

# 放射性核素诊断学

潘中允 林景辉 著



FANGSHEXING HESU  
ZHENDUANXUE



原子能出版社

# 放射性核素诊断学

潘 中 允 著  
林 景 辉

原子能出版社

## 内 容 简 介

本书系统介绍了放射性核素诊断学的基础知识和临床应用。全书共分二十五章,前十二章介绍核医学基础知识,包括医用核物理基本知识、放射性测量原理和临床常用测量装置、放射性测量装置测试的一般程序,样品放射性测量、体内放射性测量(动态测量技术、扫描技术和 $\gamma$ 照相技术)、放射性诊断药物概论、短半衰期放射性核素发生器、体外竞争放射分析、放射防护等;后十三章按系统介绍各种诊断方法,重点是我国现阶段综合性医院中最有用、最成熟和最常用的项目,对诊断方法、适应症、结果分析、鉴别诊断和临床评价等进行了较详细的讨论。全书内容丰富,图文并茂。

可供核医学专业人员和管理人员在临床、教学、科研和管理工作中参考,也可供一般医师及医学院校师生参考。

### 放射性核素诊断学

潘中允 林景辉 著

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

89920部队印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ ·印张 $33 \frac{1}{4}$ ·字数 809 千字

1984年3月 第一版·1984年3月 第一次印刷

印数1—4,000·统一书号: 15175·496

定价: 4.75 元

## 编 者 的 话

核医学在我国已有二十三年的历史，现已成为临床医学的重要学科之一，也是医科学生必修的课程。

本书根据我室多年来的教学和临床经验，结合国内外有关资料编写而成。它是一本专业参考书，主要供核医学专业人员在临床和教学工作中参考，也可供一般医师参阅。

从我国现阶段实际情况和实用的角度出发，本书前十二章的重点放在目前最常用的临床放射性测量技术、放射性药物和放射防护方面，希望有助于读者重视和掌握好临床核医学的基础知识。以后各章按系统介绍，重点放在我国现阶段综合医院中最有用、最成熟和最常用的诊断项目上，对它们的方法学、适应症、结果分析、鉴别诊断和临床评价等进行了较多的介绍和讨论，希望有助于读者较全面地认识和掌握这些技术，较好地把它应用于临床。

本书第十、十一两章由林景辉医师编写。第十三、十四两章由潘中允、林景辉两人合写。其余二十一章由潘中允编写。

在编写过程中，曾得到国家科委五局有关同志和我院各级领导的大力支持，经常受到王世真教授的鼓励。许多兄弟单位提供了宝贵的图片，我们也引用了他们在一些会议上交流的资料，在引用的各个地方均作了说明。无论在我室多年来经验的积累上或在这次编写过程中的资料整理、抄写、制图等方面，都包含着我室所有同志、我院照相室全体同志和历届许多进修同志的辛勤劳动，其中参加工作较多的有余建一、章凡、江玲珊、何瑞琪和王桂舫诸同志。本书承师兄赵惠扬医师逐章审阅。在此一并致以深切的谢意。

限于水平和时间，必有不妥之处，请读者批评指正。

潘中允

1981年10月

于北京医学院第一附属医院同位素室

# 目 录

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 绪论 .....                        | 1  |
| 第一章 医用核物理基础知识 .....             | 6  |
| 一、原子结构 .....                    | 6  |
| 二、核素、同位素、同质异能素 .....            | 7  |
| 三、放射性与放射性核素 .....               | 7  |
| 四、放射性衰变规律 .....                 | 14 |
| 五、放射性核素的来源 .....                | 18 |
| 六、射线与物质的相互作用 .....              | 19 |
| 七、辐射量及其单位 .....                 | 23 |
| 第二章 放射性测量原理和临床常<br>用的测量装置 ..... | 27 |
| 一、放射性测量原理 .....                 | 27 |
| 二、放射性测量的分类 .....                | 28 |
| 三、放射性探测器 .....                  | 28 |
| 四、放射性测量用的电子线路 .....             | 34 |
| 五、临床常用配套测量装置 .....              | 40 |
| 第三章 放射性测量装置测试的一<br>般程序 .....    | 43 |
| 一、仪器的安放 .....                   | 43 |
| 二、电路供电 .....                    | 43 |
| 三、检验 .....                      | 44 |
| 四、工作条件的选择 .....                 | 44 |
| 五、稳定性 .....                     | 47 |
| 六、仪器的刻度 .....                   | 47 |
| 七、分辨时间和漏计 .....                 | 48 |
| 八、其他 .....                      | 49 |
| 第四章 容器内样品的放射性<br>测量 .....       | 50 |
| 一、样品放射性相对测量的主要影响因<br>素 .....    | 50 |
| 二、放射性强度标定 .....                 | 56 |
| 三、放射性自显影 .....                  | 59 |
| 四、双核素测量技术 .....                 | 60 |
| 五、液体闪烁测量法 .....                 | 61 |

|                                                          |     |
|----------------------------------------------------------|-----|
| 第五章 体内放射性测量[Ⅰ] 准直<br>器、静态测量和动态测量 .....                   | 63  |
| 一、准直器 .....                                              | 63  |
| 二、静态测量 .....                                             | 74  |
| 三、慢速动态测量 .....                                           | 74  |
| 四、快速动态测量 .....                                           | 75  |
| 五、体内双核素测量 .....                                          | 75  |
| 第六章 体内放射性测量[Ⅱ]<br>脏器扫描显影技术 .....                         | 76  |
| 一、分辨率 .....                                              | 76  |
| 二、灵敏度 .....                                              | 86  |
| 三、出图效率 .....                                             | 87  |
| 四、扫描机的特殊类型和特殊扫描技术 .....                                  | 90  |
| 五、扫描机的临床测试 .....                                         | 93  |
| 六、一般扫描的程序要点 .....                                        | 94  |
| 第七章 体内放射性测量[Ⅲ]<br>$\gamma$ 照相技术 .....                    | 97  |
| 一、 $\gamma$ 照相机的组成和工作原理 .....                            | 97  |
| 二、 $\gamma$ 照相机的准直器 .....                                | 99  |
| 三、 $\gamma$ 照相机的性能测试 .....                               | 99  |
| 四、 $\gamma$ 照相技术的要点 .....                                | 101 |
| 五、 $\gamma$ 照相机的附加设备及其功能 .....                           | 102 |
| 六、 $\gamma$ 照相机与扫描机的比较 .....                             | 105 |
| 第八章 放射性药物概论 .....                                        | 106 |
| 一、放射性药物诊断原理 .....                                        | 106 |
| 二、对放射性药物的要求 .....                                        | 107 |
| 三、放射性药物的鉴定 .....                                         | 111 |
| 四、患者的吸收剂量和放射性药物的<br>正确使用 .....                           | 115 |
| 五、放射性药物的不良反应和防治 .....                                    | 119 |
| 六、放射性药物的发展趋势 .....                                       | 121 |
| 第九章 放射性核素发生器 .....                                       | 124 |
| 一、 $^{99}\text{Mo}$ — $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器 ..... | 125 |



|                                                      |     |
|------------------------------------------------------|-----|
| 二、 $^{113}\text{Sn}-^{113m}\text{In}$ 发生器 .....      | 135 |
| <b>第十章 竞争放射分析总论</b> .....                            | 140 |
| 一、竞争放射分析的基本原理 .....                                  | 140 |
| 二、被测物质的提纯 .....                                      | 142 |
| 三、被测物质的标记 .....                                      | 143 |
| 四、标准品(标准被测物) .....                                   | 146 |
| 五、特异结合试剂 .....                                       | 146 |
| 六、 $B$ 与 $F$ 的分离技术 .....                             | 148 |
| 七、竞争放射分析质量控制 .....                                   | 151 |
| 八、竞争放射分析法的应用概况 .....                                 | 155 |
| <b>第十一章 临床常用的几种竞争放射分析法和免疫放射自显影技术</b> .....           | 156 |
| 一、绒毛膜促性腺激素(HCG)放射免疫测定法 .....                         | 156 |
| 二、血清甲状腺素( $T_4$ )的竞争性蛋白结合分析法(简称血清 $T_4$ CPBA法) ..... | 158 |
| 三、血清三碘甲状腺原氨酸( $T_3$ )的放射免疫测定 .....                   | 160 |
| 四、血清促甲状腺激素(TSH)的放射免疫测定 .....                         | 161 |
| 五、甲胎蛋白(AFP)的放射免疫测定 .....                             | 163 |
| 六、血清地高辛的放射免疫测定 .....                                 | 164 |
| 七、血浆和尿皮质醇的放射免疫测定 .....                               | 165 |
| 八、血浆和尿中环磷酸腺苷的竞争性蛋白结合测定法 .....                        | 166 |
| 九、血浆胰岛素的放射免疫测定 .....                                 | 168 |
| 十、免疫放射自显影技术的基本原理及特点 .....                            | 170 |
| 十一、甲胎蛋白免疫放射火箭自显影测定法 .....                            | 171 |
| 十二、乙型肝炎表面抗原免疫放射自显影测定法 .....                          | 173 |
| <b>第十二章 放射防护</b> .....                               | 175 |
| 一、电离辐射的最大容许剂量当量和限制剂量当量 .....                         | 175 |
| 二、空气和水中放射性物质的最大容许浓度和限制浓度 .....                       | 176 |
| 三、放射性物质污染表面的控制水平 .....                               | 176 |
| 四、开放型放射性工作单位的分类和工                                    |     |

|                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------|-----|
| 作场所的分级 .....                                                 | 178 |
| 五、外照射的控制 .....                                               | 180 |
| 六、污染的控制 .....                                                | 185 |
| 七、放射性工作人员的健康管理 .....                                         | 189 |
| 八、建筑设计和实验室防护条例举例 .....                                       | 190 |
| 九、核医学实验室实测剂量情况 .....                                         | 192 |
| <b>第十三章 内分泌系统[ I ]</b>                                       |     |
| <b>甲状腺功能测定</b> .....                                         | 194 |
| 一、甲状腺生理 .....                                                | 194 |
| 二、甲状腺功能试验 .....                                              | 198 |
| (一)测定甲状腺浓聚放射性碘的功能 .....                                      | 198 |
| 1. 甲状腺吸 $^{131}\text{I}$ 试验 .....                            | 198 |
| 2. 甲状腺激素抑制试验 .....                                           | 205 |
| 3. TSH 兴奋试验 .....                                            | 206 |
| 4. $^{131}\text{I}$ 的尿排出量测定 .....                            | 207 |
| (二)测定甲状腺浓聚 $^{99m}\text{Tc}$ 的功能 .....                       | 207 |
| (三)测定甲状腺合成与释放激素的速度 .....                                     | 208 |
| 1. 蛋白结合碘( $\text{PB}^{131}\text{I}$ )及转化率( $CR$ ) .....      | 208 |
| 2. 丁醇提取 $^{131}\text{I}$ ( $\text{BE}^{131}\text{I}$ ) ..... | 210 |
| (四)测定血清中甲状腺激素水平 .....                                        | 210 |
| 1. 竞争性蛋白结合分析法(CPBA)测定血清 $T_4$ 浓度 .....                       | 210 |
| 2. $^{125}\text{I}-T_4$ 红细胞吸收试验 .....                        | 212 |
| 3. $^{125}\text{I}-T_4$ 树脂吸收试验 .....                         | 213 |
| 4. 游离甲状腺素指数( $\text{FT}_4\text{I}$ ) .....                   | 214 |
| 5. 有效甲状腺素比值( $\text{ETR}$ ) .....                            | 214 |
| 6. 用放射免疫法测定血清 $T_3$ 浓度 .....                                 | 215 |
| (五)用放射免疫法测定血清 TSH 浓度 .....                                   | 215 |
| (六)促甲状腺激素释放激素(TRH)兴奋试验 .....                                 | 216 |
| (七)过氯酸钾释放试验 .....                                            | 216 |
| 三、用放射性核素诊断甲状腺功能的程序 .....                                     | 217 |
| (一)诊断甲状腺机能亢进的程序 .....                                        | 217 |
| 1. 初诊 .....                                                  | 217 |
| 2. 治疗中和治疗后观察甲状腺功能状况 .....                                    | 219 |
| 3. 自主性功能亢进性结节的诊                                              |     |

|                                                                |            |
|----------------------------------------------------------------|------------|
| 断 .....                                                        | 220        |
| (二) 诊断甲状腺功能减退的程序 .....                                         | 220        |
| (三) 诊断甲状腺炎的程序 .....                                            | 221        |
| <b>第十四章 内分泌系统[ I ] .....</b>                                   | <b>223</b> |
| 一、甲状腺显影 .....                                                  | 223        |
| 二、肾上腺显影 .....                                                  | 241        |
| 三、肾上腺功能测定 .....                                                | 252        |
| 四、血浆胰岛素测定的临床应用 .....                                           | 254        |
| <b>第十五章 消化系统[ I ] .....</b>                                    | <b>256</b> |
| 肝胆显影 .....                                                     | 256        |
| 一、肝实质显影 .....                                                  | 256        |
| 二、胆道显影 .....                                                   | 280        |
| 三、肝血池显影 .....                                                  | 288        |
| 四、肿瘤显影 .....                                                   | 294        |
| 五、甲胎蛋白在肝癌诊断上的价值 .....                                          | 296        |
| 六、肝内占位性病变的诊断程序 .....                                           | 300        |
| <b>第十六章 消化系统[ I ] .....</b>                                    | <b>303</b> |
| 一、肝血流指数测定 .....                                                | 303        |
| 二、 <sup>131</sup> I-玫瑰红肝功能测定 .....                             | 304        |
| 三、 <sup>131</sup> I-玫瑰红排泄试验鉴别新生儿黄疸 .....                       | 305        |
| 四、乙型肝炎表面抗原测定的临床应用 .....                                        | 306        |
| 五、胰腺显影 .....                                                   | 307        |
| 六、食道癌的诊断 .....                                                 | 309        |
| 七、胃显影 .....                                                    | 309        |
| 八、胃泌素测定的临床意义 .....                                             | 310        |
| 九、Barretts食道和Meckel氏憩室的诊断 .....                                | 311        |
| 十、肠道恶性肿瘤的阳性显影 .....                                            | 311        |
| 十一、癌胚抗原(CEA)测定的临床意义 .....                                      | 312        |
| 十二、 <sup>131</sup> I 化脂肪消化吸收试验 .....                           | 312        |
| 十三、胃肠道丢失蛋白量的测定 .....                                           | 314        |
| 十四、胃肠道出血量的测定 .....                                             | 315        |
| <b>第十七章 泌尿系统 .....</b>                                         | <b>316</b> |
| 一、方法学 .....                                                    | 316        |
| (一) <sup>131</sup> I-邻碘马尿酸钠肾图 .....                            | 316        |
| (二) <sup>125</sup> I-OIH肾图 .....                               | 326        |
| (三) <sup>169</sup> Yb-二乙三胺五醋酸( <sup>169</sup> Yb-DTPA)肾图 ..... | 326        |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| (四) 肾静态显影 .....                  | 337 |
| (五) 肾动态显影 .....                  | 334 |
| (六) 放射性核素肾血管造影 .....             | 340 |
| (七) 尿逆流和膀胱残余尿量的测定 .....          | 340 |
| (八) 肾有效血浆流量测定 .....              | 341 |
| (九) 肾小球过滤率测定 .....               | 343 |
| (十) 总肾和分肾功能的定量测定 .....           | 344 |
| (十一) 血浆肾素活性测定 .....              | 345 |
| (十二) 甲状旁腺素测定 .....               | 346 |
| 二、放射性核素检查法在泌尿系几种主要疾病诊断中的应用 ..... | 346 |

## 第十八章 神经系统 .....364

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 一、脑显影 .....             | 364 |
| 二、脊髓蛛网膜下腔、脑池和脑室显影 ..... | 388 |
| 三、放射性核素脑血管造影 .....      | 394 |
| 四、脑血流测定 .....           | 397 |
| 五、颅脑发射计算机断层照相 .....     | 399 |
| 六、脑脊液中cAMP浓度测定的意义 ..... | 400 |

## 第十九章 心血管系统 .....402

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| 一、心功能测定 .....                           | 402 |
| (一) 体循环时间、肺循环时间、血容量、中心血容量、心排血量的测定 ..... | 402 |
| (二) 左心功能——左心室射血分数(LVEF)测定 .....         | 408 |
| 二、心内分流的诊断——先天性心脏病的诊断 .....              | 410 |
| (一) 放射性核素心血管显影 .....                    | 410 |
| (二) 肺稀释曲线 .....                         | 414 |
| 三、冠心病和心肌梗塞的诊断 .....                     | 415 |
| (一) 心肌“热区”显影 .....                      | 415 |
| (二) 心肌“冷区”显影 .....                      | 418 |
| (三) 局部心室壁运动观测 .....                     | 422 |
| (四) 冠状动脉血流量测定 .....                     | 422 |
| (五) 血浆cAMP测定 .....                      | 423 |
| (六) 血清肌红蛋白测定 .....                      | 423 |
| 四、高血压的病因诊断和分型 .....                     | 424 |
| 五、心血池和大血管静态显影 .....                     | 425 |
| 六、肢体血流量和静脉栓塞的测定与显影 .....                | 428 |
| (一) 肌肉血流量(MBF)测定 .....                  | 428 |

|                                       |     |                                         |     |
|---------------------------------------|-----|-----------------------------------------|-----|
| (二) 肢体血流定量测定 .....                    | 430 | 六、维生素 B <sub>12</sub> 吸收试验 .....        | 488 |
| (三) 肢体静脉血栓的测定和显影 .....                | 430 | 七、骨髓显影 .....                            | 489 |
| (四) 放射性核素静脉造影 .....                   | 431 | 第二十三章 血液及淋巴系统[ I ] .....                | 491 |
| (五) <sup>32</sup> P 皮内清除率 .....       | 431 | 一、淋巴显影 .....                            | 491 |
| (六) 末梢血流状况测定 .....                    | 432 | 二、淋巴系统恶性肿瘤显影 .....                      | 494 |
| 七、血清地高辛测定 .....                       | 432 | 三、脾显影 .....                             | 495 |
| 第二十章 呼吸系统 .....                       | 435 | 四、细胞动力学 .....                           | 499 |
| 一、方法学 .....                           | 435 | 五、 <sup>3</sup> H-TdR 参入量的测定 .....      | 504 |
| (一) 肺灌注静态显影 .....                     | 435 | 第二十四章 生殖系统 .....                        | 506 |
| (二) 吸入静态显影 .....                      | 439 | 一、生殖系肿瘤的诊断 .....                        | 506 |
| (三) 扩散性气体肺灌注动态显影 .....                | 440 | 二、产科中的应用 .....                          | 511 |
| (四) 扩散性气体肺放射图 .....                   | 443 | 三、计划生育研究中的应用 .....                      | 515 |
| (五) 吸入动态显影 .....                      | 446 | 四、内分泌紊乱和不育的诊断 .....                     | 517 |
| 二、放射性核素检查法在呼吸系统几种<br>主要疾病诊断中的应用 ..... | 447 | 第二十五章 五官 .....                          | 519 |
| 第二十一章 骨骼系统 .....                      | 461 | 一、唾液腺显影 .....                           | 519 |
| 一、骨显影 .....                           | 461 | 二、腮腺浓集与排出 <sup>99m</sup> Tc 的功能测定 ..... | 520 |
| 二、关节显影 .....                          | 469 | 三、浅表肿瘤的 <sup>32</sup> P 测定法 .....       | 521 |
| 三、创伤后的皮质醇反应 .....                     | 469 | 四、眼球恶性黑色素瘤的特异性诊断 .....                  | 522 |
| 第二十二章 血液及淋巴系统[ I ] .....              | 471 | 五、 <sup>67</sup> Ga 亲肿瘤显影 .....         | 522 |
| 一、血容量的测定 .....                        | 473 | 六、EB 病毒壳抗原 IgA 抗体与鼻咽癌 .....             | 523 |
| 二、红细胞寿命的测定 .....                      | 478 | 七、放射性核素泪道显影 .....                       | 523 |
| 三、红细胞破坏部位的测定 .....                    | 483 | 八、血浆皮质醇浓度测定用于单纯性青<br>光眼的病因研究 .....      | 524 |
| 四、血小板寿命和破坏部位的测定 .....                 | 484 | 九、其他 .....                              | 524 |
| 五、铁的吸收和利用 .....                       | 484 |                                         |     |



# 绪 论

## 核医学的定义、内容和分类

核医学是研究同位素及核辐射（包括加速器）的医学应用及其理论基础的科学，是核技术和医学相结合的一门新兴学科。其总任务是用核技术诊断、治疗和研究疾病。

它分为临床核医学和基础核医学两部分。前者以诊断和治疗疾病为主要内容，在诊断方面主要应用的技术有脏器功能测定、脏器显影、体外竞争放射分析和某些示踪技术（如稀释法等）；在治疗方面，主要是将开放型放射性核素引入体内进行内照射治疗。基础核医学以研究生命现象和病理为主要内容，主要应用的技术为各种放射性核素和稳定性同位素示踪技术、放射性自显影和活化分析。

外照射治疗是利用封闭型放射性核素辐射源、加速器或中子源的高能射线治疗疾病，无论在工作内容、工作条件和工作方法上、与其它利用开放型放射性核素的技术皆不相同，而与X射线治疗相似，故实际上已归入放射治疗学。

本书只涉及临床核医学的诊断部分，即放射性核素诊断学。诊断学可按系统或学科分类，如肝核医学、脑核医学、心血管核医学、肾核医学、甲状腺核医学、眼科核医学、骨核医学、淋巴核医学、肿瘤定位核医学、小儿核医学等。本书为综合性诊断学，内容分两大部分，前十二章包括医用核物理、放射性测量、放射性药物、放射性防护和竞争放射分析法等基础知识和基本技术，以后各章按系统（如内分泌系统、神经系统等）论述各种具体的诊断方法及其临床应用。

## 临床核医学的发展史和现状

### 序幕（1895—1934年）

放射性的历史，如从1895年M. H. Roentgen发现X射线、1896年Henri Becquerel发现铀盐的放射性和1898年居里夫妇成功提取放射性钋和镭算起，已有80年左右，但真正揭开和平利用的序幕者，是Frederic Joliot-Curie和Irene Curie。他们于1934年第一次用人工方法获得了放射性 $^{30}\text{P}$ ，由此开阔了人们的眼界，指出了获得各种人工放射性核素的前景。

### 初创阶段（1935—1950年）

人们对新事物的接受是非常快的，人工放射性核素首次制成后的第二年（1935年），Chiewetz和Hevesy就观察了 $^{32}\text{P}$ 在小白鼠体内的分布和排泄，开始了人工放射性元素的示踪研究。1936年，Hamilton观察了 $^{24}\text{Na}$ 在人体内的吸收和排泄，这是临床应用的开端。1938年，Hertz开始用 $^{128}\text{I}$ 研究家兔甲状腺代谢；1939年，Hamilton用 $^{32}\text{P}$ 对肿瘤进行示踪诊断，同年有人用 $^{55-59}\text{Fe}$ 标记的红细胞测定人体红细胞容量；1942年，Hubard用 $^{24}\text{Na}$ 测定了小儿和新生儿的血流速度。至1950年这段期间，由于人工放射性核素种类和测量仪器的限制，诊

断工作发展不快,基本上限于上述各项。在此同时,人们进行了大量的治疗工作方面的探索。1942年,Hertz和Hamilton开始用 $^{131}\text{I}$ 治疗甲亢,同年有人诊断甲状腺癌转移灶成功,并于1943年开始用 $^{131}\text{I}$ 治疗该病。1936年,Lawence开始用 $^{32}\text{P}$ 治疗肿瘤,如皮肤癌、白血病和真性红细胞增多症。1946年,Hahn用胶体 $^{198}\text{Au}$ 治疗腹腔转移瘤。此后,治疗工作进展不大。因此,我们认为30和40年代是临床核医学的开创阶段。

#### 迅速发展阶段(1950—1960年)

1946年核反应堆投产,标记技术相随进步,从此可以提供多样的放射性核素和放射性药物,加上放射性测定仪器的长足进步[如1947年光电倍增管研究成功,1949年 $\text{NaI(Tl)}$ 晶体试制成功,特别是功能仪的制成(Cassen等于1951年制成了第一台自动扫描仪)和1952年准直器的应用],迎来了50年代的迅速发展阶段。1950年, $^{131}\text{I}$ -人血清蛋白、 $^{60}\text{Co}$ -维生素 $\text{B}_{12}$ 和 $^{51}\text{Cr}$ 标记红细胞已应用于临床。1950年开始用 $^{131}\text{I}$ -SHA描绘心放射图,以测定心脏功能。1955年Taplin开始用 $^{131}\text{I}$ -玫瑰红描绘肝图测定肝胆功能和用 $^{133}\text{Xe}$ 描绘肺图测定肺功能。1956年开始用 $^{131}\text{I}$ -碘司特描绘肾图,以测定肾功能和尿路通畅情况。加上甲状腺扫描(1951年),胶体 $^{198}\text{Au}$ 肝扫描(1954年), $^{203}\text{Hg}$ 肾扫描(1955—1960年),脾扫描(1960年)和 $^{85}\text{Sr}$ 骨扫描(1959年)相继成功,使临床核医学这一学科初具规模。

#### 现代核医学阶段(1961— )

自60年代至今,核医学进入了一个更高的发展阶段。这一阶段最重要和最主要的进展是:(1)利用加速器生产出了短半衰期放射性核素;(2) $\gamma$ 照像机和放射性核素发射计算机处理断层摄影术(Radionuclide Emission Computed Tomography,略语为ECT)的应用;(3)体外竞争放射分析法的应用。60年代后期到现在,在这三大技术的基础上,进入了崭新的现代核医学阶段。

医用回旋加速器始建于1957年,它能生产核反应堆所不能生产的一些放射性核素,尤其是一些短半衰期核素,而这些核素在医学中极其有用。如 $^{11}\text{C}$ 、 $^{15}\text{O}$ 、 $^{13}\text{N}$ (1963年),它们发射正电子,引入人体后可以用射线探测器在体外测量它们,这使得研究C、O、N这些生物体内广泛存在的基本元素和它们的各种标记物在人体内的动态和分布成为可能,给研究生命现象、疾病诊断和治疗带来十分灿烂的光明前景。又如碘的放射性同位素不仅在研究和诊断甲状腺机能状态方面极有价值,并且很多具有生物活性的物质可以加以碘化而用于研究和诊断多种疾病,故在核医学中占有很重要的地位。在碘的29种放射性同位素中,加速器生产的 $^{123}\text{I}$ (1962)被认为是可供人体诊断用的最理想的一种。它不发射 $\beta$ 粒子,甲状腺的吸收剂量只有 $^{131}\text{I}$ 的1%左右。其主要 $\gamma$ 射线(83%)的能量为159keV,很适于活体测量和显影,用它获得的影像质量较 $^{131}\text{I}$ 的好。由于半衰期( $T_{1/2}$ )短(13.3h),不但可以反复应用,而且对其它放射性核素试验的干扰也很少。1973年美国原子能委员会已制定了扩大生产 $^{123}\text{I}$ 的计划,以探索用以代替 $^{131}\text{I}$ 的可能性。日本已建立一台专门生产 $^{123}\text{I}$ 的回旋加速器,为日后废用 $^{131}\text{I}$ 作准备。此外,加速器还可生产 $^{43}\text{K}$ 、 $^{201}\text{Tl}$ 、 $^{87\text{m}}\text{Sr}$ 、 $^{18}\text{F}$ 、 $^{67}\text{Ga}$ 、 $^{111}\text{In}$ 等核素,它们的生物学特性和理化性质都十分适用于脏器或肿瘤显影。

短半衰期放射性核素的另一重要来源是“发生器”(俗称母牛)。目前临床上应用得最广泛的是 $^{99\text{m}}\text{Mo}$ — $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器(1964)和 $^{113}\text{Sn}$ — $^{113\text{m}}\text{In}$ 发生器(1966),其次是 $^{68}\text{Ge}$ — $^{68}\text{Ga}$ 、 $^{87}\text{Y}$ — $^{87\text{m}}\text{Sr}$ 和 $^{132}\text{Te}$ — $^{132}\text{I}$ 发生器。 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发射单一 $\gamma$ 射线,能量为140keV,不伴有 $\beta$ 粒子, $T_{1/2}$ 为6h,极适于人体应用,同时现已能标记有临床诊断价值的30—40种化合物,故已成为目前

临床诊断中最重要的和用量最大的放射性核素。在美国每年的销售量约占放射性药品工业总销量的1/3。1965年,  $^{131}\text{I}$  是日本临床上首要的核素, 用量占体内用放射性药品总数的44%,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  仅占10.2%。但到1973年,  $^{131}\text{I}$  的用量仅占5.6%, 而  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  的用量却猛增至64.3%。

加速器生产的放射性核素和短半衰期放射性核素的应用, 加上由核反应堆生产的核素的进一步使用, 大大扩大了临床核医学的领域, 使得人体各重要脏器几乎全部能用放射性核素显影了, 如肺 (1963年,  $^{131}\text{I}$ -MAA; 1966年,  $^{113\text{m}}\text{In}$ - $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ; 1969年,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MAA)、脑 (1964年,  $^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$ )、脑池 (1964年,  $^{131}\text{I}$ -HSA; 1971年,  $^{169}\text{Yb}$ -DTPA; 1973年,  $^{111}\text{In}$ -DTPA)、心肌 (1964年,  $^{131}\text{CsCl}$ ; 1971年,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -多磷酸盐、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -四环素; 1968年,  $^{43}\text{KCl}$ ; 1973年,  $^{201}\text{TlCl}_2$ )、胰腺 (1962年,  $^{75}\text{Se}$ -硒代蛋氨酸)、骨 (1962年,  $^{18}\text{F}$ ; 1971年,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -多磷酸盐)、骨髓 (1964年, 放射性胶体和  $^{52}\text{Fe}$ )、肾上腺 (1971年,  $^{131}\text{I}$ -19-碘代胆固醇) 和血池 (1967年,  $^{113\text{m}}\text{InCl}_3$ ) 等。同时, 在肿瘤显影方面也开始了广泛的工作。第一个尝试是1963年用  $^{131}\text{I}$ -抗纤维蛋白抗体, 最为突出的有1967年的  $^{197}\text{HgCl}_3$ 、1968年的  $^{67}\text{Ga}$ -枸橼酸、 $^{131}\text{I}$ -氯喹、1969年的  $^{111}\text{InCl}_3$ 、1972年的  $^{57}\text{Co}$ -博莱霉素和1973年的  $^{111}\text{In}$ -博莱霉素, 其次是1972年的  $^{169}\text{Yb}$ -枸橼酸、1974年的  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -HEDSPA 和  $^{131}\text{I}$ -四环素。

将短半衰期放射性核素引入人体, 可使人体的吸收剂量大大减小; 另一方面, 由于其半衰期极短, 便可使用具和环境污染问题近于消失。这些优点对核医学的发展无疑起着并将继续起着很大的促进作用。

γ照像机由 Hol Anger 在1957年研制成功, 但到1966年以后才广泛应用。由于它是一次成像, 可以把脏器的放射性影像在很短时间内记录显示出来, 并可接着再显示下一时相的影像, 如此继续下去, 即成为一种动态显影。这与一般的静态显影大不一样, 它可以把形态与功能结合起来观察, 这就完全开辟了一个新的领域, 从而对脏器可以进行更全面、细致和综合的观察。它对研究心脏功能、观察心内血流路径、脏器血流情况和某些物质在各脏器内的灌注速度、灌注量和排出的速度等都极为有用。加用计算机技术, 除可以减少统计涨落, 提高分辨率, 将影像立体重建、贮像重放等以外, 还可使整个或局部图像分析提高到定量的水平。

1963年 David Kuhl 提出了纵断层和横断层扫描的设想, 并进行了实验证实, 至1975年建立了放射性核素发射计算机处理断层摄影术。这种技术消除了不同体层由放射性的重叠干扰, 可以单独观察某一体层内的放射性分布。这不仅有利于发现较小的异常和病变, 还使得局部放射性定量分析进一步精确。最近有人报道, 利用该技术观察到了  $^{18}\text{F}$ -去氧葡萄糖在特定脑区内的定量变化与脑组织功能的关系, 如眼睑活动和听音乐时可观察到脑区相应部位放射性强度的变化。因此, 这一技术使核医学发展到了一个更深入的阶段, 一个将物质代谢、功能与形态结合起来进行观察研究的阶段。不过, 该技术现在尚未得到普遍应用。

体外竞争放射分析包括放射免疫分析和竞争性蛋白质结合分析等。Yellow 和 Berlin 于1959年首先建立了胰岛素分析法, 此法将同位素分析的精确性、灵敏性和抗原抗体反应的特异性结合起来, 成为一种特异性很强的超微量分析法, 分析灵敏度可达毫微克 ( $10^{-9}\text{g}$ , ng) 和微微克 ( $10^{-12}\text{g}$ , pg) 水平。利用该法已可测定300余种生物活性物质和药物。其中主要的有T<sub>4</sub> (1960年蛋白竞争法、1972年放射免疫法)、TSH (1965年)、HCG (1966年)、T<sub>3</sub> (1967年蛋白竞争法、1971年放射免疫法)、皮质醇 (1967年蛋白竞争法, 1972年放射免疫法)、CEA (1969年)、血管紧张素 I 和 II (1969)、cAMP (1969年)、醛固酮 (1970年)

蛋白竞争结合法、1972年放射免疫分析法)、TBG (1971年)、Digoxin (1971年)、睾丸酮 (1972)、THR (1972年)、AFP (1972年) 等。这些物质用其它方法测量常常是极为麻烦而不可靠的, 有的甚至不能测定, 因此本法大受欢迎。为了简化操作, 已有配备测定所需全部试剂的“药箱”供应。

综上所述, 临床核医学经过45年三个阶段的发展, 已成为内容十分丰富的临床医学中不可缺少的重要科目之一, 也是医学现代化的重要标志之一。

我国第一个生物学和医学方面的放射性同位素学习班和放射性同位素测量仪器训练班, 是在1956年于西安举办的, 真正的临床核医学工作是在1958年开始的。在党和政府的关怀下, 经过核医学工作者的努力, 临床核医学工作已在全国各省、市的许多医院普遍开展起来。由于以下技术和设备的进展, 至70年代, 我国也进入了现代核医学的阶段, 已可进行近百个项目的诊断检查。

1. 中国科学院原子能研究所于1971年开始生产 $^{99}\text{Mo}$ — $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器和 $^{113}\text{Sn}$ — $^{113\text{m}}\text{In}$ 发生器, 并陆续供应心、肺、肾、肝、脑、骨等脏器显影配套药箱十余种。

2. 核反应堆在生产 $^{131}\text{I}$ 、 $^{32}\text{P}$ 、 $^{198}\text{Au}$ 、 $^{203}\text{Hg}$ 、 $^{51}\text{Cr}$ 、 $^{59}\text{Fe}$ 的基础上, 又生产一些重要的放射性核素和标记化合物, 如 $^{125}\text{I}$ 、 $^{133}\text{Xe}$ 、 $^{169}\text{Yb}$ 、 $^{131}\text{Cs}$ 、 $^{75}\text{Se}$ -硒代蛋氨酸、 $^{131}\text{I}$ -19-碘代胆固醇 (NM-145)、 $^{131}\text{I}$ -6-碘代胆固醇、 $^{131}\text{I}$ -6-甲基碘代胆固醇 (NP59) 等。

加速器开始生产 $^{67}\text{Ga}$ 、 $^{58}\text{Co}$ 、 $^{111}\text{In}$ 、 $^{18}\text{F}$ 等。

3. 1975年以后, 彩色扫描机得到普遍供应, 1976年上海华东电子仪器厂生产出第一台带有简单计算程序的多功能仪; 1976年四川建安电子仪器厂生产出第一台 $\gamma$ 照像机, 同时引进不同型号的 $\gamma$ 照像机多台; 1973年国营262厂生产出第一台液体闪烁计数器。

4. 1962年, 中国医学科学院用放射免疫分析法测定血浆胰岛素成功, 从此开始了我国体外竞争放射分析的工作, 至今已可进行约43个项目的分析工作。其中已向全国供应的配套药箱有甲胎蛋白 (AFP)、乙型肝炎表面抗原 (HBsAg)、绒毛膜促性腺激素 (HCG)、环磷酸腺苷 (cAMP)、环磷酸鸟苷 (cGMP)、甲状腺素 ( $\text{T}_4$ )、三碘甲状腺原氨酸 ( $\text{T}_3$ )、抗甲状腺球蛋白抗体 (Anti TG Antibody)、促甲状腺激素 (TSH)、胰岛素 (Insulin)、皮质醇 (Cortison)、地高辛 (Digoxin)、血管紧张素 I ( $\text{Ang I}$ )、肌红蛋白 (Mb)、胃泌素等十余种。

## 核医学工作者必备的知识 and 技能

核医学工作者必须具备以下知识和技能, 才能胜任工作。

1. **核物理方面:** 放射性核素是核医学的诊断手段, 因此必须对它的物理化学性质有所了解。在此基础上, 才能懂得用它进行诊断和治疗的基本原理, 也才能知道如何正确使用它, 以达到预期的目的。

2. **射线测量方面:** 每一种诊断手段, 必然要有其相应的显示和度量方法。用放射性核素进行诊断所依靠的度量和显示方法, 是射线测量技术。因此必须正确熟练地掌握好射线测量仪器和测定技术, 其中包括样品计数、脏器放射性定量测量、动态测量、放射性分布测量 (即用扫描机或 $\gamma$ 闪烁照像机作脏器显影)、放射性自显影和剂量测定等, 必须得到正确的数据和影像, 只有这样, 才能作出正确的诊断。

**3. 放射性药物方面：**放射性核素的医用制剂统称放射性药物。这些药物大部分由专门机构供应，但必不可免的有一部分标记化合物要由实验室临时制备。随着短半衰期核素的广泛应用，临时制备的药物将越来越多。因此，我们除了要对统一供应的放射性药物有所了解，以便检查它们的质量外，还必须具备制备某些放射性药物的知识，掌握常用药物的制备和鉴定方法。

**4. 放射卫生和防护方面：**放射性核素用于临床，能为病人服务，然而由于放射性物质能发射射线这一固有特性，能对人体产生一定的损害。因此经常处理和操作放射性物质的医务人员，必须采取必要的防护措施。临床核医学的特点是应用“开放型”放射性核素，它们是液态、气态或固态（粉末样）物质，应用时会暴露于空气中，也可能溅洒到桌面或地面上。在日常工作中常需稀释、转移、注射放射性物质，还需要收集和处理放射性废物（包括沾染的皿器和病人的排泄物）。由此种种就带来了特殊的卫生防护问题：

（1）频繁近距离操作放射性物质，构成对工作人员的外照射；放射性物质因挥发和溅洒，可能通过呼吸道、口或皮肤进入人体、造成内照射。为此，必须进行特殊的有针对性的防护；

（2）诊断时放射性物质多数直接引入人体，对病人全身或关键器官构成内照射，也可能造成损伤。这就要求我们对特定放射性药物在体内可能造成的为害有定量的了解，以便权衡诊断价值和可能为害两方面的利弊，选择适宜的方法。

（3）通过放射性污物和污染气体的扩散，可以造成环境污染，这也需有相应的防护措施。理论和实践皆证明：若不加注意和控制，放射性物质是有害的；若加以注意和控制，则可以转害为利。

现代科学技术可以使我们安全地让放射性核素为人类谋福利，但也需要我们有必备的防护知识和技能，以及思想上的重视。

**5. 诊断方面：**有了放射性药物、射线测量和显示手段以及防护等方面的基本知识后，我们还必须逐个地掌握各种具体诊断方法和治疗方法，包括对方法原理的深入了解，对结果的正确判断，才能为临床诊断和治疗服务。

# 第一章 医用核物理基础知识

## 一、原子结构

世界上有形形色色的物质，每一物质都有其特定的基本化学性质，如氧气 ( $O_2$ )、水 ( $H_2O$ )、硫酸 ( $H_2SO_4$ )、葡萄糖 ( $C_6H_{12}O_6$ ) 等等。任何一种物质都是由很多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的，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。

原子是不是小到不能再分了呢？原子的结构是怎样的呢？卢瑟福 (Rutherford)、波尔 (Bohr) 和依凡年柯 (Иваненко) 总结了多方面的成就，分别提出了原子模型、原子结构 (1912年) 和原子核组成学说 (1930年)。经过几十年的实践检验，表明这些学说基本上是正确的。这些学说的要点如下：

1. 原子的结构与太阳系结构相似，原子中心有一个小而重的带正电的原子核，周围有若干个小而轻的带负电的电子围绕着这个核旋转。整个原子的直径约为  $10^{-8}cm$  (一亿分之一厘米左右)，核的直径为  $10^{-13}—10^{-12}cm$ ，只是原子直径的几万分之一。原子的质量很轻，如氢原子 ( $^1H$ ) 为  $1.6735 \times 10^{-24}g$ ，铀原子 ( $^{238}U$ ) 为  $3.9196 \times 10^{-22}g$ 。电子的质量为  $9.1095 \times 10^{-28}g$ ，氢原子只有一个电子，故只占氢原子质量的  $1/1839$ ，铀原子有 92 个电子，占铀原子质量的  $1/4676$ 。所以，原子核集中了整个原子的 99.9% 以上的质量，一般用原子核的质量来代表整个原子的质量。原子核质量的单位是原子质量单位。现在用  $^{12}C$  原子质量的  $1/12$  为 1 原子质量单位，以符号  $u$  表示。

$$1 \text{ 原子质量单位 } (u) = 1.6605 \times 10^{-24}g$$

质量数取为最接近于以原子质量单位表示的原子质量的整数。如  $^{16}O$  原子质量等于  $2.655664 \times 10^{-23}g$  除以  $1.66032 \times 10^{-24}g$ ，得 15.994892，故取 16 为其质量数。

2. 原子核由质子和中子组成。质子和中子作为构成原子核的基本粒子，称为核子。质子即氢的原子核，质量为  $1.6726 \times 10^{-24}g$ ，带一个正电荷。中子质量略大于质子，为  $1.6749 \times 10^{-24}g$ ，不带电。每一核子的重量十分近似一个原子质量单位所表示的原子核质量，所以质子和中子数目的总和 (核子数) 即为原子的质量数 ( $A$ )，质子的数目 ( $Z$ ) 等于核的正电荷数亦即原子序数。

3. 在原子核周围相当广阔的空间里，有与质子数目相等的电子围绕着核旋转，这些电子被称为核外电子。原子核的正电量与其四周的负电量相等，所以就整个原子来说呈电中性。

绕行电子在核周围的旋转严格遵循一定的规律。每一个绕行电子都有一定的旋转轨道 (圆的或椭圆形的)。这些轨道分别属于几个不同的壳层如 (K, L, M……等)，每一壳层都有一定数目的轨道，每个轨道上最多只能有一个电子运动。最靠近核的为 K 壳层，最多有两个轨道，



所以最多只能有两个绕行电子。第二层是L壳层,最多可以有8个轨道,容纳8个绕行电子。接着是M壳层,最多可以有18个轨道,即最多可容纳18个绕行电子。一般说来,各壳层里可容纳的最多电子数目可用 $2n^2$ 来表示, $n$ 为层次,愈到外面可容纳的电子数愈多。但最外层除外,它有严格的限制,不能超过8个。当超过8个时,就只好排列到更外面的新的一层去了,于是最外层的电子数目又是一个、两个地逐渐增加。随着电子数目的增加,最外层的电子数目呈现1—8的周期性变化。因为原子核的质子数等于绕行电子数,所以我们可以得知元素的化学性质决定于原子核的质子数,而与元素的化学变化和原子结构深处的电子关系不大,只有最外层的电子才与之有关,也就是说原子最外层电子数目基本上决定着原子的化学性质。早在1869年门捷列夫就发现了元素周期律,但直至原子结构学说形成,才从结构与性能的结合上得到了正确的理论解释。

在一定轨道上运动的电子具有一定的能量,其能量通常以电子伏为单位(eV)。 $1\text{eV}=1.601\times 10^{-12}\text{erg}$ 。各层轨道电子的能量不同,K壳层轨道上的电子能量最低,越往外层,电子的能量越高。当电子由于某种原因而跃迁到另一层轨道上时,将放出或吸收能量;电子由外层轨道跳至内层轨道时,即由高能级过渡到低能级时要放出能量,一般是以电磁辐射(X射线)或放出俄歇电子的形式把多余的能量释放出来。当电子由内层轨道跳向外层轨道时,则需吸收外加的能量,这种现象叫做激发。假若电子得到的能量很大,以至能够克服该壳层对它的束缚能而自由地运动,则称为电离。

## 二、核素、同位素、同质异能素

质量数 $A$ 和原子序数 $Z$ 都相同,并且处于同一种能态(当处在该能态上的平均寿命长到可以观测时)的原子称为一种核素。

原子序数相同而质量数不同的核素互为同位素,它们都在元素周期表的同一位置。

质量数和原子序数都相同,但处于不同能态的核素称为同质异能素。

质量数相同,但原子序数不同的核素称为同质异位素。

按目前的国际符号标准,核素用 ${}^A_Z\text{X}$ 或 ${}^A_m\text{X}$ 来表示( $\text{X}$ 为该原子所属元素的化学符号, $m$ 表示该核处于较高能量状态,若处于最低状态则不作记号)。如 ${}^{131}_{53}\text{I}$ 、 ${}^{127}_{53}\text{I}$ 、 ${}^{198}_{79}\text{Au}$ 、 ${}^{99m}_{43}\text{Tc}$ 、 ${}^{99}_{43}\text{Tc}$ ,都是不同的核素,其中 ${}^{127}_{53}\text{I}$ 和 ${}^{131}_{53}\text{I}$ 为元素碘的同位素, ${}^{99m}_{43}\text{Tc}$ 和 ${}^{99}_{43}\text{Tc}$ 为元素锝的同位素,同时它们又是元素锝的同质异能素。

现在我们已知的元素有100多种,核素却已有1500多种。每一种元素都有若干同位素。自然元素实为按一定比例混合的核素族,如最早发现的核素族自然氦就是由三种氦核素即 ${}^{20}_{2}\text{Ne}$ 、 ${}^{21}_{2}\text{Ne}$ 和 ${}^{22}_{2}\text{Ne}$ 按90.92%、0.26%和8.82%的比例混合而存在。

同一元素的同位素的化学性质一样,故可通过对任何一种同位素性质的研究,来推测该元素的性质,这种研究方法称为同位素示踪法,用于研究的同位素称为示踪元素或示踪物。

## 三、放射性与放射性核素

### 1. 放射现象的发现

1896年贝克勒尔(H. Becquerel)在研究铀盐时,发现铀的化合物能使附近的包在黑纸

里面的照相底片感光。他由此断定，铀能不断地自动地放射出某种看不见的、穿透力相当强的射线。后来证明，这种射线来自铀的原子核本身，与其化合物的性质无关，它的放射不受任何外界因素的影响。这种物理性质叫做放射性。目前，它的严格定义是：某些核素具有自发地放出粒子或 $\gamma$ 辐射，或在发生轨道电子俘获之后放出X射线，或发生自发裂变的性质，这种性质称为放射性。它是不稳定核素的特性，具有这种特性的核素叫放射性核素。

两年以后，居里夫妇——玛丽·居里(M. Sklodowska Curie)和皮尔·居里(P. Curie)以放射性为线索，成功地发现了放射性很强的新核素 $^{210}_{82}\text{Po}$ 、 $^{226}_{88}\text{Ra}$ 等，加深了人们对放射性的认识。

### 2. 各种射线的质

射线有多种，如 $\alpha$ 、 $\beta$ 和 $\gamma$ 射线，中子、 $\pi^-$ 等。 $\alpha$ 、 $\beta$ 射线是具有一定动能的带电粒子流， $\gamma$ 射线是具有一定动能的、波长极短的、不带电的光子流（表1-1、图1-1）。本书不涉及中子和 $\pi^-$ 的应用，故从略。

表 1-1 各种射线的本质

| 射线种类        | 射 线 的 本 质                                        | 电 荷 量       | 速度(km/s)        | 质量     |
|-------------|--------------------------------------------------|-------------|-----------------|--------|
| $\alpha$ 射线 | $^4_2\text{He}$                                  | +2/粒子       | 20000           | 4.0039 |
| $\beta$ 射线  | 连续能谱的电子流                                         | -1/电子或+1/电子 | 200000          | 1/1840 |
| $\gamma$ 射线 | 波长 $10^{-8}$ — $10^{-10}\text{cm}$ 的光子流,较X射线的波长短 | 0           | $30\times 10^4$ | 极小     |

### 3. 稳定性核素与放射性核素

原子核内存在着两种方向相反的力：质子与质子之间的静电斥力和核子之间的吸引力（核力）。核力克服了静电斥力得以把核子紧紧地凝聚成一个稳定的原子核，其结构不会自发地发生改变。当核力等于静电斥力时，就有发生核分裂的倾向，这种有自发分裂倾向的原子核叫做不稳定的原子核。

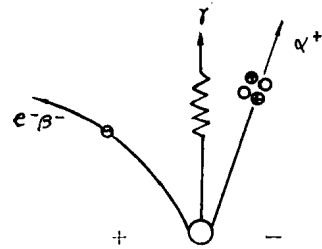


图1-1 射线在电场中的走向

核力作用于各核子间，它比质子间的静电斥力强大，并且质子与中子间的核力大于同种核子间的核力，因此以质子数和中子数相等时的核力量大。但核力的作用距离很短（ $3\times 10^{-13}\text{cm}$ ），只在与核子本身的直径相近的距离内才起作用，所以每个核子在原子核中平均只与几个相邻的核子起作用（这叫核力的饱和性）。静电斥力作用范围则较大，原子核中任意二质子间都存在着静电斥力的作用，只是随距离的增大而稍减弱。因此，当核子数增加时，静电斥力的增长有逐渐大于核力增长的趋势，即质量数很大的原子核就有静电斥力突破核力的“凝聚作用”而使核分裂的可能。另外，当质子数不变，适当增加中子数，核力会相应增加，但因原子核体积增大，质子间平均距离较远，相互之间的静电斥力反会较弱，这样就又可以保持原子核的稳定。可见，在一个稳定的核中，质子和中子相对数目的限制，是核力与静电斥力之间相互平衡的必要条件，核力倾向于要求两种核子的数目相等，静电斥力则以中子数偏多时较小。图1-2为以所有稳定核（“+”）的中子与质子的差数（I）与原子序数（Z）的关系图。 $\alpha$ 放射性核亦放在图中（“O”）。在一直到 $^{40}_{20}\text{Ca}$ 为止的轻的稳定原子核中，中子和质子数相等（差数等于0）或中子稍多一点。原子序数大于20的较重的核中，中子数逐渐明显超过质子数，直到最重的核 $^{238}_{92}\text{U}$ 中子可多约50个，中子/质子的比值（n/p）可

达1.6。但即使这样，也未能使 ${}_{84}\text{Po}$ 以上的原子核保持稳定，而成了天然放射性元素。在各个原子序数的同位素中，有的中子数较规定的多（质量数大），有的中子数较规定的少（质量数小），它们分布在稳定线的两侧（图1-3），总共约有500多种，都是不稳定的原子核。

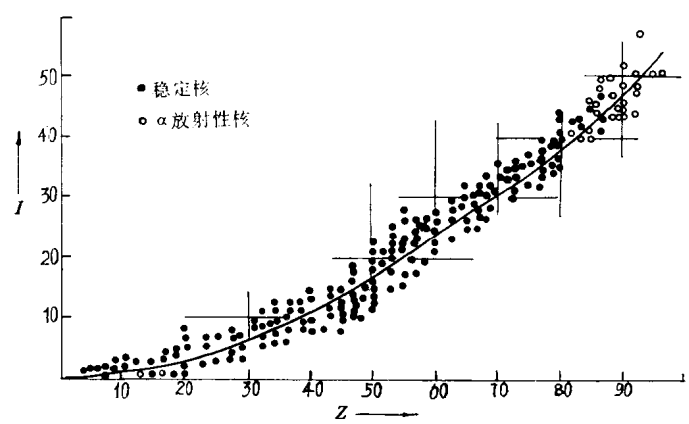


图1-2 稳定核的结构与原子序数的关系

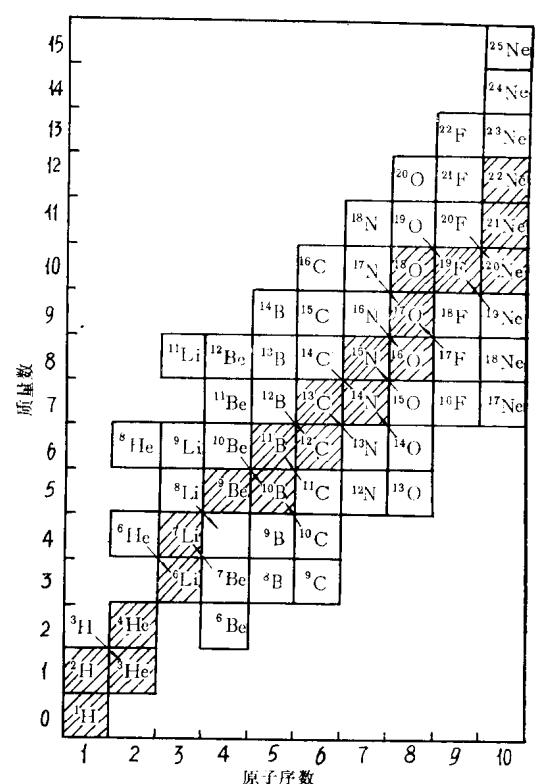


图1-3 不稳定核结构的特点

⊗表示稳定性同位素。质量数比它大 或比它小的同位素不稳定，通过核衰变趋于稳定。箭头表示趋向稳定的方向。