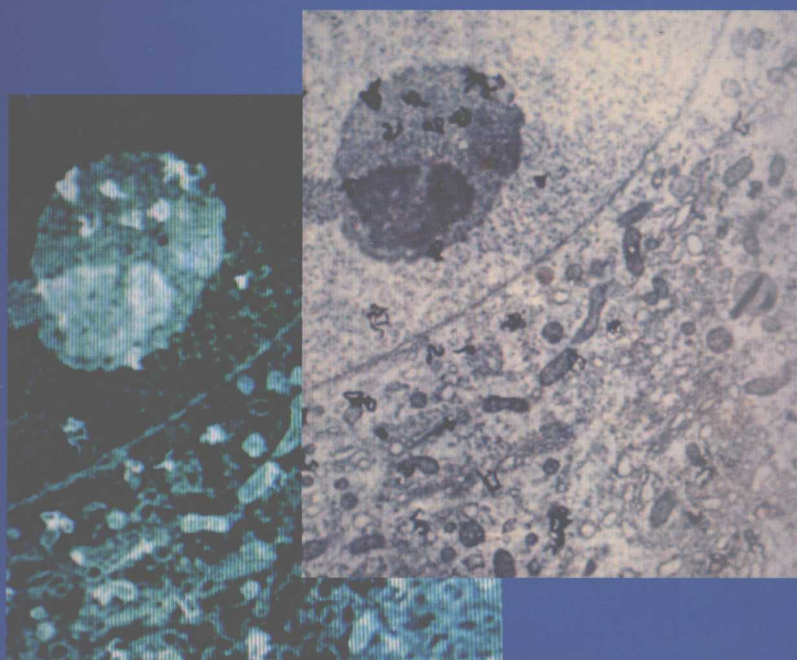


核生物医学

基础与应用技术

HESHENGWU YIXUE JICHU YU YINGYONG JISHU

主编 陈 杞 韩 玲 游冬青 蔡建明



第二军医大学出版社

核生物医学

——基础与应用技术

陈杞 韩玲 游冬青 蔡建明 主编

第二军医大学出版社

内 容 简 介

本书是介绍放射性核素与核射线应用于生物医学的有关基础理论与应用技术的专著。全书分为六篇,分别是核生物医学基础知识和基本技术、核辐射生物效应及其应用、核素示踪技术及其应用、体外分析实验技术及其应用、分子核医学基础及其应用技术、几种相关核技术在生物医学中的应用。在各篇章的内容中,除了介绍有关的基础知识和基本理论外,着重阐述核生物医学常用的实验技术和研究方法。另外,增加了近年来发展迅速的非放射性体外分析技术,以及相关核技术(如同步辐射、生物芯片等)在生物医学中的应用。本书既是为医科院校放射医学和核医学研究生的教学提供综合性教材,又可为生物医学有关专业使用核技术进行实验研究提供实用性参考书。本书可供医学生物学研究人员、教师和研究生等使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

核生物医学:基础与应用技术/陈杞,韩玲,游冬青,蔡建明 主编. —上海:第二军医大学出版社,2007.5

ISBN 978-7-81060-607-3

I. 核... II. 陈... III. 放射医学:放射生物学 IV. R811.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 005833 号

核生物医学

——基础与应用技术

主 编 陈 杞 韩 玲 游冬青 蔡建明

第二军医大学出版社出版发行

上海市翔殷路 800 号 邮政编码:200433

发行科电话/传真:021-65493093

全国各地新华书店经销

上海第二教育学院印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:28.5 字数:699 千字

2007 年 5 月第 1 版 2007 年 5 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-81060-607-3/R. 510

定价:70.00 元

编写人员名单

主 编 陈 杞 韩 玲 游冬青 蔡建明

编 者 (按姓氏笔画为序)

王成海	王雪琦	方 玲	由振东
朱 桐	孙苏平	杨 平	杨 剑
李 雨	李百龙	李建红	张丽民
陈 杞	周鲁峰	倪 瑾	胡以平
胡雅儿	秦阳华	高 福	游冬青
韩 玲	韩佩珍	蔡建明	潘 真

序 言

自 Becquerel(1896 年)从铀发现神秘的“射线”和 Curie 夫妇(1898 年)发现镭及钋以来,核技术得到了迅猛发展。百余年来,核技术给人类世界带来了巨大影响,对生物学界和医学界也做出了不可磨灭的贡献。现在,放射性核素和核射线在生物学医学中的使用已是不可缺少的组成部分,它对探索与揭示生命现象的本质和研究生物物质运动的规律起着重要作用,特别对生物和医药学的现代化发展起着重要的推动作用。

《核生物医学——基础与应用技术》一书,是由医学领域多个学科的专家教授围绕“放射性核素和核射线”在生物医学中的应用撰写的,是他们结合本人或本学科多年的教学和科研经验精心的总结。该书介绍了核生物医学的基础理论和实验技术,特别在核射线的生物效应学、细胞生物学、神经生物学、体外分析技术以及分子水平的核技术应用等方面有着较为详尽的论述。对于当今有发展前景的新技术,如同步辐射等,也介绍了它们在生物医学中的初步应用。

该书的编写主要为了学科的发展和教学的需要,因而在各篇章内既有基本理论的阐述,也有较多实验研究或应用实例的介绍,既有利于教师课程安排上参考,也有助于初学者对核技术在生物医学中应用的理解和思考,在一些研究和应用的课题上也可作为有关专业技术人员的参考资料。

我相信该书的面世对核生物医学的教学和科研工作将起促进作用。谨为序。

中国科学院院士

陈直张

前 言

核生物医学是放射性核素及其核射线在生物学和医学中的研究、应用和发展的学科,它是现代生物医学的重要组成部分,涉及到生命科学的各个领域以及发展着的新兴专业。随着生物医学的不断发展,核素及核射线的生物效应和核技术的应用将会产生极其深远的作用和影响。

本书是在作者们长期从事放射医学和基础核医学的教学科研工作並积累了丰富的经验的基础上,精心收集放射性核素和核射线在生物医学有关学科的研究和应用资料,整理编辑形成本书的六个部分,基本上反映了核生物学、核医学的基础理论和实验技术,以及其他相关学科领域中的研究和应用。

本书为了适应当前核生物学和核医学教学科研上的需求,在编写上有别于以往的程序和纲要,侧重核辐射生物效应和核技术在基础医学中的研究及应用。在内容上除介绍有关本学科的基础知识和基本理论外,着重阐述核生物学、核医学中常用的实验技术和研究方法。另外,增加了近年来迅速发展的非放射性体外分析技术,以及相关核技术(如同步辐射等)在生物医学中的研究和应用。

全书按 6 篇 26 章分别编写,每章各为一个单元按学科特点撰写。这 6 篇为:核生物医学基础知识和基本技术、核辐射生物效应及其应用、核素示踪技术及其应用、体外分析实验技术及其应用、分子核医学基础及其应用技术、几种相关核技术在生物医学中的应用。

编写本书的目的既是为医科院校放射医学和核医学研究生的教学提供综合性教材,又是为生物医学有关专业使用核技术做科学研究提供实用参考书。为此,对某些有特色的章节,特邀有关专家撰写,如请核药学朱桐教授撰写放射性核素标记技术、细胞生物学胡以平教授撰写核素示踪技术在细胞生物学的应用、神经生物学王成海教授撰写神经肽放免分析技术、基础核医学韩佩珍教授撰写放免分析的应用、胡雅儿教授撰写受体的放射性配基结合分析和应用、刘永好和黄旋博士分别撰写 AMS 和同步辐射在生物医学中的应用。在书后面的附录中摘录了国家颁布的有关放射性工作的法规,使初从事放射性工作者有章可循。

全书从策划编写至今将近 3 年,全体参编人为此付出了艰辛的劳动,经过出版社编辑的精心雕琢,这本“核生物医学——基础与应用技术”终于面世了。我们对参加本书勤奋工作的编写同仁致以衷心的感谢!由于本书为众多不同学科的专家编写,文笔文风殊难一致。限于主编的专业水平,错讹之处在所难免。希望同道和广大读者不吝赐教,以便再版时修改和更正。

陈 杞 韩 玲 游冬青 蔡建明

目 录

第一篇 核生物学基础知识和基本技术	(1)
第一章 核辐射及其剂量	(1)
第一节 核辐射基础知识	(1)
第二节 常用辐射量及其单位	(8)
第三节 生物剂量学	(13)
第二章 核射线测量	(23)
第一节 核射线测量的基本原理和概念	(23)
第二节 气体电离探测器	(26)
第三节 半导体探测器	(27)
第四节 闪烁探测器	(28)
第五节 多核素同时测量	(40)
第六节 放射性测量的统计学处理	(43)
第三章 放射性核素标记化合物和放射性药物	(48)
第一节 放射性核素标记化合物的基本概念	(48)
第二节 制备放射性标记化合物的基本方法	(49)
第三节 几种常用核素标记化合物的制备	(52)
第四节 放射性标记化合物的纯化和鉴定	(55)
第五节 放射性标记化合物的稳定性和贮存要求	(57)
第六节 放射性药物	(58)
第四章 放射卫生防护	(71)
第一节 作用于人体的电离辐射源	(71)
第二节 放射卫生防护原则	(73)
第三节 放射卫生防护方法	(75)
第四节 开放型放射性实验室的设计和管理	(77)
第五节 放射性防护监测和管理	(81)
第六节 放射性污染的清除和废物的处理	(82)
第二篇 核辐射生物效应及其应用	(85)
第一章 核辐射生物效应分类及其发生机制	(85)
第一节 核辐射生物效应分类	(85)

第二节	核辐射生物效应发生的分子机制	(86)
第三节	影响核辐射生物效应的因素	(92)
第二章	核辐射对组织细胞及全身器官的生物效应	(96)
第一节	核辐射对细胞及亚细胞水平的生物效应	(96)
第二节	核辐射对全身器官和组织水平的生物效应	(102)
第三节	核辐射对生殖系统的作用	(109)
第三章	核辐射远后效应和小剂量生物效应	(113)
第一节	核辐射远后效应	(113)
第二节	核辐射致突变和致癌变	(115)
第三节	小剂量的生物学效应	(121)
第四章	核辐射生物效应在生物学中的应用	(126)
第一节	核辐射对肿瘤的治疗作用	(126)
第二节	放射激活治疗作用的研究	(128)
第三节	核辐射的灭菌消毒效应	(130)
第三篇	核素示踪技术及其应用	(133)
第一章	核素示踪技术概论	(133)
第一节	核素示踪实验的原理和特点	(133)
第二节	核素示踪实验的基本类型	(134)
第三节	核素示踪实验的基本方法	(135)
第四节	核素示踪实验的设计原则	(139)
第二章	放射自显影实验技术	(142)
第一节	自显影技术的基本知识	(142)
第二节	显影乳胶的选择	(147)
第三节	自显影的技术和方法	(148)
第四节	几种特殊的自显影制作技术	(154)
第五节	自显影图像的观察和定量	(155)
第三章	核素示踪实验在神经生物学研究中的应用	(159)
第一节	神经细胞的增殖、迁移和功能活动的研究	(159)
第二节	神经核团的纤维联系和分布的研究	(160)
第三节	脑内某些受体及核酸的定位	(160)
第四节	脱氧葡萄糖代谢实验与脑功能活动的研究	(161)
第五节	中枢生物活性物质外流速度的测定	(162)
第四章	细胞生物学中核素示踪技术的应用	(165)

第一节	细胞内 DNA、RNA 和蛋白质合成的标记和示踪	(165)
第二节	细胞周期时间的测定	(170)
第三节	染色体 DNA 半保留复制的放射自显影测定	(173)
第四节	DNA 损伤与修复的检测	(175)
第五节	细胞培养中放射性核素的标记和应用	(178)
第五章	示踪技术在生物化学和分子生物学中的应用	(185)
第一节	在物质代谢与转化研究中的应用	(185)
第二节	在 DNA 复制研究中的应用	(186)
第三节	在蛋白质研究中的应用	(187)
第四节	在核酸研究中的应用	(188)
第六章	药物动力学研究中核素示踪技术的应用	(199)
第一节	药物动力学的基本理论	(199)
第二节	药物在体内的吸收、分布和排泄	(204)
第三节	药物动力学重要参数计算中示踪技术的应用	(207)
第四篇	体外分析实验技术及其应用	(217)
第一章	放射免疫和免疫放射分析技术	(217)
第一节	放射免疫分析技术	(217)
第二节	放射免疫分析的质量控制和方法学评价	(233)
第三节	试管固相放射免疫分析技术	(242)
第四节	免疫放射分析	(244)
第二章	放射免疫分析技术的临床应用	(252)
第一节	甲状腺疾病	(252)
第二节	代谢性疾病	(255)
第三节	骨和矿物质代谢	(257)
第四节	肿瘤	(259)
第五节	心血管疾病	(261)
第六节	器官移植中的药物监控	(263)
第三章	神经肽类物质的放射免疫分析测定	(266)
第一节	神经肽的标记	(266)
第二节	神经肽抗血清的制备及其鉴定	(268)
第三节	组织、体液中神经肽含量的测定	(272)
第四章	受体的放射性配基结合分析技术及其应用	(278)
第一节	受体概论	(278)

第二节 受体与配基结合反应的基本原理·····	(284)
第三节 受体放射分析的基本方法·····	(288)
第四节 受体放射分析的数据处理·····	(292)
第五节 受体放射分析在生物医学研究中的应用·····	(296)
第五章 非放射性体外分析技术及其应用·····	(303)
第一节 酶联免疫分析技术·····	(303)
第二节 发光免疫分析技术·····	(311)
第三节 时间分辨荧光免疫分析技术·····	(316)
第六章 活化分析技术及其应用·····	(327)
第一节 活化分析技术·····	(327)
第二节 质子激发 X 线发射分析 ·····	(331)
第三节 其他相关分析技术·····	(332)
第四节 活化分析技术在生物医学中的应用·····	(334)
 第五篇 分子核医学基础及其应用技术 ·····	 (337)
第一章 分子核医学基础 ·····	(337)
第一节 分子核医学的历史沿革·····	(337)
第二节 分子核医学的理论基础·····	(339)
第三节 分子核医学技术的发展·····	(342)
第二章 分子核医学的诊断显像和疾病治疗·····	(348)
第一节 放射性核素的基因显像及基因治疗 ·····	(348)
第二节 放射性核素受体显像及相关治疗技术·····	(354)
第三节 放射免疫显像和放射免疫治疗·····	(357)
第四节 代谢显像·····	(358)
第五节 其他分子显像技术·····	(361)
第六节 分子核医学显像诊断和疾病治疗的发展前景·····	(362)
 第六篇 几种相关核技术在生物医学中的应用·····	 (367)
第一章 AMS 在生物医学中的应用 ·····	(367)
第一节 加速器质谱学·····	(367)
第二节 AMS 在生物医学领域的应用 ·····	(368)
第三节 面向生物医学的 AMS 设备 ·····	(374)
第四节 AMS 生物医学应用的未来 ·····	(375)
第二章 同步辐射在生物医学中的应用·····	(378)

第一节 概述.....	(378)
第二节 同步辐射在基础医学研究中的应用.....	(380)
第三节 同步辐射在医学诊断中的应用.....	(381)
第三章 微束技术在辐射生物学研究中的应用.....	(384)
第一节 微束装置的研究及发展.....	(384)
第二节 微束定位照射细胞.....	(386)
第三节 微束在辐射生物学研究中的应用.....	(386)
第四章 生物芯片技术及其应用.....	(391)
第一节 基因芯片.....	(391)
第二节 蛋白质芯片.....	(397)
附录一 放射工作卫生防护管理办法.....	(405)
附录二 放射工作人员健康管理规定.....	(413)
附录三 中华人民共和国放射性污染防治法.....	(418)
附录四 核生物医学常用单位及其换算.....	(426)
中英文名词索引.....	(428)

第一篇 核生物学基础知识和基本技术

第一章 核辐射及其剂量

本章主要介绍各种核辐射的形成,以及它们的理化特性,它们与物质相互作用的特点和规律;还介绍了度量这些射线大小的单位和量纲,包括以往的专用单位和现行的国际制单位,精确定义的理化概念、物理剂量和引申到生物体而定义的器官剂量,加权定义的当量剂量和有效剂量,再从个体到群体的集体当量剂量以及生物远后效应的待积剂量等。剂量测定也从物理剂量学发展到了生物剂量学,后者又从细胞水平发展到了分子水平。灵活掌握上述各种定义和方法,了解它们各自的长处、不足和发展趋势,应用时可以比较自如和准确。

第一节 核辐射基础知识

一、原子结构

物质由分子组成,分子由原子(atom)组成,原子是很微小的粒子,直径约为 10^{-8}cm 。它由带正电的原子核(直径约为 10^{-13}cm)和若干带负电的围绕原子核旋转的核外电子组成。

1. 原子核

原子核(atomic nucleus)由带正电的质子(proton, P)和不带电的中子(neutron, N)组成,它们都是基本粒子,统称为核子(nucleon)。原子的物理与化学特性主要取决于原子核内的质子和中子的数目及其所处的能量状态。

2. 核外电子

核外电子的分布和运动很复杂,但有如下规律:

(1)电子的数目。对中性原子而言,核外电子数等于原子核质子数。

(2)电子的壳层分布。核外电子绕原子核旋转,其轨道形成不同的壳层,由内向外依次命名为K、L、M、N……,每壳层上的电子数为 $2n^2$ 个(n 表示层次),但最多不超过32个,最外层不超过8个。

(3)电子的势能。越往外层,电子的势能越高,受原子核的引力越小。原子在正常和稳定状态时,电子总是先占据势能较低的内层,再依次占据外层。原子的这种稳定状态称为基态(ground state)。

(4)电子的激发和退激。当原子从外界获得能量时,一个或一些电子受到激发(excitation),会从能量较低的内层跃迁到能量较高的外层,此时的原子处于激发态(excited state)。激发态的原子是不稳定的,外层的电子会迅速向内层跃迁,以填补空缺,使原子返回基态,这一过程称为退激(deexcitation)。退激时,由于外层电子的能量高于内层,多余的能量以光子的形式释放出来。因为各轨道的能量是固定的,退激时光子的能量也是固定的。

(5)电离。当原子从外界获得的能量较高时,电子可以脱离原子核的束缚而成为自由电

子,这时,原子由于失去电子而变为带正电的离子。该现象称为电离(ionization)。

3. 元素、核素、同位素、同质异能素

原子核内质子数相同的一类原子称为元素(element),它们具有相同的化学性质。

原子核内质子数、中子数和核能态完全相同的一类原子,称为一种核素(nuclide)。每种元素可以包括几种核素,不同核素物理特性可有差异。目前已知的核素有 2 300 多种,分别属于 109 种元素。

原子核内质子数相同但中子数不同的同一种元素,在元素周期表中处于同一位置,互称为同位素(isotope)。例如, ^1H 、 ^2H 、 ^3H 互为同位素。质子数和中子数相同但核能态不同也互称为同位素。同位素为同一种元素,具有相同的化学性质,但化学反应速度可有差异。同位素不是同一种核素。

原子核内质子数相同,中子数也相同,核能态不同的核素称为同质异能素(isomer)。同质异能素是同一种元素,是同位素的一种类型,但不是同一种核素。

国际上采用 ${}_Z^AX$ 表示各种核素, X 为元素符号, A 为原子质量数,即核内质子数和中子数之和, Z 为原子序数,即核内质子数。

表示某种核素的同质异能素,常在核素符号的左上角质量数后面加“m”表示能级不同,m表示亚稳态(metastable state),例如, $^{113\text{m}}\text{In}$ 处于激发态, ^{113}In 处于基态。

4. 质量、能量关系式和原子核结合能

具有质量和能量是物质的存在方式,它们符合爱因斯坦质量和能量关系式:

$$E=mc^2 \quad (1.1.1-1)$$

式中: E 为物质的能量, m 为物质的质量, c 为真空中的光速($2.997\,924\times 10^{10}\text{ cm/s}$)。上式指出, m 克质量的物质,具有 mc^2 尔格(erg)的能量。微观体系中,质量的改变伴随着能量的改变;能量的改变也伴随着质量的改变。在封闭系统中,质量、能量是守恒的。

国际统一的原子质量单位(atomic mass unit,简称为 amu)是碳单位,即一个 $^{12}_6\text{C}$ 中性原子处于基态时的静止质量的 1/12 为 1 amu。 $1\text{ amu}=1.660\,540\,2\times 10^{-27}\text{ kg}$ 。

质子、中子、电子的静止质量分别为:质子:1.007 276 amu,约等于 1;中子:1.008 665 amu,约等于 1;电子: $5.485\,88\times 10^{-4}\text{ amu}$,是质子质量的 1/1 840。

核物理中常用的能量单位还有电子伏特(electron volt,eV), $1\text{ eV}=1.602\,189\times 10^{-12}\text{ erg}$ 。按 1.1.1-1 式,可分别求得质子、中子、电子等的能量。

各种原子的质量都小于组成它的全部质子、中子、电子的质量总和,这个差值称为质量亏损(mass defect),记为 Δm 。 Δm 的大小与原子结合能 ΔE 的关系为: $\Delta E=\Delta m\times c^2$,核子在组成原子核时,互相靠近,势能变小,释放出的能量 ΔE 即为结合能,是核能利用的来源之一。能量少了,按质能守恒关系对应着质量亏损。 $1\text{ amu}=931\text{ MeV}$ 。

二、放射性核素和核衰变

(一) 稳定性核素和放射性核素

核素分为两类:一类为稳定性核素(stable nuclide),不会自发地发生核内能级或成分的改变,或者发生改变的概率极小;另一类为放射性核素(radioactive nuclide),会自发地放出射线并发生核能态变化,或者转变成别的核素。放射性核素这种自发的变化称为放射性核衰变(radioactive decay),简称为衰变(decay)。在已知的 2 300 多种核素中,稳定性核素为 274 种。天然存在的 $Z>83$ 的核素均为放射性核素。用核反应堆、加速器等产生的高能粒子轰击稳定

性核素,可获得人工放射性核素。目前广泛使用的放射性核素大部分为人工放射性核素。

(二) 核衰变方式

核衰变一般不受外界环境的影响,仅取决于原子核内部的特征。不同核素衰变方式、速度及发出射线的种类和能量均各不相同,常见的衰变方式有:

1. α 衰变(α decay)

放射性核素的原子核放射 α 射线(粒子)而变成另一种核素的过程称为 α 衰变。可用如下通式表示:

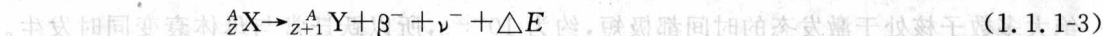


式中: X 为衰变前的母核(parent nucleus), Y 为衰变后的子核(daughter nucleus),放出的 α 粒子为两个质子和两个中子组成的氦原子核, ΔE 为衰变能,其大小对应于质量亏损,它分配给子核和 α 粒子。 α 粒子的能量是固定值,系单线能谱。 α 粒子的速度约为光速的 1/10 左右,在空气中射程很短,穿透力弱,用一张纸就可以阻挡它的通过,但电离能力强。

2. β 衰变(β decay)

放射性核素的原子核放射 β 射线(β 粒子)或俘获轨道电子的衰变称为 β 衰变。 β 衰变时原子序数增加或减少,质量数不变。 β 衰变有如下 3 种类型:

(1) β^- 衰变(β^- decay,或 negatron decay)。原子核内中子相对偏多时,一个中子转变为质子,同时放射一个负电子(β^- 粒子)及一个反中微子(anti-neutrino, $\bar{\nu}$)的过程称为 β^- 衰变。可用如下通式表示:



衰变后子核的原子序数增加 1,质量数不变。反中微子 $\bar{\nu}$ 是中性基本粒子,质量极小,是电子质量的 5/10 000,穿透性极强,一般探测器探测不到。衰变能 ΔE 随机分配给 ${}^A_{Z+1}Y$ 、 β^- 、 $\bar{\nu}$,所以 β^- 粒子的能量可以是零到某分配值的连续能谱。 β^- 粒子的穿透能力较 α 粒子强,在空气中的射程约为数米,电离能力较 α 粒子弱,比 γ 射线强。

(2) β^+ 衰变(β^+ decay,或 positron decay)。原子核内中子相对不足时,一个质子转变为一个中子,同时放射一个正电子(β^+ 粒子)及一个中微子(neutrino, ν)的过程称为 β^+ 衰变。可用如下通式表示:



衰变后子核的原子序数减少 1,质量数不变。 β^+ 为正电子,质量和电量与电子相同,但所带电荷相反。中微子 ν 是中性基本粒子,质量极小,是电子质量的 5/10 000,穿透性极强,一般探测器探测不到。 β^+ 衰变时部分质量亏损转化为 1.022 MeV 的能量,该能量转化为一对正、负电子,负电子与质子形成中子,而正电子放射出来,其余的质量亏损转变为放射 β^+ 粒子的动能。天然放射性核素没有 β^+ 衰变, β^+ 衰变仅发生在人工放射性核素。 β^+ 粒子的能谱同 β^- 粒子,也是连续的。

(3) 电子俘获衰变(electron capture decay)。原子核内中子数目相对不足时,从核外较内层的电子轨道俘获一个电子,与核内一个质子一起转变为中子,同时放射出一个中微子的过程,称为电子俘获衰变。可用如下通式表示:



衰变后子核原子序数减少 1,质量数不变。衰变放射中微子的能量是单色的。 ΔE 除提供的动能外,还使核处于激发态,随后的退激会放射 γ 射线(见 1.1.1-6 式)。

原子核从核外较内层的 K 层俘获电子概率最高,因而常称其为 K 俘获。如 L 层电子被俘获,称为 L 俘获。

核外内层被俘获一个电子后,留下一个空位,外层电子则向内层补充,同时将多余的能量以 X 线形式辐射出来,由于层间能量差是一定的,该 X 线具有一定的特征,称为标识 X 射线。根据不同能量的标识 X 线,可推知不同电子壳层的俘获;有时多余的能量会传递给另一壳层的某电子,使之脱离轨道束缚而成为自由电子,称为俄歇电子(augere electron)。俄歇电子的能量也是一定的,量子化的。每种核素电子俘获衰变,都可放射几种不同能量的标识 X 线和俄歇电子,它们各有一定的概率。

电子俘获衰变和 β^+ 衰变都是发生在中子相对缺少的核素;有时可同时进行该两种衰变。

3. γ 衰变(γ decay)或 γ 跃迁(γ transition)

上述 2 种衰变的子核可能先处于激发态,在退激回到基态时以 γ 光子的形式放射出多余的能量,此过程称为 γ 衰变。 γ 衰变不是一个独立的过程,称为跃迁更为妥当。可用如下通式表示:



跃迁有时不发射光子,而将多余的能量传给一个核外内层电子(K 层概率最大),使之脱离轨道发射出去,此过程称为内转换(internal conversion)。发射出的电子称为内转换电子。内转换电子的能量也是量子化的,约等于光子的能量。发生内转换后该内层轨道的电子的空缺随后也是由外层电子填补,从而产生标识 X 射线和俄歇电子。

绝大多数子核处于激发态的时间都极短,约为 10^{-12} s,所以跃迁常与母体衰变同时发生。有些子核处于激发态的时间较长,长得可以测出其半衰期,被看作是一种单独的核素,即同质异能素,它本身又作为母核,经 γ 跃迁而变成 Z 和 A 都相同、但能态不同的子核。这种特殊的 γ 跃迁特称为同质异能跃迁(isomeric transition)。可用如下通式表示:



任何单个原子只能以上述 3 种衰变方式中的一种方式衰变。但对某些核素的许多原子来说,可以有两种或更多的衰变方式,各有一定的概率。

(三)核衰变规律

放射性核素单个原子核的衰变是自发地、随机的。不同核素的衰变速度也各不相同。但大量原子核所组成的放射性核素的衰变是有规律可循的。

单位时间(dt)内衰变的核数(dN)与存在的核的总数(N)成正比:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (1.1.1-8)$$

移项并积分得:

$$\int_{N_0}^N \frac{1}{N} dN = \int_{t_0}^t -\lambda dt$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

可得到:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.1.1-9)$$

式中: N_0 为放射性核素初始时(即 $t=t_0$ 时)的核数, N 为经过 t 时间衰变后剩余的放射性

核数。负号表示母核数随时间的增长而减少。 λ 为衰变常数(decay constant),它反映放射性核素衰变的快慢, λ 大衰变快, λ 小衰变慢。 λ 的单位是 $1/\text{s}(\text{s}^{-1})$ 、 $1/\text{min}(\text{min}^{-1})$ 、 $1/\text{h}(\text{h}^{-1})$ 或 $1/\text{d}(\text{d}^{-1})$ 等。其含义是放射性核素的一个核在单位时间内进行自发衰变的概率。不同放射性核素 λ 值不同,对于某种确定的放射性核素,它是个恒定值,是该核素的特征参数。结论为:放射性核的数目(N)随时间(t)呈指数规律减少。

除 λ 外,还常用物理半衰期(physical half life time, T_p)来表示放射性核素的衰变特征。物理半衰期的定义是:某种放射性核素因衰变而减少到原先总数一半所需要的时间。

1.1.1-9 式中 $N = \frac{1}{2} N_0$ 时, $\frac{1}{2} = e^{-\lambda t}$,两边取自然对数,得:

$$\text{半衰期} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (1.1.1-10)$$

上式表明,物理半衰期与衰变常数成反比,放射性核素的衰变常数越大,其半衰期越短,反之亦然。不同放射性核素的物理半衰期长短不一,长的可达 10^{10} 年,短的仅数十秒。目前,为了环境保护,短半衰期核素的生物医学应用已成为发展方向。

吸收到生物体内的放射性核素自体内排出的速度以有效半减期(effective half life time, T_e)表示,指在生物体新陈代谢和物理半衰期共同作用下,使体内的放射性活度减少一半所需要的时间。某放射性核素的有效半减期 T_e 取决于该核素的生物半排期(biological half life time, T_b)和物理半衰期(physical half life time, T_p),关系式为:

$$T_e = \frac{T_p \times T_b}{T_p + T_b} \quad (1.1.1-11)$$

生物半排期(T_b)指该放射性核素通过生物体新陈代谢排泄一半所需的时间。

(四)放射性活度、比活度、放射性浓度

放射性核素单位时间内核的衰变数称为放射性活度(radioactivity),简称活度(activity),常用 A 表示:

$$A = \frac{dN}{dt} \quad (1.1.1-12)$$

放射性活度反映的是放射性核素的核衰变率,单位是 $1/\text{s}$,即每秒衰变的次数。国际单位的专门名称为 Becquerel(贝可勒尔),简称贝可,记为 Bq。

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$$

放射性活度过去称为放射性强度,旧的专用单位为居里(Ci), $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ 。放射性活度是描述放射性核素特征的一个重要参数。它反映的是核的衰变率,而不是某种辐射的放射速率。例如同是 1 Ci ,即 $3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ 的 ^{32}P 和 ^{60}Co ,它们的核衰变率相同,但 ^{32}P 每秒钟放射 3.7×10^{10} 个粒子,而 ^{60}Co 除每秒钟放射 3.7×10^{10} 个 β^- 粒子外,同时还放射 $2 \times 3.7 \times 10^{10}$ 个 γ 光子。

放射性核素和该元素的非放射性核素常常是在一起的。为了表示各种物质中的放射性核素的含量,通常还用放射性比活度(specific radioactivity)及放射性浓度(radioactive concentration)等参数。

放射性比活度是指单位质量物质的放射性活度,单位是 Bq/g 。

放射性浓度为单位体积溶液内所含的放射性活度,单位是 Bq/ml 。

亦可用单位摩尔物质的放射性活度来描述放射性比活度,单位是 Bq/mol 。

三、射线与物质的相互作用

射线与物质的相互作用,包括射线对物质的作用,如引起物质的激发和电离等,以及物质对射线的作用,如使射线减速、散射和吸收等。

射线与物质相互作用的机制,因射线是带电粒子和非带电粒子而不同。

(一)带电粒子与物质的相互作用

1. 激发和电离(excitation and ionization)

带电粒子通过物质时,与物质原子的壳层电子发生电场力作用,电子获得能量后可形成激发和电离。电离后失去一个电子的原子变成带正电荷的离子,与自由电子形成离子对(ion pair)。能量较高的自由电子又可引起其他原子电离,称为次级电离。带电粒子经过的路径上可形成一定数量的离子对。

射线对物质电离能力的强弱用电离密度(ionization density)来衡量。定义是:射线通过物质时,在路径的单位长度上形成的离子对数,亦称比电离。单位是:离子对数/厘米。电离密度与带电粒子的电荷量、速度及物质的密度有关。带电粒子的电荷量大、速度慢,被作用物质的密度大时,电离密度就大;反之则小。另外,射线通过物质时,随着能量的逐渐减少,速度逐渐变慢,电离密度会逐渐变大。对于同一种物质, α 粒子带电量比 β 粒子大,速度又慢,所以 α 粒子对该物质的电离密度比 β 粒子大得多。

射线通过物质时能量损失的大小(也就是被作用物质得到的能量)用传能线密度(亦称线性能量传递,linear energy transfer,LET)来衡量。定义式是:

$$\text{LET} = \frac{dE}{dl} \quad (1.1.1-13)$$

即射线通过物质时,在路径的单位长度(dl)上损失的能量(dE),LET的单位是MeV/cm。它与射线的能量、物质的密度和原子序数等因素有关。

2. 散射和辐射

(1)散射(scattering)。带电粒子通过物质时,受到物质原子核的电场作用而改变运动方向,称为散射。改变运动方向而能量不变者称为弹性散射(elastic scattering);伴有能量损失者称为非弹性散射。 α 粒子质量大,散射不明显,其径迹基本是直线; β 粒子的质量小,易被偏折,散射角度大,其径迹是曲线。散射角 $>90^\circ$ 者称为反散射(back scattering)。散射在物质原子核间会进行多次,会造成探测时计数的增加,应注意该误差。物质的原子序数 Z 越大,散射现象也越大。因此在射线测量时,应选用低原子序数及低密度的材料作样品的支持物,减轻散射对测量的影响。散射对防护也有影响,对非射线入射方向,也要注意防护。

(2)韧致辐射(bremsstrahlung)。高速运动的带电粒子通过物质时,受物质原子核电场的作用而急剧减速,一部分动能以光子的形式辐射出来,称为韧致辐射。韧致辐射产生的概率与带电粒子的能量及物质原子序数的平方成正比,与带电粒子质量的平方成反比。 α 粒子质量大,产生韧致辐射概率极小; β 粒子速度快、质量小,产生的韧致辐射应予以重视。对 β 射线的防护,应选用有机玻璃、塑料、铝等(低原子序数的材料,产生韧致辐射概率低),不宜用铅(高原子序数的物质,产生韧致辐射概率高)。

(3)契伦科夫辐射(Cerenkov radiation)。高能带电粒子通过折射率较大($n>1$)的透明介质时,若其速度(v)大于光在该介质中的速度($\frac{c}{n}$, c 为真空中的光速, n 为该透明介质的折射