



高等医药院校教材

供基础、预防、临床、口腔医学类专业用

放射损伤防治学

主编 曾桂英



第四军医大学出版社

放射损伤防治学

主 编 曾桂英

副主编 任东青 郭国桢

主 审 郭 鹞

编 者 (按姓氏笔画为序)

方恒虎 任东青 李 静 李康樗

张 杰 张李燕 陈永斌 赵 涛

金 成 郭万峰 郭国桢 曾丽华

曾桂英 谢学军 魏丽春

第四军医大学出版社

内 容 提 要

本书主要介绍放射损伤的基本理论和损伤的防治。其内容包括核物理基础,不同剂量电离辐射对分子、细胞和组织的效应,肿瘤放射治疗的基本理论,急性放射病的诊断、治疗和预防,放射卫生防护基础,并结合平时需要编写了核武器的杀伤作用及其防护、核爆炸复合伤和核辐射事故的医学处理等内容,同时还介绍了放射性核素在医学领域的应用基础。本书既可作为医学院校和相关院校学生用教材,也可作为放射医学领域研究人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

放射损伤防治学/曾桂英主编. —西安:第四军医大学出版社,2004.3

ISBN 7-81086-037-2

I.放… II.曾… III.放射损伤-防治 IV. R818

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 018596 号

放射损伤防治学

主 编 曾桂英
责任编辑 徐文丽 王永春
出版发行 第四军医大学出版社
地 址 西安市长乐西路 17 号(邮编:710032)
电 话 029-83376765
传 真 029-83376764
网 址 <http://press.fmmu.sn.cn>
印 刷 西安力顺彩印有限责任公司
版 次 2004 年 3 月第 1 版 2004 年 3 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 15.5
字 数 350 千字
书 号 ISBN 7-81086-037-2/R·60
定 价 29.00 元

(版权所有 盗版必究)

前 言

放射损伤防治学是研究电离辐射对机体产生生物效应的机制,放射损伤的临床诊治和放射防护的学科。它与基础医学、临床医学、预防医学和军事医学中许多学科都有着密切的联系,是一门综合的边缘性学科。

从 1895 年伦琴发现 X 射线至今一个多世纪以来,电离辐射以它独特的物理特性在国防、工业、农业和医学等各个领域发挥它特有的作用。该领域的研究成果与我国国际地位的确立、国家综合实力的提高、科技的进步、人民生活水平的改善关系密切。但由于种种原因,国际国内核辐射事故时有发生,并有增加的趋势。在当今世界风云突变的形势下,尽管各种高新技术武器“层出不穷”,但核武器仍显示出强大的威慑力,成为各国军事实力的象征。尤其是在当今人们关注的反恐斗争中,核能源基地和设施的破坏,恐怖分子使用与核辐射相关的武器装备等均可造成人员的伤亡和周围环境的污染,给人们的健康带来危害。因此,为体现平战结合、军民两用的原则,着眼 21 世纪科学技术的发展,我们参考、收集了近年来发表的相关专业书籍和科研成果,编写了“防原医学”教材。经多年的教学实践,修改、整理后决定出版此书,并更名为“放射损伤防治学”。

该书介绍了电离辐射的来源、特性,电离辐射生物效应的基础,放射损伤的救、诊、治,同时还就突发性核事件的应急救援和放射防护等问题作了概述。其目的在于将较新的研究进展介绍给读者,以启发思维,促进创新。此书可作为医科院校学生和核事故医学应急培训班教材,也可作为从事放射医学、放射生物学和放射防护专业人员的参考资料。由于本书内容涉及多学科和多专业,加之编者水平限制和时间关系,难免存在错误之处,敬请各位同仁和读者提出宝贵的意见,在此表示衷心的感谢!

在本书的编写过程中,第四军医大学训练部给予了大力支持,军事医学科学院郭力生教授、郭勇教授、鲁华玉教授等提出了宝贵的意见,全体编写人员和编排人员付出了辛勤的劳动,在此一并致以诚挚的谢意!

编 者

2004 年 3 月 16 日

目 录

第一章 核物理基础	(1)
第一节 原子和原子核	(2)
一、原子和原子核	(2)
二、质量亏损和原子核结合能	(4)
三、核衰变及衰变规律	(5)
第二节 射线同物质的相互作用	(11)
一、带电粒子同物质的相互作用	(11)
二、X 和 γ 射线同物质的相互作用	(11)
三、中子同物质的相互作用	(16)
四、传能线密度和相对生物效应	(18)
第三节 辐射量及其单位	(19)
一、放射性活度及其单位	(19)
二、辐射剂量及其单位	(20)
第二章 电离辐射生物效应	(27)
第一节 电离辐射对生物大分子的作用	(27)
一、电离辐射与生物分子作用的基本原理	(27)
二、电离辐射对 DNA 的作用	(29)
三、电离辐射对 RNA 的作用	(33)
四、电离辐射对蛋白质、酶等的作用	(35)
第二节 电离辐射对细胞的作用	(36)
一、细胞和组织的辐射敏感性	(36)
二、电离辐射对细胞膜的作用	(37)
三、电离辐射对细胞周期的影响	(37)
四、染色体畸变	(38)
五、细胞死亡	(39)
六、细胞损伤的修复	(43)
第三节 电离辐射对组织器官的作用	(43)
一、电离辐射造血器官的作用	(43)
二、电离辐射胃肠道的作用	(46)
三、电离辐射神经内分泌系统的作用	(48)
四、电离辐射心血管系统的作用	(49)

五、电离辐射免疫系统的作用	(49)
第四节 电离辐射生物学效应的分类和影响因素	(50)
一、电离辐射生物学效应的分类	(50)
二、影响电离辐射生物学效应的因素	(51)
第五节 小剂量电离辐射效应	(53)
一、基本概念	(53)
二、小剂量一次照射效应	(54)
三、小剂量慢性照射效应	(55)
四、兴奋性效应和适应性反应	(56)
五、医学处理原则	(58)
第三章 肿瘤放射治疗基础	(60)
第一节 概述	(60)
一、放射治疗常用的放射源及放射治疗设备	(60)
二、放射治疗常用的照射方式	(61)
三、放射治疗中的时间 - 剂量关系	(61)
四、放射反应及损伤	(62)
第二节 肿瘤放射生物学	(62)
一、肿瘤放射治疗的生物学理论	(63)
二、肿瘤的辐射敏感性	(65)
第三节 肿瘤放射治疗的研究进展	(66)
第四章 核武器的杀伤作用及防护	(69)
第一节 核武器概述	(69)
一、核武器的爆炸原理及基本构造	(69)
二、核武器的威力和分类	(71)
三、核武器的爆炸方式	(72)
四、核武器的爆炸景象	(72)
五、外军使用核武器的基本观点	(74)
六、核武器的发展	(74)
第二节 核武器的杀伤破坏作用	(75)
一、光辐射及其杀伤破坏作用	(75)
二、冲击波及其杀伤破坏作用	(77)
三、早期核辐射及其杀伤破坏作用	(80)
四、放射性沾染及其杀伤破坏作用	(82)
五、核电磁脉冲	(87)
第三节 核武器的综合杀伤作用	(89)
一、核爆炸条件下人员可能发生的伤类和伤情	(89)

二、核武器的杀伤范围	(90)
三、影响核武器杀伤作用的主要因素	(90)
第四节 核武器损伤的防护	(91)
一、核武器杀伤因素可防性的分析	(91)
二、瞬时杀伤因素的防护	(92)
三、放射性沾染的防护	(94)
第五章 急性放射病	(99)
第一节 概述	(99)
一、发生条件	(99)
二、分型和分度	(99)
第二节 急性放射病的主要病理改变	(100)
一、骨髓型(造血型)放射病	(100)
二、肠型放射病	(102)
三、脑型放射病	(102)
第三节 临床表现	(103)
一、骨髓型放射病	(103)
二、肠型放射病	(106)
三、脑型放射病	(107)
四、中子急性放射病	(107)
五、急性放射病的发病学特点	(108)
第四节 诊断	(109)
一、早期分类	(109)
二、临床诊断	(111)
三、鉴别诊断	(114)
第五节 治疗	(115)
一、骨髓型放射病的治疗	(115)
二、肠型放射病的治疗	(123)
三、脑型放射病的治疗	(123)
第六节 药物预防	(123)
一、辐射防护剂的作用原理	(124)
二、几种主要的辐射防护剂	(124)
第六章 核爆炸复合伤	(127)
第一节 概述	(127)
一、复合伤的发生率	(127)
二、分类和伤情	(127)
三、复合伤的基本特点	(128)

第二节 复合伤的临床特点	(129)
一、以放射损伤为主的放射性复合伤	(129)
二、烧冲复合伤	(133)
第三节 诊断	(136)
一、对伤类伤情进行群体判断	(136)
二、在早期救治机构的分类和诊断	(136)
三、在医院的确定诊断	(138)
第四节 急救和治疗	(139)
一、急救	(139)
二、治疗	(140)
 第七章 慢性放射病	(143)
第一节 病因	(143)
第二节 临床表现	(144)
一、自觉症状	(144)
二、体征	(144)
三、实验室检查	(145)
第三节 诊断	(145)
一、诊断依据	(145)
二、分度诊断标准	(146)
三、鉴别诊断	(147)
第四节 预防与治疗	(148)
一、预防	(148)
二、治疗	(148)
三、处理原则	(150)
 第八章 放射卫生防护基础	(151)
第一节 概述	(151)
一、放射防护的任务	(151)
二、放射防护的目的	(151)
三、放射防护的基本原则	(153)
第二节 放射防护标准	(154)
一、放射防护标准的制定	(154)
二、我国现行的放射防护标准	(154)
三、剂量限值	(155)
四、表面污染控制水平	(157)
五、辐射工作场所的分级	(158)
第三节 放射卫生防护	(160)

一、外照射防护	(160)
二、个人卫生防护	(161)
三、表面污染的消除	(161)
四、放射性“三废”的处理	(162)
五、辐射监测	(162)
六、放射工作人员的健康检查	(164)
第四节 辐射事故的医学处理	(165)
一、辐射事故的分类和处理原则	(165)
二、辐射事故的医学处理	(165)
第九章 核辐射事故的医学应急处理	(169)
第一节 核辐射事故概述	(169)
一、定义	(169)
二、核辐射事故的分类	(169)
三、核辐射事故的分级	(170)
四、典型的核辐射事故	(171)
第二节 核辐射事故的基本特点	(173)
一、核事故的基本特点	(173)
二、辐射事故的基本特点	(176)
第三节 核辐射事故的医学应急处理	(177)
一、核事故的医学应急处理	(177)
二、辐射事故的医学应急处理	(183)
附录一 放射性核素在医学领域的应用	(186)
第一节 放射性核素在基础医学中的应用	(187)
一、放射性核素示踪技术	(187)
二、放射自显影术	(190)
三、体外放射分析技术	(193)
第二节 放射性核素在临床诊断中的应用	(196)
一、放射性核素体内检查法的诊断原理和特点	(197)
二、放射性核素显像的应用	(199)
三、体外检查法的诊断原理	(202)
第三节 放射性核素在临床治疗中的应用	(204)
一、 ¹³¹ I-MIBG 治疗肿瘤	(204)
二、骨转移肿瘤的治疗	(205)
三、 ¹³¹ I 治疗甲状腺功能亢进	(206)
四、放射性核素敷贴治疗	(207)
五、放射性核素导向治疗学	(207)

六、介入放射学	(208)
第四节 正电子发射计算机断层显像	(213)
一、原理	(213)
二、显像方法	(214)
三、应用范围	(214)
四、PET 检查的优缺点	(215)
附录二 放射性核素的毒性分组	(217)
附录三 专业名词英汉对照表	(220)

第一章 核物理基础

“辐射”(radiation)就广义而言,是指光和热向四周的放射现象。自然界中的辐射是多种多样的,通常将它分为电磁辐射(electromagnetic radiation)和粒子辐射(grainy radiation)两大类。

电磁辐射实质是电磁波,仅有能量,而无静止质量,通过在物质和空间的穿行将能量传递给相互作用的物质。根据电磁辐射的频率和波长的不同可分为无线电波、微波、红外线、可见光、紫外线、X射线和 γ 射线(表1-1)。

表1-1 电磁辐射谱

名 称	波长(真空中)	频 率(Hz)	能 量(eV)
无线电波	$10^4 \text{ m} \sim 1 \text{ m}$	$3 \times 10^4 \sim 3 \times 10^8$	$1.24 \times 10^{-10} \sim 1.24 \times 10^{-6}$
微波	$1 \text{ m} \sim 1 \text{ mm}$	$3 \times 10^8 \sim 3 \times 10^{11}$	$1.24 \times 10^{-6} \sim 1.24 \times 10^{-3}$
红外波	$1 \text{ mm} \sim 0.8 \mu\text{m}$	$3 \times 10^{11} \sim 3.7 \times 10^{14}$	$1.24 \times 10^{-3} \sim 1.24 \times 1.55$
可见光	$800 \text{ nm} \sim 380 \text{ nm}$	$3.7 \times 10^{14} \sim 7.9 \times 10^{14}$	$1.55 \sim 3.26$
紫外线	$380 \text{ nm} \sim 10 \text{ nm}$	$7.9 \times 10^{14} \sim 3 \times 10^{16}$	$3.26 \sim 1.24 \times 10^2$
X-射线	$10 \text{ nm} \sim 10^{-3} \text{ nm}$	$3 \times 10^{16} \sim 3 \times 10^{20}$	$1.24 \times 10^2 \sim 1.24 \times 10^6$
γ 射线	$10^{-3} \text{ nm} \sim 10^{-4} \text{ nm}$	$3 \times 10^{20} \sim 3 \times 10^{21}$	$1.24 \times 10^6 \sim 1.24 \times 10^7$

粒子辐射实际上是一些组成物质的基本粒子,或者由这些基本粒子构成的原子核。它包括电子、质子、 α 粒子、中子、负 π 介子和带电重离子等(表1-2)。它们既有能量,也有静止质量,通过消耗自己的动能把能量传递给相互作用的物质。

表1-2 粒子辐射的基本特性

辐 射	静止质量 (kg)	电 荷 (C)	应用的大致能量 (eV)	(J)
α 粒子或氦核	6.7×10^{-24}	3.2×10^{-19}	$1.0 \times 10^6 \sim 2.0 \times 10^8$	$1.6 \times 10^{-13} \sim 3.2 \times 10^{-12}$
β 粒子或电子(e^+ , e^-)	9.1×10^{-31}	$\pm 1.6 \times 10^{-19}$	$1.0 \times 10^1 \sim 1.5 \times 10^7$	$1.6 \times 10^{-15} \sim 2.4 \times 10^{-12}$
中子	1.7×10^{-27}	0	$2.5 \times 10^{-2} \sim 2.0 \times 10^4$	$4.0 \times 10^{-21} \sim 3.2 \times 10^{-15}$
质子	1.7×10^{-27}	$+1.6 \times 10^{-19}$	$1.0 \times 10^6 \sim 3.0 \times 10^{10}$	$1.6 \times 10^{-13} \sim 4.8 \times 10^{-9}$
氘核	3.3×10^{-27}	$+1.6 \times 10^{-19}$	$1.0 \times 10^6 \sim 2.0 \times 10^8$	$1.6 \times 10^{-13} \sim 3.2 \times 10^{-11}$
重离子(^{14}N)	2.3×10^{-26}	$+1.1 \times 10^{-18}$	$1.0 \times 10^6 \sim 2.0 \times 10^8$	$1.6 \times 10^{-13} \sim 3.2 \times 10^{-11}$
π^+ 介子	2.5×10^{-29}	$+1.6 \times 10^{-19}$	1.0×10^8	1.6×10^{-11}
π^- 介子	2.5×10^{-29}	-1.6×10^{-19}	1.0×10^8	1.6×10^{-11}

根据辐射与物质作用方式的不同,又将辐射分为电离辐射(ionizing radiation)和非电离辐射(non-ionizing radiation)。 α 粒子、电子(β 粒子)、质子等是带电粒子,在与物质相互作用时引起物质分子或原子的直接电离;而X射线、 γ 射线和中子本身虽不带电,但它们在物质

相互作用时可产生带电的粒子(次级粒子),引起物质的电离。所以,凡能引起物质的原子或分子发生电离作用的辐射,均称为电离辐射。由此可见,电离辐射不仅包括了粒子辐射,还包括了部分电磁辐射。与电离辐射不同,非电离辐射不引起物质分子或原子的电离,只能引起分子的振动、转动或电子能级状态的改变。紫外线及能量低于紫外线的电磁辐射都属于非电离辐射。

放射损伤防治学是研究各种来源的电离辐射作用于生物体产生的生物效应规律、特点,损伤的临床表现、救、诊、治和放射卫生防护的学科。因此,电离辐射的基本物理特性、与物质相互作用特点以及防护要点是本学科的基础。

第一节 原子和原子核

1895年德国物理学家伦琴(Wilhelm Conrad Roentgen)发现X射线,引起了物理学界的极大兴趣。第二年,法国的物理学家贝可勒尔(Henri Becquerel)发现铀盐能放射出一种肉眼看不见的射线,它能使黑纸包着的底片感光。1898年居里夫妇(Marie and Pierre Curie)成功地从提取过铀的沥青矿中分离出两种具有很强放射性的元素——镭(Ra, Radium)和钋(Po, Polonium),提出了“放射性”概念。居里夫人还发现镭可蜕变成氦和氢元素,同时放出能量。这些奇妙的现象使人们把注意力集中到了构成某一元素的最小单位——原子上。

一、原子和原子核

继1895年伦琴发现X射线,1898年居里夫妇发现镭和钋之后,人们就开始探索射线是怎样产生的。1897年汤姆逊(J.J. Thomson)提出电子(electron)来源于原子(atom);1911年卢瑟福(E. Rutherford)提出了原子的行星模型假设,认为原子是由电子和原子核组成;随后,波尔(N. Bohr)提出了量子假设,并在一系列事实的支持下,对原子结构行星模型进行了修正,使其具有更强的理论性,而且一直使用至今。

原子是一个很小的微粒,它的直径只有 10^{-8} cm左右,如果把一亿个氧原子排成一行,它们的长度不过1cm左右。但原子内部犹如极小的太阳系,中心是一个带正电的核心叫原子核(nucleus),其直径仅为原子直径的万分之一(即 $10^{-12} \sim 10^{-13}$ cm);周围是绕核作高速运动的带负电的核外电子,在原子核和核外电子之间存在着巨大的空间。正常情况下,由于原子核所带的正电荷量与核外电子所带的负电荷量相等,整个原子是呈电中性的。

原子的质量也是十分微小的。原子质量是以原子质量单位(atomic mass unit,符号U)来表示,一个原子质量单位相当于一个碳原子质量的 $1/12$,即 $1\text{U} = 1.6604 \times 10^{-27}\text{kg}$ 。一个氢原子的静止质量为 $1.6734 \times 10^{-27}\text{kg}$ (即相当于 1.0078U),较重的铀原子也只有 $3.951 \times 10^{-25}\text{kg}$ (即相当于 237.9547U)。

(一) 核外电子

核外电子带一个单位的负电荷($-1.6021 \times 10^{-9}\text{C}$,库仑, coulomb),束缚于原子内作自身旋转和绕核旋转,按能量高低分别处于核外不同的电子壳层(由内向外依次为K、L、M……)。

距核越近的电子受核的吸引越强,具有的能量越低;离核越远的电子受核的吸引越弱,具有的能量越高。正常情况下,原子中的电子总是尽先占据能量较低的能级。当核外电子都处在尽可能低的能级位置时的状态,称为基态(ground state),处于基态的原子是最稳定的。当原子受到外力的作用,壳层电子获得能量由低能级跳到较高能级,这种现象(过程)称为激发(excitation),这种能量较高的状态称为激发态(excited state)。处于激发态的原子是不稳定的,短时间内还会以某种方式释放出多余的能量回到基态,这种现象称为跃迁(transition)。如原子受到了巨大外力的作用,壳层电子吸收能量后射出轨道,脱离原子成为自由电子,原子成为带正电的离子,这种现象或过程称为电离(ionization)。

(二) 原子核

原子核由质子(proton)和中子(neutron)组成,通常将中子和质子统称为核子(nucleon)。质子带一个单位的正电荷,中子不带电,所以原子核内的质子数和核外电子数是相等的。

一种元素区别于另一种元素的重要标志是它的核电荷数,也就是它核内的质子数。凡核内具有特定质子数的同一类原子,统称为一种元素(element),如 ${}^1_1\text{H}$ 、 ${}^2_1\text{H}$ 、 ${}^3_1\text{H}$ 都是氢的元素,核内都有一个质子; ${}^{12}_6\text{C}$ 、 ${}^{13}_6\text{C}$ 为碳的元素,核内都有6个质子。通常把核内的质子数称为原子序数(Atomic number),用 Z 表示,代表各元素在元素周期表中的位置。

质子和中子的质量接近相等,质子的静止质量为 $1.6725 \times 10^{-27} \text{ kg}$ (即 1.0073 U),中子为 $1.6748 \times 10^{-27} \text{ kg}$ (1.0087 U)。核外电子的质量仅为质子质量的 $1/1837$,所以原子的质量绝大部分集中在原子核内。核内质子数和中子数的总和便决定了原子的质量,也被称为该元素的原子量(Atomic weight),用符号 A 表示。原子核内的中子数则为 $A - Z$ 。若用 X 代表元素符号,则 ${}_Z^AX$ 代表某元素原子核的组成。如 ${}^{14}_6\text{C}$,表示此碳元素的原子核内有6个质子(核外有6个电子),8个中子($14 - 6$),原子量为14,在元素周期表中排在第6位; ${}^{12}_6\text{C}$ 表示碳元素的另一种原子核,它核内质子数和在元素周期表中的位置与 ${}^{14}_6\text{C}$ 相同,不同的则是中子数为 $12 - 6 = 6$,原子量为12。因此,将原子核由特定质子数和中子数组成的原子称为核素(nuclide);原子核内质子数相同,中子数不同,在元素周期表内处于同一位置的多种核素,互称为同位素(isotope)。如 ${}^{12}_6\text{C}$ 、 ${}^{14}_6\text{C}$ 、 ${}^1_1\text{H}$ 、 ${}^2_1\text{H}$ 、 ${}^3_1\text{H}$ 分别为5种不同的核素,前两种为碳元素的同位素,后三种为氢元素的同位素。

在一个稳定的原子核内,中子和质子的数目是有一定比例的,它不会自发地放出射线,这类核素称为稳定性核素(stable nuclide),如 ${}^1_1\text{H}$ 、 ${}^{12}_6\text{C}$ 等。当核内的中子数和质子数的比例不合适或原子核内核子过多时,原子核将自动地放出某种粒子或射线,这种核素称为不稳定性核素,也称放射性核素(radioactive nuclide),如 ${}^3_1\text{H}$ 、 ${}^{14}_6\text{C}$ 、 ${}^{32}_{15}\text{P}$ 等,这类放射性核素的原子核是粒子辐射的重要部分,也是电离辐射的重要来源。

放射性核素根据来源不同分为人工放射性核素(artificial radioactive nuclide)和天然放射性核素(natural radioactive nuclide)。在医疗、工业生产中使用的放射性核素大多为人工放射性核素,如 ${}^3_1\text{H}$ 、 ${}^{14}_6\text{C}$ 、 ${}^{32}_{15}\text{P}$ 、 ${}^{60}_{27}\text{Co}$ 等;在核能的和平利用中,天然放射性核素较多,如 ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ 、 ${}^{235}_{92}\text{U}$ 、 ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ 等。

核电荷数、质量数都相同,但原子核所处的能量状态不同的核素互称为同质异能素。例如 ${}^{99\text{m}}_{43}\text{Tc}$ 和 ${}^{99}_{43}\text{Tc}$ 两种核素的核电荷数,质子数都相同,只是两者的能量状态不同, ${}^{99\text{m}}_{43}\text{Tc}$ 处于高能态,而 ${}^{99}_{43}\text{Tc}$ 处于较低的能态,故它们互称为 Tc (锝)的同质异能素。

二、质量亏损和原子核结合能

(一)质量亏损

从理论上讲,原子核的质量应为 Z 个质子质量和 $A - Z$ 个中子质量之和,但实验发现核的静止质量小于 Z 个质子和 $A - Z$ 个中子的静止质量之和,也就是说:

$$Zm_p + (A - Z)m_n - M_m > 0 \text{ 或 } \Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M_m$$

(M_m :核的质量, m_p :质子质量, m_n :中子质量)

核子组成原子核后减少的静止质量 Δm 称为核的质量亏损。质量亏损现象之所以产生,是由于当许多自由存在的单个核子相互靠近而结合成原子核时,释放出大量的能量。也就是在许多核子(中子和质子)结合成核的过程中,有一部分静止能量转化为运动能量,因而按照相对论,同时也有一部分静止质量转化为运动质量,发生静止质量的减少,即质量亏损。

以氢核为例:两个中子和质子的静止质量为 $2(m_p + m_n)$,即为 $2 \times (1.00729 + 1.00867) = 4.03192(\text{U})$,而氢原子核的实际质量 M_m 为 $4.00260 - 0.00091$ (两个核外电子的质量) = $4.00169(\text{U})$:质子和中子合成氢核后,氢核静止质量较 $2(m_p + m_n)$ 减少了 $\Delta m = 4.03192 - 4.00169 = 0.03023(\text{U})$,即氢核的静止质量亏损了 0.03023 U 。

(二)原子核结合能

质量和能量是物质同时具有的两种属性,任何具有一定质量的物质必然与一定的能量相联系。

设: E = 能量(J), M = 质量(kg), C = 光速($3 \times 10^8 \text{ m/s}$),则 $E = MC^2$

在任何有能量变化的场合总是随着有质量的变化,同时如果任何物质的质量改变了,那么它相应的能量也发生改变。

据爱因斯坦质能定律,前面提到的氢核的静止能量 $E_m = 2(m_p + m_n)C^2$,运动质量及相应的能量皆为零。当氢核的静止质量减少 Δm 后,静止能量 $M_m C^2$ 也变小了,以能量的形式释放出来($\Delta E = \Delta m C^2$),因而亦有 $\Delta m = \Delta E / C^2$ 的静止质量变为运动质量。很明显,前后比较,总质量、总能量是守恒的,但发生了状态的转换。中子和质子在原子核合成过程中,一部分静止能量以辐射或其它形式释放出来,因而发生静止质量的亏损,这种由若干个核子结合成原子核时释放出来的能量叫做该原子核的结合能(binding energy of nucleus)。结合能是核子在形成核的过程中所放出的能量,它的大小与该原子核形成以后的稳定程度有密切关系,结合能越大,表示核子结合成原子核时放出的能量越大,这个核结合得越紧,该核就越稳定。但进一步分析发现,用原子核的结合能来表征核的稳定程度是不确切的。例如: $^{23}_{11}\text{Na}$ 的结合能为 186.44 MeV (eV:电子伏特,为能量单位,1电子伏特是1个电子经过1伏特电位差时所获得的动能,相当于 1.8×10^{-12} 尔格),而 $^{238}_{92}\text{U}$ 的结合能为 1780 MeV ,后者明显大于前者,但不能说后者较前者稳定。因为两者的核子数不同,前者 186.44 MeV 仅是23个核子放出的,而后者 1780 MeV 却是238个核子放出的。因此为了考察核的稳定程度,引出平均结合能:核子结合成原子核时平均每个核子释放出的能量叫该原子核的平均结合能。平均结合能代表该核的稳定程度,平均结合能越大,则核就越稳定。

$$\text{平均结合能} = \frac{\text{核的结合能}}{\text{核子数}}$$

${}_{11}^{23}\text{Na}$ 核的平均结合能为 8.11MeV , 而 ${}_{92}^{238}\text{U}$ 核的平均结合能为 7.5MeV 。按此公式计算出核素的平均结合能, 以质量数 A 为横坐标, 平均结合能为纵坐标作图, 则得图 1-1 的平均结合能曲线。

从曲线可以看出, 轻核的平均结合能较小, 中等核的平均结合能大体相同约为 8MeV , 而重核的平均结合能又略小; 所以中等质量大小核素的原子核是比较稳定的, 而轻核和重核的原子核是不稳定的。根据平均结合能曲线可看出, 获得核能有两种途径: 即①使重核分裂为两个中等质量的核, 由于重核的结合能较中等核小, 所以当重核分裂为两个中等质量大小的核时要放出能量; ②使两个轻原子核聚合成一个较重的原子核时, 将会释放更大的能量。

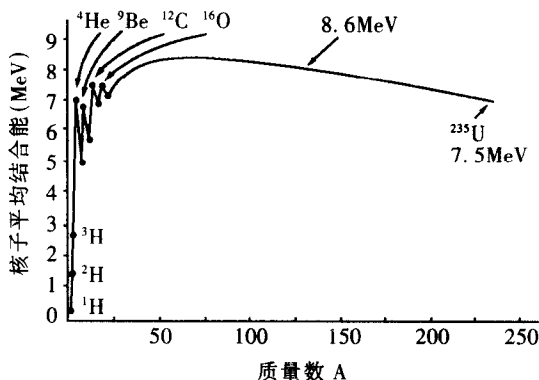


图 1-1 核子平均结合能曲线

三、核衰变及衰变规律

(一) 放射现象

上世纪末, 发现铀矿石能够自发地放出肉眼看不见的、穿透能力较强的射线, 它能使包在黑纸里的照片底片感光, 成为天然放射现象, 物质的这种性质叫做天然放射性。不久, 又发现镭、钋等元素的天然放射性。那么, 放射性物质放射出来的究竟是些什么东西呢? 为此, 安排了下面的实验: 在铅盒内放一点含有镭的放射性物质, 铅盒上开一小孔, 再把这个装置放在强磁场中, 发现镭所放射出来的射线, 在磁场中分成三种独立的射线: 一种向左, 一种向右, 一种没有偏转, 仍按直线方向射出去。这样就知道第一种带正电, 第二种带负电, 第三种不带电(图 1-2)。这三种射线依次叫 α 射线(甲种射线)、 β 射线(乙种射线)和 γ 射线(丙种射线)。以后的实验证明, α 射线是氦的原子核, 是由两个中子和两个质子组成的基团; β 射线是电子; γ 射线是电磁波。它们都是从原子核内释放出来的。

(二) 核衰变类型和射线性质

放射性核素的原子核是不稳定的, 能自发地放出某种粒子或射线, 同时发生核结构的改变, 这种现象或过程称为核衰变(nuclear decay), 放射性核素具有的这种特性叫做放射性。

由于原子核内核子数不同, 中子数和质子数比例不同, 放射性核素原子核放出射线或粒子种类也不相同, 即它们衰变类型也不相同。

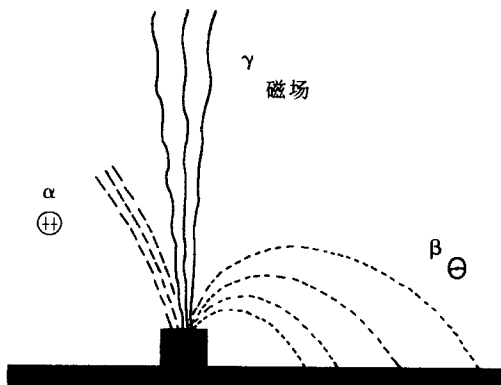
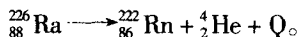


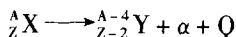
图 1-2 α 、 β 、 γ 射线在磁场中的偏转

1. α 衰变和 α 粒子 当原子核内核子过多时, 核结构常是不稳定的, 将会自发地放出带

正电的高速粒子流(从原子核内射出的初速度为 $10^9 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) - α 粒子,使原子核回复到稳定的状态。如:



放射性核素的原子核放出 α 粒子而变成另一种核素的原子核的过程,称为 α 衰变(alpha decay)。原子核发生 α 衰变后,核电荷数减少 2,在元素周期表内向左移 2 位,质量数减少 4(图 1-3)。如果用 ${}_Z^AX$ 代表衰变前的原子核(母核), ${}_{Z-2}^{A-4}Y$ 代表衰变后的原子核(子核),则 α 衰变可用下式表示:



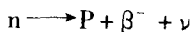
原子序数大于 82 的天然放射性核素常发生 α 衰变,这也是重元素原子核的特性之一。

α 粒子又称 α 射线(α -ray),是带两个单位正电荷的高速粒子流,实质是氦的原子核,由两个质子和两个中子组成,质量为 4U,写作 ${}_2^4\text{He}$ 。 α 射线的穿透能力很弱,如能量在 5MeV 的 α 粒子,能被 2mm 厚的铝泊全部吸收;能量低于 10MeV 的 α 射线,在空气中的平均射程小于 10cm,在肌肉组织中仅为 30~40 μm 。天然放射性核素放出的能量最高的 α 射线,最多也只能穿过人体皮肤的角质层。因此,可以不考虑 α 射线的外照射危害,但由于它带电荷多,电离能力强,所以要特别注意防止 α 射线可能造成的体内照射。

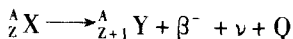
α 射线来源于放射性核素原子核的 α 衰变。

2. β 衰变和 β 粒子 放射性核素原子核的核电荷数改变 ± 1 ,而质量保持不变的核转变称为 β 衰变(beta decay)。 β 衰变包括 β^- 、 β^+ 衰变及电子俘获三种常见类型。

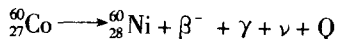
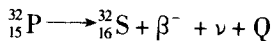
(1) β^- 衰变 原子核内的中子过多时,过多的中子将自发地转化为质子,同时放出负电子(放出速度为 $1 \times 10^{10} \sim 3 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)和中微子,这种转变叫做 β^- 衰变。可以表示为:



原子核在发生 β^- 衰变后,核电荷数增加 1,在元素周期表中右移一位,而质量保持不变(图 1-4)。如果用 ${}_Z^AX$ 和 ${}_{Z+1}^AY$ 分别代表母核和子核,则 β^- 衰变可用下式表示:

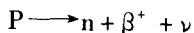


例如:



Q 代表衰变能, ν 代表中微子,静止质量为零(据目前的报道认为中微子具有一定的质量)。

(2) β^+ 衰变 当原子核内质子过多时,过多的质子将会自动地转化为中子,同时放出一个正电子和中微子,这种衰变叫 β^+ 衰变。可用下式表示:



原子核发生 β^+ 衰变后,核电荷数减少 1,在元素周期表内左移一位,质量保持不变(图 1-5)。 β^+ 衰变可用下式表示:

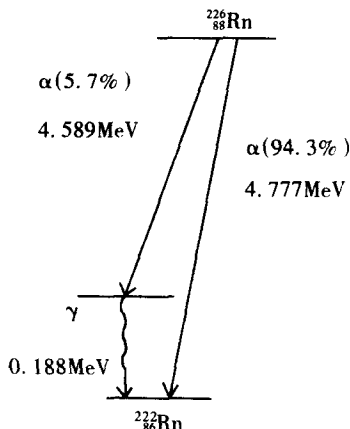
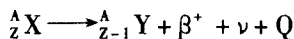


图 1-3 ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ 的衰变简图



只有人工放射性核素才有 β^+ 衰变发生。如：

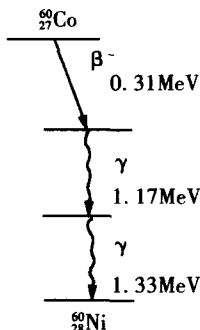
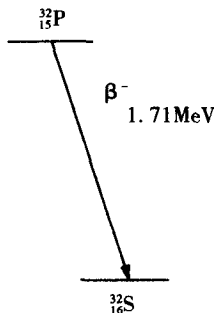
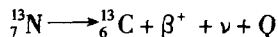


图 1-4 ${}_{15}^{32}\text{P}$ 和 ${}_{27}^{60}\text{Co}$ 的衰变简图

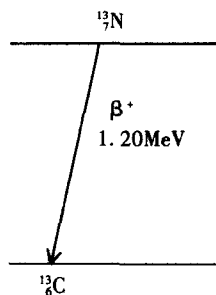


图 1-5 ${}_{7}^{13}\text{N}$ 衰变简图

从以上两个衰变式我们可看到,无论是 β^- 衰变还是 β^+ 衰变,都有三个生成物: ${}_{Z+1}^AY$ (${}_{Z-1}^AY$), β^- (β^+) 和 ν ,因此在衰变过程中所释放出来的衰变能将由这三个粒子分配。因为这三个粒子发射方向所成的角度可以是任意的,所以每个粒子带走的能量是不固定的。由于子核的质量远远大于 β^- (β^+) 粒子的质量,因此衰变能绝大部分被 β^- (β^+) 粒子和中微子 ν 带走,所以 $Q \approx E_\beta + E_\nu$, E_β 可以从最小的零值 ($E_\nu = Q$) 到最大的 Q 值 ($E_\nu = 0$), 形成一个连续能谱(图 1-6)。

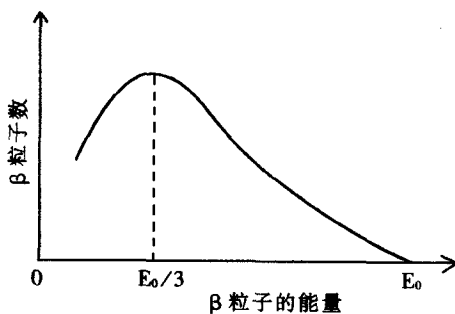


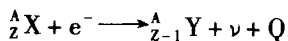
图 1-6 β 粒子能谱

由图 1-6 可见 β 粒子的能量有一个最大值 $E_{\beta\text{最大}}$, 在小于 $E_{\beta\text{最大}}$ 的粒子中, 以能量约为 $\frac{1}{3}E_{\beta\text{最大}}$ 的粒子数最多, β 粒子的平均能量约等于 $\frac{1}{3}E_{\beta\text{最大}}$ 。通常所说的放射性核素放出的 β 粒子的能量均指最大能量。

(3) 电子俘获 某些不稳定的原子核可以俘获一个绕行电子而使核里的一个质子变成中子, 同时放出中微子。即



因为俘获 K 壳层上的电子的可能性最大, 所以这样的衰变有时称作 K 电子俘获。在发生电子俘获的核衰变中, 子核的质量不变, 只是原子序数减少 1, 其衰变过程可用下式表示:



例如: ${}_{26}^{55}\text{Fe} + e^- \longrightarrow {}_{25}^{55}\text{Mn} + \nu + Q$

β 粒子分为 β^+ 和 β^- 两种, 即为正电子和负电子。 β^- 粒子又称 β 射线 ($\beta\text{-ray}$), 是带一个单