

全国卫生院校高职高专教学改革实验教材

放射物理与防护

(医学影像技术专业用)

主编 余建明



全国卫生院校高职高专教学改革实验教材

放射物理与防护

(医学影像技术专业用)

主编 余建明

编委 (以姓氏拼音为序)

国志义 吉林大学

胡军武 华中科技大学

刘东华 新乡医学院

刘广月 南京大学

余建明 华中科技大学

郁 鹏 首都医科大学

张 平 云南省第一人民医院

高等教育出版社

内 容 提 要

本书系统地论述了放射物理的基本理论,对物质的基本结构及特性、电离辐射及与物质的相互作用、X射线的产生及特性、射线的穿透及衰减、放射性核素的产生及衰变、放射性药物及使用、辐射剂量及其测量、电离辐射对人体的损伤及机理、放射防护的法规标准和原则、放射性装置和放射性物质的卫生管理、放射工作管理和放射事故管理以及放射防护培训等作了全面的阐述。

本书所述内容具有理论性、科学性、先进性和实用性,把握了高职高专这个学制及层次的特点,结合临床实际应用的需要,对放射物理、放射毒理和放射防护的机理进行了深入浅出的叙述。

此书主要用于高职高专医学影像技术专业 and 医学生物工程专业的学生,也适用于放射科、放疗科和核医学科的工作人员参阅。

图书在版编目(CIP)数据

放射物理与防护/余建明主编. —北京:高等教育出版社,2005.11

医学影像技术专业用

ISBN 7-04-017961-X

I. 放... II. 余... III. ①放射医学:物理学-高等学校:技术学校-教材②放射医学-辐射防护-高等学校:技术学校-教材 IV. ①R811.1②R142

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第129934号

策划编辑 秦致中 责任编辑 奚静平 封面设计 王 隼 责任绘图 吴文信
版式设计 胡志萍 责任校对 康晓燕 责任印制 陈伟光

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100011
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京市白帆印务有限公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 16.25
字 数 390 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2005年11月第1版
印 次 2005年11月第1次印刷
定 价 25.50元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究
物料号 17961-00

前 言

本教材是医学影像技术专业的专业基础课之一,其内容是后续专业课的必要基础。教材内容涉及物质的基本结构及其性质、电磁辐射与粒子辐射、辐射与物质的相互作用、X射线(X射线惯称X线,本书中均称X射线。)的产生及其特性、放射性核素及衰变、放射性药物特性、辐射剂量及其测量、辐射对人体的损伤及其机理、放射防护的法规、标准和原则、放射卫生管理与工作管理等。

本教材具有理论性、科学性、先进性和实用性。教材内容以专业课的需求和临床的要求为准则进行取舍,紧跟医学影像技术的发展,力争体现本专业的新知识、新技术、新方法、新概念和新法规。内容循序渐进,深入浅出,体现高职高专教材对基本知识和基本理论必需、够用的原则。通过本教材的学习,掌握放射物理学、核医学、放射剂学、放射毒理学和放射防护学的基本理论知识,使之成为具有必要的理论知识和一定实践技能的实用型技术人才。

本教材共十五章。第一章物质结构及其性质,第三章电离辐射与物质相互作用,第四章X射线的产生及特性,第六章中的第六节放射性核素示踪技术由余建明老师编写;第二章电磁辐射与粒子辐射,第五章X(或 γ)射线在物质中的衰减由郁鹏老师编写;第六章放射性核素,第七章放射性药物由胡军武老师编写;第八章辐射量及其单位,第九章辐射剂量由刘东华老师编写;第十章电离辐射对人体的危害由张平老师编写;第十一章放射防护法则与标准,第十二章放射防护的基本原则和措施,第十三章医用放射线的防护由刘广月老师编写;第十四章放射卫生管理,第十五章放射工作管理由国志义老师编写。

建议本教材理论教学为50学时,实践教学为4学时,各校可根据实际情况作适当调整。

在本教材的编写过程中,得到了多位专家的指导和同行的帮助,特别是华中科技大学医学影像系系主任冯敢生教授的具体指导,在文字的打印、编排上得到了华中科技大学同济医学院附属协和医院放射科教研室戴文老师的大力协助,在此一并表示衷心地感谢。

本教材由于编写时间短,内容涉及的专业知识面广,书中难免存在缺点和不足,恳请使用本教材的教师、学生和从事本专业的同仁批评指正。

余建明

2005年07月22日

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010) 58581897/58581896/58581879

传 真：(010) 82086060

E - mail：dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编：100011

购书请拨打电话：(010)58581118

目 录

第一章 物质结构及其性质	1	第三节 X(或 γ)射线与物质的相互 作用	24
第一节 原子核及核外结构	1	一、光子与物质相互作用系数	25
一、原子	1	二、光电效应	27
二、原子核	1	三、康普顿效应	29
三、核外结构	1	四、电子对效应	32
第二节 原子能级	4	五、光子与物质相互作用的其他过程	32
第三节 能量和辐射	5	六、各种作用发生的相对概率	33
一、概述	5	第四章 X射线的产生及特性	35
二、能量	5	第一节 X射线的产生	35
三、辐射	8	一、X射线产生的条件	35
四、电磁波谱	10	二、X射线产生的过程	37
第四节 能量放射	11	第二节 X射线发生系统及其特性	37
第二章 电磁辐射与粒子辐射	12	一、X射线管	37
第一节 辐射的种类	12	二、X射线发生器及控制	43
一、天然辐射和人工辐射	12	第三节 X射线的辐射谱线	47
二、非电离辐射及电离辐射	13	一、韧致放射(连续放射)	48
三、电磁辐射和粒子辐射	13	二、标识放射(特征放射)	49
第二节 电磁辐射	14	三、影响X射线辐射谱线的因素	51
第三节 粒子辐射	16	第四节 辐射的穿透作用	51
一、带电粒子	17	一、概述	51
二、高能电子	17	二、光子的射程	52
三、中子	18	三、半价层	52
四、 π 介子	18	四、X射线束的质量	53
五、重离子	18	五、滤过作用	53
第三章 电离辐射与物质的相互作用	20	六、散射的穿透作用	54
第一节 带电粒子与物质的相互 作用	20	七、穿透	54
一、带电粒子与物质相互作用的主要 方式	20	第五节 X射线的质与量	55
二、总质量阻止本领	22	一、X射线波长与管电压	55
三、质量角散射本领	22	二、X射线的质	55
四、射程	22	三、X射线的量	56
五、比电离	23	第六节 X射线强度的空间分布	57
六、传能线密度	23	一、概述	57
第二节 中子与物质的相互作用	24	二、分布特点——阳极效应	57
		三、分布曲线	57

四、分布曲线的应用	58	三、发生器生产	82
第七节 X射线的本质	58	第五节 放射性核素发生器	83
一、X射线的微粒性	59	一、基本特性	83
二、X射线的波动性	59	二、放射性核素发生器的展望	88
三、X射线的二象性及其统一	60	第六节 放射性核素示踪技术	89
第八节 X射线的特性	60	一、基本概念	89
一、物理效应	60	二、基本原理及基本方法	90
二、化学效应	61	三、放射性核素功能检查	91
三、生物效应	61	四、放射性核素显像技术	92
第五章 X(或 γ)射线在物质中的衰减	62	第七章 放射性药物	97
第一节 射线的衰减	62	第一节 基本概念	97
一、距离的衰减	62	一、放射性药物	97
二、物质吸收的衰减	62	二、“药物”和“药品”	97
三、影响衰减的因素	63	三、放射源	98
四、物质的X射线衰减规律	64	四、封闭源	98
第二节 单能射线在物质中的衰减	66	五、非封闭源	98
第三节 连续射线在物质中的衰减	68	六、载体	98
一、连续射线在物质中的衰减	68	七、放射性浓度	98
二、X射线的滤过	70	第二节 诊断用放射性药物	98
第四节 人体对X射线的衰减	70	一、 ^{99m}Tc 标记放射性药物	98
一、人体的构成元素和组织密度	70	二、其他放射性核素标记药物	104
二、人体对X射线的衰减	71	第三节 治疗用放射性药物	105
第六章 放射性核素	75	一、放射性碘化钠 [^{131}I] 制剂	106
第一节 放射性核素的概念与分类	75	二、 ^{131}I -碘油	106
一、核素与同位素	75	三、碘 [^{131}I] 间碘苄基胍注射液	106
二、放射性核素的选择	75	四、放射性磷 [^{32}P] 制剂	106
三、几个重要参数	76	五、磷 [^{32}P] 玻璃微球	106
四、稳定性核素与放射性核素	76	六、 ^{153}Sm -EDTMP 和 ^{186}Re -HEDP	106
第二节 放射性核素的衰变	77	第四节 放射性药物标记方法	107
一、质量亏损与衰变能	77	一、标记方法分类	107
二、衰变方式	77	二、放射性药物标记制备考虑的因素	108
第三节 放射性核素的衰变规律	79	第五节 放射性药物质量控制	109
一、衰变规律	79	一、物理化学检验	109
二、半衰期	79	二、生物学检验	110
三、放射性活度	80	第六节 放射性药房	111
四、放射性比活度	80	一、放射性药房及其基本任务	111
五、连续衰变	81	二、放射性药房分级和放射性药物分类	113
第四节 医用放射性核素的来源	82	第八章 辐射量及其单位	114
一、核反应堆生产	82	第一节 描述辐射性质的量	114
二、加速器生产	82	一、粒子注量	114

二、能量注量	115	第二节 电离辐射对生物体的作用	
三、能量注量和粒子注量的关系	116	原理	144
第二节 放射性活度及其单位	116	一、概述	144
第三节 照射量及其单位	117	二、原发作用	144
一、照射量及其单位	117	三、继发作用	147
二、照射量率 \dot{X} 及其单位	117	第三节 影响电离辐射致生物效应	
第四节 吸收剂量及其单位	118	的因素	148
一、吸收剂量及其单位	118	一、电离辐射致生物效应的分类	148
二、吸收剂量率及其单位	118	二、影响辐射致生物效应的因素	149
三、吸收剂量与照射量的关系	119	第四节 外照射急性放射病	153
第五节 比释动能及其单位	121	一、病因	153
一、比释动能及其单位	121	二、分类及临床表现	154
二、比释动能率及其单位	121	三、诊断	157
三、吸收剂量、比释动能及照射量之间的		四、预防和治疗的处理原则	158
关系	122	第五节 内照射放射病	158
第六节 辐射防护中应用量及其		一、病因	159
单位	124	二、放射性核素侵入途径和代谢	159
一、当量剂量	124	三、内照射放射病的主要特点	160
二、有效剂量	126	四、临床表现和诊断标准	160
三、集体当量剂量和集体有效剂量	128	五、治疗处理原则	161
四、待积当量剂量和待积有效剂量	129	第六节 小剂量外照射生物效应与	
第九章 辐射剂量测量	130	慢性放射病	161
第一节 电离室测量	130	一、小剂量外照射生物效应	161
一、自由空气电离室	130	二、外照射慢性放射病	162
二、实用型电离室	131	第七节 放射性皮肤损伤	164
三、电离电荷测量	132	一、急性放射性皮肤损伤	165
四、电离室工作特性	133	二、慢性放射性皮肤损伤	167
五、吸收剂量的校准	134	三、放射性皮肤癌	168
第二节 热释光剂量仪测量	136	第八节 电离辐射的远后效应	168
第三节 量热法测量	137	一、致癌效应	168
第四节 半导体剂量仪与胶片剂量仪		二、放射性白内障	170
测量	138	三、永久不育	171
一、半导体剂量仪	138	四、胎内受照效应	171
二、胶片剂量仪	140	五、遗传效应	172
第五节 射线质测量	140	第十一章 放射防护法规与标准	173
一、400 kV 以下 X 射线质的测量	141	第一节 放射防护法规	173
二、高能 X 射线能量的测定	141	一、我国放射防护法规的建立与发展	173
三、高能电子束能量的测定	142	二、我国现行放射防护法规	173
第十章 电离辐射对人体的危害	143	三、《放射防护条例》的实施	174
第一节 概述	143	四、《放射工作卫生防护管理办法》	175

第二节 放射防护标准	176	三、医用电子直线加速器的防护	211
一、放射防护标准的概念	176	四、近距离治疗中的防护	213
二、放射防护标准国内外发展简介	176	五、医用 γ 射线远距离治疗中的防护	214
第三节 我国现行放射防护标准	177	六、放射治疗中对患者的防护	216
一、放射防护的目的和基本原则	177	第十四章 放射卫生管理	217
二、随机性效应和非随机性效应	178	第一节 放射装置的放射卫生管理	217
三、基本限值	178	一、射线装置的分类	217
第四节 ICRP 关于放射防护标准		二、射线装置的放射卫生管理内容	217
的新建议	180	三、射线装置放射卫生管理依据	222
一、辐射危险概率的估计	180	第二节 放射性物质管理	222
二、辐射防护中应用的量	182	一、概述	222
三、放射防护体系	182	二、密封型预防性放射卫生防护管理	223
第五节 国际辐射防护基本安全		三、非密封源放射工作场所的设计要求	224
标准	182	四、预防性监督管理的基本程序	226
一、BSS 的基本原则和内容	183	五、经常性卫生监督的一般要求	227
二、BSS 的一些主要定量	183	六、密封型放射源工作的卫生监督管理	
三、研制我国统一的辐射防护标准	184	内容	228
第十二章 放射防护的准则	185	七、非密封型放射源的监督管理	230
第一节 放射防护的基本原则	185	第三节 放射性废物管理	232
一、放射防护的目的	185	一、放射性废物的来源	232
二、放射防护的基本原则	185	二、放射性废物的分类	232
三、剂量限值	185	三、放射性废物的管理措施	233
第二节 外照射防护的一般措施	186	四、放射性废源的安全管理	235
一、时间防护	186	五、我国放射性废物管理法规和标准	235
二、距离防护	186	第十五章 放射工作管理	236
三、屏蔽防护	186	第一节 放射防护机构	236
第三节 外照射的屏蔽防护	187	第二节 申请许可制度	236
一、电离辐射的衰减	187	一、许可登记管理的依据	236
二、外照射防护常用的屏蔽材料	189	二、许可登记范围	237
三、屏蔽厚度的计算方法	190	三、放射工作单位必备的条件	237
第四节 内照射防护的一般措施	204	第三节 个人剂量检测	238
第十三章 医用放射线的防护	205	一、个人剂量监测原则	238
第一节 医用诊断 X 射线的防护		二、个人剂量监测的方法及要求	238
原则	205	三、个人剂量监测的评价	239
一、防护原则	205	四、个人剂量监测的管理	239
二、X 射线机防护性能的技术要求	206	第四节 健康管理	241
三、放射防护设施	209	一、一般放射工作人员的常规医学监护	241
第二节 医用治疗放射线的防护	209	二、特殊受照人群的健康管理	241
一、概述	209	三、职业性放射性疾病的诊断和监督	
二、放射治疗 X 射线机的防护	210	管理	242

四、保健津贴	242	第六节 放射事故管理	244
五、休假	242	一、放射事故管理	244
第五节 放射防护培训	242	二、放射事故分级与报告	244
一、防护培训的依据	242	三、发生放射事故的应急处理	245
二、培训的内容	243	四、放射事故的处理原则	245
三、建立培训档案	244	总复习题	247

第一章 物质结构及其性质

第一节 原子核及核外结构

一、原子

物质是由原子组成的,一个经典的原子模型是由包含中子和质子的原子核以及它周围处于特定轨道或壳层中的电子所构成。每一个原子均由核及电子组成,其核小而紧密,半径约为 10^{-12} cm。核周围是按轨道运动的电子,电子在半径约为 10^{-8} cm的轨道上运动。

与核相比,电子的质量很小,但是由于它们的弥散性,所以占据着很大的空间。可这样比喻:假如一个原子扩大到“占据”一个房间那么大,则其核处于房间的中心约针尖那么小的一点空间。由于物质的这种空虚性,一个高能电子或原子核就很容易穿过许多原子后与一个原子的任何部分相碰撞。

原子间的差别在于它们核的结构和电子数量及其排列上的不同,原子中的电子数被称为原子序数,以 Z 代表。它也表示原子核内的质子数。原子序数决定着各元素的性质,原子的化学性质决定于质子数或最外层轨道电子数。

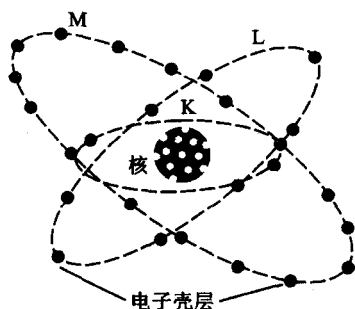


图 1-1 原子结构

二、原子核

任何原子核都由两种基本粒子——中子和质子所组成。中子和质子的大小和质量差不多相等。中子不带电荷,质子带一个正电荷,大小与一个电子所带的负电荷相等。一种物质的大多数物理和化学性质与核的中子和质子组成有关,核内的质子数就是原子序数(Z),决定原子的化学本性。

由于核和原子内的粒子都很小,惯用千克单位来表示它们的质量是不方便的。较为合适的单位是原子质量单位(u),它参照的基准是质量数为 12 的碳原子,其质量定为 12 000 u 。原子质量单位和千克间的关系是:

$$1 u = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

一个中子和一个质子的质量差别相当小,约只差 0.1%,而比电子质量大 1 900 倍。

三、核外结构

讨论 X 射线对原子的作用时,首先要了解原子的核外结构,电子位于围绕核空间中的轨道或壳层上,在多种放射性转变中,轨道电子也介入原子实际发射能量的过程中。当辐射物质相互

作用时,如与人体组织作用时,通常是与电子相互作用,而不是与原子核起作用。

(一) 电子数

正常原子中所含的电子数等于核内的质子数,这个数目就是某个化学元素的原子序(Z)。每个电子带有负电荷,其大小等于一个质子的正电荷。在正常情况下,一个原子中的电子和质子数目相同,正、负电荷平衡。因此,原子无净电荷。如果一个电子离开原子,那就是说原子被电离,带了一个正电荷。电离结果是原子为正离子,电子为负离子。

电子的电量 e 为 16.0×10^{-19} C, 电子的质量 m 为 9.1×10^{-28} kg。

(二) 能级

电子处于绕核的不连续壳层中,壳层用字母来识别。

从靠近核的壳层开始,按照玻尔理论,核外电子由于离核远近不同,而具有不同壳层,每壳层中都含有一定电子数目的可能轨道。每一壳层均可近似地看作是原子核的同心圆球。半径最小的壳层叫做 K 壳层,最多只能容纳 2 个电子;第二壳层叫做 L 层,最多只能容纳 8 个电子;第三壳层叫做 M 层,最多只能容纳 18 个电子,随着原子序数的增加,还可能有 N、O、P、Q 等壳层。愈到外面的壳层可容纳的电子数就愈多,一般每层上的电子最多可能数目是 $2n^2$ 个。但最外层的电子数有严格的限制,最多不能超过 8 个。一般规律是,电子先将内层填满,然后逐层向外填。

根据量子理论,电子以极高的速度绕核做复杂运动,可把它的电荷看成为一层笼罩在核外的带负电荷的“电子云”。电子的核外运动很难说出某一时刻处在何处,只能用统计学去认识,即用概率的大小来表示。电子出现多的地方,概率大,也就是电子云密度最大的地方。

带负电荷的电子受原子带正电荷的核的束缚。它们之间具有很强的吸引力,即结合力。这种结合强度可用能量来表示。迫使电子脱离原子,所获得的能量叫结合能。一个电子的结合能等于使电子脱离原子所需要的能量。结合能是电子势能的一种形式,与任何形式的势能一样,必须将某个地方规定为零能量级。电子在原子外的一个位置,电子已不再受到核的影响,将它定为零点。

电子能级是结合能的负值,其概念可用图 1-3 来说明。靠近底部的电子处于最低能级,具有最大结合能。电子在原子内处于确定层或壳层中,每个壳层有不同的能级,最靠近核的 K 壳层处于最低能级。

图 1-3 是原子序数为 74 的钨,只画了它的 K、L 和 M 电子能级。外加电子位于 N 和 O 壳层,这两

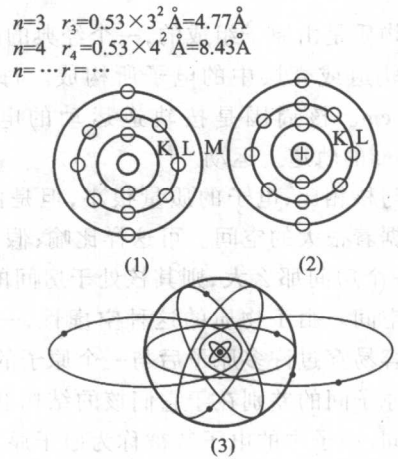


图 1-2 元素壳层结构示意图

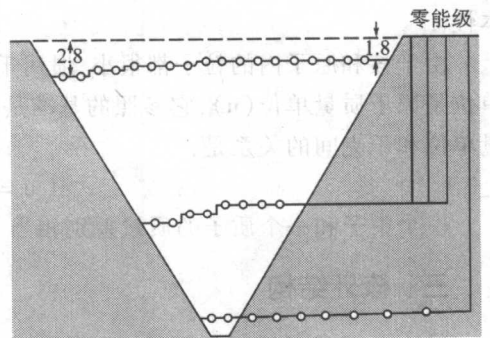


图 1-3 钨原子中电子的能级

个壳层位于 M 壳层之上并略低于零级,不同壳层之间具有显著的能量差。除 K 壳层外,其他壳层再分成另外的能级。例如, L 壳层分成 L I、L II 和 L III 三个能级。

电子在辐射过程中的作用通常涉及两个基本原理之一:① 要使一个电子移至更高壳层(如从 K 至 L)或脱离原子,必须从某些能源取得能量;② 如果一个电子移至更低的壳层(如从 L 至 K),电子必须放出能量,通常会出现某种形式的辐射。能量大小决定于电子移动的壳层之间的能级差。

在一具体壳层中,如 K 层中,对于电子的结合能,与原子序数有关。只有较高原子序数的 K 壳层电子所有的结合能是在诊断用的 γ 和 X 射线光子的相同能量范围内。L 壳层电子的结合能比 K 层的小得多,但它也随原子序数的增大而增大。对于大多数物质,最外面电子的结合能在 5 eV 至 20 eV 范围内。显然,这些电子最容易脱离原子。

一个电子脱离一个原子的过程称为电离。由于 X 射线和 γ 光子具有足够的能量使电子脱离原子,故可认为 X 射线和 γ 射线是具有电离作用的辐射。核外电子接受的能量不足使其从原子逸出,只能使它升到较高的能级上,在其恢复到正常状态时,释放出能量,这种过程称为激发。可见光的光子能量低于大多数原子中的最小结合能,不会产生辐射。

(三) 浓度

当光子与电子碰撞时,光子被吸收。光子通过物质时,它被吸收的机会决定于材料内可用的电子浓度。浓度或每立方厘米的电子数,可用以下公式计算:

$$\text{每立方厘米的电子数} = PN_A(Z/A) \quad (1-1)$$

这个关系式就是每立方厘米的原子数乘以原子序数(即每个原子内的电子数)。此关系式中的一些解释按序说明如下:阿伏伽德罗量 N_A 始终是不变值, N_A 每立方厘米的电子数仅与 Z 对 A 的比值有关。较低原子序数的元素在原子核中近乎是每个质子一个中子。 Z/A 的值近乎 0.5。随着原子序数和原子质量数的增加,核内的中子数也增大,导致 N/A 比值的减小,这种变化是相当小的。铅的原子序数是 82,原子质量 207, Z/A 比值是 0.4。在 X 射线应用中遇到的大多数材料, Z/A 比值的变化都小于 20%。唯一例外的是氢,其比值等于 1。

因阿伏伽德罗数是常量, Z/A 比值也基本上是个常数,能明显改变电子浓度的唯一因素是材料的密度。大多数材料是纯元素,都有或高或低的唯一密度值。混合物和复合物的密度决定于各种元素的相对浓度。

电子浓度并不明显地随原子序数而变化的事实,可能暗示原子序数在电子 - X 射线相互作用中作用不大。X 射线光子通过物质时,相互作用的机会不仅决定于电子浓度,还与电子在原子结构内被束缚的牢固程度有关。电子结合能随原子序数而增加,高度束缚的电子浓度也随原子序数的增大而有效地增加。

原子序数是原子的一个重要特征,对任一种化学元素都有唯一的值。许多材料,如人体组织不是单一的化学元素,而是一种混合物的密集体。它与 X 射线的相互作用,可能对混合物定义一个有效原子序数 Z_{eff} 。

$$Z_{\text{eff}} = \sqrt[2.94]{f_1 z_1^{2.94} + f_2 z_2^{2.94} + f_3 z_3^{2.94} + \dots} \quad (1-2)$$

在此关系式中, f 是与每种元素有关系的电子总数目的分数。指数 2.94 是从 X 射线相互作用和原子序数间的关系导出的。水是人体的主要组成部分,可用于说明有效原子序数的概念。

水分子包含 2 个氢原子和 1 个氧原子,每个氢原子有 1 个电子,一个氧原子有 8 个电子。因此,电子分数 f ,对氢是 0.2,对氧是 0.8。将这些值代入上面关系式,可得水的有效原子序数:

$$Z = \sqrt[2.94]{0.2 \times 1^{2.94} + 0.8 \times 8^{2.94}} = 7.42 \quad (1-3)$$

第二节 原子能级

根据玻尔的假设,电子在不连续的轨道上绕核旋转,而且在每个可能轨道上电子也都具有一定的能量(动能和势能的代数和)。因而电子在各个可能轨道上所具有的能量是不连续的。这些不连续的能量值叫做原子能级。

原子能级通常是以电子伏特来表示的。定义为一个电子通过 1 伏特电位差所释放出的能量。其功即为电荷与它通过的电位差的乘积。

电子在各个可能轨道上运动时所具有的能量,即能量公式:

$$E = -\frac{2\pi^2 me^4 Z^2}{h^2 n^2} \quad (1-4)$$

式中 $n=1,2,3,\dots$, E 代表轨道电子所具有的能量,单位为焦耳。因原子能级常用电子伏特来表示, $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$,若把单位焦耳化为电子伏特,则除以 $1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$,即

$$E = -\frac{2\pi^2 me^4 Z^2}{1.6 \times 10^{-19} \times h^2 n^2} \quad (1-5)$$

随着原子序数 Z 的增加,即核外电子数增多,其原子结构也更为复杂。核外某电子除受核的吸引力外,还受其他核外电子的排斥作用。

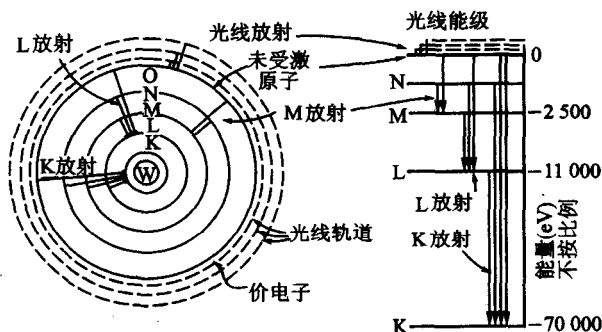


图 1-4 左侧是钨原子的电子轨道示意图,右侧示其能级以 eV 数表示的能量标度并没有按比例。X 射线通过电子向 K、L 及 M 层跃迁而引起。光线放射是由价电子从光线轨道向 O 层跃迁而引起的

以钨为例(图 1-4),K、L 和 M 层上电子结合能分别约为 70 000 eV,11 000 eV 及 2 500 eV。这意味着要除去此原子中 -K 层电子,必须供给它 70 000 eV 能量,或者必须以 70 000 e 伏特电位差的电子轰击它。要除去 -L 层电子大概需要 11 000 eV 的能量。

用电子伏特为单位来测定的结合能已在图 1-3 中表明。能量标度的零点是任意命定的,它

与非激发状态的原子相对应,并在简图近顶部以零标记的水平线代表之。正常态的钨原子,其最外层价电子占 O 层,原子的能量用简图顶部附近的粗黑线代表之。如果该电子得到能量,将会向外逸出到轨道上,原子能级被提高。这些能级之间仅仅相差几个电子伏特。然而,原子不能保持这种能量状态,或电子不能停留在任一光线轨道中。当它降回到正常位置,就放射能量,这叫做光线辐射。

原子核对电子有很强的吸引力,这种吸引力称为结合力。最靠近原子核的壳层电子结合力最大,距离越远的电子结合力越小。另外,结合力还与原子序数 Z 相关, Z 越高,核内正电荷就越多,对电子的吸引力也就越大,从原子内移走电子所需要的能量也就越大。可见,移走原子中某轨道电子所需要的最小能量,就叫做这个电子的结合能。

第三节 能量和辐射

一、概述

物理世界有两个组成部分:能量和物质。在大多数物理过程中,能量和物质间不断地相互作用和转换。医学成像也不例外,在成像方法中,图像都是由能量和人体组织(物质)的相互作用形成的。对体内结构成像,要求能量源传递到人体,再从人体传递到适当的接收器。基本要求是能量必须能穿透物体。可见光是日常生活中用于传递图像信息的能量的主要形式,但它不能穿透人体,对人体内成像必须采用其他形式的能量。

各种成像方法中的一个普遍问题是,使用能量的一大部分会积存在人体内,它并不以相同形式的能量停留在体内,而是转换为其他形式的能量,如热和化学变化。积存能量也会产生不希望的生物效应。

在医学成像过程中,有两大类能量。一类是聚集形式的能量,其存在必须有一种媒质材料,能量存在于媒质中;另一类是在一种物质材料内产生的能量,并不断地运动,将能量从一个地方转送至另一个地方,这种能量就是辐射。用于医学成像的各种形式的能量,除超声和核磁共振外,基本是辐射形式。

二、能量

在医学成像中,与物质有关的能量形式的重要特征是它的供出能量形成辐射,当辐射被吸收时,能量又被重新取回。宇宙间一个基本物理定律是能量既不能创造也不会消灭,它是从一种形式转换为另一种形式。成像系统的各种部件,可将能量从一种形式转换为另一种形式。1 个电子质量是 9.1×10^{-28} g,这意味着 10.9×10^{26} 个电子的质量等于 1 cm^3 水的重量。

一个电子既有质量又有电荷,它可占有多种形式的能量,这就是电子取得、输运和放出能量的能力,致使它在 X 射线系统中成为有用的物质。

(一) 静止质量能量

一个电子即使处于静止状态,但仍具有能量。根据物理学定律,一物质只要具有质量就具有一定的能量,在一定条件下,质量可转换为能量,或相反。下面是爱因斯坦方程式:

$$E = mc^2 \quad (1-6)$$

在此关系式中, c 是光速。根据爱因斯坦关系式, 每个电子给出 510 keV, 这个能量表现为一个光子。

(二) 动能与势能

1. 动能 动能是与运动有关的能量。运动着的汽车或棒球所具有的能量就是这种形式的能量。当电子运动时, 它们也具有动能。

一个物体所具有的动能大小与它的质量和速度有关。对于大的物体(如汽车和棒球), 动能与物质的质量和速度的平方成正比。物体速度加倍, 它们的动能要增加为原来的 4 倍。在很多情况中, 电子以接近于光速的速度在运动, 这时能量与速度间不再保持上述关系。相对论理论之一指出, 一个物体(如电子)的质量在高速情况下要发生变化, 能量与速度的关系变得复杂。在典型 X 射线管内的电子具有的能量可能超 100 keV, 并以大于光速一半的速度运动。

2. 势能 势能是一个物体因它的位置或构形所占有的一种能量, 从本质上说, 这是一个有相对意义的量。即一个物体在一个位置或处于某种构形时会比处于另一种状态具有更多或更少的势能。

电子具有两种形式的势能。一种形式与在电路内的位置有关, 另一种形式与原子的位置有关。电子势能的一个重要的特征是电子升高至更高势能级水平时, 需从某些源中得到能量, 而当它移至更低势能位置时要放出能量。X 射线管内阴极的电子获得能量后以高速撞击阳极靶面, 以产生热能和 X 射线能, 就是这个机理。

(三) 能量交换与转移

1. 能量交换 电子小得看不见, 往往很难想像电子能量的不同形式。图 1-5 所示的石块, 用它来引证能量的不同形式, 也适用于电子。

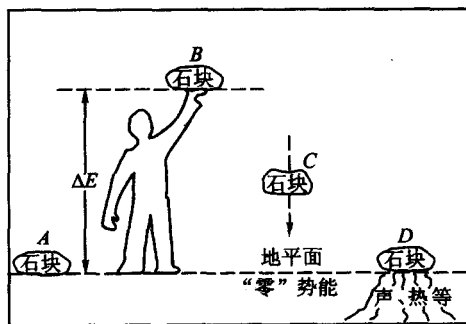


图 1-5 能量从一种形式转换为另一种形式

势能是相对意义的量。如图 1-5, 水平地面设置为零势能位置。当石块高于地面之上时, 它就处于更高的势水平。如果石块处于地面下的一洞内, 它的势能相对于水平地面具有负值。然而, 它的势能相对于更深的洞底部位置仍是正值。石块在位置 A 具有零势能(相对地说), 因为它不运动, 动能为零, 静止质量能量与它的质量成正比。当人抬起这块并将它举高至位置 B 时, 相对于位置 A 来说, 它增高了石块的势能。石块所得能量来之于人, 与电子靠电源装置可升高势能一样。

如果人在位置 B 释放石块使它落至地面,它的势能就转换为动能。随着石块往下运动,它的势能不断减少,且正比于它在地平面上的距离,不断地增加它的速度和动能。在即将撞击地面之前,它获得的动能正好等于人所提供的势能。(在 X 射线管内的电子经历着相似的过程,管内电子的热能变换为动能)。石块正好到达地面时,它比静止在地面 A 时具有更多的能量。然而,当它静止在地面 D 处时,它的能量与在 A 处时的相同。这部分能量转换为其他形式,如声音、少量热和使地面形状改变的机械能。当高速电子碰撞某种材料时,电子也失去它的动能,这能量转换为热和 X 射线辐射。

2. 能量转移 电子的主要功能之一是从一个位置输运能量至另一个位置。电子能量输运的原则是,电子从一位置获取能量,再运动到另一处将能量传递给某些其他材料,电子再回到能源,如此不断反复。

电子运动从一点将能量转移至另一点所经过的通道就是电路。任何电路至少有两个部件,一是电源,它能将能量从一种形式转换为另一种形式,并将它传输给电子。电池就是电子能源的例子;二是负载,当电子通过此器件时,它的能量转换为某些其他形式的能量。灯泡就是负载的例子,它将电能转换成光和热。

电子是以势能的形式携带能量的。当电子通过自由空间运动时,它带有动能。但通过固体导体运动时,就不是这样。一般电路中,一段导体比另一段导体具有更高的势能。从原则上讲,能源使电子升至更高的势能水平,一直维持到它通过负载器件时放出能量。在较低势能水平的电子回到能源,再重复此过程。

(四) 能量单位

在实际应用中经常会碰到能量的量值,能量的单位很多,在此仅介绍一些与放射医学成像相关的能量单位。

1. 焦耳 焦耳(J)是米制国际单位制(System International, SI)中能量的基本单位。一般来说,涉及比较大的能量时,用焦耳作单位。

2. 热单位 热单位是在放射中为表示 X 射线管所产生的热能量而提出来的一个方便单位。一个热单位是焦耳的 71%,它逐渐为焦耳所替代。

3. 克拉德 克拉德是在放射学中为表示人体吸收的总辐射能量所提出的,但应用总趋势是用焦耳为单位。

4. 尔格 尔格是能量的米制单位,不是 SI 单位。它比焦耳小得多。它在放射学中的主要应用是,表示组织内吸收辐射能量的大小。

5. 电子伏特 电子伏(eV)是能量的电子单位。千电子伏(keV)和百万电子伏(MeV),都用于表示单个电子和光子的能量,单个可见光子的能量在几个电子伏范围内。在成像过程中用的 X 射线,它们的能量范围从 15 至数百千电子伏。

三个基本能量单位的关系是:

$$1 \text{ J} = 10^7 \text{ erg} = 6.24 \times 10^{18} \text{ eV}$$

6. 功率 功率表示具体过程中能量转移的速率。瓦特(W)是用于表示功率的单位,1 W 等于能量以 1 J/s 的速率转移或转换。在医学成像中,功率用于描述 X 射线发生器的能力、X 射线管的极限值等。

7. 强度 强度是功率的空间浓度,它表示能量通过单位面积的速率。一般用每平方米或每