

## 第二章

# 核物理与电离辐射生物效应及防护

核物理是研究原子核的特性、结构及其相互转变的学科。19 世纪末，发现了 X 射线和放射现象，人类的认识开始深入到原子的内部，产生了核物理这门学科。核物理和核化学的兴起和发展，导致了原子能和放射性核素的应用。放射性核素在医学中的应用，为基础医学研究、诊断和治疗开辟了新途径，同时，放射性核素产生的射线也可给人类带来危害，因此，在放射性核素的应用中，必须进行放射防护。本章介绍核物理、辐射生物效应与放射防护的基本知识，为学习核医学奠定基础。

### 第一节 核物理

#### 一、核物理的基本概念

##### (一) 核素

原子核 (atomic nucleus) 由质子 (proton) 和中子 (neutron) 组成，并且处于一定的能量状态，能量最低的状态称为基态，能量较高的状态称为激发态。质子数和中子数均相同，并处于同一能量状态的原子，称为一种核素 (nuclide)。同一核素不仅化学性质相同，而且核性质相同，是某一原子固有的特征。

核素用  ${}^A_ZX$  表示，X 为元素符号、Z 为质子数、A 为质量数，质量数即质子数与中子数 (N) 之和。常简写为  ${}^AX$ ，如果核素处于激发态，则在右上角加 m，如  ${}^{99}_{43}\text{Tc}^m$  或  ${}^{99}\text{Tc}^m$ 。

##### (二) 同位素

质子数相同，但中子数不同的核素，它们在元素周期表中占据相同的位置，互称为同位素 (isotope)。例如  ${}^1_1\text{H}$ 、 ${}^2_1\text{H}$  和  ${}^3_1\text{H}$  互为同位素。

##### (三) 同质异能素

具有相同的质子数和中子数，处于不同能量状态的核素互称为同质异能素 (isomer)，如  ${}^{99}\text{Tc}^m$  和  ${}^{99}\text{Tc}$  互为同质异能素。

#### 二、核衰变

原子核的核子 (质子和中子统称为核子) 之间存在着很强的引力，称为核力，核力使原子核中的核子结合在一起，同时，原子核中又存在质子间的静电排斥力等不稳定因素，原子核的稳定性由核子之间的核力产生的稳定效应和质子之间的静电排斥力等不稳定效应的相对大小决定，与核子数目及质子与中子的比例有关 (图 2-1)。原子核稳定，不会自发衰变的核素称为稳定核素 (stable nuclide)；原子核处于不稳定状态，需通过核内结构或能级调整

才能趋于稳定的核素称为放射性核素（radionuclide）。放射性核素由于核内结构或能级调整，自发地释放出一种或一种以上的射线并转化为另一种核素的过程称为核衰变（nuclear decay）。

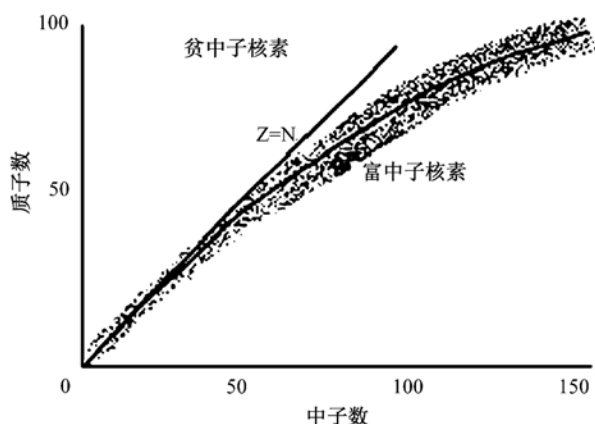
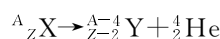


图 2-1 稳定核素分布图

### (一) 核衰变方式

#### 1. $\alpha$ 衰变

放射性核素原子核释放出  $\alpha$  射线后变成另一个原子核的过程称为  $\alpha$  衰变 ( $\alpha$  decay)。 $\alpha$  射线由  $\alpha$  粒子组成，由于  $\alpha$  粒子为带有两个单位正电荷、质量数为 4 的  ${}^4_2\text{He}$  核，所以发生  $\alpha$  衰变后，质子数减少 2，质量数减少 4；在元素周期表中子体的位置比母体左移两位。衰变反应式为：



式中：X 表示母核（衰变前的核素），Y 表示子核（衰变后的核素）。

$\alpha$  衰变发生于原子序数  $> 82$  的核素。

#### 2. $\beta^-$ 衰变

释放出  $\beta^-$  射线的衰变方式称为  $\beta^-$  衰变 ( $\beta^-$  decay)。 $\beta^-$  射线由  $\beta^-$  粒子组成， $\beta^-$  粒子实质上是负电子，带一个单位的负电荷。 $\beta^-$  衰变主要发生于富中子核素，即图 2-1 稳定线下方的核素，实质上是原子核的一个中子转化为质子。发生  $\beta^-$  衰变后质子数增加 1，质量数不变。在元素周期表中向右移动一个位置。以衰变反应式表示为：



式中  $\bar{\nu}$  为反中微子。中微子 ( $\nu$ ) 和反中微子是不带电荷、质量数基本为 0 的粒子，两者自旋方向相反。

#### 3. $\beta^+$ 衰变

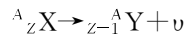
释放出  $\beta^+$  粒子的衰变方式称为  $\beta^+$  衰变 ( $\beta^+$  decay)。 $\beta^+$  粒子即带一个单位正电荷、质量与电子相同的粒子，也叫正电子 (positron)。 $\beta^+$  衰变发生于贫中子核素，即图 2-1 稳定线上方的核素，实质上是原子核的一个质子转化为中子。发生  $\beta^+$  衰变后质子数减少 1、质量数不变。在元素周期表中向左移动一个位置。以衰变反应式表示为：



#### 4. 电子俘获

电子俘获 (electron capture, EC) 是指原子核从核外俘获一个轨道电子。电子俘获也

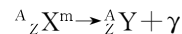
发生在贫中子核素，由于核内中子相对不足而从核外内层的电子轨道上俘获一个电子，使其一个质子转化为中子。发生电子俘获后质子数减少 1、质量数不变。在元素周期表中向左移动一个位置。以衰变反应式表示为：



发生电子俘获后，核外内层轨道缺少了电子，外层轨道电子填充到内层轨道上，外层电子比内层电子的能量大，多余的能量以 X 射线的形式释放出来，称为特征 X 射线 (characteristic X ray)。该能量也可以传递给更外层的轨道电子，使之脱离轨道而释出，此电子称为俄歇电子 (Auger electron)。

### 5. $\gamma$ 衰变与内转换

原子核由激发态向基态或由高能态向低能态跃迁时，放出  $\gamma$  射线的衰变过程称为  $\gamma$  衰变 ( $\gamma$  decay)。 $\gamma$  射线由光子组成，不带电荷，质量数为 0，又称为  $\gamma$  光子。发生  $\gamma$  衰变后质子数和质量数都不变，只是能量状态发生改变。以衰变反应式表示为：



原子核的激发能也可以直接传递给核外的内层电子，使之脱离轨道成为自由电子，这一过程称为内转换 (internal conversion, IC)，发射的电子叫做内转换电子。发生内转换后该层轨道的空缺随后由外层电子填补，从而发射特征 X 射线或俄歇电子。

### (二) 核衰变的基本定律

对于由大量原子组成的放射性物质，虽然任何原子核都可能发生衰变，但并非是同时衰变，实验和理论证明，放射性物质是按指数规律衰减的，其表达式为：

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

式中： $N_0$  为初始时放射性原子数， $N$  为经过  $t$  时间后的放射性原子数， $\lambda$  为一常数，称为衰变常数 (decay constant)。

每种放射性核素都有其固定的  $\lambda$  值。从上式可以看出， $\lambda$  值越大，放射性核素衰减得越快，因此， $\lambda$  是反映放射性核素衰变速率的特征参数。在核医学中，反映放射性核素衰变速度的一个更常用的物理量是物理半衰期 (physical half life,  $T_{1/2}$ )，它是指放射性核素减少一半所需要的时间。物理半衰期越短表明放射性核素衰变越快。

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

放射性核素应用于人体或生物体内时，还会遇到另外两种半衰期：生物半排期 (biological half life,  $T_b$ ) 和有效半减期 (effective half life,  $T_{eff}$ )。生物半排期是指生物体内的放射性核素经由各种途径从体内排出一半所需要的时间；有效半减期指生物体内的放射性核素由于从体内排出和物理衰变两个因素作用，减少至原有放射性活度的一半所需的时间。放射性核素总的减少速率等于物理衰变速率与生物排泄速率之和，即  $\lambda_{eff} = \lambda_b + \lambda$ ，所以：

$$T_{eff} = T_{1/2} \cdot T_b / (T_{1/2} + T_b)$$

在核医学中，一个常用的反映放射性强弱的物理量是放射性活度 (radioactivity,  $A$ )，它定义为单位时间内原子核的衰变数量。单位时间内原子核的衰变数与原子核数成正比，即  $A = \lambda N$ ，因此：

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

式中， $A_0$  为初始时间的放射性活度， $A$  为经过  $t$  时间的放射性活度。即放射性活度随时间呈指数规律减少。放射性活度的国际制单位是 Bq (贝克)，1 Bq 表示放射性核素在 1 秒钟内发生一次衰变。惯用单位是 Ci (居里)，1 Ci =  $3.7 \times 10^{10}$  Bq。由于 Bq 单位太小，而 Ci

单位太大，因此通常采用 kBq ( $10^3$  Bq)，MBq ( $10^6$  Bq)，GBq ( $10^9$  Bq) 或 mCi ( $10^{-3}$  Ci)， $\mu$ Ci ( $10^{-6}$  Ci) 为单位。

为了更好地表示放射性核素的含量，通常还采用比活度和放射性浓度这两个参数。比活度指单位质量物质的放射性活度；放射性浓度指单位体积溶液的放射性活度。

### 三、核射线与物质的相互作用

核射线通过物质时，将和物质发生一系列的相互作用。核射线与物质相互作用的基本规律是人们进行射线探测、防护、分析、诊断和治疗的基础，具有十分重要的意义。

#### (一) 带电粒子与物质的相互作用

##### 1. 电离与激发

当带电粒子 ( $\alpha$ 、 $\beta$  粒子) 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形成一个带负电荷的自由电子，失去核外电子的原子带有正电荷，与自由电子形成一离子对，这一过程称为电离 (ionization)。如果核外电子获得的能量不足以使其形成自由电子，只能由能量较低的轨道跃迁到能量较高的轨道，使整个原子处于能量较高的激发态，称为激发 (excitation)。激发的原子不稳定，退激后可释放出光子或热量。

带电粒子电离能力的大小可用带电粒子在单位路径上形成离子对的数目，即电离密度或比电离表示。电离密度与带电粒子的电量、速度以及物质密度有关，带电粒子的电量越大，其与物质原子核外电子发生静电作用越强，电离密度越大；带电粒子的速度越慢，其与核外电子作用的时间越长，电离密度越大。

带电粒子对物质的电离、激发作用是放射性核素治疗与放射性探测的基础，放射性核素治疗所用的核素主要是发射  $\alpha$  射线和  $\beta^-$  射线的核素，由于  $\alpha$  射线射程太短，所以  $\beta^-$  射线在放射性核素治疗中更常用。探测  $\beta^-$  射线的核仪器—液闪仪也是利用  $\beta^-$  射线使闪烁液激发，退激后产生荧光进行测量的。

##### 2. 散射作用

带电粒子与物质的原子核碰撞而改变运动方向和/或能量的过程称为散射 (scattering)。其中仅运动方向改变而能量不变者称为弹性散射。带电粒子受到物质原子核电场的作用，运动方向和速度都发生变化，能量减低，多余的能量以 X 射线的形式辐射出来，称为韧致辐射 (bremsstrahlung)。

散射作用对测量和防护都有一定影响， $\alpha$  粒子由于质量大，散射一般不明显， $\beta^-$  粒子质量远小于  $\alpha$  粒子，散射较为明显；韧致辐射释放的能量与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。 $\alpha$  粒子质量大，一般能量较低，故韧致辐射作用非常小，可以忽略不计。 $\beta^-$  粒子的韧致辐射在空气和水中很小，但在原子序数较大介质中不可忽略，因此，在放射防护中，屏蔽  $\beta^-$  射线应使用原子序数较小的物质，例如塑料、有机玻璃、铝等。

##### 3. 湮灭辐射

$\beta^+$  衰变产生的正电子具有一定的动能，可在介质中运行一定距离 (最大可达几毫米)，能量耗尽时和物质中的自由电子结合，两个电子的静止质量 (相当于 1 022 keV 的能量) 转化为两个方向相反、能量各为 511 keV 的  $\gamma$  光子而自身消失，这叫做湮灭辐射 (annihilation radiation)。探测湮灭辐射产生的两个方向相反的  $\gamma$  光子是 PET 显像 (正电子断层显像) 的基础。

#### 4. 吸收作用

带电粒子通过物质时，与物质相互作用，能量不断损失，当射线能量耗尽后，带电粒子就停留在物质中，射线则不再存在，称为吸收（absorption）。射线被吸收前在物质中所行经的路程称为射程。射线的射程与射线的种类、射线能量、介质密度有关， $\beta^-$ 射线比 $\alpha$ 射线射程长。 $\beta^-$ 射线在空气中的射程可达数米，在生物体内也有数毫米至数十毫米，因此，在外照射的情况下， $\alpha$ 粒子的危害性不大，也易于防护，而 $\beta^-$ 粒子的危害性就大得多。在内照射的情况下， $\alpha$ 粒子的电离密度大，伤害很集中，应当特别注意。射线能量越高射程越长，介质密度越大射程越短，对射线吸收作用越强。

##### （二） $\gamma$ 射线与物质的相互作用

$\gamma$ 光子不带电，因此不像带电粒子那样通过静电作用发生电离，它必须与物质原子的电子碰撞才能发生电离，故其电离密度很小。 $\gamma$ 光子的电离机制主要有三种：光电效应（photoelectric effect）、康普顿效应（Compton effect）和电子对生成（electron pair production）。

##### 1. 光电效应

光子与物质原子的轨道电子（主要是内层电子）碰撞，把能量全部交给轨道电子，使之脱离原子，光子消失，这种作用过程称为光电效应。脱离原子轨道的电子称为光电子。发生光电效应后，原子内层轨道形成空轨道，外层轨道电子很快填充到空轨道中，从而释放出特征X射线或俄歇电子。

光电效应发生的几率与入射光子的能量以及介质原子序数有关，当光子的能量等于或略高于轨道电子的结合能时，发生光电效应的概率最大，光电效应发生的几率随原子序数的增高明显增大。对于核医学常用的 $\gamma$ 、X射线而言，在原子序数较高的物质中，光电效应占主要地位，在低原子序数的介质如水、生物组织中，几乎不发生光电效应，因此，在临床中，病人不会因光电效应完全吸收光子能量而导致辐射生物效应。光电效应在高原子序数的介质如碘化钠晶体、铅中发生几率高。 $\gamma$ 射线测量仪器的基本原理就是利用光子通过光电效应产生的光电子来探测 $\gamma$ 射线。

##### 2. 康普顿效应

能量较高的 $\gamma$ 光子与原子的核外电子碰撞，将一部分能量传递给电子，使之脱离原子轨道成为自由电子， $\gamma$ 光子本身能量降低，运行方向发生改变，称为康普顿效应（图2-2）。释放出的电子称做康普顿电子，入射光子经散射后称为康普顿散射光子。

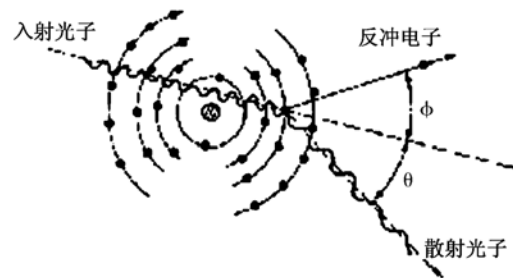


图2-2 康普顿效应示意图

康普顿效应发生的几率与光子的能量和介质的密度有关，当 $\gamma$ 光子的能量为500~1000 keV时，康普顿效应比较明显；介质的密度越高，康普顿效应越明显。

康普顿效应在核医学中是一种不利的效应，在 $\gamma$ 照相机探测中，由于康普顿效应使 $\gamma$ 射

线方向改变，可导致对显示的组织与病灶错误定位，并且使影像模糊。由于发生康普顿效应后  $\gamma$  射线能量降低，所以可以通过调节能窗大小消除大部分散射效应，但与入射  $\gamma$  光子能量相近的小角度散射的康普顿散射光子不易辨别。

### 3. 电子对生成

当  $\gamma$  光子能量  $> 1.022 \text{ keV}$  时（ $1.022 \text{ keV}$  相当于两个电子的静质量），其中  $1.022 \text{ keV}$  的能量在物质原子核电场作用下转化为一个正电子和一个负电子，称为电子对生成。余下的能量变成电子对的动能。

电子对生成的几率大约与原子序数的平方成正比。在核医学中，诊断用的  $\gamma$  射线一般能量较低，不发生电子对生成。

物质对  $\gamma$  光子阻挡能力用半值厚度表示，半值厚度是使  $\gamma$  光子活度减弱一半所需要的物质厚度。半值厚度与入射光子能量和介质密度有关，入射光子能量越低，介质密度越大则半值厚度越小，即物质对射线的阻挡作用越强。故  $\gamma$  射线常用密度大的物质进行防护。

## 四、辐射剂量学基础

利用射线对疾病进行诊断、治疗和研究时，射线能直接或间接引起人体组织的电离和激发，从而可能导致损伤。这需要对射线的不同空间部位（即辐射场）的辐射量以及可能导致的生物效应进行度量，以便对损伤的程度进行估价和采取适当的防护措施。电离辐射剂量就是用来描述辐射场的性质、辐射与物质相互作用时的能量的传递关系和反映与辐射效应相关的量。

### （一）照射量

照射量（exposure,  $X$ ）是直接度量 X 射线或  $\gamma$  射线对空气电离能力的量，是度量 X 射线、 $\gamma$  射线辐射场强度的物理量。其含义是：X 射线或  $\gamma$  射线在质量为  $dm$  的空气中释放出的全部正、负电子，完全被空气所阻止时形成的同种符号离子的总电荷绝对值  $dQ$  与空气质量  $dm$  之比。即：

$$X = dQ / dm$$

照射量的国际制单位是  $\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$ （库伦·千克<sup>-1</sup>）。旧的专用单位是 R（伦琴）、mR 或  $\mu\text{R}$ 。

$$1 \text{C} \cdot \text{kg}^{-1} = 3.876 \times 10^3 \text{ R}$$

单位时间内的照射量称为照射量率（ $\dot{X}$ ）， $\dot{X} = dX / dt$ 。

由于照射量只适用于 X 射线或  $\gamma$  射线，作用物质只适用于空气，故目前已不常用。

### （二）吸收剂量

吸收剂量（absorbed dose,  $D$ ）是反映被照射物质吸收电离辐射能量大小的物理量。其含义是：电离辐射授予单位质量物质的平均能量  $d\epsilon$  与该单位物质的质量  $dm$  之比，即：

$$D = d\epsilon / dm$$

吸收剂量的国际制单位是 Gy（戈瑞），1 Gy 即 1 kg 被照射物质吸收 1 J（焦耳）的辐射能量（ $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ），旧的专用单位是 rad（拉德）。

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

单位时间内的吸收剂量称为吸收剂量率（ $\dot{D}$ ）， $\dot{D} = dD / dt$ 。

### （三）当量剂量

当量剂量 (equivalent dose,  $H_{T,R}$ ) 是反映各种射线或粒子被吸收后引起的生物效应强弱的电离辐射量。它不仅与吸收剂量有关, 而且与射线种类、能量有关, 因为不同种类、能量的射线释出的能量在组织中的分布有明显差别, 所产生的生物效应在程度上可有明显的差别。如在相同吸收剂量的情况下,  $\alpha$  粒子比  $\beta^-$  粒子造成的伤害更集中, 因此生物效应更强。当量剂量是在吸收剂量的基础上引入一与辐射类型及能量有关的权重因子计算出来的。

辐射类型 R 在组织 (或器官) T 中产生的当量剂量由下式给出:

$$H_{T,R} = \omega_R \cdot D_{T,R}$$

式中,  $D_{T,R}$  称器官剂量, 是辐射 R 在组织或器官 T 中产生的平均吸收剂量,  $\omega_R$  是辐射权重因子, 与射线的种类和能量有关。

当量剂量的国际制单位是 Sv (希沃特),  $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。旧的专用单位为 rem (雷姆)。

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

单位时间内的当量剂量称为当量剂量率 ( $\dot{H}$ ),  $\dot{H} = dH / dt$ 。

#### (四) 有效剂量

当放射性核素进入体内时, 受照射者全身受到的内照射一般是非均匀性的, 其生物效应大小与放射性在体内的分布有关, 在当量剂量的基础上引入一与组织或器官对辐射的敏感度相关的权重因子即为有效剂量 (effective dose, E), 它是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 ( $H_T$ ) 与相应的组织权重因子 ( $W_T$ ) 乘积的总和。

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

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 (1 Sv) 在受照组织或器官中引起随机效应的几率, 称为危险度。例如:  $W_T$  值全身为 1、性腺为 0.20、乳腺为 0.05、甲状腺为 0.05、红骨髓及肺为 0.12 (ICRP 60 号出版物)。

## 第二节 电离辐射生物效应及防护

### 一、电离辐射生物效应

电离辐射生物效应是指电离辐射的能量传递给生物机体后所造成的后果。电离辐射生物效应一方面在医学中可被应用于疾病治疗, 另一方面又可导致人体的辐射损伤。

#### (一) 电离辐射生物效应的发生机制

电离辐射生物效应的发生机制可分为原发作用和继发作用两个方面。

##### 1. 原发作用

原发作用指机体在射线作用下, 能量的吸收、传递、转化及相应的生物大分子和细胞细微结构的损伤, 包括直接作用 (direct effect) 和间接作用 (indirect effect) 两个方面。

直接作用: 射线直接作用于具有生物活性的大分子, 如核酸、蛋白质等, 使其发生电离、激发或化学键断裂, 造成分子结构和性质的改变。