

军医专业五年制试用教材

原子、化学武器损伤防治学

医学防护教研室

中国人民解放军第一军医大学

中国科学院图书馆藏

原子、化学键与分子动力学

中国科学院图书馆藏

中国科学院图书馆藏——中国科学院

前 言

原子、化学武器损伤防治学是一门重要的军事医学课程，它是从医学的角度研究原子、化学武器的杀伤作用、防护措施和损伤救治，是为未来反侵略战争的需要而设置的。

本教材是根据军医大学五年制训练计划要求和原子、化学武器损伤防治学教学大纲规定而编写的。要求通过本课程的学习，使学员能正确认识原子、化学武器的杀伤性和可防性，学会对原子、化学武器损伤的医学防护原则和救治技术，在未来原子、化学武器战争中为全体军民服务。

为了使学员对所学的课程能加深理解和便于参考，我们对某些章节在内容的深广度上作了适当的扩充。因此，在讲授时要根据教学大纲要求作相应的取舍，某些部分标有△记号者仅供参考。有关具体操作方法和病历皆编入实验指导。

目 录

前 言

第一篇 原子武器损伤及其防治

第一章 放射物理学基础 (1)	
第一节 原子及原子核..... (1)	
第二节 核衰变类型及核衰变规律 (4)	
第三节 射线与物质的相互作用 (8)	
第四节 辐射剂量及其单位..... (12)	
第二章 原子武器及其致伤作用 ... (20)	
第一节 核武器的爆炸原理和 构造..... (20)	
第二节 核武器的分型和使用 (22)	
第三节 核武器的致伤因素及致 伤作用..... (26)	
第三章 光辐射和冲击波损伤 (36)	
第一节 光辐射烧伤..... (36)	
第二节 冲击伤..... (39)	
第四章 急性放射病 (42)	
第一节 概述..... (42)	
第二节 发病原理..... (46)	
第三节 主要病理改变..... (54)	
第四节 临床表现..... (64)	
第五节 诊断..... (69)	
第六节 治疗..... (74)	
第七节 药物预防..... (80)	
第五章 放射性落下灰对人体的危害 (84)	
第一节 皮肤的乙种射线损伤... (85)	
第二节 内照射损伤..... (87)	
第六章 慢性放射病 (96)	
第一节 临床表现..... (96)	
第二节 诊断..... (97)	
第三节 治疗和预防..... (99)	
第七章 核爆炸复合伤(101)	
第一节 核爆炸的综合致伤作用 (101)	
第二节 复合伤的临床经过和特 点 (103)	
第三节 复合伤的诊断 (106)	
第四节 复合伤的急救和治疗... (108)	
第八章 原子武器损伤的防护 (111)	
第一节 瞬时致伤作用的防护... (112)	
第二节 落下灰核辐射防护 ... (118)	

第二篇 化学武器损伤及其防治

第一章 化学武器损伤总論 (126)	第二节 化学武器的杀伤作用及 影响其作用的因素 ... (128)
第一节 化学武器损伤概述 ... (126)	

第三节	毒剂的毒理作用	· · · · ·	(132)	第三节	病理生理	· · · · ·	(204)
第四节	毒剂中毒的防护、诊断 与救治原则	· · · · ·	(135)	第四节	临床表现	· · · · ·	(206)
第二章	神经性毒剂中毒	· · · · ·	(137)	第五节	诊断	· · · · ·	(208)
第一节	概述	· · · · ·	(137)	第六节	急救和治疗	· · · · ·	(208)
第二节	中毒原理	· · · · ·	(140)	第七章	刺激性毒剂中毒	· · · · ·	(212)
第三节	病理学	· · · · ·	(146)	第一节	概述	· · · · ·	(212)
第四节	临床表现	· · · · ·	(148)	第二节	临床表现	· · · · ·	(215)
第五节	诊断及鉴别诊断	· · · · ·	(150)	第三节	诊断	· · · · ·	(216)
第六节	预防、急救和治疗	· · · · ·	(151)	第四节	急救和治疗	· · · · ·	(217)
第三章	糜烂性毒剂中毒	· · · · ·	(160)	第八章	化学性复合伤	· · · · ·	(218)
第一节	概述	· · · · ·	(160)	第一节	临床特点	· · · · ·	(218)
第二节	芥子气中毒	· · · · ·	(162)	第二节	化学性复合伤的急救和 处理原则	· · · · ·	(219)
第三节	路易氏剂中毒	· · · · ·	(171)	第九章	植物杀伤剂中毒	· · · · ·	(221)
第四节	诊断及鉴别诊断	· · · · ·	(173)	第一节	概述	· · · · ·	(221)
第五节	预防、急救和治疗	· · · · ·	(174)	第二节	毒理作用	· · · · ·	(223)
第四章	失能性毒剂中毒	· · · · ·	(179)	第三节	临床表现	· · · · ·	(223)
第一节	概述	· · · · ·	(179)	第四节	诊断与治疗	· · · · ·	(224)
第二节	毕兹中毒的原理	· · · · ·	(181)	第十章	化学武器的防护	· · · · ·	(225)
第三节	毕兹中毒的病理生理	· · · · ·	(183)	第一节	防护器材	· · · · ·	(225)
第四节	毕兹中毒的临床表现	· · · · ·	(185)	第二节	化学侦察	· · · · ·	(238)
第五节	毕兹中毒的诊断	· · · · ·	(185)	第三节	毒剂的消毒	· · · · ·	(240)
第六节	毕兹中毒的预防、急救 和治疗	· · · · ·	(186)	附录一	常用放射性核素主要 物理常数	· · · · ·	(243)
第七节	其他失能性毒剂中毒	· · · · ·	(188)	二、通用放射性核素衰变 计算表	· · · · ·	(245)	
第五章	全身中毒性毒剂中毒	· · · · ·	(191)	三、糜烂性毒剂中毒防治 用的各种药膏(水)的 配制法	· · · · ·	(246)	
第一节	概述	· · · · ·	(191)	四、主要消毒剂的应用	· · · · ·	(247)	
第二节	中毒原理	· · · · ·	(193)	五、饮水中各种毒剂的允 许浓度	· · · · ·	(248)	
第三节	病理生理	· · · · ·	(195)	六、每百升水消毒时所需 消毒剂用量	· · · · ·	(249)	
第四节	临床表现	· · · · ·	(196)				
第五节	诊断	· · · · ·	(197)				
第六节	急救和治疗	· · · · ·	(197)				
第六章	窒息性毒剂中毒	· · · · ·	(201)				
第一节	概述	· · · · ·	(201)				
第二节	中毒原理	· · · · ·	(203)				

第一篇 原子武器损伤及其防治

第一章 放射物理学基础

(The Fundamental of Radiation Physics)

第一节 原子及原子核

一、原子和原子结构

(一) 原子结构

世界上一切物质都是由元素所组成的,构成元素的最基本单位是该元素的原子。各种元素的原子,其性质不同,但结构都很相似,原子的中心是原子核,其外围有若干电子围绕并按一定的轨道运行。原子核在原子中所占的空间极小,直径只有 $10^{-13} \sim 10^{-12} \text{cm}$,比原子直径(10^{-8}cm)小一万倍,但它的质量几乎等于原子的质量。原子核带正电,电子带负电。原子的正电荷数与负电荷数相等,故呈中性。

核外电子以固定的轨道绕着原子核运行,每个轨道只能有一个电子。几条固定的轨道形成一个壳层。最靠近核的是K层,依次向外是L、M、N壳层等等。各层所容纳的电子数为 $2n^2$ 个, n 表示第几壳层数,但最外层电子总数不得超过8个。

(二) 原子的能级、激发和电离

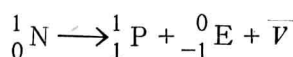
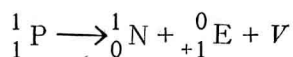
在某一壳层绕行的电子具有一定的能量,称为能级。同一壳层的电子能量相近,处于同一能级,不同壳层上的电子具有不同的能级。靠核最近的壳层其电子带有的能量最低,距核越远的壳层电子能量越高。电子吸收外来的能量从低能级升到高能级,称为原子的激发(excitation)。如果能量足够大,使电子脱离原子,这种作用称为电离(ionisation),这时的原子称为离子。如低能级壳层缺少电子,则高能壳层电子可跃迁回低能级,在这过程中,电子多余的能量以电磁辐射(electro-magnetic radiation)的形式放出。

(三) 原子核结构

原子核是由质子和中子组成的。质子带正电荷,与电子所带电荷数值相等,符号相反。中子不带电荷。质子和中子的质量差不多相等。原子核内质子和中子数目之和称为原子的质量数,用A表示;原子核的质子数即核电荷数,称为原子序数,用Z表示;中

子数为 $A-Z$ 。取 X 代表某元素，用 ${}^A_Z X$ 表示元素原子核的组成。例如， ${}^1_1\text{H}$ 表示元素氢原子组成，其原子序数为 1，质量数为 1，没有中子； ${}^{235}_{92}\text{U}$ 表示元素由铀原子组成，其原子序数为 92，质量数为 235，中子数为 143。又因为元素本身就确定了质子数，可以简便地只记元素符号和质量数 A ，如 ${}^1\text{H}$ 、 ${}^{131}\text{I}$ 、 ${}^{235}\text{U}$ 等。

质子 (p) 和中子 (n) 间能够相互转换，质子放出一个正电子而转变为中子，而中子放出一个负电子而转变为质子。在这两种情况中，还放出一个静止质量近于零的不带电的粒子——正中微子 ($\bar{\nu}$) 和反中微子 ($\bar{\nu}$)，它们的转化过程如下：



(四) 核素、同位素和同质异能素

具有一定质子数及质量数的原子称为核素 (nuclide)。例如 ${}^1\text{H}$ 、 ${}^2\text{H}$ 、 ${}^3\text{H}$ 、 ${}^{90}\text{Sr}$ 、 ${}^{131}\text{I}$ 表示不同的核素。核内含有相同质子数的原子，就属于同一种元素，同一种元素的原子，可能是不同的核素，对于核内质子数相同而中子数不同的核素，称为同位素 (isotope)。例如 ${}^1\text{H}$ 、 ${}^2\text{H}$ 、 ${}^3\text{H}$ 互称同位素 (图 1-1)。

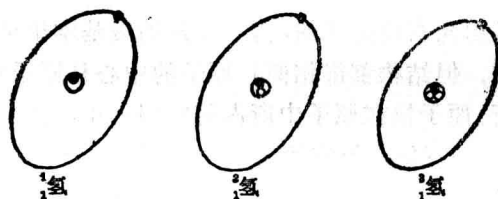


图 1-1 氢同位素 ${}^1\text{H}$ 、 ${}^2\text{H}$ 、 ${}^3\text{H}$ 的结构示意图

中子和质子数都相同的核素，它们的核所处的能量状态可能不一样，这样的核素互称为同质异能素 (isomer)。例如 ${}^{99}_{43}\text{Tc}^m$ (或 ${}^{99m}_{43}\text{Tc}$) 和 ${}^{99}_{43}\text{Tc}$ 两者能量不一样， ${}^{99m}_{43}\text{Tc}$ 具有的能量较高。

二、质量亏损和结合能

(一) 质量亏损

精确地测定质子、中子以及原子核的质量，发现原子核的质量常比组成它的粒子总质量要少一些。

如果原子核内有 Z 个质子和 $(A-Z)$ 个中子，原子核的质量为 M_A ，则它们结合前后的质量差为

$$\Delta M = (Zm_p + (A-Z)m_n) - M_A$$

式中差额 ΔM 称为质量亏损 (mass defect)。

(二) 结合能和核子平均结合能

根据爱因斯坦质量和能量连系定律 $E = mc^2$ 知道，任何具有 m 千克质量的物质 必定同时具有 mc^2 焦耳的能量。 $C = 2.9979 \times 10^8$ 米/秒，即光在真空中的速度。

在核子结合成原子核时，有 Δm 的质量亏损，也就是说，有 Δm 的质量减少了，这时必定有 ΔE 的能量释放出来，转变成其它形式的能量（如电磁辐射）。这种由核子结合成原子核时释放出来的能量，叫做原子核的结合能 (Binding energy)。结合能实质就是核子结合成原子核时，它们在核力的作用下所减少的势能。 ${}^4_2\text{He}$ 核的结合能为 28.2956 兆电子伏。

结合能既然表示核子结合成原子核时释放出来的能量，因此要使核内核子分散开来，就得给它这么多能量。这说明原子核是非常稳定的系统。各种核素的原子核其稳定程度不同。通常以每个核子的平均结合能表示原子核的稳定程度。原子核的结合能 ΔE 除以核内核子数，即为每个核子的平均结合能。例如 ${}^4_2\text{He}$ 核的核子平均结合能为：

$$\frac{\Delta E}{A} = \frac{28.2956}{4} = 7.0739 \text{ 兆电子伏}$$

图 1—2 为核子平均结合能与原子质量数的关系。

核子的平均结合能愈大表示这个原子核结合得愈紧密，原子核愈稳定；也表示核子结合成这个原子核时，释放出来的能量愈大。

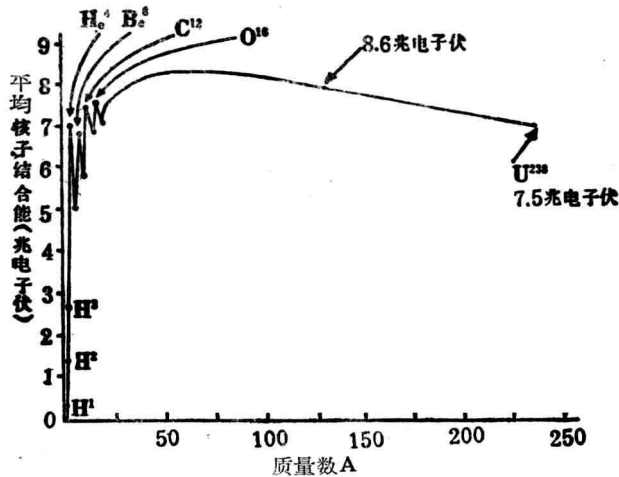


图 1—2 核子平均结合能曲线

从图 1—2 可见平均结合能是随原子质量数 A 增加而迅速增加。当质量数从 $A = 40$ 至 $A = 120$ 时，平均结合能增高到最大值，从 $A > 120$ 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，原子核可通过二种途径释放出来，即重核裂变 (fission) 和轻核聚变 (fusion)。

原子核由于外来原因，如带电粒子的轰击、吸收中子、高能光子照射等，引起核结构的变化，称为核反应（nuclear reaction），重核裂变和轻核聚变是两种重要的核反应。

第二节 核衰变类型及核衰变规律

一、核 衰 变 类 型

（一）核衰变和放射性

核素可分为二类：一类是稳定的，不发生自发的变化，称为稳定性核素；另一类是不稳定的，它的核可自发地转变为别的核素，同时放出射线，这类核素称为放射性核素，这个过程称为核衰变（nuclear disintegration），这种从放射性核素放出射线的性质称为放射性（radioactivity）。

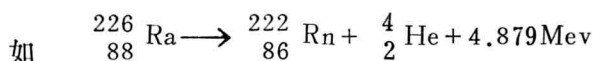
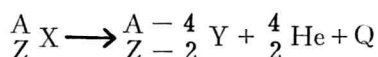
放射性核素在衰变过程中能从核内放出 α 粒子、 β 粒子、 γ 光子、 β^+ 粒子等一种或几种射线，这些射线具有下列性质：（1）能使气体及其他物质电离；（2）能使萤光体发萤光；（3）能使照相底片感光；（4）具有贯穿物质的本领；（5）能引起生物效应。

放射性核素可以是天然存在的，称为天然放射性核素，也可以是通过核反应人工产生的，称为人工放射性核素。

（二）核衰变类型

放射性核素的衰变类型主要有以下几种：

1. α 衰变 放射性核素的原子核放出一个 α 粒子的衰变过程称为 α 衰变。 α 粒子带有两个单位正电荷，它的质量数 $A=4$ ，实际上就是氦原子核（ ${}^4_2\text{He}$ ），以下式表示 α 衰变：



上式说明 α 衰变后，子核比母核少了两个中子和两个质子，其原子质量数减少4，原子序数减少2，即在元素周期表中的位置比母体移前两位。式中X代表母核，Y代表子核，Q表示衰变能，单位为兆电子伏（Mev）。

一般同一种核素放出的 α 粒子的能量是单一的。但当伴随着 γ 射线时，这样放出的 α 粒子会有几种能量值。

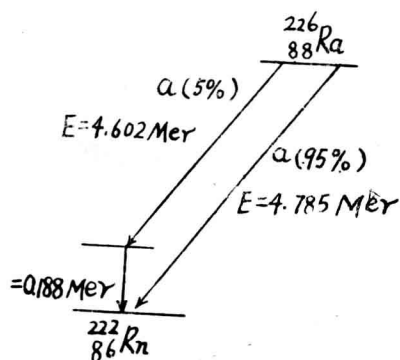
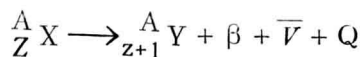


图 1—3 ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ 的衰变图

α 粒子电离能力强，射程短，穿透力弱，一张纸即能阻挡它的通过。

2. β 衰变 β 粒子实际上就是负电子 (e^-)，核内中子过多造成不平衡时，中子转变为质子放出 β 粒子，母核和子核的质量数 A 相同，原子序数增加 1，即在周期表中向后推移一位。 β 衰变可用下式表示：



如

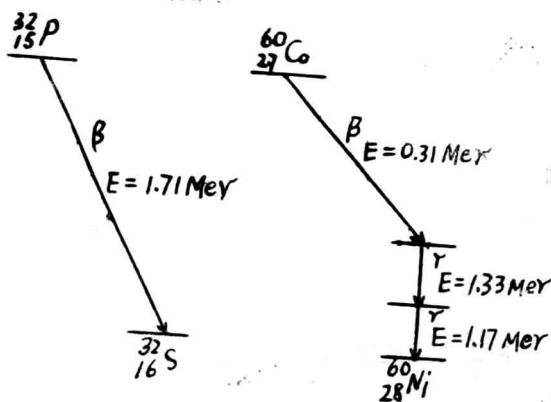
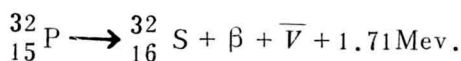


图 1—4 $\frac{32}{15}\text{P}$ 和 $\frac{60}{27}\text{Co}$ 的衰变图

式中 $\bar{\nu}$ 为反中微子，系质量极小的中性粒子。 β 衰变时释放出来的能量近似地等于 β 粒子和反中微子能量的总和 $Q \approx E_\beta + E_{\bar{\nu}}$ 。但能量在它们两者之间的分配是不固定的，因此同种原子核经过同一衰变方式放出的 β 粒子能量不是单一的，而是从零到某一最大值 E_0 ($E_0 \approx Q$) 各种数值都有。因此， β 粒子的各种能量是连续分布的，如图 1—5 所示，故称 β 粒子具有连续能谱。由图可见， β 粒子能量有一最大值 E_0 ，在小于 E_0 的 β 粒子中，以能量约为 $E_0/3$ 的粒子数最多。 β 粒子的平均能量也近似地等于 $E_0/3$ (即 $E_\beta = E_0/3$)。通常所说的放射性核素的 β 粒子能量指的是最大值。

β 粒子的电离能力较 α 粒子差得多，穿透能力则较 α 粒子强得多，可以穿透数毫米的铝箔。

3 β^+ 衰变与电子俘获 β^+ 粒子就是正电子 (e^+)，只有人工放射性核素有 β^+ 衰变，当原子核内质子相对过多而造成不平衡时，即放出 β^+ 粒子。其衰变方式如下：

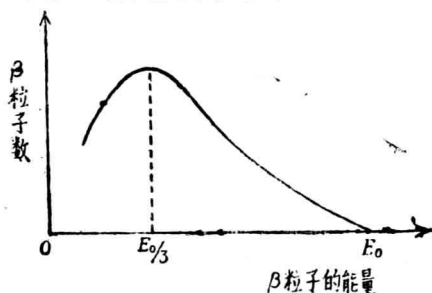
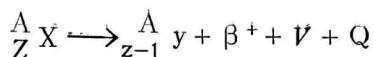
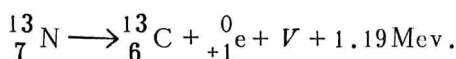


图 1—5 β 粒子能谱



如



β^+ 粒子的能谱也是连续的。

还有一种衰变，也是原子核内一个质子变成中子，只是不放出 β^+ 粒子，而是俘获轨道上（往往是K层）一个电子，使核内一个质子转变成中子。并放出中微子，这种衰变称为电子俘获。因为K壳层最靠近核，易于被俘获，所以又称为K电子俘获（K-capture）。 β^+ 衰变和电子俘获如图1—6和图1—7。

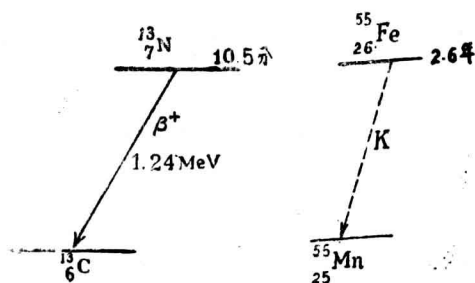


图1—6 ${}^{13}_7 \text{N}$ 的衰变图

图1—7 ${}^{55}_{26} \text{Fe}$ 的衰变图

4 γ 辐射与内转换电子

γ 射线是从原子核内放出的光子，常伴随 α 射线、 β 射线一起产生（见图1—3、4）。

在核衰变或核反应过程中，新生成的核可能处于激发态，当其由激发态跃迁到基态时就将多余的能量以 γ 射线的形式发出。与原子的能级跃迁相似，不过核的能级跃迁放出的光子能量要高得多。这种由于核能级跃迁而产生光子的过程称为 γ 辐射。 γ 光子对物质的电离能力很差，穿透力很强，可以穿过一定厚度的铅层。

激发态的核、还可以内转换电子方式将能量直接传给核外电子，把壳层电子发射出去。这种以内转换现象产生的电子称为内转换电子。

二、核衰变规律

（一）核衰变公式

放射性核素的原子核不断地自发地发生衰变，但原子核的衰变并不是同时发生，而是循一定的衰变规律衰变的。

放射性核素在单位时间内衰变的原子核数与在该时间内存在着的该原子数成正比，而按照负指数规律随着时间而减弱，可以下式表示：

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

式中 N_0 为原始放射性原子核数, N 是经过时间 t 以后的原子核数, λ 是衰变常数, 即表示每个原子核在单位时间内发生衰变的几率, 衰变快者 λ 值大, 衰变慢者 λ 值小, λ 值是每种放射性核素的特征常数。它不随外界条件的变化而改变。不同的放射性核素其 λ 值可以相差很大。

通常以物理半衰期 (half-life) ($T_{1/2}$) λ 表示放射性核素衰变速率, 物理半衰期是指放射性原子核数减少一半所需要的时间。 $T_{1/2}$ 和 λ 衰变常数之间的关系为:

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

每一种放射性核素都有其固定的 $T_{1/2}$, 如 $^{238}_{92}\text{U}$ 的半衰期长达 4.51×10^9 年, 而 $^{214}_{84}\text{Po}$ 的半衰期则短到 1.64×10^{-4} 秒。

将 (2) 代入 (1) 式可得:

$$N = N_0 e^{-0.693 \frac{t}{T_{1/2}}} \quad (3)$$

(二) 放射性强度单位

因为放射性核素只有在衰变时才放出射线来, 所以一个放射源的放射性强弱, 与单位时间内衰变的原子个数有关。放射源在单位时间内衰变的原子核个数叫做放射源的放射性强度 (activity)。常用的放射性强度的单位是居里 (Ci)。每秒钟有 3.7×10^{10} 次核衰变的任何放射性核素, 其强度为 1 居里。居里的单位较大, 应用时常采用毫居里 (mCi) 及微居里 (μCi)。

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ 核衰变/秒}$$

$$1 \text{ mCi} = 3.7 \times 10^7 \text{ 核衰变/秒}$$

$$1 \mu\text{Ci} = 3.7 \times 10^4 \text{ 核衰变/秒}$$

1974 年国际辐射单位与测量委员会 (ICRU) 规定放射性强度的国际制单位采用贝克勒尔 (Becquerel), 符号为 Bq。

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ 核衰变/秒}$$

因此 $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$

在单位质量内的放射性强度称为放射性比度或比放射性 (specific activity) (如 Ci/g 、 mCi/g 、 $\mu\text{Ci/g}$)。单位体积内所含的放射性强度称为放射性浓度 (如 Ci/ml 、 mCi/ml 、 $\mu\text{Ci/ml}$)。

(三) 放射性衰变的校正方法

放射性衰变的校正常常是在下述二种情况下进行, 一种是要知道某种放射性核素在经过若干时间后还剩下多少, 一种是知道了现在的放射性强度, 推求以前某时间的放射性强度。以 I_0 和 I 分别表示衰变前后的放射性强度, 则公式 (3) 也可以下式表示:

$$I = I_0 e^{-0.693 \frac{t}{T_{1/2}}} \quad (4)$$

式中 $e^{-0.693 t / T_{1/2}}$ 值随着 $t / T_{1/2}$ 值不同而变化, 将不同的 $t / T_{1/2}$ 比值代入, 可得一系列对应的 $e^{-0.693 t / T_{1/2}}$ 值, 由此制成通用放射性核素衰变计算表 (附录二)。因此,

在计算时只要先求出 $t/T_{1/2}$ 的比值,即可由表查得 $e^{-0.693t/T_{1/2}}$ 值。

【例 1】在一钴治疗机中, ^{60}Co 的放射性强度为 200 居里, 问经过 2.5 年后还有多少居里?

【解】已知 ^{60}Co 的 $T_{1/2} = 5.3$ 年

$$I_0 = 200 \text{ 居里}$$

$$t = 2.5 \text{ 年}$$

求 $I = ?$

$$\text{先求出 } t/T_{1/2} = \frac{2.5}{5.3} \approx 0.47$$

$$\text{查表得 } e^{-0.693 t/T_{1/2}} = 0.722$$

代入公式 (4)

$$I = I_0 e^{-0.693 t/T_{1/2}}$$

$$= 200 \times 0.722$$

$$= 144.4 \text{ 居里}$$

【例 2】 ^{32}P 出厂一星期后的放射性强度为 7.1 毫居里, 问出厂时为多少毫居里?

【解】已知 ^{32}P 的 $T_{1/2}$ 为 14.3 天

$$I = 7.1 \text{ 毫居里}$$

$$t = 7 \text{ 天}$$

求 $I_0 = ?$

$$\text{先求出 } t/T_{1/2} = \frac{7}{14.3} \approx 0.49$$

$$\text{查表得 } e^{-0.693 t/T_{1/2}} = 0.712$$

代入公式 (4)

$$I = I_0 e^{-0.693 t/T_{1/2}}$$

$$I_0 = \frac{7.1}{0.712}$$

$$\approx 10 \text{ 毫居里}$$

第三节 射线与物质的相互作用

(The Interaction of Ionising Radiations and Matter)

一、带电粒子与物质的相互作用

(一) 电离和激发

带电粒子如 α 粒子、 β 粒子、质子等在物质的原子中通过时, 在相互间的静电作用

下，原子核外轨道上的电子获得足够的能量而脱出原子壳层，成为自由电子，原子则成为带正电的离子，两者合称为离子对，形成离子对的过程称为电离。如果壳层电子所获得的能量比较小，不能够脱离原子变成自由电子，只能从内层轨道跃迁到外层轨道，使原来处于稳定状态的原子变成处于较高的能量状态，这种现象称为激发。这种原子所处的较高能量状态，称为激发态。处于激发态的原子极不稳定，很容易放出多余的能量（以标志X射线形式）恢复至基态。

（二）散射

带电粒子通过物质时，因受原子核电场的相互作用而改变运动方向，但能量不变，这种现象称为散射（scattering）。 β 粒子的质量远比 α 粒子为小，易受核电场的作用而发生散射，同时它与绕行电子作用也会发生散射，因此 β 粒子的径迹常是弯曲的。 α 粒子质量大，散射作用小，因此 α 粒子的径迹基本上都是直线形状。

（三）韧致辐射

快速带电粒子如 β 粒子如果射到原子序数较高的物质上，因受物质原子核电场的作用而突然降低速度时，它损失的能量将以电磁辐射的形式释放出来，这就是韧致辐射（dremssstrahlung）。X射线管发生的连续X射线也是韧致辐射。 α 粒子如速度足够大也能产生韧致辐射，但远少于 β 粒子。

二、 γ 射线与物质的相互作用

（一）光电效应

γ 光子和原子的壳层电子相碰撞把能量全部交给电子，使电子离开原子成为自由光电子，这个过程就称为光电效应。

（二）康普顿—吴有训效应

当 γ 光子与原子的壳层电子碰撞时，将部分能量交给电子，使之脱离核的束缚而从原子中逸出，这种电子称为康普顿电子，而光子本身能量减少，并且运动方向偏转。

（三）电子对生成效应

如果光子的能量大于 1.02 Mev ，当它经过原子核附近时，受原子核电场的作用，转变成一个正电子和负电子，这种过程称为电子对生成。在物质原子序数较大时，这种效应比较显著。

总的说来，光电吸收在光子能量较低的情况下是主要的；康普顿—吴有训效应在中等能量的光子是主要的；而电子对生成则必须在光子能量超过 1.02 Mev 后才开始出现，并且只有在能量很高时才占主要地位。这三种作用的强弱还与物质（吸收体）的原子序数 Z 有关，光电效应大致与 Z 的三次方成正比，康普顿—吴有训效应几乎与 Z 无关，而电子对生成则大致与 Z 成正比。

从上述三种作用方式可见， γ 光子与物质相互作用的结果，原始 γ 光子或者消失，或者转变为能量较低的光子，同时出现使物质中原子电离的高速正、负电子（称次级电

子)，这些次级电子再引起其他原子产生电离（称次级电离）。总之， γ 光子也是把它的能量最后消耗在电离作用上。

三、中子与物质的相互作用

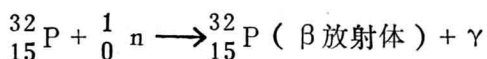
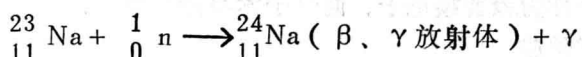
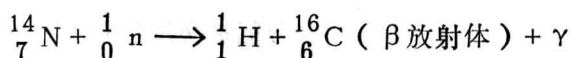
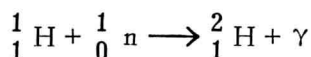
中子是不带电的粒子，不是通过静电引力与核外电子发生作用，而是在与原子核发生碰撞时，才能把它的能量传递给受碰撞的原子核。其与物质的相互作用主要是与物质原子核碰撞产生以下两种作用，即散射和俘获。

（一）散射

当快中子（能量较高的中子）与物质中的原子核碰撞时，中子将部分能量传给原子核。原子核接受了能量，成为反冲核，便摆脱电子壳层而单独运动，并在物质中引起强烈的电离作用。中子跟原子核经过多次碰撞，能量逐渐消失，速度逐渐减低，当最后成为能量较低的慢中子和热中子时，就很容易被原子核俘获，也就是被物质吸收。当中子同质量相近的氢核（即质子）相碰撞时，能量损失最大（平均可失去50%的能量），而跟重核碰撞时，则能量损失很少。例如要使能量为1 Mev的快中子减速为热中子，须与氢核碰撞25次，与氮核碰撞50次，与碳核碰撞125次，与铀核碰撞2500次。因此，中子容易被含有很多氢原子的轻物质（如水、石蜡等）所吸收。

（二）俘获

慢中子或热中子很容易被原子核俘获而引起核反应。核反应的产物可是稳定性核素或放射性核素，同时有 γ 射线等释放出来。放射性核素又能放出 β 、 γ 射线。它们都能在物质中引起电离作用。当中子流通过人体组织时，可以引起下列核反应：



这种被中子流照射而产生的放射性叫做感生放射性（induced radioactivity）；产生的放射性物质叫做感生放射性物质。

四、射线的吸收、射程和电离比度

（一）带电粒子的吸收、射程和电离比度

通过物质层的带电粒子流，由于电离、激发、散射和韧致辐射等作用，在入射方向上的粒子数将不断减少，这种现象称为物质对带电粒子的吸收（absorption）。

带电粒子通过物质时，由于电离作用，在它所经过的路径周围留下了许多离子对，每单位长度路径内所生成的离子对数叫做电离比度 (specific ionization) (离子对数/Cm)。电离比度的大小，决定于带电粒子的电荷、速度和被照物质的密度。粒子的电量多，速度小，物质的密度大，则粒子在物质中的电离比度大。因为粒子的电量多则作用于绕行电子的静电力大，速度小则作用时间长，物质的密度大则其中绕行电子密度也大，粒子对绕行电子的作用几率就大，因此产生的电离比度就大。 α 粒子在空气中的电离比度为40000个离子对/Cm，而 β 粒子为50个离子对数/Cm。

带电粒子在物质中所通过的最大厚度称为它在该物质中的射程 (range)，电离比度愈大，粒子的能量损失得愈快，射程就愈短，也即是易于被物质吸收。 α 粒子的电离比度大，因而它的射程很短，即贯穿本领很弱，易被物质吸收。 α 粒子在空气中的射程为10厘米，在组织内为0.03—0.07毫米，而 β 粒子在空中的射程为几米，在组织内为1厘米。

由此可见，在外照射的情况下， α 粒子的危害较小，稍加防护即可 (如戴薄膜手套)， β 粒子的危害比 α 粒子稍大，一般对 β 粒子的防护只需要几毫米的铝片即可，也可用有机玻璃等原子序数较低的物质防护，但不可只用铅防护，因为铅的原子序数高，被 β 射线照射容易产生韧致辐射，而韧致辐射的贯穿本领很强。至于在内照射的情况下，由于 α 粒子的电离比度大，所以危害性很大，因此对 α 放射源要防止侵入体内， β 放射源也一样要防止侵入体内。

(二) γ 射线和中子的吸收、射程和电离比度

γ 射线通过物质时，只有 γ 射线直接与绕行电子相碰撞或经过核附近才能耗损能量，产生次级电子。因此，其对物质原子的作用几率很小，不易被物质所吸收，贯穿物质的能力强。其电离作用是通过次级电子引起的，因此，其电离比度要比 β 粒子小得多，贯穿1厘米空气，只能产生1—2个离子对。 γ 射线在空气中的射程达几十—几百米，在组织内可以贯穿人体。图1—8为 γ 射线的减弱曲线，是按照负指数函数规律吸收的，不论 γ 射线通过的吸收体有多厚，其强度总不会减弱到零。因此，常用半吸收层 (half-value layer) (Δ) 来表示 γ 射线的贯穿本领，半吸收层就是使 γ 射线强度减弱一半的吸收体厚度。

中子通过物质时主要与原子核发生作用，与核碰撞后生成反冲核或被核俘获产生 γ 射线和放射性核素，然后由这些反冲核、 γ 射线和放射性核素放出的 β 、 γ 射线引起次级电离。中子容易贯穿重物质，但不容易贯穿含氢物质，也即易被含氢物质吸收。人体组织大都是含氢组织，因此中子流对人体组织的电离比度要比 γ 射线大得多。对中子的防护要用含氢多的轻物质 (一般用得最多的是水和石蜡)，而对 γ 射线则相反应用重物质如铅、铁和水泥等。

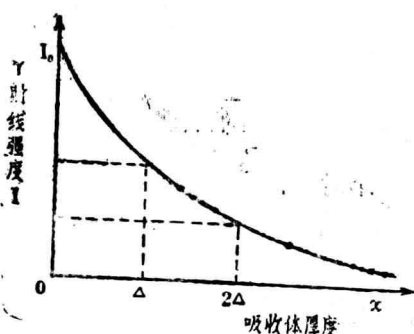


图1—8 γ 射线的减弱曲线

第四节 辐射剂量及其单位

一、照射量及其与放射性强度的关系

(一) 照射量及照射量率

X或 γ 射线在空气中由其次级电子产生的电离电荷可以用电离室测量出来。因此,很早以来就利用X或 γ 射线对空气产生电离作用的强弱,来度量某处照射X或 γ 射线的多少,由此形成了照射量(exposure)的概念。如果把射线照射所及之处看做是辐射场的话,则照射量就是辐射场的一种量度。照射量是以X或 γ 射线在每单位质量空气内释放出来的所有次级电子在空气中被阻时所产生的正离子或负离子的总电量表示,一般用X代表,即:

$$X = \frac{Q}{m}$$

式中m代表某体积内空气的质量, Q代表该体积内正离子或负离子的总电量。

照射量(X)的单位是伦琴(R)。它的定义是,当X或 γ 射线在每千克空气中产生的正离子或负离子的总电量为 2.58×10^{-4} 库伦时,其照射量为1伦琴。1伦琴的照射量也相当于每千克空气中产生 1.61×10^5 离子对。

1 伦 = 1000 毫伦

1 毫伦 = 1000 微伦

单位时间内的照射量称为照射量率(exposure rate),简称照射率或剂量率,以 $\dot{X}$ 代表,即:

$$\dot{X} = \frac{X}{t}$$

单位为伦/秒、伦/分和毫伦/小时等。

△(二) 照射率与放射性强度间的关系

1 照射率常数 γ 简称r常数,是用来联系 γ 辐射源强度与照射率的一个常数,是为了便于计算某一强度 γ 辐射源对某一距离处所产生的照射率而引入的一个概念。 γ (r常数)表示放射性强度为1居里的点状源在距离1米远的地方所产生的照射率(伦/小时),或放射性强度为毫居里的点状源在距离1厘米处的地方所产生的照射率(伦/小时)。 γ 的单位前者是 $\frac{\text{伦} \cdot \text{米}^2}{\text{小时} \cdot \text{居里}}$,后者为 $\frac{\text{伦} \cdot \text{厘米}^2}{\text{小时} \cdot \text{毫居里}}$ 。在数值上后一种表示

方法为前一种的10倍。

γ (r常数)是发射r射线的放射性核素的一种属性,不同放射性核素的 γ 值不同。
表1—1为一些发射r射线的放射性核素的 γ 值。