的作用	16
五、有机体的抗氧化功能	17
第六节 电离辐射原发作用的几种学说	19
一、硫氢基学说	19
二、膜学说	19
三、靶学说	20
四、链锁反应学说	22
五、结构代谢学说	23
第七节 影响电离辐射生物效应的主要因素	23
一、与电离辐射有关的因素	23
二、与机体有关的因素	26
思考题	28
参考文献	28
第二章 电离辐射的分子生物学效应	29
第一节 DNA 的电离辐射效应	29
一、DNA 分子组成与结构	29
二、DNA 是电离辐射的重要靶分子	32

三、DNA 损伤的类型	33
四、DNA 损伤的修复类型及机制	37
五、线粒体 DNA 损伤的特点	43
六、细胞周期检查点与 DNA 损伤修复信号系统的相关性	44
七、DNA 损伤与癌症	45
第二节 RNA 损伤修复、microRNA	47
一、RNA 甲基化损伤的修复	47
二、RNA 损伤的调控	47
三、RNA 损伤和肿瘤	47
四、电离辐射与 microRNA	47
第三节 辐射对氧化磷酸化反应的抑制作用	47
一、辐射对线粒体氧化磷酸化反应的抑制作用	48
二、辐射对核磷酸化作用的抑制	48
第四节 生物膜的电离辐射效应	48
第五节 紫外线引起的不同的 DNA 链损伤修复分子机制	50
第六节 电离辐射对蛋白质的效应	52
一、一级结构与功能的变化	52
二、高级结构与功能的变化	52
思考题	52
参考文献	53
第三章 电离辐射生物剂量计	55
第一节 电离辐射生物剂量计	55
一、电离辐射生物剂量计	55
二、电离辐射生物剂量测定研究现状	55
第二节 非稳定性染色体畸变的辐射生物剂量测定	56
一、急性照射的剂量-效应关系	57
二、局部照射的剂量-效应关系	60
三、迁延性照射或分次照射	60
四、非稳定性染色体畸变分析的辐射生物剂量估算	61
第三节 微核的生物剂量测定	61
一、微核	62
二、外周血淋巴细胞微核方法	62
三、淋巴细胞微核观察	63
四、微核的剂量-效应关系	64
第四节 其他辐射生物剂量计	64
一、早熟凝集染色体分析	64
二、稳定性染色体畸变分析	66
三、体细胞基因突变分析	68
四、DNA 损伤和突变分析	71

思考题	73
参考文献	73
第四章 电离辐射的细胞效应	74
第一节 细胞的放射敏感性	74
一、不同类型细胞的放射敏感性差异	74
二、细胞周期不同时相的放射敏感性差异	75
三、辐射敏感体细胞与突变细胞株	75
四、细胞放射敏感性机制	76
第二节 电离辐射对细胞周期进程的效应	80
一、细胞周期	80
二、细胞周期同步化	82
三、细胞周期检查点	83
四、电离辐射对细胞周期进程的影响及作用机制	84
第三节 电离辐射导致细胞死亡及其机制	88
一、细胞间期死亡与增殖死亡	88
二、细胞坏死与细胞凋亡	90
三、细胞自噬	97
第四节 细胞放射损伤修复与细胞存活曲线	98
一、细胞放射损伤类型与修复	98
二、细胞存活曲线	98
第五节 电离辐射诱导细胞恶性转化	101
一、电离辐射致癌的理论基础	101
二、辐射致癌的多阶段发展学说	103
三、辐射致癌的机制	104
思考题	105
参考文献	105
第五章 电离辐射对神经和内分泌系统的作用	108
第一节 电离辐射对神经系统的影响	108
一、神经系统的结构和功能	108
二、电离辐射对神经系统的效应	110
三、特大剂量照射引起的神经系统的变化	113
四、分次照射对神经系统的影响	113
第二节 电离辐射对内分泌系统的影响	114
一、内分泌系统的形态和功能	114
二、电离辐射对内分泌系统的效应	114
思考题	117
参考文献	117
第六章 电离辐射对造血系统的作用	119
第一节 造血系统的结构与功能	119

一、造血器官	119
二、血液	120
三、造血细胞生成	120
四、造血微环境	121
五、血细胞生成动力学	122
第二节 急性全身照射对造血系统的影响	122
一、造血组织的辐射损伤	123
二、造血细胞的辐射损伤	126
三、造血微环境的辐射损伤	133
四、造血系统辐射损伤效应	137
第三节 辐射损伤的造血系统重建	139
一、骨髓造血干细胞移植	140
二、外周血造血干细胞移植	142
三、胎肝造血干细胞移植	143
四、脐带血造血干细胞移植	143
五、基因治疗	143
思考题	145
参考文献	145
第七章 电离辐射对免疫系统的作用	147
第一节 免疫系统的组成	147
一、中枢免疫器官	147
二、外周免疫器官	148
三、固有免疫与获得性免疫	148
第二节 电离辐射对免疫组织和细胞的效应	149
一、电离辐射对免疫组织的效应	149
二、电离辐射对免疫细胞的效应	151
第三节 急性全身照射后免疫功能的变化	153
一、全身照射后固有免疫的变化	153
二、全身照射后获得性免疫的变化	154
三、全身照射后机体免疫功能的变化	155
第四节 电离辐射对免疫系统作用的机制	156
一、分子基础	156
二、神经内分泌调节	158
第五节 慢性照射的免疫效应	158
第六节 局部照射的免疫效应	160
第七节 低剂量辐射的生物效应	162
一、刺激效应	162
二、适应性反应	165
三、低剂量辐射对生物体的治疗效应	166

四、低剂量辐射生物效应的机制	168
思考题	169
参考文献	169
第八章 电离辐射所致的感染和出血并发症	171
第一节 感染并发症	171
一、感染并发症的发生机制	172
二、感染并发症的发病特点	180
三、感染并发症的临床表现	181
第二节 出血并发症	182
一、出血并发症的发生机制	182
二、出血并发症的发病特点和临床表现	187
思考题	188
参考文献	188
第九章 电离辐射对消化系统的作用	190
第一节 消化系统的结构、功能与放射敏感性	190
一、口腔、食管和胃的结构、功能与放射敏感性	190
二、肠的结构、功能与放射敏感性	191
三、肝脏的结构、功能与放射敏感性	193
四、胰腺的结构、功能与放射敏感性	193
第二节 电离辐射对口腔、食管和胃的作用	193
一、电离辐射对口腔的作用	193
二、电离辐射对食管的作用	194
三、电离辐射对胃的作用	194
第三节 放射病时肠的变化	195
一、急性放射病时小肠的变化	195
二、肠型放射病时小肠的变化	196
三、慢性放射病时小肠的变化	198
四、放射病时结肠的变化	198
第四节 电离辐射对肝脏和胰腺的作用	199
一、电离辐射对肝脏的作用	199
二、电离辐射对胰腺的作用	200
思考题	200
参考文献	201
第十章 电离辐射对其他系统和器官的作用	203
第一节 呼吸系统的变化	203
一、急性放射损伤时肺的变化	203
二、慢性放射损伤时肺的变化	203
三、局部照射后肺的变化	204
四、氡及其子体对肺的照射	204

五、放射性肺损伤发生机制	204
第二节 心血管系统的变化	205
一、急性照射后心血管的变化	206
二、胸部照射后心脏的变化	207
第三节 泌尿系统的变化	207
一、肾脏的变化	207
二、膀胱的变化	207
第四节 生殖系统的变化	207
一、生殖细胞的放射敏感性	207
二、辐射的生殖效应	208
三、放射性内分泌效应	208
四、辐射对胚胎发育的影响	209
第五节 眼的变化	210
第六节 皮肤的变化	210
一、放射性皮肤损伤的特点	211
二、皮肤放射损伤的病理变化	211
第七节 骨的变化	212
一、生长障碍	212
二、骨变性、骨折	212
三、骨肿瘤	212
思考题	213
参考文献	213
第十一章 肿瘤放射生物学基础	214
第一节 肿瘤模型的制备	214
一、细胞接种肿瘤动物模型	214
二、实体瘤动物模型接种法	215
三、实体瘤的测量及评价指标	216
第二节 肿瘤放疗杀死细胞的理论基础	219
一、细胞死亡的分子基础	219
二、放射治疗杀死肿瘤细胞及其预测	220
三、早反应组织和晚反应组织的比较	220
第三节 放疗后肿瘤的反应	225
一、肿瘤的生长	225
二、照射对肿瘤组织的生长抑制与正常组织的修复	227
三、电离辐射诱导肿瘤细胞的凋亡	228
第四节 正常细胞组织和肿瘤动力学	229
一、细胞增殖周期	229
二、瘤细胞的生成与丢失	230
三、辐射后肿瘤体积的缩小	230

第五节 人体肿瘤的再生.....	231
一、肿瘤复发出现的时间.....	231
二、分段治疗.....	231
三、延长治疗.....	232
第六节 乏氧对肿瘤细胞的影响.....	233
一、乏氧再氧合.....	233
二、周期再分布.....	235
第七节 肿瘤放射治疗及联合其他疗法的应用.....	236
一、单纯放射治疗及其分类.....	237
二、放射治疗联合手术应用.....	238
三、放射联合化学药物治疗.....	240
四、放射联合生物疗法的应用.....	240
五、放疗联合基因治疗.....	242
六、肿瘤放射生物学展望.....	244
思考题.....	245
参考文献.....	246
中英名词索引.....	248

■ 第一章 ■

电离辐射的种类、基本特性及其生物学作用的理化基础

第一节 电离辐射的种类和基本特性

电离辐射(ionizing radiation)是指能使其所作用的物质分子发生电离作用的射线。电离辐射可分为电磁辐射和粒子辐射两大类。

一、电磁辐射

电磁辐射(electromagnetic radiation)是指随时间变化而呈交互垂直变化的电场和磁场,并向前运动形成的电磁波(如:无线电波、微波、可见光、红外线、紫外线、X射线和 γ 射线等),它们只有能量,没有静止质量。在电磁辐射中,由于X射线和 γ 射线波长极短,频率很高,使其具有很大的能量,能在物质中穿行并使物质分子发生电离,所以X射线和 γ 射线属于电离辐射。

X射线和 γ 射线的物理特性基本相同,均由光子组成,但它们的来源不同,X射线是从核外产生的,如高速电子在物质中受阻而减速,其能量以电磁辐射形式释放出来,或当高速电子击出原子内壳层某一能级上的电子后,外壳层某一能级上的电子填补内壳层留下的空穴,这两个能级的能量差值,以光子形式释放出来。 γ 射线是由原子核内部产生的,比如当不稳定的核衰变成稳定的核时,多余的能量以 γ 射线形式释放出来。

X射线和 γ 射线与物质相互作用时,主要通过以下三种方式将自身能量转移至被碰撞的物质。

(一) 光电效应

当X射线和 γ 射线能量小于50 keV时,其能量转移以光电效应为主。即光子将自身的能量转移给原子,并由原子中击出一个电子,即光电子。光电效应主要发生在原子中束缚最紧的K层,光电效应发生后,由于原子内层电子出现空穴,原子将发射特征X射线或俄歇电子。光电效应示意图如图1.1所示。

(二) 康普顿效应

当X射线和 γ 射线的能量为0.2~2 MeV时,主要产生康普顿效应。康普顿效应一般发生在束缚最疏松的外层电子,即入射光子与核外轨道电子发生非弹性碰撞,

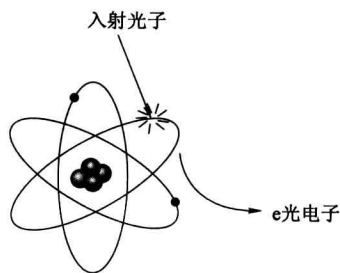


图 1.1 光电效应示意图

并将光子的能量转移给电子,使之成为反冲电子,而光子同时出现散射,其运动方向和能量发生变化,称为散射光子。若反冲电子能量比较高,它仍继续与介质相互作用直至能量耗尽。散射光子也将继续与介质相互作用。康普顿效应示意图如图 1.2 所示。

(三) 电子对效应

当光子的能量达到 50~100 MeV 时,电子对形成是光子转移自身能量给介质的主要形式,即入射光子从原子核旁经过时,在原子核库仑场作用下,入射光子可能转化为一个电子和一个正电子,这个过程称为电子对效应。所形成的正负电子继续在介质中慢化,电子成为介质中的电子,而正电子速度接近零时,将与附近的电子发生湮没作用,并释放出两个方向相反的各为 0.511 MeV 能量的光子。电子对效应示意图如图 1.3 所示。

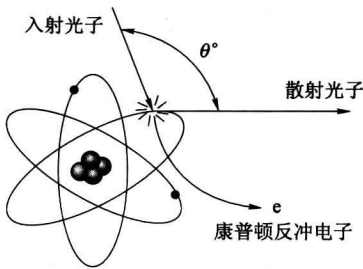


图 1.2 康普顿效应示意图

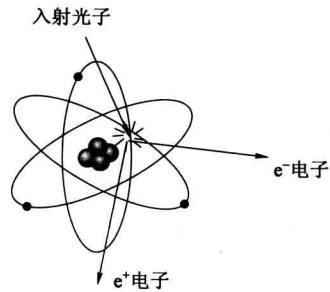


图 1.3 电子对效应示意图

二、粒子辐射

粒子辐射(particulate radiation)是一些组成物质的基本粒子,或者是剥去、部分剥去轨道电子的带正电荷的原子核,它们具有动能和静止质量。粒子辐射是通过消耗自身的动能把能量传递给介质的。粒子辐射主要有 α 粒子、 β 粒子(或电子)、质子、中子、负 π 介子和带电重离子等。

(一) α 粒子

即氦原子核,由两个质子和两个中子组成,带正电荷,其质量比电子大 7 500 倍。由于 α 粒子大,运动慢,有足够时间在短距离内引起介质中较多分子电离。随着 α 粒子在介质中运行深度增加和更多电离事件发生,能量不断被消耗,粒子运动变慢,在其径迹的末端,电离密度明显增大,形成峰值,称为布喇格峰(Bragg peak), α 粒子在空气中的布喇格峰如图 1.4 所示。

峰值后的 α 粒子,电离能力降至零,这时 α 粒子转变成中性氦原子。在生物组织中 α 粒子运行的距离比在空气中小得多,1 MeV 的 α 粒子只能运行几十微米,然后释放出全部能量,形成高电离比度的峰值区,引起组织的严重损伤。 α 粒子外照射对机体不会产生较大损伤,但发射 α 粒子的放射性核素进入体内(比如从体表破

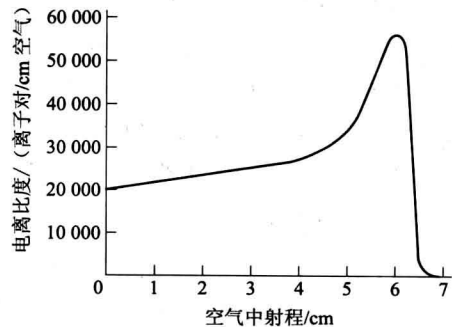


图 1.4 α 粒子在空气中的布喇格峰

损处进入体内),将对机体组织产生严重危害。

在自然界有些放射性核素衰变可产生 α 粒子,例如:铀(^{234}U 、 ^{235}U 、 ^{238}U)、镭(^{224}Ra 、 ^{226}Ra 等),氡及其子体(^{222}Rn 、 ^{218}Po 、 ^{214}Bi 等),钚(^{239}Pu 、 ^{238}Pu)等。

(二) β 粒子或电子

是带有一个最小单位负电荷的粒子,质量很小。 β 粒子在介质中容易被介质原子的轨道偏转,形成曲折的运行轨迹(径迹)。在其径迹的末端, β 粒子使介质产生高密度电离作用。

^{90}Sr 辐射源产生的 β 粒子,其能量为 0.53 MeV,在浅层(1~2 mm 的厚度)组织中产生最大的电离作用。由直线加速器产生的电子束,其能量为几到十几 MeV(高能电子),在放射治疗中可用来使深部组织产生最大的电离作用。

(三) 中子

是不带电的粒子,质量为 1.009 原子质量单位。按其所具有的能量不同,中子分为以下几种:

- 1) 热中子: 能量在 0.5 eV 以下,能与周围介质达到热平衡;
- 2) 慢中子: 能量在 100 eV 以下;
- 3) 快中子: 能量在 10 keV~10 MeV;
- 4) 高能中子: 能量大于 10 MeV。

中子与 X 射线或 γ 射线都是通过产生带电的次级粒子引起物质分子电离的,不同之处在于 X 射线或 γ 射线与核外电子发生作用,而中子只与原子核发生作用。中子与物质相互作用有两种方式:碰撞和核反应。碰撞又分为弹性碰撞和非弹性碰撞;核反应包括中子俘获反应和散裂反应。

1. 弹性碰撞(elastic collision)

入射中子将部分能量传给受碰撞的原子核,使其具有动能折向另一方向,形成所谓反冲核。同时入射中子携带剩余动能也偏离原来入射方向,并可继续与物质中其他原子核发生碰撞。所谓弹性碰撞,是指中子与靶核的总能量在碰撞前后保持不变。原子核越轻,经弹性碰撞形成的反冲核就具有越多的动能。氢反冲核(反冲质子)获得的能量最高,几乎等于入射中子的全部能量。氢是生物组织中含量最多的原子,入射中子与组织中氢原子核的相互作用,具有不可忽视的生物学意义。

2. 非弹性碰撞(nonelastic collision)

1) 中子与物质原子核碰撞后,中子的运动方向发生改变,生成一个动能较低的中子,入射中子的其余能量用于使被碰撞的核处于激发状态,随后处于激发状态的核恢复至基态,同时发射 γ 射线。由此可见,入射中子和被碰撞的原子核总能量,在碰撞前后是不相等的,碰撞后的总动能下降。组织中的氮、碳和氧原子核均能发生这样的非弹性碰撞反应。2) 中子与原子核碰撞后形成复合核,然后释放出一个次级带电粒子(如 α 粒子)。由于被碰撞的原子核(复合核)处于激发状态再恢复至基态时,释放出 γ 光子。

3. 中子俘获(neutron capture)

是指中子被原子核俘获后,原子核处于激发状态,当其由激发状态恢复至基态时,释放出 γ 光子。俘获中子的原子核发射出带有正电荷的 α 粒子。中子俘获与非弹性碰撞复合核