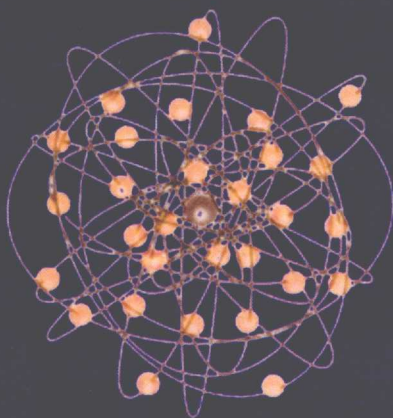

放射性同位素的 防护与安全应用

FANGSHEXING TONGWEISU DE FANGHU YU ANQUAN YINGYONG

主 编 王雪航
副主编 刘志峰 刘 翀
万路远 杨 明

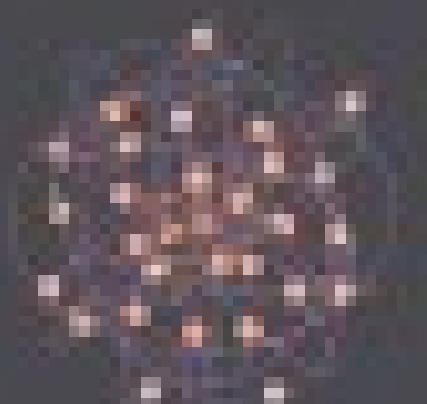


东北林业大学出版社

放射性同位素的 防护与安全应用

PROTECTION, CONCEPTS AND PRACTICE OF RADIOISOTOPES

主 编 王 强
副主编 周立明 周 强
编 委 周 强 周 强



北京理工大学出版社

放射性同位素的 防护与安全应用

主 编 王雪航

副主编 刘志峰 刘翀 万路远 杨明

东北林业大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

放射性同位素的防护与安全应用/王雪航主编. —哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2009. 6

ISBN 978-7-81131-483-0

I. 放… II. 王… 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 109332 号

责任编辑: 卢 伟

封面设计: 彭 宇



NEFUP

放射性同位素的防护与安全应用

Fangshexing Tongweisu De Fanghu Yu Anquan Yingyong

主 编 王雪航

副主编 刘志峰 刘 翀 万路远 杨 明

东北林业大学出版社出版发行

(哈尔滨市和兴路 26 号)

哈尔滨天兴速达印务有限责任公司印装

开本 850 × 1168 1/32 印张 11.625 字数 291 千字

2009 年 6 月第 1 版 2009 年 6 月第 1 次印刷

印数 1—1 000 册

ISBN 978-7-81131-483-0

定价: 41.00 元

《放射性同位素的 防护与安全应用》编委会

主 编 王雪航

副主编 刘志峰 刘 翀 万路远 杨明

编写分工:

王雪航:第六章,第七章,第九章,

第十章第四节

刘志峰:第三章,第四章,第八章,

第十章第三节

刘 翀:第五章,第十章第五节、第六节

万路远:第十章第一节、第二节,第十一章

杨 明:第一章,第二章

前 言

随着核技术的不断发展,放射性同位素应用技术已进入人们生产、生活的各个方面,广泛应用于工业、医疗、科研、教育等各个领域。与此同时,如何对放射性同位素进行防护与安全应用也毋庸置疑地摆在我们面前,提出许多新的问题。因为放射性同位素对人体健康的损伤具有其独特性和隐蔽性,在放射事故中 70% 以上是由放射性同位素造成的,一旦发生放射事故,对人们健康的影响和所带来的社会影响是不可估量的。放射事故不仅可以伤及放射工作人员,而且会危及公众的健康和环境安全,因此,放射性同位素应用中的防护安全日益受到人们的关注。鉴于此种情况,加强对放射性同位素防护与安全应用管理是保护工作人员和公众健康的重要手段。为了更加安全地应用放射性同位素,使其更好地为生产和生活服务,实现核技术合理应用的目的,我们编写了本书。该书紧密结合我国放射防护工作的实际,以我国现行放射防护法规和技术标准为依据,立足于实用,融电离辐射基础知识与放射防护实践于一体,力求阐述清楚,重点突出,便于实用。本书可作为基层放射工作人员的培训教材并可作为放射监督人员的参考书。本书编写过程中,得到多位辐射防护专家和研究人员的的大力支持,在此对他们的热心支持和付出的艰辛劳动表示诚挚的谢意!

鉴于核技术应用领域不断拓宽,放射防护技术和标准不断更新和发展,限于编者的水平和能力,书中错误、疏漏和不足之处在所难免,恳请广大读者予以批评指正。

编 者

2009 年 3 月

目 录

第一章 射线的基本知识	(1)
第一节 射线产生的物理基础	(1)
第二节 电离辐射与核衰变	(4)
第三节 带电粒子与物质的相互作用	(8)
第四节 X 射线的产生	(11)
第五节 X 射线的量与质	(14)
第六节 X 射线的性质	(16)
第七节 X 射线与物质的相互作用	(19)
第八节 中子与物质的相互作用	(22)
第二章 辐射防护中使用的量和单位	(27)
第一节 照射量	(27)
第二节 吸收剂量	(28)
第三节 比释动能	(31)
第四节 当量剂量	(32)
第五节 组织权重因子和有效剂量	(34)
第六节 与群体相关的防护辐射量	(36)
第三章 辐射生物效应	(38)
第一节 确定性效应	(38)
第二节 随机性效应	(46)
第三节 胚胎和胎儿的效应	(52)
第四节 皮肤效应	(54)

第五节	影响生物效应的因素	(57)
第六节	辐射生物效应原理	(59)
第四章	辐射防护概论	(62)
第一节	辐射源和照射方式	(62)
第二节	辐射防护体系	(64)
第五章	射线防护的基本原理	(71)
第一节	时间防护	(71)
第二节	距离防护	(72)
第三节	屏蔽防护	(72)
第六章	放射治疗的辐射防护与管理	(90)
第一节	放射治疗的基本照射方式和常用的 放射性同位素源	(90)
第二节	近距离治疗的放射卫生防护	(95)
第三节	远距离治疗中的放射卫生防护	(107)
第四节	放射治疗患者的防护	(117)
第七章	工业用射线的防护与管理	(122)
第一节	工业射线探伤的防护	(122)
第二节	辐照加工装置的防护	(134)
第三节	含密封源核子计的防护	(141)
第四节	测井用放射性同位素的防护	(149)
第八章	开放型放射工作的防护与管理	(157)
第一节	开放型放射工作单位的分类及 工作场所的分级	(157)
第二节	开放型放射工作场所的设计要求	(161)
第三节	放射工作人员的防护和安全操作	(164)

第四节	放射性污染的处理方法	(167)
第五节	核医学放射卫生防护	(171)
第九章	放射事故	(177)
第一节	放射事故概述	(177)
第二节	放射事故的分类和分级	(177)
第三节	放射事故的预防性卫生监督管理	(178)
第四节	放射事故案例分析	(180)
第十章	放射工作应用与操作程序指南	(200)
第一节	高能远距离治疗	(200)
第二节	近距离治疗	(211)
第三节	^{131}I 治疗应用	(229)
第四节	γ 射线照相	(247)
第五节	核子计	(265)
第六节	全方位辐照装置(第Ⅱ类和第Ⅳ类)	(282)
第十一章	现行国家法规	(305)
第一节	中华人民共和国职业病防治法	(305)
第二节	放射性同位素与射线装置安全和 防护条例	(325)
第三节	放射诊疗管理规定	(342)
第四节	放射工作人员职业健康管理办 法	(355)

第一章 射线的基本知识

第一节 射线产生的物理基础

一、原子结构

自然界存在的一切物质都是由分子组成，分子又是由更小微粒——原子所组成。原子是不能用化学方法再分解下去的最小微粒。但是，原子绝不能被看做简单的东西或已知的最小粒子。所有的原子都类似一个小行星系，中心是一个原子核，周围有绕核运转的电子。原子核又由质子和中子组成。质子和中子的质量差不多一样，而电子的质量仅为质子质量的 $1/1840$ 。所以原子的质量几乎全部集中于原子核，可是原子核却只占据整个原子的极小一部分空间，其直径不及原子本身直径的 $1/10000$ 。电子带负电荷，一个电子所带的电荷为 $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ ，通常用字母 e 表示。中子不带电。质子带一个正 e 电荷。原子中，其电子数目和质子数目相等，因此，原子是中性的。由于原子核与电子之间相互作用力的制约，原子核周围的每一个绕行电子都有它自己的一定轨道，这些确定的轨道组成一系列壳层，这一个个壳层即能级。最靠近原子核的叫 K 壳层，顺序向外依次称 L, M, N, O, P, Q 壳层。如图 1-1 所示。

在某一轨道上绕行的电子具有与该能级相应的一定能量，K 壳层的电子能量最低。电子可以吸收外来的能量，从能量较低的轨道跃迁至能量较高的轨道，这种现象叫激发。反之，如果能量

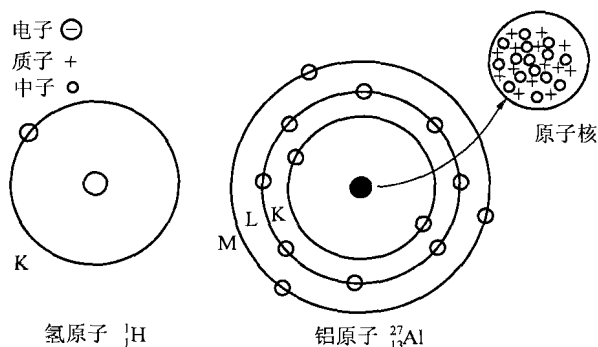


图 1-1 原子结构示意图

较低的轨道缺少电子时，位于能量较高轨道的电子也可以跃迁到能量较低的轨道，而该电子多余的能量一般就以电磁波（光子）辐射出来。

如果外来的能量足够大，可以使得轨道上的电子脱离原子核的吸引力而自由运动，也可使电子附加到另外的原子上。于是中性的原子变成了带正电或负电的离子。离子所带电荷的多少取决于失去或得到电子的数目。这种形成正负离子的过程称为电离。图 1-2 形象地表示一个原子在致电离粒子的作用下引起的电离过程。电离作用是射线的基本特性。

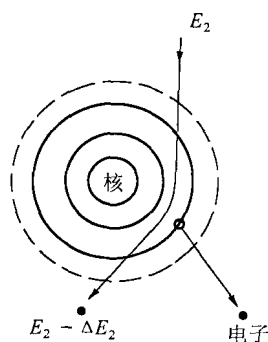


图 1-2 一个原子的电离

二、原子核结构

原子核是由质子和中子组成的。质子带一个单位的正电荷，其带电量与电子电量相等。中子不带电性。质子质量是电子质量的 1 840 倍。质子的质量为 $1.672\ 6 \times 10^{-27}\text{ kg}$ ，中子的质量为 $1.674\ 8 \times 10^{-27}\text{ kg}$ ，可见质子与中子的质量相近；原子核内质子和中子数的总和叫做原子质量数，用 A 来表示：

$$A = Z + N$$

式中， Z 表示质子数，即原子序数； N 表示中子数。

各种原子的原子核是不相同的，它们的基本区别就是组成核的中子数和质子数不同。每种元素的原子核都有一定数目的中子和质子。如： ${}^4_2\text{He}$ 由 2 个质子和 $4 - 2 = 2$ 个中子组成， ${}^{184}_{74}\text{W}$ 由 74 个质子和 $184 - 74 = 110$ 个中子组成。

三、同位素

凡是原子序数 Z 相同，而原子质量数 A 不同的元素，在元素周期表上占有同一位置，叫同位素。通常用符号 ${}^A_Z\text{X}$ 表示同位素，其中 X 代表元素的符号， Z 为原子序数， A 为原子质量数。如： ${}^2_1\text{H}$ ， ${}^3_1\text{H}$ ， ${}^4_2\text{He}$ 都是氢的同位素， ${}^{235}_{92}\text{U}$ ， ${}^{238}_{92}\text{U}$ 是铀的同位素。

同位素又分为稳定的和不稳定的两种。稳定的同位素是指原子核的结构不会自发地发生改变的同位素。而不稳定的同位素亦称为放射性同位素或放射性核素，它即使不受任何外在因素的作用，原子核的结构也会自发地发生变化，同时放出 α 射线、 β 射线或 γ 射线。

第二节 电离辐射与核衰变

一、电离辐射

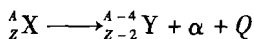
电离辐射是由直接或间接电离粒子或由两者混合组成的任何辐射。直接电离粒子是具有足够大的动能，以至通过碰撞就能引起物质电离的那些带电粒子，如电子、 β 射线、 α 粒子和质子等。间接电离粒子是指那些能够释放出直接电离粒子或能引起核变化的非带电粒子，常见的如X射线、 γ 射线、中子等。这些光子在与物质相互作用时能够产生次级带电粒子和次级光子，通过这些次级带电粒子的电离、激发把能量传递给物质。

二、核衰变

放射性核素分为天然放射性核素和人工放射性核素，它们的原子核都能自发地发生按结构的变化而放出某种射线的现象叫核衰变。根据核衰变时放出的射线种类不同而分为 α 衰变、 β 衰变、 β^+ 衰变、电子俘获及 γ 衰变等。

(一) α 衰变

放射性核素的原子核放出 α 粒子的衰变称为 α 衰变。 α 粒子的质量和氦核相等，带有2个质子和2个中子并带有 $2e$ 的正电荷，它实质上就是氦核(${}^4_2\text{He}$)。放射性核素在发生 α 衰变后它的原子质量数 A 降低4个单位，原子序数降低2个单位。用 X 代表母体核素， Y 代表子体核素，那么， α 衰变可以用下式表示：



式中， Q 为衰变能，即母体核素衰变成子体核素时放出的能量，它被子体和 α 粒子吸收。

由一种放射性核素放出的 α 粒子能量是单一的，但是伴有 γ 射线的 α 衰变的核素常常放出不止一种能量的 α 粒子。

如 $^{226}_{88}\text{Ra}$ 的衰变伴有 γ 射线 ($E_\gamma = 0.188\text{MeV}$)，其 α 粒子的能量有两种：一种是 4.777MeV ，另一种是 4.589MeV 。 $^{226}_{88}\text{Ra}$ 的衰变如图 1-3 所示。

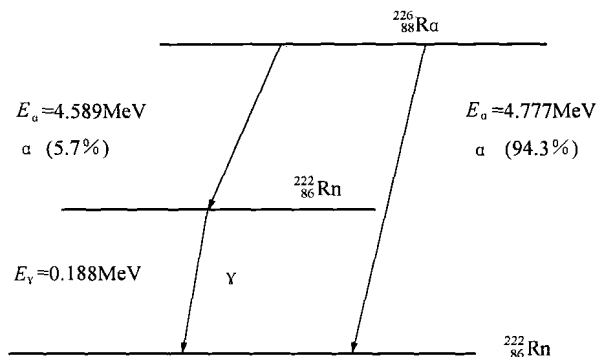
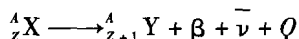


图 1-3 $^{226}_{88}\text{Ra}$ 的衰变图

由图 1-1 可以看到 $^{226}_{88}\text{Ra}$ 具有二种衰变方式，一种是镭放射出能量为 4.777MeV 的 α 粒子而变成基态的 $^{222}_{86}\text{Rn}$ ；另一种是镭放射出能量为 4.589MeV 的 α 粒子而变成处于激发态的 $^{222}_{86}\text{Rn}$ ，然后很快跃迁到 $^{222}_{86}\text{Rn}$ 的基态而放射出能量为 0.188MeV 的 γ 射线。

(二) β 衰变

从放射性核素的原子核放射出 β 粒子的衰变叫 β 衰变。 β 衰变是核内一个中子转变成为一个质子时，放出 β 粒子。用式子表示为



式中， $\bar{\nu}$ 表示反中微子，它是一种质量十分微小的中性粒子。 β

粒子是带有一个单位 e 的负电荷粒子，实际上是电子。

发生 β 衰变后，子体核内多了一个质子，所以原子序数增加一个单位，但总的原子质量数没有变化。如 $^{32}_{15}\text{P} \rightarrow ^{32}_{16}\text{S} + \beta + \bar{\nu} + Q$ 。从核衰变放射出来的 β 粒子，在被物质阻止后，就成为自由电子，与一般电子没有什么区别。通常将从原子核里放射出来的电子称为 β 粒子或 β 射线。

许多 β 衰变的放射性核素只放射 β 粒子，如 $^{14}_6\text{C}$, $^{32}_{15}\text{P}$, $^{35}_{16}\text{S}$ 等。但有许多 β 衰变的放射性核素常伴有 γ 射线，如 $^{137}_{55}\text{Cs}$, $^{60}_{27}\text{Co}$ 等。图 1-4 表示 $^{137}_{55}\text{Cs}$ 的衰变图。

(三) 电子俘获

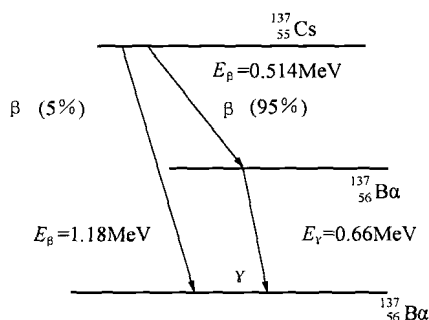
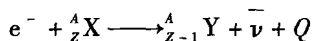


图 1-4 $^{137}_{55}\text{Cs}$ 的衰变图

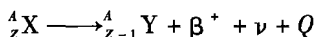
电子俘获是指原子核俘获了一个绕行电子，而使子体核素的原子核中一个质子转变为一个中子和中微子。电子俘获有时也叫做 K 电子俘获。因为 K 壳层靠近核，所以该层中的电子被俘获的几率比其他壳层电子俘获的几率大。在发生电子俘获的核衰变中，原子质量数没有变化，只有质子数即原子序数减少一个单位，用式子表示为：



在发生电子俘获衰变时，除了有些核素因子体处于激发状态而放射出 γ 射线外，原子核里并没有放射出任何易于探测的射线。但是它有次级放射能够得到探测。当 K 电子被核俘获后，K 壳层减少了一个电子。此时比 K 壳层能级更高的绕行电子（如 L 壳层电子）有可能跃迁至 K 壳层来填充被俘获电子的空位，而将两壳层的能级差的能量以标识辐射放射出来。

（四） β^+ 衰变

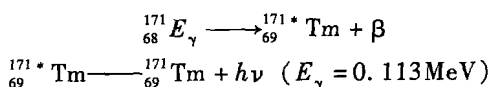
从放射性核素的原子核放射出 β^+ 粒子的衰变叫做 β^+ 衰变。 β^+ 粒子又称正电子或阳离子，是一种质量和电子相等、带一个单位正电荷的粒子。 β^+ 粒子是由于子核内一个质子转变成为中子而放射出 β^+ 粒子和中微子的结果。用式子表示为：



β^+ 衰变的子体和母体核具有相同的原子质量数 A，但是原子序数 Z 则降低一个单位。

（五） γ 衰变

从放射性核素的原子核放射出 γ 射线的衰变叫做 γ 衰变。 γ 衰变是一种电磁辐射，它是从原子核内放射出来的，而且波长较短。它的性质和伦琴射线十分相似。目前应用电子加速器产生的 X 射线，可以得到比 γ 射线波长更短的电磁辐射。核衰变产生的 γ 射线常伴有 α 射线、 β 射线等。电子俘获的衰变有时也伴有 γ 射线，这是原子核从它的激发能级跃迁至基级时的产物。这种跃迁对核素的原子序数和原子质量数都没有影响，所以称为同质异能跃迁。当母体放射 β 粒子（或其他粒子）而跃迁至子体激发能级时，它处在激发能级的时间非常短暂，差不多马上就跃迁到基级而放出 γ 射线。在这样的过程中， β 粒子和 γ 射线虽然是两个阶段的衰变，但很难把它们分开，并测不出 γ 衰变的半衰期。有些衰变在子体激发能级停留时间较长，因而能把 γ 衰变的半衰期测出来。如：



与 β 射线不同, γ 射线的能量是单色的, 它的大小差不多等于两个能级差。一个核衰变可能不只放射出一个 γ 射线, 有时就有两组或两组以上能量的 γ 射线存在。如 ${}_{27}^{60}\text{Co}$ 的衰变就有两组, 如图 1-5 所示。

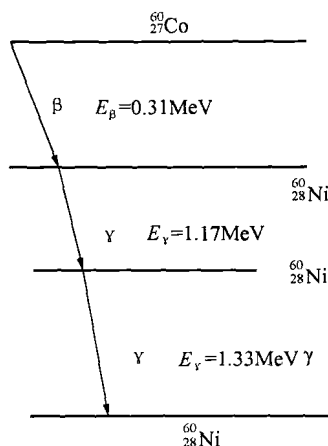


图 1-5 ${}_{27}^{60}\text{Co}$ 的衰变图

第三节 带电粒子与物质的相互作用

电离辐射是由直接或间接电离粒子或由两者混合组成的任何辐射。直接电离粒子是指那些具有足够大的动能, 能使物质电离的带电粒子, 如电子、质子、 α 粒子等。电离辐射作用于物质, 所引起的物理、化学变化, 或作用于生物体产生的某些生物效应, 几乎都是通过带电粒子把能量传递给物质引起的。即使是间