

电离辐射损伤防护与 中药抗辐射研究

DIANLIFUSHE

SUNSHANG FANGHU YU

ZHONGYAO KANGFUSHE YANJIU

主 编◎孟威宏 史国兵



人民军医出版社

PEOPLE'S MILITARY MEDICAL PRESS

电离辐射损伤防护 与中药抗辐射研究

DIANLIFUSHE SUNSHANG FANGHU
YU ZHONGYAO KANGFUSHE YANJIU

主 编 孟威宏 史国兵

副主编 赵庆春 安 晔

编 委 (按姓氏笔画排序)

马宏达 王 蓉 孙学惠 何 进
陈宇峰 赵明宏
夏明文



人民军医出版社

PEOPLE'S MILITARY MEDICAL PRESS

北 京

图书在版编目(CIP)数据

电离辐射损伤防护与中药抗辐射研究/孟威宏,史国兵主编. —北京:人民军医出版社, 2011.5

ISBN 978-7-5091-4661-3

I. ①电… II. ①孟… ②史… III. ①电离辐射—辐射防护—研究②抗辐射性—中药学—研究 IV. ①R14②R28

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 056832 号

策划编辑:张忠丽 郝 涛 孙丰年 文字编辑:赵 海 吴 倩 责任审读:黄栩兵

出版人:石 虹

出版发行:人民军医出版社

经销:新华书店

通信地址:北京市 100036 信箱 188 分箱

邮编:100036

质量反馈电话:(010)51927290;(010)51927283

邮购电话:(010)51927252

策划编辑电话:(010)51927300-8230

网址:www.pmmp.com.cn

印刷:京南印刷厂 装订:桃园装订有限公司

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:29 字数:712 千字

版、印次:2011 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

印数:0001~1200

定价:130.00 元

版权所有 侵权必究

购买本社图书,凡有缺、倒、脱页者,本社负责调换

前 言

人类从来没有像现在这样遭受如此多的辐射,原因就在于辐射源无处不在,如形形色色的家用电器,种类繁多的电子办公与医疗设备,每天近距离接触的房屋装饰材料,赖以生存的自然环境与周边环境,无一不在或多或少、或强或弱地发散出电离辐射或电磁辐射。随着不可再生能源石油、煤炭、天然气等的日益枯竭,人类和平利用核能的步伐愈发加快,各类核反应堆、核电站相继投入使用,尽管各国采取了相应的安全措施,但就在前苏联切尔诺贝利核事故的阴影尚未从全人类的脑海中挥去之时,发生在日本福岛的核危机,再次向我们敲响核安全的警钟。恐怖主义、分裂主义、极端主义等三股势力,部分有核国家政局动荡不安,又使得核威胁有增无减。了解、认识电离辐射的基本原理与基础理论,掌握电离辐射所致的生物学效应,以及由此产生的损伤种类和防护措施,已成为世界各国临床医学、核医学、放射医学和药学工作者的一项重要研究内容。本书将“电离辐射损伤与防护”这一理念贯穿始终,尽可能地将上述学科的系统理论与知识,集而优之呈献给读者。与此同时,鉴于核威胁的存在,而中医学又是中华民族灿烂文化中的瑰宝,如何发挥我国传统中医学这一独特的资源优势,将其用于预防和治疗电离辐射所致损伤与疾病,更是我国医药科技工作者研究的重点之一。为此,本书利用较大篇幅详尽论述了近年来有关中药抗辐射损伤机制、中药抗辐射活性成分、代表性中药抗辐射的最新研究成果,旨在帮助和引导大家进一步开发中药制剂用于抗电离辐射。

本书力求全面系统反映电离辐射损伤与防护这一领域的最新研究成果,尤其是在中药抗辐射方面的研究进展,努力增强内容的理论性、系统性、科学性和实用性,可作为临床医学、核医学、放射学、药学、生物学等方面研究人员的重要参考资料,也可作为上述学科大学生和研究生的辅助教材与课外读物。

本书在编写过程中,参阅了大量国内外著作、文献、资料,在此对其作者一并表示感谢!

由于编者专业水平有限,欠缺与不当之处诚望广大读者给予批评指正。

编 者

2011年4月

目 录

上篇 电离辐射概论

第1章 放射性和电离辐射	(3)
第一节 概述	(3)
第二节 放射性及其衰变规律	(6)
第三节 电离辐射剂量与剂量单位	(12)
第2章 电离辐射与物质的相互作用	(17)
第3章 电离辐射的生物学效应	(37)
第一节 电离辐射生物效应的分类	(37)
第二节 低剂量电离辐射的兴奋效应	(37)
第三节 电离辐射对生物大分子生物学效应	(38)
第四节 电离辐射对细胞的作用	(48)
第五节 电离辐射对器官与组织的作用	(62)
第六节 电离辐射与造血功能障碍	(72)
第七节 电离辐射损伤与出血	(87)
第八节 电离辐射引起的感染与免疫功能方面的变化	(95)
第九节 电离辐射与其他系统功能的变化	(105)
第十节 电离辐射生物学效应的影响因素	(113)
第十一节 电磁辐射的生物学效应	(116)
第十二节 电离辐射和非电离辐射复合作用的生物学效应	(118)

中篇 电离辐射损伤与防护

第4章 电离辐射防护	(125)
第一节 概述	(125)
第二节 辐射防护的原则和措施	(126)
第三节 核医学工作人员和患者受辐射剂量比较	(130)
第四节 电磁辐射防护	(135)
第五节 辐射防护药	(137)
第5章 急性放射性疾病	(203)
第一节 概述	(203)
第二节 急性放射病的类型	(206)
第三节 中子损伤的特点	(212)

第四节	急性放射病的诊断·····	(213)
第五节	急性放射病的治疗·····	(223)
第6章	落下灰核辐射的危害与防护·····	(237)
第一节	落下灰核辐射·····	(237)
第二节	落下灰核辐射的危害·····	(244)
第三节	落下灰核辐射的监测和剂量估算·····	(255)
第四节	落下灰核辐射的防护·····	(259)
第7章	小剂量外照射的生物效应和慢性放射病·····	(266)
第一节	小剂量外照射的生物效应·····	(266)
第二节	慢性放射病·····	(272)
第8章	内照射放射损伤·····	(296)
第一节	放射性物质的体内代谢·····	(296)
第二节	内照射放射损伤的临床特点·····	(297)
第三节	内照射放射损伤的临床诊断·····	(298)
第四节	内照射放射损伤的救治·····	(299)
第9章	放射性骨损伤·····	(301)
第一节	放射性骨损伤的发病机制·····	(301)
第二节	放射性骨损伤的病理学改变·····	(302)
第三节	放射性骨损伤愈合能力降低的机制·····	(305)
第四节	放射性骨损伤的临床表现·····	(308)
第五节	放射性骨损伤的诊断·····	(308)
第六节	放射性骨损伤的预防和治疗·····	(309)
第10章	皮肤放射损伤·····	(312)
第一节	皮肤放射损伤的分度和主要病理变化·····	(312)
第二节	皮肤放射损伤的影响因素·····	(313)
第三节	皮肤放射损伤的临床表现·····	(314)
第四节	皮肤放射损伤的诊断·····	(316)
第五节	皮肤放射损伤的治疗·····	(316)
第11章	核爆放射性复合伤·····	(318)
第一节	核爆炸杀伤作用概述·····	(318)
第二节	核爆炸复合伤的发生情况·····	(322)
第三节	核爆时放射性复合伤的临床病理特点·····	(326)
第四节	核爆复合伤的诊断·····	(329)
第五节	核爆时放射性复合伤的防护·····	(331)
第六节	核爆时放射性复合伤的救治·····	(332)
第七节	核爆时放射性复合伤救治研究进展·····	(336)

下篇 中药抗辐射研究

第12章	中药抗辐射研究·····	(341)
------	--------------	-------

第一节	概述·····	(341)
第二节	中药抗辐射损伤的机制·····	(342)
第三节	中药和微生态与抗辐射效应的研究·····	(344)
第四节	中药抗辐射活性成分研究·····	(347)
第五节	中药多糖与减轻放化疗所致白细胞减少·····	(359)
第六节	中药多糖对血细胞的影响·····	(362)
第七节	中药复方制剂抗辐射作用研究·····	(365)
第八节	中药治疗放射性肺炎方面的研究·····	(393)
第九节	有机硒的生物学功能与抗辐射研究·····	(395)
第十节	人参抗辐射损伤·····	(397)
第十一节	螺旋藻的抗辐射研究·····	(400)
第十二节	当归的抗辐射研究·····	(419)
第十三节	银耳的抗辐射作用·····	(426)
第十四节	枸杞的抗辐射作用·····	(427)
第十五节	南沙参的抗辐射作用·····	(433)
第十六节	茶的抗辐射作用·····	(434)
第十七节	三七的抗辐射作用·····	(437)
第十八节	淫羊藿的抗辐射作用·····	(439)
第十九节	红景天的抗辐射作用·····	(440)

上 篇
电离辐射概论

第 1 章 放射性和电离辐射

第一节 概 述

人类从来没有像今天这样受到如此多的辐射,辐射源无处不在,如家用电器:电视、电冰箱、空调、微波炉、吸尘器等;办公设备:手机、电脑、复印机、电子仪器、医疗设备等;家庭装饰:大理石、复合地板、壁纸、涂料等;周边环境:高压线、变电站、电视(广播)信号发射塔等;自然环境:太阳黑子等。当受到辐射时,由于每个人的身体抵抗能力不同,每个人会出现不同程度的症状。一般受到电磁辐射污染会引起头痛、失眠、心律失常等中枢神经症状。同时,对于有些人的眼睛可能产生影响,出现视力下降,还可能出现皮肤病等现象,重的还有可能致癌。对于孕妇可能导致其流产,安装了心脏起搏器的老年人也容易受到伤害。同时,不同的人或同一人在不同年龄段对电磁辐射的承受能力是不一样的,即使在超标环境下,也不意味着所有人都会患病,但是,老年人、儿童、孕妇或装有心脏起搏器的病人,对电磁辐射敏感人群及长期在超剂量电磁辐射环境中工作的人应采取防患措施。

众所周知,放射线、放射性物质是有害的。人体受到放射线的照射,随着射线作用剂量的增大,有可能出现某些有害效应。例如可能诱发白血病、甲状腺瘤、骨肿瘤等恶性肿瘤;也可能引起基因突变和染色体畸变,造成先天性畸形、流产、死胎、不育等病症。不过,这种情况发生的概率很低,其危险度一般没有超过目前人们可以接受的范围。

在放射事故情况下,如果人体所受射线的剂量达到一定程度,就可能出现明确的有害效应。如人体眼晶状体一次受到 2Gy 以上的 X 射线或 γ 射线的照射,在 3 周以后就可能出现晶状体浑浊,形成白内障;人体皮肤受到不同剂量射线的照射,可分别出现脱毛、红斑、水疱及溃疡坏死等损害;另外,还可能引起贫血、免疫功能降低、寿命缩短以及内分泌和生殖功能失调等。

当人体在短时间(数秒至数日)受到 $>1\text{Gy}$ 剂量的射线照射后,就会产生急性放射病,危及生命;机体在较长时间内受到超剂量限值的射线作用后可能导致慢性放射病,造成以造血组织损伤为主的全身慢性放射损伤。这种情况主要针对从事射线工作的职业人员,很少在公众中发生,也不包括局部的医疗照射。

那么什么是辐射,什么是电离辐射,电离辐射与电磁辐射有什么区别,辐射与放射线又有什么区别呢?

一、辐射的概念

物体以电磁波的形式持续地向外传送热量,这种传送能量的方式称为辐射。物体通过辐射所放出的能量,称为辐射能,也简称辐射。

辐射包括电离辐射与电磁辐射,就辐射来源而言,又可分为天然辐射与人工辐射。

二、电离辐射

自然界中存在多种辐射,根据作用物质的不同,辐射可分为两大类:一类是无线电波、微波、红外线、可见光、紫外线、X射线和 γ 射线等产生的电磁辐射,另一类是 α 粒子、 $\pm\beta$ 粒子、质子、中子等粒子产生的粒子辐射,粒子辐射是这些高速运动的粒子通过消耗自己的动能把能量传递给其他物质。根据作用方式的不同将辐射分为两类:电离辐射和非电离辐射。高速的带电粒子,如 α 粒子、 $\pm\beta$ 粒子、质子等,能直接引起物质的电离,属于直接电离粒子;X射线和 γ 射线及中子等不带电粒子,是通过与物质作用时产生的带电的次级粒子引起物质电离的,属于间接电离粒子。

由直接或间接电离粒子或两者混合组成的任何射线所致的辐射统称为电离辐射。由此可见,电离辐射中既包括部分电磁辐射也包括部分粒子辐射。几种主要电离辐射的特征见表 1-1。

表 1-1 几种主要电离辐射的特征

种类	静止质量(kg)	电荷(C)	特征	来源
α	6.7×10^{-24}	$+3.2 \times 10^{-19}$	氦核(${}^4_2\text{He}$)	重原子核的 放射性衰变
$-\beta$	9.1×10^{-31}	-1.6×10^{-19}	负电子(e^-)	放射性衰变和加速器
$+\beta$	9.1×10^{-31}	$+1.6 \times 10^{-19}$	正电子(e^+)	放射性衰变和加速器
质子 P	1.7×10^{-27}	$+1.6 \times 10^{-19}$	氢核(${}^1_1\text{H}$)	加速器
π 介子	2.5×10^{-29}	$\pm 1.6 \times 10^{-19}$	质量为电子的 273 倍,为质子 1/6	加速器
重核	大小不等	不等	失去一个或多个电子的原子	加速器
中子 n	1.7×10^{-27}	0	中子(${}^1_0\text{n}$)	反应堆、回旋加速器
γ 射线	0	0	电磁辐射	放射性衰变
X 射线	0	0	电磁辐射	X 线机及轨道电子重排列

α 射线是一种带电粒子流,由于带电,它所到之处很容易引起电离。 α 射线有很强的电离本领,这种性质既可被利用,也能带来一定破坏,对人体内组织破坏能力较大。由于其质量较大,穿透能力差,在空气中的射程只有几厘米,只要一张纸或健康的皮肤就能挡住。 β 射线也是一种高速带电粒子,其电离本领比 α 射线小得多,但穿透本领比 α 射线大,与X射线、 γ 射线比 β 射线的射程短,很容易被铝箔、有机玻璃等材料吸收。X射线和 γ 射线的性质大致相同,是不带电、波长短的电磁波,因此把它们统称为光子。两者的穿透力极强,要特别注意它们的意外照射防护。

电离辐射存在于自然界,但目前人工辐射已遍及各个领域,专门从事生产、使用及研究电离辐射工作的,称为放射工作人员。与放射有关的职业有:①核工业系统的原料勘探、开采、冶炼与精加工,核燃料及反应堆的生产、使用及研究;②农业的照射培育新品种,蔬菜水果保鲜,粮食储存;③医药的X射线透视、照相诊断、放射性核素对人体脏器测定,对肿瘤的照射治疗等;④工业部门的各种加速器、射线发生器及电子显微镜、电子速焊机、彩电显像管、高压电子管等。

电离辐射中的X射线与 γ 射线,本质就是能量非常高的电磁波,有很强的致电离能力,而

我们通常说的电磁波一般情况下没有致电离能力或致电离能力非常弱。正是因为 X 射线与 γ 射线本质是电磁波,同时又是射线,而电磁波的应用范围非常广,所以人们常常搞不清楚 X 射线与 γ 射线,因而也就分不清电离辐射与电磁辐射。

电离辐射各种射线有四个共同特点。

1. 有一定的穿透能力。
2. 人的五官不能感知,只有专门的仪器才能探测到。
3. 照射到某些特殊物质上能发出可见的荧光。
4. 透过物质时能产生电离作用。

三、电磁辐射

电磁辐射是一种复合的电磁波,包括射频辐射及其两端波段的延伸,电磁辐射以互相垂直的电场和磁场随时间的变化而传递能量。电磁辐射包括电离辐射(X 射线、 γ 射线)和非电离辐射(无线电波、微波、红外线、可见光和紫外线),人们常习惯于把非电离辐射称为电磁辐射。从专业角度说,电磁辐射一般指频率在 100kHz 以上的电磁波,是变化的电场和变化的磁场相互作用而产生的一种能量流的辐射。根据辐射的频率与波长,电磁辐射可分为许多频段和波段。环境保护中的电磁辐射概念包括辐射、感应和传导。

电磁场的来源有自然和人工两类,每个人都被这两类电磁辐射包围着。地球本身就是一个大的磁场,太阳光本身也是电磁波的一个频段。大气中自然现象引起火花放电而辐射的电磁波,如雷电等。在大气中如满足电荷分离和储存条件而形成的低气压、台风、风雪、火山喷烟、黄沙等均可引起射电干扰杂波。太阳热辐射、太阳黑子活动与黑体辐射,产生于宇宙空间电子的自由移动,银河系恒星爆炸,宇宙射线和静电都属于天然的电磁辐射来源。

据调查结果显示,我国人工产生电磁辐射的设施主要有以下几个方面的来源。

1. 广播电视发射系统 该系统是全国最大、最集中的电磁辐射污染源。其中中、短波广播,调频广播和电视广播等发射设备大多建在人口稠密的城市中心,被居民区所包围。在局部居民生活区形成强场区。

2. 无线通信发射系统 该发射设备种类多、数量大、分布广,使城市高空电磁波场强增强。随着寻呼台基站、多网移动通信基站基础设施的大量出现,尤其是城市中无线通信发射站大量无序的增加,造成局部高层居民楼窗口处的电磁辐射功率达 $400\mu\text{W}/\text{cm}^2$,超过了 $40\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的国家标准。

3. 工业、科研、医疗中使用的高频设备 如闪光器(霓虹灯装饰彩灯)、转换器、电磁解头、恒温器(电炉、电冷藏库、电加热器等)、荧光灯、霓虹灯放电管、高压水银灯、工业高频加热装置、高频电焊机、电限量开关、探伤机、测深机、鱼群探测器、超声波洗涤器、高频与超高频治疗装置等,在工作时产生的电磁感应场和辐射场场强较大,并时有电磁辐射泄漏,造成不同程度的辐射污染,且对周围广播电视信号的接收和电子仪器造成干扰。

4. 以电力为能源的交通系统 如全国电气化机车、有轨及无轨电车、磁悬浮列车等,其发展迅速,城市电磁噪声呈上升趋势,使沿线的居民收看电视受到影响。

5. 高压送变电系统 随着城市用电量的增加,高压送变电系统建设规模越来越大。在许多大城市周围已建设了 500kV 的高压电力环线系统,110kV 和 220 kV 的变电站在一些城市市区比比皆是。当高压电力线和变电站输送电压较高时,在其导线周围或变电站附近会产生

工频电场和工频磁场,易对人体产生危害。监测结果表明,400kV 的高压线下,磁感应强度可达 13vT。

6. 办公自动化设备及家用电器 随着办公自动化设备及各种家用电器进入千家万户,如电脑、激光照排设备、扫描仪、打印机、微波炉、电视机、手机、电冰箱、空调、电熨斗、电热毯和半导体等,家庭小环境的电磁能量密度不断增加,使得人们接触和暴露于产生极低频磁场的机会增多。研究发现,长期生活在 0.2vT 以上的低频磁场环境中,将对人体产生有害影响。

四、辐射的来源

人类接收主要来自于自然界的辐射,我们称之为天然辐射。它来源于太阳、宇宙射线和存在于地壳中的放射性核素。从地下溢出的氡是自然界辐射的另一种重要来源。来自于太空的宇宙射线包括能量化的光量子、电子、 γ 射线和 X 射线。在地壳中发现的主要放射性核素有铀、钍、钋及其他放射性物质,它们释放出 α 射线、 β 射线或 γ 射线。

辐射的另一来源就是所谓的人工辐射源,其产生的辐射广泛用于医学、工业等领域,辐射源包括医用设备(例如医学及影像设备);核反应堆及其辅助设施,如铀矿以及核燃料厂。上述设施必将产生放射性废物,其中一些向周围环境泄漏出一定剂量的辐射。放射性材料也广泛用于人们日常的消费,如夜光手表、釉料陶瓷、人造义齿、烟雾探测器等。

五、辐射与放射线的区别

不稳定元素衰变时,从原子核中放射出来的有穿透性的粒子束就是放射线,包括 α 射线、 β 射线和 γ 射线。

辐射与放射线的区别可以从以下几个方面加以理解。

1. 从概念上来说,辐射是以电磁波的形式持续地向外传送热量,它包括了无线电波、远红外线、红外线、可见光、紫外线、X 射线、 γ 射线等。而放射线则以高能粒子的形式持续地向外放射粒子以及能量,比如镭射线,既包括电磁辐射,又包括粒子辐射。以镭为例,它发出的射线由三部分组成:① α 射线,镭是 α 微粒的流,每个微粒是一个氦原子核。② β 射线,是电子流。③ γ 射线,是比 X 射线波长还短的电磁辐射。①、②就属于粒子辐射。

2. 从释放出的物质上来说,辐射放出来的是电磁波,而放射线放出的是高能粒子。

3. 从产生的机制来说,辐射是原子核外电子的运动,而放射线是原子核内部的运动变化。但两者都可以放射出能量很高的 γ 射线。

第二节 放射性及其衰变规律

一、原子结构

世界上存在着各种各样的物质,它们是由不同的元素构成的,组成每种元素的最小单位叫做原子。原子是无限可分的,它由原子核和核外电子组成。原子核由质子和中子组成,中子不带电,质子带正电荷,电荷量与核外电子所带负电荷量完全相等。通常用符号“e”表示一个电子的电荷量, $e=1.602\ 10\times 10^{-19}\text{C}$ 。一个电子的质量等于 $9.109\ 1\times 10^{-28}\text{g}$;一个质子的质量等于 $1.672\ 52\times 10^{-24}\text{g}$,为电子的 1 836 倍。中子的质量略大于质子,为 $1.674\ 82\times 10^{-24}\text{g}$ 。

在正常状态下,原子的核外绕行电子总数等于核内质子总数,所以原子为中性。原子的质量主要为原子核中质子和中子的质量之和,称为质量数。原子核的半径 $R=1.5 \times 10^{-13}$, 并且原子核的球形体积与质量数成正比。

电子按一定轨道围绕原子核不停地运动,好像行星围绕太阳运动一样(图 1-1)。

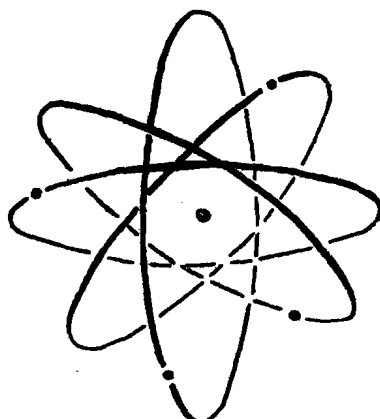


图 1-1 原子结构

不同种类元素,其原子的核外电子数是不同的。例如,氢原子有 1 个电子,氦原子有 2 个电子,锂原子有 3 个电子。

原子内每个电子都有一定的轨道,几条轨道又形成一个壳层。最靠近核的是 K 壳层,依次向外是 L 壳层、M 壳层、N 壳层等。各层所容许的电子数有一定限度,越向外,壳层上所容许的电子数越多,K 层最多只有 2 个电子,L 层可有 8 个,M 层可有 18 个,N 层可有 32 个,但最外层电子总数不能超过 8 个。原子的化学性质就是由最外层的电子数决定的(图 1-2)。

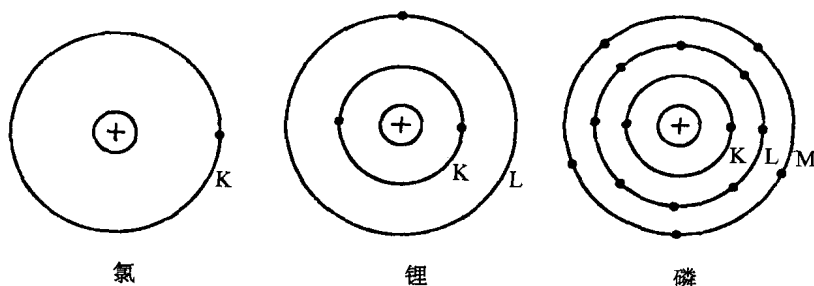


图 1-2 电子壳层

电子在原子内某一轨道上,具有严格确定的能量,称为能级,这一能级是每个绕行的壳层电子在核电荷场的作用下而特定形成的能量级,也称之为壳层电子的结合能。因此,也可以说电子处于某一能级上。同一层的电子能量相近,所以大致处于同一能级上。K 壳层轨道上的电子能量最低,越是靠外层的轨道上,电子结合能越高。电子能够吸收外来的能量从低能量级

升到高能级,称为原子的激发。如果外来的能量足够大,使电子脱离原子,这种作用称为电离,这时的原子称为离子。处于高能级的电子能够“跳回”到低能级,同时把多余的能量以电磁辐射的形式释放出来,辐射由此形成。

二、原子核衰变

原子核结合能处于最低能量状态(即基态),是所有稳定原子核的状态。高于基态的能量状态,为不稳的激发态。自然界有一些元素的原子核处于不稳定状态,即使不受任何外部作用,核的结构或能量状态也会自发地发生变化,由一种原子核转变为另一种原子核,并伴随着放出一种特殊射线,这种现象称为核衰变,这样的元素称为天然放射性核素(同位素)。在核衰变过程中,会从核内放出 α 粒子、 β 粒子、 γ 光子、俘获轨道电子等一种或几种射线。这种从不稳定核素放出射线的性质叫做放射性。

1. α 衰变 处于激发态的放射性核素,自发地放出 α 粒子,而转变成另一种原子核的过程,称为 α 衰变。 α 粒子由2个质子和2个中子组成,质量数为4。原子序数为2,即为高速运动的氦原子核。所以,衰变后的放射性核素与母核素相比质量数减4,原子序数降低2位。例如: $^{226}_{88}\text{Ra}$ (镭)经 α 衰变为 $^{222}_{86}\text{Rn}$ (氡),可用下式表示: $^{226}_{88}\text{Ra} \longrightarrow ^{222}_{86}\text{Rn} + \alpha$,其衰变能量值等于母体核素原子质量与子体核素原子及 α 粒子总质量之差。

事实上, $^{226}_{88}\text{Ra}$ 经 α 衰变为 $^{222}_{86}\text{Rn}$ 具有两种衰变方式。第一种方式是镭放射出能量为4.785MeV的 α 粒子,而变成基态的 $^{222}_{86}\text{Rn}$;另一种方式是 $^{226}_{88}\text{Ra}$ 放出能量为4.602MeV的 α 粒子而变成处于激发态的 $^{222}_{86}\text{Rn}$,然后很快“跳回”到基态而放出能量为0.188MeV的 γ 光子。第一种衰变方式占95%,第二种衰变方式占5%。

2. β 衰变 从原子核内放出 β 粒子的核衰变称为 β 衰变。其过程是放射性核素自发地使核内一个中子转变为质子,放出带负电荷的 β 粒子,实质上就是一个高速运动的电子。 β 粒子质量与电子的静止质量相等,带一个负电荷。 β 衰变生成的核素质量数不变,原子序数增加一位。

例如, $^{14}_6\text{C}$ (碳)的原子核,衰变为 $^{14}_7\text{N}$ (氮)同时放出 β 粒子及中微子 ν ,并释放衰变能量。 β 粒子就是电子,中微子的质量很小,可以忽略,因此其衰变能量等于母体核素质量与子体核素质量之差。

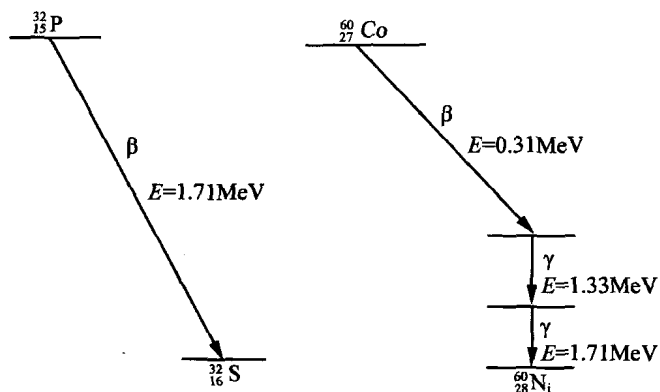
常用的放射性核素 $^{32}_{15}\text{P}$ 和 $^{60}_{27}\text{Co}$ 的衰变图见图1-3。

3. γ 跃迁 在核衰变中有时还发射 γ 光子,也称为 γ 跃迁。常见的 α 衰变或 β 衰变所产生的新原子核,处于激发态的时间很短(约 10^{-13}s),很快就会跃迁到较低能级或基态,并放出 γ 光子(又叫 γ 射线,为波长极短的电磁波)。此种现象仅发生能级跃迁,而核的质量数和原子序数都没有改变,所以有学者将其称之为同质异能 γ 跃迁。有些原子核的激发态存在时间较长,可以作为独立的放射性核素,这些通过 γ 跃迁的母核素与子核素称为同质异能素。

4. β^+ 衰变与电子俘获 从原子核内放出 β^+ 粒子的衰变称为 β^+ 衰变。 β^+ 实际为高速正电子,和电子质量相等而符号相反。在 β^+ 衰变中,原子核内一个质子变成一个中子,同时放出 β^+ 粒子和质量极小的中性粒子中微子,其特点是穿透能力极强,可以穿透地球。

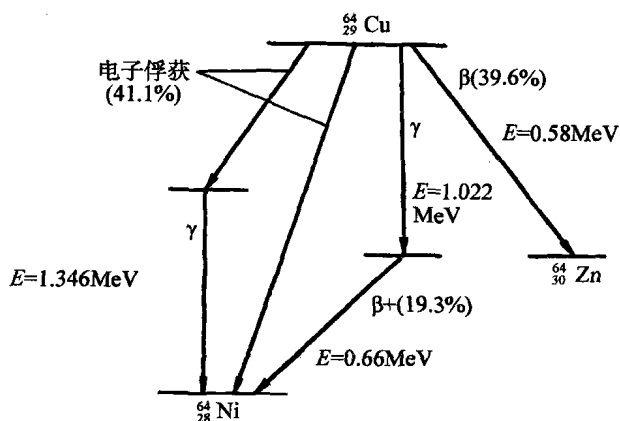
另外一种核衰变就是放射性核素自发地俘获一个核外轨道电子,使核内一个质子变为中子,生成的新核素质量数与母核相同,原子序数比母核减少一位。

例如, $^{40}_{19}\text{K}$ (钾)核俘获 e^- 后转变为 $^{40}_{18}\text{Ar}$ (氩)。因为K壳层电子离原子核最近,K壳层电子

图 1-3 $^{32}_{15}\text{P}$ 和 $^{60}_{27}\text{Co}$ 的衰变

被俘获的概率最大,因此也叫 K 电子俘获。

有一些放射性核素能同时发生 β 衰变和轨道电子俘获。还有为数不多的核素同时有 β 衰变和 β^+ 衰变,如 $^{64}_{29}\text{Cu}$ (图 1-4)。

图 1-4 $^{64}_{29}\text{Cu}$ 的衰变

三、核衰变规律

放射性核素的衰变与周围环境的温度、压力和湿度等无关,但它遵循一定的规律,即指数衰减规律。假如,某种放射性核素最初共有 N_0 个原子,经过时间 t 以后,只剩下 N 个,则 N 和 N_0 之间的关系为

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (\text{式 1-1})$$

其中, λ 称为衰变常数,其单位是时间单位的倒数(1/s、1/min、1/年等)。如果经过时间 $T_{1/2}$ 以后 $N=1/2N_0$,代入式 1-1 中,

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}}$$

即

$$2 = e^{\lambda T_{1/2}}$$

两边取对数得出

$$\lambda T_{1/2} = \ln 2$$

由于自然对数 $\ln 2 = 0.693$, 故有

$$T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (\text{式 1-2})$$

放射性原子核数因衰变而减少到原来的一半所需要的时间称为半衰期($T_{1/2}$), 它与衰变常数 λ 的关系如上式。不同核素的 $T_{1/2}$ 值差别很大, 例如 ^{232}Th 的半衰期为 1.39×10^{10} 年, 而 ^{212}Po 的半衰期只有 $3.0 \times 10^{-7}\text{s}$ 。半衰期是一种放射性核素的基本特性之一。

将式 1-2 代入式 1-1 中, 则

$$N = N_0 e^{-\frac{0.693}{T_{1/2}} t} \quad (\text{式 1-3})$$

令 $t/T_{1/2} = n$, 可得

$$N = \frac{N_0}{2^n} \quad (\text{式 1-4})$$

一定量放射性核素在单位时间内的核衰变数称为放射性强度。放射性强度的单位以前为居里(Ci), 1975 年国际剂量大会(CGPA)将其确定为贝可, 以符号 Bq 表示。一贝可表示放射性核素在 1s 内发生一次衰变。Ci 与 Bq 换算关系如下。

$$1\text{Ci}(\text{居里}) = 3.7 \times 10^{10} \text{s}^{-1} = 3.7 \times 10^{10} \text{Bq}(\text{贝可})$$

实际使用的放射性核素的放射性强度有时比 1Ci 小得多, 故又产生了由居里派生的毫居里(mCi)和微居里(μCi)等单位。

$$1\text{mCi} = 0.001\text{Ci} = 3.7 \times 10^7 \text{Bq}$$

$$1\mu\text{Ci} = 0.001\text{mCi} = 3.7 \times 10^4 \text{Bq}$$

放射性样品中, 某一放射性核素的放射性强度与相应的元素质量之比称为比放射性强度(简称比放射性)或比活度。单位质量物体中的放射性强度也可称为比放射性强度。单位体积物体中的放射性强度则称为放射性浓度。

衰变公式应用举例: 某 ^{60}Co 放射源, 出厂时放射性强度为 10 000Ci, 欲求半年后剩下的放射性强度为多少(^{60}Co 的半衰期为 5.26 年)。

已知 $N_0 = 10\,000\text{Ci}$, $t = 0.5$ 年, $T_{1/2} = 5.26$ 年。

按式 1-3

$$N = 10\,000 e^{-(0.693/5.26) \times 0.5} = 10\,000 e^{-0.0659}$$

因 $e^{-0.0659} = 0.9363$, 故

$$N = 10\,000 \times 0.9363 = 9\,363(\text{Ci})$$

也可按式 1-4 进行计算, 此时

$$N = \frac{10\,000}{2^{0.5/5.26}}$$

两边取对数, 得

$$\begin{aligned} \log N &= \log 10\,000 - 0.5/5.26 \log 2 \\ &= 4 - (0.5/5.26) \times 0.3010 = 3.9714 \end{aligned}$$