



RADIATION SAFETY AND PROTECTION IN
NUCLEAR TECHNOLOGY APPLICATION

核技术应用辐射安全与防护

环境保护部辐射环境监测技术中心 编



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

核技术应用辐射安全与防护

环境保护部辐射环境监测技术中心 编



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

图书在版编目 (CIP)数据

核技术应用辐射安全与防护 / 环境保护部辐射环境
监测技术中心编. —杭州: 浙江大学出版社, 2012. 7
ISBN 978-7-308-09451-1

I. ①核… II. ①环… III. ①辐射防护 IV. ①TL7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011)第 265368 号

核技术应用辐射安全与防护

环境保护部辐射环境监测技术中心 编

责任编辑 徐素君
封面设计 续设计
出版发行 浙江大学出版社
(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)
(网址: <http://www.zjupress.com>)
排 版 杭州中大图文设计有限公司
印 刷 杭州杭新印务有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 25.75
字 数 680 千
版 次 2012 年 7 月第 1 版 2012 年 7 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-308-09451-1
定 价 80.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话 (0571)88925591

本书编委会

主 编 王 蕾

编 委 (按姓氏笔画排列)

王晓峰 孙亚敏 吴宗梅 范雪瑾 黄 隆

前 言

我国的核技术应用起步发展至今已近六十载,其应用的领域日益广泛,给人类带来了巨大的利益,展示了美好的前景,但也不可避免地伴有一定的危害,其造成或可能造成的辐射照射对环境、人类健康的潜在危险已引起公众极大的关注。辐射防护、核安全及辐射环境管理的基本目标在于既要允许某些可能造成辐射照射的人类活动得以进行,又要尽可能减小其对个人、群体和他们后代的危害。

本书由环境保护部辐射环境监测技术中心组织编写,其中心内容是着眼于我国核技术应用发展的现状,全面地反映了国内外同行的最新研究成果与实践经验,比较系统地探讨了电离辐射的产生、对人体健康的影响及危害,以及核技术应用的安全与防护、监测与管理、事故防范与应急准备等问题,希望能为各相关领域的科研教学人员和广大社会公众了解电离辐射知识、增强自我防护意识、加强核技术应用安全管理提供有益的参考。本书从2008年10月开始筹划到2012年5月出版,历时近4年,先后经过大纲的讨论、内容编写及讨论再修改、统稿、校稿等5次会议。

本书由王蕾主编,吴宗梅、王晓峰、孙亚敏、黄隆、范雪瑾参与编写。其中第一章由黄隆执笔,第二章由吴宗梅、孙亚敏执笔,第三章由范雪瑾、王晓峰执笔,第四章由王蕾、吴宗梅执笔;第五章由孙亚敏、吴宗梅执笔;第六章由吴宗梅、王蕾执笔,第七章由王晓峰、范雪瑾执笔;第八章由王蕾、吴宗梅执笔;第九章由王晓峰执笔。主编对全书进行了统稿,并对其他编者编写的内容作了必要的增删和修改。

本书为专业参考书,可供从事辐射监测、辐射防护、废物管理、环境保护、核与辐射技术利用及相关专业的工作人员、教学、研究人员和管理人员参考,或作为专业人员培训教材。由于编者水平所限,错误和不妥当之处在所难免,恳请读者不吝指正。

编 者

2012年5月于环境保护部辐射环境监测技术中心

目 录

第一章 电离辐射的物理基础和来源	1
1.1 物质的原子结构	1
1.1.1 原子与原子核	1
1.1.2 原子质量	2
1.1.3 原子核	2
1.1.4 一般的质能关系	3
1.2 放射性衰变	3
1.2.1 放射性的一般现象	3
1.2.2 放射性衰变	4
1.2.3 放射性衰变规律	6
1.3 射线与物质的相互作用	7
1.3.1 α 粒子与物质的相互作用	8
1.3.2 β 粒子与物质的相互作用	9
1.3.3 γ 和 X 射线与物质的相互作用	12
1.3.4 中子与物质的相互作用	16
1.3.5 射线的防护	18
1.4 核裂变与核聚变	19
1.4.1 核裂变的基本概念	19
1.4.2 裂变产物及其特征	20
1.4.3 裂变能	21
1.4.4 核聚变	22
1.5 天然电离辐射照射来源	23
1.5.1 宇宙射线	23
1.5.2 宇生放射性	24
1.5.3 原生放射性	24
1.6 人工电离辐射照射来源	27
1.6.1 核试验	27
1.6.2 核能生产	27
1.6.3 医疗照射	28
1.6.4 核技术应用	28
1.7 人为活动引起的天然辐射源照射的变化	29
1.7.1 煤、石油及其他放射性伴生矿的开采、利用	30
1.7.2 煤电及其他能源生产	31



1.7.3	高空飞行	31
1.7.4	其他人为活动	31
1.8	放射性物质在环境中的行为	32
1.8.1	放射性物质在大气中的行为	32
1.8.2	放射性物质在地表水体中的行为	32
1.8.3	放射性物质在岩石、土壤和地下水中的行为	32
1.8.4	放射性物质通过生物链向人的转移	33
	参考文献	34
第二章	电离辐射防护基础与辐射防护体系	35
2.1	电离辐射的常用量和单位	35
2.1.1	与放射性有关的量和单位	36
2.1.2	与辐射场性质以及辐射与物质相互作用有关的量和单位	38
2.2	辐射剂量学中常用的量	40
2.2.1	吸收剂量及其单位	40
2.2.2	比释动能及其单位	41
2.2.3	照射量及其单位	42
2.2.4	周围剂量当量	43
2.2.5	定向剂量当量	43
2.2.6	个人剂量当量	44
2.3	辐射防护中使用的辐射量	44
2.3.1	当量剂量	44
2.3.2	有效剂量	45
2.3.3	集体当量剂量和集体有效剂量	46
2.3.4	待积当量剂量和待积有效剂量	47
2.4	辐射防护的目的与任务	47
2.4.1	辐射防护的目的	47
2.4.2	辐射防护的任务	48
2.5	辐射防护的基本原则	48
2.5.1	实践的正当性	48
2.5.2	剂量限制和潜在照射危险限制	48
2.5.3	防护与安全的最优化	49
2.5.4	剂量约束和潜在照射危险约束	50
2.5.5	医疗照射指导水平	50
2.6	外照射及其防护	51
2.6.1	外照射防护的基本原则	51
2.6.2	外照射防护的基本技术	51
2.6.3	外照射屏蔽计算	53
2.7	内照射及其防护	59
2.7.1	内照射防护的基本原则	59

2.7.2	放射性物质进入人体的途径	60
2.7.3	内照射防护基本措施	60
	参考文献	61
第三章	电离辐射的生物效应	62
3.1	电离辐射生物效应概述	62
3.1.1	电离辐射生物效应的作用方式	63
3.1.2	电离辐射生物效应的分类	63
3.1.3	急性辐射效应的症状及体征	64
3.1.4	慢性放射病	65
3.1.5	其他因子与电离辐射的联合效应	66
3.2	电离辐射致生物效应的机理	67
3.2.1	传能线密度	67
3.2.2	相对生物效应	68
3.2.3	电离辐射与细胞作用机制模型	69
3.2.4	电离辐射与生物系统作用的原初过程	69
3.2.5	电离辐射引起生物大分子结构的改变	70
3.2.6	电离辐射引起细胞的改变	72
3.3	电离辐射的随机性效应	74
3.3.1	风险评估	76
3.3.2	致癌作用	77
3.3.3	遗传效应	78
3.4	电离辐射的确定性效应(组织反应)	79
3.4.1	组织反应概念的提出	80
3.4.2	细胞存活曲线	80
3.4.3	组织和器官的早期和延迟反应	83
3.4.4	组织/器官反应的剂量阈值	83
3.4.5	胎内照射效应	84
3.4.6	寿命缩短	85
3.5	小剂量外照射的生物效应	85
3.5.1	小剂量外照射的概念	85
3.5.2	小剂量一次照射效应	85
3.5.3	小剂量慢性照射效应	86
3.5.4	微小剂量辐射的兴奋效应	87
3.5.5	小剂量外照射的医学处理原则	88
3.6	影响辐射生物学效应的因素	88
3.6.1	物理因素	88
3.6.2	生物因素	89
3.6.3	环境因素	90
3.7	非人类物种的辐射生物效应	90



3.7.1 简介 90

3.7.2 非人类物种的辐射生物效应 90

3.7.3 人类与非人类物种辐射生物效应的比较 91

参考文献 91

第四章 电离辐射检测与剂量监测 93

4.1 探测电离辐射的基本方法 93

4.1.1 电离辐射探测器的基本原理 93

4.1.2 探测器类型与探测器 93

4.1.3 选用辐射探测器的原则 97

4.2 放射性检测 98

4.2.1 γ 能谱分析 98

4.2.2 总放射性分析 100

4.2.3 放射化学分析 102

4.3 外照射剂量监测 107

4.3.1 γ 辐射空气吸收剂量率瞬时测量 107

4.3.2 环境 γ 辐射自动连续监测 108

4.3.3 γ 辐射累积剂量测量 108

4.4 场所与环境电离辐射监测 110

4.4.1 工作场所电离辐射监测 111

4.4.2 环境电离辐射监测 114

4.5 人员电离辐射监测 116

4.5.1 外照射个人剂量监测 116

4.5.2 内照射个人剂量监测 117

4.5.3 核与辐射事故个人剂量测量 121

4.6 应急辐射监测 121

4.6.1 辐射事故处理原则 122

4.6.2 辐射事故应急监测 122

参考文献 122

第五章 电离辐射安全防护法规与基本标准 123

5.1 我国现行的电离辐射安全防护相关法律法规 123

5.2 与电离辐射安全防护相关的法律 124

5.2.1 放射性污染防治法 124

5.2.2 职业病防治法 125

5.3 与电离辐射安全防护相关的条例 125

5.3.1 《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》 125

5.3.2 《放射性物品运输安全管理条例》 128

5.4 与电离辐射安全防护相关的管理办法 130

5.4.1 《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》 130

5.4.2	《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》	131
5.5	电离辐射防护与辐射源安全基本标准(GB18871—2002)	138
5.5.1	我国辐射防护基本标准的历史沿革	138
5.5.2	我国辐射防护新基本标准概述	139
5.5.3	职业照射的控制	140
5.5.4	医疗照射的控制	144
5.5.5	公众照射的控制	147
5.6	放射源和射线装置的分类	148
5.6.1	放射源分类	149
5.6.2	射线装置分类	154
附录 5.1	国际原子能机构标准——《放射源分类》	155
参考文献		155
第六章	电离辐射安全防护监督管理	156
6.1	电离辐射安全防护的监督管理	156
6.1.1	概述	156
6.1.2	分级管理	158
6.1.3	电离辐射安全防护监管的一般要求	161
6.1.4	电离辐射安全防护监管的特殊要求	163
6.1.5	违法与处罚	166
6.2	放射性物质运输的安全管理	169
6.2.1	概况	169
6.2.2	放射性物质分类和货包分类与分级	169
6.2.3	放射源运输安全管理及程序	173
6.3	辐射事故管理与应急组织	175
6.3.1	辐射事故分级	175
6.3.2	辐射事故报告	176
6.3.3	辐射事故应急组织体系	176
6.4	核技术利用废物和废旧放射源的管理	179
6.4.1	放射性废物的分类	179
6.4.2	废物最小化	182
6.4.3	核技术利用废物和废旧放射源的管理	183
6.4.4	核技术利用放射性废物的处理	186
6.5	核技术利用安全和防护监督检查	190
6.5.1	单位基本情况	190
6.5.2	常见核技术应用项目监督检查技术要求	191
6.5.3	固定式Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ类源使用场所	195
参考文献		196



第七章 电离辐射医学应用安全防护	198
7.1 概况	198
7.1.1 电离辐射医学应用的发展历程.....	198
7.1.2 电离辐射医学应用的分类.....	199
7.2 X射线诊断设备的特点及防护	200
7.2.1 X射线诊断设备的分类与组成.....	200
7.2.2 X射线物理基础.....	203
7.2.3 X射线计算机断层摄影装置.....	209
7.2.4 数字减影血管造影.....	213
7.2.5 X射线诊断设备安全与防护.....	215
7.3 肿瘤放射治疗的特点及防护	221
7.3.1 肿瘤放射治疗概述.....	221
7.3.2 远距离放射治疗设备.....	224
7.3.3 近距离放射治疗.....	230
7.3.4 放射治疗的安全与防护.....	236
7.4 核医学的特点及防护	241
7.4.1 核医学概述.....	242
7.4.2 放射性药物.....	244
7.4.3 核医学成像装置.....	247
7.4.4 放射性核素治疗及放射免疫分析.....	251
7.4.5 核医学的安全与防护.....	256
参考文献.....	267
第八章 电离辐射工农业应用的安全防护	268
8.1 辐照装置的电离辐射安全防护	268
8.1.1 概况.....	268
8.1.2 γ 辐照装置的安全防护	272
8.1.3 电子加速器辐照装置的安全防护.....	284
8.1.4 辐照装置事故与应急.....	292
8.2 射线探伤的电离辐射安全防护	295
8.2.1 概述.....	295
8.2.2 工业射线探伤的辐射安全防护.....	299
8.2.3 工业射线探伤的辐射监测.....	312
8.2.4 工业射线探伤辐射事故应急.....	315
8.3 核子仪和放射性测井的电离辐射安全防护	317
8.3.1 概述.....	317
8.3.2 核子仪和放射性测井的电离辐射安全防护.....	323
8.3.3 辐射事故应急.....	329
8.4 核电站的电离辐射安全防护	331

8.4.1	核电站的安全屏障	331
8.4.2	核电站的安全防护	333
8.4.3	核电站的辐射监测	337
8.4.4	核电站的事故应急	338
	参考文献	339
附录 8.1	加速器开关机的操作规程(范例)	340
附录 8.2	×××工业射线探伤事故应急预案	341
第九章	防范电离辐射事故与应急准备	345
9.1	辐射事故概述	345
9.1.1	全球辐射事故形势	345
9.1.2	我国的概况	353
9.2	我国辐射事故的管理体系及应急响应	354
9.2.1	我国辐射事故管理体系的变迁	354
9.2.2	我国辐射事故管理的特点	355
9.2.3	辐射事故应急响应	357
9.2.4	放射袭击事件及其应对策略	359
9.2.5	辐射突发事件的公众心理应激的危机干预	364
9.2.6	核与辐射突发事件的信息公开	367
9.3	电离辐射事故案例分析	369
9.3.1	医学案例	369
9.3.2	工业应用案例	377
9.3.3	利用放射性进行犯罪的案例	389
	参考文献	395

第一章 电离辐射的物理基础和来源

射线与物质的相互作用过程是射线防护的基础。本章介绍了放射性衰变及其规律,以及射线与物质相互作用的基本原理,以了解射线防护的一些基本知识。电离辐射通过各种途径进入人类的生活,按照辐射的来源可分为天然辐射和人工辐射。天然辐射包括宇宙射线,来自地球本身具有的天然放射性核素发出的 α 、 β 、 γ 射线,空气中的氡及其衰变产物,以及包含在食物、饮料等中的各种天然存在的放射性核素。人工辐射包括医学中使用的X射线、大气核武器试验的放射性尘埃、各种用途的人工放射源和射线装置等。本章还介绍了与我们生产、生活息息相关的天然和人工电离辐射照射的来源。

1.1 物质的原子结构

1.1.1 原子与原子核

放射性是原子核自发地放出 α 、 β 、 γ 等各种射线的现象,这里先回顾有关原子和原子核的基础知识,以便了解和认识放射性。

1897年,英国科学家汤姆生(J. J. Thomson)发现了带负电荷的电子。1911年,卢瑟福(R. C. Rutherford)提出了原子的核式模型,即原子是由带正电的原子核和核外带负电的电子组成。原子核由不带电的中子和带正电的质子组成,质子所带电荷数与电子所带的电荷数相等,从而使整个原子保持电中性。例如,一个碳原子由6个质子、6个中子和6个电子组成。

根据玻尔(Niels Bohr)的原子模型,核外电子在原子核库仑场的作用下,在特定的轨道上围绕原子核高速运动,这些核外电子也称为轨道电子。原子的中心是一个原子核,核外不同层次的轨道上运动着电子。电子在核外轨道上的排布遵守泡利不相容原理,即:最内层的轨道(称K层)只能容纳2个电子,第二层(L层)可容纳最多8个电子,更外层的轨道最多能容纳18个、32个以及50个电子,等等。核外电子的这种排布是要满足原子能态最低的要求。

元素是质子数相同的一类原子的统称。元素的化学性质取决于核外电子数,因而也就取决于核内质子数,原子包含的质子数决定了由此原子构成的物质的性质。原子核中的质子数被称为原子序数 Z ,质子数 Z 与中子数 N 之和称为原子的质量数 A 。

迄今为止,人类已经发现的元素有110多种(包括人工制造的不稳定元素),为了记忆和表述的方便,通常用一个符号来表示一种元素,例如:氢元素用H表示、碳元素用C表示、铀元素用U表示,等等。这些元素按照原子核内质子数的顺序,有规律地排列而成一张表,称为元素周期表。

实验发现,相同的元素可能具有不同数量的中子。质子数相同、中子数不同的一类原子在元素周期表中占据相同的位置,称为该元素的同位素。例如,氢有三种同位素(^1H , ^2H , ^3H),铁有13种同位素(从 ^{49}Fe 到 ^{61}Fe ,所含中子数从23到35不等),碳有11种同位素(^{12}C , ^{13}C , ^{14}C 等),钾有16种同位素(^{39}K , ^{40}K , ^{41}K 等),铀有16种同位素(^{234}U , ^{235}U , ^{238}U 等)。



每种元素都存在几种、几十种甚至更多种的同位素。有的同位素是稳定的,称之为稳定同位素。所谓稳定同位素是指核结构不会自发地发生改变的同位素。有的同位素是不稳定的,不稳定的同位素即使不受外在原因的作用,核的结构也会自发地产生变化,衰变成其他同位素,这种不稳定的同位素又称放射性同位素。

放射性同位素在这种自发变化过程中,核将放射出 α 射线(即氦核),或 β 射线(即电子),或 γ 射线(一种高能量的电磁波),或 β^+ 射线(即正电子),或者在核外俘获一个绕行电子(电子俘获),这些现象统称为核衰变。应用核反应方法产生的放射性同位素特称为人造放射性同位素,以别于在自然界中存在的天然放射性同位素。

如氢元素存在3种同位素, ^1H 、 ^2H 是稳定同位素, ^3H 是放射性同位素。又如钴元素存在10种同位素,其中只有 ^{59}Co 是稳定同位素,其余均为放射性同位素。 ^{60}Co 通常就是用稳定同位素 ^{59}Co 经中子照射,通过 $^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$ 产生的。

原子核内具有相同的质子数、中子数且处于同一核能态的一类原子核,称为核素。核素可用符号 ${}^A_Z\text{X}_N$ 表示,其中,X是元素符号,A是质量数,Z是质子数,N是中子数。如果原子核内质子数和中子数都相同,但原子核所处的核能态不同,如 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 是 ^{99}Tc 处于较长寿命的激发态,它们称为同质异能素。由于每一种元素X都有确定的质子数,所以Z有时不标出来,通常可简化为 ${}^A\text{X}$ 。例如: ${}^7_3\text{Li}$ 可简写为 ${}^7\text{Li}$ 。

在自然界中,某种元素的不同同位素,占有不同的比例。将某种同位素占该种元素的比例称为同位素丰度。例如, ^{235}U 占铀元素的0.7%, ^{238}U 占铀元素的99.2%,也常表达成 ^{235}U 的丰度为0.7%, ^{238}U 的丰度为99.2%。氢的同位素 ^1H 的丰度为99.985%, ^2H 的丰度为0.015%。

1.1.2 原子质量

原子的质量可以用克或千克做单位,也可以用原子质量单位。原子质量单位记作u,一个原子质量单位的定义为 ^{12}C 原子质量的十二分之一,如下:

$$1\text{u} = {}^{12}\text{C} \text{ 原子质量} \times \frac{1}{12}$$

由此可以计算得到,一个原子质量单位与g或kg单位之间的关系为:

$$1\text{u} = 1.6605655 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

由此可以算出,单位“g”和单位“u”的比值即为阿伏伽德罗常数 N_A :

$$N_A = 6.0221367 \times 10^{23} / \text{mol}$$

如果采用原子质量单位,质子、中子及核外电子的质量分别为:

$$\text{质子质量 } m_p = 1.007276 \text{ u}$$

$$\text{中子质量 } m_n = 1.008665 \text{ u}$$

$$\text{电子质量 } m_e = 1/1836 \text{ u}$$

可见,质子与中子的质量基本相同,远远大于电子的质量。因此,原子的质量绝大部分集中在原子核上。

1.1.3 原子核

原子核的大小与原子相比,就像大厅中的一粒芝麻,其直径在 $10^{-14} \sim 10^{-12} \text{ cm}$ 之间,但却集中了几乎全部的原子质量。原子核的大小通常是通过其与其他粒子相互作用间接测得的。

根据相互作用形式的不同,原子核的半径一般有两种定义,即电荷分布半径与核力作用半径。无论是电荷分布半径还是核力作用半径,它们都近似地正比于 $A^{1/3}$ 。也就是说,原子核的体积近似地与其质量数 A 成正比。计算可知, ${}^4\text{He}$ 原子核的半径约为 2.5fm , ${}^{238}\text{U}$ 的半径约为 9fm ($1\text{fm}=10^{-15}\text{m}$)。可知,原子核的尺度只有 fm 量级,其密度则高达 $10^8\text{t}/\text{cm}^3$ 。

1.1.4 一般的质能关系

根据爱因斯坦的相对论理论,质量和能量都是物质的属性,任何具有一定质量 m 的物体,它相应的能量 E 可由质能方程得到:

$$E = mc^2$$

其中, c 是真空中光速。它表示质量和能量可以互相转换,对此式取差分,有:

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

该式表明体系质量的变化一定对应着体系能量的变化,反之亦然。

能量的国际单位是“焦耳”(简记为 J),但在核物理中常用电子伏(简记为 eV)作为能量单位:

$$1\text{eV}=1.6021892\times 10^{-19}\text{J}$$

射线的能量一般是千电子伏 keV ($1\text{keV}=10^3\text{eV}$)和兆电子伏 MeV ($1\text{MeV}=10^6\text{eV}$)量级,更高量级单位有吉电子伏 GeV ($1\text{GeV}=10^9\text{eV}$),例如,高能宇宙射线和高能加速器产生的粒子束。

1.2 放射性衰变

1.2.1 放射性的一般现象

自然界存在的核素包括稳定核素和不稳定的核素,不稳定核素的原子核会自发地发射射线,并从一种核素转变成另一种核素。不稳定核素的这种自发转变过程称为放射性衰变过程。放射性核素可以有不止一种衰变方式。放射性核素衰变前的原子核称为母核,衰变后生成的新核称为子核。研究表明,原子核自发衰变而放射出的射线主要由三种成分组成,即: α 射线、 β 射线、 γ 射线。

α 射线: α 射线能量一般为 $4\sim 9\text{MeV}$,穿透能力很小,用一张普通的纸就能把它挡住,在空气中也只能飞行几厘米,但是它的电离能力很强。 α 射线是带有 2 个单位正电荷的高速运动的氦原子核, ${}^4_2\text{He}$,也称为 α 粒子。 α 衰变主要发生在质量数 $A>209$ 的重核。粗略地测量 α 发射体放出的 α 粒子是单能的谱线。子核从较高能级状态退激到基态时,一般要放出 γ 射线。

β 射线,也称 β 粒子: β 射线是原子核发生 β 衰变放出的高速运动的电子流,记为 β^- 或者 β^+ 。无论是 β^- 还是 β^+ , β 粒子的质量都是电子的质量,约为 α 粒子的 $1/7300$ 。对于 1MeV 量级能量的 β 粒子,速度接近光速,穿透能力比 α 射线强,可穿过几毫米厚的铝板,也能使空气电离,但电离作用比 α 射线弱。 β 衰变是大多数人造核素的特性,某些天然核素也会有这种性质。

γ 射线: γ 射线是一种波长短、能量大的电磁波,它从原子核里面发射出来,不带电,以光速运动。 γ 射线能量一般在几十 keV 至几 MeV ,穿透能力很强。

其他射线:除了上述的三种射线外,还有 X 射线,中子等。X 射线主要来源于原子核外电



子从高能级到低能级的跃迁(称为特征 X 射线)以及电子的韧致辐射。中子主要来源于核裂变以及一些特殊的核反应。

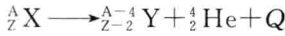
由上可知,原子核自发地放射出各种射线的现象,就称为放射性;能够自发地放射各种射线的核素,就称为放射性核素。放射性衰变是指原子核自发的放射出 α 或 β 等粒子而由一种核素转变为另一种核素的过程。实验表明,对放射性核素加温、加压或加电磁场等外界条件,都不能抑制或改变射线的发射。放射性现象是由原子核的自发变化引起的,核外电子状态的改变对原子核放射性的影响几乎没有。

1.2.2 放射性衰变

放射性衰变有三种主要的衰变方式: α 衰变、 β 衰变、 γ 跃迁(γ 衰变)。

α 衰变

α 放射性与 α 衰变相联系。原子核自发地放射出 α 粒子而发生的转变,叫做 α 衰变。图 1.1、1.2 是 ^{226}Ra 的衰变图。在 α 衰变中,衰变后的子核与衰变前的母核相比,电荷数少 2,质量数减 4,见下式:



式中, X 表示母核, Y 表示子核。例如 $^{210}_{84}\text{Po}$ 的 α 衰变可写为 $^{210}_{84}\text{Po} \longrightarrow ^{206}_{82}\text{Pb} + {}^4_2\text{He}$ 。式中的 Q 是衰变过程中放出的能量,称为衰变能。衰变能 Q 以 α 粒子的动能和子核的反冲动能的形式释放出来。

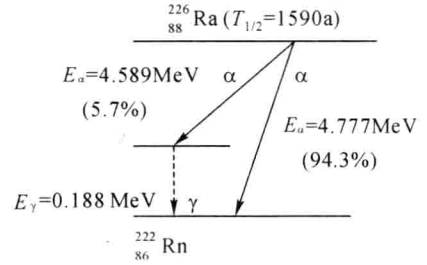


图 1.1 ^{226}Ra 的衰变

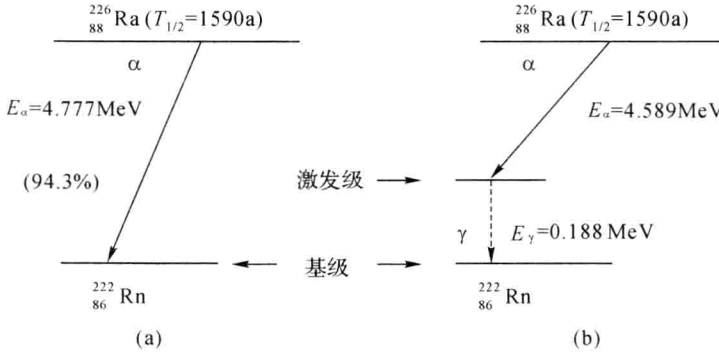
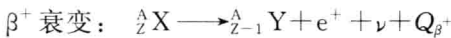
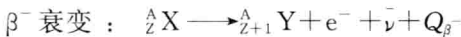


图 1.2 ^{226}Ra 的衰变

β 衰变

原子核自发地放射出电子(或正电子)或俘获一个轨道电子而发生的转变,统称为 β 衰变。细分之,发射电子的称为 β^- 衰变,发射正电子的称为 β^+ 衰变,俘获轨道电子的称为轨道电子俘获(EC)。与 α 衰变类似, β 衰变的三种类型可分别用下式表示:



式中, ν 和 $\bar{\nu}$ 分别表示中微子和反中微子。中微子和反中微子的质量几乎为零,不带电,具有极强的穿透能力,与物质发生相互作用的几率非常小。

对于 β^- 衰变和 β^+ 衰变,衰变后有三个粒子,衰变能在三个粒子之间分配,造成了 β 粒子

的能量从 0 到最大值(约等于衰变能)之间的连续分布。由于 β 粒子和中微子的质量远小于子核,因此,衰变能几乎都以 β 粒子和中微子的动能形式释放,子核的反冲动能很小。轨道电子俘获的结果产生子核与中微子,其衰变能在子核与中微子之间分配,中微子几乎带走了全部的衰变能。

轨道电子俘获是原子核将其核外的一个轨道电子俘获进了核内部,一般是俘获离核最近的 K 轨道的电子,这样原子核外的 K 轨道就少了一个电子,出现空位。此时,处于较高能量状态的电子就会跃迁到 K 轨道填充这个空位,其能量差以 X 射线的形式释放。也有可能不以 X 射线的形式释放能量,而是将能量直接交给另一个轨道电子,使其脱离原子核的约束成为自由电子,这个电子称为俄歇电子。

无论哪种形式的 β 衰变,子核与母核的质量数相同,电荷数相差 1。因此,子核和母核是相邻的同量异位素。例如, $^{32}_{15}\text{P}$ 的 β 衰变: $^{32}_{15}\text{P} \longrightarrow ^{32}_{16}\text{S} + e^{-}$, $^{32}_{15}\text{P}$ 和 $^{32}_{16}\text{S}$ 是相邻的同量异位素。

γ 跃迁

处于较高激发态的原子核要向较低能级跃迁,称为 γ 跃迁,跃迁过程中放出 γ 射线。 γ 跃迁与 α 衰变或 β 衰变相联系。 α 衰变和 β 衰变的子核往往处于激发态,子核退激时自发地发射出 γ 射线。因此, γ 射线的发射往往是伴随 α 或 β 射线产生的。例如, ^{60}Co 发生 β 衰变到子核 ^{60}Ni 的激发态, ^{60}Ni 从激发态跃迁到低激发态,从而发出 γ 射线。 γ 跃迁与 α 衰变或 β 衰变不同,它不会导致元素种类的变化,而只改变原子核的内部状态。因此 γ 跃迁的子核和母核的电荷数和质量数均相同,只是内部能量状态不同而已。图 1.3、1.4 分别为 ^{137}Cs 与 ^{60}Co 的衰变图。

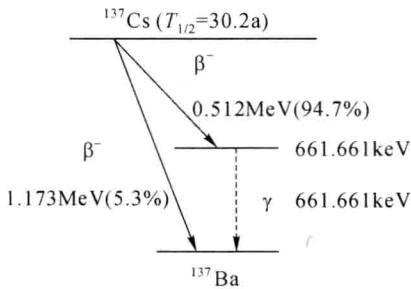


图 1.3 ^{137}Cs 的衰变图

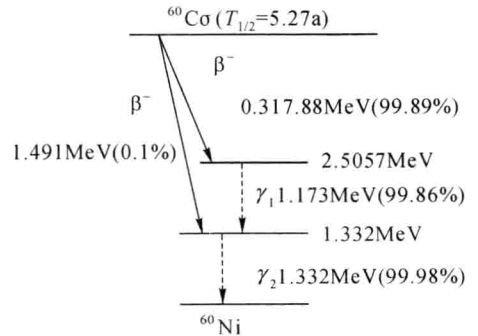
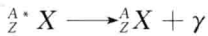


图 1.4 ^{60}Co 的衰变图

γ 跃迁可以表示为:



γ 跃迁时,原子核激发态的能量差几乎全部以 γ 射线的能量释放出来,反冲核的反冲动能很小,大多数情况下可以不考虑。

原子核从高激发态到低激发态或基态的跃迁有时也可以不通过发射 γ 射线的形式释放能量,而是将衰变能直接交给原子核外的轨道电子,使其脱离原子核的约束而发射出来,这一现象称为内转换,发射出来的电子称为内转换电子。像 γ 跃迁一样,内转换不改变原子的化学性质,发生内转换跃迁的份额表征了该核素的特性。