



# 放射医学

FANGSHE YIXUE

上

吉林医科大学

# 放 射 医 学

(附：常见职业病)

上 册

吉 林 医 科 大 学

一九七五年十二月

# 毛主席语录

列宁为什么说对资产阶级专政，这个问题要搞清楚。这个问题不搞清楚，就会变修正主义。要使全国知道。

思想上政治上的路线正确与否是决定一切的。

教育必须为无产阶级政治服务，必须同生产劳动相结合。

应当积极地预防和医治人民的疾病，推广人民的医药卫生事业。

备战、备荒、为人民。

团结起来，争取更大的胜利。

## 编 者 的 话

遵照毛主席“备战、备荒、为人民”的伟大教导，为了适应原子能科学事业的发展，及本专业工农兵学员在校自学和以后实际工作中提高的需要，我们编写了这本《放射医学》，做为参考书。它包括放射物理与辐射剂量学基础、放射化学基础、放射损伤基础、放射毒理、放射卫生防护、放射损伤临床等六篇内容。为便于厂矿医疗、工作中参考，将“常见职业病”做为附篇编入书内。

在编写过程中，得到有关厂矿和科研单位的大力支持和帮助，初稿又承蒙中国人民解放军后字59170部队和苏州医学院卫生系的同志们审阅，并提出宝贵意见，对此谨致谢意。

由于我们学习马列主义和毛主席著作不够，路线觉悟不高，业务水平有限，加之经验不足及时间仓促，书中定有不少欠妥或错误之处，恳切希望同志们批评指正。

# 目 录

## 第一篇 放射物理与辐射剂量基础

### 第一章 原子结构和原子核反应

|                   |   |                      |   |
|-------------------|---|----------------------|---|
| 一、原子结构.....       | 1 | 四、原子核反应.....         | 6 |
| 二、原子核结构.....      | 2 | (一)带电粒子引起的核反应.....   | 6 |
| 三、质能联系定律和结合能..... | 3 | (二)吸收慢中子而引起的核反应..... | 7 |
| (一)质能联系定律.....    | 3 | (三)快中子的核反应.....      | 7 |
| (二)结合能.....       | 4 | (四)高能光子照射的核反应.....   | 7 |

### 第二章 放射性核素的衰变种类和规律

|                       |    |                                           |    |
|-----------------------|----|-------------------------------------------|----|
| 一、放射性核素的衰变种类.....     | 8  | (三)半衰期 $T_{1/2}$ 与衰变常数 $\lambda$ 的关系..... | 13 |
| (一) $\alpha$ 衰变.....  | 8  | (四)放射性核素的活性及其单位.....                      | 13 |
| (二) $\beta$ 衰变.....   | 9  | 三、多代子体放射系.....                            | 14 |
| (三) $\beta^-$ 衰变..... | 10 | 四、放射性衰变的平衡.....                           | 17 |
| (四)电子俘获.....          | 10 | (一)久期平衡.....                              | 17 |
| (五) $\gamma$ 衰变.....  | 10 | (二)暂时平衡.....                              | 18 |
| 二、放射性核素的衰变规律.....     | 11 | (三)子体半衰期比母体半衰期<br>长的情况.....               | 20 |
| (一)半衰期.....           | 11 | 五、衰变公式应用举例.....                           | 21 |
| (二)衰变公式和衰变常数.....     | 12 |                                           |    |

### 第三章 电离辐射与物质的相互作用

|                             |    |                           |    |
|-----------------------------|----|---------------------------|----|
| 一、带电粒子与物质的相互作用.....         | 24 | (二)光电效应.....              | 31 |
| (一)电离和激发.....               | 24 | (三)康普顿—吴有训效应.....         | 32 |
| (二)弹性散射.....                | 25 | (四)电子对效应.....             | 33 |
| (三)韧致辐射.....                | 26 | (五) $\gamma$ 射线总衰减系数..... | 34 |
| (四)带电粒子的能量在物质中的转化.....      | 26 | 三、中子与物质的相互作用.....         | 36 |
| (五)带电粒子在物质中放射程.....         | 27 | (一)散射.....                | 36 |
| 二、 $\gamma$ 射线与物质的相互作用..... | 30 | (二)核反应.....               | 37 |
| (一)窄束 $\gamma$ 射线的减弱规律..... | 30 | (三)中子流通量率的减弱规律.....       | 38 |

### 第四章 辐射剂量学中的基本物理量和单位

|                             |    |                              |    |
|-----------------------------|----|------------------------------|----|
| 一、描述辐射场的物理量和单位.....         | 40 | 二、吸收剂量及其单位.....              | 41 |
| (一)粒子流通量 $\phi$ .....       | 40 | (一)给予能 $E$ .....             | 41 |
| (二)粒子流通量密度或通量率 $\Phi$ ..... | 40 | (二)吸收剂量 $D$ .....            | 42 |
| (三)能通量 $\psi$ .....         | 41 | (三)吸收剂量率 $\dot{D}$ 及其单位..... | 42 |
| (四)能通量密度或能通量率.....          | 41 | 三、科玛 K 及其单位.....             | 42 |

|                        |    |
|------------------------|----|
| (一) 科玛 K               | 42 |
| (二) 科玛率 $\dot{K}$      | 43 |
| (三) 带电粒子平衡             | 43 |
| (四) 科玛 K 与能通量之间的关系     | 44 |
| (五) 科玛 K 与吸收剂量 D 之间的关系 | 44 |
| (六) $\gamma$ 射线的吸收剂量   | 44 |
| 四、辐照剂量及其单位             | 45 |
| (一) 辐射量 X              | 45 |
| (二) 辐射率 $\dot{X}$      | 46 |
| (三) “伦琴”的能量当量          | 46 |

|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| (四) 伦(R)与 $\gamma$ (或 X) 射线<br>能通量( $\psi$ )之间的关系 | 46 |
| (五) 伦与拉德(rad)间的数值关系                               | 47 |
| 五、辐射防护中应用的辐射量和单位                                  | 48 |
| (一) 线能量转移(LET)                                    | 49 |
| (二) 相对生物效应(RBE)                                   | 49 |
| (三) RBE 剂量及其单位—雷姆(rem)                            | 49 |
| (四) 剂量当量及其单位                                      | 50 |
| (五) 周围环境辐射水平的表示方法——吸<br>收剂量指数 $D_i$ 和剂量当量指数 $H_i$ | 51 |

## 第五章 外照射剂量计算

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 一、 $\gamma$ 射线外照射剂量计算     | 52 |
| (一) 点状源                   | 52 |
| (二) 辐照率常数 $\Gamma$        | 52 |
| (三) $\gamma$ 当量           | 52 |
| (四) $\gamma$ 当量与辐照率常数间的关系 | 53 |
| (五) 点状 $\gamma$ 辐射源的辐照率计算 | 53 |
| (六) 非点状 $\gamma$ 辐射源辐照率计算 | 54 |
| 二、 $\beta$ 射线外照射吸收剂量的估算   | 56 |
| 三、中子剂量的计算                 | 58 |

## 第六章 内照射剂量当量的估算

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 一、内照射剂量当量估算中的<br>一些基本概念           | 60 |
| (一) 标准人                           | 60 |
| (二) 危象器官                          | 60 |
| (三) 有效半衰期                         | 60 |
| (四) 线质系数                          | 61 |
| (五) 相对危象器官                        | 61 |
| (六) 放射性衰变链因子                      | 61 |
| (七) 有效能量                          | 62 |
| 二、内照射剂量当量的估算方法                    | 63 |
| (一) 对内照射剂量当量估算的基本方法               | 63 |
| (二) 对连续摄入放射性核素时<br>内照射剂量当量的估算     | 64 |
| (三) 对连续吸入难溶性放射性核素<br>时肺部受照剂量当量的估算 | 67 |
| (四) 对单次摄入放射性核素时内照<br>射剂量当量的估算     | 67 |
| (五) 对食入放射性核素时胃肠道<br>内照射剂量当量的估算    | 69 |

## 第七章 射线探测

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 一、气体电离作用和电压的关系             | 74 |
| 二、盖革计数器的基本工作原理             | 75 |
| (一) 盖革计数器(G-M计数管)<br>的工作原理 | 75 |
| (二) 计数管的坪曲线                | 76 |
| (三) 计数管的基本特性               | 76 |
| 三、闪烁计数器                    | 77 |
| (一) 闪烁体的种类                 | 78 |
| (二) 光的收集和光导                | 79 |
| (三) 光电倍增管                  | 79 |
| (四) 辐射的探测                  | 80 |

## 第八章 辐射剂量的测量方法

|                     |    |
|---------------------|----|
| 一、辐照量——伦琴的绝对测量标准电离室 | 81 |
| (一) 标准电离室的结构原理      | 81 |
| (二) 对温度及压力的校正       | 82 |
| 二、有壁电离室             | 83 |

|                                    |                     |
|------------------------------------|---------------------|
| (一)理想有壁电离室.....83                  | 七、测量剂量的化学方法.....88  |
| (二)具有空气等效室壁的有壁电离室.....83           | (一)硫酸亚铁剂量计.....88   |
| (三)室壁厚度的影响.....84                  | (二)铈剂量计.....89      |
| 三、G—M计数管在 $\gamma$ 剂量测量中的应用.....84 | 八、测量剂量的其他方法.....89  |
| 四、闪烁计数器在剂量测量中的应用.....85            | (一)剂量玻璃个人剂量计.....89 |
| 五、测量剂量的胶片法.....86                  | (二)热致发光剂量计.....90   |
| 六、测量吸收剂量的量热法.....87                |                     |

## 第二篇 放射化学基础

### 绪 言

#### 第九章 放射化学实验的基础理论及其应用

|                        |                          |
|------------------------|--------------------------|
| 一、共沉淀现象及其应用.....93     | (二)离子交换树脂的性质.....99      |
| (一)几个基本概念.....93       | (三)离子交换法的基本原理.....100    |
| (二)共沉淀现象的分类及其形成.....94 | (四)离子交换法的操作程序.....101    |
| (三)共沉淀现象的应用.....95     | (五)影响离子交换分离的主要因素.....102 |
| 二、放射性胶体.....96         | (六)离子交换法的应用.....103      |
| (一)放射性胶体的概念及其特点.....96 | 四、萃取法及其应用.....104        |
| (二)放射性气溶胶.....97       | (一)萃取法的一般介绍.....104      |
| (三)研究放射性胶体的意义.....98   | (二)萃取过程中最适条件的选择.....105  |
| 三、离子交换法及其应用.....99     | (三)萃取法的应用.....106        |
| (一)离子交换法的概念和特点.....99  |                          |

#### 第十章 核燃料化学

|                          |                            |
|--------------------------|----------------------------|
| 一、铀的化学.....108           | (二)金属钍及主要钍化合物的化学性质.....119 |
| (一)铀矿物性质简介.....108       | (三)钍的分析化学.....121          |
| (二)金属铀及铀化合物的化学性质.....109 | 三、钷的化学.....122             |
| (三)铀的分析化学.....115        | (一)概况.....122              |
| 二、钍的化学.....118           | (二)金属钷及常见钷化合物的化学性质.....123 |
| (一)钍矿物性质简介.....119       | (三)微量钷的分析化学.....125        |

#### 第十一章 镧系元素的化学

|                        |                        |
|------------------------|------------------------|
| 一、镧的化学.....127         | 三、钐的化学.....130         |
| (一)概况.....127          | (一)概况.....130          |
| (二)镧及其化合物的化学性质.....127 | (二)主要钐化合物的化学性质.....130 |
| (三)镧的分析化学.....128      | (三)钐的测定.....130        |
| 二、铈的化学.....129         |                        |

## 第十二章 人工放射性核素的化学

|                  |     |                                                               |     |
|------------------|-----|---------------------------------------------------------------|-----|
| 一、放射性铯 .....     | 133 | (一)概况 .....                                                   | 137 |
| (一)化学性质 .....    | 133 | (二)主要化学性质 .....                                               | 138 |
| (二)分析化学 .....    | 134 | 四、放射性碳 <sup>14</sup> 、磷 <sup>32</sup> 和碘 <sup>131</sup> ..... | 140 |
| 二、放射性铊 .....     | 135 | (一)碳 <sup>14</sup> 的化学性质 .....                                | 140 |
| (一)化学性质 .....    | 135 | (二)磷 <sup>32</sup> 的化学性质 .....                                | 141 |
| (二)分析化学 .....    | 136 | (三)碘 <sup>131</sup> 的化学性质 .....                               | 142 |
| 三、稀土族放射性核素 ..... | 137 |                                                               |     |

## 第三篇 放射损伤基础

### 第十三章 电离辐射生物学作用的基本规律

|                          |     |                        |     |
|--------------------------|-----|------------------------|-----|
| 一、电离辐射的种类及其生物学效应 .....   | 144 | (六)照射方式 .....          | 150 |
| 三、影响电离辐射生物学效应的主要因素 ..... | 145 | 三、辐射敏感性 .....          | 150 |
| (一)剂量 .....              | 145 | (一)剂量发生过程中的辐射敏感性 ..... | 151 |
| (二)剂量率 .....             | 147 | (二)个体发生过程中的辐射敏感性 ..... | 151 |
| (三)分次照射 .....            | 149 | (三)各种不同器官、组织和细胞        |     |
| (四)照射部位 .....            | 149 | 的辐射敏感性 .....           | 152 |
| (五)照射面积 .....            | 150 |                        |     |

### 第十四章 电离辐射生物学作用的机理

|                         |     |                        |     |
|-------------------------|-----|------------------------|-----|
| 一、电离和激发 .....           | 154 | 1. 间期死亡 .....          | 162 |
| 二、直接作用和间接作用 .....       | 155 | 2. 生殖死亡 .....          | 164 |
| (一)直接作用 .....           | 156 | 四、辐射原发作用机理的几种学说 .....  | 165 |
| (二)间接作用 .....           | 156 | (一)硫氢基学说 .....         | 165 |
| 1. 稀释效应 .....           | 157 | (二)膜学说 .....           | 166 |
| 2. 氧效应 .....            | 157 | (三)靶学说 .....           | 166 |
| 3. 防护效应 .....           | 158 | (四)链锁反应学说 .....        | 167 |
| 4. 温度效应 .....           | 159 | (五)结构代谢学说 .....        | 168 |
| (三)直接作用和间接作用的相对效应 ..... | 159 | 五、高等动物机体放射病的发病机理 ..... | 168 |
| 三、细胞效应 .....            | 160 | (一)病理过程发展中的相互联系 .....  | 169 |
| (一)辐射对细胞的即刻效应 .....     | 160 | (二)病理过程中损伤和抗损伤反应 ..... | 170 |
| (二)巨细胞形成 .....          | 161 | (三)病理过程发展中的主导环节 .....  | 171 |
| (三)细胞死亡 .....           | 161 |                        |     |

### 第十五章 电离辐射对物质代谢的影响

|                      |     |                         |     |
|----------------------|-----|-------------------------|-----|
| 一、电离辐射对能量代谢的影响 ..... | 172 | (二)细胞核氧化磷酸化抑制 .....     | 174 |
| (一)线粒体氧化磷酸化抑制 .....  | 173 | (三)能量代谢障碍的原因与影响因素 ..... | 175 |

|                          |     |                        |     |
|--------------------------|-----|------------------------|-----|
| (四)能量代谢障碍的后果 .....       | 178 | (二)蛋白质合成代谢障碍 .....     | 190 |
| 二、电离辐射对核蛋白与核酸代谢的影响 ..... | 179 | (三)血清(浆)蛋白的改变 .....    | 191 |
| (一)脱氧核糖核蛋白与脱氧核糖核         |     | 四、电离辐射对酶代谢的影响 .....    | 192 |
| 酸的结构改变和分解代谢增强 .....      | 180 | (一)糖元的生成、异生及           |     |
| 1. 脱氧核糖核蛋白的结构破坏 .....    | 180 | 分解作用的改变 .....          | 193 |
| 2. 脱氧核糖核酸解聚 .....        | 180 | (二)糖的分解作用的变化 .....     | 193 |
| 3. 脱氧核糖核酸代谢增强 .....      | 182 | 五、电离辐射对脂肪代谢的影响 .....   | 194 |
| (二)脱氧核糖核酸的生物合成抑制 .....   | 184 | (一)组织器官和血液内脂类的改变 ..... | 194 |
| 三、电离辐射对蛋白质代谢的影响 .....    | 187 | (二)脂类代谢改变的机理 .....     | 195 |
| (一)蛋白质分解代谢加强 .....       | 187 |                        |     |

## 第十六章 电离辐射对机体各系统的影响

|                          |     |                          |     |
|--------------------------|-----|--------------------------|-----|
| 一、神经系统 .....             | 196 | (二)慢性放射病时造血血液系统的变化 ..... | 227 |
| (一)神经系统的机能变化 .....       | 196 | 1. 造血器官的变化 .....         | 227 |
| (二)神经系统的生化变化 .....       | 200 | 2. 外周血有形成分的变化 .....      | 228 |
| (三)神经系统的形态变化 .....       | 200 | 四、消化系统 .....             | 230 |
| (四)小剂量慢性照射对神经系统的影响 ..... | 201 | (一)消化道的结构、机能与辐射敏感性 ..... | 230 |
| (五)特大剂量辐射对神经系统的影响 .....  | 202 | (二)急性慢性放射病时口腔粘膜的变化 ..... | 231 |
| 二、内分泌系统 .....            | 202 | (三)胃的变化 .....            | 232 |
| (一)垂体 .....              | 202 | (四)肠的变化 .....            | 233 |
| (二)肾上腺 .....             | 203 | (五)肝的变化 .....            | 234 |
| (三)性腺 .....              | 208 | (六)胰腺的变化 .....           | 235 |
| (四)甲状腺 .....             | 210 | (七)消化系统变化的发生机理及其意义 ..... | 235 |
| 三、造血血液系统 .....           | 211 | 五、呼吸系统的变化 .....          | 236 |
| (一)急性放射病时造血血液系统的变化 ..... | 211 | (一)急性放射病时肺的变化 .....      | 236 |
| 1. 造血器官的正常结构与功能 .....    | 213 | (二)慢性放射病时肺的变化 .....      | 237 |
| 2. 急性放射病初期造血             |     | 六、心血管系统的变化 .....         | 238 |
| 器官的变化 .....              | 214 | (一)心脏的变化 .....           | 238 |
| 3. 极期时造血器官的变化 .....      | 216 | (二)血管的变化 .....           | 239 |
| 4. 恢复期时造血器官的变化 .....     | 218 | (三)血压的变化 .....           | 239 |
| 5. 急性放射病时外周血             |     | 七、泌尿系统的变化 .....          | 240 |
| 有形成分的变化 .....            | 219 | 六、其他 .....               | 240 |
| 6. 造血器官变化与外周             |     | (一)眼的变化 .....            | 240 |
| 血细胞变化的关系 .....           | 225 | (二)皮肤及其附属器的变化 .....      | 241 |
| 7. 造血血液系统在机体抗辐射          |     | (三)骨组织的变化 .....          | 243 |
| 损伤和恢复中的作用 .....          | 226 |                          |     |

## 第十七章 电离辐射作用所致出血综合症

|                       |     |                      |     |
|-----------------------|-----|----------------------|-----|
| 一、出血综合症的一般特征 .....    | 244 | 三、出血综合症的发病机理 .....   | 246 |
| 二、出血对放射病临床经过的影响 ..... | 245 | (一)血小板变化的发病学作用 ..... | 246 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 1. 血小板数量的变化 .....        | 246 |
| 2. 血小板质量的变化 .....        | 246 |
| 3. 血小板变化与凝血障碍 .....      | 247 |
| 4. 血小板变化与血管壁功能障碍 .....   | 247 |
| 5. 血小板变化与5-羟色胺代谢障碍 ..... | 248 |

|                     |     |
|---------------------|-----|
| (二)其他因素的发病学作用 ..... | 248 |
| 1. 血管壁的辐射损伤 .....   | 248 |
| 2. 凝血因子 .....       | 248 |
| 3. 肝素血症 .....       | 248 |
| 4. 感染和自身免疫 .....    | 249 |

## 第十八章 电离辐射对传染和免疫的影响

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 一、放射病的感染并发症 .....       | 250 |
| (一)内源性感染(自身感染)的特征 ..... | 250 |
| 1. 细菌种类 .....           | 250 |
| 2. 入侵部位 .....           | 250 |
| 3. 局部反应特点 .....         | 250 |
| 4. 发展时相 .....           | 250 |
| (二)外源性感染的特征 .....       | 251 |
| 1. 受照射机体对感染的敏感性 .....   | 251 |
| 2. 受照射机体传染过程的特点 .....   | 251 |
| (三)感染并发症的发生机理 .....     | 253 |
| 二、电离辐射对免疫功能的影响 .....    | 254 |
| (一)非特异性免疫 .....         | 254 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 1. 皮肤粘膜屏障 .....                  | 255 |
| 2. 炎症反应 .....                    | 255 |
| 3. 吞噬作用 .....                    | 256 |
| 4. 网状内皮系统 .....                  | 257 |
| 5. 非特异性体液因子 .....                | 258 |
| (二)特异性免疫 .....                   | 258 |
| 1. 抗体形成 .....                    | 258 |
| 2. 细胞免疫 .....                    | 261 |
| 3. 免疫耐受性和自身免疫 .....              | 262 |
| 4. 辐射致癌和治癌的免疫学 .....             | 263 |
| 5. 照射条件及其他因素<br>对免疫功能变化的影响 ..... | 264 |

## 第十九章 电离辐射所致染色体畸变

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 一、染色体概述 .....         | 266 |
| (一)细胞分裂 .....         | 267 |
| (二)染色体的化学组成 .....     | 268 |
| (三)染色体的形态特征 .....     | 269 |
| (四)染色体的命名与核型分析 .....  | 270 |
| 二、染色体畸变发生的机理与类型 ..... | 272 |
| (一)畸变发生的机理 .....      | 272 |
| (二)畸变的类型与识别 .....     | 273 |
| 1. 染色体型畸变 .....       | 274 |
| 2. 染色单体型畸变 .....      | 276 |
| 3. 半染色单体型畸变 .....     | 277 |
| 4. 非染色质损伤 .....       | 277 |
| 三、染色体畸变与剂量的关系 .....   | 278 |
| (一)染色体畸变作为生物剂量计       |     |

|                                           |     |
|-------------------------------------------|-----|
| 的依据 .....                                 | 278 |
| (二)离体照射和整体照射畸变率的比较 .....                  | 279 |
| (三)局部照射和整体照射畸变率的比较 .....                  | 279 |
| (四)剂量——效应关系 .....                         | 280 |
| 1. 天然本底辐射的畸变率 .....                       | 280 |
| 2. 稀疏电离辐射(低LET辐射) .....                   | 280 |
| 3. 密集电离辐射(高LET辐射) .....                   | 281 |
| 4. 慢性照射和间隔照射 .....                        | 281 |
| (五)染色体畸变用来监测放射性损伤<br>和作为生物剂量计所存在的问题 ..... | 281 |
| 四、辐射所致染色体畸变的生物学意义 .....                   | 282 |
| (一)关于体细胞染色体畸变的意义 .....                    | 282 |
| (二)染色体畸变和肿瘤发生的关系 .....                    | 283 |
| (三)染色体畸变与遗传的关系 .....                      | 283 |

## 附 录

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 附表1 标准人的器官 .....  | 284 |
| 附表2 有效能量 .....    | 284 |
| 附表3 标准人的肺模型 ..... | 286 |
| 附表4 生物和物理常数 ..... | 287 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 附表5 某些放射性核素在体内的最大<br>容许积存量 ..... | 288 |
| 附表6 常用 $\gamma$ 放射性核素 .....      | 289 |
| 附表7 $e^{-\lambda t}$ 函数表 .....   | 297 |

# 第一篇 放射物理 辐射剂量基础

## 第一章 原子结构和原子核反应

“对立统一的规律是宇宙的根本规律。”原子和原子核虽小，但都是由基本粒子组成，并且是相互矛盾而统一存在的。例如，原子核和核外电子，核内的中子和质子，质子和质子之间等等，都是对立统一的。本章就是阐明原子和原子核组成的对立统一的规律性，以及原子核在外因作用下所引起的核反应。

### 一 原子结构

地球上所有的物质都是由一些不同的元素所组成。自然界存在的 92 种元素中，最轻的元素是氢，最重的元素是铀。构成某一元素的最基本的单位叫做该元素的原子。

原子是很微小的粒子，它的直径只有  $10^{-8}$  厘米左右。原子的质量也很微小，一个氢原子的质量只有  $1.6733 \times 10^{-24}$  克。自然界中最重的铀原子的重量也不过是  $3.951 \times 10^{-22}$  克。

不同元素的原子虽然具有不同的性质，但是它们的结构都是十分相似的。在原子的中心有一个带正电荷的原子核，简称为核。原子核周围有带负电荷的电子按照一定的轨道绕核运行。所以原子是由原子核和绕行电子所构成。一个电子所带电荷的电量为  $4.8028 \times 10^{-10}$  静电单位，通常用字母  $e$  来表示。原子核所带正电荷的数量恰好等于所有绕核运行电子所带负电荷的数量，即等于  $Ze$ （其中  $Z$  为该原子的原子序数），因此原子呈中性。例如，铀的原子序数为  $Z = 92$ ，它有 92 个绕行电子，它的核带有  $92e$  正电荷。

原子核的质量比起电子的质量大得多，实际上，原子核的质量几乎等于原子的质量。例如，最轻的氢原子核的质量为  $1.67243 \times 10^{-24}$  克，而它的绕行电子的质量为  $9.1085 \times 10^{-28}$  克，两者之比为：

$$\frac{\text{电子质量}}{\text{氢核质量}} = \frac{9.1085 \times 10^{-28} \text{克}}{1.6724 \times 10^{-24} \text{克}} = \frac{1}{1836}$$

原子序数大的元素，这个比值还要小些，因此，原子核的质量几乎等于该原子的原子量  $A$ 。

原子核的直径在  $10^{-13} \sim 10^{-12}$  厘米之间，而原子的直径在  $10^{-8}$  厘米左右，可见原子核和它的绕行电子之间，有很大一部分空间是空虚的，而核仅占有整个原子的极小的一部分空间。

原子核周围的电子都有一定的轨道，这些轨道分成好几层，每一层中都有几个轨道，每个轨道上最多只能有一个电子。最靠近核的是 K 壳层，它有两个轨道，所以最多只能有两个

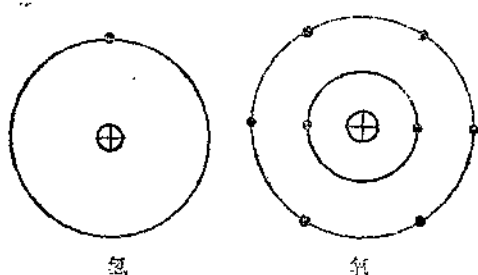


图1—1 氢和氧元素的原子结构示意图

电子。其次是L壳层，它有两个支壳层，第一支壳层只有两个轨道，第二支壳层有六个轨道，所以L壳层最多只能容有八个电子。第三层为M壳层，它有三个支壳层，18个轨道，所以最多只能容有18个电子。越往外面，可以容纳的电子就越多，但最外面一层却有严格的限制，最多只能容纳8个电子，图1—1是两种元素的原子结构示意图。

通常，壳层里可以容有的最大电子数目可用  $2n^2$  来表示。其中  $n=1$  代表K壳层， $n=2$  代表L壳层，其余以此类推。在某一轨道上的电子具有一定的能量。K壳层轨道上的电子能量最低，越往外层轨道上的电子能量越高。电子可以吸收外来的能量而从能量较低的轨道跃迁到能量较高的轨道，这种现象叫做原子的激发。如果外来的能量较大，使得轨道上的电子脱离原子核的吸引力而自由运动，则叫做电离或游离。反之，当电子从能量较高的外层轨道跃迁到能量较低的内层轨道时，电子将多余的能量以电磁波(光子)的形式辐射出来。电磁波的波长  $\lambda$  和两个轨道能级差的关系可用下式来表示：

$$\frac{hc}{\lambda} = E_n - E_{n'} \quad 1-1$$

式中  $h = 6.6252 \times 10^{-27}$  尔格·秒，称为普朗克常数。 $c = 2.99793 \times 10^{10}$  厘米/秒(通常用  $c = 3 \times 10^{10}$  厘米/秒)，是光在真空中的速度。 $E_n$  和  $E_{n'}$  分别代表电子在  $n$  和  $n'$  壳层中的能量。从式(1—1)可以看出，电子从一个轨道跃迁到另一个轨道时所放出的电磁波的波长是具有固定的值的。原子中电子的这种跃迁产生的光谱叫做原子光谱。

在原子光谱中，光谱可分为两类。第一，价电子在外部壳层各轨道间跃迁时所产生的光谱称为光学光谱。例如，设价电子原来位于N壳层，则当价电子在N, O, P, ……等外壳层间跃迁时，就产生光学光谱。当价电子作上述跃迁时，电子的能量变化较小，发生光子的频率较低，波长较长，一般在可见光区或其附近。第二，内层电子改变轨道时所产生的光谱称为标识伦琴射线光谱。这类电子跃迁时，电子的能量变化较大，发生光子的频率较高，就是伦琴射线谱中的标识射线部分。

## 二 原子核结构

原子核是由质子和中子所组成。有时把质子和中子统称核子。质子带正电荷，其所带正电荷与电子所带的负电荷大小相等，符号相反。所以原子中的电子数和原子核内的质子数是相等的。中子是不带电荷的中性粒子。质子的质量为  $1.6724 \times 10^{-24}$  克，中子的质量为  $1.6747 \times 10^{-24}$  克，可见质子和中子的质量相差不多。原子核内质子和中子数的总和叫做原子质量数，用  $A$  来表示：

$$A = Z + N \quad 1-2$$

式中  $Z$  表示质子数，即原子序数， $N$  表示中子数。

各种原子的原子核是不同的，它们的基本区别是组成核的中子数和质子数不同。每个元素的原子核都是有一定数目的中子和质子。例如： ${}^4_2\text{He}$  是由 2 个质子和  $4-2=2$  个中子组成。 ${}^{235}_{92}\text{U}$  是由 92 个质子和  $235-92=143$  个中子所组成。

凡是原子序数  $Z$  相同，而原子质量数  $A$  不同的元素，在元素周期表上占有同一位置，因此叫做同位素。通常用符号  ${}_Z^AX$  表示同位素，其中  $X$  代表元素的符号， $Z$  为原子序数， $A$  为原子质量数。例如， ${}_1^1\text{H}$ 、 ${}_1^2\text{H}$  和  ${}_1^3\text{H}$  都是氢的同位素； ${}^{235}_{92}\text{U}$  和  ${}^{238}_{92}\text{U}$  是铀的同位素。凡是  $A$  相同而  $Z$  不同的元素叫做同量异位素。例如： ${}_1^3\text{H}$  和  ${}_2^3\text{He}$ ； ${}_3^7\text{Li}$  和  ${}_5^7\text{B}$  等。凡是  $A-Z$  相同的如： ${}_5^{11}\text{B}$ ， ${}_6^{12}\text{C}$ ，和  ${}_7^{13}\text{N}$ ； ${}_{19}^{39}\text{K}$ ， ${}_{20}^{40}\text{Ca}$  和  ${}_{18}^{40}\text{Ar}$  等则称为同中子异位素。 $A$  和  $Z$  都相同，但核处于不同能级的元素叫做同质异能素。例如， ${}_{47}^{110}\text{Ag}$  和  ${}_{47}^{110}\text{Ag}^*$ ， ${}_{55}^{115}\text{Tm}$  和  ${}_{55}^{115}\text{Tm}^*$  等，其中  $*$  表示处于高能级状态。无  $*$  者为表示处于低能级状态。目前，多将放射性同位素称为放射性核素。

原子核与原子一样，也具有很多能级，最低能级叫做基级，用 0 来表示。表示激发能级的横线与基级线的距离是和它们的能量差成正比（通常用兆电子伏表示）。离基级线最近的代表第一激发能级，其次是第二、第三、……等激发能级。各种同位素的核能级是不同的。图 1—2 表示  ${}^{13}_6\text{C}$  和  ${}^{13}_7\text{N}$  的核能级。

在正常情况下，核都是处在基态（即核的能级在基级）。只有在核反应过程中，核衰变过程中，以及裂变产物中，核有可能处于激发态。处在激发态的核一般不能停留很久，它将迅速地跃迁到基级或先跃迁到较低的能级，而后再跃迁到基级，并同时放射出  $\gamma$  射线（有的是放射出别的粒子而转变成另一种同位素）。它所放射出来的  $\gamma$  射线的能量等于两个能级间的能量差。有少数的同位素在它们从激发态跃迁到基态的过程中可能在某一激发态停留较长时间，对此种激发态称为亚稳态。

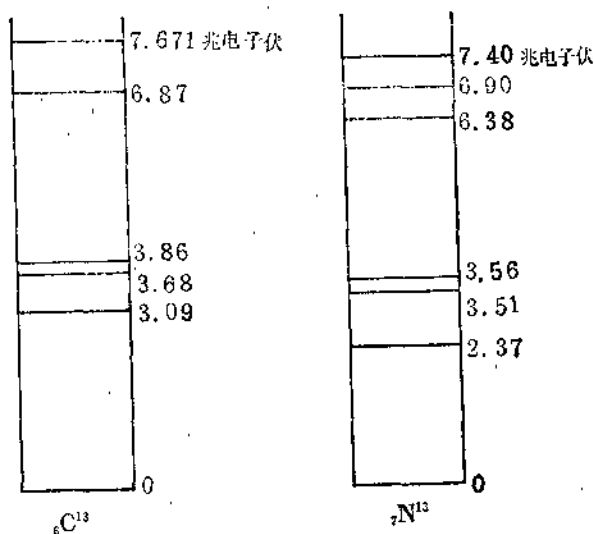


图 1—2 碳 $^{13}$ 和氮 $^{13}$ 的原子核能级图

在这图里碳 $^{13}$ 和氮 $^{13}$ 的基级画在同一条水平线上，实际上碳 $^{13}$ 的基级要比氮 $^{13}$ 的基级低 2.29 兆伏特。

### 三 质能联系定律和结合能

#### （一）质能联系定律

原子和原子核的质量都是非常小的，若用克表示其绝对质量，小数点后要写二十几个零，这是很不方便的。因此，通常用另一种单位来表示原子和原子核的质量，即用原子质量单位

(amu)表示。一九六一年以前,是以氧<sup>16</sup>的原子质量的1/16作为一个原子质量单位。在一九六一年国际原子量委员会会议规定以碳<sup>12</sup>原子质量的1/12作为一个原子质量单位。这个新的标准制—碳单位,比氧单位要大一点点,以前的氧单位物理原子量约减少1/1000300。通过计算可知,一个原子质量单位是等于 $1.66039 \times 10^{-24}$ 克。

质量和能量是物质必具的属性。任何物体都同时具有一定的质量和能量。并且两者之间存在以下相互联系的关系:

$$E = mc^2 \text{ 或 } m = \frac{E}{c^2} \quad 1-3$$

式中E为物体的能量,以尔格表示;  $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$ 。  $m_0$ 为该物体静止( $v=0$ )时的质量;

m为该物体的运动速度为v时所具有的质量,以克表示;c为光速,等于 $3 \times 10^{10}$ 厘米/秒。式1-3就是质能联系定律。它表示任何具有m克质量的物体,一定具有 $mc^2$ 尔格的能量;如果物体的质量改变,则该物体的能量也随着按正比的关系发生改变,反之亦然。这种相互关系可用下式表示:

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

即使是任何一个很小的质量都与很大的能量相联系。例如,与一克质量相联系着的能量为:

$$\begin{aligned} E &= 1 \text{ 克} \times (3 \times 10^{10} \text{ 厘米/秒})^2 \\ &= 9 \times 10^{20} \text{ 尔格} \\ &= 9 \times 10^{13} \text{ 焦耳} \\ &= 2.15 \times 10^{10} \text{ 千卡} \end{aligned}$$

该数等于燃烧2700吨优质煤所得的热量。

在原子核物理学中,以尔格表示的能量单位嫌太大,常以电子伏(ev表示)作为能量单位。1个电子在电位差为1伏特的电场中从阴极飞到阳极时所获得的能量叫做1电子伏。我们把 $10^6$ 电子伏(ev)叫做1兆电子伏(Mev)。一个电子所带的电荷为 $4.8 \times 10^{-10}$ 静电单位,1伏特的电位差等于 $\frac{1}{300}$ 静电单位,故

$$\begin{aligned} 1 \text{ 电子伏} &= 4.8 \times 10^{-10} \text{ 静电单位(电荷)} \\ &\quad \times \frac{1}{300} \text{ 静电单位(电位差)} \\ &= 1.6 \times 10^{-12} \text{ 尔格} \end{aligned}$$

利用克与尔格之间的这种关系,原子质量单位,尔格及兆电子伏之间的关系不难求出:

$$1 \text{ 原子质量单位(相应的能量)} = 931.252 \text{ 兆电子伏}.$$

由此可知,用兆电子伏作为质量的单位也是可以的。我们常常用0.511兆电子伏,938.26兆电子伏作为电子和质子的质量。

## (二) 结合能

如果把原子的质量和构成该原子的基本粒子(中子、质子和电子)的质量加以比较时,就可以发现原子质量都比组成它们基本粒子的质量总和为小,我们称这个差值为质量亏损。例

如, 由一个中子、一个质子和一个电子组成  ${}_1\text{H}^2$  原子, 其质量  $m_{{}_1\text{H}^2} = 2.01473$  原子质量单位, 而  $m_n + m_p + m_e = 2.01712$  原子质量单位。所以

$$\begin{aligned}\Delta m &= m_{{}_1\text{H}^2} - (m_n + m_p + m_e) \\ &= 2.01473 \text{ 原子质量单位} - 2.01712 \text{ 原子质量单位} \\ &= -0.00239 \text{ 原子质量单位}\end{aligned}$$

即  ${}_1\text{H}^2$  原子的质量亏损为  $-0.00239$  原子质量单位。与该质量亏损的值相联系的能量等于  $0.00239 \times 931.14$  兆电子伏  $= 2.225$  兆电子伏。这是当自由存在的单个核子相互靠近而构成原子核时所释放出的能量, 这种能量称为结合能。显然, 该结合能包括中子和质子结合成核的结合能以及核和核外电子相结合成原子的结合能。由于核和核外电子的结合能比核子之间的结合能小几个数量级, 因而上面计算得出的结合能可视为核的结合能 (或称原子能)。

某些核素原子核的总结合能和一个核子的平均结合能列于表 1-1。

表 1-1 某些核素原子核的总结合能和一个核子的平均结合能

| 核素                          | 质量数 (A) | 总结合能 $A\text{mc}^2$<br>(Mev) | 平均结合能 $\frac{A\text{mc}^2}{A}$<br>(Mev) |
|-----------------------------|---------|------------------------------|-----------------------------------------|
| 氘 ${}_1\text{H}^2$          | 2       | 2.18                         | 1.09                                    |
| 氚 ${}_1\text{H}^3$          | 3       | 8.33                         | 2.78                                    |
| 氦 ${}_2\text{He}^3$         | 3       | 7.60                         | 2.53                                    |
| 氦 ${}_2\text{He}^4$         | 4       | 28.21                        | 7.05                                    |
| 锂 ${}_3\text{Li}^6$         | 6       | 31.81                        | 5.30                                    |
| 锂 ${}_3\text{Li}^7$         | 7       | 38.98                        | 5.57                                    |
| 铍 ${}_4\text{Be}^9$         | 9       | 57.80                        | 6.42                                    |
| 硼 ${}_5\text{B}^{10}$       | 10      | 64.29                        | 6.43                                    |
| 碳 ${}_6\text{C}^{12}$       | 12      | 91.66                        | 7.64                                    |
| 碳 ${}_6\text{C}^{13}$       | 13      | 96.54                        | 7.43                                    |
| 氮 ${}_7\text{N}^{14}$       | 14      | 104.10                       | 7.44                                    |
| 氮 ${}_7\text{N}^{15}$       | 15      | 114.85                       | 7.66                                    |
| 氧 ${}_8\text{O}^{16}$       | 16      | 126.96                       | 7.94                                    |
| 氟 ${}_9\text{F}^{19}$       | 19      | 146.95                       | 7.73                                    |
| 氖 ${}_{10}\text{Ne}^{20}$   | 20      | 159.85                       | 7.99                                    |
| 钠 ${}_{11}\text{Na}^{23}$   | 23      | 186.44                       | 8.11                                    |
| 镁 ${}_{12}\text{Mg}^{24}$   | 24      | 197.52                       | 8.23                                    |
| 铁 ${}_{26}\text{Fe}^{56}$   | 56      | 486.08                       | 8.68                                    |
| 从锌 ${}_{30}\text{Zn}^{64}$  | 64      | —                            | 8.6                                     |
| 到锡 ${}_{50}\text{Sn}^{120}$ | 120     | —                            | —                                       |
| 铀 ${}_{92}\text{U}^{235}$   | 235     | 1783                         | 7.57                                    |
| 铀 ${}_{92}\text{U}^{238}$   | 238     | 1780                         | 7.48                                    |

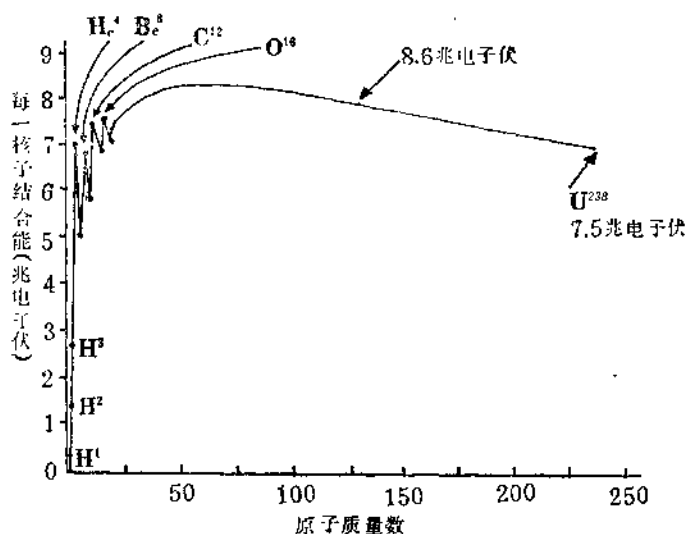


图 1—3 每一个核子结合能和原子质量数的关系

每一核子的结合能和原子质量数的关系如图1—3所示。

从表 1—1 和图 1—3 可见平均结合能是随原子质量数  $A$  增加而迅速增加，当原子质量数从  $A = 40$ ，至  $A = 120$  时，平均结合能达到最大值，从  $A > 120$  (即重原子核) 时又开始减少。如果使平均结合能小的原子核转变成平均结合能大的原子核，就可放出能量。因此重核裂变或轻核聚变都可释放出大量的结合能。

**1. 重核的裂变：**1938 年科学家们发现铀<sup>235</sup> 受到慢中子的轰击后分裂成为两个较轻的碎

片。它们是具有中等原子量的两种原子核。铀<sup>235</sup> 分裂时放出 1—3 个次级中子。这些中子慢化后又能引起 2—3 个铀<sup>235</sup> 核的分裂，如此继续下去，分裂核的数目像雪崩似地增加，可在瞬间内放出巨大的能量。瞬间内这种自动连续反应的过程，称为“链式反应”。

重原子核的这种链式反应只有在一定的条件下才能发生，为了使链式反应不致于减弱，必须保证链式反应增殖因素  $K$  (即核分裂时释放的中子所引起新的核分裂的平均数) 不小于 1。当  $K < 1$  时，链式反应将逐渐地减弱；当  $K = 1$  时，链式反应将等速地进行；当  $K > 1$  时，链式反应越来越激烈，单位时间内核的分裂次数不断增加，即具有爆炸的性质。这种反应实际上就是原子爆炸。

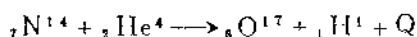
**2. 轻核的聚变：**两个或数个轻的核聚合成一个较重的核，例如， ${}_1\text{H}^2$  和  ${}_1\text{H}^3$  相互作用可以产生核反应生成氦<sup>4</sup> 和中子并释放出大量能量。这种反应只有在温度极高时 (大于一百万度) 才会发生。这种反应称做聚变，或称热核反应。

## 四 原子核反应

原子核由于受到外来因素的影响，而使其结构发生改变的现象叫做原子核反应。它和化学反应是不同的。化学反应是只能引起原子和原子之间的结合或分解，原子外层的电子的位置和运动发生变化，而核反应是外来因素 (即外来粒子) 和核里面的质子和中子等相互起作用，使原子核受到激烈扰动，而发生其结构的改变。产生核反应的方法很多，下面只作简单介绍。

### (一) 带电粒子引起的核反应

用 RaC 放射出来的  $\alpha$  粒子去轰击氮原子时，可以产生核反应，而放出氧<sup>17</sup> 和质子，其反应方程式为：



式中 ${}_2\text{He}^4$ 、 ${}_1\text{H}^1$ 和 $Q$ 分别代表氦、质子和反应能量。上式反应中 $Q = -1.198$ 兆电子伏，负号表示该反应是吸收能量。这种方程式也可以简写作 ${}_7\text{N}^{14}(\alpha, p){}_8\text{O}^{17}$ ，称 $\alpha$ - $p$ 反应。

用加速质子去轰击硼 ${}^{10}_{10}\text{B}$ 时可以放出铍 ${}^7_4\text{Be}$ 和氦 ${}^4_2\text{He}$ 。其反应方程式为：

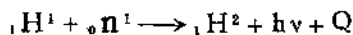


式中 $Q = 1.147$ 兆电子伏为反应能量，正号表示该反应是放出能量。

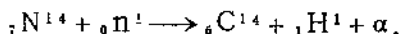
## (二) 吸收慢中子而引起的核反应

通常根据中子所带有的能量不同，而分为快中子、中能中子、慢中子和热中子。中子所带能量大于100千电子伏以上的叫做快中子；能量在100千电子伏以下而在100电子伏以上的叫做中能中子；能量在100电子伏以下而在 $\frac{1}{40}$ 电子伏以上的叫做慢中子；能量在 $\frac{1}{40}$ 电子伏以下的叫做热中子。

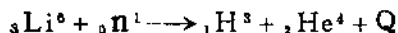
氢原子吸收中子后可引起核反应，一般放射出 $\gamma$ 射线，这样的核反应是最常见的 $n-\gamma$ 反应，例如：



此外吸收中子的核反应也有很少数是别的类型，如 $n-p$ 反应，



又如  $n-\alpha$ 反应：



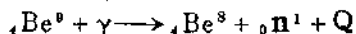
## (三) 快中子的核反应

利用快中子作为轰击粒子，也可以产生核反应，如 $n-2n$ 反应



## (四) 高能光子照射的核反应

利用高能电子所产生的轫致辐射可以得到许多种光致核反应，如 $\gamma-n$ 反应。



虽然高能量的 $\gamma$ 射线可以引起核反应，但效率不如质子和中子等那样高。