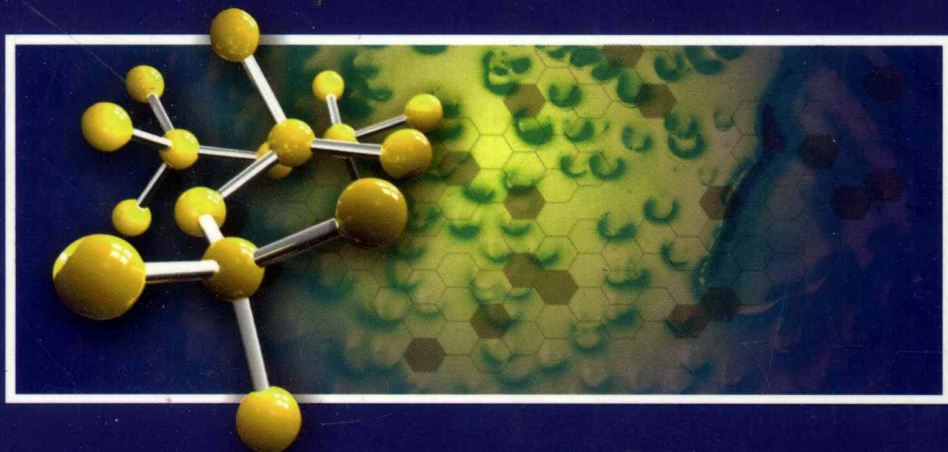


应用放射性同位素 安全防护与管理

Safety Protection and Management
for Applied Radioisotopes

主编 李鲁滨 曹珍山

主审 郭力生



R81
L20

应用放射性同位素安全 防护与管理

主 编 李鲁滨 曹珍山

副主编 胡向军 王东根 李 悦 朱茂祥

主 审 郭力生

军事医学科学出版社

· 北 京 ·

内容提要

本书系应用放射性同位素安全防护与管理方面的专著,内容包括辐射防护基础知识、辐射危害与防护原则及标准、放射性核素的代谢与危害、开放型放射实验室的安全防护与管理、放射性废物的管理和处置、放射性污染的洗消和医学处理、辐射监测设备及其应用、辐射监测与评价、相关法规和标准,以及放射性同位素实验安全管理中的一些实际技术问题。内容较全面、具体。可作为放射性同位素工作者上岗前或定期培训使用,也可作为辐射监督、监测人员以及相关专业人员在教学、训练和实际工作中的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

应用放射性同位素安全防护与管理/李鲁滨,曹珍山主编.

-北京:军事医学科学出版社,2009.9

ISBN 978-7-80245-058-5

I. 应… II. ①李… ②曹… III. 放射性同位素-辐射防护 IV. R14

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第018769号

出版:军事医学科学出版社

地址:北京市海淀区太平路27号

邮编:100850

联系电话:发行部:(010)66931051,66931049,81858195

编辑部:(010)66931127,66931039,66931038

86702759,86703183

传真:(010)63801284

网址:<http://www.mmsp.cn>

印装:北京冶金大业印刷有限公司

发行:新华书店

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:14.25

字数:347千字

版次:2009年2月第1版

印次:2009年2月第1次

定价:35.00元

本社图书凡缺、损、倒、脱页者,本社发行部负责调换

前 言

随着科学技术的发展,放射性同位素已在科学研究等许多领域广泛应用,成为实验技术中十分重要的组成部分。我国《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》明确规定:使用放射性同位素和射线装置的单位,应当对直接使用同位素和射线装置的工作人员进行安全和防护知识的教育培训,并进行考核;考核不合格的,不得上岗。在以往从事放射性同位素的工作中,因不采取必要的安全防护措施,不严格按操作规程办事,出现的辐射事故屡见不鲜,教训深刻。因此,对从事放射性同位素工作的人员进行上岗前培训,对放射性同位素实验室及相关人员进行监督、监测等安全管理,都是非常必要的。

本书较系统地介绍了电离辐射防护的基础知识、辐射危害与防护原则及标准、放射性核素的代谢与危害、开放型放射实验室的安全防护与管理、放射性废物的管理和处置、放射性污染的洗消和医学处理、核仪器的使用、辐射监测与评价、相关法规和标准,以及放射性同位素实验室安全管理中的一些实际技术问题等,力求结合常用放射性同位素的种类、操作等特点,较全面地介绍相关理论和技术知识,以及国家现行的相关法规、条例、标准及某单位正在实施的规章制度。

编撰本书的主要目的,是作为放射性同位素工作者上岗前或定期培训的教科书,使受训者掌握必要的知识和技能,考核能够合格,符合上岗条件。同时,也可作为辐射监督、监测人员以及相关专业技术人员在教学、训练和实际工作中的参考书,为使用者提供查询有关知识、技术、法规、标准等的便利。

本书在编写和出版过程中,军事医学科学院周平坤研究员、叶常青研究员、李刚博士给予了大力支持和帮助,谨此致谢。

本书编写时间较短,内容中难免有不当之处,恳请批评指正。

编者

2009年1月

目 录

第1章 电离辐射防护基础知识	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 基本概念	(2)
1.2.1 原子结构	(2)
1.2.2 原子核的组成	(3)
1.2.3 核素、同位素和同质异能素	(3)
1.2.4 放射性衰变	(3)
1.2.5 稳定性同位素和放射性同位素	(5)
1.2.6 电离和激发	(5)
1.2.7 电离辐射	(6)
1.3 电离辐射的种类	(6)
1.3.1 X、 γ 射线	(6)
1.3.2 α 射线	(6)
1.3.3 电子和正电子	(6)
1.3.4 质子	(6)
1.3.5 中子	(7)
1.3.6 重离子	(7)
1.4 电离辐射与物质的相互作用	(7)
1.4.1 相互作用程度的描述方法	(7)
1.4.2 带电粒子与物质的相互作用及其能量损失	(7)
1.4.3 X 射线和 γ 射线与物质的相互作用	(8)
1.4.4 中子与物质的相互作用	(9)
1.5 辐射剂量学的量和单位	(9)
1.5.1 放射性的量和单位	(9)
1.5.2 辐射学的量和单位	(10)
1.5.3 相互作用系数	(10)
1.5.4 剂量学的量和单位	(11)
1.5.5 辐射防护中使用的量和单位	(11)
1.5.6 防护监测中实用量的运用	(12)
1.5.7 相关符号所代表的量	(12)
第2章 电离辐射危害与防护原则及标准	(14)
2.1 电离辐射的基本生物效应	(14)

2.1.1	辐射效应的分类及影响因素	(14)
2.1.2	辐射的确定性效应	(17)
2.1.3	辐射的随机性效应	(23)
2.1.4	放射性核素内照射的生物效应	(26)
2.2	辐射防护的目的和范围	(26)
2.2.1	辐射防护的目的和意义	(26)
2.2.2	辐射防护的发展概况	(26)
2.2.3	辐射防护的范围	(28)
2.3	辐射防护的原则、措施和标准	(29)
2.3.1	辐射防护的基本原则	(29)
2.3.2	辐射防护法规及标准	(31)
2.3.3	防护的措施和方法	(32)
第3章	放射性核素的危害与医学处理	(33)
3.1	放射性核素在体内的生物转运	(33)
3.1.1	放射性核素在体内经膜转运	(34)
3.1.2	放射性核素的吸收	(34)
3.1.3	放射性核素在体内的分布	(42)
3.1.4	放射性核素由体内的排除	(44)
3.1.5	放射性核素的生物动力学	(46)
3.2	放射性核素内照射损伤效应	(51)
3.2.1	放射性核素内照射作用的机理	(51)
3.2.2	放射性核素内照射作用特点	(51)
3.2.3	影响放射性核素作用的因素	(52)
3.2.4	放射性核素内照射损伤效应	(55)
3.3	放射性核素内污染的医学处理	(61)
3.3.1	内污染的医学处理原则	(61)
3.3.2	减少吸收	(62)
3.3.3	加速排除	(64)
3.3.4	医学干预水平	(70)
第4章	辐射监测与评价	(75)
4.1	一般规定和要求	(75)
4.1.1	辐射监测质量保证	(75)
4.1.2	辐射监测机构和职责	(76)
4.1.3	环境辐射监测大纲	(76)
4.1.4	样品采集原则	(77)
4.1.5	监测结果与报告	(78)
4.2	辐射监测方法	(78)
4.2.1	地表 γ 监测	(78)
4.2.2	γ 能谱分析	(79)

4.2.3	α 能谱分析	(81)
4.2.4	氡浓度标准测量方法	(81)
4.3	个人监测	(82)
4.3.1	一般要求	(82)
4.3.2	外照射	(82)
4.3.3	内照射	(83)
4.3.4	表面污染	(83)
4.4	工作场所监测	(84)
4.4.1	基本原则	(84)
4.4.2	监测计划的制订	(84)
4.4.3	放射性同位素使用场所的监测	(84)
4.5	环境监测	(85)
4.5.1	目的和内容	(85)
4.5.2	样品的采集和处理	(86)
4.5.3	核设施环境监测	(90)
4.6	流出物监测	(92)
4.6.1	流出物监测目的	(92)
4.6.2	制定监测计划应注意的特殊问题	(92)
4.7	摄入量估算与评价	(92)
4.7.1	内照射的放射防护评价量	(92)
4.7.2	内照射监测方法	(93)
4.7.3	摄入量的估算	(93)
4.7.4	剂量估算程序	(93)
4.7.5	表示方式和测量方法	(94)
4.7.6	结果评价	(94)
第5章	开放型放射实验室的安全防护与管理	(96)
5.1	剂量限值	(96)
5.1.1	职业人员剂量限值	(96)
5.1.2	徒工和学员的剂量限值	(96)
5.1.3	特殊照射	(96)
5.1.4	公众照射	(97)
5.2	操作开放型放射性物质的规定	(97)
5.2.1	减少照射的防护措施	(97)
5.2.2	开放型放射性核素的安全操作	(97)
5.2.3	个人防护	(97)
5.2.4	辐射监测	(98)
5.3	表面污染控制水平	(98)
5.3.1	应用表面污染控制水平注意事项	(98)
5.3.2	工作场所中设备与用品的表面污染控制水平	(99)

5.4 辐射工作场所的分区	(99)
5.4.1 控制区	(99)
5.4.2 监督区	(99)
5.5 非密封放射性物质工作场所的分级	(99)
5.5.1 非密封放射性物质工作场所的分级	(99)
5.5.2 放射性核素日等效操作量的计算	(99)
5.6 常用放射性核素的毒性分组	(100)
5.7 个人防护用具的配备与应用	(101)
5.8 职业照射监测和评价	(101)
5.8.1 个人监测和评价	(101)
5.8.2 工作场所的监测和评价	(102)
5.8.3 监测的质量保证	(102)
5.9 开放型实验室辐射安全基本知识	(102)
5.9.1 放射性核素的辐射危害	(102)
5.9.2 辐射的来源	(102)
5.9.3 外照射防护	(102)
5.9.4 内照射防护	(104)
5.9.5 其他管理控制	(104)
5.9.6 污染监测	(105)
5.9.7 事故应急	(105)
5.9.8 体表污染去除	(108)
5.9.9 常用核素的辐射特性及其防护措施	(105)
5.9.10 医学常用放射性技术	(108)
第6章 放射性探测设备及其应用	(110)
6.1 射线与物质相互作用	(110)
6.1.1 带电粒子与物质的相互作用	(110)
6.1.2 光子与物质的相互作用	(110)
6.1.3 中子与物质的相互作用	(111)
6.2 辐射探测器	(111)
6.3 核电子学基础	(112)
6.4 常用辐射探测设备	(115)
6.4.1 个人剂量计	(115)
6.4.2 表面沾污仪	(116)
6.4.3 多功能辐射仪	(118)
6.4.4 便携 γ 谱仪	(122)
6.4.5 MicroBeta 液闪发光测定仪	(123)
6.4.6 一体化便携式高纯锗核素甄别器	(124)
6.4.7 半导体 α 谱仪	(127)
6.4.8 栅网电离室 α 谱仪	(127)

6.5 放射性测量设备应用	(128)
6.5.1 原子核物理学	(128)
6.5.2 核化学	(128)
6.5.3 放射化学	(129)
6.5.4 放射性同位素应用	(129)
第7章 放射性污染的医学处理	(131)
7.1 体表和伤口污染的处理	(131)
7.1.1 通用程序	(131)
7.1.2 弹片伤或放射性污染伤口的处理	(132)
7.1.3 孔口(耳、鼻、嘴)的处理	(133)
7.1.4 眼睛的处理	(133)
7.1.5 毛发的处理	(133)
7.1.6 局部皮肤的处理	(134)
7.2 体内污染的医学处理	(134)
7.3 核辐射应急洗消箱简介	(137)
7.3.1 洗消液	(137)
7.3.2 使用说明书	(139)
7.3.3 放射性污染洗消程序	(140)
7.3.4 清单	(140)
第8章 放射性废物的管理、处理和处置	(141)
8.1 放射性“三废”的特点	(141)
8.2 放射性废物管理的目标和原则	(141)
8.2.1 管理目标	(141)
8.2.2 管理原则	(141)
8.3 城市放射性废物管理办法	(142)
8.4 放射性废物的分类	(142)
8.5 放射性废物的处理、处置	(143)
8.5.1 放射性废气的处理、排放	(143)
8.5.2 放射性废水(废液)的处理、排放	(144)
8.5.3 固体放射性废物(低中水平)的处理、处置	(145)
8.6 放射源的管理办法	(146)
8.7 废放射源的处置	(147)
8.7.1 液体放射源	(147)
8.7.2 气态放射源	(147)
8.7.3 α 放射源	(147)
8.7.4 β 放射源	(147)
8.7.5 γ 放射源	(147)
8.7.6 中子源	(147)
8.7.7 废放射源的处置	(147)

8.8 固体放射性废物的处理程序	(147)
8.8.1 环保部门对产生放射性废物单位的要求	(147)
8.8.2 环保部门处理程序	(148)
第9章 放射性同位素实验室防护中值得重视的问题	(149)
9.1 从事放射工作的人员应持证上岗	(149)
9.2 从事放射性同位素实验要消除两个极端	(149)
9.3 从事放射性同位素工作前要了解所使用的放射性核素的属性	(149)
9.4 放射性核素的失效问题	(149)
9.5 充分利用辐射防护的基本方法	(150)
9.6 放射性同位素实验室卫生通过间和衣柜的作用	(150)
9.7 怎样处理剩余的液体同位素	(150)
9.8 为什么要建专门的放射性废物储存间	(150)
9.9 排风的烟囱多高才符合国家标准	(151)
9.10 几种常用放射性同位素的防护	(151)
9.10.1 ^{32}P 的防护	(151)
9.10.2 ^3H 的防护	(151)
9.10.3 放射性碘的防护	(152)
9.11 保存好放射源的标签	(152)
9.12 动物尸体的处理	(152)
9.13 做过放射性同位素的实验室可否再利用	(152)
9.14 怎样理解放射性同位素实验室的污染问题	(153)
9.15 从事放射性同位素实验前应计算现有活度	(153)
9.16 对放射性废物要分类	(154)
9.17 处理放射性废源不要穿铅衣	(154)
9.18 对屏蔽的误解	(154)
9.19 科研经费的预算	(154)
9.20 国外放射性同位素实验的管理体制	(154)
9.21 放射性同位素安全审管部门的职责	(155)
9.22 加强宣传,普及放射防护知识和有关法规、标准	(155)
第10章 核与辐射安全管理的法规和标准体系	(156)
10.1 我国核与辐射安全管理的法规和标准体系概况	(156)
10.1.1 我国核与辐射安全管理法规和标准体系的层次及相互关系	(156)
10.1.2 我国核与辐射安全管理法规和标准体系各层次的制定和发布途径	(157)
10.2 中华人民共和国放射性污染防治法	(157)
10.2.1 放射性污染的定义	(157)
10.2.2 适用范围	(158)
10.2.3 环保部门的法律地位	(158)
10.2.4 四级监管体制	(158)
10.2.5 四级监管体制职责	(158)

10.2.6	两级审批	(158)
10.2.7	本法确定的十五项制度	(158)
10.2.8	本法中几个重要法律责任	(160)
10.3	《放射性同位素与射线装置放射安全和防护条例》(449 号令)	(161)
10.3.1	449 号令主要特色	(162)
10.3.2	有关部门的职责	(162)
10.3.3	放射源与射线装置的分类管理	(163)
10.3.4	许可证制度	(166)
10.3.5	许可证分级管理	(167)
10.3.6	放射性同位素转让管理	(167)
10.3.7	放射源的编码	(167)
10.3.8	从业人员资质管理	(168)
10.3.9	辐射事故分级	(168)
10.4	《放射性同位素与射线装置放射安全许可管理办法》	(168)
10.4.1	许可证制度	(169)
10.4.2	许可证的分级审批、颁发	(169)
10.4.3	许可证的变更	(169)
10.4.4	放射源转移到外省使用的备案	(170)
10.4.5	废源的管理	(170)
10.4.6	年度评估	(170)
10.4.7	豁免管理	(170)
附件 1	中华人民共和国放射性污染防治法	(171)
附件 2	放射性同位素与射线装置安全和防护条例	(179)
附件 3	放射性同位素与射线装置安全许可管理办法	(189)
附件 4	放射性核素的毒性分组	(198)
附件 5	某单位《放射性同位素使用安全防护和管理暂行规定》	(201)
附件 6	某单位《放射性同位素实验室安全防护暂行规程》	(204)

第1章 电离辐射防护基础知识

1.1 引言

电离辐射是一个专用术语,指能够致使原子电离或激发的高能射线。所谓原子电离或激发,是指原子的轨道电子从外界获得能量,从而摆脱了原子核的束缚,成为自由电子或从低能态轨道跃迁到高能态轨道的现象。电离辐射包括人们熟悉的 α 粒子、 β 粒子、 γ 射线和X射线、中子、宇宙射线,加速器产生的高能电子和质子、重离子和基本粒子等。人们常说的放射性、核辐射等,都属于电离辐射的范畴。

任何物质都由原子组成,对生命物质而言,当细胞中的各种物质如DNA受到电离辐射作用时,将由于物质中原子的电离或激发作用导致细胞死亡或变异,从而造成不良的生物学后果。大剂量照射,将造成急性放射性损伤;长期、低水平的电离辐射照射,有可能致癌和发生遗传性疾病。因此,无论在何种情况下,都应当注意保护自己与他人尽可能免受或少受电离辐射的照射。

但就像生活在空气中一样,人类生活在一个电离辐射无所不在的环境中:居室中有放射性氡气,户外有宇宙射线,食物和饮水中有放射性物质,就连每个人的身体器官里也沉积着多种微量放射性核素……这些都叫做天然放射性。天然放射性对人类的照射是不可避免的,其平均值约为每人每年2.4毫希沃特。希沃特是表示电离辐射对人体照射并引起后果大小的度量单位。除天然照射外,人类还从事着大量可增加电离辐射照射的活动,如放射诊断及治疗、核动力、核电、军事、工业、科研、航空和航天等。放射防护中把凡是能增加电离辐射照射的人类活动叫做实践。一般而言,实践对社会应当是有利的,否则就没有必要进行这项实践。但就个体而言,当受到某项实践照射时,有些人会得益,其他人则会受到伤害。举一个例子, ^{131}I 是放射性药物,医院中常用来诊治甲状腺病患者,在这个实践中,有三类人可能会受到照射:一类是接受治疗的患者,因为体内被注射进了放射性药物;第二类是医务人员,在为患者治疗过程中受到照射;最后一类是上述两种人之外的其他人,也有可能因医院的防护设施不好或因靠近患者受到牵连照射。对于患者,因接受照射得到了治疗,这种性质的照射称为医疗照射;对于第二类人,照射对其本人有害无益,但他必须接受,因为这是由他的工作性质所决定的,这种因工作并且是在工作期间受到的照射称为职业照射;第三类人就是公众,这些人受照射既非为获益,也非因工作,而是实践的受害者,这种照射称为公众照射。任何实践对个体的照射都可以按上述3种人进行分类,从而可以施加不同的防护标准和措施。对医疗照射,首先必须是正当的,即要证明照射给患者带来的利益一定大于伴随的危害,在确定是正当的前提下,还需要在整个实践过程中实施质量保证,以做到用最小的照射来获得满意的利益。对于职业照射,第一是要遵循防护最优化原则,即防护设施的设计和实施的操作都是最优化的,以此来保证将工作

人员受到的照射降低到尽可能合理低的水平;除此之外,为体现公平,还须由国家或地方主管部门制定一个不可以接受的照射水平的上限,以保证任何人都不会负担过多的照射。对于公众照射,除了要求从事实践的单位做到防护最优化外,还应执行国家提出的更为严格的剂量限值,以保证公众不受到显著的伤害。

电离辐射是一种物理伤害因素,因此只有了解电离辐射的物理性质、与物质发生相互作用的物理机制以及物理定量方法,才有可能对其产生的效应进行评价和防护。本章旨在简单介绍与电离辐射防护相关的基本物理概念和所使用的量与单位。

1.2 基本概念

1.2.1 原子结构

自然界中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。原子的中心是带正电的原子核,核外有带等量负电荷的电子沿着一定的轨道绕着原子核转动(图 1-1)。因此,整个原子对外呈电中性。当原子失去或增加一个或数个绕行电子时,它就带有电荷,此时称为离子。原子的直径约为 10^{-8} cm,原子核的直径约为 10^{-13} cm,但原子核几乎集中了原子 99.9% 以上的质量。

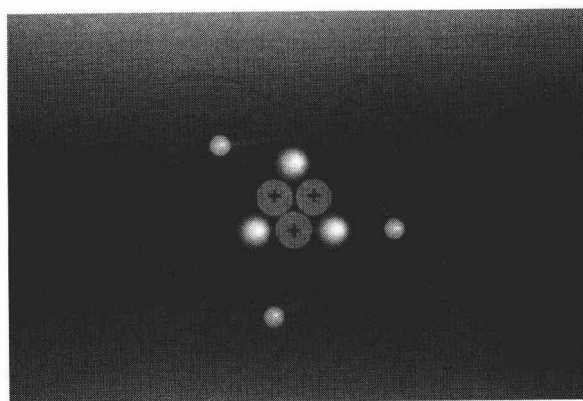


图 1-1 锂原子结构示意图

原子核由 3 个质子和 3 个中子组成,核外有 3 个电子在各自轨道上绕核运动

原子中的每一个电子都有它自己的固定轨道,若干个轨道组成一个壳层。最靠近核的壳层称为 K 壳层,接着向外依次为 L、M、N、O、P、Q 壳层。这些壳层所容纳的电子依次分别称为 L、M、N、O、P、Q 电子,并统称为轨道电子。每一壳层中可容纳的电子数目是有限的,电子壳层的序号 n 和每一壳层中可容纳的最大电子数 N_n 之间可用一简单的关系式来表示:

$$N_n = 2n^2 \quad 1-1$$

式中 $n = 1, 2, 3, 4, \dots$, 对应于 K, L, M, N, ... 等壳层。由上式可算出各壳层中可容纳的最大电子数目依次为 2, 8, 18, 32, ... 等。原子壳层的结构示意图如图 1-2 所示。

在一定轨道上运动的电子具有一定的能量,电子的能量通常以电子伏(eV)为单位。各壳

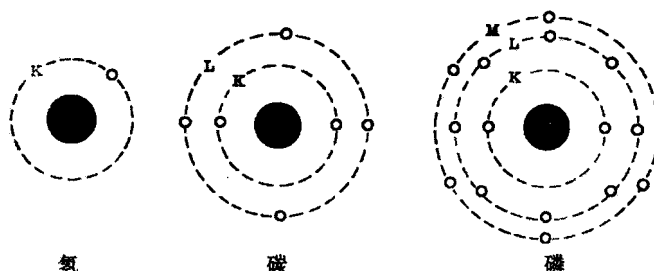


图 1-2 几种原子壳层的结构

氢原子核外只有一个电子,所以只有一个壳层。碳原子核外有 6 个电子,分布在两个壳层上运动。磷原子核外有 15 个电子,分布在 3 个壳层上运动

层轨道电子的能量不同,处于 K 壳层上的电子的能量最低,越往外面的壳层,其电子的能量越高。电子总是尽量先分布在能量最低的壳层上,然后再由里往外,依次分布在能量逐步升高的电子壳层里。在正常情况下,电子总是尽量先占据能量较低的能级。核外电子都占据在尽可能低的能量位置时的状态,称为原子的基态,处于基态的原子最为稳定。

1.2.2 原子核的组成

物质是无限可分的。原子核是由更小的质子和中子所组成。质子即氢原子核,它是带正电荷的粒子,常用符号 P 表示,所带的电量和电子电量相等。中子是不带电的中性粒子,常用符号 n 表示,它的质量为 1.6747×10^{-24} 克,比质子的质量稍大一些。质子和中子统称为核子。根据原子核所带正电荷的电量,可以确定核内的质子数。各种元素的原子中,核内质子数和核外电子数相等,整个原子呈电中性。核内质子数用符号 Z 表示,称为核的电荷数,亦即元素在周期表中的原子序数。例如元素磷(P)的原子,核外有 15 个电子,核内有 15 个质子, $Z = 15$ 。

1.2.3 核素、同位素和同质异能素

在原子核物理学中常采用下列术语:

(1)核素:凡核内质子数、中子数和能量状态完全相同的原子的集合称为核素,例如 ^{32}P , ^{12}C 和 ^{14}C 等原子为 3 种不同的核素。

(2)同位素:凡核内质子数相同,而中子数不同的核素,它们彼此称为同位素,同属于一种元素,具有相同的化学性质。例如核素 ^{125}I 和 ^{131}I 是元素碘(I)的两种同位素。

(3)同质异能素(或称同核异能素):凡核内质子数和中子数都相同,而原子核处于不同能量状态的核素,它们彼此称为同质异能素,例如 ^{99m}Tc 和 ^{99}Tc ,前者左上角加注 m 表示它比后者处于较高的能量状态。

1.2.4 放射性衰变

某些核素的原子核会自发辐射出一种或几种粒子而变成另一种核素的原子核,这种现象称为衰变。衰变有 3 种类型,即 α 衰变、 β 衰变和 γ 衰变,通常把衰变前的核称为母核,衰变后的核称为子核。表征放射性核素衰变特征的有衰变类型、射线能量和衰变速率等。任何一种

放射性核素的衰变,都同时具有这些物理特征。核衰变不依外界条件而改变,完全遵循自身的规律进行,称之为放射性衰变规律,其表达式为:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad 1-2$$

即对某种放射性核素样品,如原来有 N_0 个放射性原子核,由于衰变,经时间 t 后,只剩下了 N 个。 λ 为衰变常数,它表示单位时间内一个核的衰变几率,单位为时间的倒数。每种放射性核素都有特定的 λ 。表示放射性核素衰变特征的另一个物理量就是半衰期($T_{1/2}$),其含义是某种放射性核素因衰变减少至原来的一半所需的时间。 λ 和 $T_{1/2}$ 的关系为:

$$\lambda = 0.693/T_{1/2} \quad 1-3$$

半衰期是放射性核素的重要特征参数,比 λ 用得更普遍。

当已知 $t/T_{1/2}$ 时,可用表 1-1 查得放射性核素经 t 时刻后的存留分数 F ,此处, $F = N_t/N_0$ 。

表 1-1 放射性核素衰变的存留分数 F 值

$t/T_{1/2}$	0.00	0.02	0.04	0.06	0.08
0.00	1.0000	0.9862	0.9727	0.9593	0.9461
0.10	0.9330	0.9202	0.9075	0.8950	0.8827
0.20	0.8706	0.8586	0.8467	0.8351	0.8236
0.30	0.8123	0.8011	0.7900	0.7792	0.7684
0.40	0.7579	0.7474	0.7371	0.7270	0.7170
0.50	0.7071	0.6974	0.6878	0.6783	0.6690
0.60	0.6598	0.6507	0.6417	0.6329	0.6242
0.70	0.6156	0.6071	0.5987	0.5905	0.5824
0.80	0.5743	0.5664	0.5586	0.5510	0.5434
0.90	0.5359	0.5285	0.5212	0.5141	0.5070
1.00	0.5000	0.4931	0.4863	0.4796	0.4730
1.10	0.4665	0.4601	0.4538	0.4475	0.4414
1.20	0.4353	0.4293	0.4234	0.4175	0.4118
1.30	0.4061	0.4005	0.3950	0.3896	0.3842
1.40	0.3789	0.3737	0.3686	0.3635	0.3585
1.50	0.3536	0.3487	0.3439	0.3392	0.3345
1.60	0.3299	0.3253	0.3209	0.3164	0.3121
1.70	0.3078	0.3035	0.2994	0.2952	0.2912
1.80	0.2872	0.2832	0.2793	0.2755	0.2717
1.90	0.2679	0.2643	0.2606	0.2570	0.2535
2.00	0.2500	0.2466	0.2432	0.2398	0.2365
2.10	0.2333	0.2300	0.2269	0.2238	0.2207
2.20	0.2176	0.2146	0.2117	0.2088	0.2059
2.30	0.2031	0.2003	0.1975	0.1948	0.1921
2.40	0.1895	0.1869	0.1843	0.1817	0.1792
2.50	0.1769	0.1743	0.1719	0.1696	0.1672
2.60	0.1649	0.1627	0.1604	0.1582	0.1560

续表

$t/T_{1/2}$	0.00	0.02	0.04	0.06	0.08
2.70	0.1539	0.1518	0.1497	0.1476	0.1456
2.80	0.1436	0.1416	0.1397	0.1377	0.1358
2.90	0.1304	0.1321	0.1303	0.1285	0.1267
3.00	0.1250	0.1233	0.1216	0.1199	0.1183
3.10	0.1166	0.1150	0.1134	0.1119	0.1103
3.20	0.1088	0.1073	0.1058	0.1044	0.1029
3.30	0.1015	0.1001	0.0988	0.0974	0.0961
3.40	0.0947	0.0934	0.0921	0.0909	0.0896
3.50	0.0884	0.0872	0.0860	0.0848	0.0836
3.60	0.0825	0.0813	0.0802	0.0791	0.0780
3.70	0.0769	0.0759	0.0748	0.0738	0.0728
3.80	0.0718	0.0708	0.0698	0.0689	0.0679
3.90	0.0670	0.0661	0.0652	0.0643	0.0634

以 ^{131}I 为例,它的 $T_{1/2}$ 为8.03天,经不同天数的存留分数列于表1-2。

表1-2 ^{131}I 衰变的存留分数

天数	存留分数	天数	存留分数	天数	存留分数
1	0.9173	6	0.5958	11	0.3870
2	0.8415	7	0.5466	12	0.3550
3	0.7719	8	0.5014	13	0.3256
4	0.7081	9	0.4599	14	0.2987
5	0.6495	10	0.4219	15	0.2740

1.2.5 稳定性同位素和放射性同位素

同位素可以分成两大类:一类同位素的原子核不会自发地衰变,能够稳定地存在,这类同位素称为稳定性同位素;另一类同位素的原子核会自发地衰变而转变为别种原子核,这类同位素则称为放射性同位素。放射性同位素也可分两类:一类是天然存在的,称为天然放射性同位素;另一类是用人工方法(例如反应堆、加速器)制得的,称为人工放射性同位素。实验室或临床医学上常用的放射性同位素几乎都是人工放射性同位素,例如 ^{32}P , ^{51}Cr , ^{131}I , ^{198}Au 等。

1.2.6 电离和激发

处于原子壳层上的轨道电子可以吸收外来的能量而从能量较低的轨道跃迁到能量较高的轨道,这种现象叫做激发。假如激发的能量很大,使得轨道上的电子能够脱离原子核的吸引力而自由运动,则称为电离。反之,如果能量较低的轨道还没有电子,则能量较高的轨道的电子亦可以跃迁到能量较低的轨道。在这样跃迁的过程中,电子多余的能量一般变成电磁波(光子)放射出来。电离主要是由外来带电粒子与原子中的轨道电子相碰撞引起的,不同的物质,

原子的壳层电子受原子核束缚的程度不同,因而造成电离所需的带电粒子的最小能量也不同。光子也可以引起物质电离,则首先是通过它从原子的壳层中击出电子,此电子继而引起电离。中子可以通过与原子核的碰撞形成反冲核,再继而由反冲核造成原子的电离。

1.2.7 电离辐射

是由能够产生电离的带电粒子(如 α 粒子,正、负电子,质子或其他重粒子)或非带电粒子(如光子、中子)组成的辐射。电离辐射在空间或介质中进行传播的范围,称之为电离辐射场。

1.3 电离辐射的种类

1.3.1 X、 γ 射线

X、 γ 射线都是高能光子, γ 射线的能量并非一定比X射线高,它们的区分在于产生的方式不同。 γ 射线是在核转变过程中原子核从高激发态跃迁回到低激发态或基态时放出的光子,它是单能的,能量一般在10 keV至10 MeV,例如, ^{60}Co 原子核蜕变时同时放出能量为1.173 MeV和1.333 MeV的两个 γ 光子。X射线产生于原子核外的物理过程,通常由高速电子轰击如钨等高原子序数材料产生X射线,这个过程将产生两种X射线,一种是高速电子在钨靶中受阻而减速,其能量以光子形式放出,这种X射线叫做韧致辐射;另一种是高速电子与靶原子碰撞,把原子内壳层某一能级上的电子击出原子,然后外壳层某一能级上的电子去填补内壳层留下的空位,放出能量等于这两个能级之差的光子,这种光子叫做特征X射线,它反映了靶原子内层电子的能级特征。因此,X射线包括了韧致辐射和特征X射线两部分,前者的能量为连续谱,最大能量等于轰击靶的电子的动能;后者为单能光子,能量取决于靶原子的电子壳层结构。轰击电子的能量越高,特征X射线所占的比例越小。在放射治疗中,常用电子直线加速器、电子回旋加速器或范德格喇夫静电加速器产生高能X射线,其最大能量可达 10^3MeV 。

1.3.2 α 射线

α 射线就是氦原子核 ^4He ,它含有两个质子和两个中子,通常由放射性核素 α 衰变产生。

1.3.3 电子和正电子

电子带有一个最小单位的负电荷。正电子是电子的反粒子,带正电荷,它可由原子核发生 β^+ 衰变时产生。电子和正电子在放射生物学里的重要性在于它们是X射线和 γ 射线与物质作用后产生的次级粒子,而X、 γ 射线的生物效应主要是通过次级电子引起的。

1.3.4 质子

它就是氢原子核 ^1H ,经常产生于粒子加速器(如回旋加速器),20世纪50年代开始就有人将它用来治疗肿瘤和某些疾病。中子的生物效应主要是由它与组织中的氢原子核发生弹性散射产生的反冲质子所引起。初级宇宙射线中79%的带电粒子也是质子。这些都构成了质子在放射生物学中的重要性。