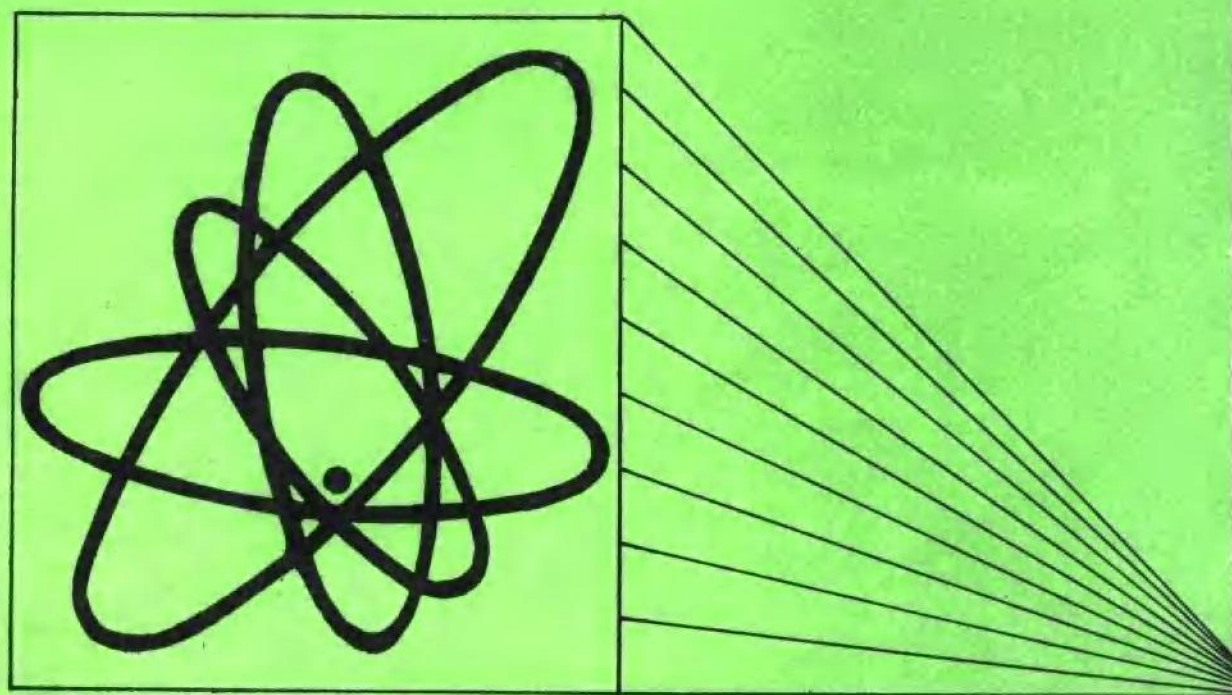


# 電離輻射損傷 基礎與臨床

---

金爲翹 王洪復 主編



上海醫科大學出版社

1520/02

# 电离辐射损伤基础与临床

主 编 金为翘 王洪复

编著者(以姓氏笔画为序)

|     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|
| 山根兴 | 王洪复 | 叶淑华 | 冯嘉林 |
| 许 荣 | 陈思白 | 陈识杰 | 张鸿寿 |
| 邵松生 | 金一尊 | 金为翘 | 周智新 |
| 何介薇 | 罗梅初 | 谈平轩 | 翁志根 |
| 黄振东 | 盛民立 | 程文英 |     |



A0048547



上海医科大学出版社

(沪)新登字 207 号

特约编辑 冯 晓  
封面设计 吴 平

**电离辐射损伤基础与临床**

主编 金为翘 王洪复

---

上海医科大学出版社出版

上海市医学院路 138 号

邮政编码 200032

新华书店上海发行所经销

江苏句容县排印厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 20.75 插页 1 字数 504,900

1992 年 3 月第 1 版 1992 年 3 月第 1 次印刷

印数 1—1500

---

ISBN 7-5627-0108-3/R·99

---

定价: 15.00 元

## 编者的话

50年代中叶,随着我国原子能事业的发展,核医学与放射损伤防治也受到国家的重视。上海第一医学院受卫生部与上海市卫生局委托,汇集了十多名包括核物理、医学、卫生学、药理学、生物学、化学等方面的青年教师,成立上海市工业卫生研究所(今上海医科大学放射医学研究所),为国防需要和上海及其周围地区的放射损伤防治开展工作。80年代我国核电站的筹建,进一步推动核防护与放射医学为核能开发和人民健康服务。1986年我所受卫生部委托,举办医学放射生物学培训班,在本专业工作了20余年的同志,参阅国内外文献,并结合自己的工作,写出了教材。在此基础上,几经修改,编写成《电离辐射损伤基础与临床》一书出版。

核辐射作用于有机体,使机体内的分子、原子被电离、激发,生成氧自由基等,如超过机体清除能力,将引起生物大分子脂质、核酸、蛋白质、酶、糖类等的破坏,损伤细胞质膜与细胞核。如未能正确修复,将导致细胞组织的结构与功能异常,产生临床各种近、远期症状,甚至出现遗传性危害。近20年来自由基捕捉剂与核磁共振技术的发展,体内超氧化物歧化酶的发现,推动了自由基生物学与自由基医学的进步。中西药物清除自由基与抗氧化剂的研究,为预防与及早治疗放射损伤,提供了广阔的前景。一系列放射性核素阻断吸收与加速排除药物的研究和临床应用,为防治放射性核素内污染损伤提供了手段。放射性皮肤烧伤的内外科诊治,已积累了较丰富的经验。胎肝输注、骨髓移植的研究,更为某些血液病与肿瘤的治疗提供了方法和依据。肿瘤放射治疗的成功与放射生物学的发展息息相关,放射防护药物与放射增敏剂也相得益彰。本书还介绍了国内外肿瘤放射生物学与增敏研究的一些情况与我所工作的经验,以期对肿瘤放射治疗临床医师和放射生物学工作者能有所帮助。

由于我们水平限制,错误之处更望同道指正。

金为翹 王洪复

## 序 言

电离辐射损伤是19世纪末发现和利用X射线与放射性镭、钍、铀之后出现的。随着射线和核技术在国防、工农业、医学等领域中的广泛应用,人体放射损伤的预防、诊断和治疗引起人们极大的关注,不少国家投入大量科技力量和经费进行研究。我国从50年代初期开始组织科技人员在放射损伤机理、药物防治、诊断治疗技术和防护等多方面进行较深入的研究,培养造就了一支科技队伍,形成放射医学这门新学科。

由于当今世界经济的发展紧密依赖能源的增长,许多国家都十分重视核能的利用。我国在射线技术和放射性同位素的应用上越来越广泛,核电站也正在建设中,电离辐射已经和人们的生活紧密相联。因此,大力宣传放射医学与防护知识是每个放射医学工作者的任务。

上海医科大学放射医学研究所是我国从事本学科研究较早的专业机构之一,30年来,该所从临床与基础两方面对电离辐射的剂量与效应、损伤与修复、治疗与预防等课题进行了较深入的研究。他们在总结自己的研究成果和经验的基础上,结合国外资料编写了《电离辐射损伤基础与临床》这本书。这是一本介绍国内外电离辐射损伤和防治研究的进展的放射医学专著,既有基础知识又有临床内容。它的出版对宣传这一学科的发展将会起到积极推动作用。

李学成

# 目 录

## I. 电离辐射损伤基础

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 1. 电离辐射损伤的物理基础与剂量学基础 .....   | 1   |
| 1.1 引言 .....                 | 1   |
| 1.2 核辐射基本概念 .....            | 1   |
| 1.3 核辐射与介质相互作用 .....         | 6   |
| 1.4 剂量学基础 .....              | 8   |
| 2. 辐射生物效应原理 .....            | 12  |
| 2.1 电离辐射的原子、分子水平效应 .....     | 12  |
| 2.2 自由基的生成和特性 .....          | 13  |
| 2.3 自由基测定及电子自旋顺磁共振光谱学 .....  | 19  |
| 2.4 自由基与电离辐射损伤 .....         | 32  |
| 3. 生物分子的辐射效应 .....           | 40  |
| 3.1 电离辐射对 DNA 结构与功能的影响 ..... | 41  |
| 3.2 染色质的辐射效应 .....           | 53  |
| 3.3 电离辐射对生物膜的影响 .....        | 58  |
| 4. 电离辐射对体重和某些代谢的影响 .....     | 63  |
| 4.1 体重减轻 .....               | 63  |
| 4.2 电离辐射对能量代谢的影响 .....       | 64  |
| 4.3 电离辐射对蛋白质和氨基酸代谢的影响 .....  | 66  |
| 4.4 电离辐射对核酸代谢的影响 .....       | 70  |
| 4.5 电离辐射对糖代谢的影响 .....        | 72  |
| 4.6 电离辐射对脂肪代谢的影响 .....       | 74  |
| 4.7 电离辐射对水和电解质代谢的影响 .....    | 74  |
| 4.8 电离辐射对机体中微量元素的影响 .....    | 75  |
| 5. 细胞辐射损伤与修复 .....           | 76  |
| 5.1 概论 .....                 | 76  |
| 5.2 细胞——生命的基本单位 .....        | 77  |
| 5.3 辐射对细胞的作用 .....           | 78  |
| 6. 电离辐射对造血功能的影响 .....        | 88  |
| 6.1 正常造血 .....               | 88  |
| 6.2 电离辐射对造血干细胞的影响 .....      | 92  |
| 6.3 电离辐射对骨髓细胞的影响 .....       | 97  |
| 6.4 电离辐射对周围血细胞数的影响 .....     | 102 |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 6.5 电离辐射与造血细胞效应的应用 .....              | 107 |
| 7. 电离辐射损伤时免疫系统的改变 .....               | 109 |
| 7.1 急性放射损伤时的全身感染 .....                | 109 |
| 7.2 大剂量照射对免疫的影响 .....                 | 110 |
| 7.3 辐射诱发免疫耐受性和自身免疫 .....              | 115 |
| 7.4 小剂量免疫效应的争论问题——Hormesis 效应 .....   | 115 |
| 8. 电离辐射对生殖系统的影响 .....                 | 116 |
| 8.1 性腺辐射敏感性 .....                     | 116 |
| 8.2 辐射对生殖功能的影响 .....                  | 118 |
| 8.3 辐射后性腺激素的改变 .....                  | 119 |
| 9. 电离辐射组织病理学 .....                    | 121 |
| 9.1 电离辐射组织病理学概论 .....                 | 121 |
| 9.2 造血型放射病病理形态 .....                  | 125 |
| 9.3 肠型放射病病理形态 .....                   | 131 |
| 9.4 心血管型放射病病理形态改变 .....               | 135 |
| 9.5 脑型放射病的病理形态改变 .....                | 135 |
| 10. 电离辐射损伤时的微循环障碍 .....               | 137 |
| 10.1 微血管的辐射敏感性 .....                  | 139 |
| 10.2 电离辐射损伤时微循环障碍的基本病理改变 .....        | 140 |
| 10.3 急性放射损伤早期的血液高凝改变对微循环障碍影响的加重 ..... | 143 |
| 10.4 微循环电离辐射损伤的晚期改变 .....             | 147 |
| 10.5 微循环障碍对组织细胞辐射损伤与修复的影响 .....       | 148 |
| 10.6 电离辐射损伤时几种脏器的微循环障碍 .....          | 149 |
| 11. 电离辐射对机体凝血过程的影响 .....              | 152 |
| 11.1 血液、抗凝与纤维蛋白溶解 .....               | 152 |
| 11.2 电离辐射损伤时的凝血过程障碍 .....             | 156 |
| 11.3 电离辐射对血小板、血管内皮 AA 代谢的影响 .....     | 159 |
| 12. 电离辐射诱发染色体畸变 .....                 | 161 |
| 12.1 辐射诱发的染色体畸变分析 .....               | 161 |
| 12.2 小剂量照射对染色体畸变的影响 .....             | 163 |
| 12.3 染色体畸变的剂量-效应曲线及其应用 .....          | 164 |
| 12.4 姐妹染色单体交换 .....                   | 170 |
| 12.5 人类精子染色体的分析 .....                 | 173 |
| 13. 自由基清除与辐射效应阻断药物 .....              | 175 |
| 13.1 辐射损伤与硫醇类的自由基清除 .....             | 175 |
| 13.2 内源性谷胱甘肽的自由基清除机理 .....            | 175 |
| 13.3 维生素 E 和抗氧化剂 .....                | 179 |
| 13.4 外源性的自由基清除剂及其作用机理 .....           | 180 |
| 13.5 辐射损伤防护药物机理小结 .....               | 184 |

## II. 电离辐射损伤临床

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 14. 外照射急性放射病            | 188 |
| 14.1 定义分型               | 188 |
| 14.2 影响因素               | 189 |
| 14.3 病因分析               | 189 |
| 14.4 临床表现               | 190 |
| 14.5 诊断                 | 192 |
| 14.6 治疗                 | 194 |
| 14.7 改善辐射微循环障碍的治疗       | 196 |
| 14.8 造血干细胞移植            | 199 |
| 14.9 预防                 | 204 |
| 15. 外照射慢性放射病            | 205 |
| 15.1 定义                 | 205 |
| 15.2 病因                 | 205 |
| 15.3 症状与体征              | 206 |
| 15.4 诊断                 | 209 |
| 15.5 鉴别诊断               | 210 |
| 15.6 治疗                 | 211 |
| 15.7 预防                 | 212 |
| 16. 内照射放射病              | 213 |
| 16.1 放射性核素体内污染与代谢规律     | 213 |
| 16.2 内照射放射损伤的特点         | 215 |
| 16.3 内照射放射损伤的发病情况       | 216 |
| 16.4 内照射放射病的诊断          | 218 |
| 16.5 治疗                 | 219 |
| 16.6 预防                 | 220 |
| 16.7 几种放射性核素的代谢特点、效应与治疗 | 221 |
| 17. 皮肤辐射损伤              | 227 |
| 17.1 皮肤辐射损伤的生物效应        | 227 |
| 17.2 皮肤辐射损伤的发病原因        | 228 |
| 17.3 皮肤辐射损伤的影响因素        | 229 |
| 17.4 皮肤辐射损伤的基本病理        | 231 |
| 17.5 急性皮肤辐射损伤           | 233 |
| 17.6 慢性皮肤辐射损伤           | 237 |
| 17.7 放射性皮肤癌             | 243 |
| 17.8 皮肤辐射损伤的手术治疗        | 245 |
| 18. 放射性复合伤              | 249 |
| 18.1 分类                 | 249 |



|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 18.2 发病率 .....              | 249 |
| 18.3 分度 .....               | 252 |
| 18.4 核武器所致杀伤区 .....         | 252 |
| 18.5 复合伤的临床特点 .....         | 252 |
| 18.6 临床经过 .....             | 254 |
| 18.7 诊断 .....               | 255 |
| 18.8 治疗 .....               | 256 |
| 19. 电离辐射的远后效应 .....         | 257 |
| 19.1 辐射致血液系统疾病 .....        | 258 |
| 19.2 辐射致眼晶体混浊(白内障) .....    | 258 |
| 19.3 辐射致寿命缩短 .....          | 259 |
| 19.4 辐射遗传效应 .....           | 259 |
| 19.5 辐射致畸 .....             | 261 |
| 19.6 辐射致癌 .....             | 262 |
| 20. 核电厂事故时的放射损伤与应急医疗 .....  | 268 |
| 20.1 核电厂事故发生概况 .....        | 269 |
| 20.2 核电厂事故时对人员的主要损伤因素 ..... | 269 |
| 20.3 核电厂事故时的急性放射病 .....     | 271 |
| 20.4 核电厂事故时放射损伤应急医疗措施 ..... | 273 |

## Ⅲ. 肿瘤放射生物学与增敏

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 21. 肿瘤放射生物学基础 .....           | 275 |
| 21.1 肿瘤放射生物学的研究历史与放射治疗 .....  | 275 |
| 21.2 肿瘤组织与射线的敏感性 .....        | 277 |
| 21.3 氧效应与乏氧细胞 .....           | 278 |
| 21.4 其它生物学效应 .....            | 284 |
| 21.5 肿瘤放射生物学中常用的研究方法和内容 ..... | 287 |
| 22. 辐射增敏作用与辐射增敏剂 .....        | 294 |
| 22.1 辐射增敏基础和发展历史 .....        | 294 |
| 22.2 辐射增敏研究的内容 .....          | 297 |
| 22.3 辐射增敏剂的类型及其增敏效应 .....     | 301 |
| 22.4 辐射增敏的作用机理 .....          | 311 |
| 22.5 影响辐射增敏效应的因素 .....        | 312 |
| 22.6 辐射增敏药物在肿瘤放射治疗中的应用 .....  | 314 |
| 22.7 辐射增敏剂的发展前景 .....         | 318 |

# I . 电离辐射损伤基础

## 1. 电离辐射损伤的物理基础与剂量学基础

### 1.1 引言

电离辐射损伤是电离辐射的生物效应之一。电离辐射生物效应是电离辐射与生物体相互作用的结果,一般分为初级效应和次级效应。初级效应是指能量交换或能量吸收;次级效应是产生化学变化。本章介绍电离辐射的初级效应,包括电离辐射的来源和电离辐射与介质相互作用的规律。因天然的电离辐射都来自原子核内,所以电离辐射也叫做核辐射,有时也简称为辐射。

### 1.2 核辐射基本概念

#### 1.2.1 原子核结构

要了解原子核的结构,须从原子结构谈起。原子一开始只是哲学上的概念。它的含义是物质的最小的不可分割的单元。后来在化学和物理学中先后也引进了这个概念,并且最终证实原子的存在。但如今在物理学中,原子只是微小粒子的代名词,并不意味着不可分割。1897年英国物理学家汤姆逊发现,被人称做阴极射线的东西就是电子流。1899年他又指出,电子来源于原子。电子是带负电荷的质量仅为氢原子质量 $1/1800$ 的微观粒子。那末带负电荷的电子在原子中又是怎样达到电中性的呢?对此汤姆逊有一个假设,他认为“一个原子包含着数量为 $Z$ 的电子,每个电子带有电荷 $-e$ ,以平衡位置埋置在连续分布的总量为 $+2e$ 的正电荷中,形成一个不带电的原子”。原子中的正电荷就像大饼中的面粉,而电子则是大饼上的芝麻。但在1911年卢瑟福发现事情并非如此,他所做的 $\alpha$ 粒子散射实验表明,原子中的正电荷是集中在一起的,像一个核一样。因此卢瑟福假设了一个行星模型,他认为原子是由电子和核组成的。组成的方式就像太阳系一样,电子在各自的轨道上环绕核旋转,而且这轨道是一个接一个连续的。可是这样的结构按照经典力学的理论是不可能存在的。因为作高速圆周运动的带电粒子将因不断辐射能量而趋于停止运动,最后为核所吸引。面对这一经典困难,1911年玻尔大胆地提出了与经典理论相冲突的二个假设:定态假设和频率法则。

定态假设认为核外电子只能稳定地处在某些分立的状态(轨道或能级)。

频率法则是指电子在不同定态之间跃迁,能量之差为 $\Delta E$ 。跃迁时释放出来的辐射的频率 $\nu$ 满足 $\Delta E = h\nu$ 。 $h$ 是普朗克常数,是最小的量子。

这两个假设就是量子化假设。假定电子环绕核旋转的轨道是椭圆形,根据这个假设,经过计算可以得出椭圆轨道的长轴

$$a = \frac{h^2}{4\pi^2 m_e e^2} \cdot \frac{n^2}{Z}$$

其中  $m_e$  是电子的质量,  $e$  是电子的电荷量,  $Z$  是核电荷数。

椭圆轨道的短轴

$$b = a \cdot \frac{1}{n}$$

轨道平面与  $Z$  轴的交角  $\alpha$  的余弦

$$\cos\alpha = \frac{m}{l}$$

其中  $n, l, m$  三个数是确定  $a, b, \cos\alpha$  三个量的参数,称为量子数。它们只能取某些整数值

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

$$l = 0, 1, 2, \dots, n-1$$

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$$

$n$  是确定电子能量的参数叫主量子数

$$E_n = -\frac{2\pi^2 m_e e^4 Z^2}{n^2 h^2}$$

$l$  是确定电子角动量( $P_\theta$ )的参数叫角量子数

$$P_\theta = l \frac{h}{2\pi}$$

$m$  是确定电子角动量在外磁场方向上投影( $P_z$ )的参数叫磁量子数

$$P_z = m \frac{h}{2\pi}$$

玻尔的量子假设不仅得到一系列事实的支持,也是具有普遍意义的理论——量子力学的必然结果。按这个假设修正的原子结构——行星模型一直使用至今。

原子有核,核是一个直径仅为  $10^{-13}\text{cm}$  的粒子。物理学家曾希望质子是组成一切原子核的基本粒子。按照这种设想构成原子核,其它原子核的质量数和电荷数应当是相同的整数。但实验上发现它们的质量数大约是电荷数的两倍。为了解释这一偏差,1920年卢瑟福提出中子的概念。他认为核中除了质子以外还有不带电荷的中子存在。1928年德国物理学家博特和贝克在用  $\alpha$  粒子轰击铍元素时发现了一种很强的不带电的射线。一直挂念着中子的查德威克马上想到这可能是卢瑟福预言过的中子,但他接着所做的实验由于条件所限没有证实这一点。四年以后,约里奥-居里和伊伦-居里发现博特的射线能从石蜡中打出质子来。查德威克也发现这种射线还可以从其它轻元素中打出质子,而且有很强的穿透力。在反复进行一些简单理论计算并与实验结果比较后,他得到的结论是:释放出的这种射线是一种质量与质子相等的中性粒子即中子。1932年2月他正式宣布了这个结论。同年,海森伯及塔姆和伊凡宁科同时阐明原子核是由质子和中子组成。具有电荷数  $Z$  和质量  $A$  的原子核由  $Z$  个质子和  $N = A - Z$  个中子组成。例如氢原子核的质量数  $A = 1$ , 电荷数  $Z = 1$ , 只有1个质子组成。又如原子核为  $A = 4, Z = 2$ , 则它是由2个质子和2个中子组成。一个原子核一般可以用符号  ${}^A\text{X}$  表示,  $\text{X}$  是这个核所组成的元素的符号,  $A$  是质量数。对于氢核、

氢核和碳核可以分别表示为  ${}^1\text{H}$ 、 ${}^4\text{He}$  和  ${}^{12}\text{C}$ 。

原子核除了在组成上有差别外,能量状态也有差别,有激发态和基态之分。为了表示这些差别,引用下列术语。

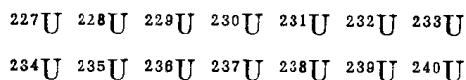
① 核素 原子核的组成和能量状态完全相同的属于同一种核素。例如  ${}^1\text{H}$  表示一种核素,  ${}^{12}\text{C}$  表示一种核素,  ${}^{99}\text{Tc}$  是一种核素,  ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$  是另一种核素。后者在符号上比前者多了一个 m, 这表示两种核素的能量状态不同, 后者处于激发态。

② 同位素 核内质子数相同的原子属于同一种元素。同一种元素的原子可以是不同的核素。例如  ${}^1\text{H}$ 、 ${}^2\text{H}$ 、 ${}^3\text{H}$  是不同的核素, 但它们都是氢元素, 故把它们叫做同位素。

③ 同质异能素 两种核素若中子数和质子数都相同, 而仅仅是能量状态不同, 被称为同质异能素。例如  ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$  与  ${}^{99}\text{Tc}$  是同质异能素。

前已指出, 同一种元素的原子核可以有不同的结构, 但不是所有的结构都能稳定地存在。只有中子和质子在一定比例条件下结合所构成的原子核才能稳定存在。这个比例对氢核为 1:1, 对重核约为 1.5:1。不满足一定比例的核结构就不能稳定存在, 而会自发地转变为满足一定比例的原子核。人们分别把这两类原子核叫做稳定原子核和放射性原子核。放射性原子核在自发转变的同时有射线放出。

实验发现, 在 100 多种元素中, 凡原子序数在 83 以下的, 除镉、铷两种元素外, 其它每种元素都有一个或 n 个稳定同位素。但原子序数在 84 以上的元素则没有稳定的同位素。这些元素的所有原子核都具有放射性。例如作为重要核燃料的元素铀(原子序数为 92), 就有以下几种同位素。这些同位素都具有放射性。



从自然界的矿物中提炼而得的金属铀中, 只包含  ${}^{234}\text{U}$ 、 ${}^{235}\text{U}$ 、 ${}^{238}\text{U}$  三种天然的铀同位素。其它的铀同位素不是天然存在于自然界, 而是人工生产出来的。

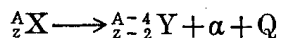
## 1.2.2 原子核蜕变

### 1.2.2.1 蜕变方式

前面已经提到, 如果核内中子数与质子数不满足一定比例, 原子核便不稳定。不稳定的原子核自发地发生转变并放出射线。这个过程叫做放射性蜕变或核蜕变。

各种放射性原子核的蜕变方式各不相同。不同形式的蜕变过程发射出不同的粒子。现在人们已经发现的蜕变方式有以下几种:

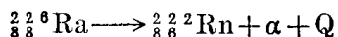
1.2.2.1.1  $\alpha$  蜕变 不稳定的原子核自发地从核内放射出  $\alpha$  粒子即氦原子核( ${}^4\text{He}$ )而变成另一个核的过程称为  $\alpha$  蜕变, 它可以用如下公式表示:



式中 X 是母核, Y 是子核,  $\alpha$  是  $\alpha$  粒子, Q 是蜕变过程中放出的能量, 大部分成为  $\alpha$  粒子的能量。

量度从核内放出的粒子的能量大多用兆电子伏特作单位, 记为 MeV。1MeV=1.6×10<sup>-13</sup>J。

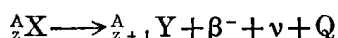
作  $\alpha$  蜕变的绝大部分是属于原子序数大于 83 的同位素。例如:



利用人工制成的某些低原子序数同位素也能放出  $\alpha$  粒子。例如： $^{148}_{48}\text{Cd}$  和  $^{148}_{62}\text{Sm}$  等。

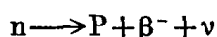
1.2.2.1.2  $\beta$  蜕变  $\beta$  蜕变包括三种类型的蜕变。① 由母核中放出负电子  $e^-$  的蜕变过程即  $\beta^-$  蜕变；② 由母核中放出正电子  $e^+$  的蜕变过程即  $\beta^+$  蜕变；③ 母核俘获了核外的一个电子的过程即电子俘获。这三种类型的蜕变过程中有许多规律是相同的，因而统称为  $\beta$  蜕变。

1)  $\beta^-$  蜕变  $\beta^-$  蜕变是指从核内放射出一个负电子  $e^-$  的过程。由于电子的质量比核的质量小得多，所以子核的质量数与母核相同，只有核电荷数比母核提高了一个单位。可用如下公式表示：



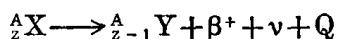
式中  $\nu$  称为中微子。是一种质量极小的中性粒子。它的质量至今还未测量出。

$\beta^-$  蜕变可以看成是母核中的一个中子转化为质子，同时放出  $\beta^-$  粒子和中微子的过程，即：

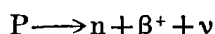


$\beta^-$  粒子和一般电子没有什么不同，只是为了表示它是从核里放出来的电子才称它为  $\beta^-$  粒子或  $\beta^-$  射线。

2)  $\beta^+$  蜕变  $\beta^+$  蜕变是指从母核中放出一个正电子  $e^+$  的过程。与  $\beta^-$  蜕变一样，可用如下公式表示：



所不同的是  $\beta^+$  蜕变可以看成是母核中的一个质子转化为中子，放出  $\beta^+$  粒子和中微子，即：

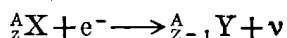


$\beta^+$  粒子就是正电子，质量和电子相等。但带一个单位正电荷。

3) 电子俘获 电子俘获是指原子核俘获了一个核外电子，而使核内的一个质子转化为中子和中微子：



整个核的蜕变过程可用如下公式表示：



和  $\beta^+$  蜕变一样，其结果使子核的原子序数比母核减少了一个单位。

因为核外电子分布在不同壳层上，而 k 层电子被俘获的几率最大，所以电子俘获又称 k 电子俘获。

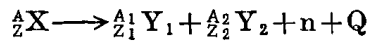
1.2.2.1.3  $\gamma$  蜕变 前面已经指出，原子核除了在组成上有差别以外，在能量状态上也有差别。能量最低的状态称基态，比基态能量高的状态称“激发态”。“激发态”又有第一激发态和第二激发态等。

如果原子核处在激发态的某个能级上，这种核状态也是不稳定的。它往往通过放出  $\gamma$  光子从激发态回到基态。这种变化过程称  $\gamma$  蜕变或  $\gamma$  跃迁。

许多放射性核在  $\alpha$  或  $\beta$  蜕变后，子核往往处于激发态，然后再向基态过渡，也就是出现  $\gamma$  跃迁。

在  $\gamma$  蜕变过程中，原子核的质量和原子序数都没有改变，仅仅是原子核的能量状态发生了改变。因而这种变化叫做同质异能跃迁。

1.2.2.1.4 裂变 除了上述三种方式可以改变子核的不稳定状态外,第四种改变原子核不稳定状态的方式称为裂变。它是由一个重核分裂成二个轻核的过程。这个过程可以用如下公式表示:



式中  ${}_Z^AX$  是母核,  ${}_{Z_1}^{A_1}Y_1$  和  ${}_{Z_2}^{A_2}Y_2$  是两个质量比母核轻得多的子核。 $n$  是裂变过程中放出来的中子, $Q$  是反应能。

### 1.2.2.2 放射性衰减规律

1.2.2.2.1 活度(放射性强度) 放射性核素会自发蜕变。量度这种蜕变快慢的量即蜕变率叫活度(以前叫放射性强度)。活度的 SI(国际制)单位是贝可(Bq),  $1\text{Bq} = 1$  次核蜕变/秒。

活度的专用单位曾是居里(Ci),  $1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10}\text{Bq}$

1.2.2.2.2 衰减规律和衰变常数 实验指出,一定量的放射性核素,其衰变成的子代产物是稳定核素的话,则其活度将逐渐下降。下降规律为每经过相同时间,活度减弱相同倍数(图 1-1)。例如,经过 1 小时活度减弱到原来的  $1/2$ , 再过 1 小时活度则减弱到原来的  $1/4$ 。这样的减弱规律在数学上称为指数规律。令  $I_0$  为原始活度。 $I_t$  为  $t$  时刻的活度,这个规律可用如下公式表示:

$$I_t = I_0 e^{-\lambda t}$$

式中  $e=2.718$ , 为自然对数的底。 $\lambda$  为衰变常数,是放射性核素的特征常数,反映该核素活度减弱的快慢,无论加热、冷却、高压、加磁场或电场都不能改变  $\lambda$  的大小。 $\lambda$  值愈大,核素的活度减弱愈快,反之则愈慢。

在实际应用中,常用半衰期  $T_{1/2}$  来表示各种核素活度减弱的快慢。半衰期是指放射性核素的活度减弱  $1/2$  所需经过的时间,它与衰变常数有如下关系:

$$T_{1/2} = 0.693/\lambda$$

显然  $T_{1/2}$  愈大,活度减弱愈慢,反之则愈快。

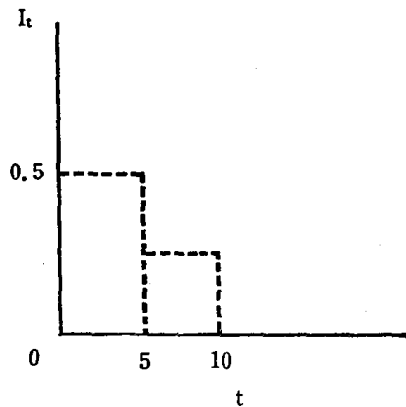


图 1-1 核素活度衰减规律

## 1.2.3 原子核辐射

从前面介绍可以看出,在所有的核蜕变过程中,都有一种或多种射线放出(即电离辐射)。它们可能是带电粒子,可能是光子,也可能是不带电粒子。表征核辐射特征的量一般是质量、电荷和能量。为了便于比较,现将  $\alpha$  粒子、 $\beta$  粒子、中子和  $\gamma$  光子的某些特征列表见表 1-1。

表 1-1 核辐射的某些特征

| 辐射类型     | 质量(u)                | 电荷(e)         | 能量(MeV)                    | 空气中的射程 (cm) |
|----------|----------------------|---------------|----------------------------|-------------|
| $\alpha$ | 4                    | $2^+$         | $10^*$                     | $10^*$      |
| $\beta$  | $5.5 \times 10^{-4}$ | $1^-, 1^+, 0$ | $0 \sim 10^*(\text{max})$  | $10^2$      |
| $n$      | 1                    | 0             | $0.025\text{eV} \sim 10^*$ |             |
| $\gamma$ | 0                    | 0             | $10^*$                     | $10^4$      |

注:  $u$  是原子质量单位,  $1u = 1.66 \times 10^{-27}\text{kg}$ ;  $e$  是电子的电荷,  $1e = 1.6022 \times 10^{-19}\text{C}$ (库仑)

## 1.3 核辐射与介质相互作用

所有核辐射在介质中通过时,都要和介质的原子核和核外电子相互作用。这种相互作用一般可分为带电粒子和不带电粒子两种情况。

### 1.3.1 带电粒子与物质相互作用

$\alpha$  和  $\beta$  粒子都是带电粒子,它们主要以三种形式与物质相互作用。

(1) 电离和激发 电离和激发是带电粒子和被通过的介质的原子的核外电子相互作用的结果。电离是指在带电粒子的作用下,核外束缚电子获得能量脱离原子而变成自由电子。同时中性原子因失去电子而变成离子的现象,这种同时产生的自由电子和离子称为离子对。带电粒子通过介质时在它经过的径迹周围可留下许多离子对。激发是指在带电粒子的作用下核外电子获得能量,由原来的能级跃迁到更高能级上去,使整个原子处于较高能量状态(即激发态)的现象。处于激发态的原子是不稳定的,它会自发地回到正常状态(即基态),并把多余的能量以光的形式释放出来(图 1-2)。

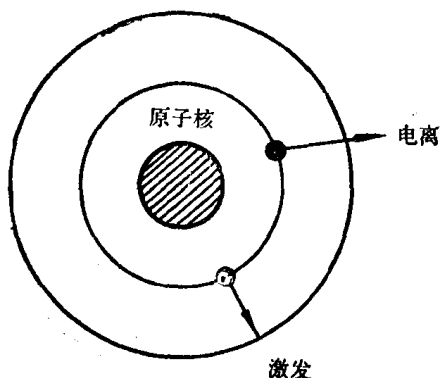


图 1-2 电离和激发示意图

(2) 弹性散射 弹性散射是带电粒子与被通过的介质的原子核发生相互作用的结果。在这种作用下,带电粒子只改变运动方向,不改变能量。方向改变的大小与带电粒子的质量有关。质量愈小,方向的改变则愈大。

(3) 韧致辐射 韧致辐射也是带电粒子与被通过的介质原子核相互作用的结果。在这种作用下,带电粒子突然减速,一部分动能转变为连续能谱的电磁辐射释放出来。这种作用随着粒子的能量增加而增大,与粒子的质量平方成反比,与被通过的介质的原子序数  $Z$  的平方成正比。

带电粒子在介质中通过,由于与介质相互作用耗尽了能量而最终停止下来。这种现象称为被介质吸收。

### 1.3.2 不带电粒子与介质相互作用

不带电粒子有  $\gamma$  光子和中子两种,它们与介质相互作用的情况也不相同。分别介绍如下。

#### 1.3.2.1 $\gamma$ 光子与介质相互作用

$\gamma$  光子是电磁辐射,是不带电荷的量子,没有质量。在介质中通过时主要以下列三个效应与介质发生作用。

(1) 光电效应 当  $\gamma$  光子与介质的原子相互作用时,整个光子被原子所吸收,其所有的能量交给原子中的一个电子。该电子获得能量后就离开原子而被发射出来,这种现象叫做光电效应。被发射出来的电子叫光电子。光电子能继续与介质相互作用。

(2) 康普顿散射 康普顿散射是光子与原子中最外层电子的一种非弹性碰撞。在这种

作用过程中,光子只将部分能量传递给核外电子,使该电子脱离核的束缚从原子中逸出。 $\gamma$ 光子本身则改变了运动的方向。被发射出来的电子称康普顿电子,能继续与物质发生相互作用。

(3) 电子偶效应 能量大于  $1.02\text{MeV}$  的  $\gamma$  光子在物质中通过时,可与原子核碰撞,转变成一个电子和一个正电子从原子中发射出来。这种现象叫做电子偶效应。被发射出来的电子和正电子也能继续与介质发生相互作用。

在  $\gamma$  光子通过的路程上,这三种效应都有一定的发生率。 $\gamma$  光子在物质中通过时由于上述三种效应,一方面产生光电子、康普顿电子和电子对等次级射线,让这些次级带电粒子继续与物质相互作用;另一方面  $\gamma$  光子本身的强度也随着所通过的物质的厚度增加而减弱,运动的方向也发生不同的改变。

### 1.3.2.2 中子与介质相互作用

中子与  $\gamma$  射线不同,中子只与介质的原子核发生作用。中子与核作用的结果是产生次级带电粒子,例如:  $\alpha$  粒子、质子、反冲核等。这些次级带电粒子都能进一步与介质相互作用。中子与介质的原子核相互作用过程可分为两种: 散射和吸收。

散射是指中子与介质的原子核相碰撞后,粒子的性质仍然不变,只改变粒子的方向和能量的过程。这种过程主要发生在快中子与机体组织相互作用中。

吸收是指中子与介质的原子核相碰撞后,粒子的性质发生了变化的过程。它们可以是中子俘获、核分裂或重核裂变。

当中子靠近原子核而被原子核俘获称中子俘获。俘获了中子的原子核处在激发状态,当它回到正常状态时,就能放出能量较高的  $\gamma$  射线(图 1-3)。例如氢俘获中子后变成氘的过程。

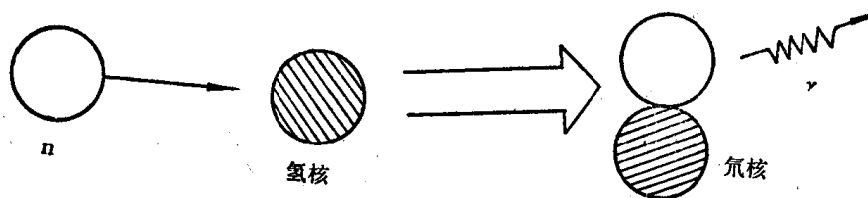


图 1-3 中子俘获示意图

核分裂是指原子核吸收中子后,放出  $\alpha$  粒子、质子或其它粒子,并蜕变成另一种原子核的过程。例如氮核吸收中子后的分裂(图 1-4)。

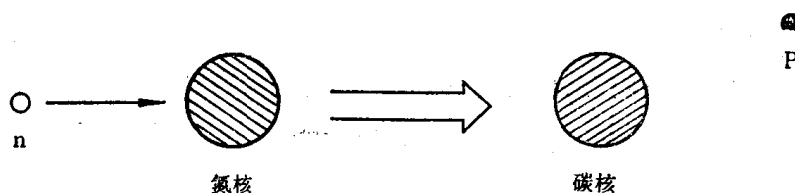


图 1-4 核分裂示意图

裂变是指重核吸收中子后分裂成大小大致相同的二个碎片,同时放出  $2\sim 3$  个中子的过程。慢中子与介质相互作用主要是吸收过程。例如  $^{235}\text{U}$  吸收中子后可分裂成各种裂变产



物,包括 30 多种元素和 200 多种放射性同位素。其中比较主要的是  $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{131}\text{I}$  和  $^{137}\text{Cs}$ 。

## 1.4 剂量学基础

电离辐射剂量学主要研究电离辐射的能量在物质中转移和吸收的规律。辐射剂量是辐射与介质相互作用的量度。在电离辐射领域中所涉及的包括辐射剂量在内一些物理量都叫辐射量。辐射量及其相应的量度单位相对于其它学科来说要新得多,只有 50 多年历史,而且在这期间,辐射量的概念、术语、名称及其单位又经历了一段不断进行修改并日趋完善的过程。使得同一名称的量在不同的时期往往有不同的意义,这造成在这个领域中量的使用十分混乱。当今最全面最系统阐述辐射量和单位的文献是 ICRU(国际辐射单位与测量委员会)的 33 号出版物,在这个出版物中总共定义 38 个辐射量,并明确规定采用国际单位制(SI制)。只有充分理解报告中提出的所有概念,才可避免在使用这些量时发生混乱。对生物效应来说,重要的辐射量是剂量。下面着重介绍几个剂量学常用的量。

### 1.4.1 相互作用的量度

电离辐射与物质相互作用,从某种意义上讲是一种能量传递过程。也就是辐射放出能量,物质吸收能量的过程。从物质吸收能量角度来量度相互作用大小的量称吸收剂量  $D$ 。

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm}$$

其中  $dm$  是吸收到能量的物质的质量。 $d\bar{\epsilon}$  是授予  $dm$  质量物质的平均能量(平均授予能)。

因为辐射授能量予物质是一随机过程,所以授予能  $\epsilon$  是一随机量,在定义中采用的平均能量是随机量  $\epsilon$  的期望值。

按定义可知吸收剂量  $D$  是电离辐射授予单位质量物质的平均授予能,电离辐射授予某一质量物质的平均能量愈多,则该物质的吸收剂量愈大。

吸收剂量的 SI 单位是焦耳每千克( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),取专名为“戈瑞”(Gray),以“Gy”表示。

吸收剂量为 1Gy,表示电离辐射授予每千克物质的平均能量是 1 焦耳(J)。历史上吸收剂量的专用单位曾用“拉德”,以“rad”表示。吸收剂量 1rad,表示电离辐射授予 1g 物质的平均能量是 10 $\mu\text{J}$ (微焦耳)。所以,

$$1\text{Gy} = 100\text{rad}$$

必须指出,吸收剂量适用于任何电离辐射和物质。在谈及吸收剂量时,必须说明是何物质的吸收剂量,由什么电离辐射授予。生物体的吸收剂量是决定生物效应的主要因素之一。

除了从物质吸收能量的角度,还可由辐射放出能量的角度来量度相互作用的大小,这个角度量度相互作用大小的量叫“比释动能” $K$ (Kerma),它的定义是:

$$K = \frac{d\bar{\epsilon}_{\text{tr}}}{dm}$$

其中  $dm$  是与不带电电离辐射发生相互作用的物质的质量。 $d\bar{\epsilon}_{\text{tr}}$  是不带电电离辐射转移给从  $dm$  物质中释出的次级带电粒子的平均能量(平均转移能)。 $\epsilon_{\text{tr}}$  称为转移能,也是一个随机量,故在定义中用的是它的期望值。

$K$  是不带电电离辐射在与单位质量物质相互作用时,转移给从物质中释出的次级带电