

预防医学高级函授系列教材

放射卫生学

芦春林 符绍莲 主编

北京医科大学预防医学函授部 编

中医古籍出版社

中华预防医学高级函授系列教材

放射卫生学

芦春林 符绍莲 主编

中医古籍出版社

前 言

放射卫生学是研究电离辐射与放射性核素对人群健康的影响、危害及其预防的科学。它是预防医学中的一门重要学科。

目前，电离辐射和放射性核素及核技术在我国农业、食品、化工、材料、石油、地质、医学、科研等领域已广泛应用。与此同时，需要普及放射卫生知识，还需要培养高级人才。

为了培养人才，加强放射卫生理论和防护技能知识，我们为预防医学专业大专班编写了“放射卫生学”教材，该书也可供从事放射医学、核医学及环境保护等工作的科技人员和有关专业师生参考。

本书共分五章，第一章放射物理学基础；第二章电离辐射与人体健康；第三章放射防护标准；第四章外照射效应与防护；第五章内照射效应与防护；每章有复习题，书后有附录。

书中插图由芦冀、薛梅绘制。

由于编者水平和时间所限，书中有不当之处，请批评指正。

编者 1988.10

目 录

第一章 放射物理学基础	(1-16)
一、放射性	(1)
(一)什么是放射性	(1)
(二)放射线的种类	(1)
(三)放射性的产生	(2)
(四)衰变定律	(3)
二、射线与物质的相互作用	(5)
(一)带电粒子与物质的相互作用	(5)
(二) α 、 γ 射线与物质的相互作用	(7)
(三)中子与物质的相互作用	(8)
三、辐射量与单位	(8)
(一)放射性活度	(8)
(二)照射量	(9)
(三)吸收剂量	(9)
(四)剂量当量	(10)
四、放射线的探测	(12)
(一)电离室探测器	(12)
(二)闪烁探测器	(13)
(三)半导体探测器	(14)
(四)热释光剂量仪	(15)
复习题	(15)
第二章 电离辐射与人体健康	(17-43)
一、作用于人体的电离辐射源	(17)
(一)天然辐射源	(17)
(二)人工辐射源	(19)
二、电离辐射与人体健康	(21)
(一)辐射生物效应的分类和特点	(22)
(二)电离辐射生物效应的影响因素	(22)
(三)辐射生物效应的机理	(26)
(四)介绍常见的几种效应	(30)
复习题	(42)
第三章 放射防护标准	(44-56)
一、放射防护标准的历史回顾	(44)
二、有关重要概念	(45)
(一)非随机性效应	(45)

(二)随机性效应·····	(47)
(三)危险度·····	(47)
三、放射防护的目的及基本原则·····	(50)
(一)放射防护的目的·····	(50)
(二)放射防护的基本原则·····	(51)
四 剂量限值·····	(51)
(一)放射工作人员的剂量限值·····	(51)
(二)公众中个人的剂量限值·····	(53)
五、放射性物质表面污染的控制水平·····	(53)
六、放射工作人员的健康管理·····	(54)
(一)健康管理的意义和目的·····	(54)
(二)健康管理的内容及范围·····	(54)
(三)常规医学监督·····	(55)
(四)异常受照人员的医学处理·····	(56)
复习题·····	(56)
第四章 外照射效应与防护·····	(57-68)
一、外照射的概念及作用特点·····	(57)
二、小剂量外照射的生物效应·····	(58)
(一)一次或分次照射对人体的影响·····	(58)
(二)长期职业照射对机体的影响·····	(59)
三、外照射防护·····	(61)
(一)外照射防护的基本原则·····	(61)
(二)对几种电离辐射的屏蔽防护·····	(62)
(三)医疗照射与医用辐射防护·····	(63)
复习题·····	(67)
第五章 内照射效应与防护·····	(69-95)
一、放射性核素的吸收、分布及排出·····	(69)
(一)吸收·····	(69)
(二)分布·····	(70)
(三)排出·····	(71)
二、放射性核素内照射效应与损伤·····	(71)
(一)可发生体内放射性污染的人员·····	(71)
(二)内照射损伤的特点·····	(72)
(三)放射性核素内照射效应与危害·····	(72)
三、设计与建造的防护要求·····	(76)
(一)放射性核素的毒性分组·····	(76)
(二)开放型放射工作单位分类及其工作场所分级·····	(77)
(三)开放型放射工作场所的配置与设施·····	(79)
四、个人防护及安全操作规程·····	(80)

(一)个人防护.....	(80)
(二)安全操作规程.....	(80)
(三)事故处理.....	(81)
五、放射性核素的运输、储存与保管.....	(82)
六、放射性表面污染的去除.....	(82)
(一)常用的去污方法及去污剂.....	(83)
(二)皮肤除污染.....	(84)
(三)物体除污染.....	(84)
七、放射性《三废》处理.....	(84)
(一)放射性《三废》的来源及特点.....	(86)
(二)放射性废水(废液)的处理.....	(86)
(三)放射性废气的处理.....	(87)
(四)放射性固体废物的处理.....	(87)
八、临床核医学科(同位素室)的防护.....	(88)
(一)核医学科的建筑、设施要求.....	(88)
(二)核医学科医护人员的防护.....	(88)
(三)患者及非诊疗人员的防护.....	(91)
复习题.....	(94)
附录	(96—109)
附录一 职业射线工作人员的医学检查.....	(96)
附录二 常用放射性废水排放的参考值.....	(97)
附录三 通用放射性核素衰变计算表.....	(98)
附录四 主要放射性核素的某些物理和生物学参数表.....	(100)
附录五 γ 射线(宽束)在不同的减弱倍数K时铅的厚度 (cm).....	(107)
附录六 γ 射线(宽束)在不同的减弱倍数K时铁的厚度(cm).....	(108)
附录七 γ 射线(宽束)在不同的减弱倍数K时水泥的厚度(cm).....	(109)

第一章 放射物理学基础

一、放射性

(一) 什么是放射性

在介绍什么是放射性以前,需先介绍核素和同位素的概念。

1. 核素(nuclide) 核内具有一定质子数、一定质量数及一定能量状态的原子,称为核素。换句话说,核的质子数、质量数和能量状态三者完全相同的原子,属于一种核素。例如, ^1H 、 ^2H 、 ^3H 、 ^{12}C 、 ^{13}C 、 ^{14}C 为六种不同的核素。因此,一种化学元素可以有多种不同的核素。

核素常用符号 ${}_Z^AX$ 来表示,其中X为化学元素符号,Z为原子序数,A为质量数。因为元素符号X本身就确定了原子序数,所以通常Z可以省略不写。

2. 同位素(isotope) 核内质子数相同,质量数不同(即中子数不同)的核素,称为同位素。它们在元素周期表上处于同一位置。例如, ^1H 、 ^2H 、 ^3H 互称同位素。每种化学元素都有几种或几十种同位素。

3. 放射性(Radioactivity) 某些核素的原子核,能自发地、不断地放出射线的性质称为放射性。放出的射线称为放射线。放射线用肉眼看不见,具有一定的穿透能力,能透过黑纸使底片感光,能使空气或其它物质电离,能激发荧光物质发出荧光。

具有放射性的核素称为放射性核素(Radionuclide);具有放射性的同位素称为放射性同位素(radioisotope);而不具有放射性的核素或同位素分别称为稳定性核素或稳定性同位素。例如, ^3H 、 ^{14}C 、 ^{60}Co (钴-60)、 ^{226}Ra (镭-226)为四种放射性核素; ^1H 、 ^4He 、 ^{12}C 、 ^{13}C 为四种稳定性核素。目前,在已发现的2000多种核素中,稳定性核素有近三百种,放射性核素有1700多种。而放射性核素中,大多数是用人工方法产生的人工放射性核素。

(二) 放射线的种类

放射性核素放出的射线究竟是什么呢?为了弄清这个问题,可做如下实验(见图1-1):

将放射性核素镭放在一个带有小孔的铅块内,把铅块置于正负两块电极板之间,则可以发现由铅孔中放射出的射线分为三束。向负极偏转的射线称为 α 射线,向正极偏转的射线称为 β 射线,不受电场影响的射线称为 γ 射线。很明显, α 射线带正电荷, β 射线带负电荷, γ 射线不带电荷。

α 射线照射于荧光屏上,可以看到一个个的闪光点,这说明 α 射线是一种粒子流。因此, α 射线又称为 α 粒子。实验证明 α 粒子是高速飞行的氦原子核(${}^4_2\text{He}$),它的质量数为4,带2个正电荷。 α 粒子穿透力很弱,一张普通的纸就可阻挡住,因此, α 射线很容易被物质吸收。但 α 粒子的电离本领很大,所以 α 粒子进入人体后造成的内照射危害最大。

实验证明 β 射线是电子流,每个 β 粒子就是一个电子,带一个负电荷。 β 粒子比 α 粒子小得多,它的穿透力比 α 粒子要大得多,能透过一定厚度的铝箔,所以 β 射线有一定的外照

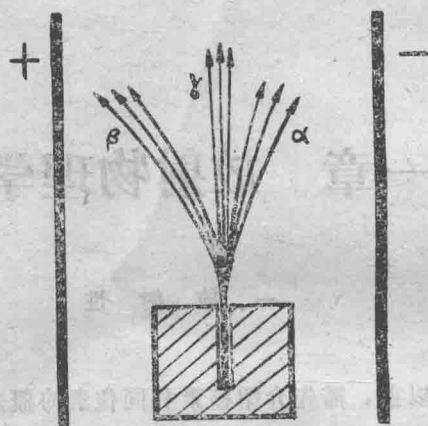


图1-1 射线在电场中的偏转

射危害。

γ射线是一种电磁辐射，或看作一种光子流，本身不带电。γ射线的传播速度与光速相等，具有极强的穿透能力。γ射线可在人体外部对人造成照射危害，是外照射防护的主要对象。

以上是放射性核素自然衰变时产生的三种射线，此外，还有自然衰变和人工制造产生的X射线、正β粒子(带一个正电荷的正电子)、中子和质子等几种不同的射线。

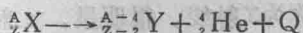
X射线同γ射线一样，属于电磁辐射，或称光子流。X射线和γ射线没有本质上的区别，只是在产生机制上不同。产生于原子核内的称γ射线，产生于原子核外的称X射线。

(三) 放射性的产生

放射性核素自发地放出某种射线而转变成另一种核素的过程称为核衰变(decay)。发生核衰变的放射性核素称为母体或母核，衰变形成的新核素称为子体或子核。如果放射性核素的核子(即质子和中子)总数过多，或者中子数和质子数的比例不当；中子数过剩或不足，则核便不稳定而发生核衰变。核衰变的方式有以下几种。

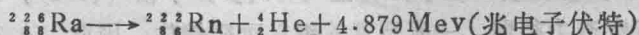
1. α衰变

放射性核素的原子核放出一个α粒子，而形成新的原子核的过程称为α衰变。如上所述，α粒子(${}^4_2\text{He}$)为氦原子核，含有两个质子，两个中子，带两个正电荷，质量数为4。因此，形成的新的原子核Z减2，而A减4。α衰变过程可用公式表示如下，此类公式称为衰变公式。



式中X代表母核，Y代表子核，Q代表衰变过程中核内释放出来的能量，称为衰变能。

例如：

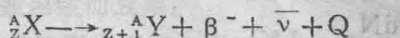


α衰变时放出的α粒子，其所具有的能量是单一的一种或有限的几种，因此，其能谱是不连续的。

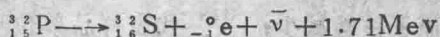
原子序数大于82，且核子总数过多的核素常发生α衰变。

2. β 衰变

(1) β^- 衰变 原子核放出一个 β^- 粒子形成新的原子核的过程称为 β^- 衰变。原子核内本来没有 β^- 粒子存在, 它是由一个中子转化为质子时放出的。 β^- 粒子实际上就是负电子, 它带一个负电荷, 而质量很小很小, 可忽略不计。因此, 形成的子核 Z 加 1, 而 A 不变。可用下式表示。



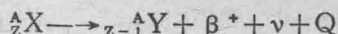
例如:



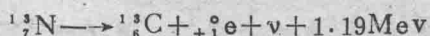
式中 $\bar{\nu}$ 为反中微子, 是静止质量近似为零的中性粒子。 β^- 衰变时, 其衰变能 Q 随机分配给 β^- 和 $\bar{\nu}$, 因此 β^- 粒子的能量分布是由 0 到 Q 的连续能谱。

核内中子过多的核素常发生 β^- 衰变。

(2) β^+ 衰变 β^+ 衰变是母核内一个质子转化成中子, 放出一个 β^+ 粒子而形成新的原子核的过程。 β^+ 粒子实际上是正电子, 带一个正电荷, 而质量亦可忽略不计。所以, 子核的原子序数 Z 减 1, 而质量数 A 不变。可用下式表示:



例如:

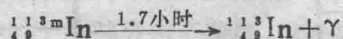
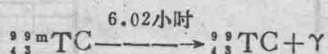


式中 ν 为中微子, 也是静止质量近似为零的中性粒子。 β^+ 衰变时, 衰变能 Q 亦随机分配给 β^+ 和 ν , 所以 β^+ 粒子的能谱也是连续的。

核内中子不足的核素常发生 β^+ 衰变。

3. γ 衰变

原子核以放出 γ 射线的方式释出能量, 从激发态回到基态的过程称为 γ 衰变。 γ 衰变的特点是原子核的能量状态发生了改变, 而其原子序数和质量数均无改变。多数放射性核素在发生 α 衰变和 β 衰变后, 子核处于激发态、常常会放出 γ 射线而跳回基态。因此, α 和 β 衰变尤其是 β 衰变常伴有 γ 衰变发生。 α 和 β 衰变后形成的子核大多处在激发态的时间很短 (10^{-11} 秒) 便发生 γ 衰变。因此, 很难把子核的 γ 衰变和母核的 α 或 β 衰变分离开来。但也有些子核在激发态停留的时间较长, 可以单独测出其存在的时间。例如:



式中在核素质量数的后面加一个字母 m , 表示原子核处于激发态或亚稳态。式中标出的时间表示处于激发态或亚稳态的核素转变成基态核素的半衰期。半衰期的概念下节介绍。

(四) 衰变定律

放射性核素的原子核不断地、自发地发生衰变。衰变的结果使原来的放射性核素在数量

上不断减少，新的核素不断生成。原子核的衰变并不是所有的核同时衰变，放射性核素中任意一个原子核的衰变，可能在这时也可能在那时发生，是完全随机的。但对于大量的原子核来说，各种核素的衰变均遵循一种普遍的衰减规律。

研究结果表明，对于同一种放射性核素来说，若放射核总数为 N ，在短时间间隔 dt 内，发生衰变的原子核数为 dN ，则有：

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \tag{1}$$

式中负号表示衰变使原有的原子核数减少； $\frac{dN}{dt}$ 代表样品单位时间内衰变的原子核数，称为样品的放射性活度； λ 称为放射核素的衰变常数(decay constant)，它的物理意义是单位时间内每一个原子核的衰变几率。对于某种特定的放射性核素， λ 是一个固定不变的常数。反过来说，每种放射性核素都有自己特定的衰变常数。它决定着该核素衰变的快慢，不受外界条件的影响。

(1) 式表明，样品的放射性活度与放射核总数 N 成正比，比例常数就是 λ 。

(1) 式又可写成：

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \tag{2}$$

对(2)式进行积分，可得：

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \tag{3}$$

这个公式就是放射性核素的衰变定律。式中 N_0 为 $t=0$ 时即初始的放射核数； N 为衰变 t 时间后的放射核数； t 为衰变时间； e 为自然对数的底数。衰变定律表明，未衰变的放射核数 N 是按照时间 t 的指数函数而衰减，即 t 按算术级数增加时，而 N 按几何级数减少。函数曲线如图1-2所示。若将图中纵座标改为对数座标，可得一直线，如图1-3。

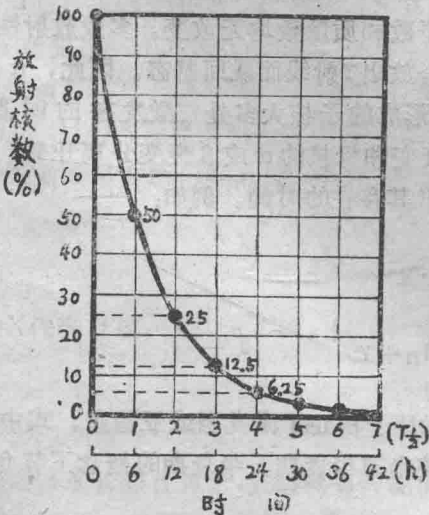


图1-2 ^{99m}Tc 衰变曲线(普通座标)

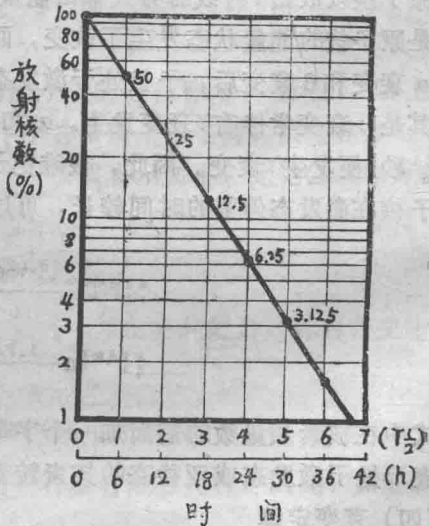


图1-3 ^{99m}Tc 衰变曲线(半对数座标)

由于实际工作中样品的放射性活度比未衰变的放射核数更具有意义，所以衰变定律又常用放射性活度的表达式来表示。将(3)式两侧同乘 λ ，并以符号 A 代表放射性活度，得：

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (4)$$

式中 A_0 为 $t=0$ 时即初始的放射性活度； A 为衰变 t 时间后的放射性活度。(4)式表明放射性活度也是按时间 t 的指数函数而衰减。

除衰变常数 λ 以外，通常还用半衰期来表示放射性核素的特征。放射性核素的原子核数由于衰变而减少到原来的一半所需要的时间称为半衰期(half-life)。以符号 $T_{1/2}$ 表示。每一种放射性核素都有自己的半衰期。半衰期越短，说明放射性核素衰变的越快。实际工作中常用半衰期，而很少用衰变常数来表示核素衰变的速度。

将 $t = T_{1/2}$ 时， $N = \frac{1}{2} N_0$ 。代入(3)式，可推得 $T_{1/2}$ 和 λ 的相互关系：

$$T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (5)$$

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}} \quad (6)$$

将(6)式代入(4)式，得：

$$A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\frac{0.693}{T_{1/2}} t} = A_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T_{1/2}}} \quad (7)$$

在实际工作中，已知原始放射性活度 A_0 ，求衰变 t 时间后的放射性活度 A ，可根据(7)式用电子计算器计算求得。也可用查表法，即查《通用放射性核素衰变计算表》(书后附录三)而求得。应注意，无论是计算还是查表，在求 $\frac{t}{T_{1/2}}$ 时， t 和 $T_{1/2}$ 二者的单位都应一致。

比如， $T_{1/2}$ 的单位是天， t 的单位也应用天；若 $T_{1/2}$ 的单位是小时， t 的单位也应用小时。

二、射线与物质的相互作用

放射线无论是带电的 α 、 β 射线，还是不带电的 X 、 γ 及中子射线都能穿透物质并和物质相互作用，产生物理学和生物学效应。了解射线与物质相互作用的各种效应，对于学习射线的探测、应用和防护是非常必要的。

(一)带电粒子与物质的相互作用

1、电离(ionization)与激发(excitation) α 、 β 等带电粒子高速穿过物质时，由于静电的作用，可使物质中原子的核外电子获能，摆脱原子核的束缚成为自由电子，从而产生由自由电子和正离子组成的离子对，这种作用叫电离[如图1-4(1)]。通常把入射带电粒子对物质原子的电离作用称为直接电离或初级电离(initial ionization)，而把由直接电离产生的具有一定动能的自由电子，进一步对物质的其它原子的电离作用称为次级电离(secondary ionization)。带电粒子穿过物质时，在其单位长度路径上所产生的电离离子对数，叫做电离密度(specific ionization)。它代表入射粒子电离作用的大小。

如果带电粒子通过物质时,使物质核外电子获得的能量不足以成为自由电子,而只是使它由较低能级的轨道跳到较高能级的轨道,这种作用称为激发〔如图1-4(2)〕。因核外电子被激发而处于激发态的原子极不稳定,很容易放出多余的能量而恢复至基态。

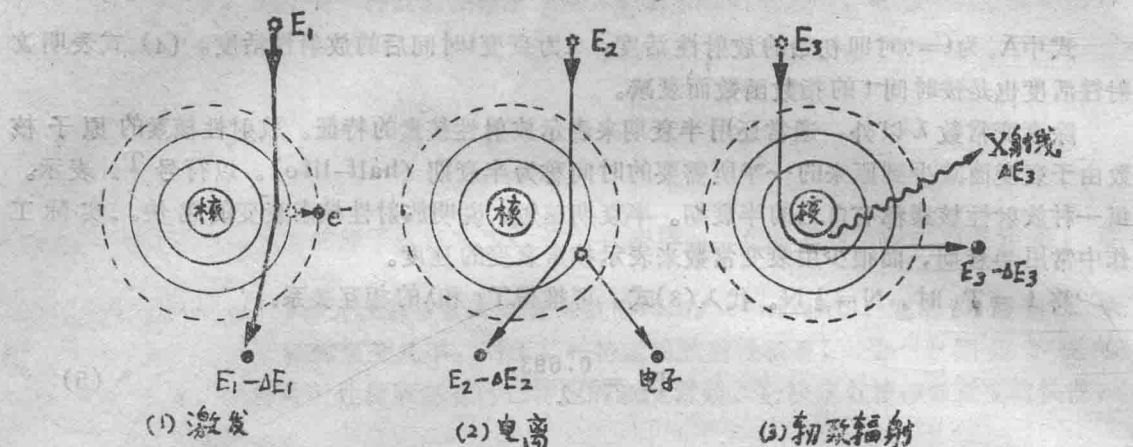


图 1-4 带电粒子与物质的相互作用

带电粒子穿过物质时,由于电离和激发,其能量会逐渐损失。在其单位长度路径上,带电粒子的能量损失,叫做传能线密度(linear energy transfer; LET)。LET值与入射粒子的电荷、质量、能量以及被作用物质的密度有关。 α 粒子所带电荷量多,质量重,所以对于同种被作用物质, α 粒子的LET值远大于 β 粒子,因而 α 粒子穿透力很弱,易被物质吸收,而 β 粒子穿透力较强。LET和射线对生物机体的损伤有密切关系,在相同的吸收能量下, α 粒子的生物学效应较 β 粒子要大。

2. 散射(scattering) 带电粒子在通过物质时,受到核外电子特别是原子核的静电力作用而改变运动方向,这种现象称为散射。散射的特点是带电粒子没有能量损失,只是改变了运动方向。 α 粒子的质量比核外电子大得多,所以核外电子不致引起 α 粒子的散射; α 粒子经过原子核旁时,会发生小角度的偏转。因而, α 粒子的径迹大多近似于一条直线。 β 粒子质量与核外电子相同,因此, β 粒子散射作用显著, β 粒子的径迹是弯弯曲曲的。

3. 韧致辐射(bremsstrahlung) 高速运动的带电粒子通过物质时,受到物质原子核电场的阻滞而被突然减速,其运动方向发生大的偏转,同时,带电粒子的一部分动能转化为电磁辐射或称X射线,这种辐射称为韧致辐射〔如图1-4(3)〕。其X射线的能量分布是连续的。入射粒子的能量越高,所作用物质的原子序数越大,产生的韧致辐射就越强。所以,在防护高能 β 射线时,应选择原子序数低的有机玻璃、铝等作为屏蔽材料,而不用原子序数高的铅、铁等材料,以防产生韧致辐射。

医疗上用以诊断和治疗的X射线机就是利用韧致辐射原理产生X射线的。X射线机的球管内有一真空管,管内有阴阳两极,两极间加上数万伏的电压。由阴极产生的电子在高压电场的作用下,高速射向阳极,打在阳极原子序数很高的钨靶上而被突然减速,产生韧致辐射,放出X射线。

带电粒子通过物质时,由于电离、激发、散射、韧致辐射等一系列与物质的相互作用,最终逐渐失去全部能量而被物质吸收。带电粒子在物质中沿着最初入射方向所能穿行的最大

直线距离，称为带电粒子的射程(range)，见图1-5所示。

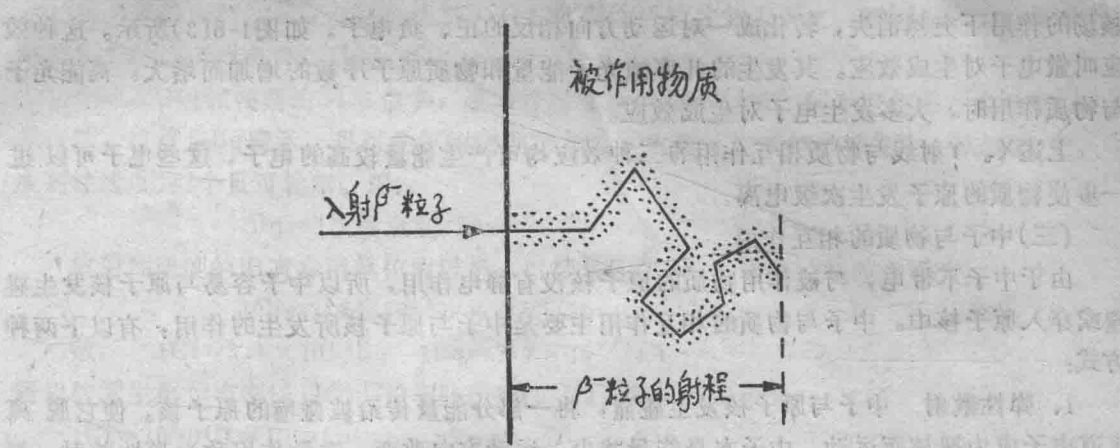


图1-5 β 粒子的射程

(二) X、 γ 射线与物质的相互作用

X、 γ 射线和物质的相互作用主要有以下三种效应，其发生几率随入射光子的能量和被作用物质的原子序数不同而变化。

1. 光电效应(Photoelectric Effect) 光子和物质原子内层轨道电子相互作用，把其全部能量交给一个电子，使该电子脱离原子成为自由电子，光子本身被吸收。这种效应叫做光电效应，光电效应中产生的自由电子称为光电子，如图1-6(1)所示。光电效应主要发生在低能光子与物质相互作用时。光子的能量越低，物质的原子序数越大，发生光电效应的几率越大。

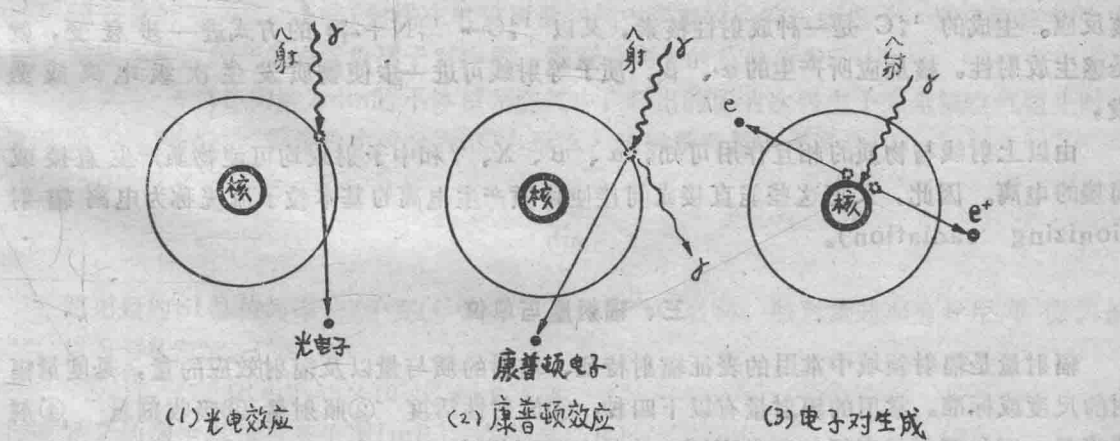


图1-6 X、 γ 射线与物质的相互作用

2. 康普顿效应(Compton Effect) 光子和物质原子的一个外层轨道电子发生碰撞，光子将其一部分能量传给电子，使该电子脱离原子成为自由电子，光子本身能量减少，运动方向改变。如图1-6(2)所示。这种效应称为康普顿效应，康普顿效应产生的自由电子称为康普顿电子。中等能量的光子与物质作用时，主要是康普顿效应。康普顿效应的发生几率与物质的原子序数关系不大，而与物质的密度近似成正比。

3. 电子对生成效应(Production of an Electron-Positron Pair) 当能量大于

两个电子的静止能量1.02 Mev(兆电子伏特)的入射光子穿过原子核时,光子能够在极强的核场的作用下突然消失,转化成一对运动方向相反的正、负电子。如图1-6(3)所示。这种效应叫做电子对生成效应。其发生的几率随光子能量和物质原子序数的增加而增大。高能光子与物质作用时,大多发生电子对生成效应。

上述X、 γ 射线与物质相互作用的三种效应均可产生能量较高的电子,这些电子可以进一步使物质的原子发生次级电离。

(三)中子与物质的相互作用

由于中子不带电,与被作用物质的原子核没有静电作用,所以中子容易与原子核发生碰撞或穿入原子核中。中子与物质的相互作用主要是中子与原子核所发生的作用,有以下两种方式:

1、弹性散射 中子与原子核发生碰撞,将一部分能量传给被碰撞的原子核,使它脱离轨道电子成为裸核而运动,中子本身能量减少,运动方向改变,这种作用称为弹性散射。弹性散射所产生的裸核称为反冲核。反冲核在物质中的快速运动,能进一步引起物质电离和激发。

中子与氢原子核碰撞所产生的反冲核称为反冲质子。因为中子与氢核质量相当,所以碰撞后中子能量损失很大,反冲质子得到的能量也很大;而中子与质量巨大的重核相碰撞时,仅仅失去一小部分能量,所以中子很容易被含氢多的轻物质如水、石蜡等吸收,却能穿透很厚的重物质如铅等。这一点,在中子防护上需加以注意。

2、核反应 中子打入原子核中,使原子核放出 α 、 β 或质子等射线,形成新核。中子射线对物质的这种作用称为核反应。如果形成的新核是放射性核素,新核可继续衰变,放出射线,这种现象叫做感生放射性。例如: ${}^1_0\text{N} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^1_6\text{C} + \text{P}(\text{质子})$,这是中子核反应。生成的 ${}^1_6\text{C}$ 是一种放射性核素,又以 ${}^1_6\text{C} \rightarrow {}^1_7\text{N} + {}^0_{-1}\text{e}$ 的方式进一步衰变,就是感生放射性。核反应所产生的 α 、 β 、质子等射线可进一步使物质发生次级电离或激发,

由以上射线与物质的相互作用可知, α 、 β 、X、 γ 和中子射线均可使物质产生直接或间接的电离。因此,又把这些能直接或间接使物质产生电离的基本粒子流统称为电离辐射(ionizing radiation)。

三、辐射量与单位

辐射量是辐射领域中常用的表征辐射特征、辐射的质与量以及辐射效应的量,是度量辐射的尺度或标准。常用的辐射量有以下四种:①放射性活度 ②照射量 ③吸收剂量 ④剂量当量。四种辐射量表征的意义不同,单位也各不相同。

1974年,国际辐射单位与测量委员会(ICRU)提出建议,要在若干年后用国际制单位(SI单位)取代旧有的辐射量专用单位。在尚未取消旧有专用单位的过渡时期中,新旧辐射量单位可以并用。

(一)放射性活度(radioactivity)

放射源单位时间内衰变的原子核数称为放射性活度,以A表示。放射性活度用来度量和表示放射源的强弱,过去叫放射性强度。

由于不同放射性核素的半衰期不同,所以不同的核素即使原子核数相同或重量、体积相

同，而在同样时间内衰变的原子核数却会大不相同。因此，放射性核素的重量、体积及原子核数都不能确切表示其放射性的强弱，只有放射性活度才能表示之。实际工作中，样品的放射活度可通过仪器测量而得知。

在ICRU建议使用的SI单位中，放射性活度的单位为1/秒，其专用名称为贝可勒尔，简称贝可，以符号Bq表示。贝可勒尔的物理意义为：放射性核素每秒钟发生一次核衰变，其放射性活度为1个贝可勒尔。即：

$$1\text{Bq}=1\text{次核衰变/秒}$$

放射性活度的旧有专用单位为居里，以符号Ci表示。1居里的物理意义为：

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

$$\text{故： } 1\text{Ci}=3.7\times 10^{10}\text{Bq} \quad 1\text{Bq}=2.7\times 10^{-11}\text{Ci}$$

居里的派生单位有毫居里(mCi)和微居里(μCi)，其换算关系为：

$$1\text{Ci}=10^3\text{mCi}=10^6\mu\text{Ci}$$

还有一个过去常用的放射性活度单位，叫做克镭当量，偶尔还能遇到，现加以介绍。克镭当量的意义是：当某 γ 放射体所产生的电离作用与1克镭(镭和其子体达到放射平衡，并被置于0.5mm厚的铂管内)在相同条件下所产生的电离作用相等时，该 γ 放射体的放射性活度为1克镭当量。克镭当量是一个与镭相对比较而得出的活度单位，仅适用于 γ 放射源。克镭当量的派生单位还有毫克镭当量。

(二) 照射量(exposure)

照射量以X表示，表征X、 γ 射线对空气的电离程度，用来度量X、 γ 辐射场的射线输出量。换句话说，照射量依据X、 γ 射线对空气的电离程度做尺度来度量X、 γ 放射源给予了物质多少射线。

照射量的定义是：X或 γ 射线在单位质量空气中释出的所有次级电子，当它们在空气中完全被阻止时，所产生的正负离子对同一种符号离子的总电荷量。

若X或 γ 射线在质量为dm的小体积元空气中，释出的所有次级电子完全被空气阻止时，产生的同一种符号离子的总电荷量为dQ，那么，照射量可用下式表达：

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

照射量的SI单位为库仑/千克($\text{C}\cdot\text{kg}^{-1}$)，没有专门名称。照射量的旧有专用单位为伦琴，以符号R表示。

$$1\text{R}=2.58\times 10^{-4}\text{C}\cdot\text{kg}^{-1}$$

伦琴的派生单位有毫伦琴(mR)，微伦琴(μR)。

$$1\text{R}=10^3\text{mR}=10^6\mu\text{R}$$

照射量仅适用于能量在10Kev~3Mev范围内的X、 γ 射线，不能用于能量高于3Mev的X、 γ 射线和带电粒子及中子。

单位时间内的照射量称为照射量率(exposure rate)。照射量率是度量辐射场强弱的一个辐射量。其SI单位为库仑/千克·秒($\text{C}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{S}^{-1}$)。旧有专用单位有伦琴/分($\text{R}\cdot\text{min}^{-1}$)、毫伦琴/小时($\text{mR}\cdot\text{h}^{-1}$)等。

(三) 吸收剂量(absorbed dose)

单位质量被照物质所吸收的任何电离辐射的平均能量称为吸收剂量，以D表示。

若质量为dm的小体积元被照物质，所吸收的辐射能量为dE，则吸收剂量可用下式表示：

$$D = \frac{dE}{dm}$$

吸收剂量和照射量是两个意义完全不同的量。因为吸收剂量反映单位质量被照物质所吸收的辐射能量，所以吸收剂量不仅和辐射场的射线输出量即照射量有关，而且和被照物质本身的性质有关。用一定能量的X或γ射线照射某种物质，照射量越大，吸收剂量也越大；但若照射两种不同的物质，虽照射量相同，而两种物质的吸收剂量并不相同。比如，对于低能γ射线，在同样的照射量下，骨骼的吸收剂量约为肌肉的四倍。又因为机体受射线照射后所产生的生物效应与组织所吸收的辐射能量相关，所以吸收剂量与生物效应具有直接关系。此外，吸收剂量不仅适用于X、γ射线，还适用于α、β、中子等各种射线。

吸收剂量的SI单位为焦耳/千克($J \cdot kg^{-1}$)，其专用名称为戈瑞，以符号Gy表示。

$$1Gy = 1J \cdot kg^{-1} \quad 1Gy = 10^3mGy$$

吸收剂量的旧有专用单位为拉德，以符号rad表示。其派生单位有毫拉德(mrad)、微拉德(μrad)等。

$$1rad = 0.01Gy \quad \text{或} \quad 1Gy = 100rad$$

$$1rad = 10^3mrad = 10^6\mu rad$$

单位时间内的吸收剂量称为吸收剂量率(absorbed dose rate)。其SI单位为戈瑞/秒($Gy \cdot S^{-1}$)。旧有专用单位有拉德/分($rad \cdot min^{-1}$)毫拉德/小时($mrad \cdot h^{-1}$)等。

吸收剂量与照射量之间存在着一定的联系，根据下面的公式，可由所测得的空气中任一点上的照射量X计算出该点上被照物质或组织的吸收剂量D：

$$D = f \cdot X$$

式中X的单位用伦琴，D的单位为戈瑞，f是由以伦琴为单位的照射量换算成以戈瑞为单位的吸收剂量时的转换系数，称为转换因子或f值。f值因光子能量不同，被照组织不同而取不同的值。表1-1列出了水、肌肉和骨骼对不同能量X、γ射线的f值。

(四) 剂量当量(dose equivalent)

剂量当量在辐射防护上，表示辐射所致有害效应的危害程度或发生几率，以H表示。它的应用仅限于辐射防护。

辐射引起的生物效应不仅与吸收剂量有关，而且与射线种类及照射条件有关，所以单纯用吸收剂量尚不能预示辐射所致生物效应的程度。当射线种类不同或照射条件改变时，即使被照组织的吸收剂量相同，而生物效应并不相同。比如：吸收剂量为1个戈瑞的中子(能量>10keV)照射所致的生物效应大约相当于1戈瑞的X线照射的10倍，其差异非常显著。在辐射防护上，为了便于统一衡量各种射线对机体所致有害效应的危害程度，引入了剂量当量这一概念。剂量当量是用适当的修正因数对吸收剂量进行修正，从而使修正后的吸收剂量即剂量当量能够反映辐射对机体的危害程度。

剂量当量H的定义是：在所关心的组织中的某点上，吸收剂量D与品质因数Q、修正因数N的乘积。即：

表1—1

各种能量光子在水、骨骼、肌肉的f值

光子能量 (Mev)	f 值 ($\times 10^{-3} \text{Gy} \cdot \text{R}^{-1}$)		
	水	肌 肉	骨 骼
0.010	9.06	9.32	36.3
0.020	8.74	9.23	41.9
0.030	8.78	9.25	42.5
0.040	8.84	9.27	39.6
0.050	9.00	9.38	34.6
0.060	9.15	9.43	28.5
0.080	9.40	9.51	19.2
0.10	9.54	9.54	14.5
0.15	9.66	9.59	10.6
0.20	9.66	9.59	9.79
0.30	9.66	9.59	9.38
0.40	9.69	9.96	9.34
0.50	9.72	9.66	9.34
0.60	9.72	9.63	9.28
0.80	9.68	9.59	9.23
1.0	9.69	9.63	9.25
2.0	9.69	9.61	9.28

$$H = D \cdot Q \cdot N$$

式中Q称品质因数，是与辐射品质即射线种类有关的修正因数。当辐射种类不同时，品质因数取不同的值，见表1-2。

表1—2 不同种类辐射的品质因数

辐 射 种 类	品 质 因 数
X射线、γ射线、电子或正电子	1
中子，能量<10Kev	3
中子，能量>10Kev	10
质子	10
α 粒子	20
裂变碎片、反冲核	20

式中N称修正因数，又称分布因数，是对吸收剂量的空间分布（全身照射、局部照射、均匀照射、非均匀照射）和时间分布（吸收剂量率、一次照射、分次照射）等做出的所有其它修正因数的乘积。目前，国际放射防护委员会(ICRP)暂定：外照射时N=1。

式中吸收剂量D的单位用戈瑞，剂量当量H的单位为西沃特；若D的单位用拉德，则H的单位为雷姆。

剂量当量的SI单位也是焦耳/千克($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)，其专用名称为西沃特，以符号Sv表示。雷姆是剂量当量的旧有专用单位，以符号rem表示。