

第四章 X(或 γ)射线与物质的相互作用



学习目标

1. 掌握:X(或 γ)射线与物质相互作用规律及光电效应、康普顿效应、电子对效应发生机制。
2. 熟悉:X射线与组织相互作用;各种效应发生几率及对影像质量、辐射剂量的影响;窄束X射线及宽束X射线的概念及其在介质中的衰变规律。
3. 了解:X(或 γ)射线与物质作用规律在射线诊断、屏蔽防护中的应用。

第一节 概 述

组成X(或 γ)射线的粒子统称为光子,光子自身不带电。X(或 γ)射线都是电磁波,它们在电磁辐射能谱中所占范围基本相同,仅仅是来源不同。 γ 射线是从原子核衰变中放射出来的,而X射线则是高速电子与物质核外电子相互作用的结果。射线通过物质时与物质发生相互作用,研究这种作用可以了解射线的性质、射线产生的物理过程及射线对物质的影响。因此,研究射线与物质相互作用的规律是进行射线探测、防护和应用的重要基础。为了叙述方便,后面仅以X射线与物质的相互作用进行描述。

X射线通过物质时,小部分从物质的原子间隙中穿过,大部分被吸收和散射,从而产生各种物理的、化学的及生物的效应。这些效应的产生都是物质吸收X射线能的结果。

图4-1示意地画出了X射线光子进入生物组织后,光子能量在其中转移、吸收乃至最终引起生物效应的大概过程。可以看出,在物质中每经历一次相互作用,光子的一部分能量转移给电子,另一部分则被散射光子所带走。

第三章所介绍的电子与物质的作用和本章介绍的光子与物质的作用,都是电离辐射与物质的作用。从广义上讲,X射线光子与物质作用,包括了由X射线产生的次级电子与物质的作用。

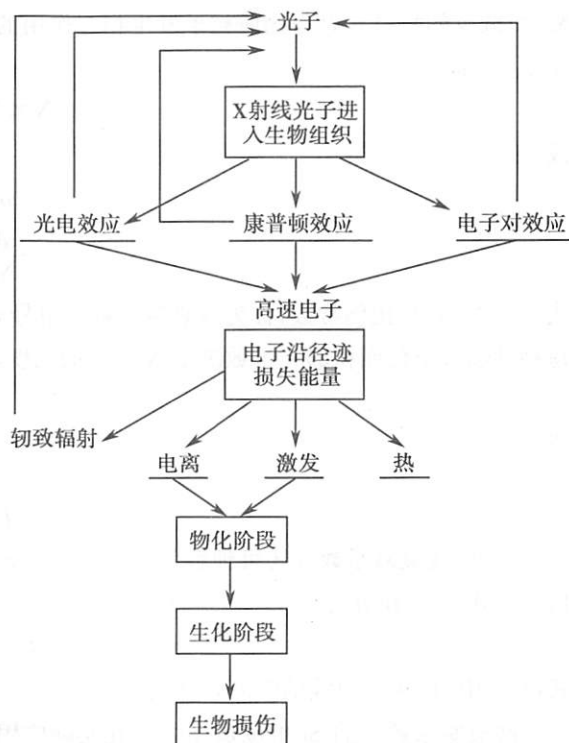


图4-1 X射线光子在生物组织中的吸收及其引起生物效应的过程



一、X射线与物质相互作用的几率

由于入射光子与物质中的粒子(也称靶粒子、靶核)相互作用,可以认为一个入射光子与靶粒子发生相互作用,这个入射光子或者消失,或者偏离原来的运动方向,造成出射线束强度的减弱。用 N 表示入射光子数, N_B 表示厚度为 Δx 的物质内与这些光子相互作用的靶粒子数, N_B/N 同样可以表示射线通过物质层面 Δx 后强度相对减弱的程度,即

$$\eta = \frac{N_B}{N} \quad (4-1)$$

η 常被称为作用几率,它表示射线通过物质层面 Δx 时,一束入射光子与物质中 N_B 个靶核相互作用的几率。显然,作用几率与射线通过物质上的靶粒子数 N_B 成正比。

作用几率也可用入射束通过作用物质前后的强度变化来表示。物质的厚度为 Δx ,入射的强度为 I_0 ,出射时的强度为 I 。因入射光子通过物质时,将与物质粒子相互作用,使出射束的强度减弱。可见 $I < I_0$ 。若令 $I - I_0 = -\Delta I$,则 $\Delta I/I_0$ 同样表示射线强度相对减弱的程度,即

$$\eta = \frac{I - I_0}{I_0} = -\frac{\Delta I}{I_0} \quad (4-2)$$

二、射线的衰减

(一) 线衰减系数

测量光子束减弱特性的方法,是让光子束入射到厚度可变的物体上,探测器与射线源之间的距离保持不变,不过此距离要保证在探测器上仅能测量到原始光子(穿过吸收体没有发生相互作用的光子),由吸收体产生的散射光子在这种安排中假定探测不到。当X射线通过物体时,射线不是被吸收就是被散射,此种现象称为X射线衰减或减弱。

设X射线束穿过厚度为 dx 的物质,因入射光子与物质粒子的相互作用,使探测到的光子数减少,减少的数目 dN (与物质粒子发生相互作用的光子数)正比于入射的光子数 N 和吸收体的厚度 dx ,即

$$-dN \propto N dx$$

或

$$\begin{aligned} dN &= -\mu N dx \\ \mu &= -\frac{dN}{N dx} \end{aligned} \quad (4-3)$$

式(4-3)中, μ 是比例常数,称为线衰减系数。负号表示随吸收体厚度的增加,光子数减少。因为每秒钟通过单位面积的光子数决定X射线的强度,故式(4-3)还可用强度表示为

$$dI = -\mu I dx$$

或

$$\mu = -\frac{dI}{I dx} \quad (4-4)$$

可见,线衰减系数 μ 还可理解为,当X射线穿过单位厚度的物质层时,其强度衰减的分数值。对式(4-4)积分得

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (4-5)$$

式(4-5)中, I_0 为入射线的强度, I 为穿过厚度为 x 的物质层后的射线强度。

线衰减系数 μ 的SI单位是“ m^{-1} ”,在实际应用中还常用分数单位“ cm^{-1} ”。

射线通过物质的衰减是由3种主要相互作用造成的,因此,总的线衰减系数应近似等于各主要作用过程的线衰减系数之和,即



$$\mu \approx \tau + \sigma + \kappa \quad (4-6)$$

式(4-6)中, τ 为光电线衰减系数; σ 为康普顿线衰减系数; κ 为电子对线衰减系数。它们代表射线束通过单位厚度的物质层,由于光电吸收、康普顿散射、电子对产生而使射线强度衰减的分数值。

(二) 质量衰减系数

由于 μ 与吸收物质的密度成正比,而密度又随材料的物理形态而变化,为了避开这种与物质密度的相关性而便于应用,通常还采用质量衰减系数 $\mu_m = \mu/\rho$ 。其优点是它的数值与物质密度无关,也就是与物质的物理形态无关。例如水、冰和水蒸气,虽然它们的密度和物理形态不同,但都由 H_2O 组成,其质量衰减系数相同。

现将式(4-4)两边同除以密度 ρ ,可得

$$\frac{\mu}{\rho} = -\frac{dI}{I(\rho dx)} \quad (4-7)$$

式(4-7)中, ρdx 表示面积为 $1m^2$,厚度为 dx 的立方体中所含物质的质量,称为质量厚度,其SI单位是“ $kg \cdot m^{-2}$ ”。若 ρdx 等于1,则称为单位质量厚度,其物理意义是:在 $1m^2$ 面积上均匀分布 $1kg$ 质量吸收物质层的厚度值。

设 $\rho dx=1$,代入式(4-7)可得

$$\frac{\mu}{\rho} = -\frac{dI}{I}$$

可见,质量衰减系数表示X射线在穿过单位质量厚度($1kg \cdot m^{-2}$)的物质层时,强度衰减的分数值。

质量衰减系数的SI单位是“ $m^2 \cdot kg^{-1}$ ”,有时还使用其分数单位“ $cm^2 \cdot g^{-1}$ ”,两者的换算关系是 $1m^2 \cdot kg^{-1} = 10cm^2 \cdot g^{-1}$

由式(4-6)得

$$\frac{\mu}{\rho} \approx \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma}{\rho} + \frac{\kappa}{\rho}$$

显然,总质量衰减系数应近似等于各主要相互作用过程的质量衰减系数之和,即

$$\mu_m \approx \tau_m + \sigma_m + \kappa_m \quad (4-8)$$

式(4-8)中, τ_m 、 σ_m 和 κ_m 分别为光电、康普顿和电子对效应的质量衰减系数。

三、能量转移和吸收

(一) 能量转移系数

1. 线能量转移系数 在X射线与物质相互作用的3种主要过程中,X射线光子的能量都有一部分转化为电子(光电子、反冲电子及正负电子对)的动能,而另一部分则被一些次级光子(标识X射线光子、康普顿散射光子及湮灭辐射光子)所带走,这就是说,总的衰减系数 μ 可以表示为两部分的总和,即

$$\mu = \mu_{tr} + \mu_s \quad (4-9)$$

式(4-9)中, μ_{tr} 为X射线光子能量的电子转移部分; μ_s 为X射线光子能量的辐射转移部分。

对于辐射剂量学而言,重要的是确定X射线能量的电子转移部分,因为最终在物质中被吸收的就来自这部分能量。

显然,X射线能量的电子转移部分应等于

$$\mu_{tr} = \tau_{tr} + \sigma_{tr} + \kappa_{tr} \quad (4-10)$$

式(4-10)中, μ_{tr} 称为线能量转移系数,它表示X射线在物质中穿过单位长度距离时,由于各种相互作用,其能量转移给电子的动能占总能量的份额。 τ_{tr} 、 σ_{tr} 、 κ_{tr} 分别为光电效应、康普顿效应和电子对效应过程中能量转移为电子能量的线能量转移系数。

2. 质能转移系数 和线性衰减系数一样, μ_{tr} 也近似正比于吸收物质密度 ρ ,而 ρ 随物质的物



理状态变化。为避开同物质密度的相关性,常引入质能转移系数 μ_{tr}/ρ ,即

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{\tau_{tr}}{\rho} + \frac{\sigma_{tr}}{\rho} + \frac{\kappa_{tr}}{\rho} \quad (4-11)$$

质能转移系数表示X射线在物质中穿过质量厚度为 $1\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,因相互作用其能量转移给电子的份额。

质能转系数的单位是 $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

(二) 能量吸收系数

1. 线能量吸收系数 对于中等能量的光子,在与物质相互作用过程中,转移给次级电子的能量在碰撞过程中全部消耗,并被蓄留于吸收物质中,即全部被物质吸收。如果次级电子的能量相当高,那么由于韧致辐射而消耗次级电子的能量份额则不可忽略。因此,真正被物质吸收的能量应等于光子转移给次级电子的能量减去因韧致辐射而损失的能量。若用 g 表示次级电子能量转变为韧致辐射的能量份额,则

$$\mu_{en} = \mu_{tr}(1-g) \quad (4-12)$$

式(4-12)中, g 称为能量吸收系数,表示X射线在物质中通过单位长度距离时,其能量真正被物质吸收的份额。 g 的数值随吸收体原子序数的增加而增大。但是次级电子能量在MeV以下时, g 常忽略不计,即韧致辐射可忽略,此时 $\mu_{en} = \mu_{tr}$,即转移给次级电子的能量全部被物质吸收。

2. 质能吸收系数 同质能转移系数一样,质能吸收系数为

$$\frac{\mu_{en}}{\rho} = \frac{\mu_{tr}}{\rho}(1-g) \quad (4-13)$$

它的SI单位为 $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

第二节 X射线与物质相互作用的主要过程

一、光电效应

光电效应又称光电吸收,它是X射线光子被原子全部吸收的作用过程,所以也将有关的光电系数称为吸收系数。

(一) 光电效应的产生

当一个能量为 $h\nu$ 的光子通过物质时,它与原子的某个内层轨道上一个电子发生相互作用,把全部能量传递给这个电子,而光子本身则整个被原子吸收,获得能量的电子摆脱原子的束缚以速度 v 而成为具有速度 v 的自由电子,这种电子称为光电子,这种现象称为光电效应,如图4-2所示。光电子的动能 $E_c = h\nu - E_B$,这里 E_B 是电子的结合能。

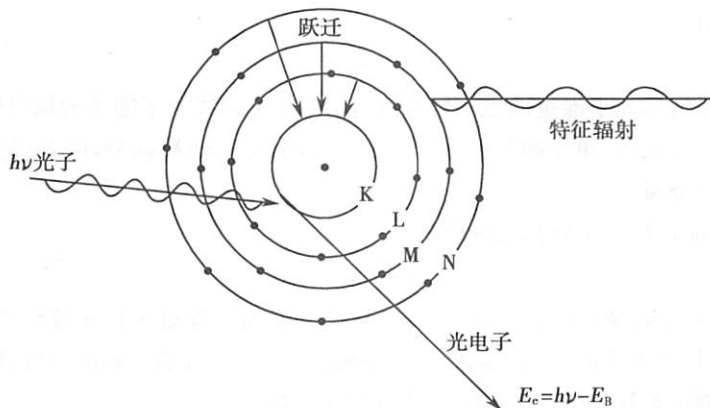


图4-2 光电效应



放出光电子的原子变为正离子,原子处于激发态,其电子空位很快被外层电子跃入填充,同时放出特征X射线。有时,特征X射线离开原子前,又击出外层的轨道电子,即“俄歇电子”。

可见,光电效应的实质是物质吸收X射线使其产生电离的过程。在此过程中将产生的次级粒子有:光电子、正离子(产生光电子的原子)、新的光子(特征辐射光子)、俄歇电子。

(二) 光电效应的发生几率

实验和理论都可以准确地证明光电质量衰减系数的表达式为

$$\tau_m = \frac{c_1}{A} Z^4 \lambda^3 \quad (4-14)$$

式(4-14)中, A 是原子量; c_1 是一个常数, λ 为入射线波长。可见,光电效应的发生几率可受以下3方面因素的影响。

1. 物质原子序数的影响 从式(4-14)可知,光电效应的发生几率与物质原子序数的4次方成正比,即

$$\text{光电效应几率} \propto Z^4 \quad (4-15)$$

物质的原子序数愈高,光电效应的发生几率就愈大。对高原子序数物质由于结合能较大,不仅K层,其他壳层电子也较容易发生光电效应。但对低原子序数物质几乎都发生在K层。在满足光电效应的能量条件下,内层比外层电子发生光电效应的几率可高出4~5倍。

2. 入射光子能量的影响 因为光电子的动能 $E_e = h\nu - E_B$,所以光电效应发生的能量条件是:入射光子的能量 $h\nu$ 必须等于或大于轨道电子的结合能 E_B ,否则就不会发生光电效应。

从式(4-14)可知,光电效应的发生几率与入射线波长的3次方成正比,说明与光子能量的3次方成反比,即

$$\text{光电效应几率} \propto \frac{1}{(h\nu)^3} \quad (4-16)$$

3. 原子边界限吸收的影响 如果测出某一种物体对不同波长射线的光电质量衰减系数,并依据式(4-14)把它们对 $h\nu$ 作标绘,就会得到质量衰减系数随入射光子能量 $h\nu$ 的变化。图4-3是水和铅的光电吸收曲线,这里可以看到:吸收系数(光电效应发生率)一般随入射光子能量 $h\nu$ 的增大而降低,这就是说,波长较短,频率较高的射线的贯穿本领强;当入射光子能量 $h\nu$ 增到某一数值恰好等于原子轨道电子结合能时,吸收系数突然增加,这些吸收突然增加处称为吸收限。当光子能量等于原子K结合能时,发生K边界限吸收;等于L结合能时,发生L边界限吸收;等于M结合能时发生M边界限吸收,但最重要的是结合能较大的K边界限吸收,因为光电效应主要发生在结合能较大的K层,而发生在其他壳层上的机会相对较少。

从图4-3中光电吸收曲线得知,在88keV铅的K结合能处,出现突变折点,光电质量衰减系数由 $0.097\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 突然增加到 $0.731\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$,这增加完全是由于2个K层电子突然参加所致。K边界限吸收使光电效应几率增大了7倍,它比L层8个电子光电效应的几率还大6倍。可见,光电效应主要发生在结合能较大的K层中,在13~15keV处出现铅的3个L边界限吸收折点;在2~4keV处还有M边界限吸收,只因

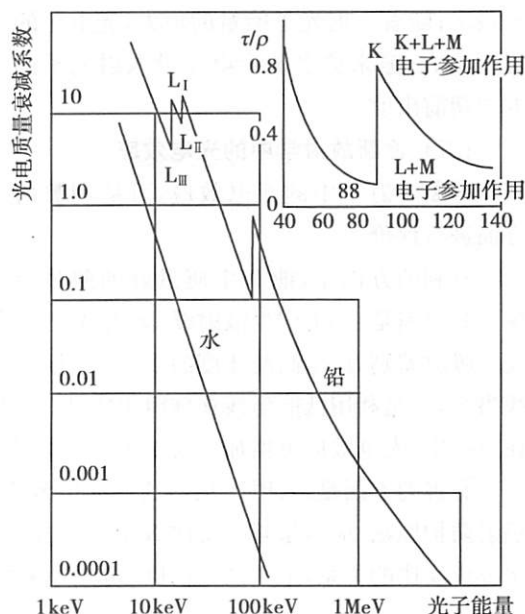


图 4-3 水和铅的光电质量衰减系数
随入射光子能量的变化



能量太低,图中未画出。水的有效原子序数较低,K 界限很小,图中也未画出。

物质原子的边界吸收特性很有实用价值,可在防护材料的选取、复合防护材料配方及阳性对比剂材料的制备等方面得到应用。

(三) 光电效应中的特征放射

这里讲的特征放射,与 X 射线产生中的特征放射意思完全一样,唯一的区别是用于击脱轨道电子所用的“子弹”不同。在 X 射线管中,击脱靶原子轨道电子的是从阴极飞来的高速电子;而在光电效应中则是 X 射线光子。它们共同的作用结果,都是造成电子空位产生特征辐射。

图 4-4 是元素钡(^{137}Ba)的 K 系特征放射示意图。当钡的 K 层电子被击脱,其 K 电子空位可由多种方式填充,其中自由电子跃入填充时放出的特征光子能量最大;其他壳层电子填充时可产生不同的特征放射光子,这些不同的特征光子便构成钡的 K 系特征线谱。

钡剂和碘剂都是 X 射线检查中常用的对比剂,其 K 特征放射都具有较高的能量(钡是 37.4keV,碘是 33.2keV),它们都能穿过人体组织到达胶片,使之产生灰雾。

人体软组织中原子的 K 结合能仅为 0.5keV,发生光电效应时,其特征放射光子能量也不会超过 0.5keV,如此低能光子,在同一细胞内就可被吸收而变为电子运能。骨骼中钙的 K 结合能为 4keV,发生光电效应时其特征放射光子在发生点几毫米之内就被吸收。由此可见,在人体组织内发生的光电效应,其全部能量都将被组织吸收。

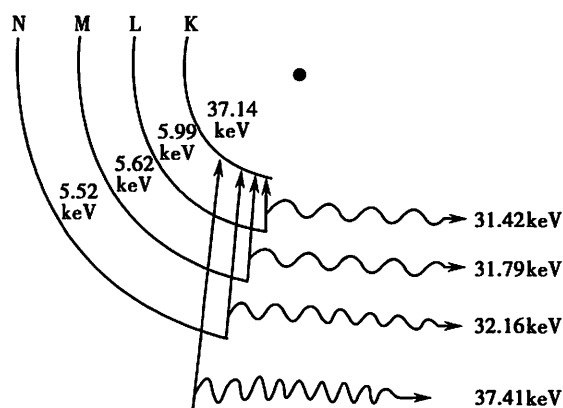


图 4-4 钡的 K 系特征辐射

(四) 光电子的角分布

光电子出射的角度分布与入射光子的能量有关,光电子的角分布如图 4-5 所示。低能时,在与入射方向成 90° 的方向上射出的光电子最多;随着入射光子能量的增大,光电子的速度增大,愈来愈多的光电子沿入射光子的方向朝前出射。

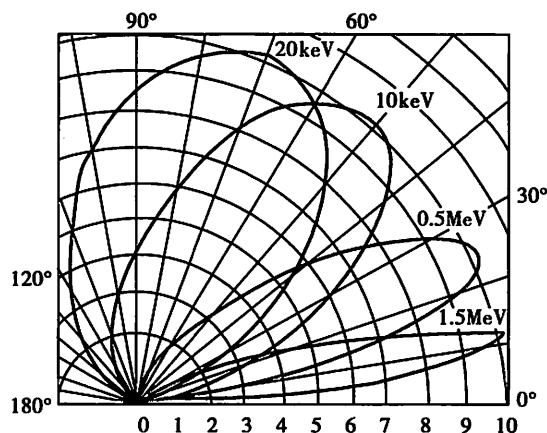


图 4-5 光电子的角分布

(五) 诊断放射学中的光电效应

诊断放射学中的光电效应,可从利弊两方面进行评价。

有利的方面是,能产生质量好的照片影像。其原因是:①不产生散射线,大大减少了照片的灰雾;②可增加人体不同组织和对比剂对射线的吸收差别,产生高对比度的 X 射线照片,对提高诊断的准确性很有好处。钼靶软组织 X 射线摄影,就是利用低能射线在软组织中,因光电吸收的明显差别而产生高对比度照片的。另外,在放疗中,光电效应可增加肿瘤组织的剂量,提高其疗效。

有害的方面是,入射 X 射线通过光电效应可全部被人体吸收,增加了受检者的剂量。根据辐射防护原则,应尽量减少每次 X 射线检查的剂量。为此,可根据光电效应发生率与光子能量 3 次方成反比的关系,采用高千伏摄影技术,从而达到降低剂量的目的。

二、康普顿效应

康普顿效应又称康普顿散射,它是射线光子能量被部分吸收而产生散射线的过程。

(一) 康普顿效应的产生

如图 4-6 所示,康普顿效应是入射光子与原子中的一个外层“自由”电子相互作用时发生的。“自由”一词的意思是指电子的结合能和入射光子能量相比是很小的。在相互作用中,光子只将一部分能量传递给外层电子,电子接收一定的能量后脱离原子束缚,以与光子的初始入射方向成 θ 角的方向上射出,此电子称为反冲电子。与此同时,光子本身能量降低(即频率降低)并朝着与入射成 φ 角的方向射出,此光子称为散射光子。图中 $h\nu$ 和 $h\nu'$ 分别为入射光子和散射光子的能量, φ 和 θ 分别为散射角和反冲角。

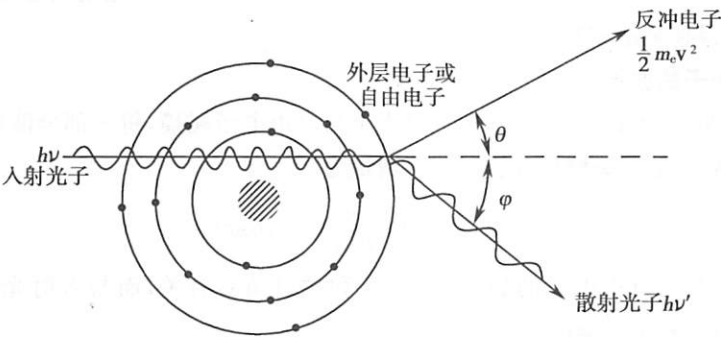


图 4-6 康普顿效应

(二) 康普顿效应的发生几率

实验和理论都可以准确地证明康普顿质量衰减系数的表达式为

$$\sigma_m = \frac{c_1 N_0}{A} Z \lambda = \frac{c_2}{A} Z \lambda \tag{4-17}$$

这里, $c_2 = c_1 N_0$ 是另一个常数。康普顿效应的发生几率可受以下两方面因素的影响。

1. 物质原子序数的影响 从式(4-17)可知,康普顿效应的发生几率与物质的原子序数 Z 成正比,即

$$\text{康普顿效应几率} \propto Z \tag{4-18}$$

但式(4-18)只适合氢与其他元素的比较,因为除了氢元素外,大多数材料被认为几乎有相同的 $\frac{N_0}{A} Z$ (每克电子数)(表 4-1)。因此, σ_m 对所有物质几乎是相同的。

表 4-1 常见物质的密度 ρ 和每克电子数

物质	密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	有效原子序数 $\bar{Z}$	$\text{Ne}(\times 10^{23} \text{ 电子数} \cdot \text{g}^{-1})$
氢	8988×10^{-5}	1	5.97
碳	2250	6	3.01
氧	1.429	8	3.01
铝	2.699×10^3	13	2.90
铜	8.960×10^3	29	2.75
铅	1.136×10^4	82	2.38
空气	1.293	7.78	3.01
水	1.000×10^3	7.42	3.34
肌肉	1.040×10^3	7.64	3.31
脂肪	9.160×10^2	6.46	3.34
骨	1.650×10^3	13.80	3.19



2. 入射光子能量的影响 从式(4-17)可知,康普顿效应发生几率与入射射线波长成正比,说明与入射光子能量成反比,即

$$\text{康普顿效应几率} \propto \frac{1}{h\nu} \quad (4-19)$$

如在前面所提到的那样,康普顿效应是光子和“自由”电子之间的相互作用。实际上,这意味着入射光子的能量比电子的结合能必须大很多[否则式(4-19)不适用]。这与光电效应形成一个对比,当入射光子的能量等于或稍大于电子的结合能,光电效应最可能发生。因此,在K电子结合能以上,随着入射光子能量的增加,由光电效应几率 $\propto 1/(h\nu)^3$ 可知,光电效应随能量很快降低,而康普顿效应变得越来越重要。

(三) 散射光子的波长

理论推导证明,在康普顿散射中,因入射光子与自由电子碰撞,将一部分能量转移给自由电子,自己的能量减少,故频率降低,波长变长,增量为

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\varphi) \quad (4-20)$$

可见,其改变量与自由电子的静止质量 m_0 和散射角 φ 有关,而与入射光子的波长无关。 $h/m_0 c = 0.00243\text{nm}$ 称为反冲电子的康普顿波长。

(四) 散射光子和反冲电子的角分布

在这里可以把康普顿散射想象为两个球的碰撞,一个比作入射光子,一个比作自由电子。碰撞时,若光子从电子边上擦过,其偏转角度很小,反冲电子获得的能量也很少,这时散射光子却保留了绝大部分能量;如果碰撞更直接些,光子的偏转角度增大,损失的能量将增多;正向碰撞时,反冲电子获得的能量最多,这时被反向折回的散射光子仍保留一部分能量。

理论推导证明,在康普顿散射中,散射光子的能量为

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0 c^2} (1 - \cos\varphi)} \quad (4-21)$$

反冲电子的动能为

$$T = \frac{h\nu}{1 + \frac{m_0 c^2}{h\nu(1 - \cos\varphi)}} \quad (4-22)$$

可见,它们依赖入射光子的能量和散射角。当 φ 角等于 0° 时, $\cos\varphi = 1$, 反冲电子的能量等于零,散射光子的能量等于 $h\nu$ 。这说明在入射方向上,光子没有散射。当 φ 角等于 180° 时, $\cos\varphi = -1$, 散射光子的能量达到最小,为

$$(h\nu')_{\min} = \frac{h\nu}{1 + \frac{2h\nu}{m_0 c^2}} \quad (4-23)$$

反冲电子的动能达到最大,为

$$T_{\max} = \frac{h\nu}{1 + \frac{m_0 c^2}{2h\nu}} \quad (4-24)$$

从上面的讨论可知,如果射线束的能量处于仅发生康普顿效应的能量范围内,对 0.1MeV 低能射线产生的散射光子近似对称于 90° 分布,随着入射光子能量的增大,散射光子的分布趋向前方,如图 4-7 所示。图中曲线上任何一点到 O 点的距离,表示在该方向上散射线强度;若沿 X 射线的入射轴旋转一周,就成为散射线强度的立体空间分布图。 φ 和 θ 角的关系是

$$\text{ctg}\theta = \left(1 + \frac{h\nu}{m_0 c^2}\right) \text{tg} \frac{\varphi}{2} \quad (4-25)$$



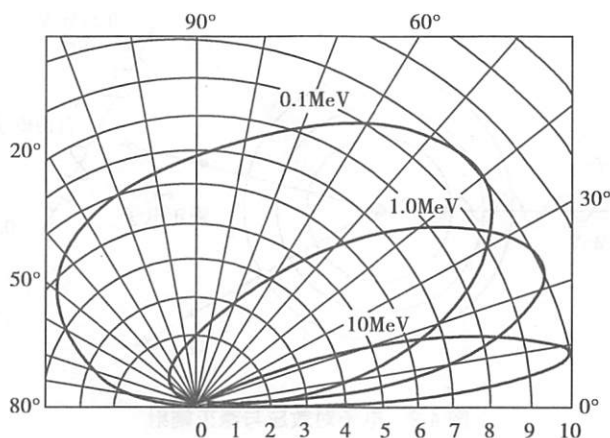


图 4-7 康普顿散射光子的角分布

由式(4-25)看出,光子可在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的整个空间范围内散射,而反冲电子飞出的角度则不超过 90° 。即角度变化范围, φ 由 0° 到 180° ,相应的反冲角 θ 由 90° 变到 0° 。图 4-8 表示对于反冲电子,大于 90° 就不存在了。可见,随入射光子能量的增大,反冲电子的角分布同样趋向前方。

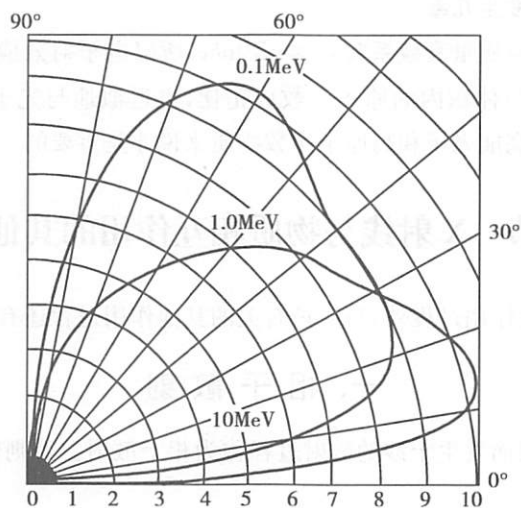


图 4-8 康普顿反冲电子的角分布

需要指出的是,康普顿效应中产生的散射线是 X 射线检查中最大的散射线来源。从被照射部位和其他被照物体上产生的散射线充满检查室整个空间。这一事实应引起 X 射线工作者和防护人员的重视,并采取相应的防护措施。

三、电子对效应

(一) 电子对效应的产生

如图 4-9 所示,一个具有足够能量的光子,在与靶原子核发生相互作用时,光子突然消失,同时转化为一对正、负电子,这个作用过程称为电子对效应。

一个电子的静止质量能 $m_0c^2 = 0.51\text{MeV}$,一个电子对的静止质量能就应为 1.02MeV 。根据能量守恒定律,要产生电子对效应,入射光子的能量就必须等于或大于 1.02MeV 。光子能量超过该能量值的部分就变成了正、负电子的动能(ϵ^+ 、 ϵ^-)。即

$$h\nu = 1.02\text{MeV} + \epsilon^+ + \epsilon^- \quad (4-26)$$



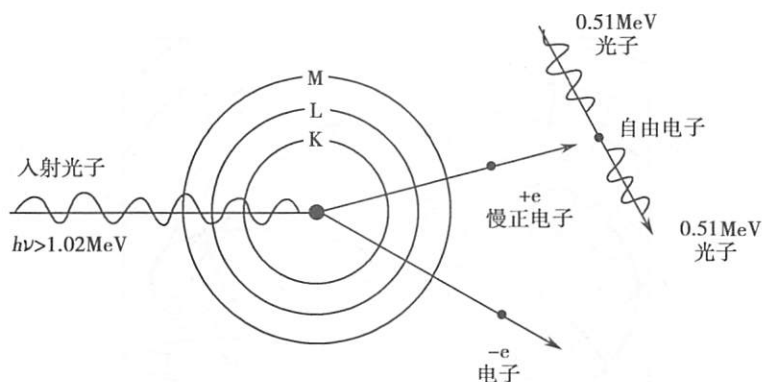


图 4-9 电子对效应与湮灭辐射

正电子与负电子的静止质量相等,所带电量相等,但性质相反;生成的正、负电子在物质中穿行,通过电离和激发不断损失其自身的能量,最后慢化的正电子在停止前的一瞬间与物质中的自由电子结合,随即向相反方向射出两个能量各为 0.51 MeV 的光子,该作用过程称为湮灭辐射。虽然正、负电子在耗尽其动能之前也会发生湮灭辐射,但发生的几率很小。由此可见,电子对效应和湮灭辐射都是质量和能量相互转化的最好例证。

(二) 电子对效应的发生几率

实验证明,电子对效应质量衰减系数 $\kappa_m \propto nZ^2 \ln h\nu$, 所以电子对效应的发生几率与物质原子序数的平方成正比,与单位体积内的原子个数成正比,也近似地与光子能量的对数 ($\ln h\nu$) 成正比。可见,该作用过程对高能光子和高原子序数物质来说才是重要的。

第三节 X 射线与物质相互作用的其他过程

除以上 3 种主要相互作用过程外,与防护有关的其他作用过程还有相干散射和光核作用。

一、相干散射

射线与物质相互作用而发生干涉的散射过程称为相干散射。否则就是非相干散射,康普顿散射即为非相干散射。

早先,劳厄用一束 X 射线入射在一块晶体上,经晶体发生衍射后的 X 射线,在后面的感光胶片上形成明显的干涉花纹。这证明晶体空间点阵的每个原子成为 X 射线波的散射中心,这些散射 X 射线是相干的。

相干散射包括瑞利散射、核的弹性散射和德布罗克散射。与康普顿散射相比,核的弹性散射和德布罗克散射的几率非常低,可以忽略不计。当入射光子在低能范围如 0.5~200 keV 时,瑞利散射的几率不可忽略,因此相干散射主要是指瑞利散射。

瑞利散射是入射光子被原子的内壳层电子吸收并激发到外层高能级上,随即又跃迁回原能级,同时放出一个能量与入射光子相同,但传播方向发生改变的散射光子。这种只改变传播方向而光子能量不变的作用过程称为瑞利相干散射。实际上就是 X 射线的折射。

由于束缚电子未脱离原子,故反冲体是整个原子,从而光子的能量损失可忽略不计。相干散射是光子与物质相互作用中唯一不产生电离的过程。

相干散射的发生几率与物质原子序数成正比,并随光子能量的增大而急剧地减少。在整个诊断 X 射线能量范围内都有相干散射发生,其发生几率不足全部相互作用的 5%,对辐射屏蔽的影响不大,但在总的减弱系数计算中却要考虑相干散射的贡献。



二、光核作用

所谓光核作用,就是光子与原子核作用而发生的核反应。这是一个光子从原子核内击出数量不等的中子、质子和 γ 光子的作用过程。对不同物质,只有当光子能量大于该物质发生核反应的阈能时,光核反应才会发生。其发生率不足主要作用过程的5%。因此,从入射光子能量被物质所吸收的角度考虑,光核反应并不重要。但应注意到,某些核素在进行光核反应时,不仅产生中子,而且反应的产物是放射性核素。

光核反应在诊断X射线能量范围内不可能发生,在医用电子加速器等高能射线的放疗中发生率也很低。

第四节 各种作用发生的相对几率

一、X射线引发效应总结

本章主要讨论了X射线与物质相互作用中产生的3个主要效应,也就是入射光子能量在物质中发生转移,传播方向发生改变的过程。

当一束X射线照射物体时,其中一部分能量和方向均不发生变化,而从原子内部的间隙中直接透过;另一部分则被吸收和散射。现总结如下。



二、 Z 和 $h\nu$ 与三种基本作用的关系

在0.01~10MeV这个最常见的能量范围内,除少数例外,几乎所有效应都是由三种基本作用过程产生的。图4-10对范围很宽的人射光子能量($h\nu$)和吸收物质原子序数(Z),简单明了地指出了这三种基本作用过程的相对范围。

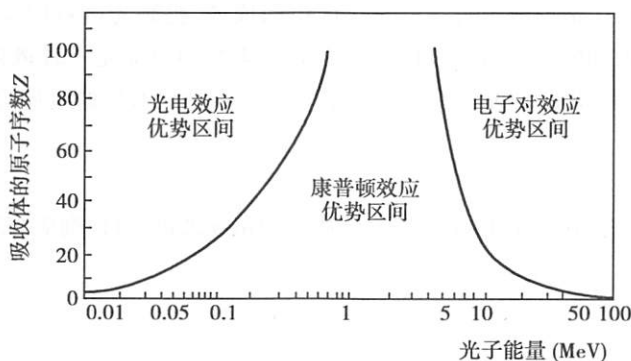


图 4-10 三种主要效应的优势区间



由图 4-10 中的曲线可见,在光子能量较低时,除低原子序数物质以外的所有元素,都以光电效应为主;在 0.8~4MeV 时,无论原子序数大小,几乎全部作用都是康普顿效应;在大的 $h\nu$ 处则电子对效应占优势。图中曲线表示相邻两种效应发生几率正好相等处的 Z 和 $h\nu$ 值。

X 射线与物质原子的每次作用,都使原线束中减少一个原发光子,而使一个电子开始其运动的过程。

三、在诊断放射学中各种基本作用发生的相对几率

在 20~100keV 诊断 X 射线能量范围内,只有光电效应和康普顿效应是重要的;相干散射所占比例很小,并不重要;电子对效应不可能产生。若忽略占比例很小的相干散射,则在 X 射线诊断中就只有光电效应和康普顿效应两种作用形式。表 4-2 给出在 20~100keV 的 X 射线在水、骨骼和碘化钠 3 种物质中发生两种主要作用几率的百分数。

表 4-2 诊断放射学中作用几率与 Z 和 $h\nu$ 的关系

X 射线能量 (keV)	水($Z=7.4$)		骨骼($Z=13.8$)		碘化钠($Z=49.8$)	
	光电(%)	康普顿(%)	光电(%)	康普顿(%)	光电(%)	康普顿(%)
20	70	30	89	11	94	6
60	7	93	31	69	95	5
100	1	99	9	91	88	12

表 4-2 中用水代表低原子序数物质,如肌肉、脂肪、体液和空气等;骨骼含有大量钙质,它代表人体内中等原子序数的物质;碘和钡是诊断放射学中遇到的高原子序数物质,以碘化钠为代表。

表 4-2 中数据说明,随 $h\nu$ 增大,光电效应几率下降。对低原子序数物质的水呈迅速下降趋势,对高原子序数物质的碘化钠呈缓慢下降趋势,对中等原子序数物质的骨骼则介于两者之间。对 20keV 的低能 X 射线,各种物质均以光电效应为主。对引入体内的对比剂(碘剂和钡剂),在整个诊断 X 射线能量范围内,光电效应始终占绝对优势。我们掌握不同能量的 X 射线对不同原子序数物质的作用类型和几率,对研究提高 X 射线影像质量,降低受照剂量和优选屏蔽防护材料都有重要意义。



本章小结

射线在医学中的应用基础是射线与组织的相互作用,在诊断 X 射线能量范围内,光电效应、康普顿效应所占的比例最大。光电效应是一种全吸收效应,入射光子的能量完全被组织吸收,因此不产生散射线。对于低对比度组织成像,提高光电效应发生几率可以提高影像对比度,但会增加软组织对射线的能量吸收。康普顿效应是一种散射效应,在高千伏摄影及胸腹部 X 射线摄影时,必须使用滤线栅以消除散射线对影像质量的影响。

思考题

1. X 射线影像检查中,为何使用对比剂? 从物理角度来讲,对比剂应当具备哪些特性?
2. 康普顿效应中,散射光子的角分布与哪些因素有关?

(彭文献)

