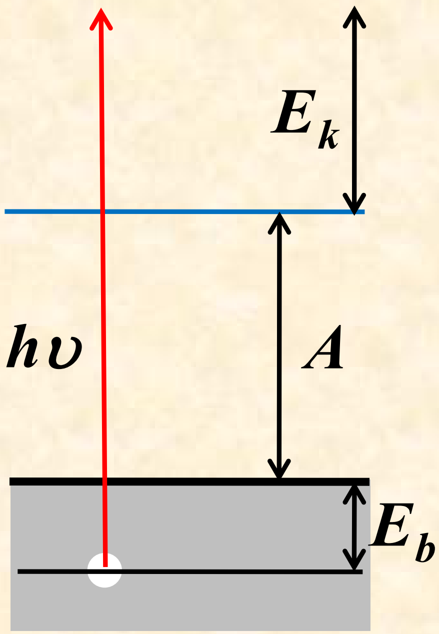
§ 20.3 光电效应



$$\boxed{h\upsilon_0 = A, \quad \text{红限频率}\ \upsilon_0 = \frac{A}{h}.}$$

$$\boxed{h\upsilon = E_b + A + E_k.} \qquad \boxed{h\upsilon = E_{km} + A.}$$

$$\boxed{|U_a| = \frac{E_{km}}{e} = \frac{1}{e}(h\upsilon - A).}$$

$$\boxed{\text{光子的能量}\ E = h\upsilon = h\frac{c}{\lambda}.}$$

$$\boxed{\text{光子的质量}\ m = \frac{E}{c^2} = \frac{h\upsilon}{c^2}, \quad \text{静质量}\ m_0 = 0.}$$

$$\boxed{\text{光子的动量}\ p = mc = \frac{h\upsilon}{c} = \frac{h}{\lambda}.}$$

例2. λ=0.207 μm的光照射在金属钯表面产生光电效应。已知钯的红限频率υ_0=1.21×10^{15} Hz，则遏止电压U_a=?

解法一：从光电效应的物理机理出发。

光子能量 $E=\dfrac{hc}{\lambda}=\dfrac{6.63\times10^{-34}\times3\times10^{8}}{0.207\times10^{-6}}=9.609\times10^{-19}J=6.01\ eV.$

逸出功$A=h\upsilon_0=6.63\times10^{-34}\times1.21\times10^{15}=8.022\times10^{-19}J=5.01\ eV.$

光电子最大初动能 $E_{km}=E-A=1.0\ eV.$

遏止电压 $U_a=\dfrac{E_{km}}{e}=\dfrac{1.0\ eV}{e}=\dfrac{1.0\times1.6\times10^{-19}\ J}{1.6\times10^{-19}\ C}=1.0\ V.$

解法二：套公式。

$$A=h\upsilon_0=6.63\times10^{-34}\times1.21\times10^{15}=8.022\times10^{-19}J.$$

$$U_a=\frac{1}{e}(h\upsilon-A)=\frac{1}{1.6\times10^{-19}}\left(\frac{6.63\times10^{-34}\times3\times10^{8}}{0.207\times10^{-6}}-8.022\times10^{-19}\right)$$

$$=1.0\ V.$$

例3. λ=300 nm的光照射在某金属表面时，光电子能量范围从0−4.0×10^{-19} J, 则遏止电压U_a=? 红限频率υ_0=?

解： $E_{km} = 4.0\times10^{-19}\,J.$

$$U_a = \frac{E_{km}}{e} = \frac{4.0\times10^{-19}}{1.6\times10^{-19}} = 2.5\ V.$$

$$A = h\upsilon - E_{km}$$

$$= 6.63\times10^{-34}\times\frac{3\times10^{8}}{300\times10^{-9}} - 4.0\times10^{-19}$$

$$= 2.63\times10^{-19}\,J$$

$$= 1.64\ eV.$$

教科书中通常有少量不符合实际情况的理论计算结果。实际上，几乎不存在逸出功小于3.0 eV的材料。

$$\upsilon_0 = \frac{A}{h} = \frac{2.63\times10^{-19}}{6.63\times10^{-34}} = 3.97\times10^{14}\,Hz.$$

§ 20.4 康普顿效应

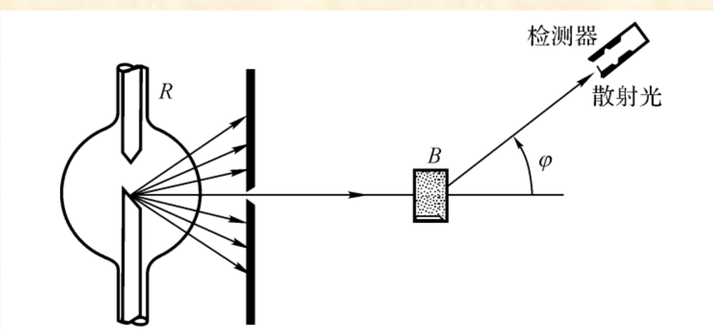
光电效应从能量角度显示出光的粒子性，康普顿效应从动量角度验证(支持)了光的粒子性。

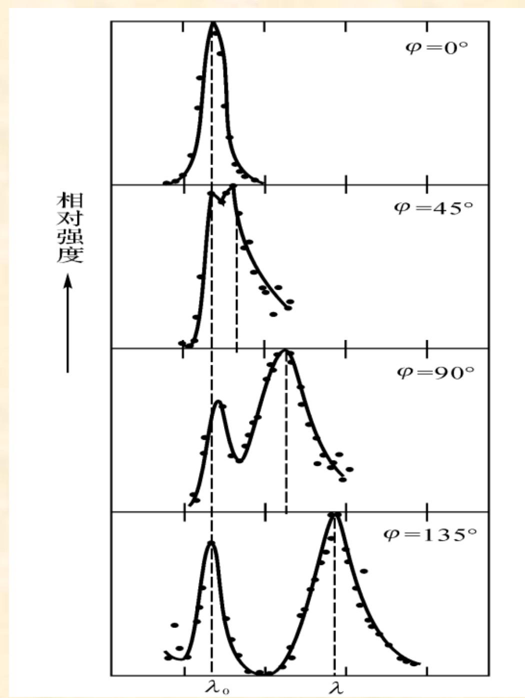
1923年，芝加哥大学康普顿研究小组用波长为λ_0的单色X射线照射在石墨晶体上，测量散射光时发现：

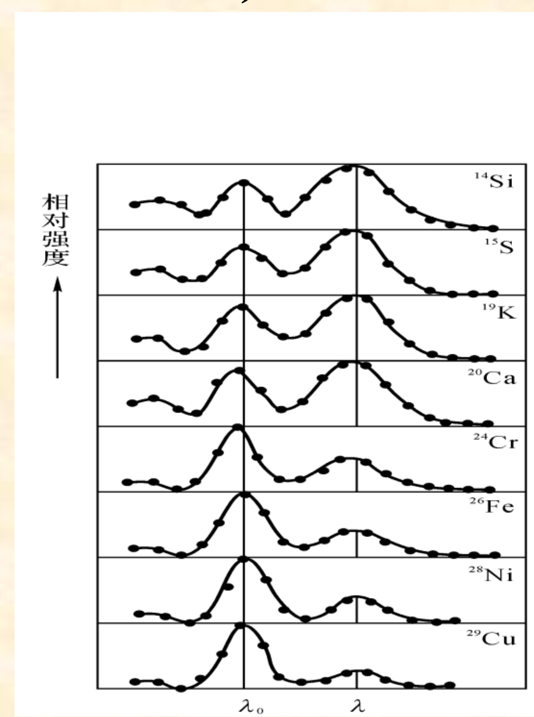
(1) 散射光中除波长为λ_0的光外，还出现波长大于λ_0的成分；

(2) $\Delta\lambda=\lambda-\lambda_0$随衍射角$\varphi$增大而增大，且$\Delta\lambda$与$\lambda_0$及散射物质无关；

(3) 重原子上此效应不明显(即新波长对应的实验信号弱)。







经典光散射理论：

频率为υ的电磁波通过物质时，引起物质内部带电粒子作同频率的受迫振动，并向四周发出辐射，形成散射光，因此散射光的波长与入射光相同。

经典理论和可见光的散射实验是相符的，但不能解释*X*光(波长小得多)散射。

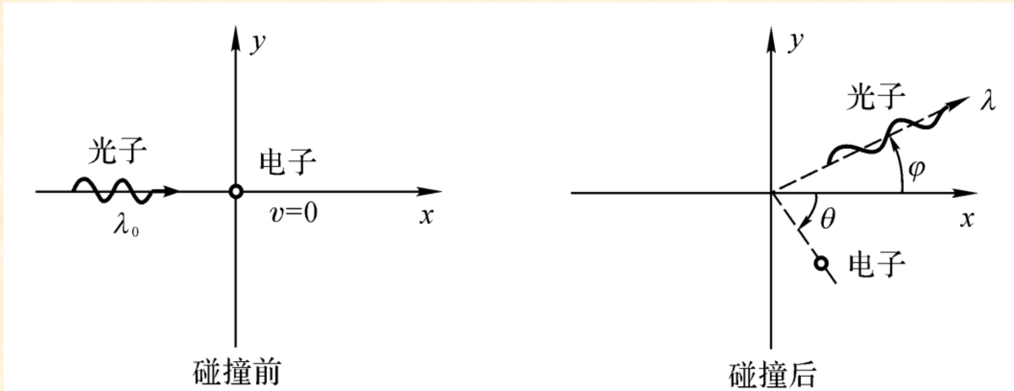
康普顿(1892-1962, 美国物理学家)用爱因斯坦的光子理论对*X*光散射作了满意的解释。

一、康普顿的定性解释

光作为粒子，和原子的外层电子(可近似看成自由电子)碰撞时，把一部分能量转移给电子，于是光的能量减小，即频率减小，所以波长增大。（λ）

如果和内层电子碰撞，由于内层电子和原子核结合牢固，这时相当于光子和整个原子碰撞。光子质量比原子小得多，和经典力学的小球撞墙壁类似，光子能量几乎不变。（λ_0）

二、康普顿的定量解释



设散射光子的运动方向在x轴上方。

(康普顿认为，原子里电子的运动能量远小于X射线能量，电子可近似看成原先是静止的。)

能量守恒：$m_0c^2 + h\upsilon_0 = \underline{m}c^2 + h\underline{\upsilon},$

式中m, m_0为电子的质量和静质量；υ_0和υ为光子散射前后的频率。

动量守恒：x方向，$h\dfrac{\upsilon_0}{c} = h\dfrac{\upsilon}{c}\cos\varphi + m\underline{\mathrm{v}}\cos\underline{\theta},$

y方向，$0 = h\dfrac{\upsilon}{c}\sin\varphi - m\mathrm{v}\sin\theta.$

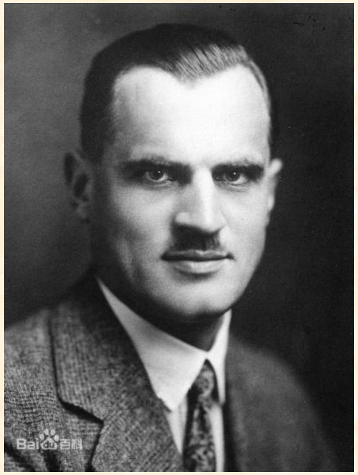
质速关系：$m = \dfrac{m_0}{\sqrt{1-\mathrm{v}^2/c^2}}.$

由上面四个方程可解出(课后自己务必算算，有难度)：

$$\boxed{\Delta\lambda \equiv \lambda - \lambda_0 = \frac{h}{m_0 c}(1-\cos\varphi),} \qquad (\lambda = \frac{c}{\upsilon})$$

式中 $\boxed{\frac{h}{m_0 c} = 0.0024\ nm,}$ 称为康普顿波长。

这个计算结果能精确说明光子和原子的外层电子碰撞时$\Delta\lambda$随φ的变化，也能说明和内层电子碰撞时的(近似)弹性散射，还表明能量、动量守恒定律在微观世界仍适用。康普顿因此获得1927年诺贝尔奖。



康普顿(1892-1962，美国)，1927年诺奖获得者。

吴有训(1897-1977，中国)，康普顿当时的博士生(1925年获博士学位)。清华大学物理系四位创系科学家之一，中央大学校长，中科院副院长。

课后阅读：

在康普顿公式的推导过程中，如果假设散射光子的运动方向在x轴下方，那么电子的反冲方向就在x轴上方。如果假设散射光子原路返回，则电子的反冲方向就是x轴正向。散射光子还有可能沿x轴正方向继续前进($\varphi=0$, $\Delta\lambda=0$,波长、能量不变，即没有和电子发生相互作用)。在实验中，一束光包含大量光子，各种φ角的散射事件时间都可能发生。

追问，对于某一个入射光子，它向哪个方向散射？在经典物理中，这就是对心碰撞，只可能发生$\varphi=0$或π的散射情况，$\varphi\neq0$或π的散射是如何发生的？对于$\varphi=0$的情况，因为光子速度一定大于电子速度，这说明光子能穿透电子吗？难道电子还有内部结构吗？这些问题在量子力学建立后才能回答。

原子内电子的运动能量真的远小于X射线的光子能量吗？对于原子的外层电子确实如此，内层电子就不一定了。康普顿的理论针对的主要是外层电子。

为什么之前几十年的可见光散射实验看不到波长变化？这是因为：（1）可见光的能量较低，和外层电子的能量相差不大，因此对于可见光来说，外层电子也是和原子核牢固结合在一起的；（2）波长越大的光其谱线本身的宽度越大，即使有一部分可见光子的波长发生了变化，这部分实验信号也湮没在波长不变的光信号背景中，分辨不出; ...以下略去其它一些原因。

例4. 一束λ_0=0.01 nm的X光中的某光子被电子散射，沿与入射光成60°的方向射出。求: (1) 散射光的波长；(2) 反冲电子的动能。

解：(1) $\Delta\lambda = \dfrac{h}{m_0 c}(1-\cos\varphi)$

$$= 0.0024\times 10^{-9}\times(1-\cos 60^0)$$

$$= 0.0012\ nm.$$

$$\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda = 0.01 + 0.0012 = 0.0112\ nm.$$

当时，康普顿研究组测量波长所能达到的最高分辨率是0.0001 nm，分辨率够了。

(2) 反冲电子的动能等于光子损失的能量。

$$E_k = h\upsilon_0 - h\upsilon = hc(\frac{1}{\lambda_0}-\frac{1}{\lambda})$$

$$= 1243\times(\frac{1}{0.01}-\frac{1}{0.0112})\ eV$$

$$= 1.33\times 10^4 eV.$$

$$hc = 6.63\times 10^{-34}\times 3\times 10^8\ J\cdot s\cdot m/s$$

$$= 19.89\times 10^{-26}\ J\cdot m$$

$$= \frac{19.89\times 10^{-26}}{1.6\times 10^{-19}}eV\cdot 10^9\ nm$$

$$= 1243\ eV\cdot nm$$

$$\boxed{hc \approx 1243\ eV\cdot nm.}$$

例5(课外学习). 一束波长为λ=0.050nm的X射线光子与静止的自由电子发生康普顿散射，散射角为φ=30^o。计算：

(1) 入射光子的能量和动量大小。

(2) 康普顿散射的波长偏移$\Delta\lambda$以及散射光子的波长λ'。

(3) 散射光子的能量和动量大小。

(4) 反冲电子获得的动能。

(5) 反冲电子的动量大小和方向(用与入射光子方向的夹角表示)。

本题要求能量都以eV为单位。

解：(1) $E=\dfrac{hc}{\lambda}=\dfrac{1243}{0.05}=2.4860\times10^4\ eV.$

$$p=\frac{h}{\lambda}=\frac{6.63\times10^{-34}}{0.05\times10^{-9}}=1.326\times10^{-23}\,Kg\cdot m/s.$$

(2) $\Delta\lambda=\dfrac{h}{m_0c}(1-\cos\varphi)=0.0024\times(1-\sqrt{3}/2)=3.22\times10^{-4}\ nm.$

$$\lambda'=\lambda+\Delta\lambda=0.05032\ nm.$$

(3) $E'=2.4702\times10^4\ eV.\quad p=1.318\times10^{-23}\,Kg\cdot m/s.$

(4) $E_k = E - E' = 158\ eV$.

(5) 动量守恒，$\begin{cases} x\text{方向，} \dfrac{h}{\lambda} = \dfrac{h}{\lambda'}\cos\varphi + p_e\cos\theta \\ y\text{方向，} \dfrac{h}{\lambda'}\sin\varphi - p_e\sin\theta = 0 \end{cases}$.

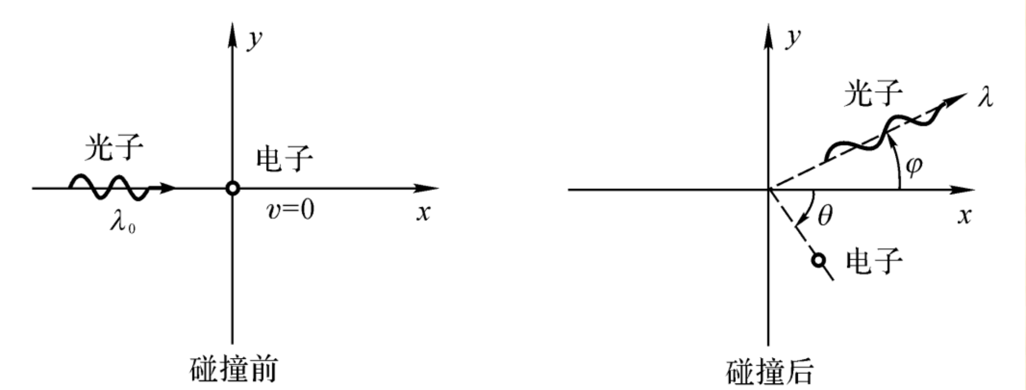
$$\begin{cases} p_e\cos\theta = \dfrac{h}{\lambda} - \dfrac{h}{\lambda'}\cos\varphi = 1.326\times10^{-23} - 1.318\times10^{-23}\times\dfrac{\sqrt{3}}{2} = 0.185\times10^{-23} \\ p_e\sin\theta = \dfrac{h}{\lambda'}\sin\varphi = 1.318\times10^{-23}\times\dfrac{1}{2} = 0.659\times10^{-23} \end{cases},$$

$$p_e^{\ 2} = 0.185^2\times10^{-46} + 0.659^2\times10^{-46}.$$

$$p_e = 6.84\times10^{-24}\ Kg\cdot m/s.$$

$$\tan\theta = \frac{0.659}{0.185} = 3.562,$$

$$\theta = 74.3^{o}.$$



§ 20.5 光的波粒二象性

在几何光学条件下(波长比障碍物小很多)，光如同粒子、直线传播。

在波动光学或电磁波理论中，1. 波长和障碍物线度相近时，有干涉和衍射现象；2. 波长远大于障碍物线度时，光波能绕过障碍物继续传播。

几何光学可以看成是波动光学的极限情况(理论上可证明)，所以经典物理认为光本质上是波。

在光电效应和康普顿散射实验中，光的粒子性很明显，且不能看成是经典电磁波的极限情况(能量是一份一份的，即量子，不是经典电磁波的概念)。这促使人们更深入地思考光的本性。

主流看法：不把谁看成谁的极限情况，光既是粒子也是波，具有粒子和波动两方面的属性。这种二重性叫光的波粒二象性。

粒子性对应的代表性物理量是能量和动量，波动性对应的代表性物理量是频率和波长。粒子性和波动性通过下面两个定量关系紧密联系在一起。

$$E = h\upsilon = h\frac{c}{\lambda}, \qquad p = \frac{h}{\lambda}.$$

此外，

光强$I = Nh\upsilon$，（N为光子的数目，爱因斯坦提出）

干涉、衍射等现象中光强的分布正比于粒子(光子)在各处出现的几率。(德国科学家波恩提出)

量子力学是按波粒二象性这种看法向前推进的。

作业

20.15，20.16, 20.17.

周二、四班第三次小测验

1. (0.5分) 一束自然光垂直入射到由两偏振片组成的偏振系统，已知两偏振片的偏振化方向夹角为60^{o}，则透射光强与入射光强之比为(　　)。
A. 1/2; *B*. 1/4; *C*. 1/8; *D*. 3/8.

2. (1分) 波长λ=600*nm*的单色光垂直入射到一平面透射光栅上，光栅常数$d=2.4\times10^{-6}m$，缝宽$a=0.8\times10^{-6}m$。光栅衍射的第1级主极大的衍射角为____________；第____________________级主极大缺级.

3. (1.5分) 一凸透镜焦距$f_1=10cm$，一凹透镜焦距$f_2=-10cm$，两透镜共轴放置，间距$d=5cm$。若一物体位于凸透镜左侧20*cm*处，求最终像的位置及像的虚实性。

4. (2分) 在杨氏双缝干涉实验中，双缝间距$d=0.2mm$，缝到屏的距离$D=1m$，入射光波长$\lambda=550nm$入射光波长$\lambda=550nm$。求：
(1)中央明纹两侧第3级明纹中心的间距;
(2)）若用厚度$e=6.6\times10^{-5}m$、折射率$n=1.58$的透明薄片覆盖其中一缝，中央明纹将向哪侧移动？移动距离为多少？