



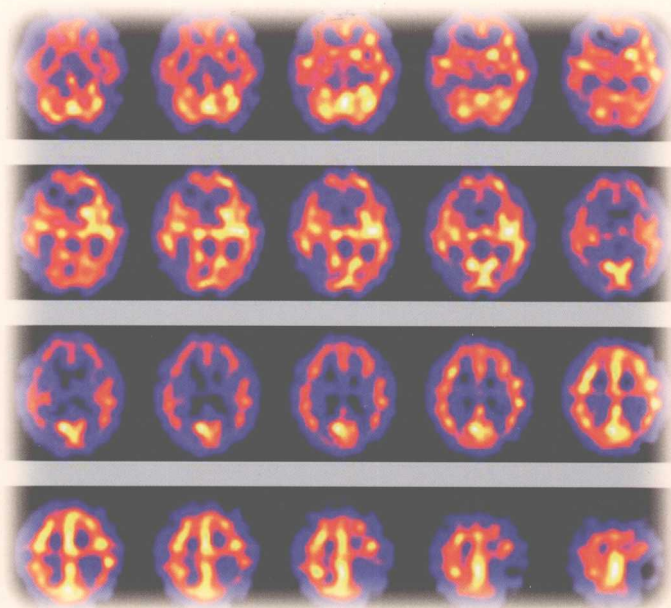
中国科学院教材建设专家委员会规划教材
全国高等医学院校规划教材

供临床、预防、基础、口腔、麻醉、影像、药学、检验、
护理、法医等专业使用



核 医 学

王伯岑 刘 纯 主编



 科学出版社
www.sciencep.com

中国科学院教材建设专家委员会规划教材
全国高等医学院校规划教材

案例版TM

供临床、预防、基础、口腔、麻醉、影像、药学、检验、护理、法医等专业使用

核 医 学

王伯岑 刘 纯 主编

科 学 出 版 社

北 京

郑 重 声 明

为顺应教育部教学改革潮流和改进现有的教学模式,适应目前高等医学院校的教育现状,提高医学教学质量,培养具有创新精神和创新能力的医学人才,科学出版社在充分调研的基础上,引进国外先进的教学模式,独创案例与教学内容相结合的编写形式,组织编写了国内首套引领医学教育发展趋势的案例版教材。案例教学在医学教育中,是培养高素质、创新型和实用型医学人才的有效途径。

案例版教材版权所有,其内容和引用案例的编写模式受法律保护,一切抄袭、模仿和盗版等侵权行为及不正当竞争行为,将被追究法律责任。

图书在版编目(CIP)数据

核医学:案例版 / 王伯岑,刘纯主编. —北京:科学出版社,2007
中国科学院教材建设专家委员会规划教材. 全国高等医学院校规划教材
ISBN 978-7-03-019620-0

I. 核… II. ①王… ②刘… III. 原子医学-医学院校-教材 IV. R81

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 125369 号

责任编辑:康 蕾 李国红 / 责任校对:张怡君

责任印制:刘士平 / 封面设计:黄 超

版权所有,违者必究。未经本社许可,数字图书馆不得使用

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

天时彩色印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 8 月第 一 版 开本:850×1168 1/16

2007 年 8 月第一次印刷 印张:15

印数:1—5 000 字数:526 000

定价:49.80 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

《核医学》编委名单

主 编 王伯岑 刘 纯
副主编 陈 萍 陈 跃 秦永德 张雪峰
编 委 (按姓氏笔画排序)
王来好 长治医学院附属和平医院
王伯岑 昆明医学院第一附属医院
刘 纯 兰州大学第一医院
杜明华 东南大学附属中大医院
李 娟 宁夏医学院附属医院
张 青 南昌大学第一附属医院
张雪峰 北华大学第一临床医院
张 琦 温州医学院
陈 萍 广州医学院第一附属医院
陈雪红 兰州大学第二医院
陈 跃 泸州医学院附属医院
武兆忠 广州医学院第二附属医院
林 伟 广州医学院第二附属医院
周国祥 遵义医学院附属医院
秦永德 新疆医科大学第一附属医院
袁卫红 昆明医学院第二附属医院
曹剑鸣 昆明医学院第一附属医院

前言

核医学是原子能科学技术与医学相结合的产物,它的出现已成为医学科学现代化的主要标志之一。近年来,随着核仪器的不断改进、发展,新放射性药物的开发利用以及相关理论和新技术的应用,我国的核医学事业迅速发展。作为培养现代医学生的核医学教材,也必须适应现代医学发展的需要,不断地改革与创新。

《核医学》案例版教材顺应教育部教学改革潮流,将国外先进的行动导向教学模式、典型案例融于教材中。本着提升教学质量,增强学生实践能力,为学生实习、走上岗位打好基础的原则,借鉴以教学型为特点院校的成功经验,强化现有教学模式和课程体系的实用性。在不改变现有教学体制的情况下,在教材中增加临床真实案例,这是本套教材有别于其他教材的特点和特色。

经过科学出版社在全国范围内遴选,最后选定了具有几十年教学经验的教授和副教授组成编委会,编写了这套以五年制医学本科教学为主的创新性案例版全国高等医学院校规划教材《核医学》。该教材突破传统教学模式,在讲基本理论之前先介绍一个真实案例,提出问题,让学生带着问题听老师讲解,变被动学习为主动学习。结合案例分析显像结果,学生更容易掌握显像原理,把老师的临床思维提前教给学生,学生毕业后就能立即投入临床应用。最后结合案例作小结,老师讲的生动,学生听的兴奋。案例引导教学,丰富了教学内容,提高学习效率。

根据教学大纲的要求,本书严格贯彻“少而精”的原则,基础部分内容精简为2章,占8%。总论为一章,着重介绍核医学开展的必需条件、诊疗原理、诊治的主要特点,占5%。大量的篇幅留给各论共12章,正电子核素显像单独1章,包括目前最前沿的显像药物及方法。第15章介绍核医学最新进展,包括肿瘤的受体显像、反义显像、基因显像、非特异性肿瘤显像、放射性核素炎症显像。教材与现代核医学紧密结合,可以开阔学生的眼界,提高学生的科研能力。教材全部用彩图,弥补了以往黑白图像模糊、不清晰的缺陷,有利于学生课后复习参考。每一章节后附有思考题,督促学生复习思考。还推荐了大量的国内外文献及书籍供学生课外阅读,提高学生查阅资料 and 阅读能力。为了方便教师制作多媒体,我们还提供了光盘。

本书在编写过程中得到了各级领导和同仁们的大力关怀和支持,各位编委均付出了辛勤的劳动,特此致谢!由于本教材采用全新的案例模式编写,编者水平有限、经验不足,尚有一些疏漏之处,恳请广大同行和师生批评指正,以利不断完善和改进。

王伯岑

2007年5月18日

目 录

前言

第1章 核物理基础知识	(1)	第八节 甲状旁腺显像	(54)
第一节 原子结构	(1)	第九节 肾上腺皮质显像	(56)
第二节 核素的基本概念	(2)	第十节 肾上腺髓质显像	(57)
第三节 稳定性核素和放射性核素	(3)	第6章 神经系统显像	(59)
第四节 核衰变及其规律	(3)	第一节 脑血流灌注显像	(59)
第五节 射线和物质的相互作用	(6)	第二节 脑受体显像	(68)
第六节 常用的辐射剂量及其单位	(9)	第三节 脑脊液显像	(72)
第2章 电离辐射的生物学效应及放射防护	(11)	第四节 放射性核素脑血管显像	(74)
第一节 辐射生物学效应及射线作用原理	(11)	第7章 肺显像	(77)
第二节 辐射生物学效应分类和影响因素	(13)	第一节 肺灌注显像	(77)
第三节 作用于人体的电离辐射源	(15)	第二节 肺通气显像	(81)
第四节 放射防护的目的和基本原则	(16)	第三节 肺灌注显像和肺通气显像的临床应用	(84)
第五节 放射防护标准	(16)	第8章 心血管显像和心室功能测定	(89)
第六节 放射防护措施	(17)	第一节 心肌灌注显像	(89)
第3章 核医学总论	(19)	第二节 核素显像对心肌活力的估价	(96)
第一节 临床核医学的定义与内容	(19)	第三节 心脏神经递质及受体显像	(99)
第二节 临床核医学开展的必需条件	(19)	第四节 急性心肌梗死灶 ^{99m} Tc-PYP显像	(100)
第三节 临床核医学的诊疗原理	(26)	第五节 平衡法门控心功能显像	(101)
第四节 临床核医学在诊治上的主要特点	(31)	第六节 双下肢深静脉显像	(106)
第4章 体外分析技术	(33)	第9章 消化系统	(109)
第一节 放射免疫分析	(33)	第一节 肝胶体显像	(109)
第二节 免疫放射分析法	(37)	第二节 肝血流灌注和肝血池显像	(113)
第三节 其他体外放射分析法	(38)	第三节 肝胆动态显像	(116)
第四节 非放射性标记免疫分析技术	(38)	第四节 胃肠道出血显像	(122)
第五节 临床应用	(40)	第五节 异位胃黏膜显像	(124)
第5章 内分泌系统	(43)	第10章 泌尿生殖系统显像和功能测定	(128)
第一节 甲状腺静态显像	(43)	第一节 肾、膀胱动态显像、GFR、ERPF测定和肾图	(128)
第二节 甲状腺血流显像	(48)	第二节 肾静态显像	(136)
第三节 甲状腺吸 ¹³¹ I功能试验	(49)	第三节 阴囊显像	(138)
第四节 甲状腺激素抑制试验	(51)	第四节 子宫输卵管显像	(139)
第五节 TSH兴奋试验	(51)	第11章 骨骼显像	(140)
第六节 TRH兴奋试验	(52)	第一节 骨显像原理方法和适应证	(140)
第七节 过氯酸钾释放试验	(53)	第二节 影像分析和临床意义	(141)
		第三节 临床应用	(150)

第 12 章 造血与淋巴系统	(165)	第九节 其他核素治疗	(191)
第一节 骨髓显像	(165)	第 14 章 正电子核素显像	(197)
第二节 脾显像(spleen imaging)	(167)	第一节 PET 药物概述	(197)
第三节 淋巴显像	(169)	第二节 正电子核素肿瘤显像	(199)
第四节 血液系统几项检查的应用	(171)	第三节 PET/CT 肿瘤显像的临床应用	(200)
第 13 章 放射性核素治疗	(173)	第四节 正电子核素在神经系统的应用	(209)
第一节 ^{131}I 治疗 Graves' 病	(173)	第五节 正电子核素在心肌显像的应用	(212)
第二节 ^{131}I 治疗自主功能性甲状腺结节	(178)	第 15 章 肿瘤与炎症	(217)
第三节 ^{131}I 治疗分化型甲状腺癌转移灶	(179)	第一节 放射性核素肿瘤显像分类及其结果判断方法	(217)
第四节 骨转移癌和恶性骨肿瘤的放射性核素治疗	(182)	第二节 放射性核素非特异性肿瘤显像	(218)
第五节 肾上腺素能肿瘤的 ^{131}I -MIBG 治疗	(185)	第三节 放射性核素特异性肿瘤显像	(222)
第六节 ^{32}P 治疗血液疾病	(186)	第四节 放射性核素炎症显像	(226)
第七节 放射性核素敷贴治疗	(188)		
第八节 核素介入治疗	(190)		

第1章 核物理基础知识

第一节 原子结构

自然界中的任何一种物质都是由很多同样的分子组成。分子是由相同或不同的原子结合而成，而原子是任何一种化学方法都不能分解的最小粒子。分子是保持物质基本化学性质的最小个体，其种类无穷无尽，但它们都是由 100 多种基本成分组成的。这些基本成分叫元素，元素的最小单位是原子。

一、原子结构

1911 年，卢瑟福提出原子“行星模型”(图 1-1)，原子结构类似太阳系“行星”结构，在原子的中心有一个很小的核，叫做原子核。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着核旋转，即原子由原子核与电子组成。现代量子力学原子结构模型(电子云模型)：①原子由原子核和核外电子构成；②电子运动的规律跟宏

观物体运动的规律截然不同；③对于多电子的原子，电子在核外一定的空间近似于分层排布。原子中心是带正电的原子核，电子在核外运动形成带负电荷的云团。

1. 原子核外电子的分层排布 从卢瑟福原子模型我们可知原子是由处于原子中心的原子核和核外电子组成的。为了形象地表示原子的结构，人们创造了“原子结构示意图”这种特殊的图形。原子核外电子按一定轨道绕核高速旋转，一个轨道只有一个电子，若干个轨道组成一个壳层，每个壳层电子数遵循 $2n^2$ 规律，但最外层电子数最多不超过 8 个，并由它决定物质的化学性质，且随原子序数的增加而成周期性变化。

2. 原子核外电子的排布规律 各电子层最多容纳的电子数是 $2n^2$ (n 表示电子层)；最外层电子数不超过 8 个(K 层是最外层时，最多不超过 2 个)，次外层电子数不超过 18 个，倒数第三层不超过 32 个(图 1-2)；核外电子总是尽先排布在能量最低的电子层，然后由里向外，从能量低的电子层逐步向能量高的电子层排布。



图 1-1 卢瑟福提出的原子结构；原子结构模拟图

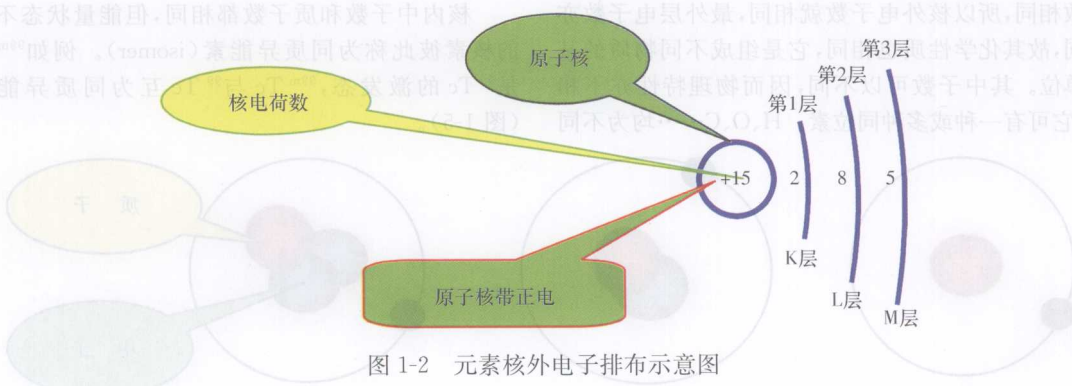


图 1-2 元素核外电子排布示意图

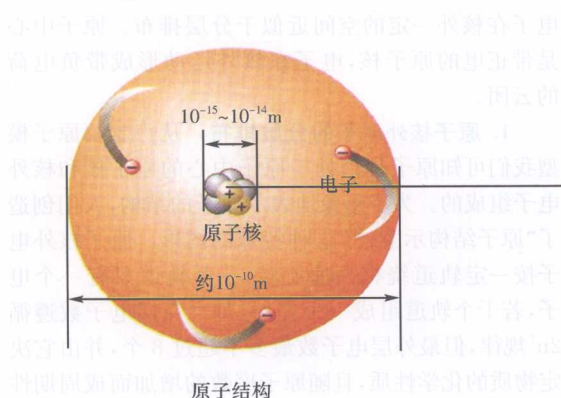
3. 原子核外电子运动区域与电子能量的关系 电子能量高在离核远的区域内运动，电子能量低在离核近的区域运动，把原子核外分成七个运动区域，

又叫电子层，分别用 $n=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, \dots$ 表示，分别称为 K、L、M、N、O、P、Q、 $\dots$ ， n 值越大，说明电子离核越远，能量也就越高。当内层轨道电子获得一定能量

即会跃迁到外层轨道,称激发;电子脱离原子称电离。内层电子空缺时,外层电子又会跃迁(激退)到内层补缺,而多余的能量以标志(特征)X射线或俄歇电子形式放出。

二、原子核结构

原子核的质量几乎是整个原子的质量,那么原子核又是怎样构成的呢?



1. 原子核的构成 1919年,卢瑟福用粒子轰击氮核得到了质子,进而猜想原子核内存在不带电的中子,这一猜想被他的学生查德威克用实验证实,并得到公认。原子核是由质子和中子(统称核子)组成。质子和中子质量数相近,质子带有一个正电荷,而中子不带电荷(图1-3)。原子核结构可表示为 ${}^A_Z\text{X}_N$,X为元素符号,Z为质子数,N为中子数,A为质量数,A为Z和N之和,通常可以略写为 ${}^A\text{X}$ 。

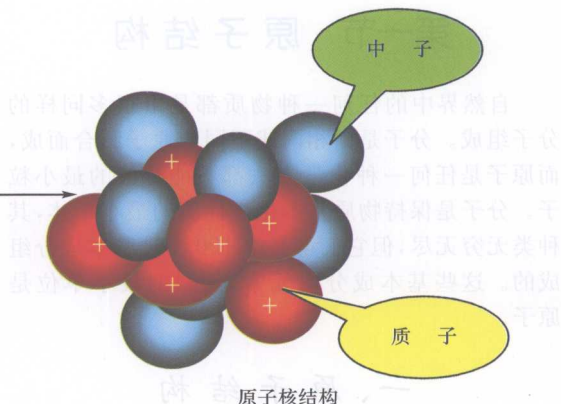


图1-3 原子核的构成

2. 原子核的能级 原子核由于不断运动而具有一定的能量。一般情况下,原子核都处于能量最低的状态,称为基态。在一定条件下,如在某些核反应、核裂变及放射性衰变后,原子核可以暂时处于较高的能量状态称为激发态。激发态的原子核可表示为 ${}^A_m\text{X}$,如 ${}^{99m}\text{Tc}$ 。处于激发态的核素都很不稳定,要释放过剩的能量而回到基态。原子核可处于不同的能量状态。

的元素。

二、同位素

凡原子核具有相同的质子数而中子数不同的元素互为同位素(isotope)。如 ${}^1\text{H}$ 、 ${}^2\text{H}$ 、 ${}^3\text{H}$ 三种核素均有1个质子,在元素周期表中处于同一位置,故把它们互称为同位素,或可称为氢元素的同位素。它们是同一元素——氢元素,但是不同的核素。一个元素所有同位素的化学和生物性质几乎都一样,但物理性质却不同(图1-4,都是氢的同位素)。

第二节 核素的基本概念

一、元素

凡质子数相同的一类原子称为一种元素。因质子数相同,所以核外电子数就相同,最外层电子数亦相同,故其化学性质也相同,它是组成不同物质的基本单位。其中子数可以不同,因而物理特性亦不相同,它可有一种或多种同位素。H、O、C……均为不同

三、同质异能素

核内中子数和质子数都相同,但能量状态不同的核素彼此称为同质异能素(isomer)。例如 ${}^{99m}\text{Tc}$ 是 ${}^{99}\text{Tc}$ 的激发态, ${}^{99m}\text{Tc}$ 与 ${}^{99}\text{Tc}$ 互为同质异能素(图1-5)。

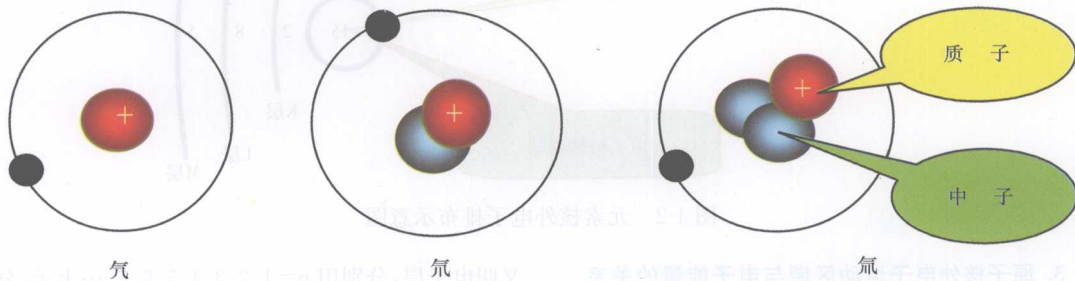


图1-4 氕、氘、氚互为同位素

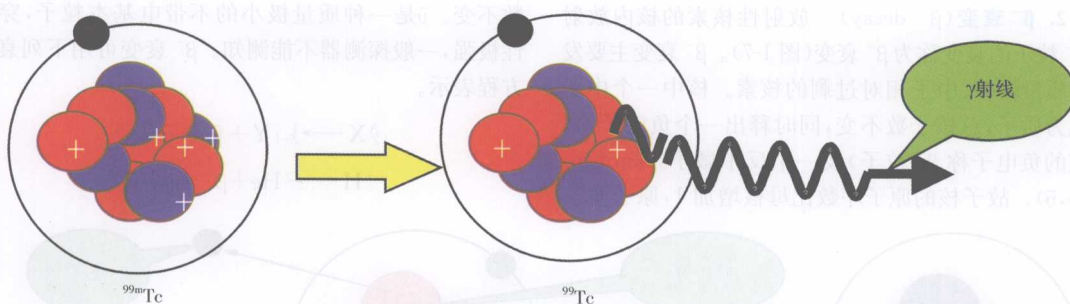


图 1-5 ^{99m}Tc 、 ^{99}Tc 互为同质异能素

四、核 素

原子核的质子数、中子数和原子核所处的能量状态均相同的原子属于同一种核素 (nuclide)。例如 ^1H 、 ^{12}C 、 ^{198}Au 表示不同的核素。具有放射性,称为放射性核素。用下列符号表示: ^A_ZX 。

第三节 稳定性核素和放射性核素

核素包括稳定性核素和放射性核素。

1. 稳定性核素 稳定性核素 (stable nuclide) 是指原子核不会自发地发生核变化的核素,已发现的稳定性核素仅有 274 种,它们的质子和中子处于平衡状态。

2. 放射性核素 放射性核素 (radioactive nuclide) 是一类不稳定的核素,原子核能自发地不受外界影响(如温度、压力、电磁场),也不受元素所处状态的影响,只和时间有关。而转变为其他原子核或自发地发生核能态变化的核素,同时释放一种或一种以上的射线,这一变化的过程称为放射性核衰变 (radioactive nuclear decay) 或蜕变 (简称核衰变)。核衰变是由原子核内部的矛盾运动决定的。每种元素的原子核,其质子数和中子数必须在一定的比例范围内才是稳定的,比例过大或过小放射性核素都要发生核衰变。

第四节 核衰变及其规律

原子核只有在中子和质子的数目之间保持一定的比例时才能稳定。当原子核中质子数过多或过少,或者中子数过少或过多,原子核便不稳定。这时的原子核就会自发地放出射线,转变成另一种核素,同时释放出一种或一种以上的射线。这个过程称为放射性衰变 (radiation decay) 或蜕变 (简称核衰变)。核衰变是由原子核内部的矛盾运动决定的。我们把放出射线的原子核叫母核,而把衰变后产生的原子核叫子核。

一、核衰变的类型

放射性核素主要衰变方式有: α 衰变、 β^- 衰变、 β^+ 衰变、核外电子俘获以及 γ 跃迁和同质异能跃迁。

1. α 衰变 (α decay) 不稳定原子核自发地放射出 α 粒子 (alpha particle) 而变成另一个核素的过程称为 α 衰变 (图 1-6)。 α 衰变主要发生于原子序数 > 82 的重元素核素。每次衰变释出一个氦核,称 α 粒子,母核失去两个质子和两个中子,故子核的原子序数较母核减少 2,原子质量数减少 4。可用下列衰变方程表示。



X 为母核, Y 为子核, Q 为释放的衰变能。

如: $^{226}_{88}\text{Ra} \longrightarrow ^{222}_{86}\text{Rn} + \alpha (^4_2\text{He}) + 4.785\text{MeV}$

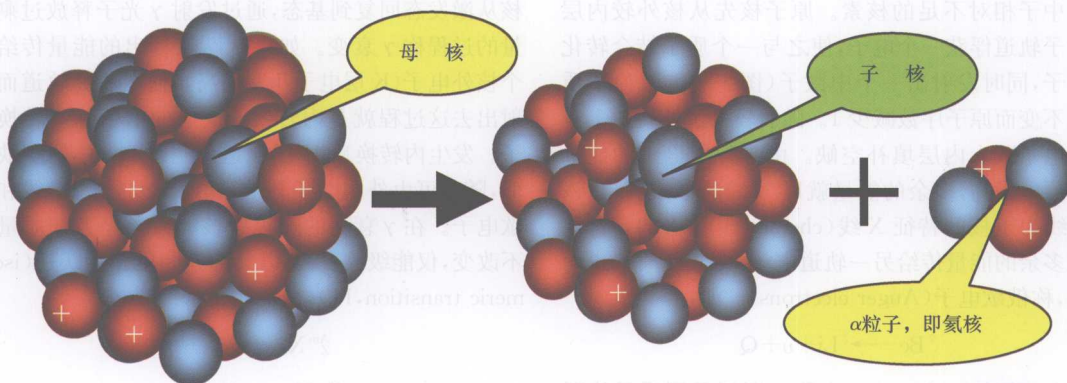


图 1-6 α 衰变
从母核中射出的 ^4He 原子核

2. β^- 衰变 (β^- decay) 放射性核素的核内放射出 β^- 粒子的衰变称为 β^- 衰变(图 1-7)。 β^- 衰变主要发生在质量较轻、中子相对过剩的核素。核中一个中子转化为质子,总核子数不变,同时释出一个负电子(来自核的负电子称 β^- 粒子)及一个反中微子(antineutrino, $\bar{\nu}$)。故子核的原子序数比母核增加 1,原子质量

数不变。 $\bar{\nu}$ 是一种质量极小的不带电基本粒子,穿透性极强,一般探测器不能测知。 β^- 衰变可用下列衰变方程表示。

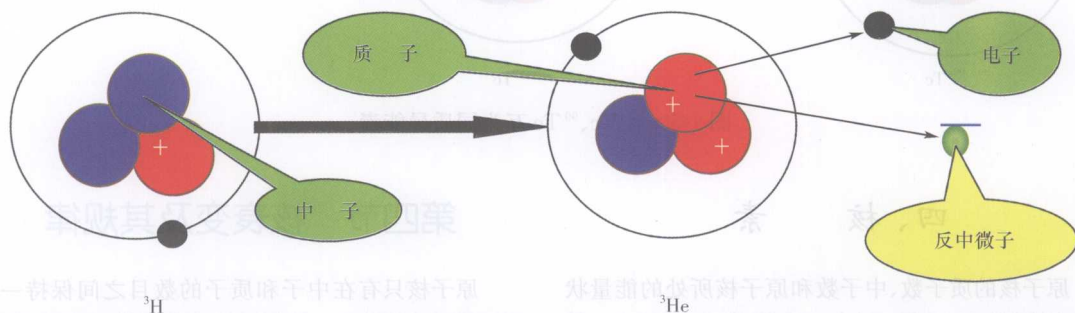
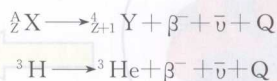
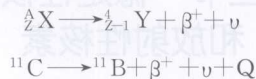


图 1-7 β^- 衰变

一个中子转变为一个质子,同时释放一个 β^- 粒子,即电子

3. β^+ (正电子衰变) 放射性核素的核内放射出 β^+ 粒子的衰变称为 β^+ 衰变(图 1-8)。 β^+ 衰变主要发生在中子相对不足的核素。可以看做是 β^- 衰变相反的过程,即核中一个质子转化为中子,同时释出一个正电子(positron, 称 β^+ 粒子)及一个中微子(neutrino, ν),故核子总数也不变,原子序数减少 1 而原子质量数不变。 ν 也是质量极小的不带电基本粒子,穿透性

极强而很难测知。衰变可用以下衰变公式表示。



β 射线本质是高速运动的电子流;三种子体分享裂变能——因此,电子具有连续能谱。

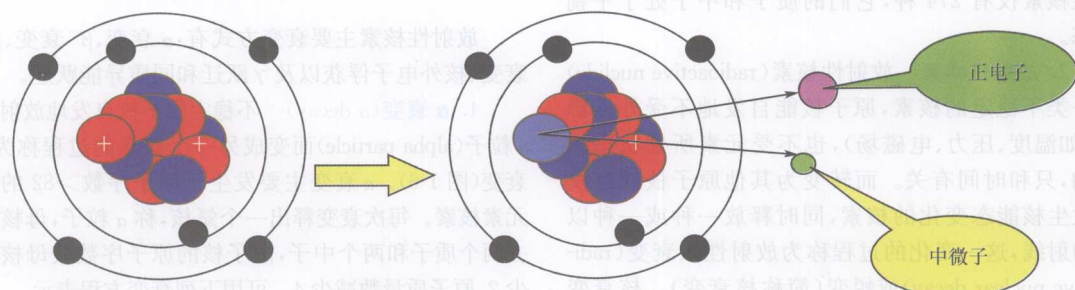


图 1-8 β^+ 衰变

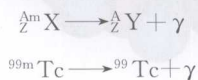
一个质子转变为一个中子,同时释放一个 β^+ 粒子,即正电子

4. 电子俘获衰变 (electron capture, EC) EC 发生在中子相对不足的核素。原子核先从核外较内层的电子轨道俘获一个电子,使之与一个质子结合转化为中子,同时发射出一个中微子(图 1-9)。故原子质量数不变而原子序数减少 1。随后较外层的轨道上有一个电子跃入内层填补空缺。由于外层电子的能量比内层电子高,多余的能量就以 X 线的形式释出,该 X 射线为子核的特征 X 线(characteristic X ray)。或者该多余的能量传给另一轨道电子,使之脱离轨道而释出,称俄歇电子(Auger electrons)。如:



5. γ 衰变 (γ -decay) 也称 γ 跃迁及同质异能跃迁。上述四种衰变的子核可能先处于激发态,在不到 1 微秒的时间内回到基态并以 γ 光子的形式释出多余

的能量。此过程称 γ 衰变或 γ 跃迁(图 1-10)。原子核从激发态回复到基态,通过发射 γ 光子释放过剩能量的过程称 γ 衰变。如果 γ 跃迁释出的能量传给一个核外电子(K 层电子几率最高),使之脱离轨道而发射出去这过程就是内转换。发射的电子称内转换电子。发生内转换后 K 层轨道的空缺和 EC 的空缺相似,随后可由外层电子补缺,从而又发射 X 射线和俄歇电子。在 γ 衰变的过程中核的原子序数和质量均不改变,仅能级改变,所以又称为同质异能跃迁(isomeric transition, IT),用下式表示:



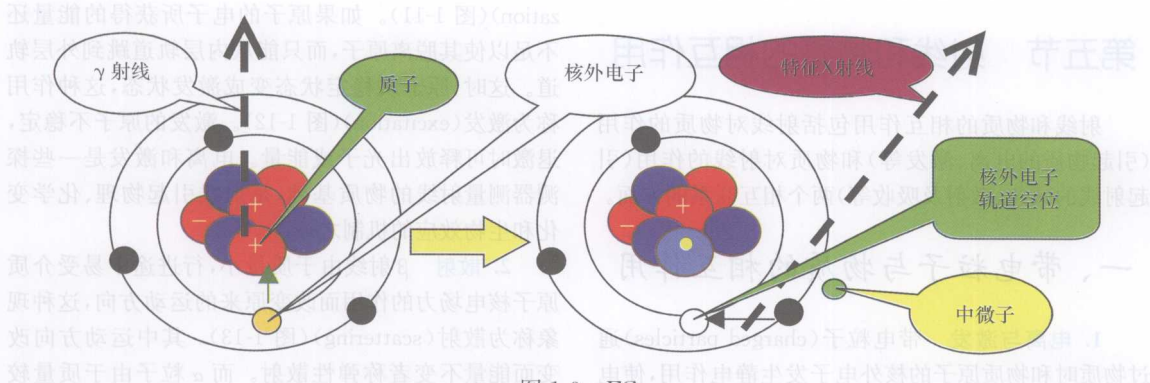
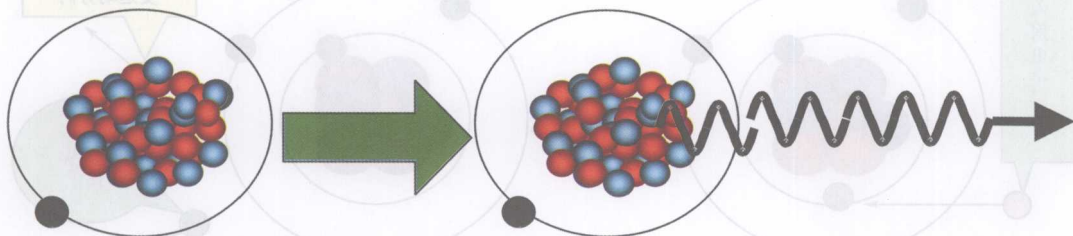


图 1-9 EC

核内一个质子从核外内层的电子轨道俘获一个电子,而转化为一个中子,同时发射 γ 射线和一个中微子;外层的轨道上有一个电子跃入内层填补空缺。由于外层电子的能量比内层电子高,多余的能量就以 X 射线的形式释出

图 1-10 γ 衰变

在以上五种衰变方式中,任何单个原子都只以其中一种方式衰变,但对某些核素的许多原子来说,却可以有两种或两种以上的衰变方式,各有一定的几率。例如 γ 占 31%, β^+ 占 15%, EC 占 54%。

此外,还有一些较少见的核衰变方式,如超铀元素 ^{252}Pu 会自发裂变发射中子而变成较轻的两个核素等。

二、核衰变规律

1. 放射性衰变规律(decay laws) 实验证明,放射性衰变是一级反应,即对每种放射性核素来说,单位时间内衰变的原子数只和存在的原子总数成正比,可用下式表示:

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (1)$$

式中 N_0 是初始放射性原子总数, λ 是衰变常数,其含义是单位时间内衰变的原子占当时存在的原子总数的百分比。各种核素衰变常数的不同是核素的重要特征参数。 N_t 是经过时间 t 后剩余的原子数。所以放射性核衰变服从指数规律,亦即其原子数随时间 t 按指数函数的规律而减少。从衰变曲线可求出核素的半衰期及衰变常数,也可求出经过任何时间 t 后,剩余的核素相当于原有核素的百分之几。

2. 物理半衰期(physical half life, $T_{1/2}$) 放射性核素的衰变速率常以物理半衰期表示, $T_{1/2}$ 系指放射性核素数从 N_0 衰变到 N_0 的一半所需的时间。物理

半衰期是每一种放射性核素所特有的。数学推导很容易证明。

$$T_{1/2} = 0.693/\lambda \quad (2)$$

由于生物代谢从体内排出到原来的一半所需的时间,称为生物半衰期(biological half life, T_b);由于物理衰变与生物的代谢共同作用而使体内放射性核素减少一半所需要的时间,称有效半衰期(effective half life, T_e)。 T_e 、 T_b 、 $T_{1/2}$ 三者的关系为:

$$T_e = T_{1/2} \cdot T_b / (T_{1/2} + T_b) \quad (3)$$

3. 放射性活度(radioactivity, A) 是表示单位时间内发生衰变的原子核数。即 $A = \lambda N$, 因此, (1) 式可换算为:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (4)$$

放射性活度的单位是 s^{-1} , 实际含义是每秒衰变次数。其国际制单位的专用名称为贝可勒尔(Becquerel), 简称贝可, 符号为 Bq。数十年来, 活度沿用居里(Ci)为其特殊的专用单位。等于每秒 3.7×10^{10} 次衰变。贝可勒尔与居里的换算关系是: $1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10}\text{Bq}$ 。

居里单位较大, 通常用毫居里(mCi), 微居里(μCi)等。贝可(Bq)单位又太小, 通常用千贝可(KBq), 兆贝可(MBq)等。

放射性比活度(specific radioactivity)定义为单位质量或单位摩尔物质中含有的放射性活度, 单位是 Bq/g, MBq/g, MBq/mol。放射性浓度(radioactivity concentration)为单位体积溶液中所含的放射性活度, 单位是 Bq/ml, mCi/ml 等。

第五节 射线和物质的相互作用

射线和物质的相互作用包括射线对物质的作用(引起物质的电离、激发等)和物质对射线的作用(引起射线的减速、散射及吸收等)两个相互联系的方面。

一、带电粒子与物质的相互作用

1. 电离与激发 带电粒子(charged particles)通过物质时和物质原子的核外电子发生静电作用,使电子脱离原子轨道而形成自由电子的过程称电离(ioni-

zation)(图 1-11)。如果原子的电子所获得的能量还不足以使其脱离原子,而只能从内层轨道跳到外层轨道。这时,原子从稳定状态变成激发状态,这种作用称为激发(excitation)(图 1-12)。激发的原子不稳定,退激时可释放出光子或能量。电离和激发是一些探测器测量射线的物质基础,是射线引起物理、化学变化和生物效应的机制之一。

2. 散射 β 射线由于质量小,行进途中易受介质原子核电场力的作用而改变原来的运动方向,这种现象称为散射(scattering)(图 1-13),其中运动方向改变而能量不变者称弹性散射。而 α 粒子由于质量较大,散射一般不明显。

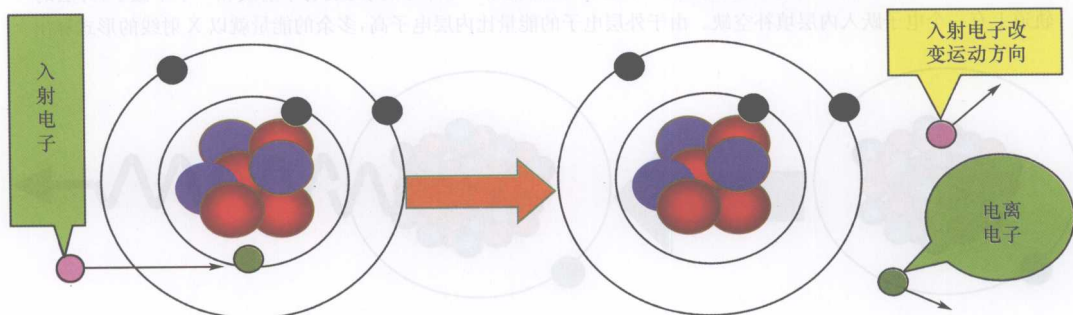


图 1-11 电离

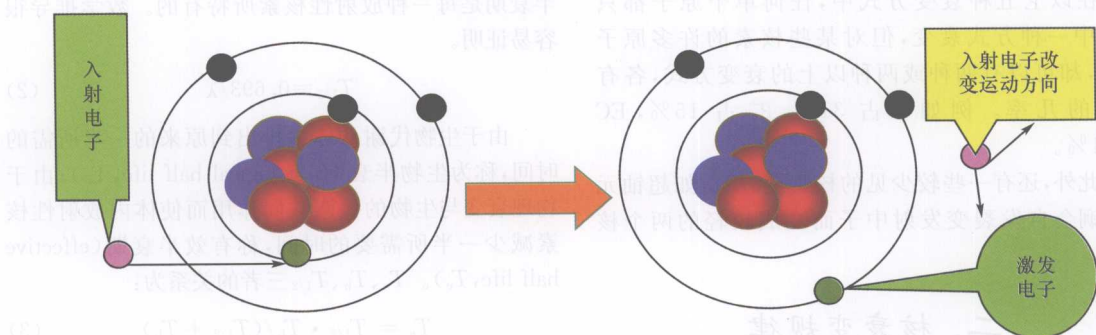


图 1-12 激发

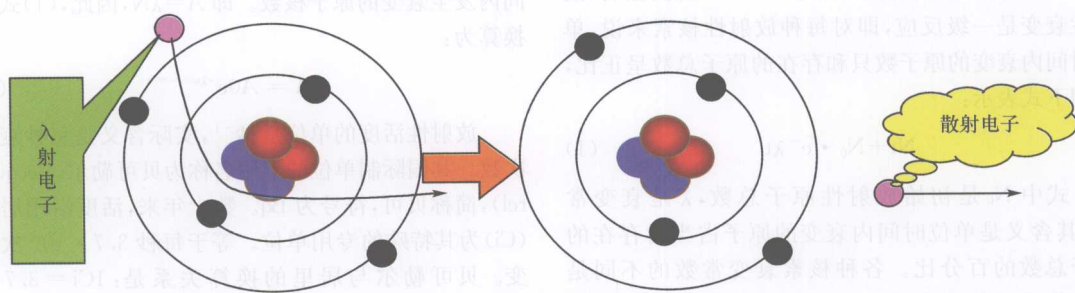


图 1-13 散射

β 射线在原子核电场力的作用下改变原来的运动方向

3. 韧致辐射 快速电子通过物质时,在原子核电场作用下,急剧减低速度,电子的一部分或全部动能转化为连续能量的 X 射线发射出来,这种现象称为韧致辐射(bremsstrahlung)(图 1-14)。韧致辐射释放的能量与所通过介质的原子序数的平方成正比,与带电粒子的质量成反比,并且随带电粒子的能量

增大而增大。韧致辐射的强度和 β 粒子反向散射的几率随屏蔽物质的原子序数增大而增大,还随 β 粒子的能量增加而增加。因此, β 射线的屏蔽要用原子序数低材料制成,如铝、塑料、有机玻璃等。 α 射线由于自身质量数大、运行速度慢,较少产生韧致辐射。

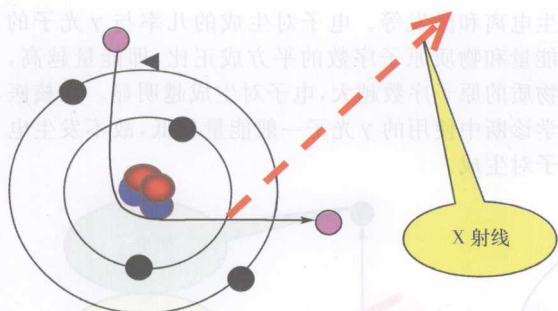


图 1-14 轫致辐射

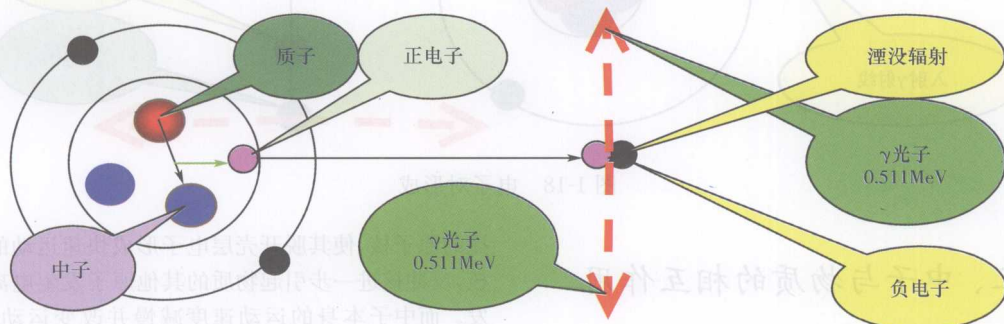


图 1-15 湮没辐射

二、光子与物质的相互作用

γ 射线和 X 射线属于电磁辐射,都是中性光子流,与物质相互作用方式相同。主要产生三个效应:光电效应、康普顿效应和电子对效应。

1. 光电效应 γ 光子和原子中内层壳层(如 K、L 层)电子相互作用,将全部能量交给电子,使之脱离原子成为自由的光电子的过程称为光电效应(photoelectric effect)(图 1-16)。光电效应发生的几率与入射光

4. 湮没辐射 正电子衰变产生的正电子,在介质中运行一定距离,当其能量耗尽时可与物质中的自由电子结合(两个电子的静止质量相当于 1.022MeV 的能量),而转化为两个方向相反、能量各为 0.511MeV 的 γ 光子而自身消失,称湮没辐射(annihilation radiation)(图 1-15)。

5. 吸收 射线使物质的原子发生电离和激发的过程中,射线的能量全部耗尽,射线不再存在,称作吸收(absorption)。吸收前所经过的路程称为射程。吸收的最终结果是使物质的温度升高。

子的能量及介质原子序数有关。

2. 康普顿效应 能量较高的 γ 光子与原子中的核外电子作用时,只将部分能量传递给核外电子,使之脱离原子核束缚成为高速运行的自由电子,而 γ 光子本身能量降低,运行方向发生改变,称康普顿效应(Compton effect)(图 1-17),释放出的电子称为康普顿电子。康普顿效应发生的几率与光子的能量和介质的密度有关,当 γ 光子的能量为 $500\sim 1000\text{keV}$ 时,康普顿效应比较明显。介质的密度越大,康普顿效应越明显。

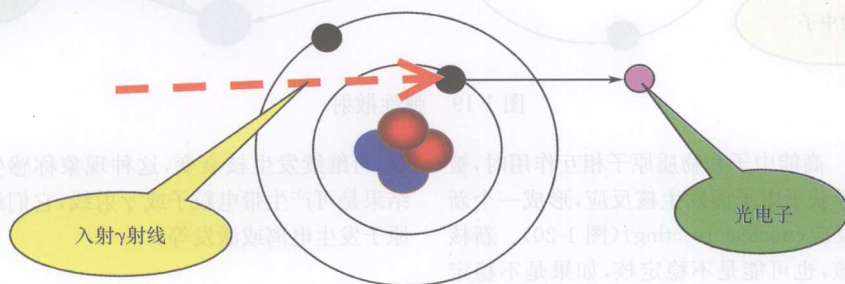


图 1-16 光电效应

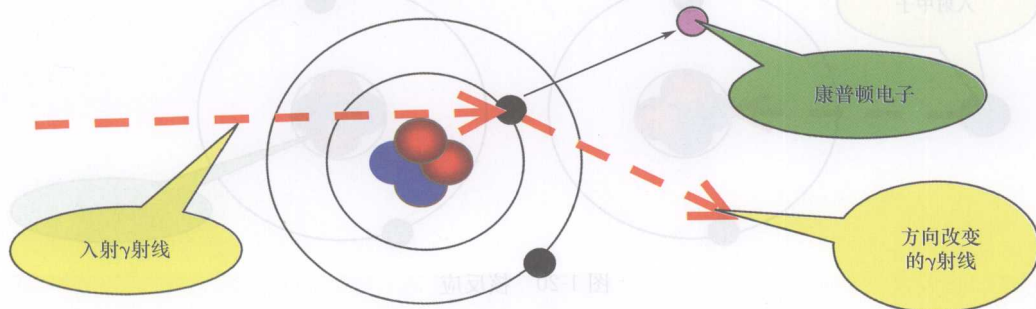


图 1-17 康普顿效应

3. 电子对形成 当 γ 光子的能量大于 1.022MeV 处于高能时,在物质核电场作用下,其中 1.022MeV 的能量转化为一个正电子和一个负电子的过程叫电子对生成 (electron pair production) (图 1-18),剩余的能量变为电子对的动能,又可发

生电离和激发等。电子对生成的几率与 γ 光子的能量和物质原子序数的平方成正比,即能量越高,物质的原子序数越大,电子对生成越明显。在核医学诊断中使用的 γ 光子一般能量较低,故不发生电子对生成。

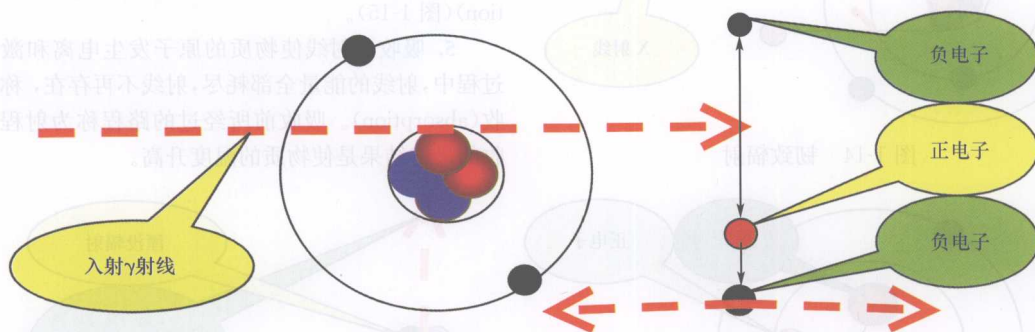


图 1-18 电子对形成

三、中子与物质的相互作用

与上述核辐射不同,中子不与吸收介质的原子核外层电子相互作用。当中子流穿过物质时,它可以进入物质的原子核内部并与核子相互作用,其过程可分为两种:即弹性散射和核反应。

1. 弹性散射 入射中子将一部分能量传给被碰

撞的原子核,使其脱离壳层电子形成快速运动的反冲核,反冲核进一步引起物质的其他原子发生电离和激发。而中子本身的运动速度减慢并改变运动方向。这种过程叫做弹性散射 (elastic scattering) (图 1-19)。当中子与其质量相近的原子核碰撞时,损失的能量最多,如中子与氢核碰撞时,因其质量与中子相近,反冲核得到的能量较多,故中子很容易被含氢多的物质如水、石墨等减速而吸收,这在防护上有重要意义。

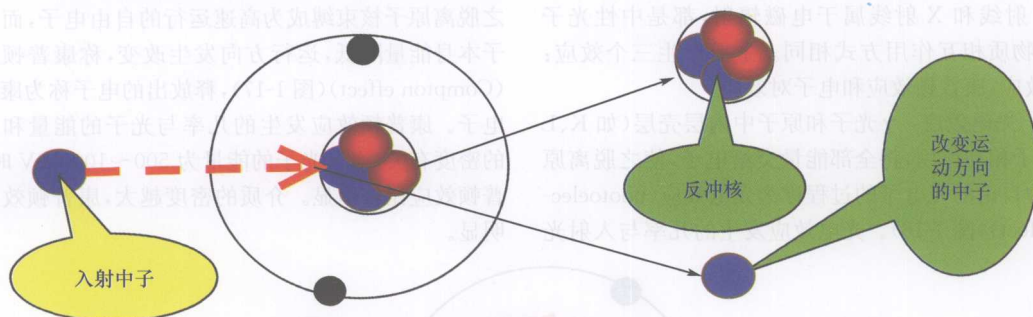


图 1-19 弹性散射

2. 核反应 高能中子和物质原子相互作用时,被撞击的原子核俘获了中子而发生核反应,形成一个新核的过程叫核反应 (nuclear reacting) (图 1-20)。新核可能是稳定性核,也可能是不稳定核,如果是不稳定

核,可继续发生核衰变,这种现象称感生放射性。其结果是可产生带电粒子或 γ 射线,它们继续使物质的原子发生电离或激发等。

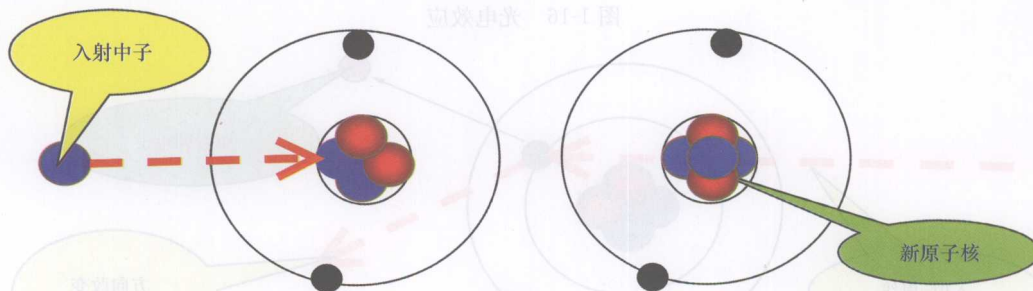


图 1-20 核反应

第六节 常用的辐射剂量及其单位

电离辐射剂量是用来描述辐射场的性质、辐射与物质相互作用时的能量传递关系和反映与辐射生物效应相关的量。其常用的辐射量是：照射量、吸收剂量和剂量当量。

一、照射量

照射量(exposure)是直接度量 X 或 γ 射线对空气电离能力的量,可间接反映 X、 γ 辐射场的强弱,是用来度量辐射场的一种物理量。其定义为: X 或 γ 射线在单位质量为 dm 的空气中,与原子相互作用释放出来的次级电子完全被阻止时,所产生的同一种符号离子的总电荷的绝对值 dq,与空气质量 dm 之比,即 $X = dq/dm$ 。

照射量的国际制单位是库仑/千克(C/kg),旧有专用单位为伦琴(R)。

1 伦琴 = 2.58×10^{-4} 库仑/千克

照射量率(exposure rate)就是单位时间内的照射量。其单位为:库仑/(千克·小时)(或秒)。照射量较小时,常用毫伦(1mR = 0.001R)或微伦(1 μ R = 0.001mR)表示,因此照射量率也类似地应用毫伦/小时或微伦/秒表示。

照射量仅适用于能量在 10keV~3MeV 范围内的 X 射线或 γ 射线。

由上可知,照射量是指 X 射线或 γ 射线给某一空气体积内次级电子用于电离的能量,而不计这些电子是否把这部分能量都消耗于这一空气体积之内,更不包括在指定的空气体积之外产生的次级电子所消耗的能量。

二、吸收剂量

吸收剂量(absorbed dose)是反映被照射物质吸收电离辐射能量大小的物理量。定义为:单位质量被照射物质吸收任何电离辐射的平均能量。吸收剂量国际单位制单位为戈(瑞)(Gray),以 Gy 表示。它的定义是:质量 1 千克的物质吸收 1 焦耳的辐射能量时相应的吸收剂量。即 $1\text{Gy} = 1\text{J/kg}$ 。旧有专用单位为拉德,以 rad 表示, $1\text{Gy} = 100\text{rad}$ 。单位时间内的吸收剂量叫吸收剂量率,其单位为 Gy/s。

由以上看出,吸收剂量与照射量不同,吸收剂量是指任何射线并适用于任何物质,衡量的指标是指被照射物质所吸收的辐射能量。而照射量只适用于 X 射线及 γ 射线,被研究的对象是空气,衡量的指标是在空气体积内所形成的次级电子所产生的离子总电荷量,即 X 射线或 γ 射线通过的空气时所放出的能量。

三、剂量当量

各种射线对组织产生的生物效应与射线种类有关,也与吸收剂量有关。由于不同射线在相同吸收剂量下产生的生物效应不同,故剂量当量(dose equivalent)是用适当的修正因子对吸收剂量进行加权,从而使修正后的吸收剂量更好地反映辐射对机体的危害程度。剂量当量 H 定义为吸收剂量和其他必要修正因子的乘积,并用 H 表示,即: $H = D \cdot Q \cdot N$, 式中: H: 剂量当量(Sv); D: 吸收剂量(Gy); Q: 辐射的线质系数(或称品质因子); N: 其他修正系数($N=1$)。

剂量当量国际单位制单位为希(沃特),以 Sv 表示。旧制专用单位为雷姆,以 ram 表示, $1\text{Sv} = 100\text{ram}$ 。

单位时间内剂量当量称为剂量当量率,用 H 表示,即 H 的单位为 Sv/s。

剂量当量一般在放射防护中应用,主要是在长期小剂量慢性照射时的相应剂量限制值范围内使用,而不能用于急性、大剂量照射时计算剂量,因为它所采用的品质因素仅与传能线密度(linear energy transfer, LET)相联系,而没有把影响生物效应的各种因素概括进去,所以品质因素是一个近似值。

四、有效剂量(effective dose)

有效剂量用于评价全身受到非均匀性照射情况下,发生随机效应几率的物理量。即:在全身受到非均匀性照射的情况下,受照组织或器官的当量剂量与相应的组织权重因子乘积的总和。

$$E = \sum_T \cdot W_T \cdot H_T$$

式中: E: 有效剂量; W_T : 组织 T 的组织权重因子; H_T : 组织 T 的当量剂量。

组织权重因子表示受照组织或器官的相对危险度,是从受照组织或器官的危险度与全身受照总危险度之比计算出来的。单位当量剂量(1Sv)在受照组织或器官中引起随机效应的几率,称为危险度。

组织权重因子(tissue weighting factor, W_T)的定义: W_T 代表组织 T 接受的照射所导致的随机效应的危险系数与全身受到均匀照射时的总危险系数的比值。表示组织或器官的辐射敏感性,反应了在全身均匀受照下,各组织或器官对总危害的相对贡献。

各组织或器官的组织权重因子(W_T)见下表

组织或器官	组织权重因子 W_T
睾丸	0.20
红骨髓	0.12
结肠	0.12
肺	0.12
胃	0.12
膀胱	0.05

续表

组织或器官	组织权重因子 WT
乳腺	0.05
肝	0.05
食管	0.05
甲状腺	0.05
皮肤	0.01
骨表面	0.01
其余组织或器官	0.05

(张雪峰)



思考题

1. 某元素的原子核外有 3 个电子层, 最外层有 5 个电子, 该原子核内的质子数为 ()
A. 14 B. 15 C. 16 D. 17
2. 某元素的原子核外有三个电子层, M 层的电子数是 L 层电子数的 $1/2$, 则该元素的原子是 ()
A. Li B. Si C. Al D. K

3. 两种元素原子的核外电子层数之比与它们的最外层电子数之比相等, 在周期表的前 10 号元素中, 满足上述关系的元素共有 ()

A. 1 对 B. 2 对 C. 3 对 D. 4 对

4. 放射性核素、放射性活度、元素、核素、同位素、同质异能素、电离、激发、湮灭辐射、光电效应、康普顿效应、剂量当量、照射量、吸收剂量的定义。

5. 核衰变的方式?

参考文献

- 卢希庭. 2001. 原子核物理. 修订版. 北京: 原子能出版社. 1~22
- 杨福家. 1993. 原子核物理. 12 版. 上海: 复旦大学出版社. 1~37