

全国高等学校配套教材

供基础、临床、预防、口腔医学类专业用

核医学 实习指导

主 编 王荣福 李少林

普通高等教育医学类教材

第四版 主编：陈文、陈文、王树强 副主编：陈文

核医学 实习指导

主 编：陈文、陈文、王树强

人民卫生出版社

全国高等学校配套教材
供基础、临床、预防、口腔医学类专业用

核医学实习指导

主 编 王荣福 李少林

副主编 闫 平

编 者 (以姓氏笔画为序)

王 茜	北京大学人民医院	张建华	北京大学第一医院
王荣福	北京大学第一医院	张燕燕	北京大学第三医院
石洪成	复旦大学中山医院	陈 跃	泸州医学院附属医院
付占立	北京大学第一医院	范 岩	北京大学第一医院
闫 平	北京大学第一医院	罗 弋	重庆医科大学
李 娟	宁夏医学院附属医院	罗云霄	吉林大学第二医院
李少林	重庆医科大学	孟庆勇	广东医学院
杨国仁	山东省肿瘤医院	胡 硕	中南大学湘雅医院
张旭初	北京大学第一医院	彭志平	重庆医科大学

主编助理 闫 平 庞 华

人 民 卫 生 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

核医学实习指导/王荣福等主编. —北京: 人民卫生出版社, 2008. 7

ISBN 978-7-117-10229-2

I. 核… II. 王… III. 原子医学-医学院校-教学参考资料 IV. R81

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 068050 号

核医学实习指导

主 编: 王荣福 李少林

出版发行: 人民卫生出版社 (中继线 010-67616688)

地 址: 北京市丰台区方庄芳群园 3 区 3 号楼

邮 编: 100078

网 址: <http://www.pmph.com>

E - mail: pmph@pmph.com

购书热线: 010-67605754 010-65264830

印 刷: 北京市文林印务有限公司

经 销: 新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 12.75 插页: 2

字 数: 294 千字

版 次: 2008 年 7 月第 1 版 2008 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

标准书号: ISBN 978-7-117-10229-2/R·10230

定 价: 22.00 元

版权所有, 侵权必究, 打击盗版举报电话: 010-87613394

(凡属印装质量问题请与本社销售部联系退换)

前 言

为贯彻教育部关于进一步深化教学改革和加强教材建设的精神，由全国高等医药教材建设研究会和卫生部教材办公室研究决定启动第七轮卫生部规划教材《核医学》主干教材——学生用书、《核医学教师用书》、《核医学实习指导》、《核医学学习指导及习题集》和“核医学教学课件”等系列配套教材编写工作，精心策划并组织全国高等医学院校长年从事核医学医疗、教学和科研的一线教师联合编写的《核医学》系列配套教材，已由人民卫生出版社出版发行。本教材充分体现了权威性、实用性和科学性。

《核医学实习指导》教材首次问世，克服和改变传统的灌输式教育方法，遵循“以问题为中心”，调动学生的积极性，营造学生自主学习的氛围。该教材内容全面而精炼，概念准确，层次清晰，重点突出，注重实用。它不完全是《核医学》主干教材学生用书的翻版与压缩，而是来自全国高等医学院校奋战在教学一线的老师多年来从事临床医学教育的集体智慧的结晶，书中字字句句都凝练了老师们宝贵的教学经验和体会。本书是一本目前临床医学学生难得的核医学教科书。

为了给任课教师的教学提供方便，使学生能更好地理解和全面掌握核医学大课传授的理论知识，理论紧密结合临床实践，我们在《核医学》教材基础上编写了配套教材，即《核医学实习指导》一书。

本书共 17 章，其章次顺序、内容与《核医学》主干教材相匹配。每一章包括五部分内容：①实习目的和要求，以掌握、熟悉和了解的表述方式明确告知学生学习该章节的重点和难点；②实践学时数，本书中列出的实践学时数供各院校参考，建议各院校根据本单位教学大纲和具体要求作相应的调整；③实习内容，是本教材的重中之重和精髓，亦是主干教材的核心部分，主要内容为相关检查的原理、方法、检查结果分析与判断、适应证和临床应用意义等；④病例分析或知识拓展，1~5 章为核医学基础知识，这部分内容主要涉及相关领域应用进展与前景，6~17 章主要内容为临床核医学，通过思考与病例分析，主要检测学生通过学习本章内容并结合相关专业对疾病进行诊断、鉴别诊断及治疗的分析和解决问题的能力，部分病例分析还包括放射性核素显像的影像分析、体外分析、功能测定及相关影像学技术应用比较等；⑤为了便于学生了解和掌握本章知识，分别进行了小结。为了教与学的相互配合和相互促

进,进一步调动学生的学习兴趣和再提高,书中还编入了核医学发展历史和新进展。

将《核医学》主干教材、《核医学教师用书》、《核医学实习指导》、《核医学学习指导及习题集》和“核医学教学课件”等系列配套教材有机结合为一体的系统和规范教材的问世,将极大地方便教师教学,有利于学生复习与巩固,同时为核医学专业资格、核医学技术专业资格晋升考试提供了很好的复习素材。

编写过程中得到有关高等医学院校领导的鼎力支持和各位编写者的通力合作,本书主编助理闫平副教授在统稿过程中做了大量工作,在此一并致谢。

编写本书要求高、时间短、内容丰富精练、简明扼要。教材新编,难免存在错误和不妥之处,真诚地希望广大读者批评指正。

王荣福 李少林

2008年5月

目 录

第一章 核物理	1
一、目的和要求	1
二、实践学时	1
三、实习内容	1
(一) 核物理的基本概念	1
(二) 核衰变	2
(三) 射线与物质的相互作用	4
(四) 辐射剂量学基础	5
四、知识拓展	6
五、小结	8
第二章 仪器	9
一、目的和要求	9
二、实践学时	9
三、实习内容	9
(一) 正电子发射计算机断层显像仪	9
(二) 医用回旋加速器	15
(三) 单光子发射计算机断层显像仪	15
(四) γ 照相机	16
(五) 医用核素活度计	16
(六) 脏器功能测量仪器	17
(七) 液体闪烁测量仪	19
(八) 体外 γ 射线测量仪	20
(九) 污染剂量仪与个人剂量监测仪	21
(十) 图像融合联机	22
四、核医学仪器进展和应用前景	26
五、小结	26

第三章 放射性药物	28
一、目的和要求	28
二、实践学时	28
三、实习内容	28
(一) 放射性药物的核素来源	28
(二) 放射性药物的制备	30
(三) 放射性药物的质量控制	32
四、放射性药物制备举例	33
五、小结	34
第四章 辐射防护	36
一、目的和要求	36
二、实践学时	36
三、实习内容	36
(一) 辐射防护概述	36
(二) 材料和设备	39
(三) 方法	40
(四) 注意事项	41
四、知识拓展	42
五、小结	44
第五章 放射性核素示踪技术与显像	45
一、目的和要求	45
二、实践学时	45
三、实习内容	45
(一) 放射性核素示踪技术概述	45
(二) 放射性核素显像	50
(三) 核医学科参观实习	52
四、知识拓展	52
五、小结	53
第六章 体外分析技术	54
一、目的和要求	54
二、实践学时	55
三、实习内容	55
(一) 放射免疫法测定血清甲状腺素浓度	55
(二) 免疫放射法测定血清促甲状腺激素浓度	57
(三) 酶联免疫分析技术测定雌二醇浓度	59
(四) 时间分辨荧光免疫分析技术测定血清乙型肝炎 e 抗原量	61
(五) 受体放射性配基结合分析技术测定组织中尿激酶受体密度	63
四、知识拓展	66
五、国内常用的放射免疫分析项目	67

第七章 内分泌系统	70
一、目的和要求	70
二、实践学时	70
三、实习内容	70
(一) 甲状腺功能测定	70
(二) 甲状腺静态显像	73
(三) 甲状旁腺显像	74
(四) 肾上腺皮质显像	75
(五) 肾上腺髓质显像	76
四、病例分析	76
五、小结	79
第八章 心血管系统	80
一、目的和要求	80
二、实践学时	80
三、实习内容	80
(一) 心肌灌注显像	80
(二) 心肌代谢显像	82
(三) 心血池显像	82
(四) 心肌灌注显像图像的分析方法	83
(五) 心肌负荷显像基本原理和方法	83
(六) 放射性核素心肌灌注显像与 CT 冠状动脉造影的关系	83
四、病例分析	84
五、小结	88
第九章 神经系统	89
一、目的和要求	89
二、实践学时	89
三、实习内容	89
(一) 脑血流灌注显像	91
(二) 脑代谢显像	93
(三) 神经受体显像	94
(四) 脑脊液间隙显像	95
(五) 放射性核素脑血管显像与血脑屏障显像	96
(六) 临床应用	96
(七) 放射性核素神经系统显像的优势	98
四、病例分析	98
五、小结	100
第十章 呼吸系统	101
一、目的和要求	101
二、实践学时	101

三、实习内容	101
(一) 肺灌注显像	101
(二) 肺通气显像	102
(三) 下肢深静脉显像	103
(四) 临床应用	104
四、病例分析	107
五、小结	109
第十一章 骨骼系统	110
一、目的和要求	110
二、实践学时	110
三、实习内容	110
(一) 骨骼显像	110
(二) 骨矿物质含量及骨密度的测量	111
四、病例分析	113
五、小结	117
第十二章 肿瘤显像	118
一、目的和要求	118
二、实践学时	118
三、实习内容	118
(一) SPECT 肿瘤显像	118
(二) PET 或 PET/CT 肿瘤显像	120
(三) 肿瘤核医学显像进展	124
四、病例分析	128
五、小结	130
第十三章 炎症显像	132
一、目的和要求	132
二、实践学时	132
三、实习内容	132
(一) ^{67}Ga -枸橼酸盐炎症显像	132
(二) 放射性核素标记白细胞炎症显像	133
(三) 放射性核素标记人免疫球蛋白炎症显像	133
(四) 放射性核素标记抗粒细胞单克隆抗体炎症显像	133
(五) ^{18}F -FDG 炎症显像	133
(六) 临床应用	133
四、病例分析	136
五、小结	137
第十四章 消化系统	138
一、目的和要求	138
二、实践学时	138

三、实习内容·····	138
(一) 肝胆显像·····	138
(二) 胃肠道显像·····	147
四、病例分析·····	151
五、小结·····	153
第十五章 泌尿系统·····	154
一、目的和要求·····	154
二、实践学时·····	154
三、实习内容·····	154
(一) 肾动态显像·····	154
(二) 介入试验·····	155
(三) 肾小球滤过率和肾有效血浆流量测定的原理和方法·····	157
(四) 肾图·····	159
(五) 肾静态显像·····	159
(六) 膀胱输尿管反流显像·····	160
四、病例分析·····	161
五、泌尿生殖系统核医学应用进展·····	166
六、小结·····	167
第十六章 血液与淋巴显像·····	168
一、目的和要求·····	168
二、实践学时·····	168
三、实习内容·····	168
(一) 骨髓显像·····	168
(二) 脾显像·····	170
(三) 淋巴显像·····	171
四、病例分析·····	173
五、小结·····	175
第十七章 放射性核素治疗·····	176
一、目的和要求·····	176
二、实践学时·····	176
三、实习内容·····	176
(一) ^{131}I 治疗甲状腺功能亢进症·····	176
(二) ^{131}I 治疗分化型甲状腺癌·····	177
(三) ^{131}I 治疗自主功能性甲状腺腺瘤·····	179
(四) ^{131}I -间碘苄胍治疗嗜铬细胞瘤和神经母细胞瘤·····	179
(五) 转移性骨肿瘤的放射性核素治疗·····	180
四、病例分析·····	181
五、小结·····	183
中英文名词对照·····	184

第一章

核 物 理

一、目的和要求

掌握核物理的基本概念、核衰变的类型、射线与物质的相互作用(物理效应);理解照射量、吸收剂量、剂量当量及有效剂量当量。

二、实践学时

本章实践 3 学时。

三、实习内容

(一) 核物理的基本概念

1. 原子结构 物质都是由原子组成的,不同元素的原子具有不同的性质,但是原子的基本结构大致相同。1869 年门捷列夫(Mendeleev)发现元素周期表。1895 年伦琴(Roentgen)发现 X 射线。1896 年贝克勒尔(Becquerel)发现放射性物质铀,1901 年又发现从铀原子中发射出的高速电子流(β 射线)。1911 年卢瑟福(Rutherford)提出了原子的核式模型,即原子是由一个原子核(带有正电荷)和若干个绕核运动的电子所组成。1913 年玻尔(Bohr)在卢瑟福核式模型的基础上,提出了众所周知的玻尔原子模型。现在我们知道,原子由处于原子中心的原子核和带负电荷的核外电子组成。

2. 核素、同位素、同质异能素

(1) 核素:原子核的质子数、中子数和原子核所处的能量状态均相同的原子属于同一种核素(nuclide)。例如氢[^1H]、碳[^{12}C]、金[^{198}Au]表示不同的核素。

(2) 同位素:凡原子核具有相同的质子数而中子数不同的元素互为同位素(isotope)。如 ^{123}I 、 ^{125}I 、 ^{131}I 在元素周期表中处于同一位置,是同一元素——碘元素。一种元素往往有几种甚至几十种同位素。一种元素所有同位素的化学和生物性质几乎都一样,但物理性质可能有所不同。

(3) 同质异能素:核内中子数和质子数都相同但能量状态不同的核素彼此称为同质异能素(isomer)。原子核可以处于不同的能量状态,最低能量状态为基态,激发态是继发于某些核反应、核裂变及放射性衰变后形成的。对于激发态的核素,在原子质量数

的后面加一个小写的“m”来表示,例如锝 ^{99m}Tc 是 ^{99}Tc 的激发态,两者互为同质异能素。

(二) 核衰变

原子核分为两大类,一类为稳定原子核,即原子稳定存在。原子核只有当中子和质子的数目保持一定的比例时,才能稳定结合,相应的核素称为稳定核素(stable nuclide)。另一类原子核则是不稳定的,会自发转变成别的原子核,或自发地发生核能态变化,并伴有射线的发射,这类原子称为放射性原子,相应的核素称为放射性核素(radionuclide)。放射性核素发生上述变化的过程称为放射性核衰变(radioactive decay),常简称核衰变。用人工的方法改变质子和中子的比例,可以使稳定性原子核变成不稳定的放射性核素。

1. 放射性衰变的类型

(1) α 衰变:不稳定原子核自发地放射出 α 粒子而变成另一个核素的过程称为 α 衰变(alpha decay)。 α 粒子实际上就是氦 ^4He 原子核。

α 衰变发生在原子序数大于82的重元素核素。 α 射线射程短,很容易被物质吸收,一张纸就能阻挡 α 粒子的通过,因而不能用于核医学显像。由于其对局部组织的电离作用强,而不损害远处组织,故可用于恶性肿瘤等疾病的放射性核素内照射治疗。

(2) β 衰变:核衰变时放射出 β 粒子或俘获轨道电子的衰变称为 β 衰变(beta decay),其分为 β^- 、 β^+ 和电子俘获三种。

1) β^- 衰变:放射性核素的核内放射出 β^- 射线的衰变方式称为 β^- 衰变。发生在质量较轻、中子过多的原子核。

β^- 射线的本质是高速运动的负电子流, β^- 粒子穿透力较弱,不能用于核素显像。 β^- 粒子在空气中射程比 α 粒子大,但电离能力较 α 粒子弱,能被铝箔和机体组织吸收。临床上常用 β^- 衰变核素,例如碘 ^{131}I 、磷 ^{32}P 、锶 ^{89}Sr 等进行核素治疗。

2) β^+ 衰变:由于核内中子缺乏而放射出正电子的衰变称为正电子衰变,也叫 β^+ 衰变。

β^+ 衰变的核素都是人工放射性核素,天然的核素不发生 β^+ 衰变。正电子与其邻近的电子(β^-)碰撞而发生湮灭辐射(annihilation radiation),失去电子质量,转变成两个方向相反、能量皆为511keV的 γ 光子。利用正电子符合探测技术能探测方向相反的511keV γ 光子,并进行机体内的定量、定性分析和代谢显像。

3) 电子俘获衰变:原子核俘获一个核外轨道电子,使核内一个质子转变成一个中子和放出一个中微子的过程称为电子俘获衰变(electron capture, EC)。EC发生在缺中子的原子核,与正电子衰变时核结构的改变相似。

(3) γ 衰变和内转换:

1) γ 衰变:激发态的原子核以放出 γ 射线(光子)的形式释放能量而跃迁到较低能量级的过程称 γ 衰变(γ -decay)。

γ 射线的本质是中性的光子流,电离能力很小,穿透能力强,适合核素显像。例如核素钼 ^{99}Mo 衰变时放出 β 射线,产生子体放射性核素 ^{99m}Tc , ^{99m}Tc 发射能量为140keV的纯 γ 射线回复到基态 ^{99}Tc , ^{99m}Tc 已广泛用于标记各种显像剂。而 ^{131}I 衰变同时放出 β 射线和 γ 射线,故它既可用于治疗也可用于显像。

2) 内转换:核素的原子核由激发态向基态或由高能态向低能态跃迁时,将多余的能量直接传给核外电子,使轨道上的电子获得足够的能量后,脱离轨道成为自由电子,这一过程称为内转换(internal conversion)。因内转换放射出的自由电子称为内转换电子。

2. 核衰变的基本定律

(1) 衰变规律:放射性核素的衰变是遵循一定的指数规律衰减的,不同放射性核素有不同衰变常数,以 λ 表示。放射性核素单位时间内衰变的原子核数(即衰变率 $\frac{dN}{dt}$)与现有的原子核总数 N 成正比,即 $\frac{dN}{dt} = -\lambda N$,式中负号表示原子核由于衰变而逐渐减少。将上式积分,得 $N = N_0 e^{-\lambda t}$,式中 N 、 N_0 分别是经过时间 t 衰变后剩下的原子核数和 $t=0$ 时的原子核数。

(2) 半衰期:半衰期在实际工作中是表示放射性核素衰变速率的指标。在核医学中常用的半衰期有物理半衰期(physical half life, $T_{1/2}$)、生物半衰期(biological half life, T_b)和有效半衰期(effective half life, T_{eff})。

1) 物理半衰期:系指放射性核素数目因衰变减少到原来的一半所需的时间,是每一种放射性核素所特有的,可通过测定半衰期确定核素种类,甚至推断放射性核素混合物中的核素种类。

各种放射性核素的半衰期长短不一,可长达 10^{10} 年,可短至 10^{-10} 秒。一般把半衰期短于10小时的核素称为短半衰期核素,短半衰期核素在临床诊断和医学研究中的应用是核医学发展的重要研究内容。

2) 生物半衰期和有效半衰期:进入生物体内的放射性核素或其化合物,由于生物代谢从体内排出到原来的一半所需的时间,称为生物半衰期。由于物理衰变与生物的代谢共同作用而使体内放射性核素减少一半所需要的时间,称有效半衰期。三者关系如下:

$$\frac{1}{T_e} = \frac{1}{T_{1/2}} + \frac{1}{T_b} \quad (\text{式 1-1})$$

$$T_{eff} = \frac{T_{1/2} \times T_b}{T_{1/2} + T_b} \quad (\text{式 1-2})$$

许多放射性核素并非一次衰变就达到稳定,有些放射性核素衰变后形成的子核仍为放射性核素,子核又以本身的规律继续衰变,直至衰变成稳定性核素,即所谓连续衰变。临床核医学使用的钼-锝核素发生器也是连续衰变的例子之一。 ^{99}Mo ($T_{1/2} = 66.02\text{h}$) $\rightarrow$ ^{99m}Tc ($T_{1/2} = 6.02\text{h}$) $\rightarrow$ ^{99}Tc ($T_{1/2} = 2.12 \times 10^5$ 年) $\rightarrow$ 钌 [^{99}Ru]。

当母核半衰期很长,而子核的衰变远比母核快,经过一定时间衰变后,子体核素与母体核素的原子核数以一定的比例达到平衡,两者的衰变率基本相等,称为长期平衡。例如,锡-铟核素发生器属于这一类。锡 [^{113}Sn], $T_{1/2} = 115$ 天 $\rightarrow$ 铟 [^{113m}In], $T_{1/2} = 1.66\text{h}$ $\rightarrow$ ^{113}In 。

(3) 放射性活度:放射性活度(radioactivity, A)是表示单位时间内发生衰变的原子核数。过去惯称放射性强度。

在国际制单位(system international unites, SI)中,放射性活度的单位是贝可(Bec-

querel, Bq), 定义为每秒一次衰变。即 $1\text{Bq}=1\text{次/秒}$ 。

放射性活度的旧制单位是居里(Curie, Ci), 1 居里表示每秒 3.7×10^{10} 次核衰变。居里与贝可的换算关系是:

$$1\text{Ci}=3.7\times 10^{10}\text{Bq}$$

$$1\text{Bq}\approx 2.7\times 10^{-11}\text{Ci}$$

核医学通常使用的放射源的活度, 居里的单位较大, 为方便使用, 通常采用较小的单位, 如毫居里、微居里等, 贝可相对太小, 通常用 kBq、MBq、GBq 等。

$$1\text{mCi}=37\text{MBq}$$

$$1\mu\text{Ci}=37\text{kBq}$$

为了表示各种物质中放射性核素的含量, 通常还采用比活度(specific radioactivity)及放射性浓度(radioactivity concentration)。比活度定义为单位质量或单位摩尔物质中含有的放射性活度, 单位是 Bq/g、MBq/g、MBq/mol。放射性浓度定义为单位体积溶液中所含的放射性活度, 单位是 Bq/ml、mCi/ml 等。临床核医学使用放射性浓度较多。

例题:

某核医学科存有 1 月 5 日生产的 ^{131}I 口服溶液, 出厂时其放射性活度是 100mCi, 体积是 2ml, 问其放射性浓度是多少?

1 月 13 日某甲亢患者拟服用 ^{131}I 口服溶液 5mCi, 问需取用多少 ml ^{131}I 口服溶液?

解答:

放射性浓度即放射性活度与体积的比值, 故 1 月 5 日 ^{131}I 口服溶液的放射性浓度是 $100\div 2$, 即 50mCi/ml。

1 月 13 日 ^{131}I 口服溶液经过 8 天的衰变(^{131}I 的物理半衰期为 8 天), 其放射性活度减少一半, 即 50mCi, 放射性浓度为 25mCi/ml, 故此患者需取 $(5\div 25)0.2\text{ml}$ ^{131}I 口服溶液。

(三) 射线与物质的相互作用

射线的运动空间充满介质, 射线就会与物质发生相互作用, 射线的能量不断被物质吸收, 这种相互作用亦称射线的物理效应, 是我们了解辐射生物效应、屏蔽防护以及放射性检测、核素显像和治疗的基础。

1. 带电粒子与物质的作用

(1) 电离作用: 是指 α 、 β 等带电粒子使物质中的原子失去轨道电子而形成自由电子和正离子的过程。入射粒子的电荷量越大, 电离(ionization)作用越强。

(2) 激发作用: 带电粒子通过物质时, 如果原子的核外电子所获得的能量还不足以使其脱离原子, 而只能从内层轨道跳到外层轨道, 这时原子从稳定状态变成激发状态, 这种作用称为激发(excitation)作用。

电离和激发作用是一些探测器工作的物质基础, 是射线引起物理、化学变化和生物效应的机制之一。

(3) 散射作用: β 射线由于质量小, 行进途中易受介质原子核静电场的作用而改变原来的运动方向, 这种现象称为散射(scattering)。

(4) 韧致辐射: 快速电子通过物质时, 在原子核电场作用下, 急剧减低速度, 电子的

一部分或全部动能转化为连续能量的 X 射线发射出来,这种现象称为轫致辐射(bremsstrahlung)。

轫致辐射的强度和 β 粒子反向散射的几率随屏蔽物质的原子序数增大而增大,还随 β 粒子的能量增加而增加。因此, β 射线的屏蔽要用原子序数低的材料制成,如铝、塑料、有机玻璃等。 α 射线由于自身质量数大、运行速度慢,较少产生轫致辐射。

(5) 吸收作用:带电粒子使物质的原子发生电离和激发的过程中,射线的能量全部耗尽,射线不再存在,称作吸收(absorption)。

2. 光子与物质的相互作用 γ 射线和 X 射线及轫致辐射等属于电磁辐射,都是中性光子流,与物质相互作用方式相同,只与光子的能量有关,主要产生三种效应:光电效应、康普顿效应和电子对效应。

(1) 光电效应: γ 光子和原子中内层(如 K、L 层)壳层电子相互作用,将全部能量交给电子,使之脱离原子成为自由光电子的过程称为光电效应(photoelectric effect)。

(2) 康普顿效应:随着光子能量的增加, γ 光子与原子中的电子作用时,只将部分能量传递给核外电子,使之脱离原子核成为 Compton 电子发射出来,而 γ 光子本身能量减少,改变方向继续运行,称之为康普顿效应(Compton effect)。当光子能量在 0.8~4MeV 之间时,对任何物质来说康普顿效应的发生几率都占主导地位。

(3) 电子对形成:光子穿过物质时,光子在与介质原子核电场的相互作用过程中突然消失而产生一对正、负电子,这种作用被称为电子对生成(pair production)。

光子与物质的这三种作用形式与光子的入射能量和物质的原子序数有关,能量低的光子和高原子序数的物质以光电效应为主;中等能量的 γ 射线以康普顿散射为主;电子对效应主要发生在高能光子和高原子序数物质的作用中。

(四) 辐射剂量学基础

1. 照射量 X、 γ 射线与物质通过相互作用产生三种效应,形成次级电子,这些次级电子又可在物质中产生电离作用。照射量(exposure, X)就是用来度量 X、 γ 射线在空气中电离作用强弱的一个物理量,过去也称为照射剂量或辐照剂量。

照射量专用单位为伦琴,用 R 表示,它与国际单位库仑/千克(C/kg)的关系是:

$$1\text{R}=2.58\times 10^{-4}\text{C/kg}$$

$$1\text{C/kg}=3.876\times 10^3\text{R}$$

伦琴适于 3MeV 以下的 X、 γ 射线。

2. 吸收剂量 射线和物质相互作用的结果是,一方面射线丢失能量,另一方面物质吸收能量,物质吸收越多,说明射线作用越显著,造成的生物效应也越大。在一定条件下,生物效应和单位质量机体吸收的能量成正比,可以把单位质量物质吸收的射线能量称为吸收剂量(absorbed dose, D)。

吸收剂量的单位为拉德,以符号 rad 表示。其定义为:

$$1\text{rad}=10^{-2}\text{焦耳/千克(J/kg)}$$

$$1\text{rad}=10^3\text{mrad}=10^6\mu\text{rad}$$

1974 年国际辐射单位和测量委员会建议吸收剂量的专用单位改为格雷(Gray),以符号 Gy 表示。

$$1\text{Gy}=100\text{rad}=1\text{J/kg}$$

吸收剂量率为单位时间内的吸收剂量,其单位有 rad/s、mrad/h 等。

3. 当量剂量 生物组织的吸收剂量相同而射线种类、能量及照射条件不同时,生物学效应可有程度上的明显差别。这是因为不同的情况下,射线释放的能量在组织中的分布可以明显不同。在辐射防护中,为了能够把人体所受各种电离辐射剂量所诱发的有害效应的几率或严重程度统一衡量,引入“当量剂量”(equivalent dose, $H_{T,R}$)。

在 SI 中,当量剂量的单位是希沃特,简称希,用符号 Sv 表示。

它与专用单位雷姆(rem)的关系是:

$$1\text{Sv}=100\text{rem} \text{ 或 } 1\text{rem}=0.01\text{Sv}$$

当量剂量率是单位时间内当量剂量的增量。

它的 SI 单位为 Sv/h、mSv/a 等。相应的专用单位为 rem/h、mrem/h 等。

4. 有效剂量 放射工作者的身体各部位总是受到程度不同的照射(非均匀照射),而且人体各个器官或组织辐射效应的危险度也是不同的。所谓辐射效应的危险度,是指每单位剂量当量所诱发的随机性效应的发生率。为了计算各受照部位带来的总危险度,引进有效剂量(effective dose, E)。

有效剂量和当量剂量一样,也可以 Sv(或 rem)为单位。

四、知识拓展

诺贝尔奖是全世界的科学家梦寐以求的最高荣誉。科学家们在核物理方面孜孜不倦地探索和钻研,不断获得新的突破与进展,因此诺贝尔奖几乎贯穿了核物理的发展史,以下介绍几位核物理史上最著名的科学家。

1. 威尔姆·康拉德·伦琴 1901 年德国著名实验物理学家伦琴(图 1-1)有幸成为第一位诺贝尔物理学奖获得者。1895 年 11 月,伦琴在用阴极射线管做实验时,发现阴极射线中有一种穿透力很强的未知射线。这种射线能穿透 1 000 页的书本、3cm 厚的木板或 15mm 厚的铝板。为了写出实验报告,伦琴还拍下了一张用这种射线照射他夫人手骨的照片。伦琴把它命名为 X 射线,这为人类利用 X 射线诊断与治疗疾病开拓了新途径,开创了医疗影像技术的先河。此后电子计算机 X 射线断层成像(X-computed tomography, CT)、发射式计算机断层成像(SPECT 和 PET)、磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)、计算机放射成像(computed radiology, CR)、数字化放射成像(digital radiology, DR)等各种数字化医疗影像新技术不断涌现,组成了功能强大的放射成像信息系统(radiological information system, RIS),成为医疗诊断必不可少的重要基石。



图 1-1 德国物理学家伦琴

2. 安东尼·亨利·贝克勒尔 法国物理学家贝克勒尔(图 1-2),因发现天然放射性,获得了 1903 年度诺贝尔物理学奖。1896 年 3 月,贝克勒尔发现,与双氧铀硫酸钾盐放在一起但包在黑纸