

辐射安全与防护

RADIATION SAFETY AND PROTECTION

吴宜灿 等 编著



中国科学技术大学出版社

辐射安全与防护

RADIATION SAFETY AND PROTECTION

吴宜灿 等 编著



中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书围绕辐射安全与防护的基本原理与方法体系,结合辐射在医学和工业中的应用展开叙述,内容包括辐射相关基础理论知识、辐射危害与防护原理、辐射防护体系、安全管理与辐射监测技术,并以放射诊断、放射治疗、核医学、辐照加工、射线探伤、同位素仪器仪表等为例概述了辐射在医学与工业应用中的安全管理与防护措施,并介绍了核设施辐射安全与防护知识。

本书可作为相关从业人员系统性学习辐射安全与防护知识的通用教材,也可作为公众了解和學習辐射安全与防护的科普读物。

图书在版编目(CIP)数据

辐射安全与防护/吴宜灿等编著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2017.1
ISBN 978-7-312-04147-1

I. 辐… II. 吴… III. 辐射防护 IV. TL7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 037190 号

出版 中国科学技术大学出版社
安徽省合肥市金寨路 96 号,230026
<http://press.ustc.edu.cn>
<https://zgkxjsdxcb.tmall.com>
印刷 安徽国文彩印有限公司
发行 中国科学技术大学出版社
经销 全国新华书店
开本 787 mm×1092 mm 1/16
印张 14.75
字数 378 千
版次 2017 年 1 月第 1 版
印次 2017 年 1 月第 1 次印刷
定价 45.00 元

编 委 会

吴宜灿 李桃生 郝丽娟

孙光耀 邹 俊 李文艺

龙鹏程 何 桃 顾 群

前 言

一个多世纪以来,电离辐射(简称“辐射”)已被广泛应用于人类社会的各个领域。它在发挥重要作用的同时,也会给人类与环境带来危害,严重时危及生命安全,因此必须做好辐射防护工作。经过六十多年的发展,我国已建立起一套相对完善的辐射防护体系,涌现出一批优秀的辐射防护书籍,但这些书籍针对性与专业性较强,难以满足辐射安全与防护的通用知识学习和科普需求。

作者团队长期从事辐射安全与防护相关研究,并积极开展辐射安全与防护培训和科普工作,促进公众正确认识辐射的价值及危害。本书是在前期科学研究和培训实践的基础上编著完成的,共分12章:第1章至第5章介绍了辐射安全与防护的基本理论与方法体系,从辐射相关的基础知识、危害及防护原理出发,阐述了我国辐射防护体系建设情况以及辐射安全管理与辐射监测相关技术等;第6章至第12章介绍了辐射在医学、核能和其他工业领域中的应用及防护方法,基本上涵盖了辐射应用的各个方面。

本书力求用通俗易懂的语言阐述核技术与核工程领域的辐射安全与防护知识,可作为相关从业人员学习辐射安全与防护知识的通用培训教材,也可作为公众了解和学习辐射安全与防护的科普读物。

作者团队查阅了大量文献和报告,进行了系统的梳理和总结概括,力求书中介绍的内容全面、系统、翔实。在本书撰写过程中,以下老师和同学在素材收集整理和书稿校核等方面给予了大力支持和帮助,在此表示诚挚的感谢(按拼音排序):柏云清、曹瑞芬、曹伟涛、陈朝斌、陈传凯、陈妮、丁文艺、胡丽琴、黄华、蒋洁琼、李斌、李伟华、李雅男、李亚洲、廖燕飞、刘超、刘慧、刘静、毛小东、彭德建、宋翰城、宋婧、宋勇、王飞鹏、王海霞、王捷、王明煌、王芷妍、吴庆生、夏冬琴、熊厚华、徐照、闫少健、杨琪、易楠、张青鹞、周俊、庄思璇。同时,在成书过程中,安徽省环保厅和其他同行专家给予了许多支持,在此一并向他们表示

衷心的感谢!

辐射安全与防护是一项系统工程,涉及诸多学科,有许多问题待进一步探索,书中存在的不足之处还请各位专家、读者不吝赐教。

谨以此书纪念中国科学院核能安全技术研究所成立五周年。

吴方

目 录

前言	(i)
第 1 章 辐射防护基础知识	(1)
1.1 原子与原子核物理基本理论	(1)
1.1.1 原子和原子核	(1)
1.1.2 放射性核素的衰变	(2)
1.1.3 射线与物质相互作用	(4)
1.2 辐射防护基本量	(9)
1.2.1 电离辐射场量	(9)
1.2.2 基本剂量学量	(9)
1.2.3 防护量	(11)
1.2.4 实用量	(13)
1.3 电离辐射源	(14)
1.3.1 天然本底辐射	(14)
1.3.2 人工辐射	(18)
参考文献	(22)
第 2 章 辐射危害与防护原理	(23)
2.1 电离辐射危害性	(23)
2.2 辐射生物学效应	(24)
2.2.1 辐射生物学效应产生机理	(24)
2.2.2 辐射生物学效应分类	(27)
2.2.3 低剂量辐射生物学效应	(30)
2.3 外照射防护	(31)
2.3.1 外照射剂量计算	(32)
2.3.2 外照射防护方法	(37)
2.4 内照射防护	(39)
2.4.1 内照射剂量计算	(40)
2.4.2 内照射防护方法	(49)
参考文献	(51)
第 3 章 辐射防护体系概况	(52)
3.1 辐射防护体系发展概况	(52)

3.1.1 国际辐射防护体系发展概况	(52)
3.1.2 我国辐射防护体系发展及完善	(53)
3.2 辐射防护原则与限值	(55)
3.2.1 辐射防护基本原则	(55)
3.2.2 我国个人剂量限值	(56)
3.3 辐射安全法律法规	(58)
3.3.1 法律法规体系	(58)
3.3.2 许可证制度	(61)
3.3.3 辐射安全监管制度	(63)
3.3.4 职业人员要求和权利	(65)
3.4 安全文化	(66)
3.4.1 安全文化内涵与要求	(66)
3.4.2 安全文化建设	(67)
参考文献	(69)
第4章 辐射安全管理	(70)
4.1 辐射源	(70)
4.1.1 放射性同位素源	(70)
4.1.2 射线装置	(71)
4.1.3 非密封源工作场所	(72)
4.2 环境影响评价	(73)
4.2.1 辐射环境影响评价的管理要求	(73)
4.2.2 辐射环境影响评价的技术方法	(75)
4.3 运输安全管理	(79)
4.3.1 运输安全概述	(79)
4.3.2 放射性物品运输资质	(80)
4.3.3 放射性物品运输容器	(80)
4.3.4 放射性物品运输工具和设备	(82)
4.3.5 放射性物品运输过程管理	(82)
4.4 运行安全管理	(83)
4.4.1 装置管理	(83)
4.4.2 人员管理	(85)
4.4.3 场所管理	(86)
4.5 放射性废物安全管理	(88)
4.5.1 放射性废物管理要求及原则	(89)
4.5.2 放射性废物的来源和分类	(89)
4.5.3 放射性废物处理	(91)
4.5.4 放射性废物处置	(94)

4.6 辐射事故应急	(95)
4.6.1 辐射事故分级	(95)
4.6.2 辐射事故应急预案	(96)
4.6.3 辐射事故应急响应	(97)
4.6.4 辐射事故案例总结	(100)
参考文献	(103)
第5章 辐射监测	(105)
5.1 监测的法规依据	(105)
5.2 辐射测量的原理与方法	(105)
5.2.1 X/ γ 射线测量	(106)
5.2.2 中子测量	(109)
5.2.3 带电粒子测量	(110)
5.3 个人剂量监测	(112)
5.3.1 个人外照射监测	(112)
5.3.2 体表污染监测	(113)
5.3.3 体内污染监测	(113)
5.4 工作场所辐射监测	(114)
5.4.1 外照射剂量监测	(114)
5.4.2 表面污染监测	(115)
5.4.3 空气污染监测	(115)
5.5 环境辐射监测	(116)
5.5.1 水中放射性物质监测	(116)
5.5.2 土壤中放射性物质监测	(116)
5.5.3 农牧产品中放射性物质监测	(117)
参考文献	(117)
第6章 放射诊断中的辐射安全与防护	(118)
6.1 放射诊断原理与设备分类	(118)
6.1.1 放射诊断原理	(118)
6.1.2 设备分类	(119)
6.2 辐射安全要求与防护措施	(125)
6.2.1 场所的安全要求	(125)
6.2.2 设备的安全要求	(127)
6.2.3 安全操作要求	(128)
6.2.4 安全连锁	(130)
6.2.5 事故应急	(130)
6.3 典型案例	(131)
6.3.1 低能 X 射线机操作事故	(132)

6.3.2 介入设备操作事故	(132)
参考文献	(133)
第7章 放射治疗中的辐射安全与防护	(134)
7.1 放射治疗原理及常用设备分类	(134)
7.1.1 放射治疗原理	(134)
7.1.2 设备分类	(135)
7.2 辐射安全要求与防护措施	(139)
7.2.1 设备的安全要求	(140)
7.2.2 场所的安全要求	(142)
7.2.3 安全操作要求	(143)
7.2.4 安全联锁	(144)
7.2.5 事故应急	(144)
7.3 典型案例	(145)
7.3.1 患者受超剂量照射事故	(145)
7.3.2 报废的 ⁶⁰ Co治疗机所致辐射事故	(146)
参考文献	(146)
第8章 核医学中辐射安全与防护	(148)
8.1 核医学概述	(148)
8.1.1 核医学原理与分类	(148)
8.1.2 放射性药物	(149)
8.1.3 核医学相关设备	(152)
8.2 辐射安全要求与防护措施	(155)
8.2.1 辐射来源	(156)
8.2.2 场所的安全要求	(156)
8.2.3 放射性药物操作辐射安全要求	(157)
8.2.4 安全联锁	(158)
8.2.5 放射性废物安全处理	(159)
8.2.6 事故应急	(160)
8.3 典型案例	(161)
8.3.1 核医学药物制备辐射事故	(161)
8.3.2 核医学治疗辐射事故	(162)
参考文献	(162)
第9章 辐射加工中的辐射安全与防护	(163)
9.1 辐射加工简介	(163)
9.1.1 辐射加工的原理	(163)
9.1.2 辐照装置的分类	(164)
9.2 辐射安全要求与防护措施	(167)

9.2.1 辐射源的安全要求	(168)
9.2.2 场所的安全要求	(170)
9.2.3 安全操作要求	(171)
9.2.4 安全联锁	(172)
9.2.5 事故应急	(173)
9.3 典型案例	(174)
9.3.1 γ 射线源管理不当事故	(174)
9.3.2 加速器超剂量辐照事故	(177)
参考文献	(178)
第 10 章 工业射线探伤的辐射安全与防护	(179)
10.1 工业射线探伤概述	(179)
10.1.1 工业射线探伤原理及应用	(179)
10.1.2 工业射线探伤辐射设备	(183)
10.2 辐射安全要求与防护措施	(185)
10.2.1 辐射源的安全要求	(185)
10.2.2 场所的安全要求	(187)
10.2.3 安全操作要求	(188)
10.2.4 安全联锁	(188)
10.2.5 事故应急	(189)
10.3 典型案例	(189)
10.3.1 γ 射线探伤源失控致人员受照事故	(190)
10.3.2 探伤仪联锁故障致放射源丢失事故	(191)
10.3.3 X 射线误照事件	(192)
参考文献	(193)
第 11 章 同位素仪器仪表的辐射安全与防护	(194)
11.1 核子仪辐射安全与防护	(194)
11.1.1 核子仪概述	(194)
11.1.2 核子仪辐射安全与防护	(198)
11.2 核测井辐射安全与防护	(200)
11.2.1 核测井概述	(200)
11.2.2 核测井辐射安全与防护	(201)
11.3 典型案例	(204)
11.3.1 石油测井放射源落井事故	(204)
11.3.2 疏于管理而造成 6 组放射源丢失事故	(205)
参考文献	(207)
第 12 章 核设施的辐射安全与防护	(208)
12.1 核燃料的开采与加工	(208)

12.1.1	铀矿的开采与加工简述	(208)
12.1.2	铀矿开采过程中的辐射危害及防护	(211)
12.1.3	铀加工过程中的辐射危害及防护	(212)
12.2	反应堆和临界装置	(213)
12.2.1	研究堆和临界装置的危害来源及防护	(213)
12.2.2	核电厂的辐射防护	(214)
12.2.3	聚变堆的辐射防护	(216)
12.3	乏燃料后处理	(218)
12.3.1	乏燃料运输中的防护	(218)
12.3.2	乏燃料处理中的防护	(220)
12.3.3	乏燃料的处置	(221)
参考文献		(223)

第 1 章 辐射防护基础知识

辐射是指物质向四周发射各种粒子或电磁波的现象。根据辐射与物质相互作用结果,辐射可分为两类:电离辐射和非电离辐射。其中,电离辐射是指与物质相互作用时使物质中原子发生电离的辐射;非电离辐射是指不能引起电离的辐射,本书主要介绍电离辐射(以下简称辐射)的安全与防护问题。

辐射目前已广泛应用于放射诊断、放射治疗、核医学、辐射加工、工业射线探伤等领域。在造福人类的同时,也会不可避免地给人类和环境带来辐射危害,辐射防护主要研究如何在利用辐射为人类造福的同时避免或减少它的危害。

本章首先对辐射产生原理及其与物质相互作用机制进行介绍,其次介绍如何定量评估辐射场与物质的相互作用,最后简单介绍辐射源的种类。

1.1 原子与原子核物理基本理论

辐射的产生及其与物质的相互作用基本上都发生在原子或原子核尺度上,本节主要介绍原子与原子核物理的基本理论,包括原子与原子核特性、放射性核素衰变规律、射线与物质的相互作用机制。

1.1.1 原子和原子核

自然界中,物质是由原子组成的,原子的半径在 10^{-10} m 量级左右,其质量很小。1960 年的国际物理学会议和 1961 年的化学会议分别通过决议,确定以一个 ^{12}C 原子质量的十二分之一作为原子质量单位,记为 u(unit 缩写),又称作碳单位, $1\text{ u} = 1.993 \times 10^{-26} \text{ kg} / 12 = 1.661 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。

原子是由原子核和核外电子组成的,其结构如图 1.1 所示。原子核质量约占原子质量的 99.98%,半径在 $10^{-15} \sim 10^{-14}$ m 量级。原子核是由质子和中子(统称核子)组成的,其中,质子带一个单位的正电荷,中子不带电。质子的质量约为 $1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$,中子的质量约为 $1.675 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。每个核外电子带一个单位的负电荷,质量约为 $9.110 \times 10^{-31} \text{ kg}$,其运行轨道以壳层模型排列,距核最近的电子壳层(第一层)称为 K 壳层,由内向外依次是 K、L、M、N、O 等,每个壳层上最多有 $2n^2$ 个电子(n 是壳层序号)。不同壳层轨道上的电子具有不同的能量,距核越近,电子受原子核束缚越紧,势能越小。核外电子排布如图 1.1 所示。在没有外界作用的情况下,原子核外电子所带的负电荷数等于原子核所带的正电荷数,整个原子呈电中性。

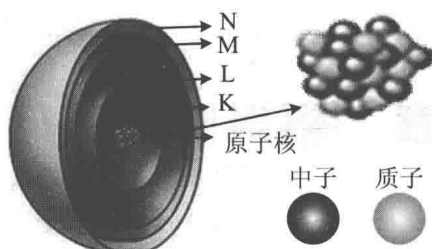


图 1.1 原子结构简图

原子核中质子数又称为原子序数,用符号 Z 表示,中子数用 N 表示。原子核中质子数和中子数之和称为原子质量数,用符号 A 表示。原子序数确定了原子的化学特性,具有相同原子序数的一类原子被称为元素。一种元素的原子核包含相同数目的质子,但可能包含不同数目的中子。通常把具有一定质子数和中子数的原子(核)称为核素,用符号 A_ZX 表示,简写为 AX ,其中 X 代表元素符号;把具有相同质子数、不同中子数的核素互称为同位素,如氢元素有三种同位素,即 1H , 2H , 3H 。

另外,虽然原子核是由中子和质子组成的,但研究表明,原子核的质量总是小于组成它的所有核子的质量总和,这一现象称为质量亏损。如 2H 原子核由一个质子和一个中子组成,但两个核子的质量之和($m_p + m_n$)大于 2H 原子核的质量($m_{{}^2H}$),两者的差值为

$$\Delta m = m_p + m_n - m_{{}^2H} = 0.002\,390\,u \quad (1.1)$$

根据爱因斯坦质能关系,可得核子结合成原子核时能量减小了 $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$ (Δm 是反应前后的质量亏损, c 是光速),这表明核子结合成原子核时会释放出能量,该能量即为原子核的结合能。在核物理中,能量单位一般使用 eV,1 V 表示一个电子在真空中通过电势差为 1 V 的电场时所获得的能量,与焦耳(J)的转换关系为 $1\,eV = 1.602 \times 10^{-19}\,J$,相当于约 $1.8 \times 10^{-36}\,kg$ 质量亏损释放出的能量。

1.1.2 放射性核素的衰变

1896 年,法国物理学家贝可勒尔(Becquerel)发现铀的化合物能使放在其附近的照相底片感光,后来认识到这是由铀发射出的某种肉眼看不见且穿透力强的光线导致的。此后的 10 多年中,科学家通过实验证实了某些天然核素的原子核是不稳定的,它们能自发地转变成另一种核素的原子核,并伴随发出某种粒子(这些粒子统称为射线),这一过程称为核衰变,这些核素称为放射性核素。能够自发进行核衰变并释放出射线的特性称为放射性。

放射性核素的数量按固有的衰变速度而逐渐减少,如下式所示:

$$\Delta N(t) = -\lambda N(t) \Delta t \quad (1.2)$$

式中, $\Delta N(t)$ 为 t 时刻 Δt 时间内发生衰变的放射性核素数量; λ 为衰变常数,表征放射性核素的衰变速度,单位为 s^{-1} ; $N(t)$ 为 t 时刻放射性核素数量。

由公式(1.2)可得到放射性核素数量随时间变化的关系,如下式所示:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.3)$$

式中, N_0 为初始时刻放射性核素数量。从该式可知当 $t = T_{1/2} = (\ln 2)/\lambda$ 时,放射性核素数量变为初始时刻的一半,该时间($T_{1/2}$)称为半衰期。各种放射性核素的半衰期差异较大,例

如天然铀中丰度最高的 ^{238}U ,其半衰期为 4.5×10^9 年,工业射线探伤用 ^{192}Ir 的半衰期为74天,医用放射性核素 ^{125}I 的半衰期是60天。在放射性核素的生产及应用、辐射防护中,半衰期是一个非常重要的参数。

放射性核素的衰变率通常使用放射性活度(简称活度)来描述。活度(A_t)是指单位时间发生衰变的核素数量:

$$A_t = \lambda N(t) \quad (1.4)$$

放射性活度的国际单位制(SI制)的单位为 s^{-1} ,专用单位为贝可勒尔(Bq , $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$),简称贝可,曾用单位为居里(Ci), $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ 。实际应用中,常用下列单位来表示放射性核素的活度:1千贝可(kBq)= 10^3 Bq ,1兆贝可(MBq)= 10^6 Bq 等。

在实际使用中,还常用比活度反映放射性核素的衰变情况。比活度是指单位质量或单位体积的放射性核素的活度,常用的单位有 Bq/kg , Bq/m^3 等。比活度可以反映核素的相对危险程度。对于比活度大的核素,即使其质量或体积较小,也可能很危险。

放射性核素在衰变时可发射出 α 、 β 、 γ 等射线,这些衰变分别称为 α 衰变、 β 衰变、 γ 衰变,下面分别进行介绍。

1.1.2.1 α 衰变

α 射线由 α 粒子组成, α 粒子是带两个正电荷的 ^4He ,能够发生 α 衰变的天然放射性核素的原子序数大都在82以上。原子核发生 α 衰变的过程(如图1.2所示)一般可以写成:



其中, ^A_ZX 称为母体核素; $^{A-4}_{Z-2}\text{Y}$ 称为子体核素; Q 为衰变能,可由衰变前后的质量差计算得到。

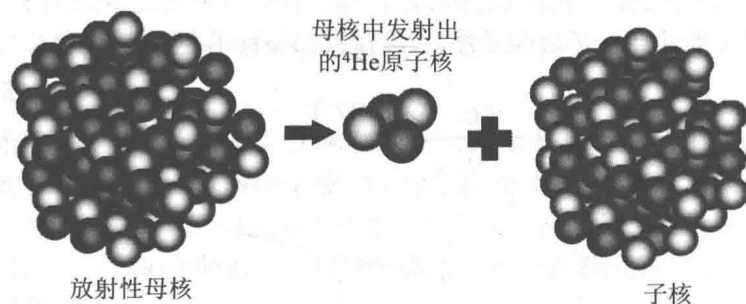


图1.2 α 衰变示意图

1.1.2.2 β 衰变

β 射线由 β 粒子组成, β 粒子是电子或正电子。 β 衰变包括 β^- 衰变、 β^+ 衰变、轨道电子俘获三类,其中 β^- 衰变可以理解为核内一个中子转变成质子,同时释放一个电子与一个中微子; β^+ 衰变可以看成是核内一个质子转变成中子,同时释放出一个正电子与一个中微子;轨道电子俘获是原子核俘获一个核外电子,使得核内一个质子转变成中子,同时释放出一个中微子,并形成一個空位,如图1.3所示。这三类衰变分别如式(1.6)~(1.8)所示:



其中, X 和 Y 分别表示母核和子核, e^- 和 e^+ 为电子和正电子, ν 为中微子。

当发生轨道电子俘获时, 处于较高能级的电子会跃迁至轨道上的空位处, 同时发射出特定能量的光子, 这种光子又被称为特征 X 射线。

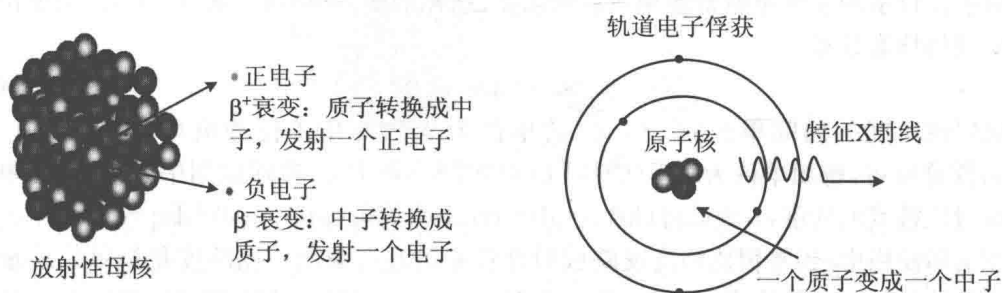


图 1.3 β 衰变示意图

1.1.2.3 γ 衰变

γ 射线实质上是波长极短的电磁波, 又称光子。原子核发生 α 或 β 衰变时, 所生成的子核常处于较高能量的不稳定状态(即激发态), 通过发射 γ 射线或将激发能传递给核外电子的方式实现退激发。 γ 衰变可用式(1.9)表示。

$${}^A_Z X^* \longrightarrow {}^A_Z X + \gamma \quad (1.9)$$

式中, ${}^A_Z X^*$ 表示处于激发态的子核, ${}^A_Z X$ 是放出 γ 后的稳定核。图 1.4 为 ${}^{137}\text{Cs}$ 核素的 β^- 衰变与 γ 衰变示意图。

大多数处于激发态的原子核的寿命极短, 一般为 10^{-14} s, 因而可认为 γ 射线与 α 、 β 粒子同时放出。放出 γ 射线后原子核的质量数、电荷数都保持不变。

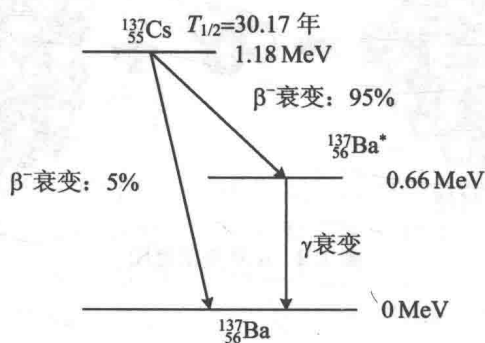


图 1.4 核素衰变示意图

有时原子核发生退激发时, 多余的能量交给核外电子, 使其脱离原子核束缚而发射出来, 这一过程称为内转换。内转换过程中释放的电子具有固定的能量。

1.1.3 射线与物质相互作用

人们在实际工作、生活中可能遇到的射线包括带电粒子(α 粒子、 β 粒子等)、中子、X/ γ 射线等。射线与物质相互作用时, 通过与物质中的原子核或核外电子发生反应, 将能量转移

给原子核或核外电子。在此过程中,射线不断被损耗,同时物质中的原子由于接受射线能量,发生激发、电离等现象。

(1) 激发。当原子从外界获取的能量小于原子核对核外电子的束缚能时,虽然核外电子不能摆脱原子核束缚,但能使某些核外电子跃迁至较高的能级上,原子整体仍保持电中性,这种现象称为激发。

(2) 电离。当原子从外界获取的能量大于原子核对核外电子的束缚能时,核外电子脱离原子核束缚,形成一个电子-离子对,这一现象称为电离。

能够使物质的原子发生电离的辐射称为致电离辐射(简称电离辐射),反之则称为非电离辐射。电离辐射的粒子类型可分为直接致电离辐射粒子和间接致电离辐射粒子。其中,直接致电离辐射粒子是指能够通过碰撞使物质发生电离的带电粒子(如电子、质子和 α 粒子等),间接致电离辐射粒子是指与物质相互作用时能够释放直接致电离粒子或引起核反应的不带电粒子(如中子、X/ γ 射线等)。

下面将按射线种类分别介绍带电粒子(α 、 β 等)、中子以及X/ γ 射线与物质的相互作用机制。

1.1.3.1 带电粒子与物质相互作用

带电粒子带有电荷,在与物质相互作用时因受原子核库仑场影响很难直接与原子核相互作用,一般与核外电子或原子核库仑场发生相互作用,如电离和激发、韧致辐射等;当带电粒子能量较高时,能够克服原子核库仑场影响,与原子核发生相互作用,即核反应,如聚变反应、散裂反应等。带电粒子与物质作用过程中,动能逐渐减少,最后被物质吸收,其在物质中沿入射方向从进入到最后被吸收所经过的最大直线距离,称为带电粒子在该物质中的射程。下面对辐射防护中常涉及的电离和激发、韧致辐射、吸收等进行介绍。

1. 电离和激发

具有一定能量的带电粒子在物质中通过时,主要发生直接电离或激发作用。直接电离过程中打出的电子(称为 δ 电子),当其能量较高时还能继续产生电离。 δ 电子与物质原子发生的电离过程叫作次级电离。总电离是直接电离与次级电离之和。为了衡量带电粒子电离本领的大小,定义了一个叫“比电离”的量,它是指带电粒子在单位路程上所产生的电子-离子对总数。比电离越高,带电粒子通过电离在单位路程上损失的能量就越高。比电离与入射带电粒子的速度平方成反比,与入射带电粒子电荷数的平方成正比。

与 β 粒子相比, α 粒子带两个单位电荷且质量数大,能量相同时,“比电离”相差上万倍, α 粒子在物质中的射程很短,例如, ^{238}U 发生 α 衰变放出的4.27 MeV的 α 粒子在人体组织中的射程仅为 $3.4 \times 10^{-5} \text{ m}$ 。 β 粒子在与物质原子作用时,由于不断受到原子中轨道电子及原子核的电磁场作用,会偏离原来的运动方向。因此, β 粒子在物质中的路径不是一条直线,不像 α 粒子那样有确定的射程。

2. 韧致辐射

高速带电粒子从靶原子核(简称靶核)附近掠过时,由于受原子核库仑场作用动能发生变化,部分或全部动能会以具有连续能量的电磁波(即X射线,本质上是不带电、静止质量为零的光子)的形式向外发射,这种现象称为韧致辐射。根据电磁学理论可得带电粒子在物质中相互作用时由韧致辐射导致的能量损失: