

临床核医学

王伯苓 主编



云南出版集团公司
云南科技出版社





云南省“十二五”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

LINCHUANG HEYIXUE

临床核医学

主编：王伯岑

第二版

云南出版集团公司
云南科技出版社
· 昆 明 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

临床核医学 / 王伯岑主编. -- 昆明 : 云南科技出版社, 2014. 5

ISBN 978-7-5416-8097-7 (2017. 1重印)

I . ①临… II . ①王… III . ①核医学—医学院校—教材 IV . ①R81

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 095060 号

责任编辑: 李永丽 苏丽月

封面设计: 晓 晴

责任校对: 叶水金

责任印制: 翟 苑

云南出版集团公司

云南科技出版社出版发行

(昆明市环城西路609号云南新闻出版大楼 邮政编码: 650034)

昆明海冈彩印有限公司印刷 全国新华书店经销

开本: 889mm×1194mm 1/16 印张: 13 字数: 509千字

2014年10月第1版 2017年1月第2次印刷

定价: 49.80元

《临床核医学》编委名单

主 编：王伯岑

副主编：袁卫红 杨波

编 委：（按姓氏笔画排列）

万 丹 教 授	昆明医科大学第一附属医院
马铁昆 副教授	昆明医科大学第一附属医院
王 强 副教授	云南省第一人民医院
王伯岑 教 授	昆明医科大学第一附属医院
邓智勇 副教授	昆明医科大学第三附属医院
孙 华 教 授	昆明医科大学第三附属医院
刘 进 讲 师	大理大学附属医院
任炳秀 博 士	昆明医科大学第一附属医院
余丽丽 副主任技师	昆明医科大学第一附属医院
苏玉林 主管技师	昆明医科大学第一附属医院
杨 波 教 授	昆明医科大学第四附属医院
杨吉生 教 授	云南省第一人民医院
杨淑敏 硕 士	昆明医科大学第一附属医院
张 红 主管技师	昆明医科大学第一附属医院
张济建 副教授	昆明医科大学第一附属医院
张雪峰 教 授	北华大学第一临床医院
袁卫红 教 授	昆明医科大学第二附属医院
秦永德 教 授	新疆医科大学第一附属医院
黄维丽 副教授	昆明医科大学第一附属医院

前 言

2005 年我们组织云南省昆明医科大学第一附属医院、第二附属医院、云南省第一人民医院、昆明军区总医院、云南省第二人民医院、大理大学 6 家有多年教学经验的专家，共同编写了《临床核医学》教材供现代医学生作为学习用书，用过两年。2007 年为了改变旧的“结构式课堂教学”模式，我主编了全国高等医学院校规划教材案例版《核医学》，到今年为止用过 5 年。根据云南省教育厅【2012】97 号要求，《临床核医学》被列为云南省“十二五”规划教材，要求我们重新编写。随着现代核医学的发展，特别是分子功能影像仪器 PET/CT 在我国的普及和体外分析技术的多样化，以及放射性核素治疗的迅速发展，旧的教材已经不能适应现代医学生的需求。我们又组织云南省昆明医科大学第一附属医院、第二附属医院、云南省第一人民医院、云南省第二人民医院、大理大学 5 家医院。并新增昆明医科大学第三附属医院，省外两家：北华大学第一临床医院、新疆医科大学第一附属医院有多年教学经验的专家共同编写第二版《临床核医学》。我们编写的基本原则是：少而精，基础部分并为三章，重点介绍与各论相关的知识。临床部分并为十章，保留经典的、成熟的方法，显像按系统编写，并补充 PET/CT 内容。

由于时间和水平有限，在编写过程中错误和不妥之处在所难免，恳请同道和学生提出宝贵意见并予以指正。

王伯苓

目 录

第一章 核物理基础知识.....	1	第五节 临床常用项目	43
第一节 原子结构	1	小 结	45
第二节 核素的基本概念	2	Summary	45
第三节 稳定性核素和放射性核素	3	第五章 内分泌系统.....	46
第四节 核衰变及其规律	3	第一节 甲状腺静态显像	46
第五节 射线和物质的相互作用	6	第二节 甲状腺血流显像	49
第六节 常用的辐射剂量及其单位	9	第三节 甲状腺吸 ^{131}I 功能试验.....	50
小 结	10	第四节 甲状腺激素抑制试验	51
Summary	10	第五节 TSH 兴奋试验	52
第二章 电离辐射的生物学效应及放射防护 11		第六节 TRH 兴奋试验	53
第一节 辐射生物学效应及射线作用原理	11	第七节 过氯酸钾释放试验	54
第二节 辐射生物学效应分类和影响因素	13	第八节 甲状旁腺显像	54
第三节 作用于人体的电离辐射源 ..	15	第九节 肾上腺皮质显像	56
第四节 放射防护的目的和基本原则...	15	第十节 肾上腺髓质显像	57
第五节 放射防护标准	16	小 结	58
第六节 放射防护措施	17	Summary	59
小 结	18	第六章 神经系统.....	61
Summary	19	第一节 脑血流灌注显像	61
第三章 核医学总论.....	20	第二节 脑代谢显像	65
第一节 临床核医学的定义与内容 ...	20	第三节 脑受体显像	69
第二节 临床核医学开展的必需条件...	20	第四节 脑脊液显像	69
第三节 临床核医学的诊疗原理	27	第五节 放射性核素脑血管显像	72
第四节 临床核医学在诊治上的主要特点	33	小 结	72
小 结	34	Summary	73
Summary	35	第七章 呼吸系统和放射性核素下肢静脉造影	74
第四章 体外分析技术.....	36	第一节 解剖和生理基础	74
第一节 放射免疫分析	36	第二节 肺灌注显像	75
第二节 免疫放射分析法	40	第三节 肺通气显像	77
第三节 其他体外放射分析法	41	第四节 肺灌注显像和肺通气显像临床	78
第四节 非放射性标记免疫分析技术...	41	应用.....	78
		第五节 核医学在肺肿瘤诊治中的应用	82
		小 结	88

Summary	89	第一节 解剖生理	144
第八章 心血管系统	90	第二节 骨显像原理、优缺点和适应证	144
第一节 心室显像及心功能分析	90	第三节 显像方法	145
第二节 心肌灌注显像	98	第四节 图像分析	148
第三节 心肌活力的检测	108	第五节 临床应用	151
第四节 急性心肌梗塞灶显像	111	小 结	156
第五节 心血管核医学显像进展简介	112	Summary	156
第六节 与相关影像学检查比较	114	第十二章 血液与淋巴系统检查	158
小 结	114	第一节 骨髓显像	158
Summary	114	第二节 脾显像	161
第九章 消化系统	116	第三节 淋巴显像	163
第一节 肝脏胶体显像	116	第四节 血容量测定	169
第二节 肝血流与肝血池显像	117	第五节 红细胞寿命的测定	169
第三节 肝胆动态显像	118	第六节 红细胞破坏部位测定	169
第四节 肝、胆 PET/CT 显像	120	第七节 血小板破坏部位测定	169
第五节 肠道出血显像	124	小 结	169
第六节 异位胃黏膜显像	125	Summary	170
小 结	126	第十三章 放射性核素治疗	171
Summary	126	第一节 ^{131}I 治疗 Graves' 病	171
第十章 泌尿生殖系统	128	第二节 ^{131}I 治疗自主功能性甲状腺结节	175
第一节 肾、膀胱动态显像、GFR、ERPF 测定和肾图	128	第三节 ^{131}I 治疗非毒性甲状腺肿	176
第二节 肾静态显像	137	第四节 ^{131}I 治疗分化型甲状腺癌	176
第三节 膀胱输尿管反流显像	137	第五节 肾上腺素能肿瘤的 ^{131}I -MIBG 治疗	180
第四节 阴囊显像	138	第六节 转移性骨肿瘤的放射性核素治疗	182
第五节 子宫输卵管显像	139	第七节 ^{32}P 治疗血液疾病	185
第六节 PET 在泌尿系统肿瘤中的应用	139	第八节 放射性核素介入治疗	187
小 结	142	第九节 其他治疗	190
Summary	143	小 结	193
第十一章 骨骼系统	144	Summary	194

第一章 核物理基础知识

Basic Knowledge of Nuclear Physics

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。分子是由相同的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。分子是保持该物质基本化学性质的最小个体。它的种类虽然是无穷无尽的，但它们都是由不外乎 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，我们知道原子是由处于原子中心的原子核和核外电子组成。为了形象地表示原子的结构，人们就创造了“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），次外层电子数目不超过 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。

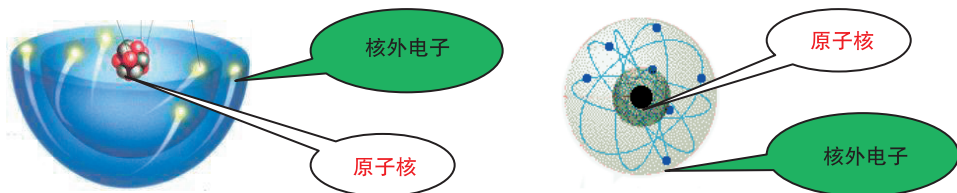


图 1-1 卢瑟福提出的原子结构；原子结构模拟图

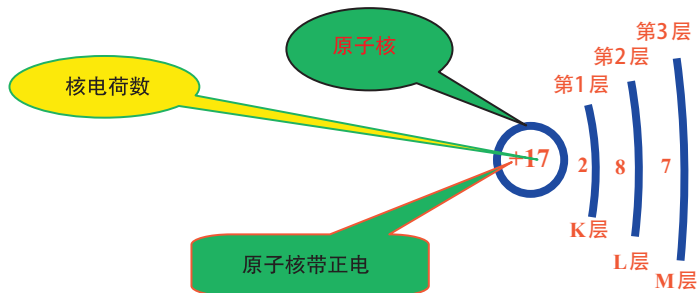


图 1-2 元素核外电子排布示意图

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内运动，把原子核外分成七个运动区

域，又叫电子层，分别用 $n=1、2、3、4、5、6、7\cdots$ 表示，分别称为 $K、L、M、N、O、P、Q\cdots$ ， 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？

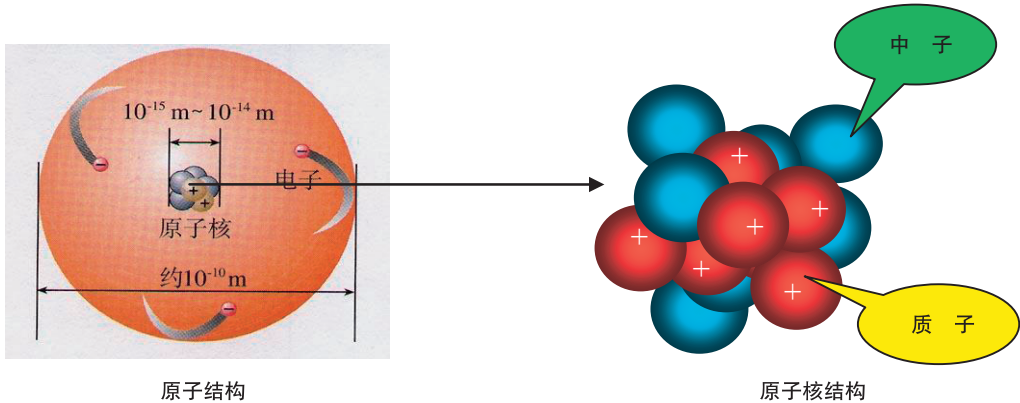


图 1-3 原子核的构成

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：原子核在某些核反应、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 $^A_m X$ ，如 ^{99m}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。

均为不同的元素。

二、同位素

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 ^1H 、 ^2H 、 ^3H 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

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……

三、同质异能素

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就称为同质异能素（isomer）。例如 ^{99m}Tc 是 ^{99}Tc 的激发态， ^{99m}Tc 与 ^{99}Tc 互为同质异能素（图 1-5）。

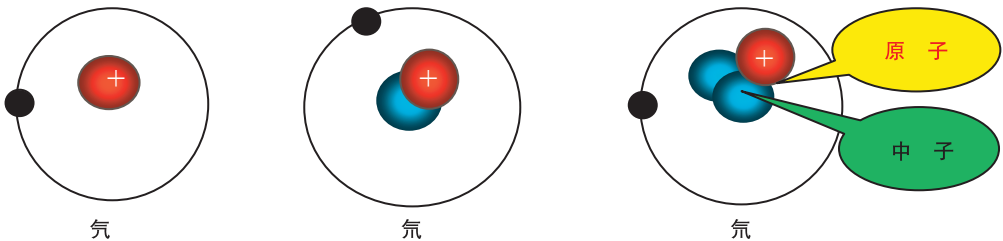


图 1-4 氢、氘、氚互为同位素

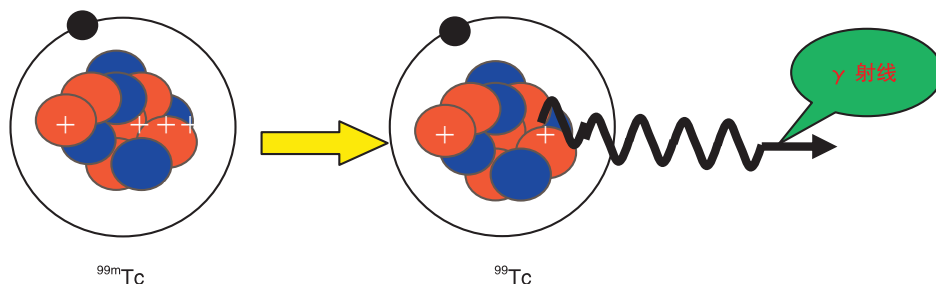


图 1-5 ^{99m}Tc 、 ^{99}Tc 互为同质异能素

四、核素

核素 (Nuclide)：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。

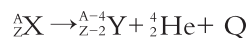
第四节 核衰变及其规律

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，母核失去二个质子和两个中子，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。

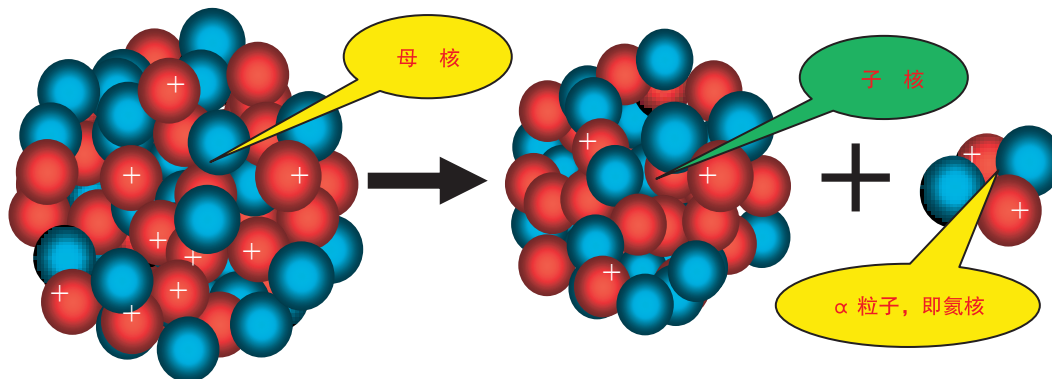
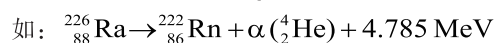


图 1-6 α 衰变 (从母核中射出的 ^4He 原子核)

2. β^- 衰变 (Decay) 放射性核素的核内放射出粒子的衰变称为 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,

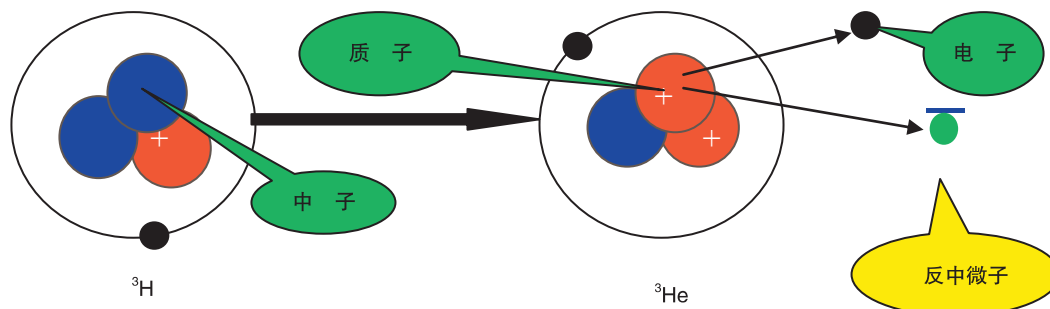
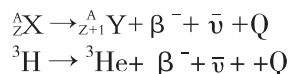


图 1-7 β^- 衰变 (一个中子转变为一个质子, 同时释放一个粒子, 即电子)

3. (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。可以看作是 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

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。



衰变公式表示。

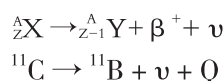


图 1-8: β^+ 衰变 (一个质子转变为一个中子, 同时释放一个粒子, 即正电子)

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。

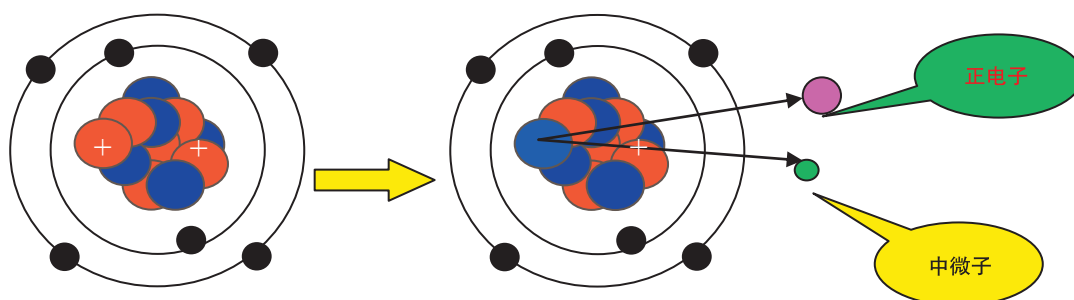


图 1-8 β^+ 衰变 (一个质子转变为一个中子, 同时释放一个 β^+ 粒子, 即正电子)

4. 电子俘获衰变 (Electron Capture, EC) 电子俘获衰变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 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:

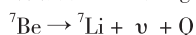
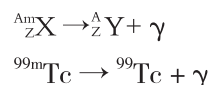


图 1-9: EC (核内一个质子从核外内层的电子轨道俘获一个电子, 而转化为一个中子, 同时发射 γ 射线和一个中微子; 外层的轨道上有一个电子跃入内层填补空缺。由于外层电子的能量比内层电子高, 多余的能量就以 X 线的形式释出。)

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 光子释出过剩能量的过程称 γ 衰变。如果 γ 跃迁释出的能量传给一个核外电子 (K 层电子概率最高), 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 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:



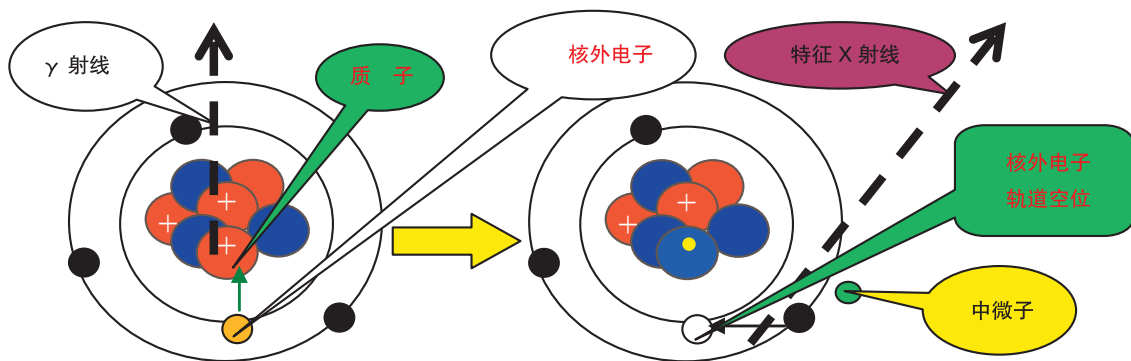


图 1-9 EC

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 线的形式释出。

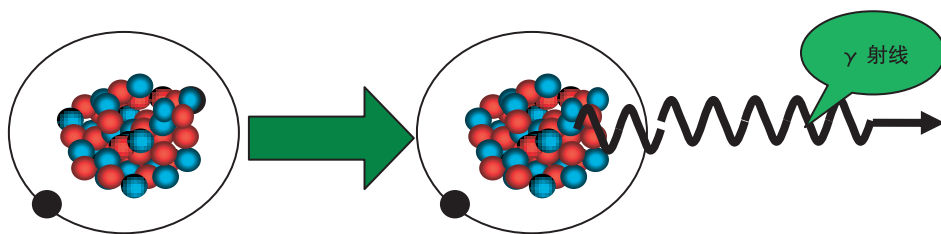


图 1-10 γ 衰变

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，各有一定的概率。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，如超铀元素钷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呈正比，可用下式表示：

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

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。

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

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：

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

3. 放射性活度 (Radioactivity, A) 放射性活度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：

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (1-4)$$

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 Ci = 3.7×10^{10} 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（Ionization）（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。

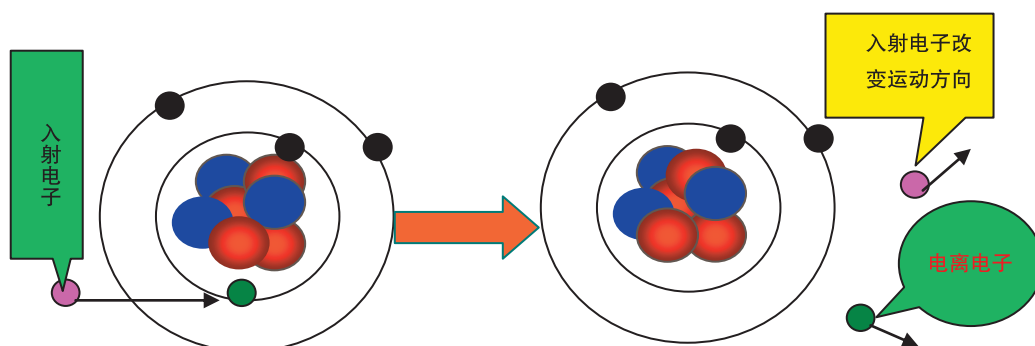


图 1-11 电离

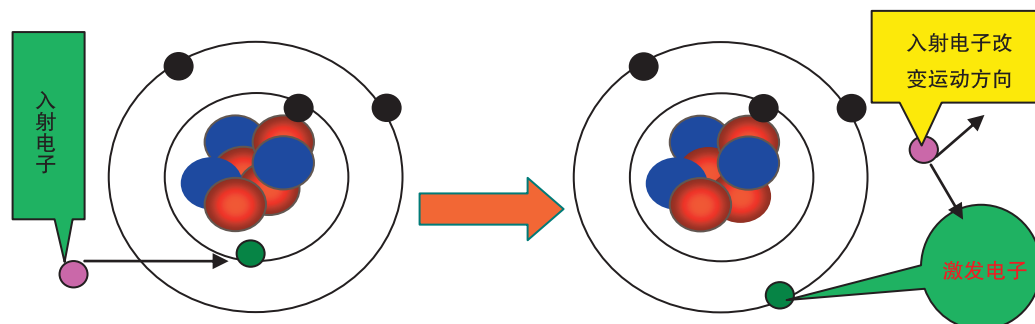


图 1-12 激发

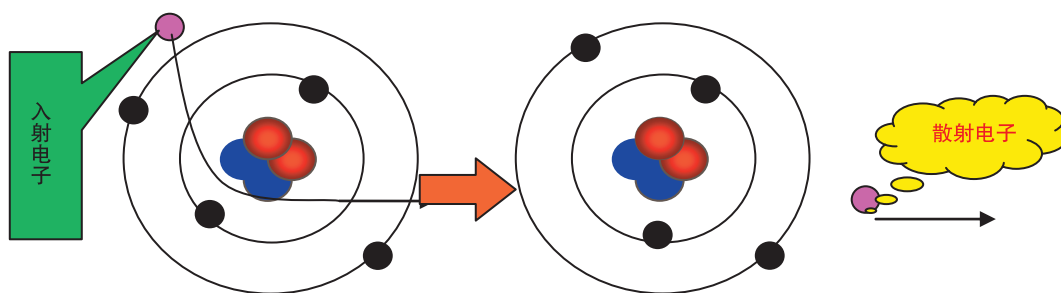


图 1-13 散射（ β 射线在原子核电场力的作用下改变原来的运动方向）

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 粒子的反向散射的概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。

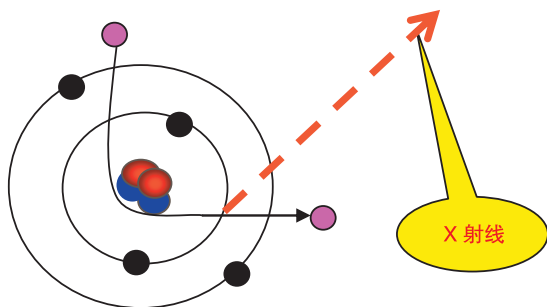


图 1-14 韧致辐射

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）。吸收前所经的路程称为射程。吸收的最终结果是使物质的温度升高。

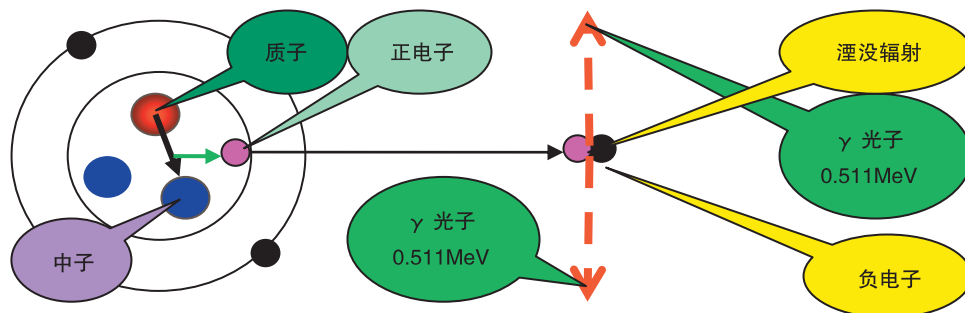


图 1-15 湮没辐射

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）。光电效应发生的概率与入射光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。康普顿效应发生的概率与光子的能量和介质的密度有关，当 γ 光子的能量为500~1000keV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。

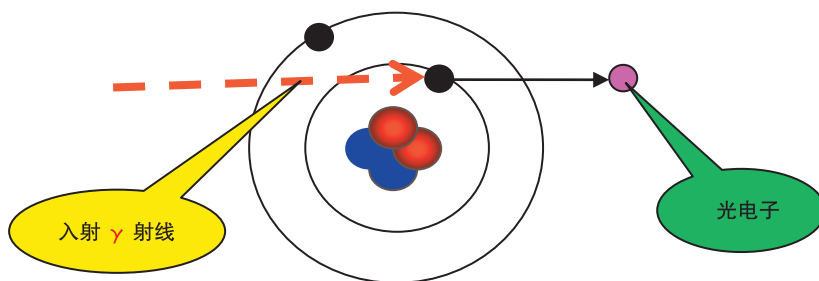


图 1-16 光电效应

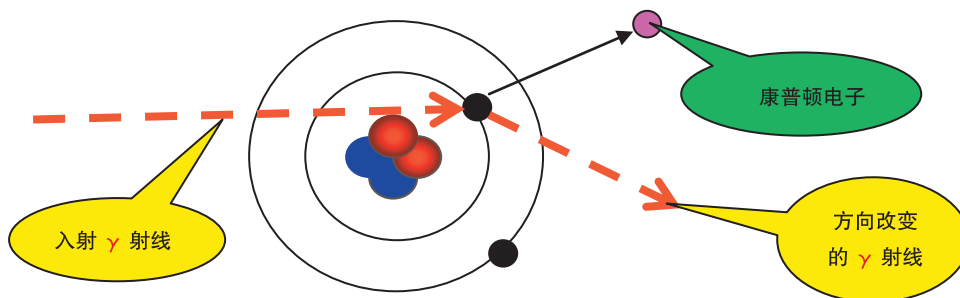


图 1-17 康普顿效应

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。电子对生成的概率与 γ 光子的能量和物质的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。

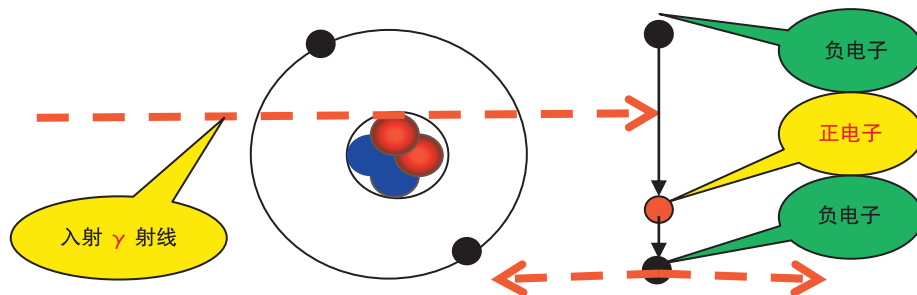


图 1-18 电子对形成

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。

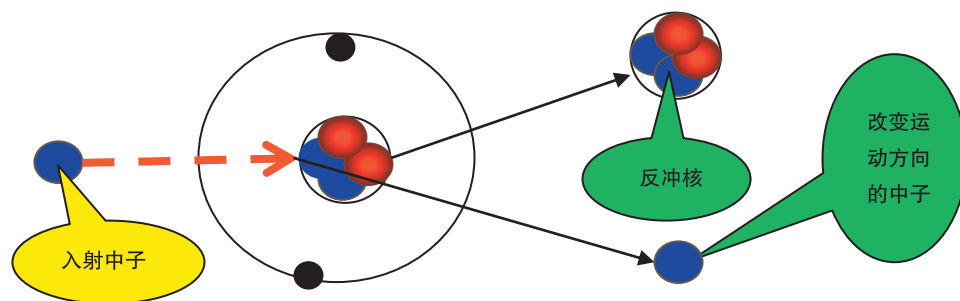


图 1-19 弹性散射

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，也可能是不稳定性核，如果是不稳定性核，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。

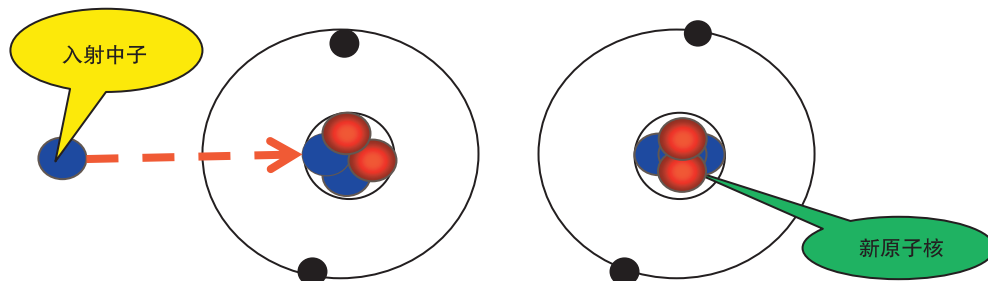


图 1-20 核反应

电荷量, 即 X 或 γ 射线通过的空气时所放出的能量。

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 或 γ 射线。

由上可知, 照射量是指 X 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 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

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。

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

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概率, 称为危险度。

组织权重因子 (Tissue Weighting Factor, W_T)

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, 反映了在全身均匀受照下各该组织或器官对总危害的相对贡献。

组织权重因子 (WT)

组织或器官	组织权重因子 WT
睾丸	0.20
红骨髓	0.12
结肠	0.12
肺	0.12
胃	0.12
膀胱	0.05
乳腺	0.05
肝	0.05
食道	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

小 结

原子核是由质子和中子组成, 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。凡质子数相同的一类原子称为一种元素, 具有相同的质子数而中子数不同的元素互为同位素。核内中子数和质子数都相同, 但能量状态不同的核素彼此就称为同质异能素。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。元素有 108 种, 核素有 2000 多种。原子核只有在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。核衰变和物理半衰期是放射性核素的共同特点。常见的核衰类型有: α 衰变、 β^- 衰变、 β^+ 衰变、 γ 衰变。带电粒子与物质的相互作用产生: 电离与激发、散射、韧致辐射、湮没辐射、吸收。光子与物质的相互作用产生: 光电效应、康普顿效应、电子对形成。常用的辐射剂量及其单位: 放射性活度、照射量、吸收剂量、剂量当量、有效剂量。

Summary

An atomic nucleus consists of positive charged protons and uncharged neutrons. The number of protons in a nucleus is similar to that of neutrons. The atoms with the same number of protons are known as a kind of element. Isotopes refer to atoms with the same number of protons but different number of neutrons. Nuclear isomer are atoms with the same number of both the

protons and neutrons but in different energy state. There are 108 elements and more than 2000 kind of nuclides. An nucleus is stable when the number ratio between the neutrons and protons in it keeps in balance, however, once the balance was broken, the nucleus become unstable and emits one or more kinds of rays spontaneously, which leads to a new nuclide formation. The process is called radiation decay or disintegration, and also called nuclear decay briefly. Nuclear decay is determined by paradoxical movement in the nucleus. The nucleus before decay is called parent nucleus and the decayed nucleus is called daughter nucleus. Radionuclides were characterized by nuclear decay and physical half-life. There are four common nuclear decay types: alpha decay, beta minus decay, beta plus decay and gamma decay. When charged particles interact with other materials, ionization, excitation, scattering, bremsstrahlung radiation, annihilation radiation and absorption could occur. The interaction between photons and other substances may be accompanied by photoelectric effect, Compton effect and electron pair production. The common radiation dose units include radioactivity, exposure dose, absorbed dose, dose equivalent and effective dose.

小结翻译: 杨淑敏

【 练习题 】

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:

- [1] 杨福家. 原子核物理 [M]. 上海: 复旦大学出版社, 1993.
- [2] 卢希庭. 原子核物理 [M]. 北京: 原子能出版社, 2001.

编写: 张雪峰 校对: 苏玉林