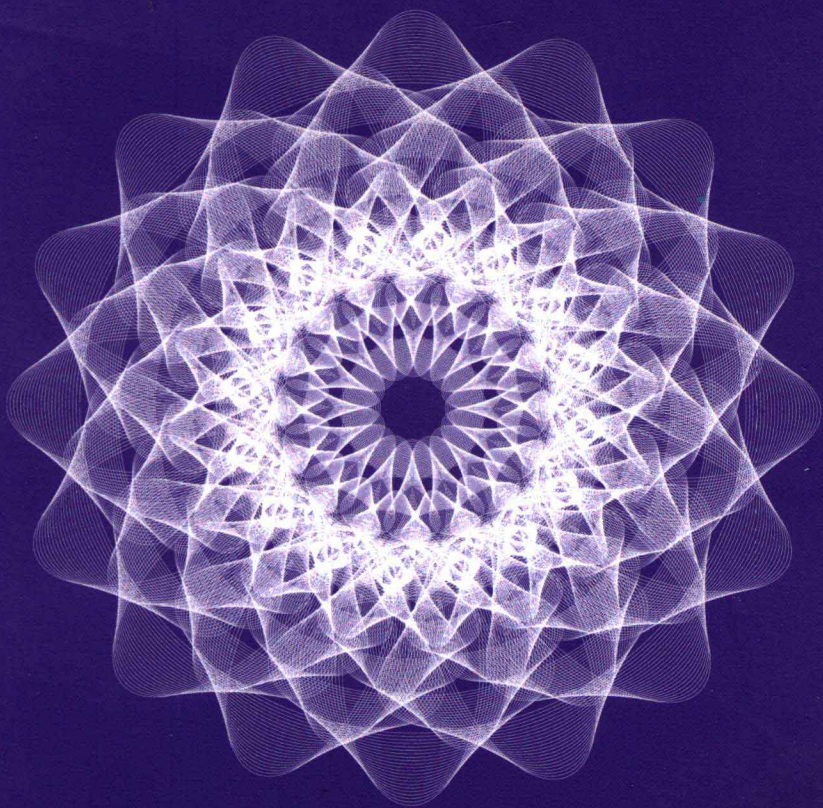


电离辐射剂量学 医学应用

主编 张梦龙 牛学才 徐金法



 军事医学科学出版社

电离辐射剂量学医学应用

主 编 张梦龙 牛学才 徐金法

军事医学科学出版社
· 北 京

图书在版编目(CIP)数据

电离辐射剂量学医学应用/张梦龙,牛学才,徐金法主编.

-北京:军事医学科学出版社,2011.9

ISBN 978-7-80245-799-7

I. ①电… II. ①张… ②牛… ③徐… III. ①电离辐射-
辐射剂量学 IV. ①R144.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第169419号

策划编辑:李 玫 责任编辑:吕连婷 责任印制:丁爱军

出版人:孙 宇

出版:军事医学科学出版社

地址:北京市海淀区太平路27号

邮.编:100850

联系电话:发行部:(010)66931049

编辑部:(010)66931127,66931039,66931038

86702759,86703183

传 真:(010)63801284

网 址:<http://www.mmisp.cn>

印 装:北京市顺义兴华印刷厂

发 行:新华书店

开 本:850mm×1168mm 1/32

印 张:9.5

字 数:228千字

版 次:2012年1月第1版

印 次:2012年1月第1次

定 价:25.00元

本社图书凡缺、损、倒、脱页者,本社发行部负责调换

内 容 提 要

本书概括了电离辐射剂量学的基本概念、原理,电离辐射测量基本方法及最新发展,介绍了电离辐射剂量学在X线诊断学、核医学、外照射治疗学、内照射治疗学、微剂量学以及辐射防护等领域的具体应用等内容。可供从事放射治疗、放射诊断、核医学等工作的医生和护士参考,也可作为从事放射医学、放射生物学、保健物理、辐射防护、放射线应用等领域的剂量工作者、研究人员和高校有关专业师生从医学角度观察电离辐射剂量学的学习用书。

《电离辐射剂量学医学应用》

编委会

主 编 张梦龙 山东省医学影像学研究所
牛学才 山东省济南市第四人民医院
徐金法 山东省聊城市人民医院

副主编 侯立霞 山东省泰山医学院
杨子峰 山东省济南市历城区人民医院
董连军 山东省聊城市传染病医院
尚东平 山东省肿瘤医院
郁海英 山东省肿瘤医院
付晓琴 山东省昌乐县人民医院

编 委 (以姓氏笔画为序)

马全海 新疆维吾尔自治区人民医院
朱海涛 山东省医学影像学研究所
孙晶星 江苏省苏州市计量测试研究所
宋善军 山东省聊城市人民医院
高 建 山东省医学影像学研究所

前 言

放射线在现代医学诊疗工作中的作用和地位越来越重要,因此,有必要对医学上用到的辐射剂量学系统化、条理化,从而为研究辐射效应的作用机制、实施辐射防护的剂量监测和评价、进行放射线医学诊断和治疗提供可靠的科学依据。

本书旨在向医务工作者和医学生介绍电离辐射剂量学在医学中的应用。全书分为十章:前三章介绍了电离辐射剂量学的基本概念、原理,力求简明,使读者在接受后面内容时便于理解。第十章介绍了电离辐射测量基本方法及最新发展。其他章节则按医院和医学院目前的学科体系分别介绍了电离辐射剂量学在X线诊断学、核医学、外照射治疗学、内照射治疗学、微剂量学以及辐射防护等领域的具体应用。编著者参阅了大量国内外相关最新文献并参考了许多相关的临床资料,使本书内容新颖而实用;在编排上思路清晰,图文表相得益彰,使读者便于理解。

本书可供从事放射治疗、放射诊断、核医学等工作的医生和护士参考,也可作为从事放射医学、放射生物学、保健物理、辐射防护、放射线应用等领域的剂量工作者、研究人员和高校有关专业师生从医学角度观察电离辐射剂量学的学习用书。

编 者

目 录

第一章 电离辐射的产生	(1)
第一节 电离辐射与非电离辐射	(1)
第二节 电离辐射的来源	(3)
第三节 医学中应用的电离辐射	(5)
第二章 电离辐射与物质的相互作用	(15)
第一节 带电粒子与物质的相互作用	(15)
第二节 X 和 γ 射线与物质的相互作用	(20)
第三节 中子与物质的相互作用	(29)
第三章 基本辐射剂量学量	(31)
第一节 辐射场性质相关量	(31)
第二节 能量转移相关量	(35)
第三节 能量吸收相关量	(37)
第四节 基本量之间的关系与区别	(39)
第四章 辐射防护及辐射监测量	(43)
第一节 辐射损伤效应	(43)
第二节 个体防护量	(48)
第三节 集体防护量	(54)
第四节 个人监测实用量	(55)
第五节 场所监测实用量	(55)

第六节	电离辐射防护标准和规范	(56)
第五章	外照射放射治疗射野剂量学	(70)
第一节	人体模型	(70)
第二节	深度剂量分布	(71)
第三节	组织-空气比(TAR)	(78)
第四节	散射-空气比(SAR)	(82)
第五节	组织最大剂量比	(83)
第六节	等剂量分布	(86)
第七节	楔形照射野	(90)
第八节	不对称准直器剂量学	(94)
第九节	人体曲面和组织不均匀性的修正	(97)
第十节	剂量计算举例	(103)
第六章	近距离治疗剂量学	(106)
第一节	近距离治疗剂量学的一般知识	(106)
第二节	AAPM TG-43 剂量学系统	(109)
第三节	近距离治疗的剂量分布测量	(115)
第四节	近距离治疗使用的放射性核素	(123)
第五节	用于临床的粒子源及其归一化数据库	(129)
第七章	诊断 X 线辐射剂量	(152)
第一节	射线产生时的曝光量选择参数	(152)
第二节	探测器相对剂量的指示参数	(157)
第三节	诊断 X 线病人受照剂量实测量	(164)
第八章	核医学内照射剂量学	(180)
第一节	放射性核素体内衰减的基本规律	(180)

目 录

第二节	内照射剂量估算基本公式	(183)
第三节	内照射剂量估算中摄入物代谢的描述	(186)
第四节	辐射事故中个人内照射剂量评价方法	(193)
第五节	核医学中个人内照射剂量学模型	(199)
第九章	微剂量学	(207)
第一节	微剂量学的研究内容和发展过程	(207)
第二节	微剂量学基本概念和常用量	(209)
第三节	测量和计算微剂量的方法	(221)
第四节	微剂量学的应用	(222)
第十章	电离辐射测量及模拟计算方法	(237)
第一节	电离辐射探测器	(237)
第二节	蒙特卡罗模拟计算	(265)
第三节	电离辐射剂量测量中的数据处理	(270)
附录	相关电离辐射术语	(275)

第一章 电离辐射的产生

第一节 电离辐射与非电离辐射

在我们生存的大自然里,辐射和阳光、空气、水同时存在,因为它无色、无味、无臭,人体无法直接感应,使得大家对于辐射有莫名的恐惧感。媒体有关辐射安全的炒作性报导,几乎使人闻辐色变。

实际上在我们生活中始终伴随有辐射,从某种意义上说,我们的生存已离不开辐射。例如,太阳中就有这类辐射,也就是人们常说的宇宙射线;土壤、岩石、水、植物、动物中也都存在放射性,这些造成了地球的本底辐射;在我们吃的食品中都含有钾-40,钾-40就有放射性。

现代医学、农业和工业已离不开核技术的应用,可以说放射性给我们现代文明作出了重要的贡献。人类自一百多年前发现辐射以来,就尝试应用辐射于许多层面,如X线照射、农产品保鲜与飞机结构检测等,这带给了我们许多方便。事实上日常生活中已经少不了辐射的应用。

我们应该深入了解辐射是什么,这样才能利用它的优点,避开它的危险性,而不再只是莫名的害怕。为了让大家能更清楚地了解,首先介绍辐射究竟是何种现象,它是如何产生的、有哪些特性以及如何与物质如人体等发生作用。

辐射,像光一样,是一种能量,如 γ 射线等的电磁波、 β 射线等的高速粒子流。通常我们按它们能量的高低或电离物质的能力,将其分成非电离辐射和电离辐射两大类。

非电离辐射:指能量低无法产生电离的辐射,如太阳光、灯光、红外线、微波、无线电波、雷达波等。

电离辐射:指能量高,能使物质产生电离作用的辐射。后面讲的辐射都是指电离辐射。按 1985 年 ICRU 39 号报告的定义,若入射辐射能量 $\leq 15 \text{ keV}$ 时,称之为弱贯穿辐射,否则为强贯穿辐射。

早在 1895 年 11 月,德国物理学教授伦琴(Roentgen)发现一种眼睛看不见但能穿透物质的射线,因不知其名,故称为 X 射线,俗称 X 光。随后不久便发现了 X 射线会使空气电离而导电。紧接着在 1896 年 2 月,法国科学家贝克勒尔(Becquerel)发现铀的化合物会发出一种不同于 X 射线,但也具有穿透能力使照相底片感光的射线,当时称它为铀放射线。他是第一位发现放射性的人。1898 年 7 月在法国巴黎,居里(Curie)夫妇两人首次自沥青铀矿中提炼出一种新元素,命名为钋(Po)以纪念居里夫人的祖国波兰。同年 12 月又成功地分离出另一新元素镭(Ra)。放射性(radioactivity)这个名词就是居里夫人所创的。同在 1898 年,威廉韦恩发现了带正电的质子,1899 年原籍新西兰的拉瑟福德(Rutherford)发现了带 2 个正电单位的 α 粒子,称为阿伐射线;还证明了带一个负电单位的贝他(β)射线就是电子。在 1900 年韦拉特(Villard)发现另一种电磁波射线,能量比 X 射线还高,命名为伽马(γ)射线。不带电的中子是最后被发现的,迟至 1932 年 2 月才由查德威克(Chadwick)发现。至此人类对原子核里面的构造,才有了较清楚的了解。

20 世纪 30 年代初期,人们已开始认识了原子的构造(图 1-1):原子的中心为原子核,内含质子和中子,体积很小但质量很大。原子核的外面有电子,像行星绕太阳一般,遵循着固定的轨道绕着原子核旋转。我们把原子核内质子数和中子数的总和称作质量数,如钴-60,记成 ^{60}Co ,它有 27 个质子和 33 个中子,其质量数为 60。

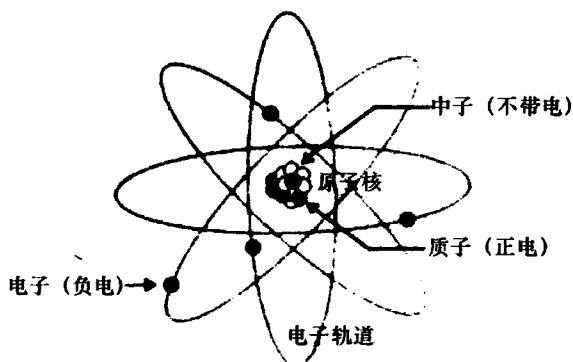


图 1-1 原子结构示意图

了解辐射前的另一重要术语是同位素 (isotope)。原子结构中的数目决定元素的名称和它的性质。若某一种元素含有不同的中子数目,则称为该元素的同位素。例如钴的同位素有五种,分别是 $^{56}_{27}\text{Co}$ 、 $^{57}_{27}\text{Co}$ 、 $^{58}_{27}\text{Co}$ 、 $^{59}_{27}\text{Co}$ 、 $^{60}_{27}\text{Co}$,这中间除了 $^{59}_{27}\text{Co}$ 是稳定同位素(无放射性)外,其余都具有放射性。这些同位素在元素周期表中具有相同的位置,因而称它们为同位素。

我们常说的放射性同位素,就是具有放射性的同位素,如氚(^3H)、碳-14(^{14}C)、钾-40(^{40}K)、钴-60(^{60}Co)、碘-125(^{125}I)、铯-137(^{137}Cs)、镭-226(^{226}Ra)、铀-238(^{238}U)等。目前已知天然存在的同位素约有330种,其中大约270种是稳定同位素,其余是不稳定的放射性同位素。

第二节 电离辐射的来源

辐射是怎么产生的呢?一般来说,辐射有以下几种来源。

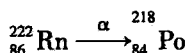
1. 来自放射性同位素 不稳定的原子核为了回复到稳定状态,必须释放出能量,以电磁波或粒子的形态射出,这就称为辐射

(俗称放射线)。

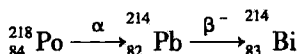
放射性同位素有两大类,即天然放射性同位素和人工放射性同位素。

按人们的需要,用人工办法产生的放射性同位素称为人工放射性同位素。 ^{60}Co 是人工放射性同位素的典型例子,它先放出一个 β 粒子转变成 ^{60}Ni ,但此时 ^{60}Ni 原子核仍很不稳定,又迅速放出两道 γ 射线,才形成稳定的 ^{60}Ni 同位素。所以,一个钴-60 原子自发地蜕变时,会放出一个 β 粒子和两道 γ 射线。

天然放射性同位素的典型例子是空气中的放射性同位素 ^{222}Rn ,它发射两个带正电荷的 α 粒子,形成 ^{218}Po :



^{218}Po 也具有放射性,会继续蜕变下去。 ^{218}Po 的整个衰变过程是:



所得到的 $^{214}_{83}\text{Bi}$ 原子,也是不稳定的,所以它还要进而发生 α 衰变和 β 衰变,直到产生稳定原子为止。

2. 来自产生辐射的设备 除放射性同位素是辐射的重要来源外,现代技术几乎可以制造出产生各种可能辐射的设备(α 、 β 、 γ 、 n 、 p 、正电子、重粒子等)。我们常遇到的有医学辐射诊断和治疗作用的设备,如 X 线到底是怎么产生的? 原来当高速运动的电子撞击重原子核时(例如钨元素)就会产生出 X 射线,在医学上的用途非常大。在火车站、海关等地我们常见到的辐射安全检查设备在这些部门起着关键性的作用。在工业探伤检测、辐照加工、核子称等工业领域,辐射设备也起着重要的作用。另外,当高能轨道的电子跳回低能轨道时,也会产生 X 射线,可应用在金属元素的定性和定量分析工作上。总之,辐射设备也是辐射的重要来源。

3. 来自核反应 如核电站、各种核反应堆、宇宙射线、核试验等。

第三节 医学中应用的电离辐射

辐射剂量学是用理论或实践的方法研究电离辐射与物质相互作用过程中能量传递的规律,并用来预言、估计和控制有关的辐射效应的学科。其研究的主要内容包括:电离辐射能量在物质中的转移、吸收规律;受照物质内的剂量分布及其与辐射场的关系;辐射剂量与有关的辐射效应的相应关系以及剂量的测量、屏蔽计算方法等。另外,辐射剂量学还为研究辐射效应的作用机制,实施辐射防护的剂量监测和评价,进行放射治疗与辐射损伤的医学诊断和治疗提供可靠的科学依据。当前,辐射剂量学已成为一个专门的技术领域,广泛应用于辐射防护、医疗、生产和科研等各个方面,其在医学上的应用主要集中在核医学、放射治疗和放射诊断等学科。

一、核医学中的辐射剂量学

核医学包括两大分支,即实验核医学和临床核医学。中国医学百科全书核医学分册中明确指出,前者主要利用核素及核射线进行生物医学的理论研究,以探索生命本质中的重大问题,加深人们对正常生理生化过程和病理过程的认识。临床核医学则主要是利用核素及核射线来诊断和治疗疾病。与它们密切相关的核药理学,主要任务是研究核素标记物和核素标记药物的制备、理化特性、分析以及它们的应用。这三门学科的发展和应用都离不开电离辐射剂量学的定量分析。国际辐射防护委员会(ICRP)和美国核医学学会医学内照射辐射剂量委员会(MIRD)等权威机构发布的相关文件中,详细介绍了放射性药物内照射剂量学模型和剂量

估算的基本方法。在后面第八章中将进行专门论述。

二、放射治疗剂量学

按照对病人实施照射的方式和技术特点,放射治疗可分为远距离治疗(teletherapy)、近距离治疗(brachytherapy)、放射性核素治疗(radionuclide therapy)以及其他特殊技术治疗,如立体定向放射治疗(stereotactic radiosurgery, SRS)、中子和重粒子治疗等。远距离治疗是放射治疗的主要方式,它是利用射线装置和密封核素源产生的外部光子和电子束对病人靶区进行照射。近距离治疗是放射治疗的第二位照射方式,它是把密封核素源置于病人自然体腔或组织间隙,对其邻近靶区进行照射。放射性核素(非密封)治疗的照射范围是人体的特殊器官或区域。SRS治疗的病灶范围很小,一般为毫米量级。由于照射方式和技术特点不同,剂量学方法和技术也各有特点。

1. 远距离治疗剂量学 远距离治疗剂量学研究的重点在以下两个方面。

(1)放射治疗剂量测量的程序 为了规范放射治疗剂量测量的程序,1984年国家计量局(现为国家质量技术监督局)和卫生部联合发布了《关于肿瘤放射治疗剂量学的若干规定》。随着辐射剂量学的发展,IAEA在1987年出版了一个放疗剂量测量的国际实用准则,即TRS 277号报告《光子和电子束吸收剂量的测定》。这个报告推荐了使用圆柱形空腔电离室测定外照射线束的方法和程序,覆盖的能量范围为100~300 keV的中能X射线、平均能量大于或等于0.66 MeV的高能光子束和5~50 MeV的高能电子束。这个实用准则已在IAEA/WHO二级标准剂量学实验室(SS-DL)和一些国家,特别是欧洲国家中应用。1992年IAEA成立了一个工作组对TRS 277号报告进行了复审,并于1997年出版了277号报告的修订本,对原报告中的某些数值资料(如中能X射线

的扰动修正 P_u 值等)进行了修正。与此同时这个任务组着手编写了一个新的剂量学实用准则《高能电子和光子束测量中平行板电离室的使用》,即1997年出版的IAEA TRS 381号报告。这个报告推荐平行板电离室用于电子束,特别是10 MeV以下电子束吸收剂量的绝对测量和光子、电子束相对剂量测量。因此,TRS381是TRS277的扩展和更新,它反映了基础放疗剂量学的新进展。在我国,虽然曾组织过关于 TRS 277 报告的培训班,但范围很小,因此实际应用的不多,特别是医院仍然在使用1984年发布的《规定》。

(2)剂量学质量保证 多年来人们已达成共识,成功的放射治疗取决于对病人靶区实施准确、一致的高剂量照射,同时尽可能减少对正常组织的照射。要达到这个目标,必须对从剂量仪的使用和校准到实施病人照射的各个环节实行剂量学质量保证(quality assurance, QA)。剂量学的QA就是为达到上述目标所进行的使所有有关程序实现标准化的一切活动。剂量学的质量控制(quality control, QC)则是对剂量学的各个环节进行实际性能测量,如偏离标准,采取必要措施使之符合标准要求。如果QC的测量是由与被核查主体完全无关的局外人完成,这种活动称质量核查(quality audit)。例如IAEA/WHO组织的国际TLD邮寄比对活动,目的是核查医院的剂量校准程序。国际上放疗剂量学QC大致分4个发展阶段(或4个水平)。

- ①第一阶段:利用简单的模体(水模或固体模)和TLD核查在参考照射条件下(例如对 ^{60}Co 机, SSD = 80 cm, 照射野 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$, 水下 5 cm 深处)对机器输出量和射束线质的校准。
- ②第二阶段:利用多用途体模(水模或固体模)和TLD或胶片剂量计核查临床剂量学基本数据,诸如参考点剂量、中心束轴深部剂量、束对称、离轴比和楔穿透等。
- ③第三阶段:利用人体剂量学方法(in vivo dosimetry)验证个体病人的某些位置处实际接受的治疗剂量值是否偏离预定的数值。所谓人体

剂量学就是把剂量计置于病人皮肤上或自然体腔内进行剂量测量的方法。目前用于人体剂量学的剂量计主要是 TLD, 二极管半导体探测器和金属氧化物场效应管 (MOSFET), 正在发展的新探测器主要是有机闪烁探测器和金刚石探测器, 它们具有更优越的剂量学性能。④第四阶段: 利用过渡剂量学 (transit dosimetry) 方法验证病人在实施照射过程中所接受的实际剂量的分布。所谓过渡剂量学就是通过对穿透病人的透射辐射的测量来测定病人实际剂量的分布。它是适形放射治疗 (conformal therapy) 中非常重要的技术。适形治疗是 20 世纪 90 年代发展起来的新的治疗方法, 要求选定的治疗剂量分布与靶体积的形状一致。过渡剂量学的关键技术是利用电子门电路成像装置 (FPID)。主要的技术方法为: 一是利用金属板磷光屏把透射光子强度转变为光影像, 然后通过一个电荷耦合照相机来观察荧光屏; 二是通过矩阵探测器 (二极管半导体探测器或有机闪烁探测器) 对透射辐射进行扫描测量; 三是利用液体矩阵电离室。过渡剂量学方法与利用半导体二极管作为探测器的人体剂量学方法相比有以下优点: 获得的是三维剂量资料而不是一个或几个剂量点; 给出进行中实时剂量学资料而不增加病人治疗时间; 探测器与病人无物理接触。我国远距离治疗剂量学的 QC 工作起始于 1983 年, 目前基本上处于国际 QC 工作的第一阶段; 第二、三阶段的技术方法国内虽已开始研究, 实际应用尚需一段时间。

2. 近距离后装治疗剂量学 近距离治疗剂量学的研究主要集中在以下三个方面。

(1) 源强的表示方法 源强的表示方法多年来几经变化: 最早是镭质量, 单位是毫克镭; 后来由于源种类增加, 变成镭当量, 单位是毫克镭当量; 由于源外壳减弱了空气比释动能率, 又使用表观活度 (apparent activity); 但两个表观活度相同的源由于包装结构不同, 可能产生不同的剂量分布, 最后 ICRU 推荐使用参考空气