第四章 X(或γ)射线与物质的相互作用

学习目标

◆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

◆掌握诊断X射线能量范围，射线与组织相互作用各种效应发生的几率及对影像质量、辐射剂量的影响

◆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

第四章 X(或γ)射线与物质的相互作用

第一节 概 述

放射性核素 —原子核衰变→ γ射线

X射线管 —高速电子与物质核外电子相互作用→ x射线

电磁波

射线的粒子称为光子

光子不带电

光子与物质的作用，都是电离辐射与物质的作用

包括由x线产生的次级电子与物质的作用

x射线 → 物质

相互作用

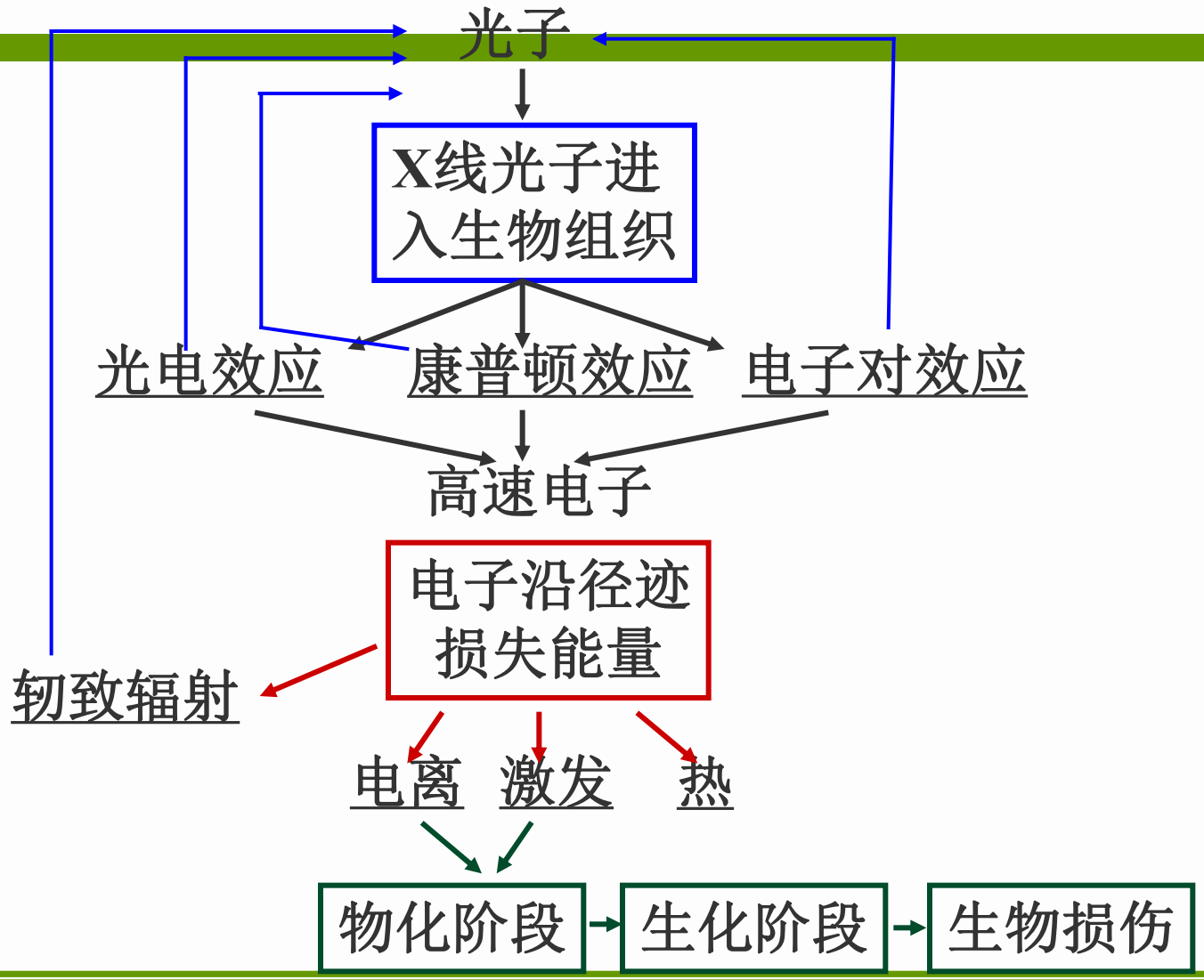
大部分被吸收和散射

小部分穿过

物质 → 物理、化学、生物效应

探测防护应用

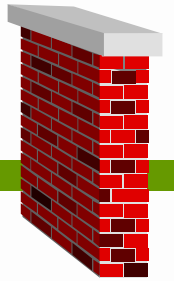
第一节 概　述



X线光子在生物组织中的吸收及其引起生物效应的过程

第一节　概述

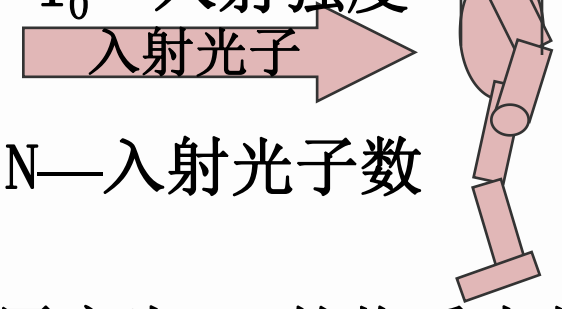
一、X射线与物质相互作用的几率



作用几率：

I_0—入射强度

入射光子



I—出射强度

N—入射光子数

N_B—厚度为Δx的物质内与这些光子相互作用的靶粒子数

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

表示射线通过物质层面Δx后强度相对减弱的程度

一个入射线光子与物质中N_B个靶核相互作用的几率

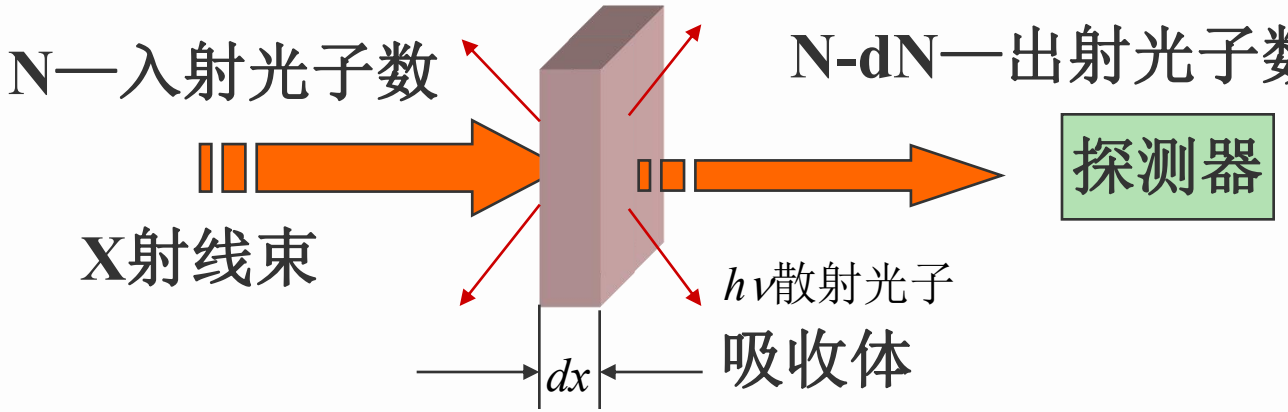
令$I - I_0 = -\Delta I$

$$\eta = \frac{\Delta I}{I_0} = \frac{I_0 - I}{I_0} = 1 - \frac{I}{I_0} \qquad (4\text{-}2)$$

二. 射线的衰减

(一) 线衰减系数

dN—减少的数目（与物质粒子发生相互作用的光子数）



入射光子与物质粒子相互作用
吸收、散射

$$-dN \propto Ndx \qquad dN = -\mu Ndx$$

负号表示随吸收体厚度的增加光子数减少

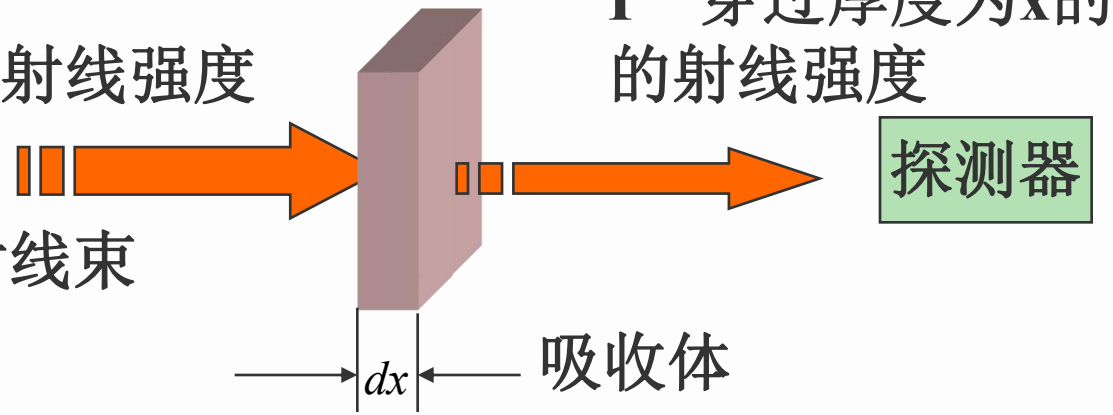
$$\mu = -\frac{dN}{Ndx} \qquad (4\text{-}3)$$

二. 射线的衰减

(一) 线衰减系数　　dI—减少的强度

I—穿过厚度为x的物质后的射线强度

I_0—入射线强度



入射光子与物质粒子相互作用
吸收、散射

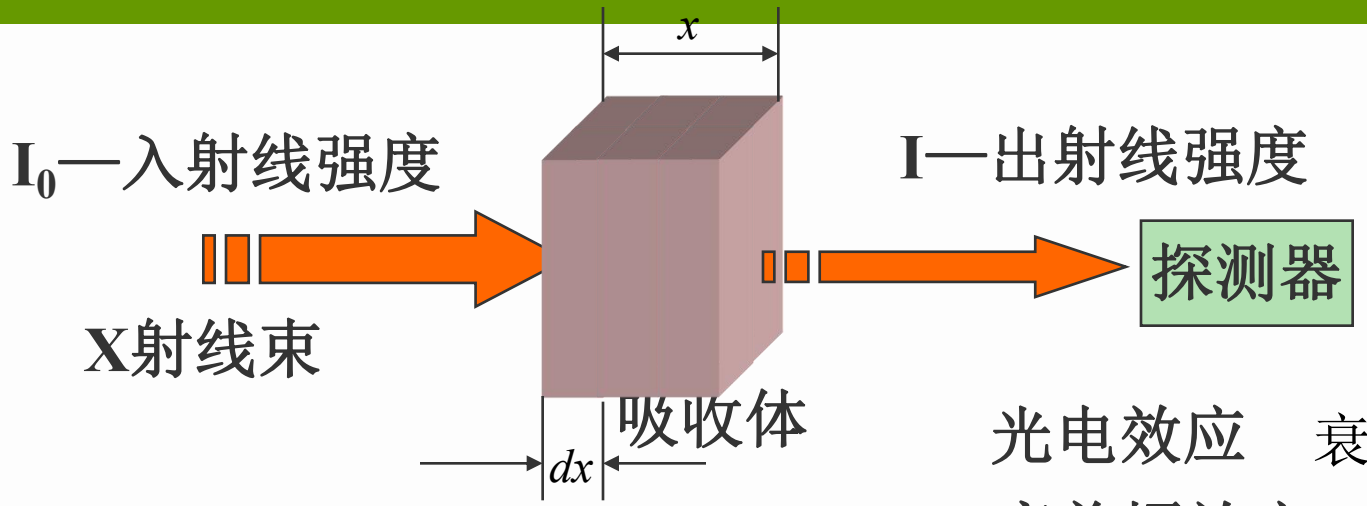
当x线穿过单位厚度的物质层时，其强度衰减的分数值

$$dI = -\mu I dx$$

$$\mu = -\frac{dI}{Idx} \qquad (4\text{-}4)$$

二. 射线的衰减

dI—减少的强度



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

光电效应　衰减系数τ

康普顿效应 衰减系数σ

电子对效应 衰减系数κ

积分，得　$I = I_0 e^{-\mu x}$　(4-5)

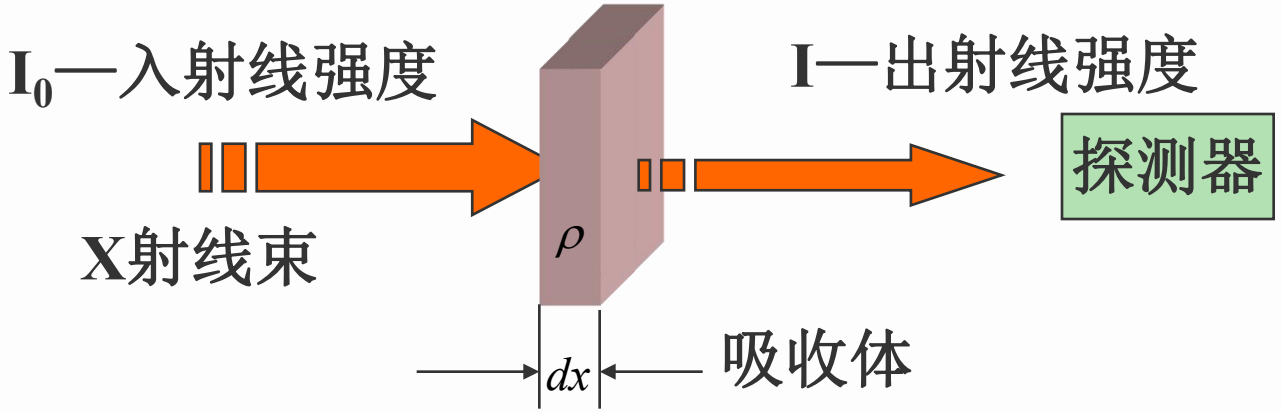
μ的SI单位是“m^{-1}”，实际应用中还常用“cm^{-1}”

衰减系数　$\mu \approx \tau + \sigma + \kappa$　(4-6)

二. 射线的衰减

(二) 质量衰减系数

dI—减少的强度



由于μ与吸收物质的密度ρ成正比，而密度ρ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

质量衰减系数 $$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$$

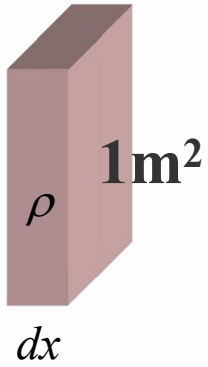
$$\frac{\mu}{\rho} = -\frac{dI}{I(\rho dx)} \qquad (4\text{-}7)$$

优点： μ_m的数值与物质的密度 ρ无关
与物质的物理形态无关

例：水、冰、水蒸气
质量衰减系数相同

二. 射线的衰减

(二) 质量衰减系数



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

式中：ρdx ——面积为$1m^2$,厚度为dx的立方体中所含的质量，称为质量厚度

单位：$kg.m^{-2}$

若 $\rho dx = 1$ 则称为单位质量厚度——在$1m^2$面积上均匀分布1kg质量吸收物质层的厚度值

二. 射线的衰减

设 $\rho dx = 1$ $\quad \mu_m = \dfrac{\mu}{\rho} = -\dfrac{dI}{I}$

μ_m 表示X线在穿过单位质量厚度1kg.m^{-2}的物质层时，强度衰减的分数值

单位：$m^2 \cdot kg^{-1}$ ， $cm^2 \cdot g^{-1}$

$1m^2 \cdot kg^{-1} = 10cm^2 \cdot g^{-1}$

由 $\mu \approx \tau + \sigma + \kappa$ 得 $\dfrac{\mu}{\rho} \approx \dfrac{\tau}{\rho} + \dfrac{\sigma}{\rho} + \dfrac{\kappa}{\rho}$

总质量衰减系数 $\mu_m \approx \tau_m + \sigma_m + \kappa_m$

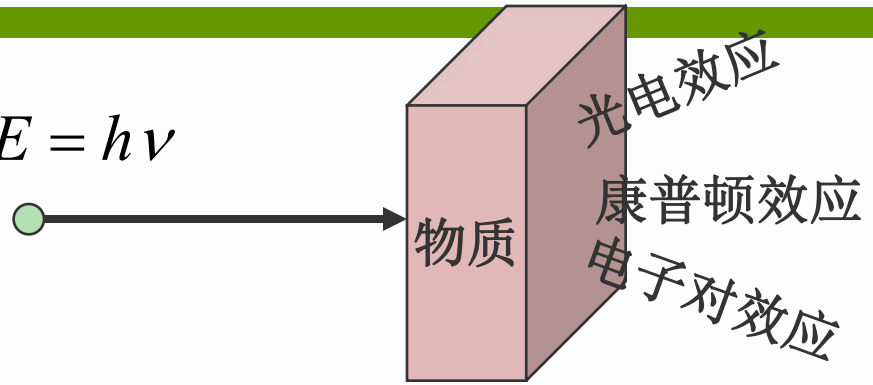
式中： τ_m、σ_m、κ_m 分别为光电、康普顿和电子对效应的质量衰减系数

三. 能量转移和吸收

(一) 能量转移系数

吸收、散射

1.线能量转移系数 $E = h\nu$



转化为

X线光子的能量 =电子的动能 + 次级光子辐射能量

光电子
反冲电子
正负电子对

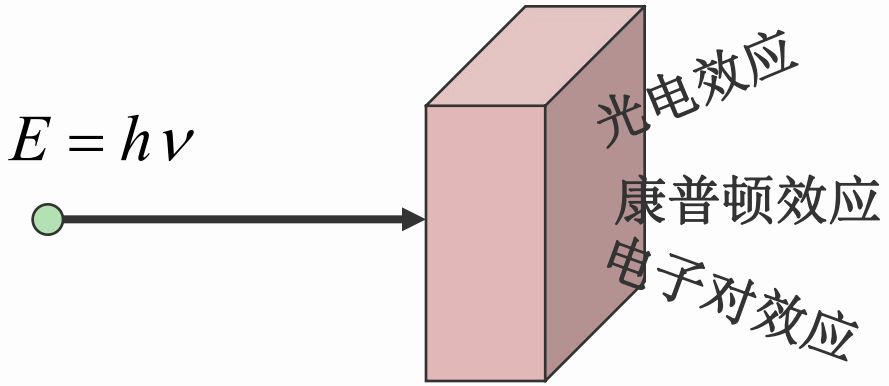
标识X线光子
康普顿散射光子
湮灭辐射光子

总衰减系数 $\mu = \mu_{tr} + \mu_s$ （4-9）

式中：μ_{tr} 为X线光子能量的电子转移部分

μ_s 为X线光子能量的辐射转移部分

三. 能量转移和吸收



辐射剂量

要确定最终在物质中被吸收的能量

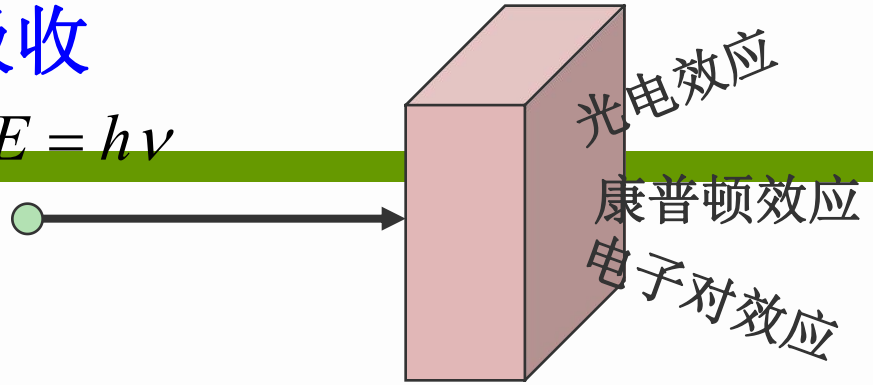
就是X线光子能量的电子转移部分

线能量转移系数　$\mu_{tr} = \tau_{tr} + \sigma_{tr} + \kappa_{tr}$　（4-10）

表示X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

三. 能量转移和吸收

$E = h\nu$



2.质能转移系数

μ_{tr}近似正比于吸收物质的密度ρ，而密度ρ随物质的物理形态变化，为了避开同物质密度的相关性

质能转移系数 $$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{\tau_{tr}}{\rho} + \frac{\sigma_{tr}}{\rho} + \frac{\kappa_{tr}}{\rho} \qquad (4\text{-}11)$$

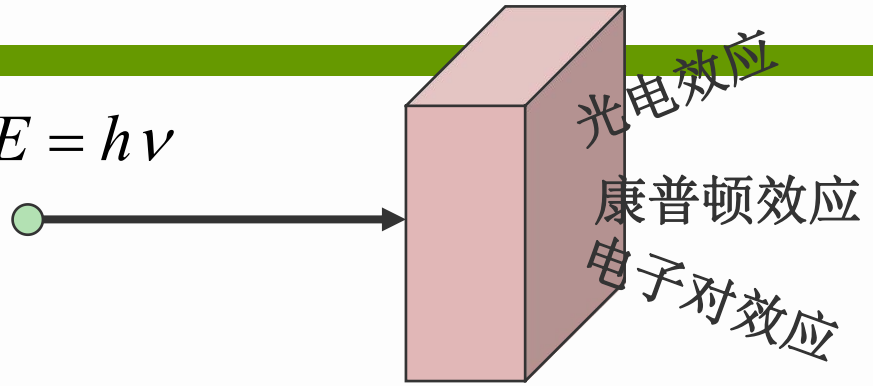
表示X线在物质中穿过单位质量厚度为1kg.m^{-2} 时，因各种相互作用其能量转移给电子的份额

单位：米^2.千克$^{-1}$(m^2.kg^{-1})

三. 能量转移和吸收

二.能量吸收系数

$E = h\nu$



1. 线能量吸收系数

中等能量的光子 → 相互作用 物质 → 产生 次级电子 → 与物质粒子碰撞中消耗全部能量

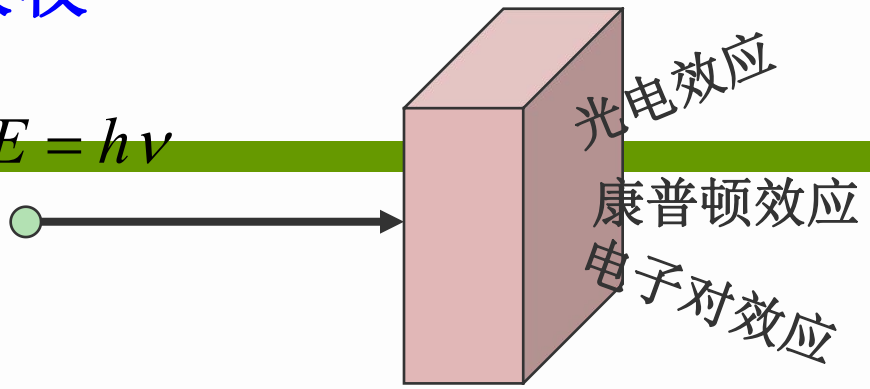
次级电子 → 当次级电子的能量相当高时 → 产生韧致辐射消耗次级电子的能量

消耗全部能量 → X光子的能量全部被物质吸收

三. 能量转移和吸收

二.能量吸收系数

$E = h\nu$



1. 线能量吸收系数

能量吸收系数 $\mu_{en} = \mu_{tr} - g\mu_{tr} = \mu_{tr}(1-g)$ （4-12）

- μ_{en}：真正被物质吸收的能量
- μ_{tr}：光子转移给次级电子的能量
- $g\mu_{tr}$：因韧致辐射而损失的能量

g表示次级电子能量转变为韧致辐射的能量份额

μ_{en}称为**能量吸收系数**，表示X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

2. 质能吸收系数

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

单位：米^2.千克$^{-1}$