



第二节 X(或 γ)射线与物质的相互作用的主要过程

学习目标

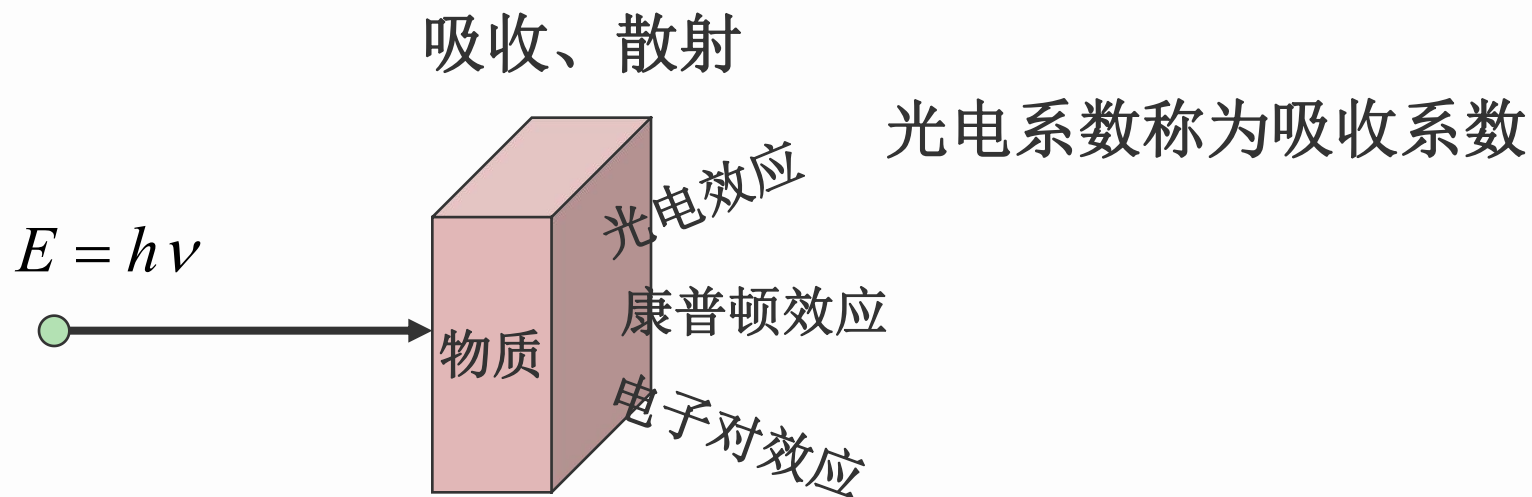
- ◆掌握X(或 γ)射线与物质相互作用规律及光电效应、康普顿效应、电子对效应发生机制
- ◆掌握诊断X射线能量范围，射线与组织相互作用各种效应发生的几率及对影像质量、辐射剂量的影响
- ◆了解X (或 γ)射线与物质作用规律在射线诊断、屏蔽防护中的应用



第二节 X(或 γ)射线与物质的相互作用的主要过程

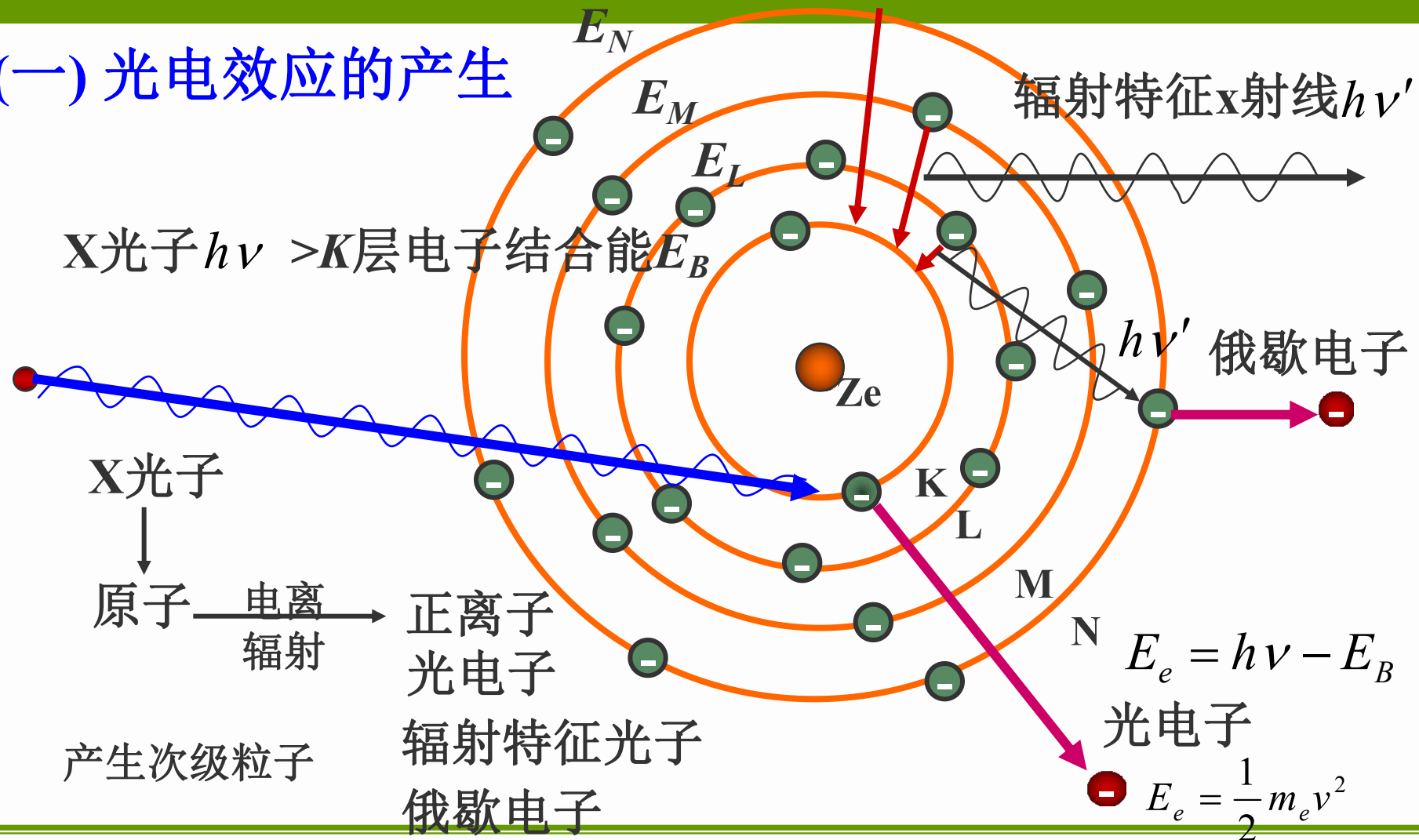
一、光电效应

光电吸收，是X线光子被原子全部吸收的作用过程



第二节 X(或 γ)射线与物质的相互作用的主要过程

(一) 光电效应的产生





(二) 光电效应的发生几率

1. 光电质量衰减系数

$$\tau_m = \frac{C_1}{A} Z^4 \lambda^3 \quad (4-14)$$

式中： C_1 —常数 Z —物质的原子序数
 A —原子量 λ —X光波长

2. 影响光电效应发生几率的因素

(1) 物质原子序数的影响

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



(2) 入射光子能量的影响

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

$$\text{产生光电效应的条件} \quad h\nu \geq E_B$$

$$\text{光电子的动能} \quad E_e = h\nu - E_B$$

$$\tau_m = \frac{c_1}{A} Z^4 \lambda^3 \quad c = \frac{\lambda}{T} = \lambda\nu \quad \lambda = \frac{c}{\nu}$$

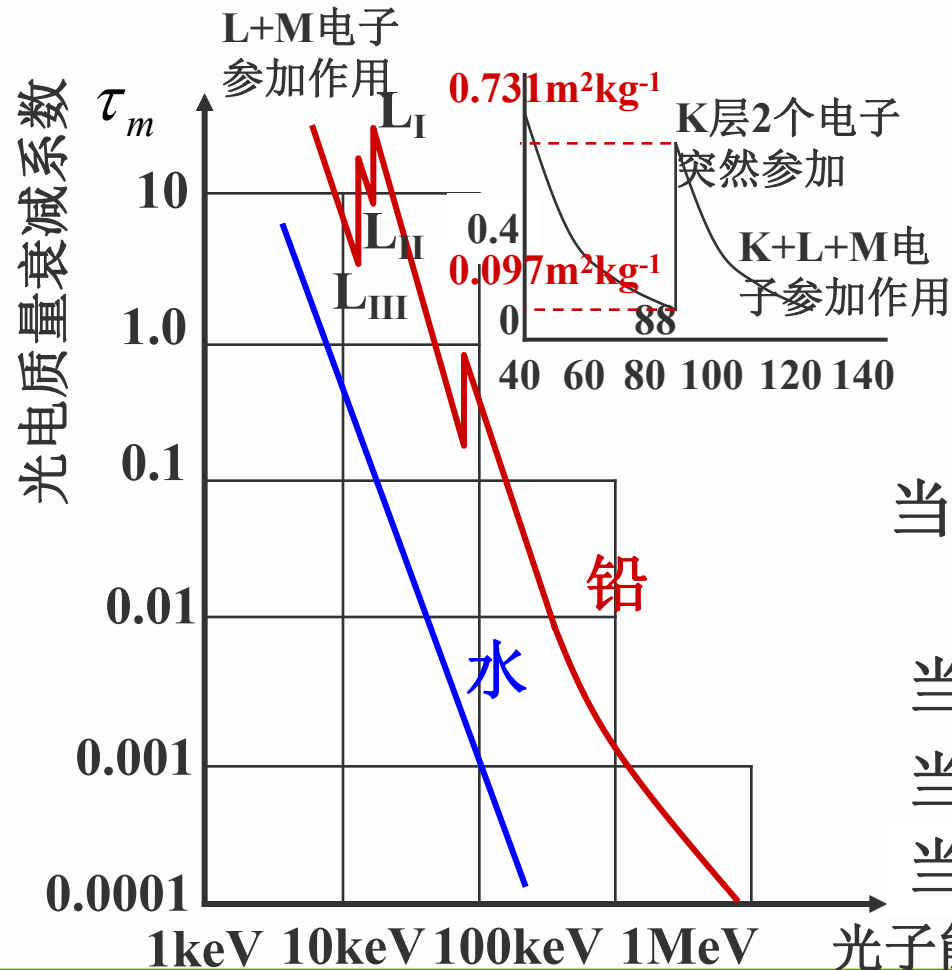


(3)原子边界限吸收的影响

测出某一物质对不同波长射线的光电质量衰减系数

以X光子能量 $h\nu$ 为横坐标，以质量衰减系数为纵坐标

得到质量衰减系数随入射光子能量变化的吸收曲线



$$h\nu \nearrow \tau_m \searrow$$

波长短频率
高的射线贯
穿本领强

当 $h\nu = E_B$ 时 $\rightarrow$ 吸收突然增加
该处称为吸收限

当 $h\nu = E_{BK}$ 时 $\rightarrow$ 发K边界吸收

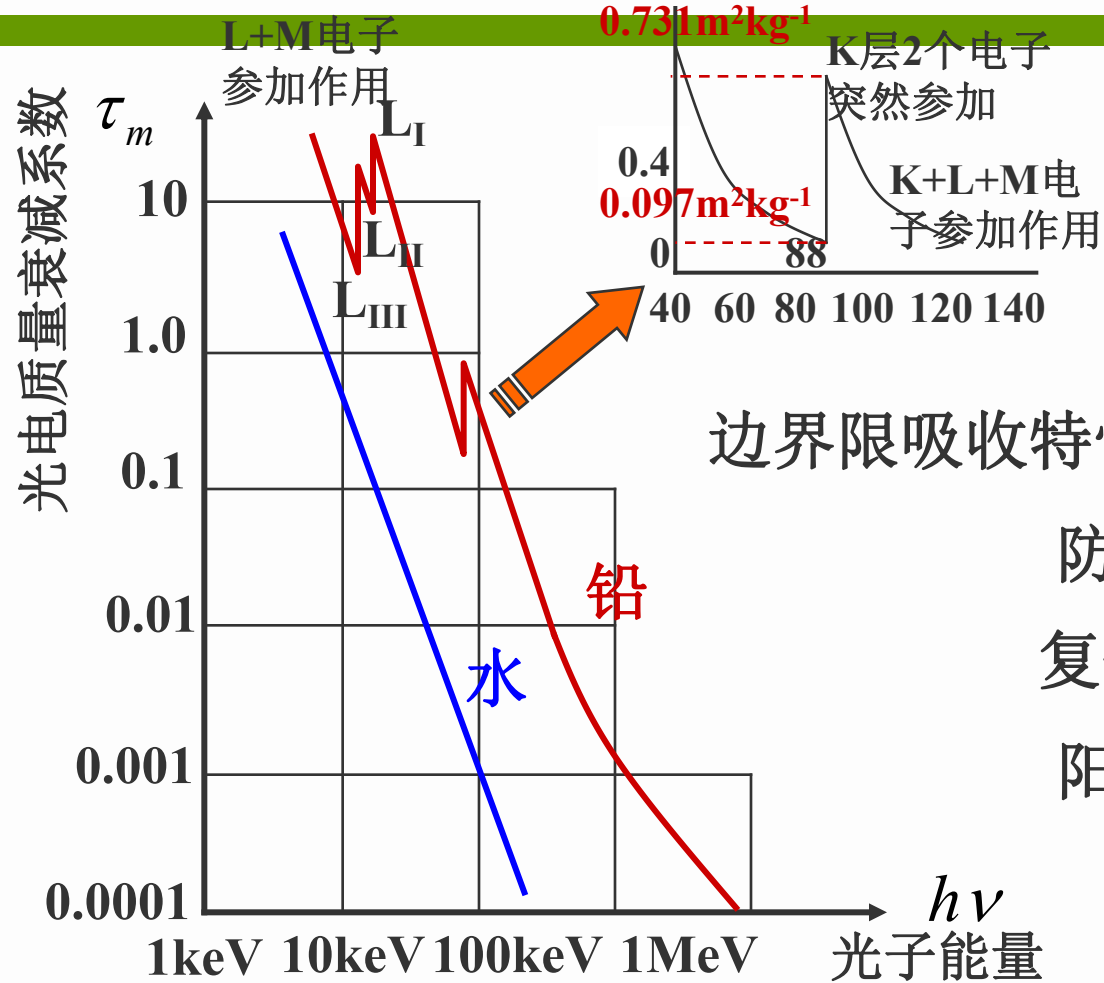
当 $h\nu = E_{BL}$ 时 $\rightarrow$ 发L边界吸收

当 $h\nu = E_{BM}$ 时 $\rightarrow$ 发M边界吸收

水和铅的光电吸收曲线



(3)原子边界限吸收的影响



边界限吸收特性的实用价值:

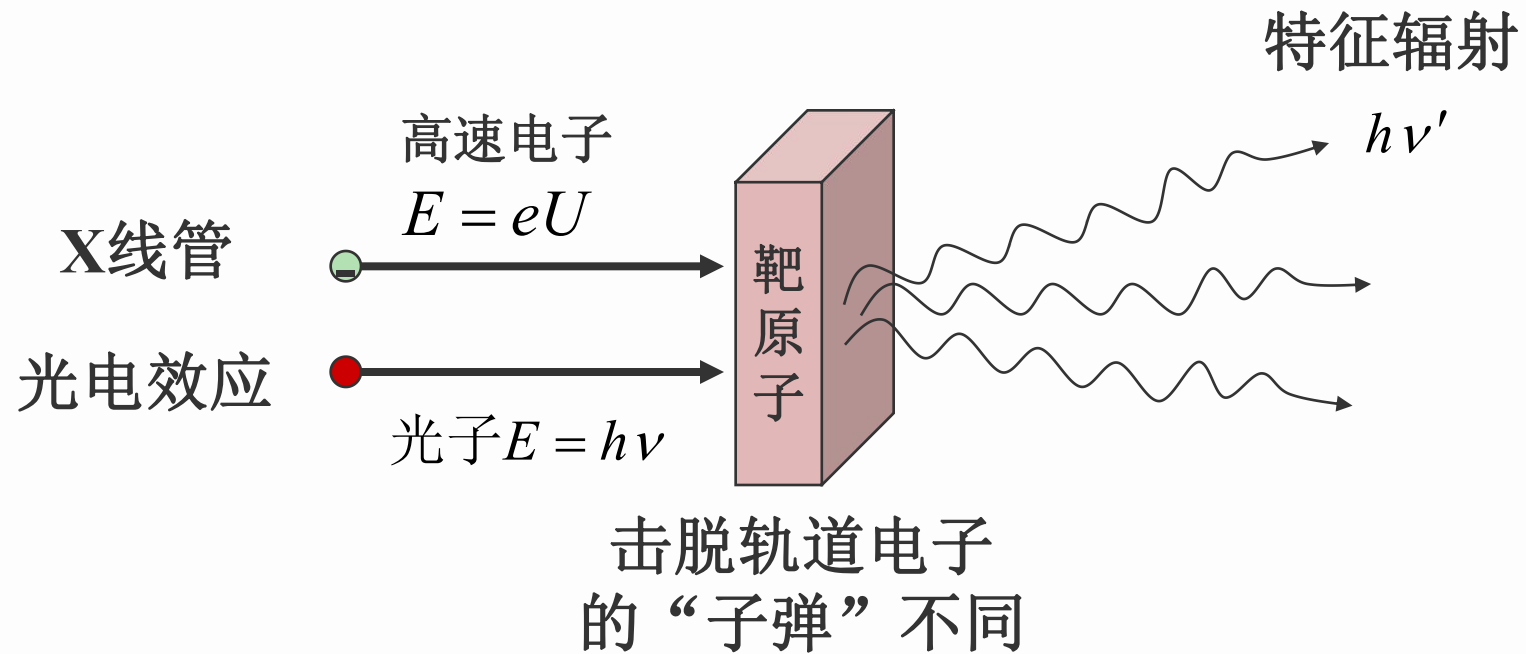
防护材料选取

复合防护材料配方

阳性造影剂制备

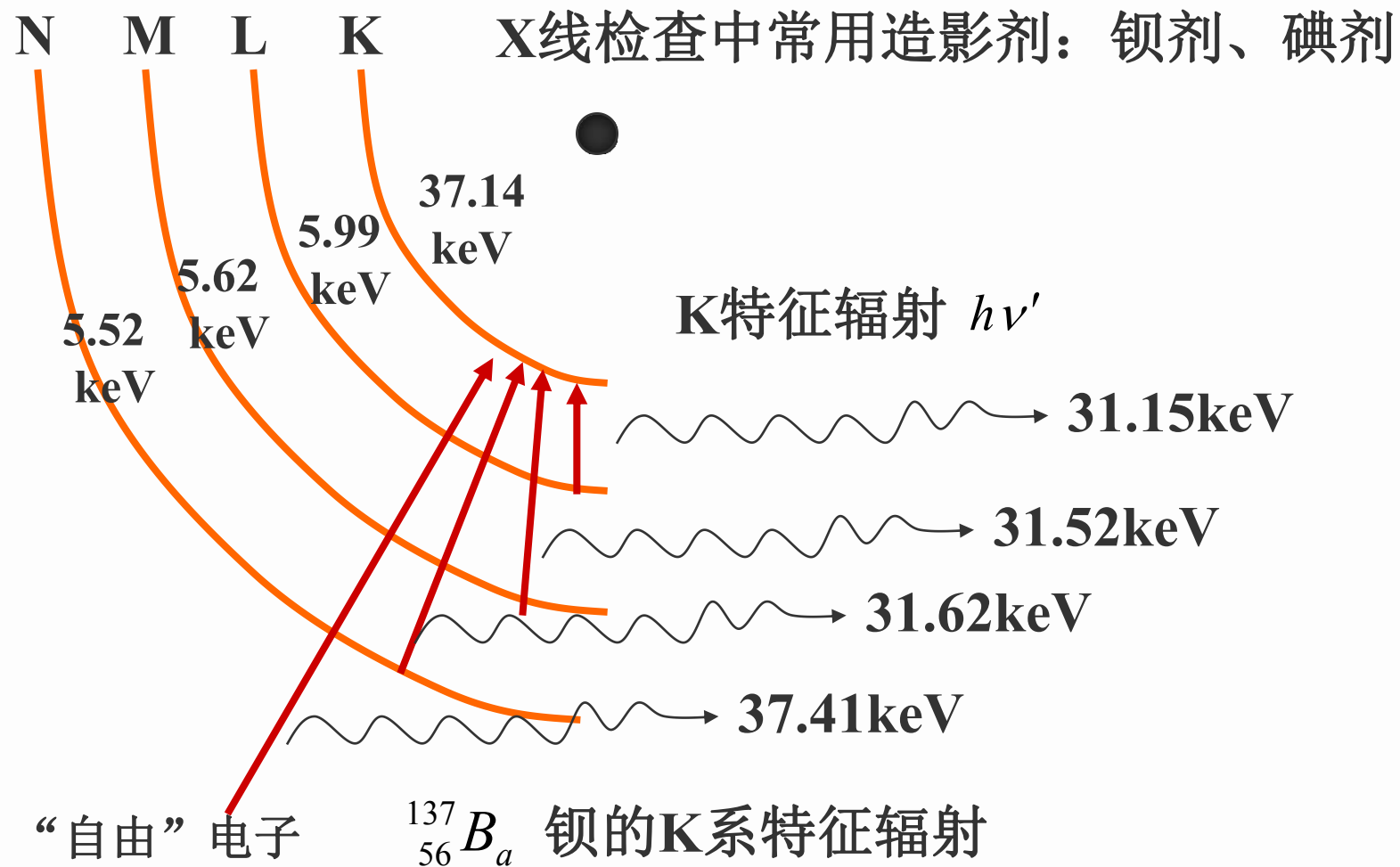


(三) 光电效应中的特征放射





(三) 光电效应中的特征放射





(三) 光电效应中的特征放射

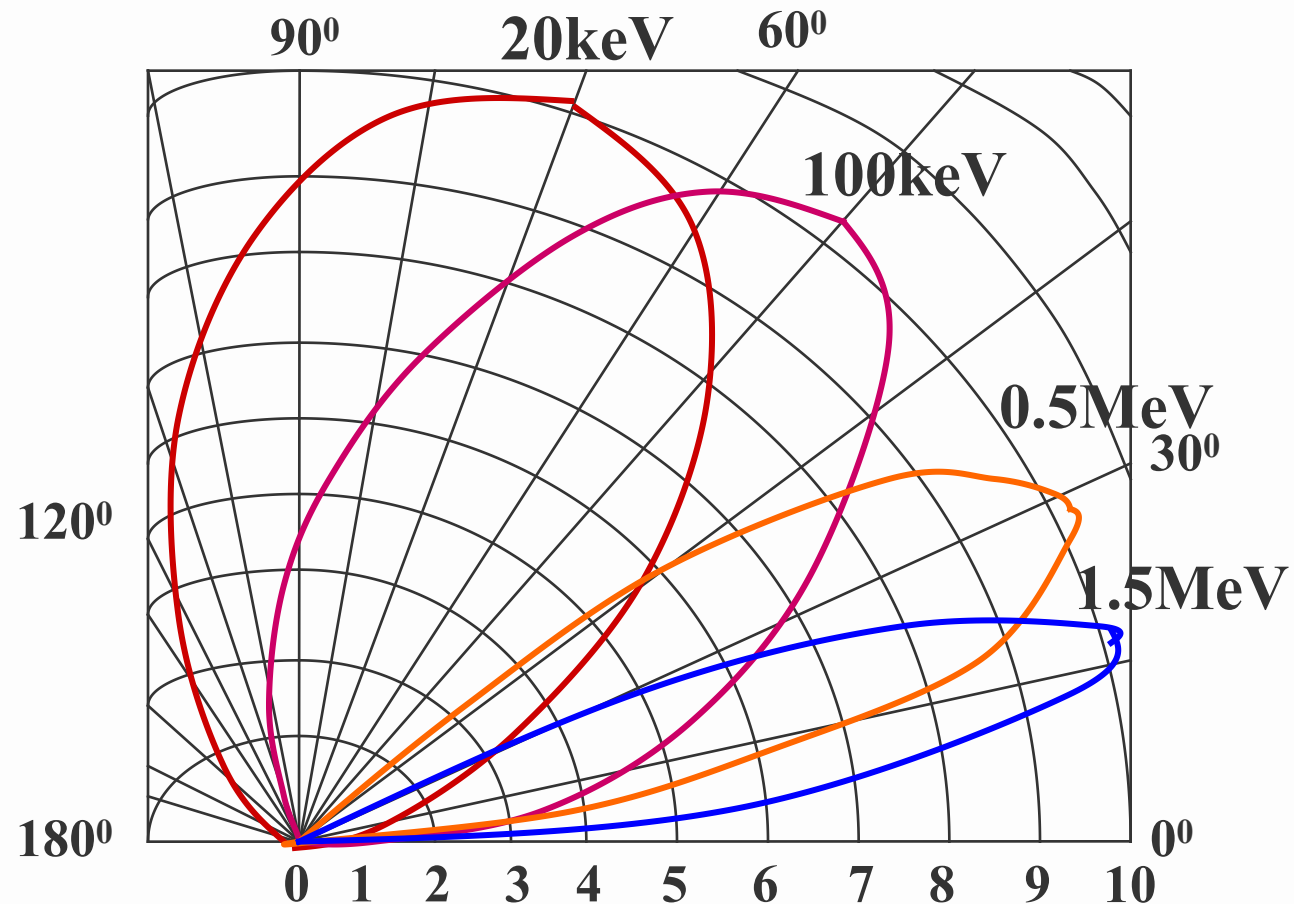
	K层电子结合能	K特征放射能量	
钡	37.4keV	37.4keV	穿过人体组织到达胶片产生灰雾
碘	33.2keV	33.2keV	
人体软组织	0.5keV	0.5keV	在同一细胞内被吸收变为电子运动
骨骼中的钙	4keV	4keV	在零点几毫米之内被吸收

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



(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





(五) 诊断放射学中的光电效应

在诊断放射学中产生光电效应的利和害

1. 有利方面：产生质量好的照片影像

(1) 不产生散射线，减少照片的灰雾

(2) 增加受检人体不同组织和造影剂对射线的吸收差别，产生高对比度的X线照片

应用：铝靶软组织X线摄影 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
提高放疗疗效 光电效应可增加肿瘤组织的剂量

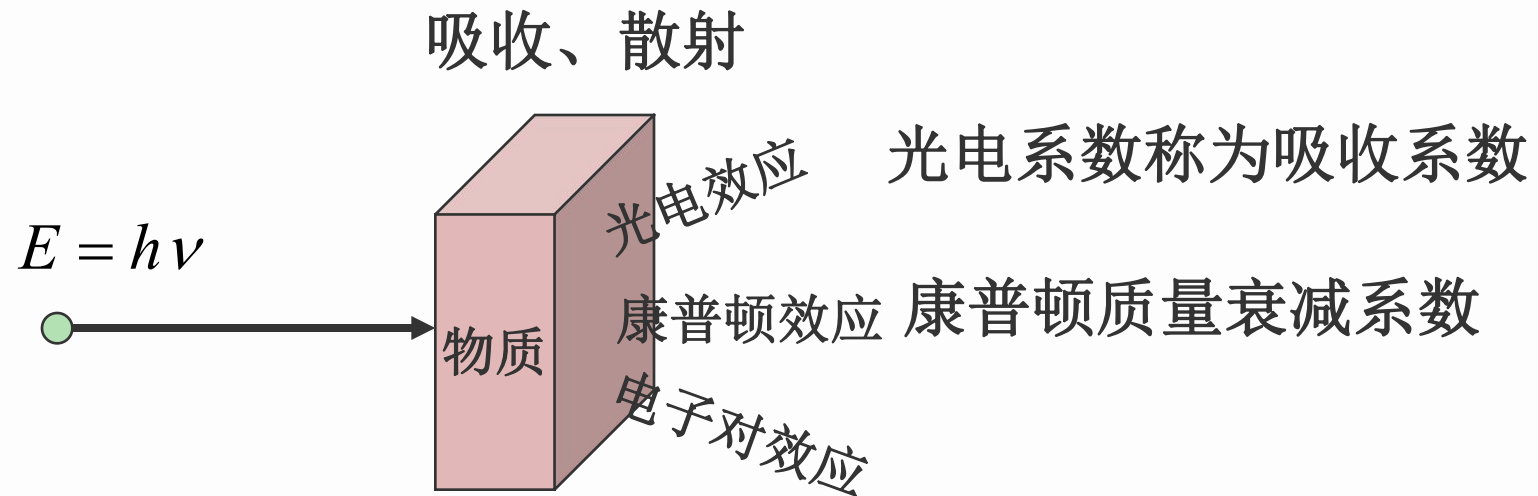
2. 有害方面：入射X线通过光电效应可全部被人体吸收 增加受检者的剂量

用千伏摄影技术，降低剂量



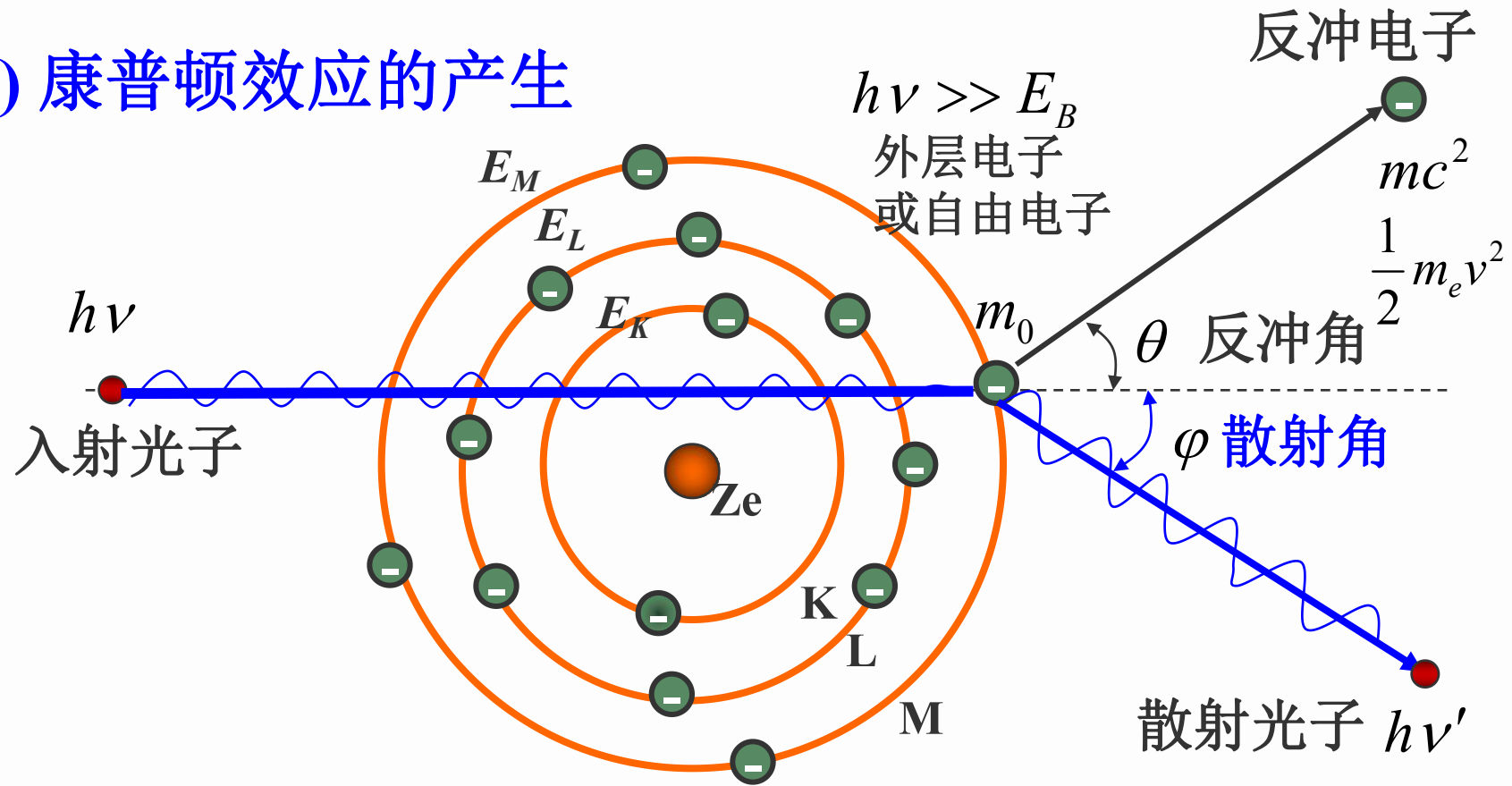
第二节 X(或 γ)射线与物质的相互作用的主要过程

二、康普顿效应 康普顿散射，是X射线光子能量被部分吸收而产生散射线过程



第二节 X(或 γ)射线与物质的相互作用的主要过程

(一) 康普顿效应的产生





(二) 康普顿效应的发生几率

1. 康普顿质量衰减系数

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

式中： $C_2 = C_1 N_0$ — 常数 A — 原子量
 Z — 物质的原子序数 λ — X光波长



(二) 康普顿效应的发生几率

2. 影响康普顿效应发生几率的因素

(1) 物质原子序数的影响

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

只适合氢元素与其他元素比较

大多数材料几乎有相同的 $\frac{N_0}{A}Z$ 每克电子数

所有物质 σ_m 几乎是相同的



(2)入射光子能量的影响

$$\text{康普顿效应几率} \propto \frac{1}{h\nu} \quad (4-16)$$

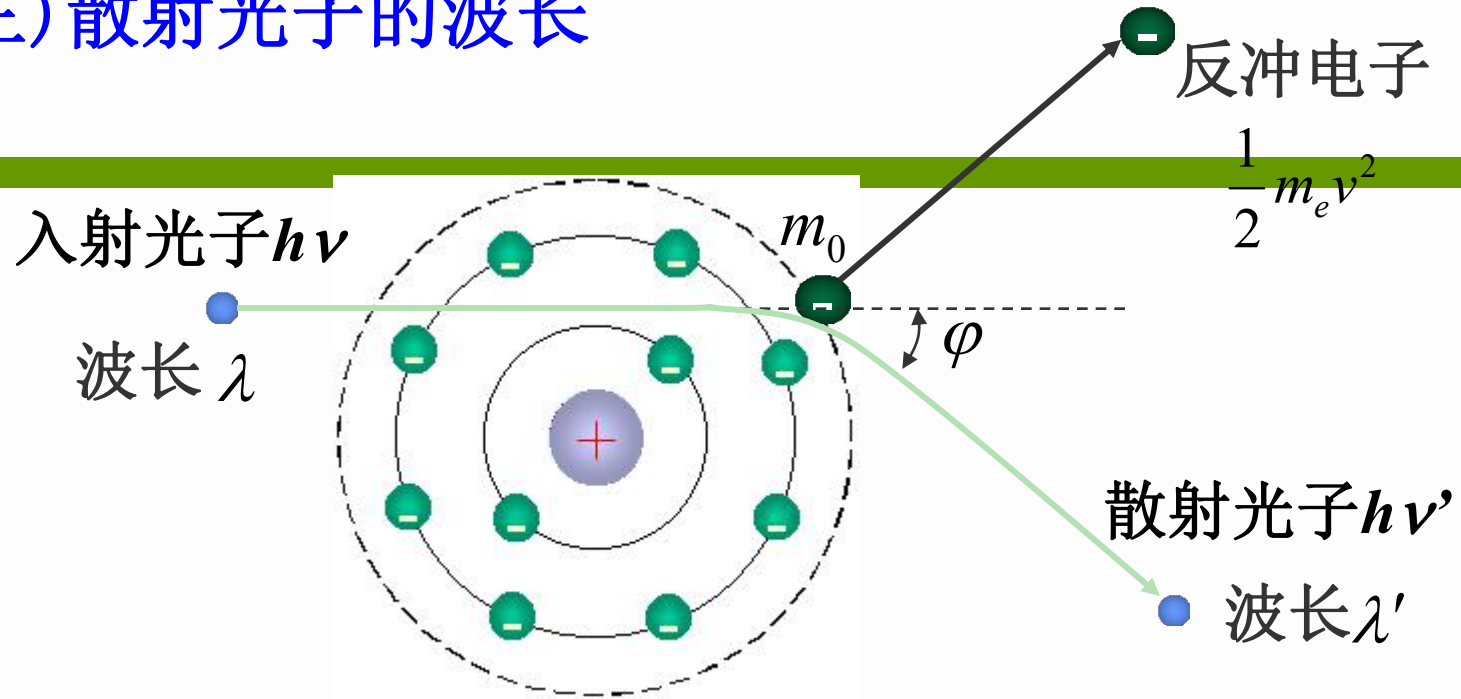
相互作用
光子 $\longrightarrow$ “自由” 电子

对比

产生康普顿效应的条件	$h\nu \gg E_B$	$\sigma_m = \frac{c_2}{A} Z\lambda$
产生光电效应的条件	$h\nu \geq E_B$	$\tau_m = \frac{c_1}{A} Z^4 \lambda^3$

在K层电子结合能以上，随着入射光子能量的增加
光电效应很快降低，而康普顿效应变得越来越重要

(三) 散射光子的波长



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

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

X线光子波长的增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



(三) 散射光子的波长

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos\varphi) \quad (4-20)$$

$$\lambda_c = \frac{h}{m_0c} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{9.1 \times 10^{-31} \times 3.0 \times 10^8} = 2.43 \times 10^{-12} (m)$$

称为反冲电子的康普顿波长

$$\lambda_c = \frac{h}{m_0c} = 0.00243 (nm)$$



(四). 散射光子和反冲电子的角分布

散射光子的能量

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\varphi)} \quad (4-21)$$

反冲电子的动能

$$T = \frac{h\nu}{1 + \frac{m_0c^2}{h\nu(1 - \cos\varphi)}} \quad (4-22)$$

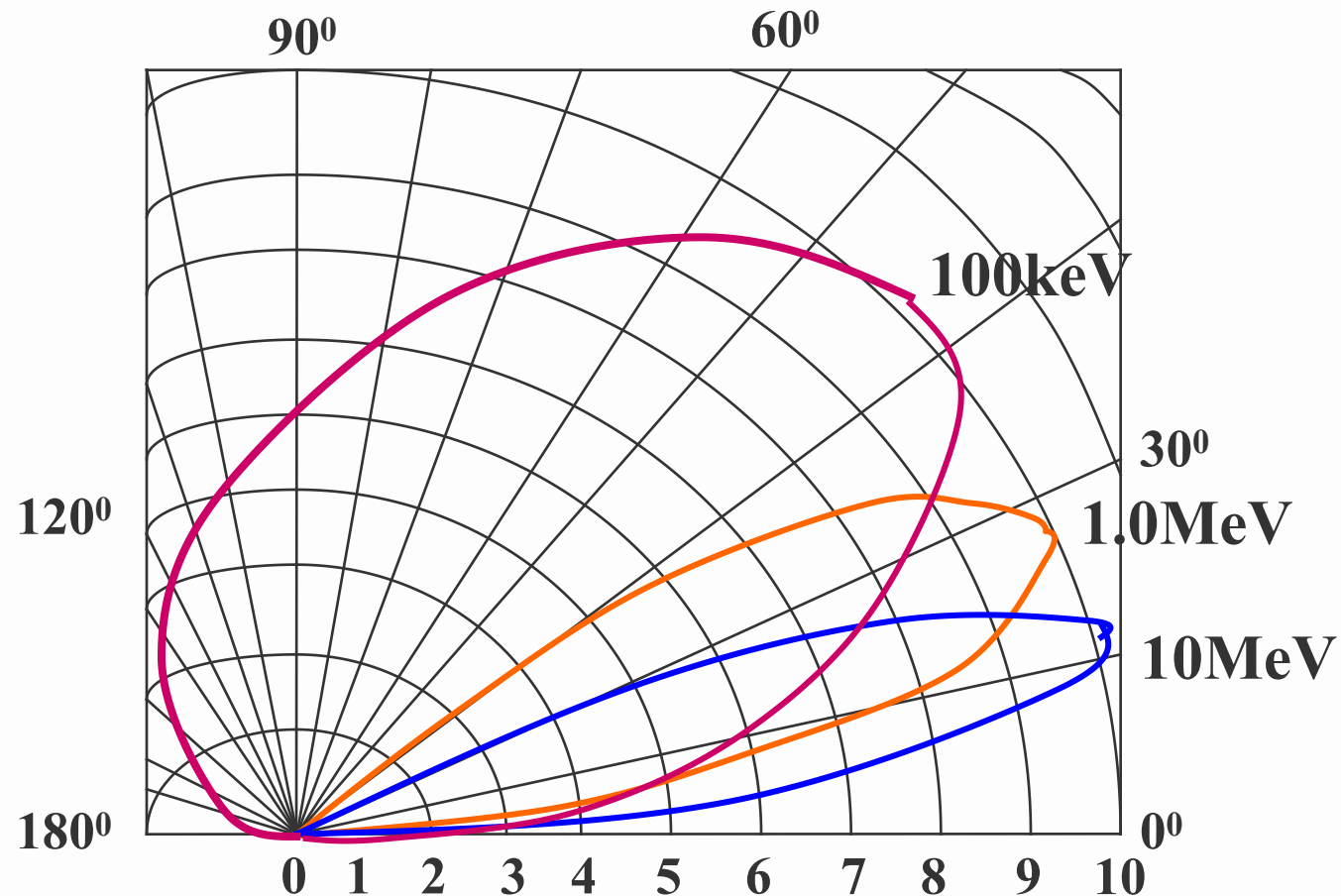
讨论：当 $\varphi = 0^\circ$ 时 $\cos\varphi = 1$ $h\nu' = h\nu$ $T = 0$

$$\text{当 } \varphi = 180^\circ \text{ 时 } \cos\varphi = -1 \quad (h\nu')_{\min} = \frac{h\nu}{1 + \frac{2h\nu}{m_0c^2}} \quad T_{\max} = \frac{h\nu}{1 + \frac{m_0c^2}{2h\nu}}$$



(四). 散射光子和反冲电子的角分布

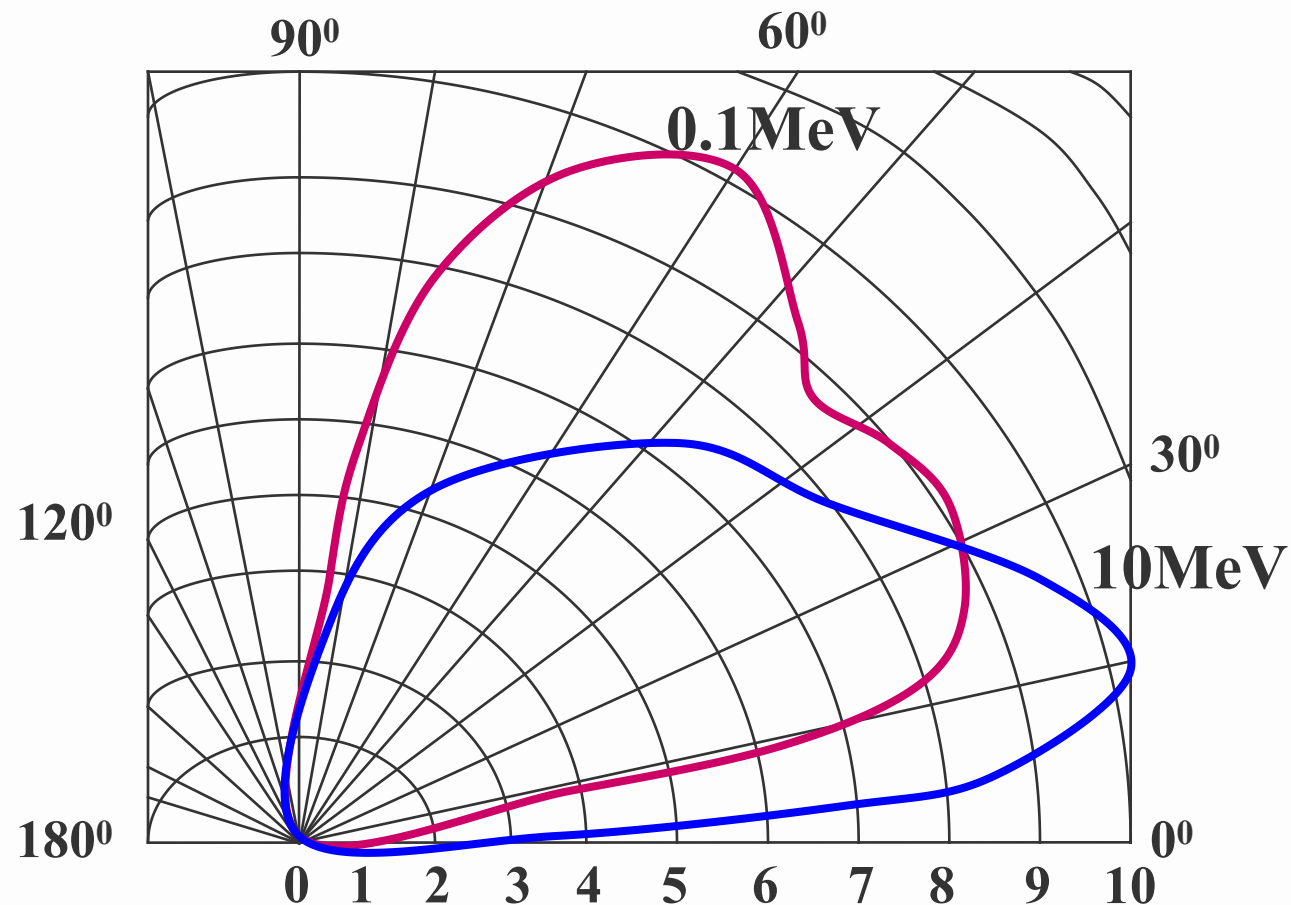
康普顿散射光子的分布角





(四). 散射光子和反冲电子的角分布

康普顿反冲电子的分布角





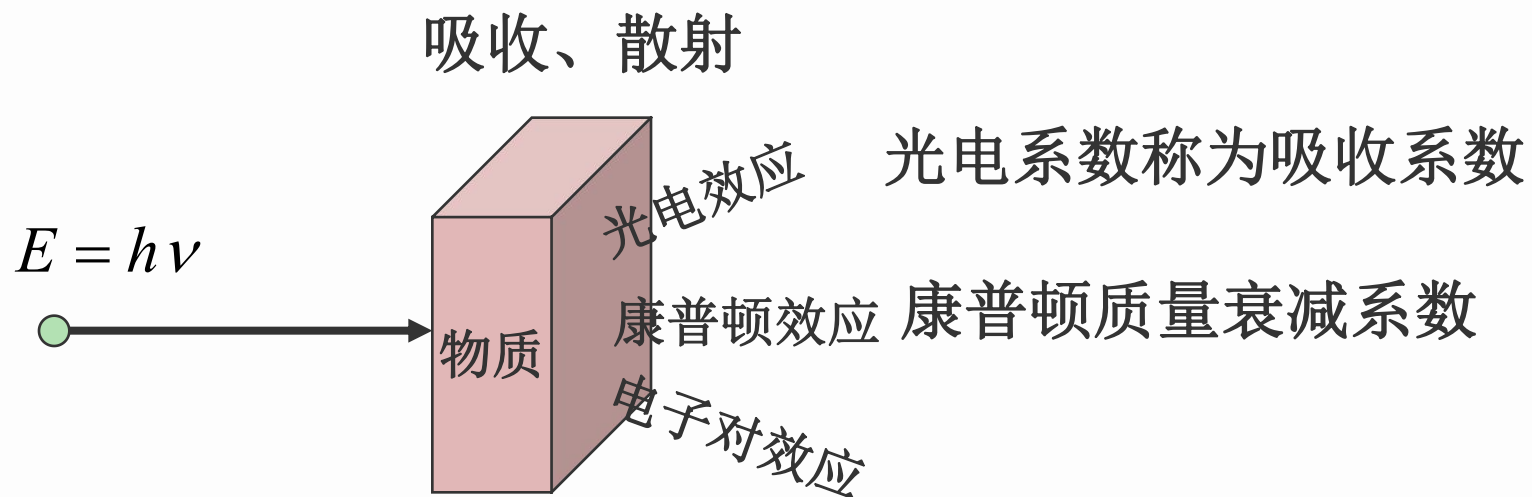
康普顿效应中产生的散射线
是X检查中最大的散射来源



第二节 X(或 γ)射线与物质的相互作用的主要过程

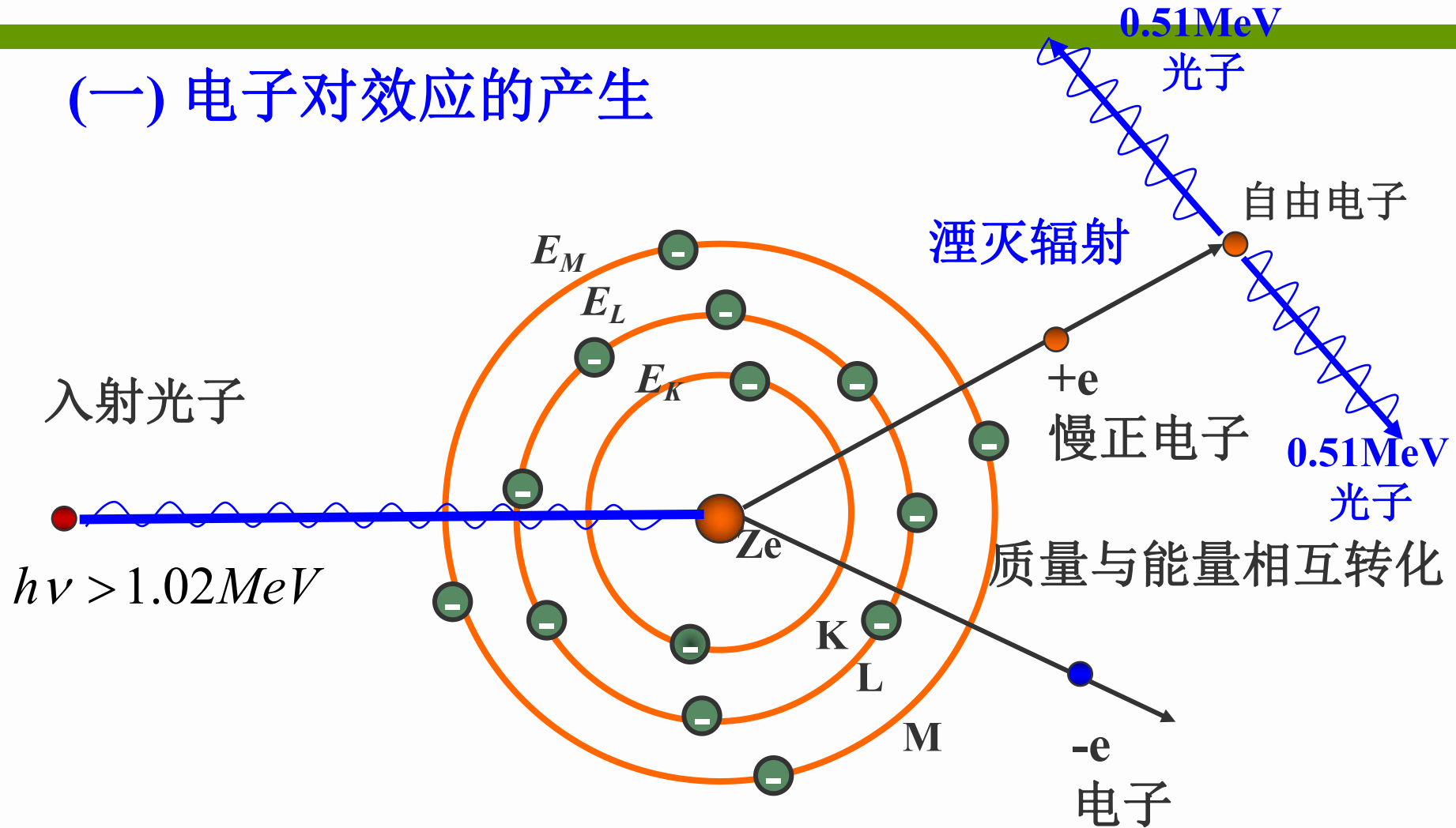
三、电子对效应

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、负电子的过程



第二节 X(或 γ)射线与物质的相互作用的主要过程

(一) 电子对效应的产生





一个电子的静止质量能 $m_0c^2 = 0.51MeV$

一个电子对的静止质量能 $2m_0c^2 = 2 \times 0.51MeV = 1.02MeV$

要产生电子对效应

$$h\nu = 1.02MeV + \varepsilon^+ + \varepsilon^- \quad (4-26)$$

光子能量超过该能量值的部分
就变为正、负电子的动能 (ε^+ 、 ε^-)



(二) 电子对效应的发生几率

电子对效应质量衰减系数

$$\kappa_m \propto nZ^2 \ln(h\nu)$$

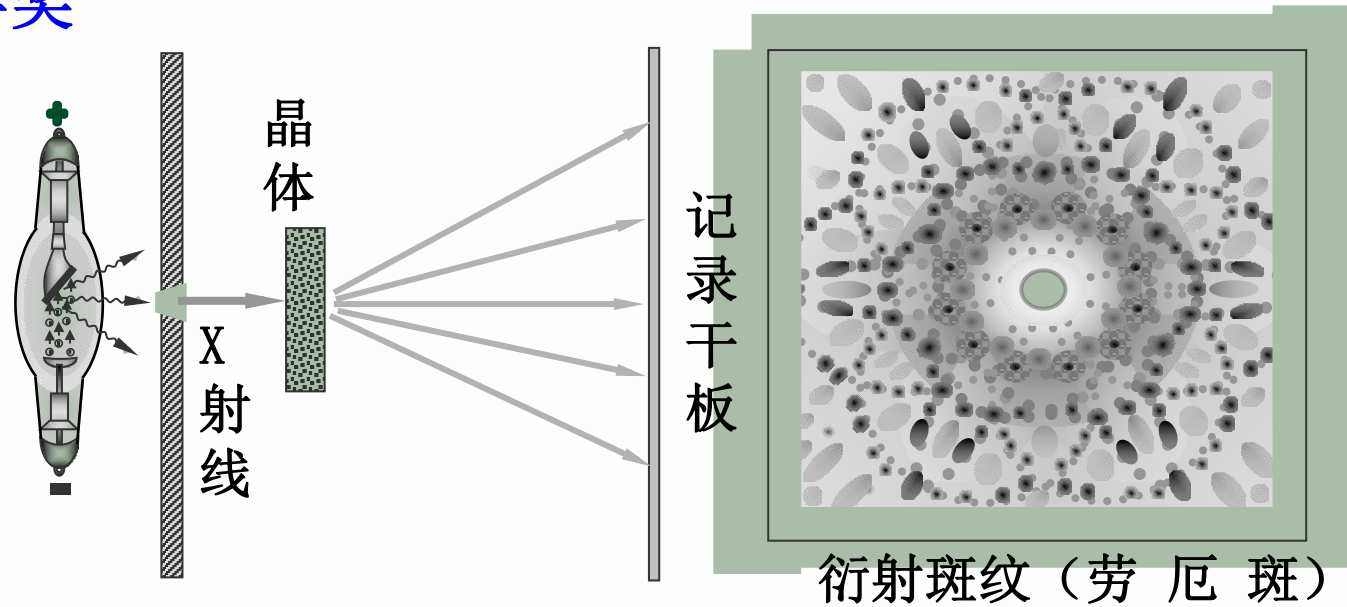
式中： n —单位体积内的原子个数

Z —物质的原子序数

$\ln(h\nu)$ —X光子能量的对数

(1). X射线衍射

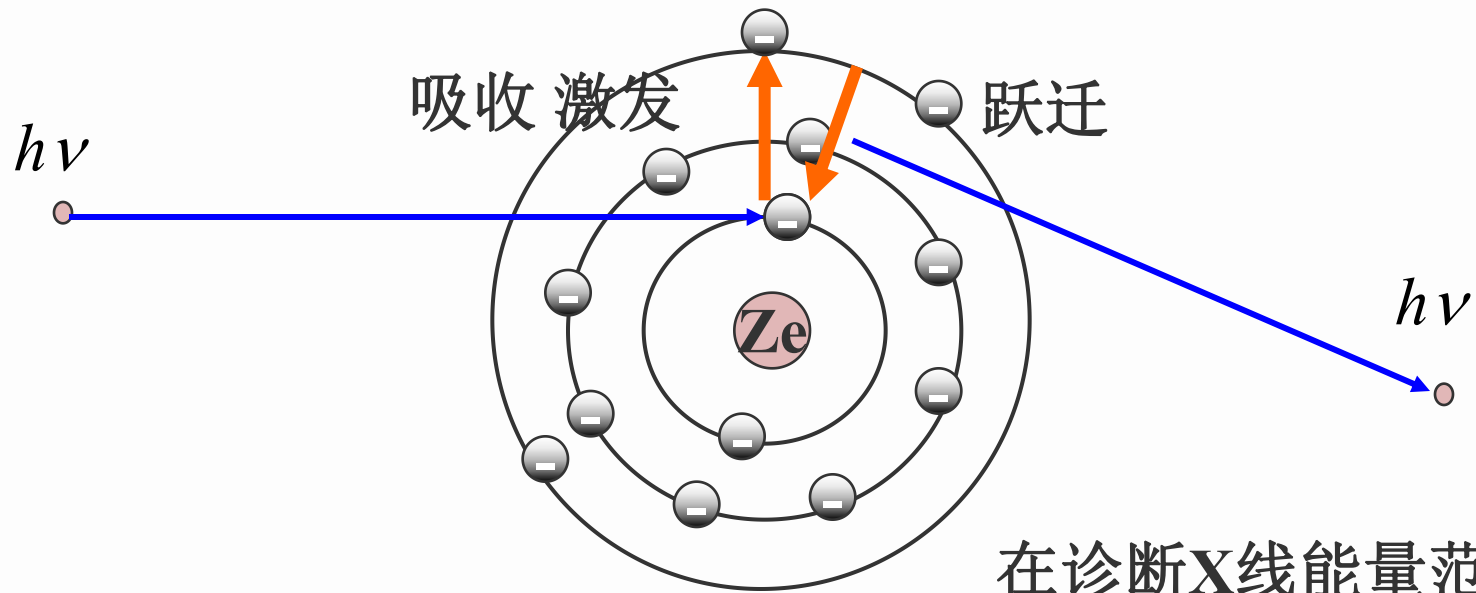
X射线发现17年后，于1912年，德国物理学家劳厄找到了X射线具有波动本性的最有力的实验证据：发现并记录了 X 射线通过晶体时发生的衍射现象。1914年获诺贝尔物理学奖



劳厄的X射线衍射实验原理图

(2). 瑞利散射——X射线折射

只改变传播方向，而光子的能量不变的作用过程称为
瑞利散射 不产生电离



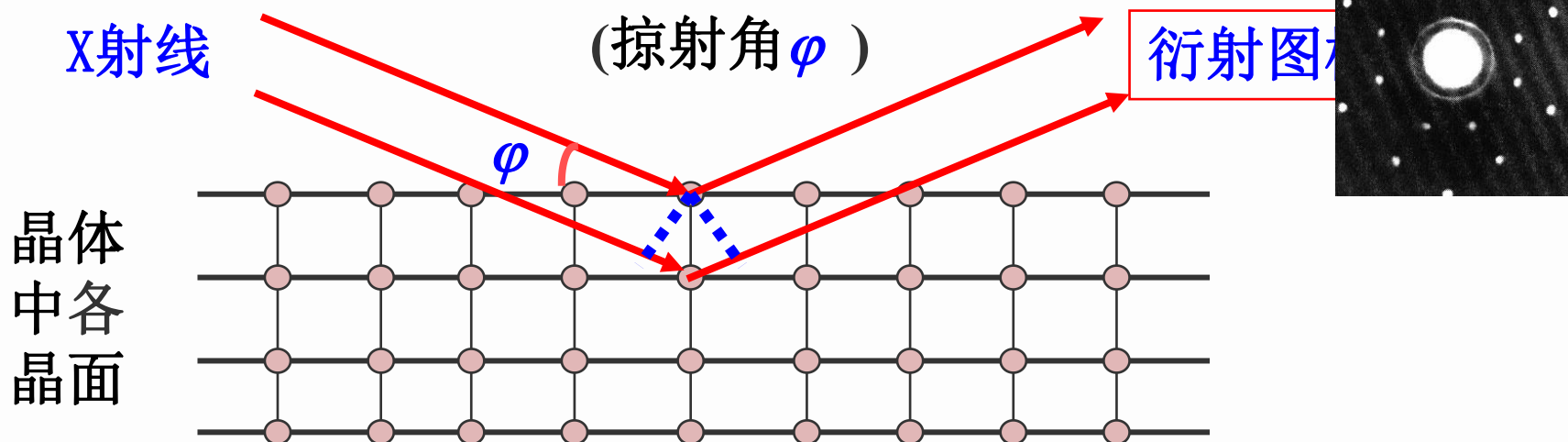
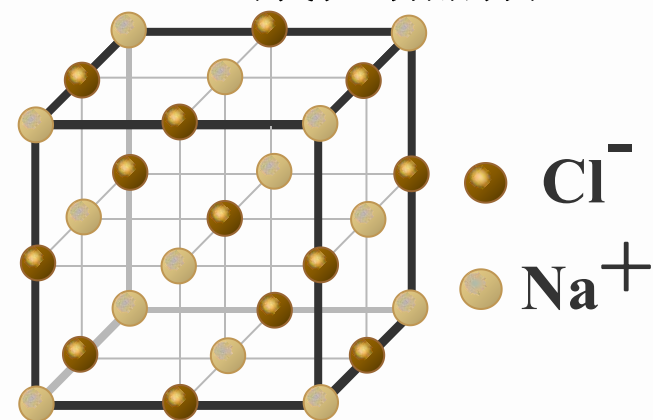
在诊断X线能量范围
瑞利散射的发生几率 $\propto \frac{Z}{(h\nu)^n}$ 发生几率 < 全部相互作用的5%

瑞利散射原理图

晶体结构点阵

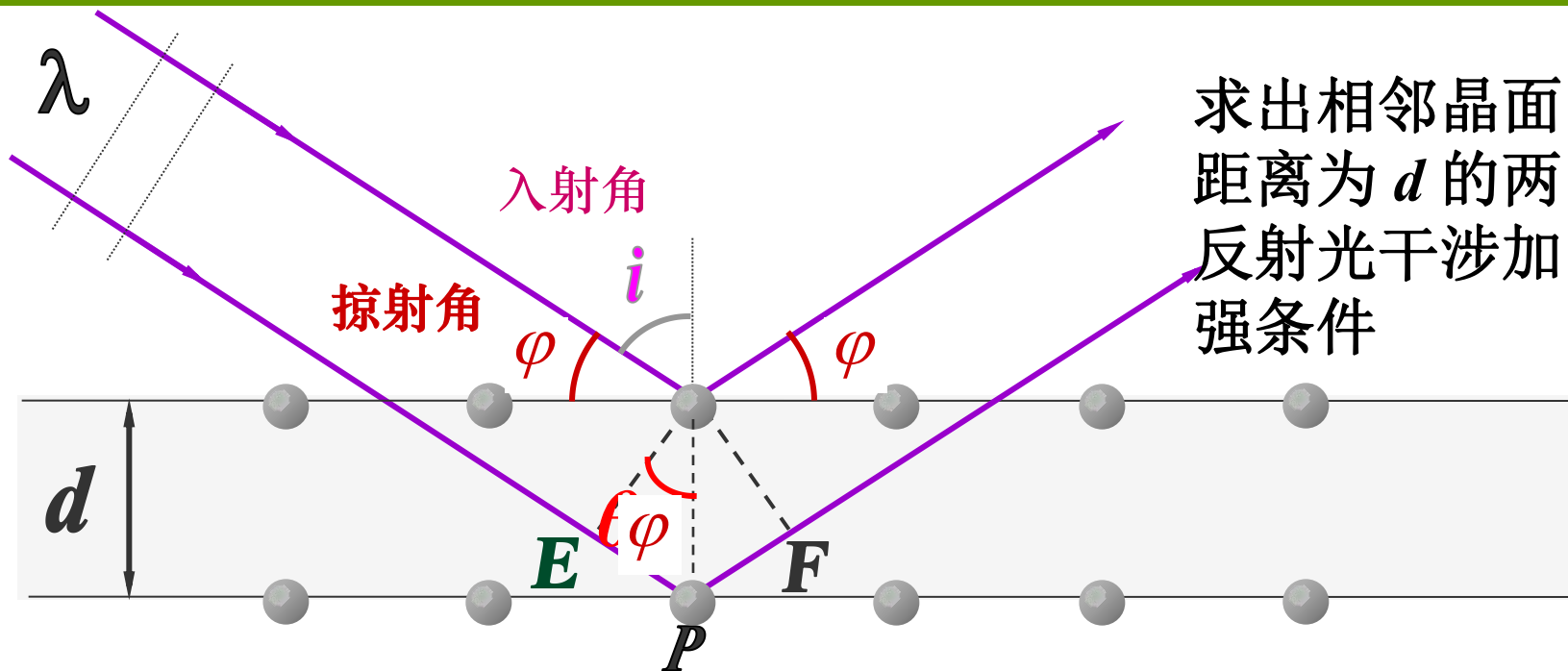
晶体中原子有规律排列的结构可看成是光栅。原子的线度和间距大约为 10^{-10}m 数量级，与入射X射线的波长相当或更小些，相邻晶面原子的反射线发生干涉，就可能获得衍射现象

(氯化钠晶体)



布拉格方程

Bragg equation



面层间两反射光光程差

$$\delta = \overline{EP} + \overline{PF} = 2d \cos i = 2d \sin \varphi$$

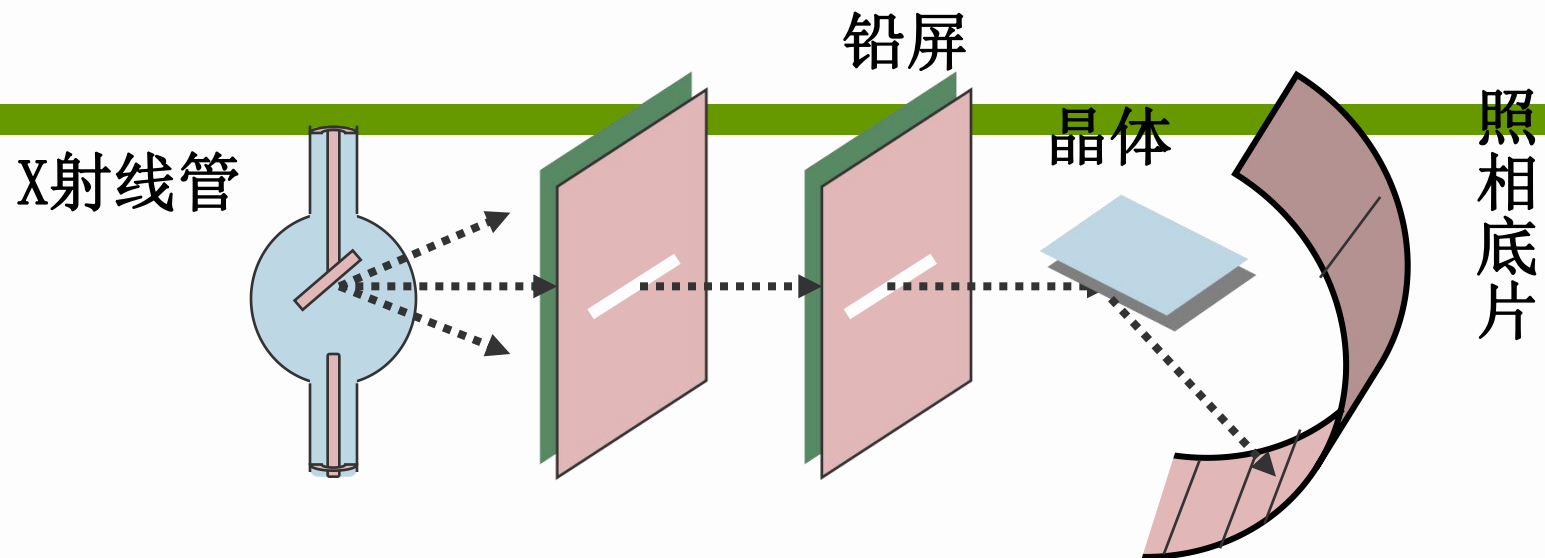
干涉加强得亮点的条件

$$2d \sin \varphi = k\lambda$$

($k = 1, 2, \dots$)

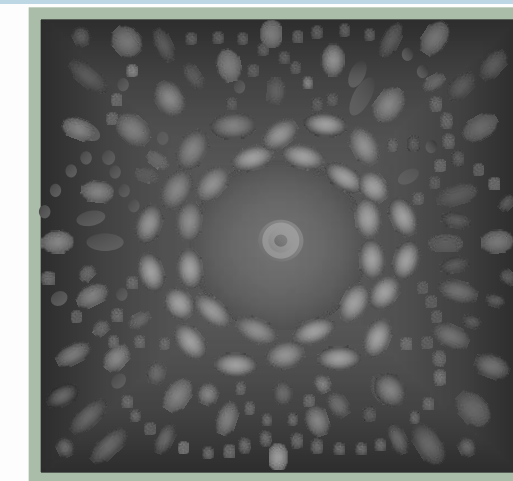
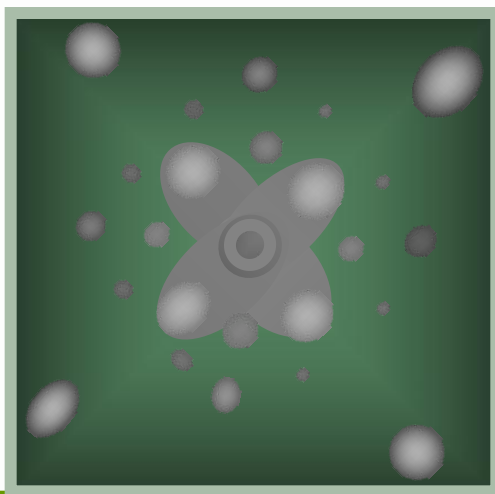
布拉格定律
或布拉格方程

X射线摄谱仪原理图



X射线的衍射图样:

NaCl单晶X射线
衍射斑点

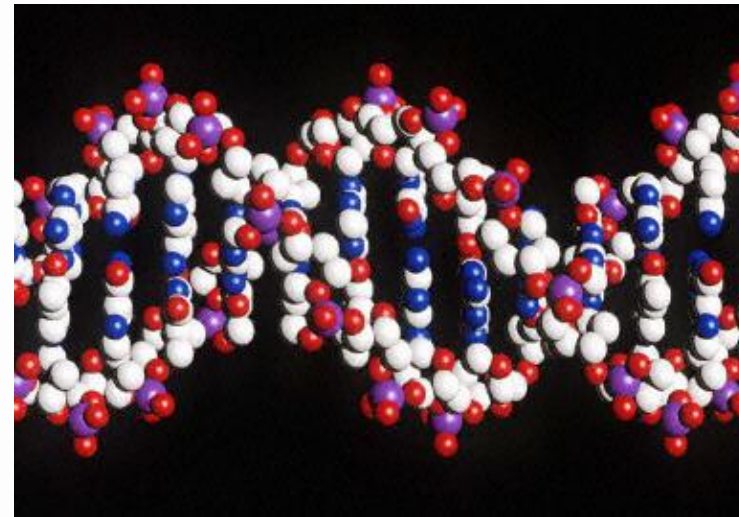
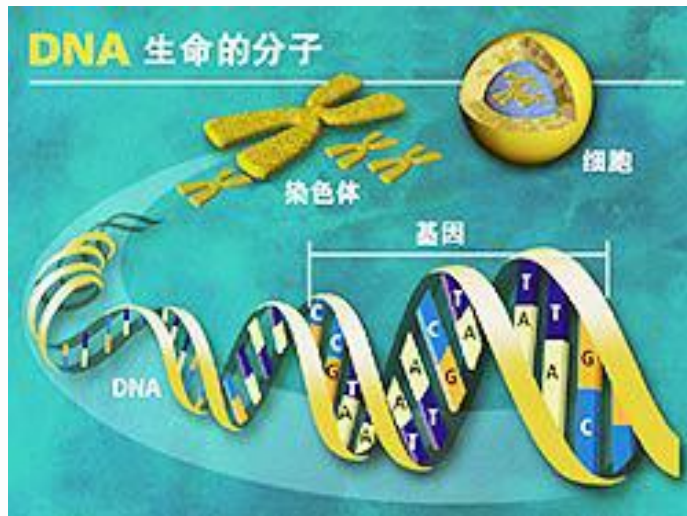


石英的X射线衍射斑点



X射线衍射的重要应用举例

脱氧核糖核酸(DNA分子)的双螺旋结构模式



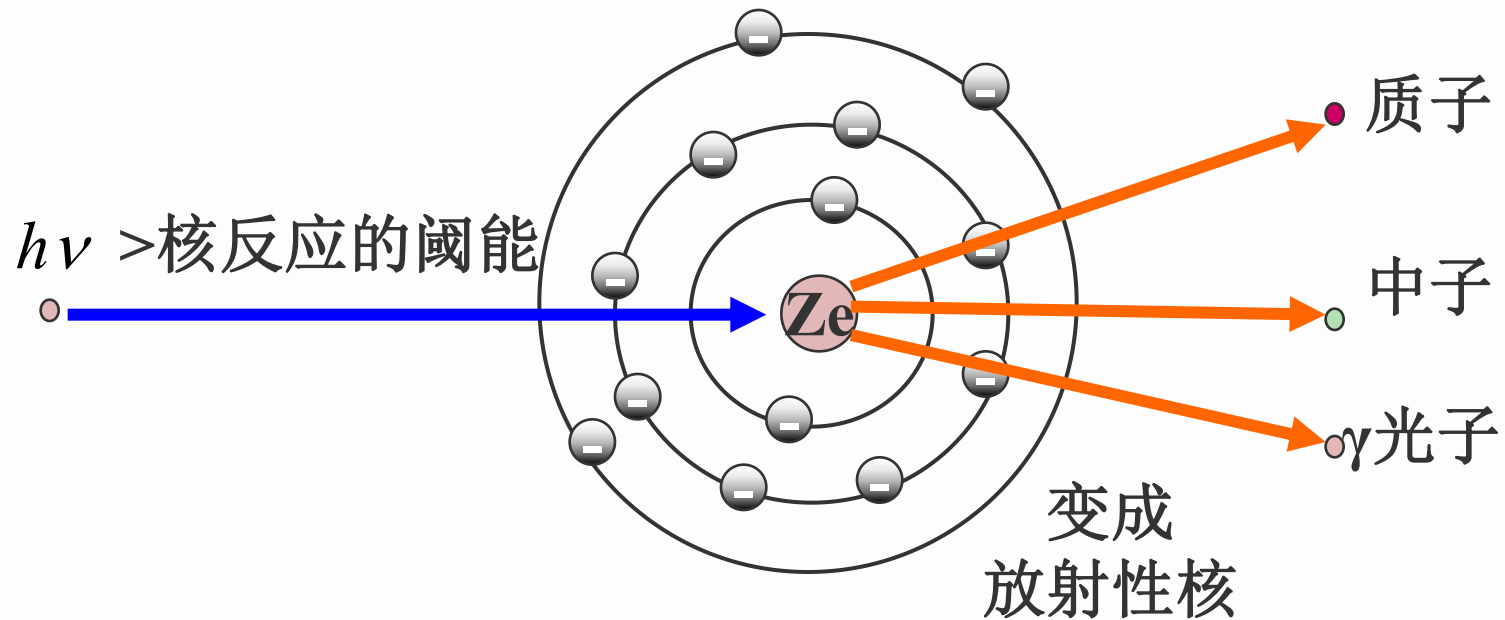
1953年，美国科学家沃森（J. D. Watson, 1928-）和英国科学家克里克（F. Crick, 1916-）提出DNA双螺旋结构；1962年获诺贝尔医学和生理学奖



二、光核作用

就是光子与原子核作用发生的核反应

发生几率<全部相互作用的5%



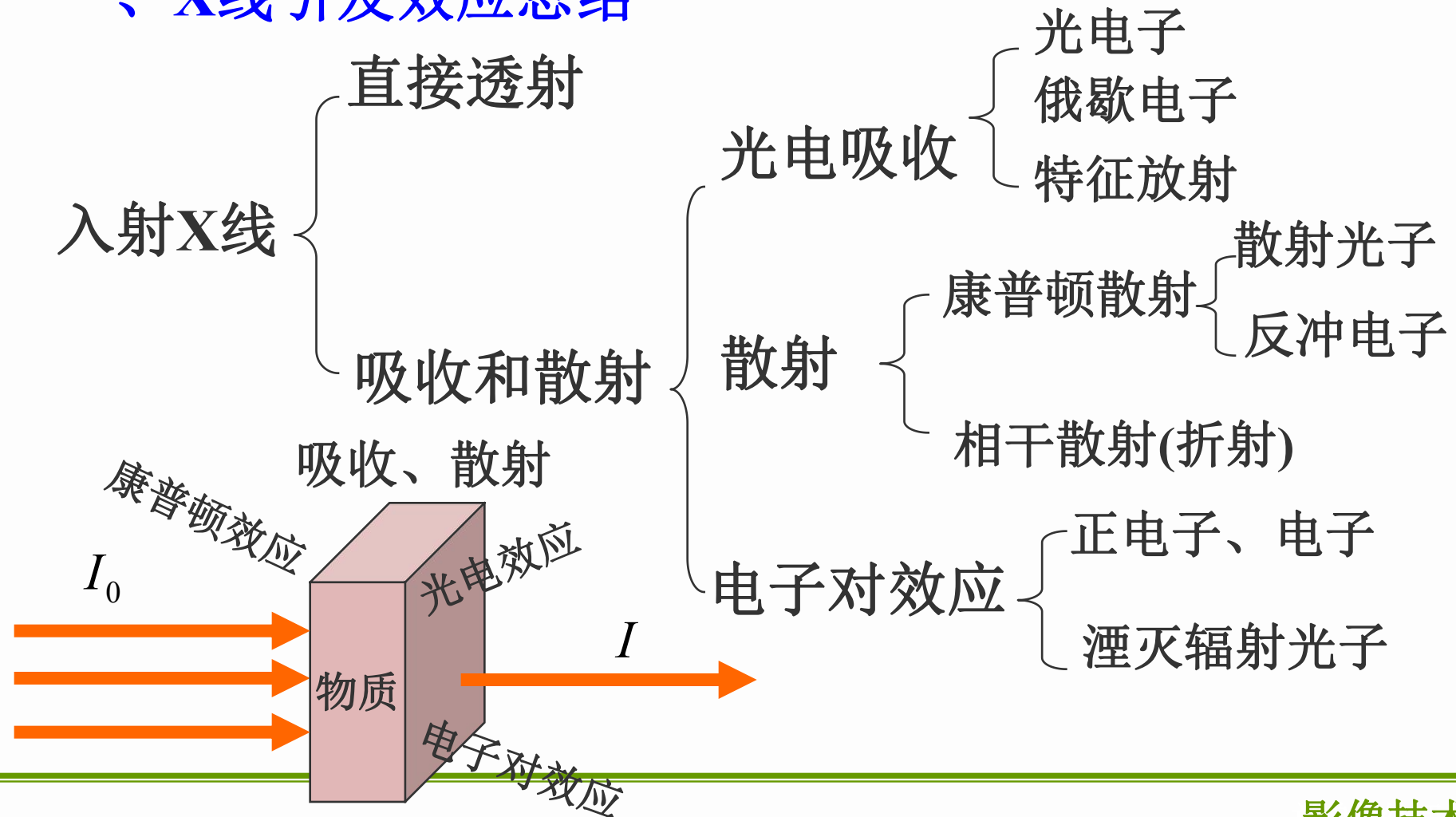
γ

光核作用原理图



第四节 各种相互作用发生的相对几率

一、X线引发效应总结

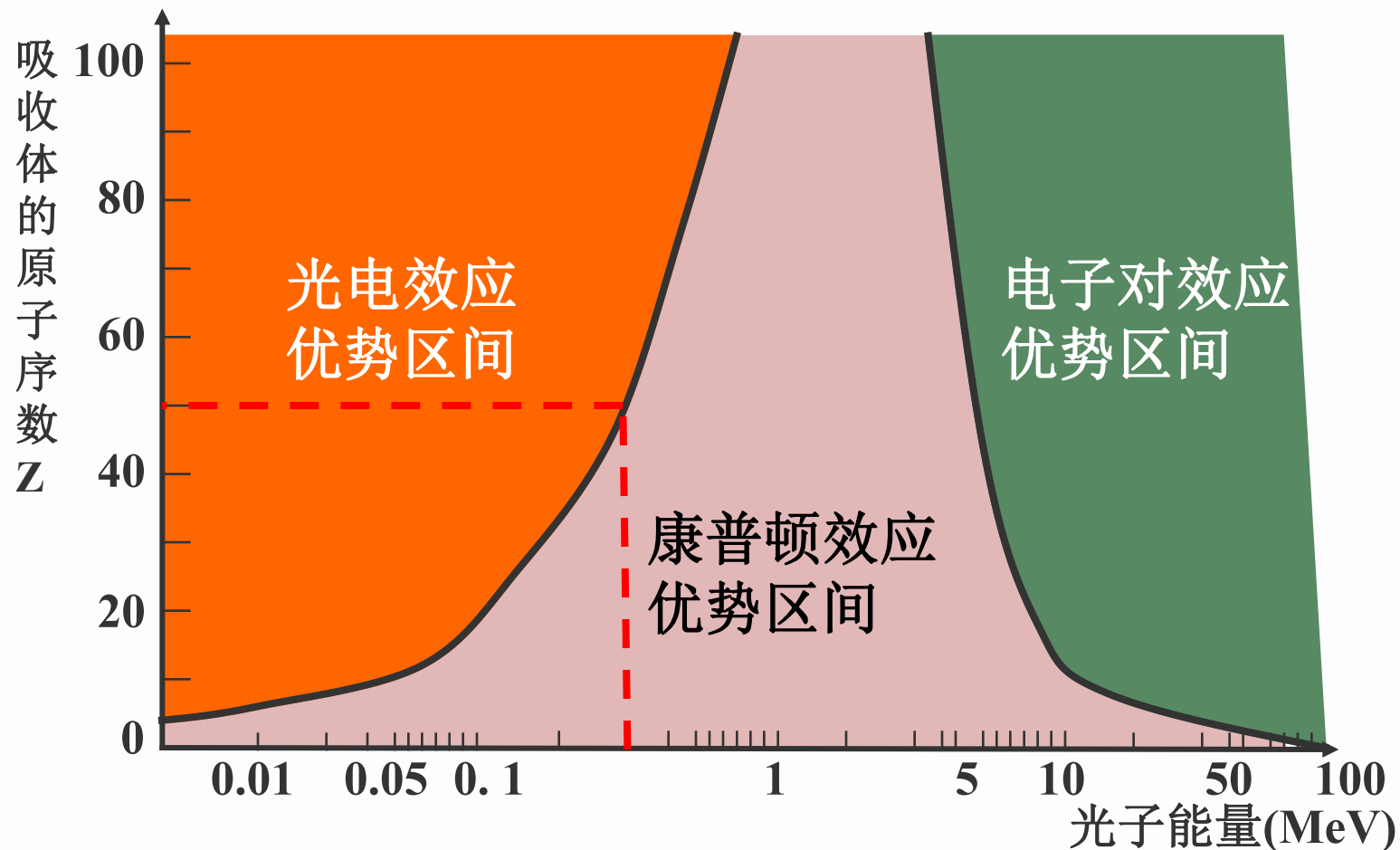




二、 Z 和 $h\nu$ 与三种基本作用的关系

在0.01~10MeV最常见的能量范围

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





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线能量范围

诊断放射学中作用几率 $\bar{Z}$ 与 $h\nu$ 和的关系

X线能量 <i>keV</i>	水 $\bar{Z} = 7.4$		骨 $\bar{Z} = 13.8$		碘化钠 $\bar{Z} = 49.8$	
	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

水代表低 Z 物质，如肌肉、脂肪、体液和空气等

骨含大量的钙质，代表人体内中等原子序数的物质

碘化钠代表诊断放射学中遇到的高原子序数物质碘和钡