

放射防护学

FANGSHE FANGHUXUE

防
护

主编 赖亚辉 王明华

中国医药科技出版社

放射防护学

主 编 赖亚辉 (北华大学公共卫生学院)

王明华 (北华大学第一临床医院)

主 审 苏士杰

副主编 靳曙光 董莉萍 孟 姮

编 委 (以姓氏笔画为序)

王明华 牛 丽 尹桂春 李 坦

孟 姮 杜瑞红 张 铎 张 慧

陈 晶 何淑云 唐 璐 董莉萍

雷 鸣 靳曙光 赖亚辉

中国医药科技出版社

内 容 提 要

本书根据近年来国内外在放射防护领域的研究成果,结合预防医学专业、医学影像专业的教学实践组织编写。全书共分八章,分别介绍了有关放射防护的基础知识;国际、国内有关放射防护标准中的概念和内容;放射外照射防护、内照射防护内容;医用中放射性的防护;放射的防护监测和职业保健监护内容。尤其侧重介绍了放射性损伤中分子水平的变化,放射性事故的应急处理和放射防护方面新的国家法规、条例等。

本书可作为预防医学专业、医学影像专业学生的教材,也可供相关医务工作人员作为参考书。

图书在版编目(CIP)数据

放射防护学/赖亚辉主编. —北京:中国医药科技出版社, 2007.9

ISBN 978 - 7 - 5067 - 3738 - 8

I. 放… II. 赖… III. 辐射防护 IV. TL7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 140303 号

美术编辑 陈君杞

责任校对 张学军

版式设计 郭小平

出版 中国医药科技出版社

地址 北京市海淀区文慧园北路甲 22 号

邮编 100082

电话 责编: 010 - 62278402 发行: 010 - 62244206

网址 www.esyp.com.cn www.mpsky.com.cn

规格 787 × 1092mm $\frac{1}{16}$

印张 14 $\frac{1}{2}$

字数 327 千字

版次 2007 年 8 月第 1 版

印次 2007 年 8 月第 1 次印刷

印刷 廊坊市海翔印刷有限公司

经销 全国各地新华书店

书号 ISBN 978 - 7 - 5067 - 3738 - 8

定价 29.00 元

本社图书如存在印装质量问题请与本社联系调换

前 言

随着科技的发展，人们对生存环境及个人权益认识的提高，放射性物质的应用和放射防护问题已成为医学领域研究的重要内容。本书是根据近年来国内外对放射防护领域的研究成果，结合预防医学专业、医学影像专业的教学实践组织编写的，为有关专业放射防护学课程的教材。

放射防护学是预防医学的组成部分，是一门新兴的、综合性的边缘学科。它主要研究保护人类免受或少受放射危害的应用性学科。其涉及内容广泛，学科发展迅速。本教材在编写过程中，吸收了近年来学科本身发展的新成果，注重了本专业理论知识与实际工作的联系，一些新的调查结果、国家标准、国际标准也引入教材中。全书共分八章，分别介绍了有关放射防护的基础知识；国际、国内有关放射防护标准的新的概念和内容；放射外照射防护、内照射防护内容；医用放射的防护；放射的防护监测和职业保健监护内容。

本书的编写得到了北华大学教务处的大力支持；尤其是苏士杰教授对此倾注了大量心血并给予悉心指导，使这本书得以完成；同时，在编写过程中作者参阅了许多国内外书刊，对各位专家一并表示诚挚的谢意！

由于编者水平有限，书中错误与不妥之处恳请同行和读者给予指正。

编 者

2007年8月

目 录

绪论	(1)
第一章 放射防护的物理基础	(3)
第一节 原子核及其衰变	(3)
一、原子和原子核	(3)
二、核衰变和核衰变规律	(5)
第二节 电离辐射与物质的相互作用	(10)
一、带电粒子与物质的相互作用	(10)
二、X射线、 γ 射线与物质相互作用	(14)
三、中子与物质的相互作用	(16)
第三节 放射防护中常用的辐射量和一些概念	(17)
一、国际单位制单位	(18)
二、放射防护中常用辐射量及其单位	(21)
三、放射防护中常用的一些基本概念	(29)
第二章 放射防护的生物学基础	(32)
第一节 电离辐射的生物学效应	(32)
一、电离辐射的生物学作用	(32)
二、影响电离辐射效应的主要因素	(33)
三、电离辐射的生物化学效应	(37)
四、电离辐射的细胞效应	(41)
第二节 电离辐射对人体的作用	(47)
一、电离辐射对造血、血液系统的作用	(47)
二、电离辐射对免疫系统的作用	(54)
三、皮肤放射损伤	(59)
四、急、慢性放射损伤	(62)
五、随机性效应与确定性效应	(67)
第三章 人类生活中所受的放射性照射	(74)
第一节 天然辐射源的照射	(74)
一、天然本底对人体的外照射	(75)
二、天然本底对人体的内照射	(80)
三、天然辐射源对人体产生的年有效剂量	(83)
四、人为活动变更的天然辐射	(84)

五、天然辐射的控制·····	(86)
第二节 人工辐射源的照射·····	(87)
一、医疗照射·····	(87)
二、核事故引起的照射·····	(89)
三、核爆炸试验·····	(90)
四、核能生产·····	(91)
五、职业照射·····	(92)
第三节 作用于人体的放射照射·····	(92)
第四章 放射防护标准·····	(95)
第一节 放射防护标准及历史的回顾·····	(95)
一、放射防护标准的概念和分级·····	(95)
二、国际放射防护委员会和国际电离辐射防护标准的演变·····	(95)
三、国际放射防护委员会现行的放射防护概念和体系·····	(98)
四、国际原子能机构和《国际电离辐射防护和辐射源安全的基本安全标准》 ·····	(104)
第二节 我国放射防护的基本标准·····	(111)
一、我国放射防护基本标准的沿革·····	(111)
二、我国放射防护标准的概述·····	(112)
第五章 放射性外照射的防护·····	(118)
第一节 概述·····	(118)
一、外照射·····	(118)
二、外照射源·····	(118)
第二节 外照射防护的基本原则和方法·····	(123)
一、外照射防护的目的·····	(123)
二、外照射防护的基本原则与方法·····	(124)
第三节 电离辐射在物质中的衰减及其屏蔽防护·····	(125)
一、X、 γ 射线在物质中的衰减及其屏蔽防护·····	(125)
二、 β 射线在物质中的吸收与屏蔽防护·····	(143)
第六章 放射性内照射的防护·····	(149)
第一节 概述·····	(149)
一、开放源及其作业特点·····	(149)
二、放射内照射及其特点·····	(150)
三、开放源作业卫生防护的特殊性·····	(150)
第二节 开放型放射源的综合性防护·····	(151)
一、开放型放射源工作场所的分级和分区·····	(151)

二、开放型放射源安全设计要求	(154)
三、开放型放射性物质的安全操作、贮存和运输	(156)
四、个人防护和安全操作	(160)
五、去除放射性表面污染	(162)
六、放射性废物的处理	(167)
第七章 医学中的放射防护	(172)
第一节 概述	(172)
一、放射在医学上的应用	(172)
二、医用电离辐射的防护要求	(173)
第二节 医用诊断 X 射线的放射防护	(181)
一、医用诊断 X 射线的防护原则	(181)
二、诊断用 X 射线机的防护	(182)
三、X 射线计算机体层摄影的放射防护	(186)
第三节 医用放射治疗的放射防护	(187)
一、放射治疗的放射防护原则	(188)
二、X 射线治疗机的放射防护	(189)
三、医用加速器的放射防护	(191)
四、 γ 射线远距治疗机的放射防护	(192)
第四节 介入放射学中的放射防护	(194)
一、介入放射学所需的影像监视设备	(194)
二、介入放射学对人体的放射危害及防护措施	(195)
第五节 核医学中的放射防护	(196)
一、核医学发展概况	(196)
二、核医学诊断所致的放射剂量	(196)
三、核医学工作人员的防护	(197)
四、患者及公众成员的防护	(198)
第八章 放射防护监测和职业保健监护	(202)
第一节 放射防护监测	(202)
一、个人剂量的监测	(202)
二、工作场所监测	(204)
三、表面污染监测	(206)
四、环境放射性的监测	(207)
第二节 放射突发事件与应急处理	(210)
一、放射突发事件的特点与分级	(211)
二、放射性突发事件所造成的照射途径与防护措施	(214)
三、放射突发事件的医学应急准备和响应	(214)

第三节 职业保健监护与防护知识培训.....	(218)
一、对放射性工作单位在职业保健方面的要求.....	(218)
二、对放射性职业人员的医学检查要求.....	(219)
三、放射防护知识培训与管理.....	(220)
参考文献.....	(222)

绪 论

从广义上讲“辐射”是指机械波（如声波）、电磁波（无线电波、可见光、X射线、 γ 射线）或大量微观粒子（如 α 粒子、 β 粒子）从它们的发射体发出，在空间或媒质中传播、移动的过程；也可以理解为波动的能量或大量微观粒子本身。如声波是一种能听到的，在空气中传播的较小能量的波运动；X射线、 γ 射线或 α 粒子、 β 粒子是具有大量能量的，它们作用于物质时，能够从物质的原子中把核外电子“弹飞”出去，引起物质电离。因此，将能够引起物质电离的这类辐射，称为电离辐射。为区别一般意义上的“辐射”，通常电离辐射又称“放射”。

随着原子能的开发和利用，放射已在工业、农业、国防和医学等各领域得到广泛应用。放射对人体的损伤作用也日益受到人们的重视，放射防护已成为原子能科学、医学科学中的重要组成部分。

放射防护学是研究人类免受或少受电离辐射危害的一门综合性的边缘学科。它主要研究人类生活和生产活动中放射因素与人群健康的关系，揭示放射对人群健康的危害；研究放射防护标准的制定和执行；研究防护原则、防护方法、防护评价和管理，改善放射环境条件，预防或减少放射损伤作用，以保护人类健康。

放射防护学是伴随着人们对电离辐射损伤作用的认识而形成和发展的。在地球环境中，生物和人类始终受到电离辐射的照射，但人类不知道它们的存在。

自1895年德国物理学家伦琴发现了X射线；1896年法国科学家贝克勒尔发现了天然放射性；1898年居里夫妇从沥青中分离出天然放射性元素钋和镭；从此人类社会进入了辉煌的原子时代。X射线与天然放射线发现后最早被应用的是医学领域，但是人们发现射线在给人类带来利益的同时也会对人体造成损伤。1902年出现了放射线照射所致的皮肤癌患者死亡的病例，于是，科学家提出了放射线危险界限的概念。

到了20世纪初，放射的医学应用已相当广泛，如X射线用于诊断和治疗等；工业上已有了相当规模的“永久”性发光涂料和表盘描绘；对镭的误用和滥用等，这些使得放射性物质对人体的损害作用也日益明显出现，人类逐渐意识到了电离辐射的损害作用。1913年就有人提出了防护方面建议，人类对放射性的危害和预防开始了研究。在1928年第二次国际放射学大会上成立了国际X射线和镭委员会（ICXRP），这些为电离辐射防护的形成奠定了基础。1942年人类实现了自持连锁裂变反应，可以大量生产放射性物质，建立了核反应堆，核工业的兴起和原子弹的使用，引起了人类对放射防护的极大关注，新兴的学科——放射防护学（辐射防护学）开始形成。第二次世界大战后，核工业及电离辐射装置、放射性核素的大量应用，推动了辐射防护的发展。1950年国际X射线和镭委员会（ICXRP）更名为国际放射防护委员会（ICRP）；联合国成立了专门机构——联合国辐射效应科学委员会（UNSCEAR），这两个组织同国际原子能机构（IAEA）、世界卫生组织（WHO）等国际团体一起做了大量的辐射防护工作。国际放射防护委员会（ICRP）发表的

编号出版物是电离辐射领域的指导性文献，是各国制定放射法规和指导放射防护实践的重要依据。

放射防护学与其他学科相比，具有综合性强、技术性强和政策性的特点。它涉及物理学、化学、数学、工程、生物、医学、地质、政治、经济、法律等学科；并且随着其本身以及相关学科的发展而不断更新内容。

我国在新中国成立以后，放射防护事业不断发展壮大。现在已建立了行政管理和业务服务体系，培养了一支专业队伍，并获得了一批科研成果和国情资料；中国放射防护标准体系已初步形成。

由于放射防护学的内容非常丰富，理论性和实践性都很强，它的发展仍有许多问题等待着人们去研究解决。

(赖亚辉)

第一章 放射防护的物理基础

第一节 原子核及其衰变

一、原子和原子核

自然界是物质的，物质是由分子组成的，分子是物质能独立存在的最小单元。而分子是由原子组成的，原子是元素的最小单元，是用任何化学方法都不能分解的最小粒子，并且分子和原子都处于不停的运动之中。目前天然存在的元素有 93 种，加上人工制造的元素已报道的共有 107 种。

(一) 原子

1. 原子的结构

原子具有复杂的结构。原子是由原子核和核外电子组成的。原子核带正电荷，在它的周围有带负电荷的电子。电子按一定轨道围绕原子核不停地运动。通常原子核所带的正电荷数与核外电子数是相等的，所以整个原子是电中性的。不同种类元素，其原子的核外电子数是不同的，例如，氢原子有一个电子，氦原子有两个电子，锂原子有三个电子。

原子是很小的粒子，直径只有 10^{-8} cm 左右，原子核的直径约在 $10^{-13} \sim 10^{-12}$ cm 之间。原子的质量也很小，其质量几乎全集中在原子核上。国际上规定，以一种碳原子（6 个质子和 6 个中子的碳原子，质量为 1.993×10^{-23} g）质量的 $1/12$ 作为标准，其他原子的质量与它相比所得的数值，就是该原子的原子量。例如，一个氢原子的质量只有 1.6733×10^{-24} g，原子量为 1。

2. 核外电子

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。其中最靠近核的是 K 壳层，向外依次是 L 壳层、M 壳层、N 壳层，等等。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 层最多只能有 2 个电子，L 层可有 8 个电子，M 层可有 18 个电子，N 层可有 32 个电子。

电子在原子内某一轨道上，具有严格确定的能量，称为能级。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，电子能量越高。电子能够吸收外来的能量从低能级升到高能级，使原子处于激发态，这一过程称为原子的激发（excitation）。如果外来的能量足够大，使电子脱离原子，产生自由电子和带正电的离子（原子核），即形成离子对，这种作用称为电离（ionization）。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（光子）的形式释放出来。

3. 原子核

人们对于原子核的认识是从研究天然放射性现象开始的。早在 1896 年，法国物理学

家亨利·贝可勒尔 (H. Becquerel) 在研究各种物质的磷光时, 发现铀盐能够发出人眼所看不见的、穿透力相当强的射线。1911 年卢瑟福提出了原子核式结构模型: 在原子的中心有一个很小的核称为原子核, 原子的全部正电荷和几乎全部质量都集中在原子核里, 带负电的电子在核外空间绕核高速旋转。

原子核 (atomic nucleus) 是由质子 (proton) 和中子 (neutron) 组成的, 质子和中子统称为核子 (nucleon)。质子带正电荷, 与电子所带电荷数值相等, 符号相反。中子不带电荷。质子和中子的质量差不多相等。原子内质子和中子数目的总和称为原子的质量数, 用 A 表示; 原子核的质子数即核电荷数, 称为原子序数, 用 Z 表示; 原子核内中子数即为 $A - Z$ 。

质子数相同的一类原子称为元素 (element)。取 X 代表某元素, 用 A_ZX 表示元素原子核的组成。例如, ${}^1_1\text{H}$ 表示元素由氢原子组成, 其原子序数为 1, 质量数为 1, 没有中子; ${}^{235}_{92}\text{U}$ 表示该元素是由铀原子组成, 其原子序数为 92, 质量数为 235, 中子数为 143。

(二) 放射性核素与核反应

原子核内具有相同数量的质子, 即原子序数相同, 但中子数不同的一类原子, 它们的化学性质相同, 在元素周期表上占据一个位置, 叫做同位素 (isotope)。例如, 天然存在的元素钾, 由几种类型的原子组成, 其原子序数为 19, 而中子数则可能为 20 (即 ${}^{39}\text{K}$)、21 (即 ${}^{40}\text{K}$) 或 22 (即 ${}^{41}\text{K}$), 它们都是钾元素。一种元素的各个同位素, 其某些性质可能是不同的, 因此, 又将核内具有特定数目质子、质量数 A (或中子数 N) 以及一定能量状态的一类原子, 称为某一核素 (nuclid)。例如, ${}^1\text{H}$ 、 ${}^2\text{H}$ 、和 ${}^3\text{H}$, 都是氢的同位素, 但它们是不同的核素。

凡原子核的质子数和中子数相同而能量状态不同的核素称为同质异能素 (isomer)。一般在核素的质量数符号 A 的后面加一字母 m , 表示处于较高的能态或亚稳态, 如 ${}^{99m}_{43}\text{Tc}$ (${}^{99m}\text{锝}$), 其与 ${}^{99}_{43}\text{Tc}$ (${}^{99}\text{锝}$) 互称为同质异能素。

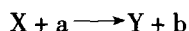
原子核由于核子不断地运动, 具有一定的能量, 原子核处于不同的能量状态, 如同原子一样, 原子核也具有许多能级, 最低的能级称为基态; 高的能级称为激发态。在正常情况下, 原子核都处于基态。只有在核反应、核衰变过程中以及核裂变产物中, 核才会处于激发态。

在原子核内两核子间存在着万有引力位能、质子间存在着静电势能、质子与中子间存在着磁作用势能, 在原子核内每个核子的平均结合能一般为 8MeV 左右。原子核内核子之间存在着这种短程的引力称为核力 (nuclear force), 它存在于中子与中子、质子与质子、中子与质子之间, 属于强相互作用, 它是电磁作用的 10^2 倍, 是万有引力 10^{38} 倍。此外, 在质子与质子之间还存在库仑力, 它起着破坏原子核结合的作用。因此, 原子核是否稳定, 取决核力和库仑力二者的平衡, 即取决于核内中子和质子数是否保持恰当的比例。一般来说, $N/Z = 1 \sim 1.5$ 时, 核力和库仑斥力之间保持平衡, 原子核处于稳定状态, 若没有外来因素 (如高能粒子的轰击), 核素不会自发地发生原子核内结构或能级的变化, 这类原子核称为稳定性原子核; 相应的核素称为稳定核素 (stable nuclide)。若某些核素的原子核的中子与质子的比例遭到破坏, 库仑斥力大于核力, 此时原子核处于不稳定的状态,

会自发地衰变而转变为另一种核素，同时发射出各种射线，这类原子核称为不稳定的原子核；相应的核素称为不稳定核素或放射性核素（radioactive nuclide）。核素的原子核能自发地衰变放出 α 、 β 、 γ 等射线的性质称为放射性。放射性核素分为天然放射性核素和人工放射性核素两种。到目前为止，已发现的放射性核素近2000种，其中绝大多数部分是人工放射性核素。

放射性原子核自发地进行核结构或核能级变化并伴有射线的发射，这就是放射性衰变过程。

当具有一定能量的粒子轰击某核素的原子核而使其转变为另一种原子核的过程被称为核反应（nuclear reaction）。这个过程可用方程式表示为：



式中，X为靶原子核；a为入射粒子；Y为生成核；b为出射粒子。

核反应过程可简写为 $X(a, b)Y$ ，例如： ${}^1_5\text{B}(p, n){}^6_6\text{C}$ 。

1919年卢瑟福利用天然放射性核素放出的 α 粒子轰击氮核，第一次实现了原子核反应。通过核反应获得中子、人工放射性核素、核裂变、超铀元素等，还能产生介子、光子等基本粒子；还能得到核能、放射性核素。

裂变和聚变是两种重要的核反应。如某些重元素（如铀、钚）受中子作用时，发生裂变反应，这可以获得巨大的原子能。铀等重元素的原子核经过裂变，产生许多裂变碎片，或称裂变产物。裂变过程产生的中子可能被铀核所俘获，发生新的核裂变。这种过程如果能不断地继续下去，就称为“自持链式反应”。原子弹就是利用重核分裂并产生链式反应，从而释放巨大能量的一种武器。核反应堆则是使链式反应在受控条件下释放出能量的一种装置。

由轻核聚变成较重的原子核的核反应称为轻原子的聚变反应。在一亿摄氏度以上的高温下，质量轻的核素如氢、氘、氚、锂等的原子核运动速度非常快，有可能互相结合为较重的原子核，同时放出巨大的能量，氢弹就是利用热核反应释放出巨大能量的武器。反应所需高温由重核裂变产生，所以氢弹爆炸需以裂变装置引发。

二、核衰变和核衰变规律

（一）核衰变

天然放射性核素能自发地产生射线。核反应后的产物更多的是不稳定的核素，例如， ${}^{23}\text{Na}$ 受到中子轰击而形成的 ${}^{24}\text{Na}$ 就是不稳定的核素，它将自发地蜕变为其他核素。

放射性核素的原子核能自发地进行核结构或核能级变化，并伴有射线发射的过程称为核衰变（nuclear decay），或称为放射性衰变（radioactive decay）。如果放射性核素是由核反应产生的则称为人工放射性核素，以区别于在自然界中存在的天然放射性核素。在核衰变过程中，会从核内放出 α 粒子、 β 粒子、 γ 光子、 β^+ 粒子等一种或几种射线。各种核衰变过程概括如图1-1所示。

1. α 衰变

从原子核内放出 α 粒子的核衰变称为 α 衰变。 α 粒子实际上就是氦原子核（ ${}^4_2\text{He}$ ），它的质量数为4，由两个中子和两个质子组成，带两个单位正电荷。

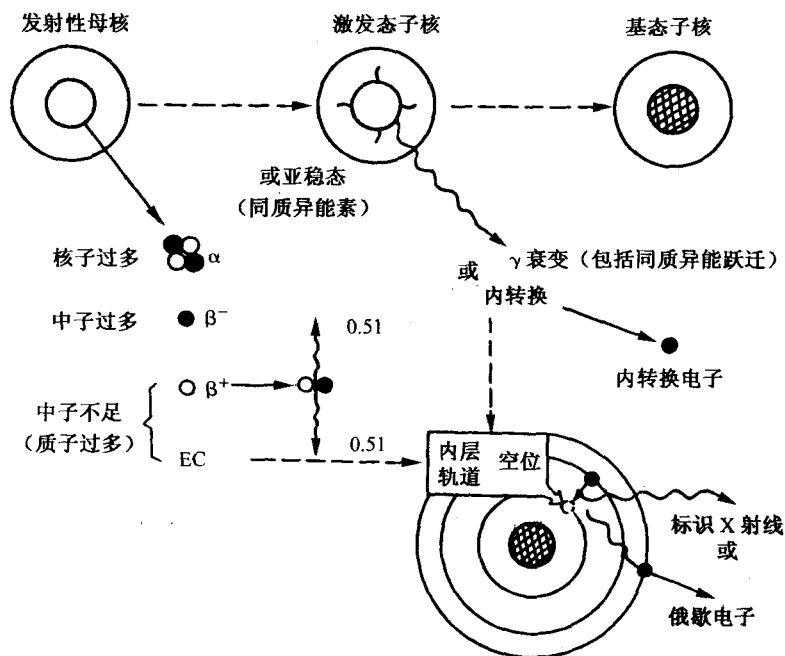
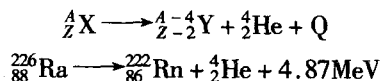


图 1-1 核衰变过程示意图

作为 α 衰变的放射性核素都是高原子序数的。放射性核素经 α 衰变以后，它的质量数 A 降低 4 个单位，原子序数 Z 降低 2 个单位。若令 X 代表母体， Y 代表子核，则 α 衰变可用下式表示：

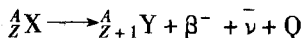


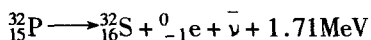
Q 代表衰变能，主要分配给 α 粒子和伴生的 γ 光子。 α 粒子的能谱是不连续的，系单能线谱。

α 射线通常是从天然放射性核素放射出的 α 粒子流。如铀 (${}^{234}\text{U}$, ${}^{235}\text{U}$, ${}^{238}\text{U}$)、镭 (${}^{224}\text{Ra}$, ${}^{226}\text{Ra}$ 等)、氡 (${}^{222}\text{Rn}$) 及其子体 (${}^{218}\text{Po}$, ${}^{214}\text{Bi}$ 等)、钚 (${}^{239}\text{Pu}$, ${}^{238}\text{Pu}$) 等均为释放 α 粒子的放射性核素。 α 粒子质量大，运动较慢，因此其电离能力强。 α 粒子射程短，穿透力弱，一张纸就能挡住它通过。 α 粒子对人体不存在外照射危害；但如果 α 粒子进入人体内的器官，就会对该器官造成严重损伤。因此， α 粒子作为一种体内危害是应该重视的。在放射治疗中用特快中子 (大于 20MeV) 和负 π 介子照射组织时，在组织中可产生 α 粒子，对杀伤癌细胞起到重要作用。

2. β 衰变

从原子核内放出 β 粒子 (或记作 β^- 粒子) 的核衰变称为 β 衰变。在 β 衰变中，原子核内一个中子变成一个质子，同时放出 β^- 粒子和反中微子。 β 粒子实际是高速电子。 β 衰变可用下式表示：





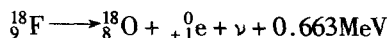
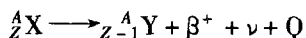
$\bar{\nu}$ 代表反中微子，是一种静止质量近似为零的中性粒子。由于衰变时能量 Q 随机分配给 β^- 和 $\bar{\nu}$ ，因此，它们的能量分布都是从零到 Q 的连续谱。通常所说的 β 粒子能量是指最大值。

放射性碘 (${}^{131}\text{I}$ 、 ${}^{129}\text{I}$ 、 ${}^{125}\text{I}$)、放射性锶 (${}^{90}\text{Sr}$ 、 ${}^{89}\text{Sr}$) 和氚 (${}^3\text{H}$) 均为重要的 β 辐射体。 β 粒子的质量小，带负电荷，故在介质中容易被介质原子的轨道电子所偏转，形成曲折径迹。因此， β 射线具有一定的电离能力，其穿透能力比 α 射线强得多，能穿透人体的皮肤角质层而损伤组织。通常 β 射线被认为是一种轻微的外照射危害因素，用几厘米的铝层就能完全屏蔽掉 β 射线。 β 射线源进入人体后的危害比 α 粒子小。

放射治疗中由直线加速器产生电子流，其能量为几兆电子伏到十几兆电子伏（高能电子），主要在组织深部产生最大的电离作用。而 ${}^{90}\text{Sr}$ 辐射源放出 0.53MeV 的 β 粒子则在浅层（ $1 \sim 2\text{mm}$ 的深度）引起最大的电离作用。

3. β^+ 衰变和电子俘获

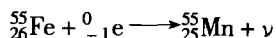
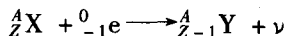
从原子核内放出 β^+ 粒子的衰变称为 β^+ 衰变。 β^+ 粒子实际为高速正电子，与电子质量相等而符号相反。 β^+ 衰变可用下式表示：



ν 代表中微子，中微子与反中微子相似，互为“反粒子”。

β^+ 粒子能量也同 β 粒子一样具有连续谱分布。在 β^+ 衰变中，原子核内一个质子变成一个中子，同时放出 β^+ 粒子和中微子。

还有一种核衰变，也是原子核内一个质子变成一个中子，只是不放出 β^+ 粒子而是捕获一个轨道电子，这种衰变称为电子捕获。电子捕获可用下式表示：

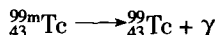


其中 e 代表带单位负电荷的轨道电子。

有许多放射性核素同时具有放射 β^+ 粒子和电子捕获的衰变。

4. γ 辐射

在核衰变中有时还发射 γ 光子，称为 γ 辐射。经过 α 、 β 衰变的原子核经常处于激发态，原子核从较高激发态回到较低激发态或基态时，往往把多余的能量以 γ 光子的形式发射出来，所以 γ 光子通常是紧随着 α 粒子或 β 粒子一起产生的。大多数子核处在激发态的时间很短（一般为 10^{-13}s ），因此很难把子核的 γ 衰变由母核的 α 或 β 衰变中分离出来，并测出其各自的半衰期。但有些子核在激发态停留的时间较长，可把 γ 衰变的半衰期测出来。这种半衰期较长的激发态核素或亚稳态核素就是其基态核素的同质异能素。同质异能素是纯 γ 衰变的放射性核素。

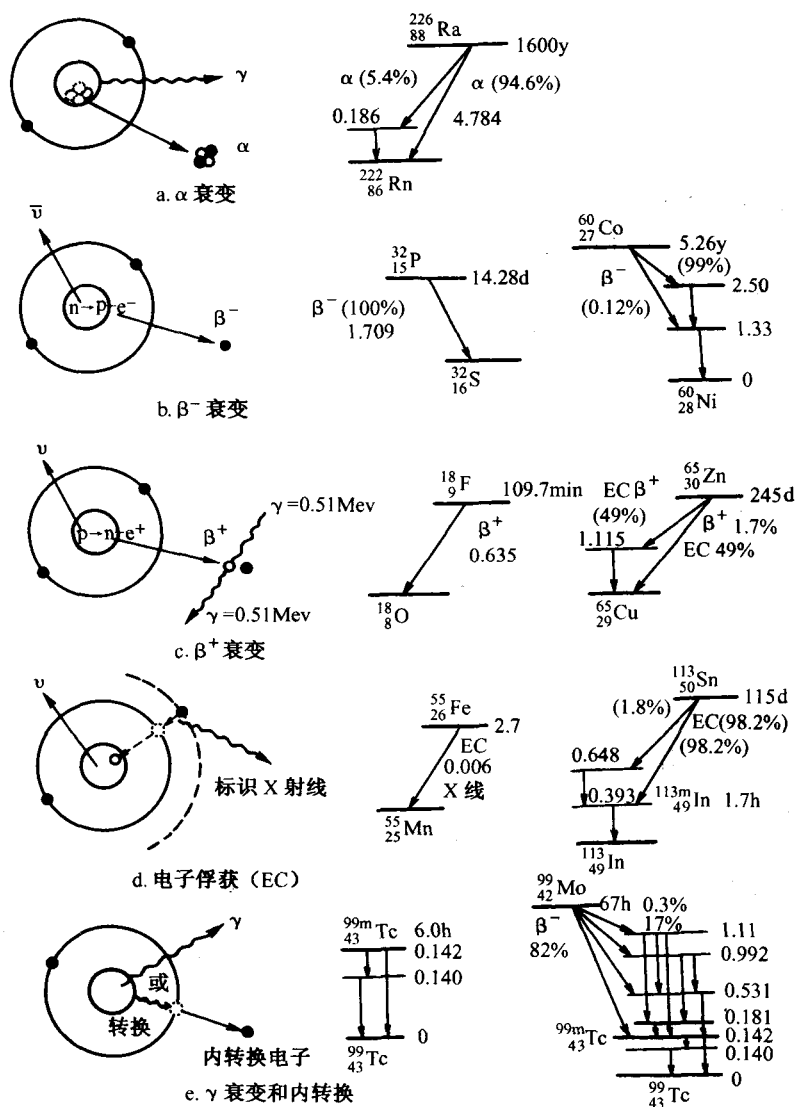


γ 光子流构成了 γ 射线，其电离能力较弱，但具有很强的贯穿能力，故又称贯穿辐射。它在真空中传播速度为 $3 \times 10^8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。作为潜在的外部危害，即使在离开 γ 放射源较

远的地方也可能受到照射。为了防止或减少危害，在绝大多数情况下，都需要对 γ 射线进行屏蔽防护。相对地，在内照射情况下， γ 射线在体内的危害不如 α 或 β 辐射大。

核能级的跃迁有时并不发射 γ 射线，而是把激发能直接传给核外壳层电子，使它脱离原子核的束缚而成为自由电子，这种过程称为内转换，这种电子称为内转换电子。内转换电子的能量呈单色性，与 β 射线的连续能谱截然不同。当 K 或 L 层电子受内转换放射出之后，留下的空轨道将继续产生标识 X 射线（具有特定波长的 X 射线）或俄歇电子。

放射性核素通过上述衰变方式不断向稳定核素转化，有些核素还兼有几种衰变方式，



(注：能量单位为 MeV)

图 1-2 核衰变模式和衰变图

各有不同概率(%)。各种核衰变过程可用公式表示,也可用图解方式来描述(图1-2),前者称为衰变公式;后者称为衰变图。

(二) 核衰变规律

就单个原子核来说,核衰变是偶然无规律的。但对于含有大量放射性原子核的群体进行研究,发现其衰变遵循一种普遍的衰减规律,即各种放射性核素的群体总放射性核素的数目 N 都随时间 t 按指数规律衰减。这与环境的温度、压力和湿度等是无关的。放射性核素衰变的函数曲线如图1-3、图1-4所示,在半对数坐标上呈一条直线。

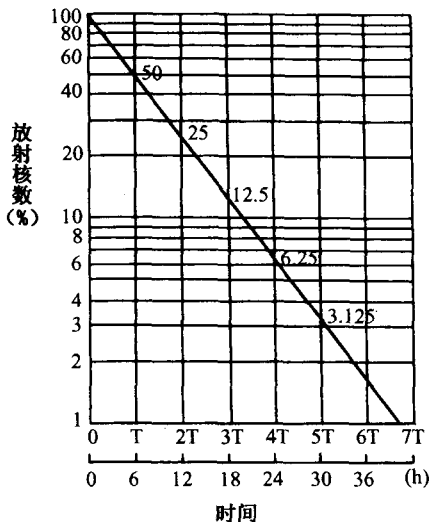


图1-3 (半对数坐标)
^{99m}Tc 衰变曲线

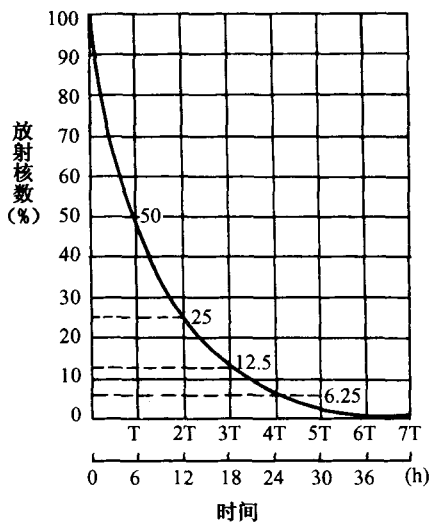


图1-4 (普通坐标)
^{99m}Tc 衰变曲线

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,其特点是对于同种核素在相同的时间间隔 dt 内,母核衰变掉的分率 dN/N_0 是恒定的,则 N 和 N_0 之间的关系为:

$$\frac{dN/N_0}{dt} = \lambda \tag{1-1}$$

其中, λ 称为放射性核素的衰变常数 (decay constant)。它取决于核素的种类,反映该种核素衰变的快慢。其单位是时间的倒数 (1/s、1/d、1/a 等)。式 (1-1) 可以写成:

$$\frac{dN}{dt} = \lambda N_0$$

即: $dN = \lambda N_0 dt$, 进行积分, 可得到:

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

式中, N_0 为 $t=0$ 时即初始时核素的活度。

如果经过时间 $T_{1/2}$ 以后 $N = 1/2 N_0$, 代入式 (1-2):

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