

国家重点学科放射医学系列教材

全国高等院校教材,供特种医学、临床医学类专业用

江苏省优势学科(特种医学)经费资助

电离辐射剂量学基础

(第三版)

主 编 孙 亮 李士骏

中国原子能出版社

国家重点学科放射医学系列教材

全国高等院校教材，供特种医学、临床医学类专业用

江苏省优势学科（特种医学）经费资助

电离辐射剂量学基础

（第三版）

主编 孙 亮 李士骏

中国原子能出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

电离辐射剂量学基础 / 孙亮, 李士骏主编. —3 版.

—北京: 中国原子能出版社, 2014.12

ISBN 978-7-5022-6502-1

I. ①电… II. ①孙… ②李… 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(2015)第 009972 号

内 容 简 介

本教材较系统地阐述了电离辐射剂量学基本理论体系。全书共分八章,以第一章为引言,简要叙述电离辐射的定义、分类、来源及电离辐射剂量学的意义和用途。第二、三、四章集中叙述剂量学理论框架,主要包括了辐射场理论、辐射与物质相互作用理论和剂量学量。第五章到第八章介绍剂量学理论的实际应用,分别是放射防护、临床肿瘤放射治疗外照射剂量计算方法以及核医学相关的放射性药物内照射剂量估算方法。在内容选择方面注重新旧知识的衔接更新,在编排上力图兼顾理论和实践。

本教材主要面向高校放射医学专业的师生,也可供核技术应用、辐射防护及环境监测等相关专业人员参考使用。

电离辐射剂量学基础(第三版)

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

装帧设计 马世玉

责任校对 冯莲凤

责任印制 潘玉玲

印 刷 保定市中华美凯印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 16.625

字 数 415 千字

版 次 2014 年 12 月第 1 版 2014 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-6502-1 定 价 50.00 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. Röntgen)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》、《核药学教程》、《放射治疗技术学》、《放射治疗物理学》等,多次获得国家和省部级优秀教材奖,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和其他行业相关教师和专家,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,《电离辐射剂量学基础》是系列教材中的一本,其余教材将陆续出版,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。



2013.6.1

第三版前言

电离辐射,是自然环境固有的特征之一,它来自宇宙空间,也来自人类居住的地球。然而,直到19世纪,人们才开始认识电离辐射。1895年,伦琴发现了X射线。1896年,贝可勒尔发现了天然放射性。1932年查德威克发现中子,1938年哈恩发现重核裂变。20世纪40年代,随着原子核裂变反应堆、粒子加速器的先后建成,人类不仅可以利用核能,而且还能生产、应用人工的放射性同位素,世界开始步入全新的原子能时代。至今,放射源、电离辐射,已广泛应用于社会生产、医疗卫生、科学研究,为社会创造财富、给人类带来福祉,同时,也对人类和环境增加了一定的危害。

辐射效应,实质就是电离辐射引起的受照射物体性质的变化。这种变化,有的对人类有益,成为放射源、电离辐射应用的基础;有的对人类有害,需要防护,甚至需要医疗和救治。

为合理应用放射源、电离辐射,有效保护人类和环境,需要了解受照对象的“辐射剂量”。就本质而言,“辐射剂量”就是一系列反映电离辐射对受照物体诱发的真实效应、潜在影响程度的客观指标。

电离辐射剂量学,就是研究辐射效应程度的预测原理、指标、方法的一门学科。它的研究内容,主要包括:电离辐射能量在物质中转移、吸收规律,剂量分布与辐射场关系,辐射剂量与辐射效应联系以及辐射剂量的测量、计算方法。电离辐射剂量学已成为放射源、电离辐射应用、放射防护、放射医学的基础,依其应用的领域,目前已派生出一系列分支学科,如辐照加工剂量学、放射防护剂量学和放射治疗剂量学,等等。

本教材旨在:向放射医学专业的学生介绍电离辐射剂量学的基本概念以及肿瘤远距离放射治疗和核医学中剂量计算的基本方法。全书分八章:引言、电离辐射场、电离辐射能量在物质中的转移过程、基本的剂量学量、放射防护量、外照射情况下的监测量、肿瘤放射治疗中外照射剂量计算的基本方法和放射性药物内照射剂量估算的基本方法;其内容也可供相关领域的专业人员参考。

从电离辐射剂量学相关国际学术团体“国际辐射单位与测量委员会(ICRU,1925)”、“国际放射防护委员会(ICRP,1928)”问世算起,电离辐射剂量学,历史不过百年,尚属“年轻”;随着认识水平提高,辐射剂量的基本概念仍在深化和更新,辐射剂量的测量、计算技术还在发展和完善。

教材成稿,不仅注意文字简明扼要、图文相得益彰,而且内容也力求反映学科的知识更新。无疑,对于新的内容,编者也属初学,虽经着力理解,犹恐不得要领。衷心感谢清华大学工程物理系李君利教授拨冗对本教材书稿的悉心审阅和帮助。尽管如此,编者仍以不安的心情推出这本教材,意在抛砖引玉,企望专家、读者批评、斧正,赐以真知灼见,以释编者重负。

孙亮撰写了本教材第一章和第四章中微剂量学的书稿内容,并承担了本教材立项、组稿、审稿、出版的全部事宜。李士骏撰写了其中第二、三章,第四章的一、二、三节以及第五至第八章的书稿内容。

编者

2014年10月

第二版前言

电离辐射,是自然环境固有的特征之一,它来自宇宙空间,也来自人类居住的地球。然而,直到19世纪,人们才开始认识电离辐射。1895年,伦琴发现了X射线。1896年,贝可勒尔发现了天然放射性。1932年查德威克发现中子,1938年哈恩发现重核裂变。20世纪40年代,随着原子核裂变反应堆、粒子加速器的先后建成,人类不仅可以利用核能,而且还能生产、应用人工的放射性同位素,世界开始步入全新的原子能时代。至今,放射源、电离辐射,已广泛应用于社会生产、医疗卫生、科学研究,为社会创造财富、给人类带来福祉,同时,也对人类和环境附加了一定的危害。

辐射效应,实系电离辐射引起的受照射物体性质的变化。这种变化,有的对人类有益,成为电离辐射应用的基础;有的则对人类有害,需要放射防护,甚至需要医疗救治。

为合理应用放射源、电离辐射,有效地保护人类和环境,都需了解受照对象的“辐射剂量”——反映电离辐射对受照物体诱发的真实效应、潜在影响程度的客观指标。

电离辐射剂量学,就是研究辐射效应程度预测原理、指标、方法的一门学科。它的研究内容,主要包括:电离辐射能量在物质中转移、吸收规律,剂量分布与辐射场关系,辐射剂量与辐射效应联系以及辐射剂量的测量、计算方法。电离辐射剂量学已成为放射源、电离辐射应用、放射防护、放射医学的基础,依其应用的领域,目前已派生出一系列分支学科,如辐照加工剂量学、放射防护剂量学、放射治疗剂量学,等等。

本教材旨在:向放射医学专业学生介绍电离辐射剂量学的基本概念以及肿瘤远距离放射治疗和核医学中剂量计算的基本方法。全书分八章:量和单位、电离辐射场、电离辐射能量在物质中的转移过程、基本的剂量学量、放射防护量、外照射情况下的监测量、肿瘤放射治疗中外照射剂量计算的基本方法和放射性药物内照射剂量估算的基本方法;其内容也可供相关领域的专业人员参考。

从电离辐射剂量学相关国际学术团体“国际辐射单位与测量委员会(International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU, 1925)”、“国际放射防护委员会(International Commission on Radiological Protection, ICRP, 1928)”问世算起,电离辐射剂量学,历史不过百年,尚属“年轻”;随着认识水平提高,辐射剂量的基本概念仍在深化和更新,辐射剂量的测量、计算技术还在发展和完善。

教材成稿,不仅注意文字简明扼要、图文相得益彰,而且内容也力求反映学科的知识更新。无疑,对于新的内容,编者也属初学,虽经着力理解,犹恐不得要领,以致谬误迭出。编者以不安的心情推出这本教材,意在抛砖引玉,企望专家、读者批评、斧正,赐以真知灼见,以释编者重负。

编者

2008年1月

第一版前言

电离辐射的广泛应用和核能领域的迅速发展,给人类带来巨大裨益,但也伴有一定的危害,主要是电离辐射对人体健康的影响。因此,需要进行辐射防护——既保护辐射照射的个人、他们的后代以及全体人类,又允许进行那些可能产生辐射照射的必要活动。为此,必须培养熟练的专业人员从事这方面的工作。本书旨在向放射医学专业的学生系统介绍与辐射防护有关电离辐射剂量学的基本概念、常用辐射量与单位、剂量测量的基本原理和剂量的计算方法。

电离辐射剂量,实质是电离辐射与物质相互作用的物理量度。电离辐射剂量学,主要研究电离辐射的能量在物质中的转移、吸收规律;受照射物质内的剂量分布及其与辐射场的关系;辐射剂量与有关辐射效应之间的联系以及辐射剂量的测量、计算方法等。它们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,进行放射治疗和人体辐射损伤的医学诊断和治疗提供可靠的科学依据。

然而,电离辐射剂量学还是一门比较年轻的学科,至今仍在不断发展和深化。20世纪五十年代末崛起的微剂量学,把电离辐射剂量学的研究推向细胞、分子水平,为探索辐射的作用机制开辟了新的途径,它的某些研究成果已直接在辐射防护和放射治疗的实践中得到应用。对微剂量学的若干基本概念,本书也扼要作了介绍,用小号字排印,供读者深入研究时参考。

全书承蒙史元明同志悉心审校,且从素材搜集直至最后定稿,始终得到他富有建设性的指教和极其有力的帮助,谨此表示由衷的感谢。

由于本书取材较新,编者水平有限,书中缺点错误定然不少,恳请各界专家和读者不吝指正。

编者
1985年6月

目 录

第一章 引 言

| | |
|-----------------------|---|
| 一、电离辐射的定义和分类 | 1 |
| 二、电离辐射的来源 | 2 |
| (一) 天然辐射源 | 3 |
| (二) 人工辐射源 | 4 |
| 三、电离辐射剂量学的意义和用途 | 4 |
| 四、一些预备知识 | 5 |
| (一) 放射性及放射性衰变 | 5 |
| (二) 辐射能量的表达和能谱 | 6 |
| (三) 简单几何 | 7 |
| 思考题 | 7 |

第二章 电离辐射场

| | |
|---------------------|----|
| 一、粒子注量、能量注量 | 8 |
| 二、粒子注量率、能量注量率 | 9 |
| 三、粒子辐射度、能量辐射度 | 10 |
| 四、谱分布 | 11 |
| 五、平均值 | 13 |
| 思考题 | 15 |

第三章 电离辐射能量在物质中的转移过程

| | |
|---|----|
| 一、带电粒子能量在物质中的转移 | 17 |
| (一) 阻止本领 | 18 |
| (二) 传能线密度 | 22 |
| (三) 电子在干燥空气中每产生一个离子对所需消耗的平均能量 W_a | 24 |

| | |
|------------------------------------|----|
| 二、X、 γ 射线的光子能量在物质中的转移 | 24 |
| (一) 衰减系数 | 25 |
| (二) 能量转移系数 | 27 |
| (三) 能量吸收系数 | 28 |
| 三、中子能量在物质中的转移 | 30 |
| 思考题 | 31 |

第四章 基本的剂量学量

| | |
|---------------------------------|----|
| 一、物质中电离辐射能量的递减过程 | 33 |
| 二、与能量转移关联的剂量学量 | 35 |
| (一) 比释动能 K | 35 |
| (二) 比转换能 C | 43 |
| (三) 受约束的比转换能 C_{Δ} | 44 |
| 三、与能量吸收关联的剂量学量 | 46 |
| (一) 吸收剂量 | 46 |
| (二) 辐射平衡 | 48 |
| (三) 吸收剂量的比释动能近似 | 52 |
| (四) 吸收剂量的比转换能近似 | 56 |
| (五) 吸收剂量的受约束的比转换能近似 | 58 |
| 四、微剂量学和微剂量学量 | 61 |
| (一) 微剂量学研究对象 | 61 |
| (二) 辐射径迹结构 | 62 |
| (三) 微剂量学量 | 64 |
| 思考题 | 66 |

第五章 放射防护量

| | |
|-------------------------------------|----|
| 一、电离辐射对人体健康的有害效应 | 69 |
| (一) 确定性效应的量-效关系 | 69 |
| (二) 随机性效应的量-效关系 | 71 |
| 二、器官剂量 D_T | 72 |
| 三、当量剂量 H_T | 73 |
| 四、有效剂量 E | 75 |
| 五、待积量 $H_T(\tau)$ 和 $E(\tau)$ | 78 |

| | |
|---|----|
| 六、集体量 S_T 和 S_E | 79 |
| 七、剂量负担 $H_{c,T}$ 和 E_c | 80 |
| (一) 器官当量剂量负担 $H_{c,T}$ 、有效剂量负担 E_c | 80 |
| (二) 截尾的器官当量剂量负担 $H_{c,T}(\tau)$ 、截尾的有效剂量负担 $E_c(\tau)$ | 80 |
| (三) 单位实践的截尾当量剂量负担 $h_{c,T}(\tau)$ 、截尾有效剂量负担 $e_c(\tau)$ | 81 |
| 思考题 | 82 |

第六章 外照射情况下的监测量

| | |
|----------------------------------|----|
| 一、辐射监测仪的响应 | 84 |
| 二、强贯穿辐射和弱贯穿辐射 | 85 |
| (一) 放射防护原则和个人剂量限值 | 85 |
| (二) 弱贯穿辐射、强贯穿辐射的界定 | 85 |
| 三、品质因子 Q 和剂量当量 H | 86 |
| (一) 品质因子 Q | 86 |
| (二) 剂量当量 H | 87 |
| 四、扩展场和齐向扩展场 | 87 |
| 五、用于场所监测的实用量 | 88 |
| (一) ICRU 球 | 88 |
| (二) 周围剂量当量 $H^*(d)$ | 89 |
| (三) 定向剂量当量 $H'(d, \Omega)$ | 91 |
| 六、用于个人监测的实用量 | 93 |
| 思考题 | 97 |

第七章 肿瘤放射治疗中外照射 剂量计算的基本方法

| | |
|-----------------------------------|-----|
| 一、辐射场 | 98 |
| 二、辐射源 | 99 |
| (一) X 辐射源 | 99 |
| (二) γ 辐射源 | 103 |
| 三、X、 γ 辐射人体组织吸收剂量的计算 | 110 |
| (一) 发散射线束参考点上的吸收剂量 | 111 |
| (二) 发散射线束垂直入射时的深部剂量参数 | 113 |

| | |
|-------------------------------|-----|
| (三) 发散射线束垂直入射时人体组织剂量的计算 | 127 |
| 思考题 | 129 |

第八章 放射性药物内照射 剂量估算的基本方法

| | |
|--|-----|
| 一、摄入物质体内滞留的描述方法 | 131 |
| (一) 隔室 | 131 |
| (二) 隔室模型 | 132 |
| 二、摄入物质体内转移的描述方法 | 133 |
| 三、参考人 | 137 |
| 四、内照射剂量估算的基本公式 | 138 |
| 五、内照射剂量估算中用到的一些剂量学模型 | 141 |
| 六、核医学诊断检查中放射性药物的指导水平 | 146 |
| 思考题 | 147 |
| | |
| 附录 1 电离辐射与物质的相互作用系数值 | 148 |
| 附录 2 各种照射条件下,宽束单能光子、宽束单能中子的成人器官剂量 ... | 184 |
| 附录 3 深部剂量参数表 | 195 |
| 附录 4 对于成年参考人锝-99m(^{99m} Tc)的 $S(T \leftarrow S)$ 值 | 240 |
| 附录 5 放射性药物单位给药量对应的有效剂量 E 和受照最甚的器官或 组织 | 245 |
| 附录 6 成年患者核医学诊断中放射性活度的指导水平 | 252 |

第一章 引言

人类生存的地球甚至整个宇宙都是一个充满电离辐射的环境。无论从形式还是本质上说,电离辐射都是能量的一种客观表达。当前,电离辐射在人类生活和生产过程中的应用越发广泛。电离辐射的应用既能给人类带来利益,又可能在应用过程中对人体造成健康危害。究其原因,电离辐射能量的传播和沉积是根本性影响因素。而辐射能量的传播、沉积规律与辐射类型及性质密切相关。于是,出于趋利避害的实际需求,需要了解:① 电离辐射的定义、分类、基本性质和电离辐射的来源;② 电离辐射剂量学这一学科的意义、用途及一些预备的知识。

一、电离辐射的定义和分类

辐射(radiation)是以波或粒子的形式传递的能量。辐射一经发出,其能量可能被周围物质所吸收。

依据兴趣点的不同,辐射有多种分类方法。如按照其来源,辐射可以分为宇宙射线和地球辐射,也可分为天然辐射和人工辐射。按照其荷电情况可以分为带电辐射和不带电辐射。但更令人感兴趣的是依据其能量大小进行分类,即依据能否引发物质原子电离(ionization),把辐射分为电离辐射(ionizing radiation)和非电离辐射(non-ionizing radiation)。

物质的基本组成单元是原子(atom)。从物理学角度来看,辐射对物质的照射其实就是对原子的照射。原子的基本结构是原子核和核外电子。所谓电离,是指的这么一个过程:辐射能量授予原子,使得核外电子克服原子核束缚,从而得以释放。如果在辐射能量授予过程中电子不能摆脱原子核的束缚,只能使原子从低能级跃迁到高能级,则称之为激发(excitation)。电离、激发过程的发生均意味着物质实实在在地接受了辐射能量。

显然,辐射在物质中是否产生电离与其能量大小密切相关(大于等于结合能)。因此,电离辐射就是能引起物质原子发生电离的一切辐射。而非电离辐射指那些能量不够高,不能引发物质原子电离的辐射。在电离辐射剂量学领域,常用辐射来简代电离辐射。

人们日常生活中经常接触的紫外线、红外线、可见光、无线电波和微波等都属于非电离辐射范畴。而辐射应用中常见的 X 射线、 γ 射线、中子、 α 粒子、 β 射线、质子和电子等则属于电离辐射。图 1.1 示出了常见的电磁波频谱图,有助于了解波长或频率与电离能力之间的关系。

电离辐射依其是否荷电可分为带电辐射和不带电辐射。电荷特性对于电离辐射能量在物质中传递和沉积过程而言十分重要。一般来说,受照物质可以看成是一个复杂电场的综合

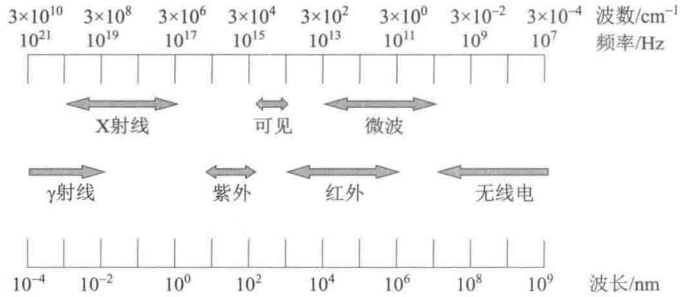


图 1.1 常见的电磁波频谱图

体,那么电离辐射的电性将显著影响其在物质中的行为方式和规律。表 1.1 列出了常见带电辐射的基本性质。

表 1.1 常见带电辐射的基本性质

| 名称 | 电荷/e | 质量/u | M_0c^2/MeV | M/M_p | 平均寿命 |
|--------------------|---------|----------|---------------------|---------|-------------------|
| 电子, e^\pm | ± 1 | 0.000 55 | 0.511 07 | 0.000 5 | 稳定 |
| μ 子, μ^\pm | ± 1 | 0.113 43 | 105.659 | 0.112 6 | 2.2 μs |
| 质子, P | +1 | 1.007 28 | 938.256 | 1.000 0 | 稳定 |
| 氦核, α | +2 | 4.001 51 | 3 727.32 | 3.972 6 | 稳定 |

常见的不带电辐射,如 X 射线、 γ 射线和中子等,由于其不带电,很少受到电场的直接影响,因此在物质中穿行时其行为、能量传递和沉积方式与带电辐射之间有着较大差异。常见不带电辐射的性质如表 1.2 所示。

表 1.2 常见不带电辐射的性质

| 名称 | 电荷/e | 能量性质 | 来源 | 质量/u | 平均寿命 |
|-------------|------|------|-------|---------|----------|
| X 射线 | 0 | 波 | 相互作用 | — | — |
| γ 射线 | 0 | 波 | 放射性衰变 | — | — |
| 中子, n | 0 | 粒子 | 相互作用 | 1.086 7 | 881.5 s* |

注: * 代表自由中子。

就电离产生的来源而言,主要有三个方面:① 足够动能的带电粒子直接产生,称为直接电离;② 不带电粒子虽亦可直接产生电离,但其主要是通过先在物质中产生次级带电粒子并转移一部分能量给予这些带电粒子,而后这些次级带电粒子在物质中产生电离。这种形式称为间接电离;③ 动能不足的带电粒子已不能直接产生电离,但可通过诱发核与粒子的转变,即质量能转换成动能,从而获得足够能量引发电离。这种电离过程的后果往往是入射粒子的消亡。

二、电离辐射的来源

从人类生活的环境来说,电离辐射的来源有两个,分别是天然辐射源和人工辐射源。前

者来自于宇宙空间和地壳物质中;后者来自一些人类的活动、实践或辐射事件。以下分别进行简单介绍。

(一) 天然辐射源

天然辐射源包括来自大气层外的宇宙辐射和来自地壳物质中存在的天然放射性核素产生的陆地辐射。在天然放射性核素中,有些核素半衰期的长度可以与地球的年龄相比,加上宇宙辐射持续射向地球表面,所以人类时刻在接受着天然辐射源的照射。天然辐射源对地球上人类的辐射照射,称为天然本底照射。

1. 宇宙辐射

宇宙空间(对地球而言主要是银河系和太阳)存在着许多高能粒子,称为初级宇宙射线,其成分主要是质子(约 88%)、 α 粒子(约 11%)、重核(约 1%)和电子(约 2%)。初级宇宙射线进入地球大气层与其中的原子核相互作用产生级联效应或次级反应,从而形成次级宇宙射线。初级宇宙射线与大气层中的某些原子核相互作用生成的放射性核素,称为宇生放射性核素。

入射到地球大气层中的宇宙高能粒子与大气中的原子或分子相互作用产生的带电的和不带电的次级粒子,包括质子、中子、 π 介子和一些低原子序数的原子核。这些次级粒子在大气层中再与某些原子或分子发生核子级联反应,生成更多的核子,称为宇宙射线簇射(见图 1.2)。

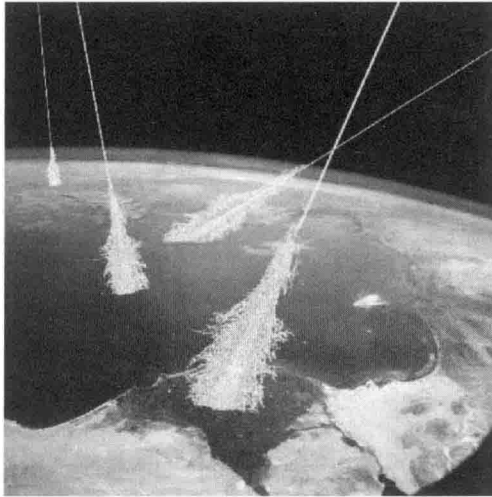


图 1.2 宇宙射线簇射示意图

2. 陆地辐射

地球上各种环境介质(土壤、岩石、水和空气等)和生物体内或多或少都存在天然放射性核素。主要的天然放射性系列如表 1.3 所示。

表 1.3 主要的天然放射性系列

| 名称 | 母核素 | 半衰期/a | 终结核(稳定) | 系列内核素数目 |
|----|-------------------|-----------------------|-------------------|---------|
| 铀系 | ^{238}U | 4.49×10^9 | ^{206}Pb | 19 |
| 钍系 | ^{232}Th | 1.41×10^{10} | ^{208}Pb | 17 |
| 锕系 | ^{235}U | 7.13×10^8 | ^{207}Pb | 12 |

(二) 人工辐射源

人类为各种目的通过各种方式制造出来的辐射源称为人工辐射源。人工辐射产生的渠道主要包括:

- 1) 核的军事应用——核武器研发;
- 2) 核能生产——核裂变能和核聚变能的生产与核素排放;
- 3) 放射性同位素生产和应用——人工放射性核素;
- 4) 反应堆研究——实用技术研究和理论研究;
- 5) 医用辐射照射——放射影像诊断和放射治疗;
- 6) 核事故——异常排放和异常照射。

三、电离辐射剂量学的意义和用途

随着贝克勒尔发现天然放射性和伦琴发现 X 射线,电离辐射作为一个可以给人类带来利益的工具,其应用越发广泛,如辐照灭菌、材料改性、环保去污和放射治疗等。人类在利用电离辐射的过程中逐渐发现无论从利益最大化还是危害防护的角度而言均面临同样一个问题:如何有效定量辐射效应?

所谓辐射效应(radiation effects)是指辐射能量沉积所致物质性质的改变。物质性质包括物质的物理性质、化学性质甚至生物学性质等。显然,辐射效应具有“利、害”两面性。例如,放射治疗这一实践过程就是利用射线照射患者肿瘤部位,将辐射能量沉积于肿瘤细胞,从而导致肿瘤细胞的生长受到抑制,发生凋亡乃至死亡,这是人们期望的辐射效应。但同时,在治疗过程中辐射能量也会对患者正常组织或器官造成损害,这是人们不希望发生的辐射效应。因此,放射治疗其实就是一个通过各项措施保证需要受照的部位充分受照,正常组织尽可能少受照的辐射应用实践过程。那么,从某种程度上可以说,人类对辐射的应用水平取决于对辐射效应的认识程度。

受照物质发生辐射效应的先决条件是辐射能量在物质中的沉积,因此辐射沉积能量的定量对于了解辐射效应而言十分关键。而辐射能量究竟有多少沉积在物质中取决于辐射的类型、所携能量、受照物质的基本特性以及照射条件(时间、距离、方式等)。于是,从数学上,辐射沉积能量可以看成上述多个因素作用下的函数。出于辐射应用的实践目的,十分需要确定这个函数的形式、各因素的影响程度及相应的定量关系。这种实践上的迫切要求成为电离辐射剂量学这一学科产生和发展的原始动力。

所谓剂量,其实是将辐射能量沉积特点(客观实际)与人们关心的辐射效应联系在一起桥梁和媒介。辐射能量沉积特点包括能量沉积的数量、速率、位置和方式等重要信息,人们在辐射应用实践中往往通过这些信息和“剂量”来推测感兴趣的效应。因此,剂量也被认为是反映电离辐射对受照物体诱发的真实效应或潜在影响程度的客观指标。

电离辐射剂量学,就是研究辐射效应程度预测原理、指标、方法的一门学科。它的研究内容,主要包括:电离辐射能量在物质中转移、吸收规律,剂量分布与辐射场关系,辐射剂量与辐射效应联系以及辐射剂量的测量、计算方法。电离辐射剂量学已成为辐射应用领域的

重要基础学科,其原理和基本方法在电离辐射工、农业应用、电离辐射医学应用、放射防护和放射医学科学研究等领域使用颇广。

从理论框架来看,电离辐射剂量学主要包含辐射场理论、辐射与物质相互作用理论和辐射效应量度理论等。这些理论之间联系紧密,数学手段和物理认识贯穿其中。基于这些基本理论,结合具体应用实践过程,电离辐射剂量学目前已派生出一系列分支学科,如辐照加工剂量学、放射防护剂量学和放射治疗剂量学等。

电离辐射剂量学是一门年轻的学科,从相关国际学术团体“国际辐射单位与测量委员会(International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU, 1925)”、“国际放射防护委员会(International Commission on Radiological Protection, ICRP, 1928)”问世算起,电离辐射剂量学的历史不过百年。随着认识水平提高,辐射剂量的基本概念仍在深化和更新,辐射剂量的测量、计算技术还在发展和完善。

四、一些预备知识

前已述及,电离辐射剂量学是一门综合了物理学、数学、统计学乃至生物学的交叉性学科,在当前的实践过程中与计算机科学的联系越发紧密。因此,在讲授基本理论之前,做一些预备知识的铺垫和回顾是必要的。

(一) 放射性及放射性衰变

不稳定核素自发地放出射线,转变为另一种核素,这种现象称为放射性,这个过程称为放射性衰变,这些核素称为放射性核素。放射性衰变是放射性核素的固有特性,该特性不受外部条件(温度、压力、化合物形态等)的影响。放射性核素衰变发出的射线种类可能有 α 射线、 β 射线、 γ 射线,还可能有正电子、质子、中子等其他粒子。发生衰变前的核称为母核,发生衰变后的核称为子核,衰变过程中释放的能量称为衰变能。

1. 放射性活度

放射性活度, $A(t)$, 是专门用于表示放射性物质的量,其含义是 t 时刻单位时间内放射性核素发生的核衰变数, $1/s$ 。活度的 SI 单位是贝克勒尔(Bq),常用单位为 MBq、GBq 和 TBq。在此之前,放射性活度的单位是居里(Ci)。这些单位之间的关系可为:

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq} = 3.7 \times 10^4 \text{ MBq} = 3.7 \times 10^1 \text{ GBq} = 3.7 \times 10^{-2} \text{ TBq} \quad (1.1)$$

2. 物理衰变常数

物理衰变常数 λ , 表示单位时间内发生核衰变的放射性原子核的份额, $1/s$ 。 λ 依据核素种类的不同而变化,其实际是表示放射性核素衰变速率的一个常数。 λ 越大则表示核素衰变的越快。

3. 物理半衰期

物理半衰期, $T_{1/2}$, 表示放射性原子核的数目衰减到原来的一半所需要的时间, s 。其与物理衰变常数 λ 之间有简单关系:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (1.2)$$