

医学影像

辐射防护学

主编 强永刚 张林

 世界图书出版公司

医学影像辐射防护学

YIXUE YINGXIANG FUSHE FANGHUXUE

主 编 强永刚 张 林

编 者 (按姓氏笔画为序)

邹蓉珠 (广州市卫生防疫站)

张燕燕 (北京大学第三医院)

张 林 (广州市卫生防疫站)

柳 荫 (第四军医大学)

蒋宁一 (中山医科大学)

强永刚 (广州医学院)

 世界图书出版公司
广州·上海·西安·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

医学影像辐射防护学/强永刚, 张林主编. —广州: 广东世界图书出版公司, 2001. 7

ISBN7-5062-5140-X

I. 医… II. ①强… ②张… III. 影像-诊断-辐射防护 IV. R14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 045557 号

医学影像辐射防护学

主编: 强永刚 张 林

广东世界图书出版公司 出版

印刷: 广东科普印刷厂

经销: 各地新华书店

发行: 广东世界图书出版公司

地址: 广州市新港西路大江冲 25 号

邮编: 510300

电话: 020—84451969

传真: 020—84464151

版次: 2001 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

规格: 787 mm × 1092 mm 1/16 印张 16.5 字数 405 千

印数: 1—3000

ISBN 7—5062—5140 —X/ R • 0025

出版社注册号: 粤 014

定价: 25.00 元

如有印装错误, 请寄回本公司调换。

内 容 简 介

本书是根据近年来国内外对医学影像辐射防护的研究成果结合教学实践的需要编写而成。全书共分 15 章，分别介绍了核物理基础及辐射防护常用量、电离辐射的生物学原理、辐射生物效应、电离辐射对人体造血和免疫系统的影响、放射病诊治、电离辐射防护与辐射源安全基本标准、放射性废物的治理、医学上应用的电离辐射防护和影像质量保证、内照射剂量估算和含放射性物质的物品的防护、营养保健与非电离辐射防护。

本书既注重理论的阐述，也收集了大量的调查数据、国家标准、国际标准和有关参考数据，因此该书可作为高等院校医学影像专业的试用教材，也可作为卫生管理部门放射防护培训教材以及临床医生和从事辐射工作人员的参考用书。

前 言

《医学影像辐射防护学》是研究医学影像中各种辐射对人体健康的影响,并研究拟定卫生防护措施的一门边缘学科,是预防医学的一个分支。它的内容涉及到物理学、核电子学、生物医学等多个领域。特别是近10年来,CT、ECT、数字减影、核磁共振和超声等影像诊断技术已深入到医学诊断的各个领域,使影像医学的防护范围从单一的电离辐射防护扩展到整个辐射领域。21世纪的医学影像学将成为医学和生物学中发展最快的学科之一。影像学的诊断方法将由以大体形态成像为主向生理、功能代谢成像转变,其对比增强由一般性向组织、疾病特异性转变,图像分析由“定性”向“定量”方向发展,诊断模式也由原来的胶片采像与阅读逐渐向数字采像和电子传输的无胶片方向转变。由于电子学、计算机等信息学科的飞速发展,医学图像的存储和传输通讯系统(PACS)、远程传输、介入放射学与微创伤外科学的相互融合,一个新的“网络影像学”时代即将到来。

我国的医学影像学发展很快,近10多年来,一些高等医学院校相继成立了医学影像学系或专业,改变了我国医学影像学人员主要靠中等卫生专业学校来培养的模式。他们中的部分毕业生已成为我国医学影像学科的技术骨干。然而,医学影像学的发展也对其专业人员提出了更高的要求,我国放射防护规定,新参加放射性工作的人员要进行放射防护的培训,考核合格并取得《放射工作人员证》才可从事放射工作。因此,医学影像学专业医师不仅要懂得自身的安全防护,而且还要懂得对患者的保护知识。患者是否需要接受放射学检查,完全取决于医生的职业判断,而患者接受剂量的大小则取决于职业放射人员的技术水平。有鉴于此,为医学影像专业学生开设放射防护课程已是当务之急。

目前,我国尚无一部适合医学影像专业使用的放射防护教材。1995年,我们编写了《医学辐射防护基础》一书,由陕西科技出版社出版并提供给有关单位试用。5年来辐射防护领域发展很快,特别是ICRP 60号出版物出版后,世界各国相继开始修订自己的辐射防护标准。我们收集了一些教学单位的反馈意见,参考了近年来国内外有关的资料,重新编写成了这本《医学影像辐射防护学》。书中增加了介入放射学的防护、内照射剂量学估算方法、放射性物品及消费品的防护、放射性工作人员的营养与保健等内容。

由于非电离辐射在医学影像专业的使用越来越多,鉴于目前尚缺少一个较好的“术语”来统一电离辐射与非电离辐射的概念,遂用“医学辐射防护”这一术语来概括医学上的电离辐射与非电离辐射的防护。

本书的编写和出版工作得到了广州医学院的领导和全体编者所在单位的大力支持。在此一并表示感谢。

由于编者的水平和阅历所限,谬误疏漏之处在所难免,恳请各位同行和读者给予指正。

编 者

2001年3月8日

目 录

第一章 医学核辐射物理基础及辐射防护常用量	(1)
第一节 原子结构与放射性核素	(1)
一、原子结构	(1)
二、X 射线	(1)
三、元素、核素、同位素和同质异能素	(3)
四、稳定性核素和放射性核素	(4)
第二节 原子核的衰变	(4)
一、原子核衰变类型	(4)
二、原子核衰变规律	(6)
第三节 辐射防护常用量及其单位	(7)
一、放射性活度 (A)	(7)
二、照射量 (X)	(7)
三、吸收剂量 (D)	(8)
四、比释动能 (K)	(8)
五、当量剂量 ($H_{T, R}$)	(9)
六、有效剂量 (E)	(10)
七、待积当量剂量 ($H_{T(t)}$) 与待积有效剂量 ($E_{(t)}$)	(11)
八、常用辐射剂量之间的关系	(12)
第二章 辐射的生物学作用	(13)
第一节 辐射能量损失与相对生物效应	(13)
一、辐射的概念、种类及与物质的相互作用	(13)
二、传能线密度与相对生物效应	(16)
第二节 电离辐射的生物学作用	(18)
一、电离辐射的直接作用	(18)
二、电离辐射的间接作用	(19)
三、直接作用和间接作用的相对效应	(20)
第三节 生物靶的调节作用	(21)
一、效应	(21)
二、氧效应	(21)
三、防护效应	(23)
四、温度效应	(24)
五、抗自由基的氧化酶系效应	(24)
第四节 影响电离辐射生物学作用的主要因素	(26)
一、与辐射有关的因素	(26)
二、与机体有关的因素	(31)

第五节 辐射损伤与修复的分子生物学基础·····	(35)
一、基因组 DNA 靶·····	(36)
二、基因组 DNA 靶区部位分布·····	(36)
三、核酸双链断裂的生物学结果·····	(36)
四、DNA 损伤的化学修复·····	(38)
第三章 电离辐射的生物效应·····	(45)
第一节 电离辐射的生物效应分类·····	(45)
第二节 电离辐射对靶细胞的损伤·····	(45)
第三节 电离辐射致突变及致癌效应·····	(47)
一、电离辐射致突变效应·····	(48)
二、电离辐射致癌效应·····	(48)
三、电离辐射致癌的剂量—效应关系·····	(49)
四、电离辐射致癌的潜伏期·····	(50)
五、影响电离辐射致癌的主要因素·····	(51)
第四节 电离辐射对染色体的损伤·····	(53)
一、人类染色体·····	(53)
二、辐射诱发染色体畸变·····	(54)
三、染色体畸变的生物学作用·····	(55)
第四章 电离辐射的几个特殊效应·····	(57)
第一节 胎内照射效应·····	(57)
一、胎内照射效应分类·····	(57)
二、孕妇受照发生的胎儿小头症及智力发育障碍·····	(58)
三、胎内照射的发育延迟·····	(59)
四、胎内受照的致癌效应·····	(60)
第二节 放射性不孕症·····	(61)
一、生殖细胞受照的变化·····	(61)
二、放射性不孕症的临床特征·····	(61)
第三节 辐射所致的寿命缩短·····	(62)
第四节 电离辐射的遗传效应·····	(63)
一、辐射对人类产生的遗传效应·····	(63)
二、对辐射遗传效应的综合评价·····	(64)
三、在评价辐射的遗传危害时应注意的几个问题·····	(64)
第五节 Hormesis 效应·····	(65)
第五章 电离辐射对造血和免疫系统的作用·····	(66)
第一节 电离辐射对造血系统的影响·····	(66)
一、血液系统辐射损伤特点·····	(66)

二、电离辐射致出血综合征·····	(67)
三、造血系统辐射的近期后果及远期效应·····	(68)
第二节 电离辐射对免疫系统的影响及并发感染·····	(69)
一、免疫系统的放射敏感性·····	(69)
二、急性全身照射的免疫效应·····	(71)
三、急性放射损伤并发感染及其特点·····	(73)
四、慢性照射的免疫效应·····	(74)
第六章 外照射急性、亚急性放射病和慢性放射损伤·····	(78)
第一节 外照射急性放射病·····	(78)
一、病因·····	(78)
二、临床表现·····	(79)
三、急性放射病分型·····	(81)
四、外照射急性放射病的诊断·····	(84)
五、外照射急性放射病的治疗·····	(86)
第二节 外照射亚急性放射病·····	(88)
一、外照射亚急性放射病临床特点·····	(88)
二、诊断与鉴别诊断·····	(89)
三、治疗原则·····	(89)
第三节 外照射慢性放射性损伤·····	(90)
一、外照射慢性放射病·····	(90)
二、慢性放射性皮肤病·····	(94)
三、放射性白内障·····	(95)
第七章 电离辐射防护与辐射源的安全标准·····	(99)
第一节 射防护的目的·····	(99)
第二节 辐射防护的基本原则·····	(99)
一、实践的正当化·····	(99)
二、防护的最优化·····	(99)
三、个人剂量限值·····	(100)
第三节 电离辐射防护的基本标准·····	(100)
一、放射防护基本限值·····	(100)
二、放射防护的推定限值·····	(102)
三、教学和事故等照射的防护要求·····	(103)
第四节 辐射防护体系中的干预水平·····	(105)
第五节 医疗照射剂量的约束·····	(106)
一、医疗照射指导水平·····	(106)
二、医疗照射对非患者受照的约束·····	(107)
第六节 国民的安全文化素养·····	(110)

第七节 放射性工作场所及辐射危险标志	(110)
一、放射性工作场所及工作条件	(110)
二、开放源防护的基本措施	(113)
三、开放源的安全系数操作规程	(116)
四、放射危险标志物	(117)
第八章 放射性废物的治理	(118)
第一节 概述	(118)
一、放射性废物及其特点	(118)
二、放射性废物治理的目的、基本原则和途径	(118)
三、放射性废物处理指标	(118)
第二节 放射性废液的治理	(119)
一、低放射性废液的处理	(119)
二、中、高放射性废液的处理	(120)
第三节 气载放射性废物的治理	(121)
第四节 固体放射性废物的治理	(122)
一、低放射性固体废物的处置	(122)
二、中、高放射性固体废物的处置	(122)
第五节 医用放射性废物的处理	(123)
第九章 医用电离辐射的防护	(124)
第一节 辐射源与辐射场	(124)
一、X 辐射源物理特性和辐射量估算	(124)
二、 γ 辐射源及其辐射量估算	(127)
第二节 我国医疗照射及其现状	(133)
第三节 医疗照射防护的基本原则	(137)
一、医疗照射的正当化	(137)
二、医疗照射的最优化	(138)
第四节 医用封闭源的防护	(139)
一、外照射防护的基本措施	(139)
二、医用 X、 γ 射线的衰减及屏蔽厚度估算方法	(140)
三、医用 X 射线或 γ 射线的常用屏蔽材料	(165)
第十章 介入放射学的安全与防护	(169)
第一节 操作医师和患者所受到的辐射剂量	(169)
一、介入放射操作者所受到的辐射剂量	(169)
二、患者所受到的辐射剂量	(169)
第二节 介入放射学的人体生物效应	(174)
一、对介入操作者血液和免疫系统的影响	(174)

二、对介入操作者的遗传学影响·····	(175)
三、介入诊疗患者的辐射损伤·····	(175)
第三节 介入放射学的辐射剂量估算方法·····	(175)
一、介入诊疗病人的剂量估算·····	(176)
二、介入操作者个人剂量估算·····	(177)
第四节 介入放射学的防护·····	(178)
一、介入操作者的防护措施·····	(178)
二、介入放射学防护用品设计的基本要求·····	(178)
三、介入操作的个人防护用品和设施·····	(178)
四、影响介入放射学辐射剂量的主要因素·····	(180)
第五节 介入放射学中的规范化管理·····	(181)
一、介入放射学科室的组成·····	(181)
二、介入放射学工作者的基本要求·····	(181)
三、介入放射操作室的布局和基本条件·····	(182)
四、介入放射学诊疗质量保证的主要内容·····	(182)
 第十一章 医用 X 射线卫生防护及影像质量保证·····	(184)
第一节 医用 X 射线诊断的管理·····	(184)
第二节 对受检者的防护要求·····	(185)
第三节 医用 X 射线诊断工作人员的防护操作要求·····	(185)
第四节 医用 X 射线诊断的防护设施要求·····	(186)
第五节 医用 X 射线设备的一般防护监测·····	(186)
一、透视用 X 射线机的监测·····	(186)
二、摄影用 X 射线机的检测·····	(190)
第六节 医用 X 射线诊断的质量保证及控制检测·····	(191)
一、射线诊断影像质量保证的基本条件·····	(192)
二、透视 X 射线机质量控制检测的主要指标及评价·····	(192)
三、摄影 X 射线机质量控制检测的主要指标及评价·····	(194)
四、X 射线 CT 机影像质量控制检测的主要指标及评价·····	(195)
 第十二章 放射性核素进入体内的剂量估算及防护·····	(197)
第一节 放射性核素进入人体的途径及排除·····	(197)
第二节 内照射剂量的估算·····	(199)
一、放射性核素摄入量的估算方法·····	(199)
二、内照射剂量的估算·····	(202)
第三节 内照射防护的一般措施·····	(203)
一、防止放射性物质经呼吸道进入体内·····	(203)
二、防止放射性物质经口进入体内·····	(203)
三、建立内照射监测系统·····	(203)

第十三章 含放射性物质制品、消费品及伴生 X 射线产品的防护	(209)
第一节 含放射性物质制品、消费品的基本特征.....	(209)
第二节 建筑材料和室内氡气的防护.....	(210)
一、建筑材料及其防护要求.....	(210)
二、室内氡及其防护.....	(211)
第三节 含放射性物品的其他防护要求.....	(213)
第四节 视屏装置对人体的安全与防护.....	(214)
一、视屏装置对人体的不良作用.....	(214)
二、视屏操作者的防护措施.....	(214)
第十四章 放射性工作人员的营养与保健	(216)
第一节 电离辐射对机体营养素的破坏作用.....	(216)
第二节 放射性工作人员营养需求量及特殊要求.....	(217)
一、放射性工作人员营养的特殊要求.....	(217)
二、放射性工作人员的营养需要量.....	(217)
第三节 有助于减轻辐射损伤的药品与保健品.....	(219)
第四节 放射性工作人员的健康管理.....	(221)
一、常规医学监督.....	(221)
二、放射工作人员的健康要求.....	(221)
三、特殊受照人员的管理.....	(222)
四、放射性工作人员的保健待遇.....	(222)
第十五章 医学影像非电离辐射的防护	(223)
第一节 射频辐射与微波辐射.....	(224)
一、射频对机体的作用及影响.....	(224)
二、射频与微波辐射危害的防护.....	(225)
第二节 激光.....	(226)
一、激光辐射对机体的影响.....	(227)
二、激光损伤的防护措施.....	(227)
第三节 超声波和核磁共振.....	(228)
一、超声波对机体的作用.....	(228)
二、核磁共振对机体的作用.....	(233)
附录一 我国现行有关放射医学与卫生防护法规题录	(236)
附录二 我国现行部分卫生防护法规题录	(240)
附录三 放射性核素毒性分组	(241)
附录四 国际计量单位与符号	(245)
主要参考文献	(249)

第一章 医学核辐射物理基础及辐射防护常用量

第一节 原子结构与放射性核素

一、原子结构

自然界中的一切物质都是由各种元素组成的，构成元素的基本单位是原子。19 世纪末期以前，大多数物理学家都认为原子是构成物质最小的、不能再分的微粒，直到 1895 年伦琴发现 X 射线，次年贝克勒尔又发现放射性现象以后，才打破了原来的看法，逐步揭示和认识了原子结构的微观奥秘。

1911 年，英国物理学家卢瑟福用一束高速带正电荷的 α 粒子流，轰击金属薄片，发现绝大多数 α 粒子穿过金属薄片而不改变方向，这说明原子的内部是很“宽敞”的，有些 α 粒子穿过金属薄片时方向稍有改变，个别粒子好象碰到一种极硬、不可穿过的东西一样被弹回来。这说明 α 粒子碰到了一种体积很小，带正电荷的物质，卢瑟福称之为“原子核”。

原子核 (atomic nucleus) 由 2 种质量几乎相等的基本粒子——质子 (proton; P) 和中子 (neutron; N) 组成。质子和中子统称为核子 (nucleon)。

质子带正电荷，与电子所带电荷数量相等，但符号相反。中子不带电荷。原子核内质子和中子数目之和即为原子质量数，用 A 表示。原子核内的质子数 (即核电荷数) 称为原子序数，用 Z 表示，原子核内的中子数为 A 减 Z。

国际上通常采用 A_ZX 表示各种核素，也常简化为 AX ，X 为某种元素符号，如 ${}^{16}O$ 、 ${}^{14}N$ 等。有些核素右上角加 m，表示该核素处于激发态，如 ${}^{99m}Tc$ 。

二、X 射线

1895 年伦琴在研究阴极射线时发现一种穿透本领很强的辐射，当时称为 X 射线 (X-ray)，后来又称为伦琴射线。经过较长的时间以后，人们才知道 X 射线是一种比紫外线波长更短的电磁波，它具有电磁辐射的一切特性。

X 射线是高速运动的电子与物质相互作用而产生的，这种过程通常在 X 射线管内进行 (图 1-1)。

图中 K 是阴极，被灯丝电源 E 加热后可以发射电子 (e)。A 是阳极，也称对阴极。在阴极和阳极之间加一约 10 万伏的加速电压 (V_0)，阴极产生的电子在强电场中加速，到达阳极时将具有很高的能量。这种高速电子与阳极的物质相互作用，便可产生 X 射线。在原子核物理学上，常用的能量单位是电子伏特 (eV)，其值为一个电子通过 1 伏特电势差时能量的改变。常用单位还有千电子伏 (keV)、兆电子伏 (MeV)。一般在通常的技术设备中，电子的能量约 100keV，但也有能使电子能量达到 1MeV 的 X 射线装置，用特殊的电子加速器可以获得能量更高的电子，这样的电子与物质相互作用，可以

获得波长更短的X射线。一般医用X射线的波长为 10^{-10}m 左右,对激发电压小于 120keV 产生的X射线叫软X射线,激发电压大于 120keV 产生的X射线叫硬X射线。

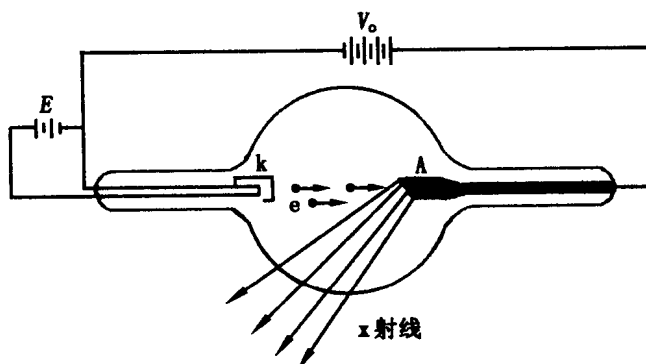


图 1-1 X射线管示意图

X射线管产生的X射线可分2类,一类X射线的光谱是连续的,另一类X射线的光谱是线状的。当电子与某种确定的阳极相互作用时,如果电子的能量没有超过一定的限度,则只发射连续光谱的X射线,当电子能量超过一定的限度后,除发射连续光谱的X射线外,还伴随着一种线状光谱的X射线,如图1-2所示。

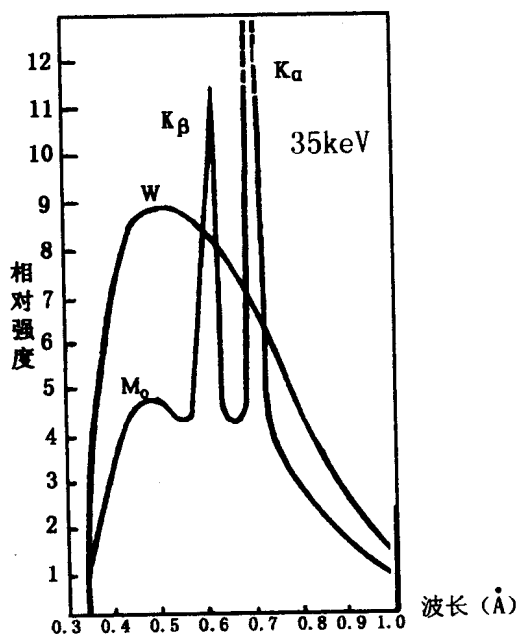


图 1-2 钨和钼的X线光谱

能量为 35keV 的电子还不能使钨靶发射线状光谱的 X 射线, 而只有连续光谱的 X 射线。然而, 能量为 35keV 的电子与钨靶相互作用, 除发射连续光谱的 X 射线外, 还叠加 2 条线状光谱的 X 射线, 这 2 条光谱线分别称为钨元素的 K_{α} 线和 K_{β} 线。要得到钨元素的 K_{α} 线, 则必须使电子的能量增加到 70keV 以上。同一种物质, 在 高能电子的作用下能够发射 2 种类型的 X 射线, 其机制是不同的。

(一) 轫致辐射

轫致辐射产生的 X 射线是连续能谱。当高能电子轰击阳极的原子时, 电子在原子核库伦场的作用下急剧减速, 将一部分动能以光子的形式辐射出来, 这种辐射称为轫致辐射 (bremsstrahlung)。连续能谱意味着产生 X 射线光子的能量是从零到一个最大值的范围, 最大值取决于加速电压的大小。

(二) 特征 X 射线

当电子能量超过某一数值而轰击阳极时, 所产生的 X 射线除连续光谱外, 还叠加一种线状光谱。线状光谱的频率与阳极物质的性质有关。各种阳极物质所产生的线状光谱的频率是固定的, 与电子的能量无关 (当电子的能量大于某一数值后), 因此把这种辐射称为特征辐射, 又称为特征 X 射线。图 1-2 中的 K_{α} 、 K_{β} 就是钨元素的特征 X 射线。

高能电子和阳极中的原子相碰撞, 把能量传给靶内原子, 使原子激发, 当激发态原子向较低能态跃迁时产生特征 X 射线, 其频率为:

$$f = (E_2 - E_1) / h$$

注: 式中 E_1 、 E_2 是原子跃迁前后 2 个量子态所对应的能量, h 为普朗克常数。

可见特征 X 射线是原子在 2 个能量相差很大的量子态之间的跃迁而产生的。对较重原子, 内层电子不可能过渡到邻近的壳层中。因为邻近的壳层也是被电子充满的, 所以原子内层的电子只能过渡到最外层的量子态上, 或者完全脱离原子的束缚, 而后一种情况通常是做得到的。高能电子将原子内层的电子击出原子以外, 在原子的内壳上留下一个电子空位, 其他外壳层的电子将进来填充, 在这个过程中也将产生特征 X 射线。

医疗诊断用 X 线机球管多属高真空热阴极电子式, 当高速运动的电子撞击阳极靶面时, 大约仅有 1% 的能量可转变为 X 射线, 绝大部分的能量将变为热能, 使阳极靶面温度增高, 故 X 射线球管不可能长时间连续工作。

三、元素、核素、同位素和同质异能素

(一) 元素 (element)

凡质子数相同的原子称为一种元素, 它们的原子序数相同, 因此具有相同的化学特性, 是组成不同物质的基本单位。但其原子核中的中子数可以不同, 因而物理特性可有某些差异。

(二) 核素 (nuclide)

不仅质子数相同, 而且中子数也相同, 因而质量数相同, 并处于同能量状态的原子, 称为一种核素, 例如 ^1_1H 、 ^2_1H 、 ^3_1H 、 $^{226}_{88}\text{Ra}$ 、 $^{99}_{43}\text{Tc}$ 分别为 5 种不同的核素。每种元素可以包括若干种核素, 目前已知的核素有 2300 多种, 分别属于 100 多种元素。

(三) 同位素(isotope)

凡属于同一种元素的不同核素,它们在元素周期表中处于相同的位置,质子数相同而中子数不同,称为元素的同位素,例如 ^1_1H 、 ^2_1H 和 ^3_1H 互为氢的同位素。

(四) 同质异能素(isomer)

核内中子数和质子数都相同,但核所处能态不同的核素互为同质异能素。如 $^{99}_{43}\text{Tc}^*$ 。

四、 稳定性核素和放射性核素

原子核内核子之间存在一种强大的引力,称为核力(nuclear force)。它是一种短程力,核子数越多,核力越弱。由于质子带正电,所以质子间又存在一种斥力,它是一种长程力,一般不受核子数的影响。原子核能否稳定,取决于以上2种内在力量是否平衡。当核内中子和质子数保持一定比例时,2种力量平衡,若没有外来因素(如高能粒子的轰击),不会发生核内成分或能级的变化,这种核素称为稳定性核素(stable nuclide)。目前把半衰期超过10亿年(10^9 年)的核素也归类于稳定性核素的范畴。核内质子数不变,中子数增加或减少都会使斥力大于引力,此时原子核乃处于不稳定状态,需通过核内结构或能级调整才能趋于稳定,这种核素称作不稳定性核素。这种核内结构或能级的调整称为核衰变。核衰变的同时,将释放出一种或一种以上的射线,这种性质叫做放射性。因此,不稳定核素又称作放射性核素(radioactive nuclide)。

放射性核素根据来源不同分为天然和人工两大类。现今广泛使用的放射性核素主要用人工方法制备,即由核反应堆、加速器或中子源产生的高能中子、带电粒子或 γ 光子轰击稳定性核素,引起核反应,使之成为富中子(中子相对过多)或贫中子(中子相对过少)的放射性核素。少数是从天然放射性核素的裂变产物中提取而得到的。

第二节 原子核的衰变

原子核自发地发生变化,放出射线而转变为另一种原子的现象叫核衰变(decay)。通常的外界条件不能改变核衰变的性质及速度。任何放射性核素在核衰变过程中都遵守电荷守恒、质量守恒和能量守恒定律。不同类型放射性核素的衰变方式虽各不相同,但按核衰变时放出射线的性质,主要有3种类型,即 α 、 β 衰变和 γ 跃迁。

一、 原子核衰变类型

(一) α 衰变

放射性核素的原子核释放出 α 粒子的衰变称为 α 衰变。一个原子核经 α 衰变后,核的电荷数减少2,即原子序数减少2(在周期表内向前移2格),质量数减少4。 α 粒子的本质是氦的原子核,它由2个质子和2个中子组成。 α 衰变的反应式如下:

$$^A_Z\text{X} \rightarrow ^{A-4}_{Z-2}\text{Y} + \alpha + Q \quad (1-1)$$

$$^{238}_{92}\text{U} \rightarrow ^{234}_{90}\text{Th} + ^4_2\text{He} + 4.8790 \text{ MeV}$$

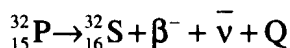
注：X 代表母核，Y 代表子核，Q 代表衰变时释放的能量。

在 α 衰变时放出的粒子所具有的能量是单一、不连续的。 α 衰变的天然放射性核素绝大部分属于原子序数大于 82 的核素。

(二) β 衰变

β 衰变包括 3 种类型： β^- 衰变、 β^+ 衰变、电子俘获。

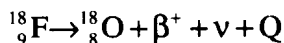
1. β^- 衰变 放射性核素的原子核释放 β^- 粒子转变为原子序数增加 1，但质量数不变的子体核素过程称为 β^- 衰变。 β^- 粒子实质上是电子，因为核内并无电子，所以这类衰变可以看成中子过多，使一个中子转变为一个质子和一个 β^- 粒子，并将 β^- 粒子释放出来。这种衰变使子体的质子多了 1 个，因此原子序数增加 1。



$\bar{\nu}$ 称为反中微子，在 β^- 衰变中伴随一起释放出来，它是一种静止质量近似于零的中性粒子。

在 β^- 衰变过程中，有 3 个生成物，即 ${}_{Z+1}^AY$ 、 β^- 及 $\bar{\nu}$ ；在衰变过程中的衰变能 Q 为这 3 个生成物所共同分有。由于这 3 种生成物的发射方向是任意的，因而每个生成物所分有的能量也是随机的。对于一次 β^- 衰变时所产生的 β^- 粒子能量来说，只能有从零到全部衰变能中的某一具体的能量值。但在群体发生 β^- 衰变时，在单位时间内 β^- 粒子会出现由零到全部衰变能的各种能量值，从而组成连续能谱。

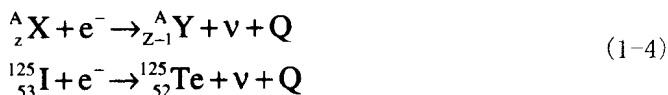
2. β^+ 衰变 放射性核素的原子核放出 β^+ 粒子转变为原子序数减少 1，但质量数不变的子体核素过程称为 β^+ 衰变。 β^+ 粒子的本质就是正电子 (e^+)。 β^+ 衰变可以看作是母体放射性核素的原子核中 1 个质子转变为中子的结果。在天然放射性核素中没有发生 β^+ 衰变的原子核，故这种衰变类型的核素都是人工放射性核素。



注：式中 ν 代表中微子。

β^+ 粒子的能谱与 β^- 粒子能谱一样也是连续的。

3. 电子俘获 放射性核素的原子核从核外壳层中俘获一个电子使核内的一个质子转变为中子，同时放出中微子的过程称为电子俘获。由于核内少了一个质子，原子核的原子序数减少 1。衰变过程可用下式表示：



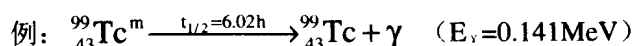
由上式可以看出这类衰变过程中只释放出一个中微子，所以它的能量是单一的。因为 K 壳层最靠近核，K 层电子被俘获的机率比其他壳层机率大。K 层的电子被俘获称

为 K 电子俘获，而 L 层的电子被俘获则称为 L 层电子俘获。

在发生电子俘获后，内层轨道上留下的电子空位，将由外层轨道上的电子以跃迁的形式填补，其多余的能量，或者以特征 X 射线发射出来，或者传给另一个电子使之获能而脱离轨道成为自由电子，这种现象又称为俄歇效应，这种电子则称为俄歇电子。俄歇电子是单能的。

(三) γ 跃迁和内转换

放射性核素的原子核产生 α 或 β 衰变后生成的子核常处于某个激发态能级上，极不稳定，往往即刻就向较低激发态能级或基态跃迁。在此过程放出 γ 射线，但核内成分不变。这个过程称 γ 跃迁 (γ transition)。 γ 射线的能量近似地等于产生跃迁前、后能级间的能量差。绝大多数原子核处于激发态的时间十分短暂 ($<10^{-11}$ 秒)，而难以单独测定。但有些核在激发态停留时间较长，可以把 γ 跃迁的半衰期单独测量出来。这种半衰期较长的激发态可称为同质异能态。对这类可以测出半衰期的 γ 跃迁称为同质异能跃迁。处于同质异能态的原子核叫做同质异能素，它的 γ 跃迁过程可用下式表示：



注： ${}^{99}_{43}\text{Tc}^m$ 是 ${}^{99}_{43}\text{Tc}$ 的同质异能素。

有些原子核进行 γ 跃迁时不放出 γ 射线，而把激发态跃迁到较低激发态或基态时释放出来的能量直接交给核外壳层电子（主要是 K 层电子），使该电子释放出来成为自由电子，这个过程称为内转换。释放出来的电子称为内转换电子 (internal conversion electron)，它的能量是单一的，在发生内转换现象后由于内壳层中出现空位，外层电子向内层填补，还会发生特征 X 射线或俄歇电子 (auger electron)。

二、 原子核衰变规律

放射性核素在单位时间内衰变的原子核数与当时存有的原子核总数呈正比，每一种放射性核素都有自己固定的单位时间内衰变百分比，这个百分比叫做衰变常数 (λ)，是放射性核素的重要物理特征参数。

单位时间内原子核衰变的数量定义为放射性活度。一定量放射性核素的原子核数随时间而减少，因此放射性活度随之而变化，其变化规律如下：

$$I_t = I_0 e^{-\lambda t} \quad (1-6)$$

式中 I_0 为初始时间 ($t=0$) 时的放射性活度， I_t 为经过时间 (t) 以后的放射性活度， e 是自然对数的底数 (2.718)。这一公式表明放射性活度随时间按指数规律减少。放射性活度减少至一半所需要的时间称作物理半衰期 ($T_{1/2}$)，在实际工作中它比衰变常数 λ 更常用。数学推导很容易证明：

$$T_{1/2} = 0.693/\lambda \quad (1-7)$$

故放射性活度衰变规律也可表达为：

$$I_t = I_0 e^{-0.693t/T_{1/2}} \quad (1-8)$$