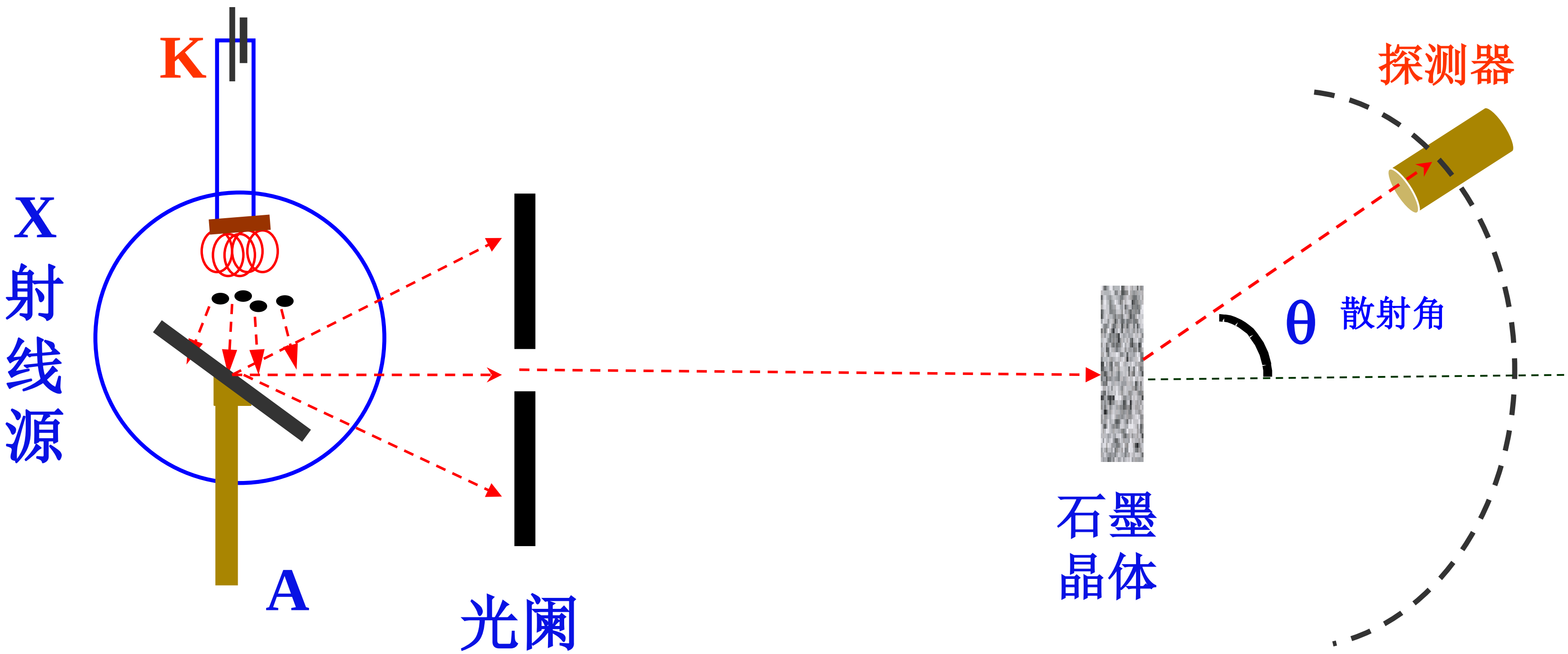
第十五章 量子物理

15- 3 康普顿效应

知识点：康普顿效应的光子理论解释

一、康普顿效应的实验及其规律

1、实验装置



1923年, 测量了X射线沿各方向的散射波，发现在散射光线中除了有与入射线波长相同的射线外，还有波长大于入射线波长的射线，这种改变波长的散射现象—— 康普顿效应 Compton Effect

一、康普顿效应的实验及其规律

2、康普顿散射的实验规律

1) 在散射光线中有与入射光波长相同的射线，也有波长大于入射光的射线;

2) 波长的偏移量 $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ 随散射角 θ 的增加而增加;

3) 在同一散射角 θ 下，所有散射物质波长的偏移量 $\Delta\lambda$ 都是相同的。

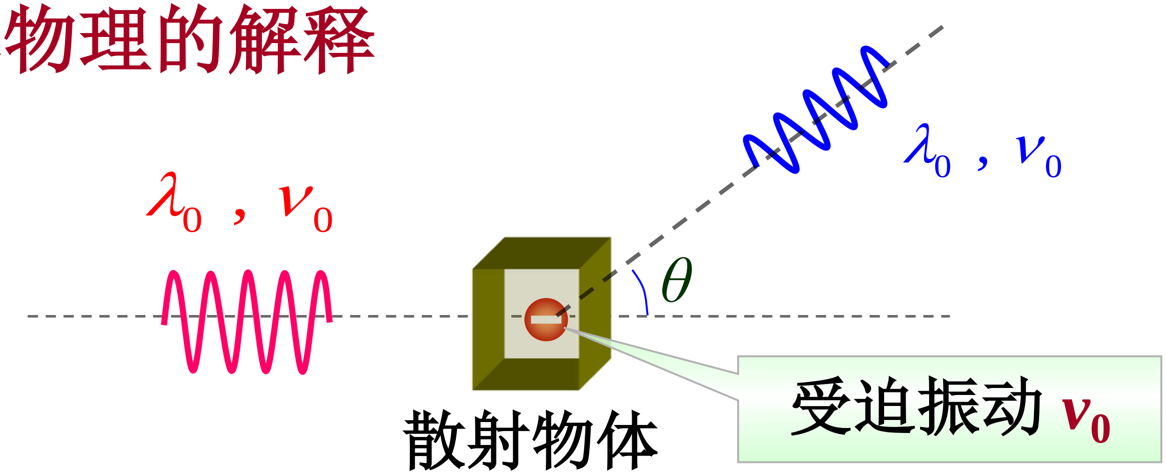
4) 在原子量较小的物质中，康普顿散射较强;对原子量较大的物质，康普顿散射较弱。

吴有训 (1897-1977)，江西高安人，1921年赴美国芝加哥大学随康普顿教授从事物理学研究，吴有训通过实验和理论分析，验证了某些X射线经散射后波长的变化。1924年他与康普顿合作发表了《经过轻元素散射的铝 (Ka)射线的波长》，因此，物理学界把某些X射线经散射后波长变长的现象称为康普顿-吴有训效应。在普朗克、玻尔等人开创的现代物理学中，吴有训作出了杰出贡献。

二、对实验结果的分析

1、康普顿散射的实验结果与光的波动说相矛盾

◆经典物理的解释



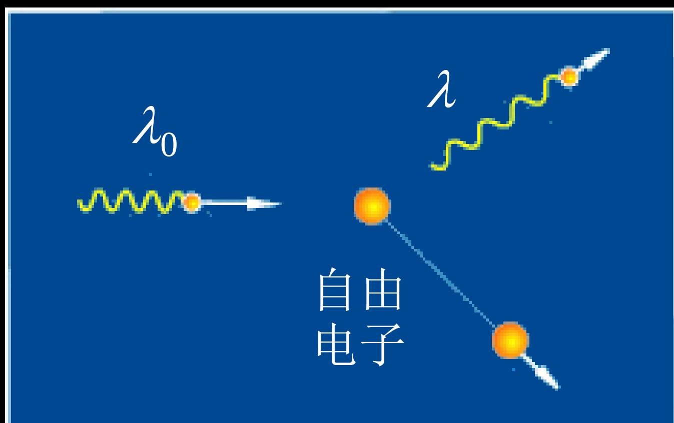
单色电磁波	$\xrightarrow{\text{照射}}$	电子受迫振动	$\xrightarrow{\text{发射}}$	同频率散射线

❖经典理论只能说明波长不变的散射，而不能说明康普顿散射

2、光子理论解释

（1）X 射线由 $\varepsilon = h\nu$ 的光子组成；

（2）光子与实物粒子一样，能与电子等粒子作弹性碰撞。



1）入射光子与外层电子弹性碰撞

外层电子 → 受原子核束缚较弱 → 近似自由

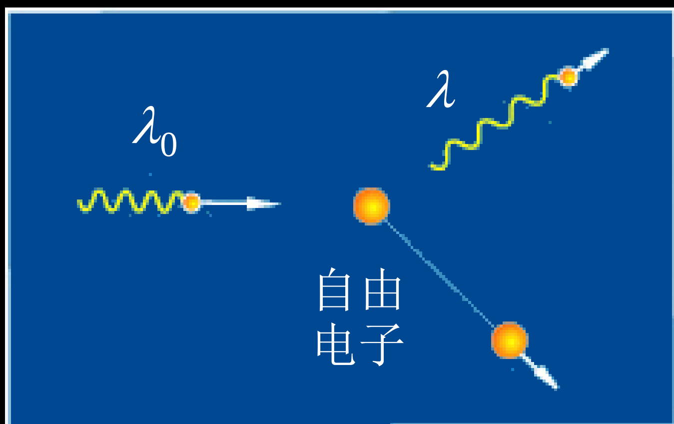
外层电子 → 动能<<光子能量 → 近似静止

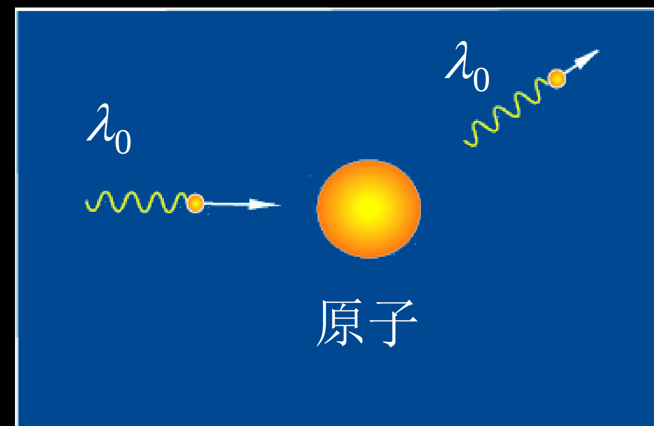
近似自由、近似静止 → 静止自由电子

2、光子理论解释

（1） X 射线由 $\varepsilon = h\nu$ 的光子组成；

（2） 光子与实物粒子一样，能与电子等粒子作**弹性碰撞**。





2） X 射线光子和原子内层电子相互作用

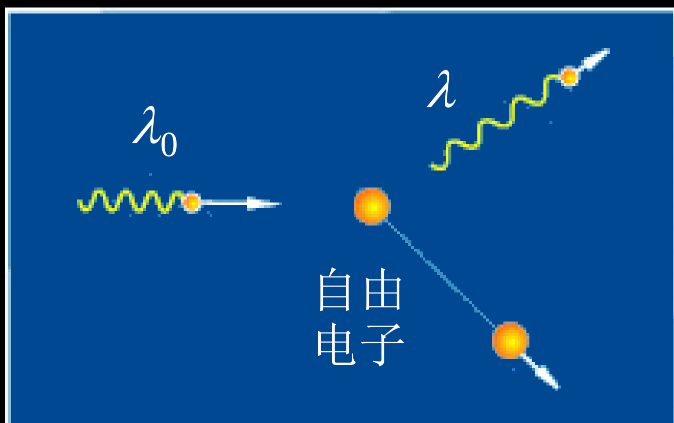
内层电子被束缚很紧，光子相当于和整个原子发生碰撞。

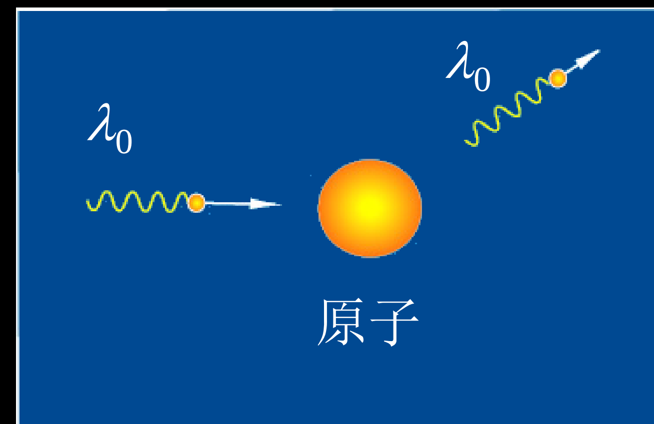
光子质量远小于原子质量，碰撞时光子不会明显损失能量，波长不变。

2、光子理论解释

（1） *X* 射线由 $\varepsilon = h\nu$ 的光子组成；

（2） 光子与实物粒子一样，能与电子等粒子作**弹性碰撞**。





❐ 结论

❖ 波长变化　X光子

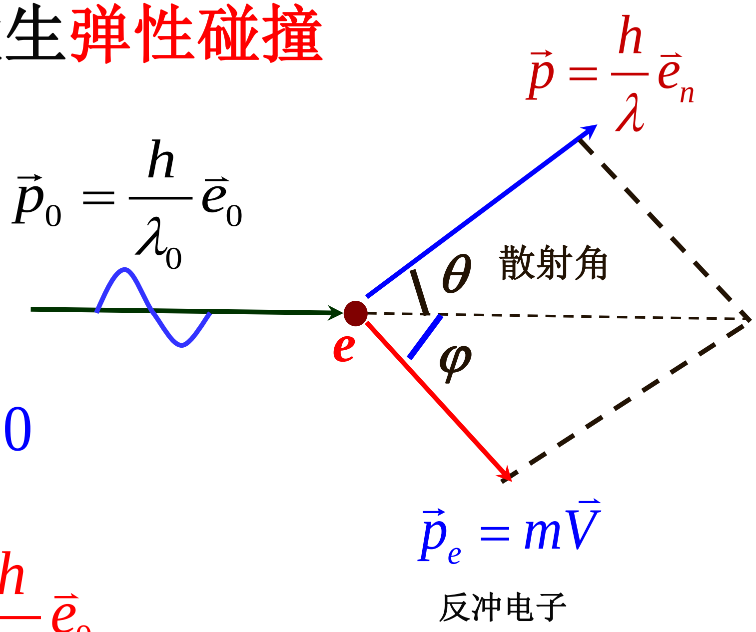
- 内层电子 ⟶ 波长不变的散射线
- 外层电子 ⟶ 波长变大的散射线

康普顿散射

三、康普顿效应的理论解释

单个光子与单个静止的自由电子发生弹性碰撞

X 射线光子与电子的碰撞



(1) 碰撞前

m_0: 电子的静质量

*电子

能量 $E_0=m_0c^2$ 动量 $\vec{p}_{e0}=0$

*光子

能量 $\varepsilon_0=h\nu_0=h\dfrac{c}{\lambda_0}$ 动量 $\vec{p}_0=\dfrac{h}{\lambda_0}\vec{e}_0$

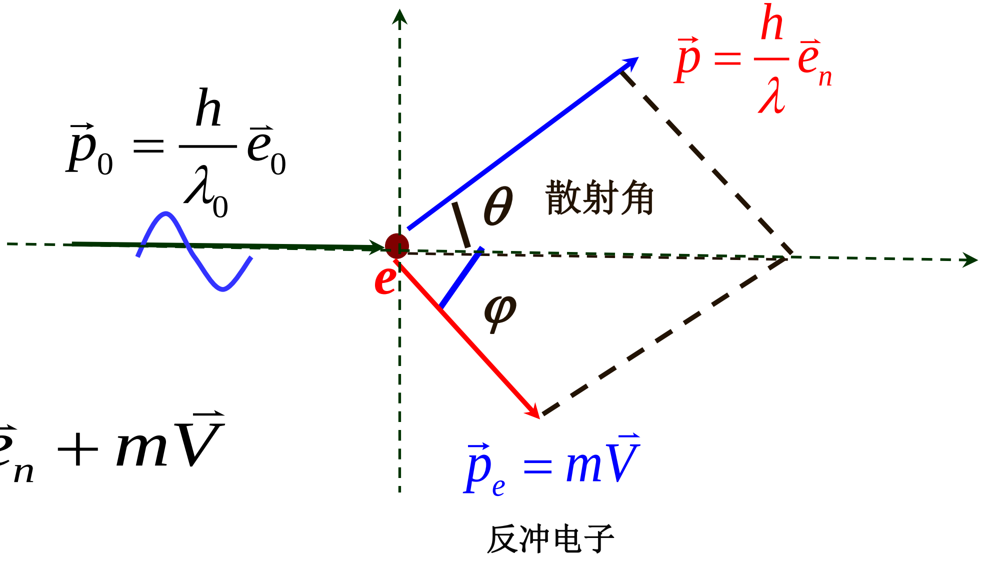
(2) 碰撞后

*电子 能量 $E=m\,c^2$ 动量 $\vec{p}_e=m\vec{V}$, $m=\dfrac{m_0}{\sqrt{1-(V/c)^2}}$

*光子 能量 $\varepsilon=h\nu=h\dfrac{c}{\lambda}$ 动量 $\vec{p}=\dfrac{h}{\lambda}\vec{e}_n$

碰撞过程中能量守恒

$$h\nu_0 + m_0c^2 = h\nu + mc^2$$



碰撞过程中动量守恒

$$\vec{p}_0 = \vec{p} + \vec{p}_e \Rightarrow \frac{h}{\lambda_0}\vec{e}_0 = \frac{h}{\lambda}\vec{e}_n + m\vec{V}$$

$$\frac{h}{\lambda_0} = \frac{h}{\lambda}\cos\theta + \frac{m_0V\cos\varphi}{\sqrt{1-(V/c)^2}}, \qquad 0 = \frac{h}{\lambda}\sin\theta - \frac{m_0V\sin\varphi}{\sqrt{1-(V/c)^2}}$$

消去φ与V可得，散射使波长的偏移量为：

$$\boxed{\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \frac{h}{m_0c}(1-\cos\theta)} \qquad \boxed{\Delta\lambda = \lambda_c(1-\cos\theta)}$$

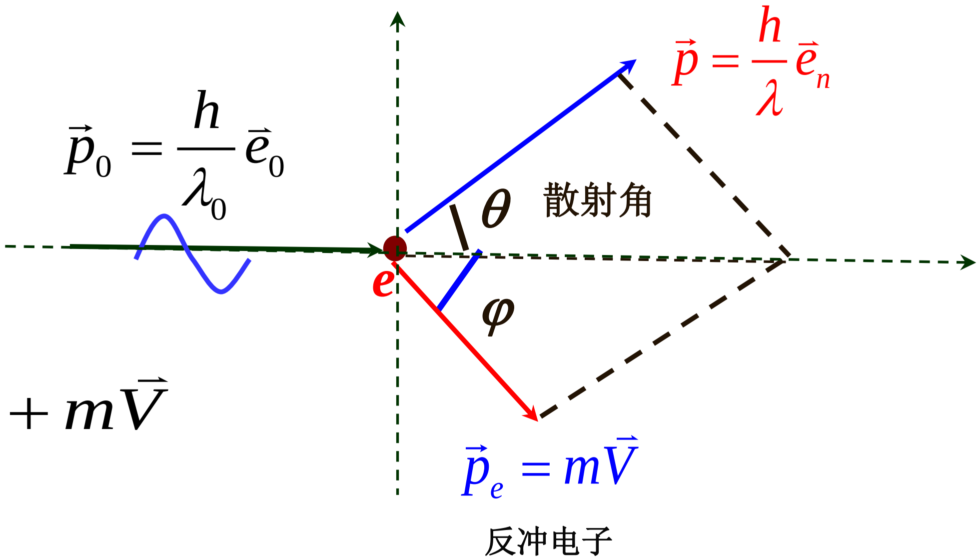
电子的康普顿波长： $\lambda_c = \frac{h}{m_0c} \approx 2\cdot 43\times10^{-12}\,\text{m} = 0.00243\text{nm}$

本节知识点

康普顿效应中，

碰撞过程中**能量守恒**

$$h\nu_0 + m_0c^2 = h\nu + mc^2$$



碰撞过程中动量守恒

$$\vec{p}_0 = \vec{p} + \vec{p}_e \Rightarrow \frac{h}{\lambda_0}\vec{e}_0 = \frac{h}{\lambda}\vec{e}_n + m\vec{V}$$

散射使波长的偏移量为:

$$\boxed{\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \frac{h}{m_0c}(1-\cos\theta)}$$

$$\boxed{\Delta\lambda = \lambda_c(1-\cos\theta)}$$

电子的康普顿波长: $\lambda_c = \frac{h}{m_0c} \approx 2\cdot 43\times 10^{-12}\text{m} = 0.00243\text{nm}$

例 10: 在康普顿效应中，入射X射线的波长为 $\lambda_0 = 3\times10^{-3}$nm，反冲电子的速度为光速的60%，

求: 散射X光的波长和散射角。

解: $h\nu_0 + m_0c^2 = h\nu + mc^2 \Rightarrow \dfrac{hc}{\lambda_0} + m_0c^2 = \dfrac{hc}{\lambda} + \dfrac{m_0}{\sqrt{1-\upsilon^2/c^2}}c^2$

散射X射线波长: $\lambda = \dfrac{4h\lambda_0}{4h - \lambda_0 m_0 c} = 4.34\times10^{-3}\,\text{nm}$

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \lambda_C(1-\cos\theta)$$

$$\Rightarrow \cos\theta = 1 - \frac{\lambda-\lambda_0}{\lambda_c} = 0.449$$

散射角: $\theta = 63.3°$

例 11: 在康普顿效应中，入射X 射线的波长为 $\lambda_0 = 0.0700\ \mathrm{nm}$，散射X 射线与入射X 射线**垂直**，

求： 1）反冲电子的动能；

2）反冲电子运动方向与入射X 射线之间的夹角。

解： 1） $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \lambda_C(1-\cos\theta) = \lambda_C(1-\cos 90^\circ) = \lambda_C$

散射X射线波长： $\lambda = \lambda_0 + \lambda_C = 0.07243\,\mathrm{nm}$

根据能量守恒： $h\nu_0 + m_0c^2 = h\nu + mc^2$

反冲电子的动能为：

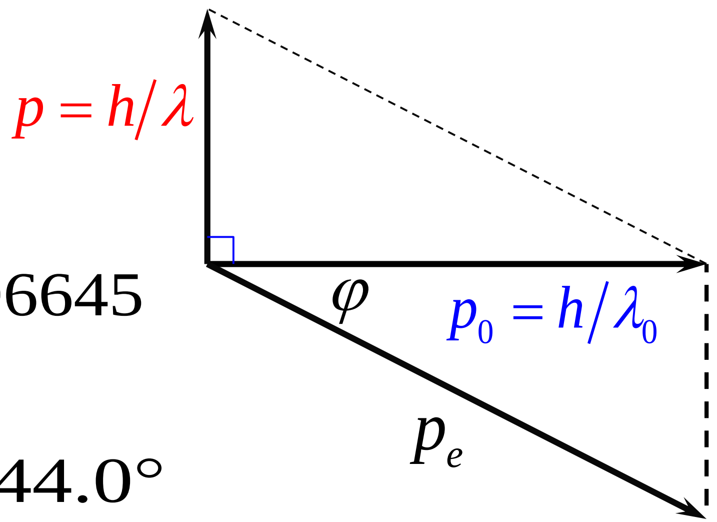
$$E_k = mc^2 - m_0c^2 = h\nu_0 - h\nu = \frac{hc}{\lambda_0} - \frac{hc}{\lambda} = 9.42\times10^{-17}\,\mathrm{J}$$

例 11: 在康普顿效应中，入射X 射线的波长为 $\lambda_0 = 0.0700\ \text{nm}$，散射X 射线与入射X 射线**垂直**，

求： 1）反冲电子的动能；
2）反冲电子运动方向与入射X 射线之间的夹角。

解：2） 根据动量守恒：

$$\vec{p}_0 = \vec{p} + \vec{p}_e$$



$$\tan\varphi = \frac{p}{p_0} = \frac{h/\lambda}{h/\lambda_0} = \frac{\lambda_0}{\lambda} = 0.96645$$

$$\varphi = \arctan(0.96645) = 44.0^\circ$$

另，反冲电子的动量： $p_e = \sqrt{p^2 + p_0^2} = \sqrt{\left(\frac{h}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{h}{\lambda_0}\right)^2}$

例 12: 在康普顿效应中，一具有10^{4} eV能量的X 射线光子，与一静止的自由电子相碰撞，碰撞后，光子的散射角为 60^0，

求: 1）散射X光子的波长、频率和能量各为多少？

2）反冲电子的动能、动量和运动方向？

解: 1）

$$\varepsilon_0 = h\nu_0 = \frac{hc}{\lambda_0} \Rightarrow \nu_0 = \frac{\varepsilon_0}{h} = 2.41\times10^{18}\,\mathrm{Hz}$$

$$\Rightarrow \lambda_0 = \frac{hc}{\varepsilon_0} = 0.1242\mathrm{nm}$$

散射X射线波长： $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \lambda_C(1-\cos\theta) = \frac{1}{2}\lambda_C$

$$\Rightarrow \lambda = \lambda_0 + \frac{1}{2}\lambda_c = 0.1254\mathrm{nm}$$

$$\Rightarrow \nu = \frac{c}{\lambda} = 2.392\times10^{18}\,\mathrm{Hz}$$

$$\varepsilon = h\nu = 9.905\times10^{3}\,\mathrm{eV}$$

例 12 在康普顿效应中，一具有 10^4 eV能量的X 射线光子，与一静止的自由电子相碰撞，碰撞后，光子的散射角为 60^0，

求： 1）散射X光子的波长、频率和能量各为多少？

2）反冲电子的动能、动量和运动方向？

解： 2）反冲电子的动能： $h\nu_0 + m_0c^2 = h\nu + mc^2$

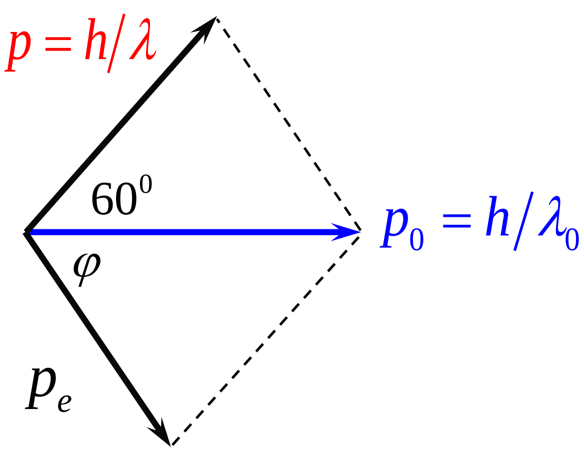
$$\Rightarrow E_k = mc^2 - m_0c^2 = h\nu_0 - h\nu \Rightarrow E_k = 95\text{eV}$$

反冲电子的动量：方法-1：动量守恒

$$p_e^2 = p_0^2 + p^2 - 2p_0 p\cos 60^0$$

$$\Rightarrow p_e = \sqrt{(\frac{h}{\lambda_0})^2 + (\frac{h}{\lambda})^2 - 2\frac{h}{\lambda_0}\cdot\frac{h}{\lambda}\cos 60^0}$$

$$\Rightarrow p_e = 5.26\times 10^{-24}\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$



例 12: 在康普顿效应中，一具有10^4 eV能量的X 射线光子，与一静止的自由电子相碰撞，碰撞后，光子的散射角为 60^0，

求: 1）散射X光子的波长、频率和能量各为多少？

2）反冲电子的动能、动量和运动方向？

解: 2）反冲电子的动能: $h\nu_0 + m_0c^2 = h\nu + mc^2$

$$\Rightarrow E_k = mc^2 - m_0c^2 = h\nu_0 - h\nu \Rightarrow E_k = 95\text{eV}$$

反冲电子的动量：方法-2：相对论能量与动量关系

$$E^2 = E_0^2 + p_e^2c^2$$

$$\Rightarrow p_e = \frac{\sqrt{E^2 - E_0^2}}{c} = \frac{\sqrt{E_k^2 + 2E_0E_k}}{c}$$

$$\Rightarrow p_e = 5.26\times10^{-24}\,\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

例 12: 在康普顿效应中，一具有10^4 eV能量的X 射线光子，与一静止的自由电子相碰撞，碰撞后，光子的散射角为 60^0，

求: 1）散射X光子的波长、频率和能量各为多少？

2）反冲电子的动能、动量和运动方向？

解: 2）反冲电子的运动方向

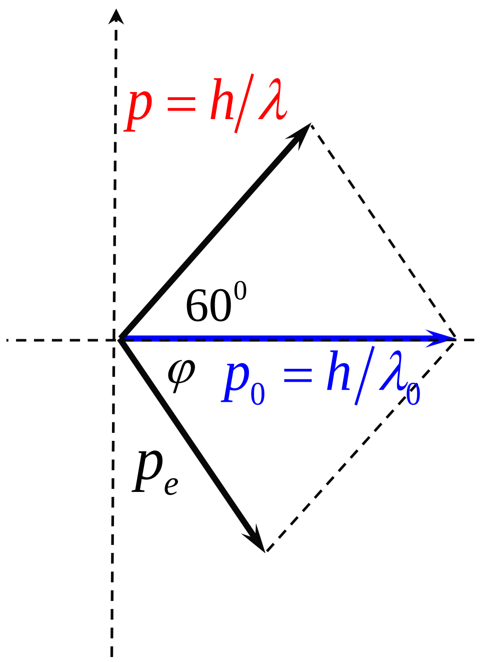
动量守恒（竖直方向）：

$$0 = p\sin 60^0 - p_e \sin\varphi$$

$$0 = \frac{h}{\lambda}\sin 60^0 - p_e \sin\varphi$$

$$\Rightarrow \sin\varphi = \frac{h}{p_e \lambda}\sin 60^0 = 0.870$$

$$\Rightarrow \varphi = 60.4^0$$



第十五章 量子物理

15- 4 氢原子的玻尔理论

知识点：

1、玻尔的氢原子理论（三条假设）

2、氢原子能级公式

研究原子结构规律有两条途径：

1、利用高能粒子轰击原子——轰出未知粒子来研究；

2、通过在外界激发下，原子发射的光谱来研究。

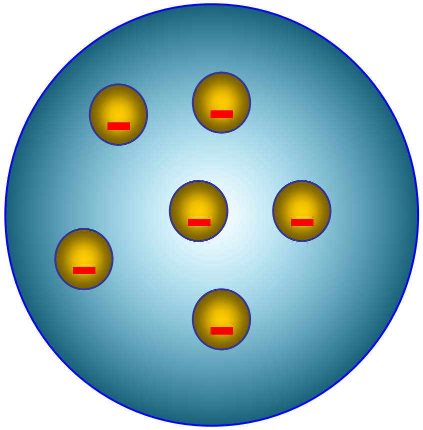
原子光谱是研究和了解原子内部结构的重要方法

一、卢瑟福的原子模型 Atomic Nuclear Model Structure

1、汤姆逊葡萄干蛋糕模型 J. J. Thomsson （1904）

原子中的正电荷和原子的质量均匀地分布在半径为 10^{-10}m的球体范围内，电子浸于其中。

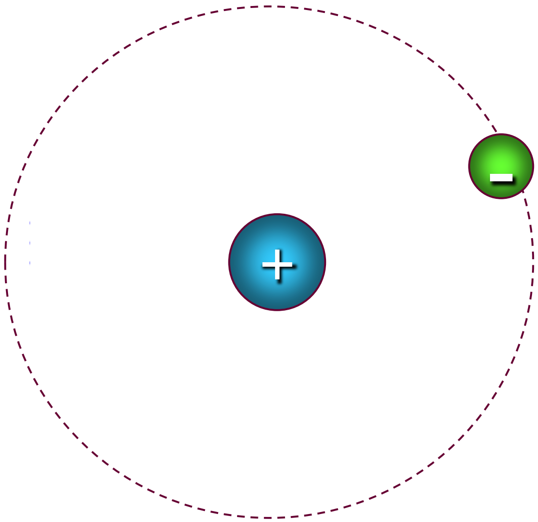
整个原子呈胶冻状的球体，正电荷均匀分布于球体上，而电子镶嵌在原子球内，在各自的平衡位置附近做简谐振动，并发射同频率的电磁波。



2、卢瑟福的原子有核模型

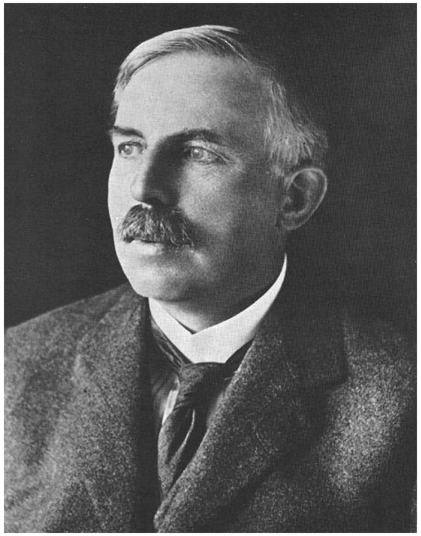
E.Rufherford （1911） α粒子散射实验

原子由原子核和核外电子构成，原子核带正电荷，它几乎集中了原子的全部质量，占据整个原子的极小一部分空间，而电子带负电，绕着原子核转动，如同行星绕太阳转动一样。



卢瑟福 E.Rufherford (1871-1937)

英国物理学家，J.J.汤姆孙的研究生，原子核物理学的奠基人。1899年发现α和β射线，提出衰变理论，1908年获诺贝尔化学奖。1911年根据α粒子散射理论提出原子有核模型，被誉为原子物理之父。



二、氢原子光谱的实验规律

$H_\alpha = 6562.8\ \mathring{A}$, $H_\beta = 4861.3\ \mathring{A}$, $H_\gamma = 4340.5\ \mathring{A}$,

1、氢原子光谱是彼此分裂的线状光谱，每一条谱线具有确定的波长（或频率）；

2、巴尔末公式

1885年，瑞士中学教师

巴尔末 **J.J.Balmer**

(1825-1898)

发现了氢原子光谱在可见光部分的规律：

$$\lambda = B\frac{n^2}{n^2-4},$$

$$B = 364.56\text{nm}$$

当n=3, 4, 5, …..时，分别为H_α, H_β, H_γ, …..等谱线的波长

二、氢原子光谱的实验规律

2、巴尔末公式

$$\lambda = B\frac{n^2}{n^2-4},\qquad B = 364.56\text{nm}$$

当n=3, 4, 5, …..时，分别为H_α, H_β, H_γ, …..等谱线的波长

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{4c}{B}\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{n^2}\right)$$

令： $\tilde{\nu} = \dfrac{1}{\lambda}$ 称为波数

即单位长度内完整波的个数

$$\boxed{\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = \frac{4}{B}\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{n^2}\right) = R_H\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{n^2}\right),\quad n = 3,4,5,\cdots}$$

里德伯常数 ← $R_H = 1.097373\times10^7\,\text{m}^{-1}$

二、氢原子光谱的实验规律

3、里德伯公式(1890)

Janne Rydberg
1854—1919

氢原子光谱的普遍公式

$$\boxed{\tilde{\nu} = R_H\left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2}\right)}$$

$$\begin{cases} k = 1, 2, 3, \cdots \\ n = k+1, \ k+2, \cdots \end{cases}$$

$$\boxed{R_H = 1\cdot 097373 \times 10^7 \, \mathrm{m}^{-1}}$$

二、氢原子光谱的实验规律

3、里德伯公式(1890)

$$\tilde{\nu}=R_H\left(\frac{1}{1^2}-\frac{1}{n^2}\right),\quad n=2,3,\cdots$$

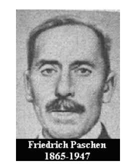
莱曼系(紫外光)
T. Lyman 1914

$$\tilde{\nu}=R_H\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{n^2}\right),\quad n=3,4,\cdots$$

巴尔末系
(可见光)

$$\tilde{\nu}=R_H\left(\frac{1}{3^2}-\frac{1}{n^2}\right),\quad n=4,5,\cdots$$

帕邢系(红外光)
F. Paschen 1908



$$\tilde{\nu}=R_H\left(\frac{1}{4^2}-\frac{1}{n^2}\right),\quad n=5,6,\cdots$$

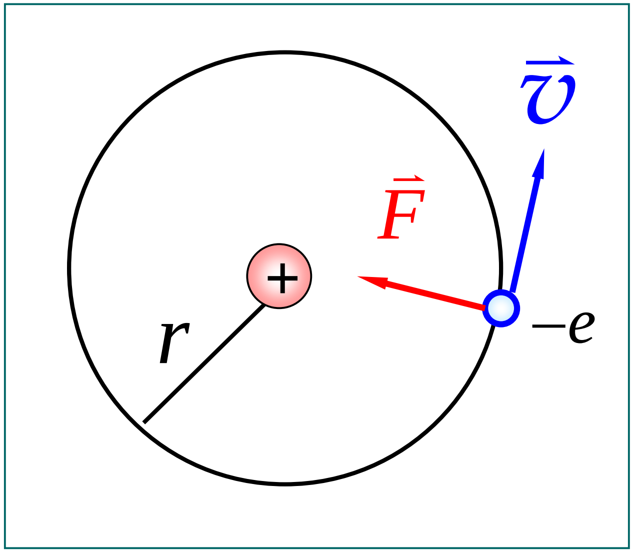
布拉开系(红外光)
F. Brackett 1922

$$\tilde{\nu}=R_H\left(\frac{1}{5^2}-\frac{1}{n^2}\right),\quad n=6,7,\cdots$$

普丰德系(红外光)
H.A. Pfund 1924

三、玻尔氢原子量子论

1、经典核模型的困难

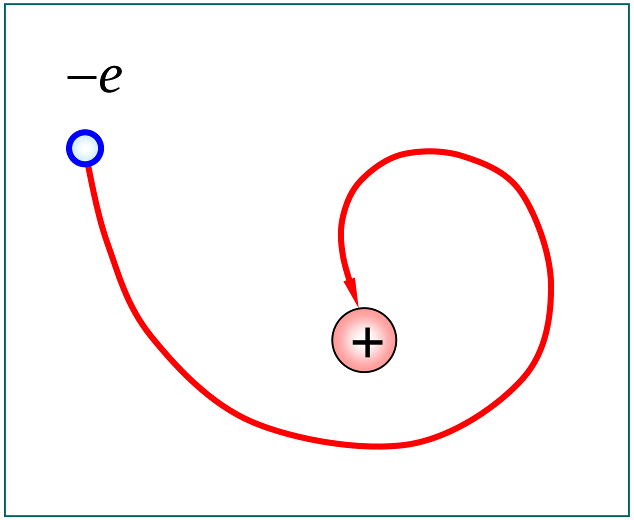


根据经典电磁理论，电子绕核作匀速圆周运动，作加速运动的电子将不断向外辐射电磁波。

◈原子光谱的分立性

发射电磁波频率等于电子绕核转动频率→能量逐渐减小，电子绕核旋转的频率也逐渐改变，

发射光谱应是连续谱；



◈原子的稳定性

电子绕核转动→发射电磁波
→原子总能量减小→电子作螺旋运动
→电子将逐渐的接近原子核而后相遇，

原子不稳定

玻尔的氢原子理论的三个重要假设

1)定态假设； 2)角动量量子化条件假设； 3)频率条件假设

● 定态假设

原子中的电子只能在一些半径不连续的轨道上作圆周运动。

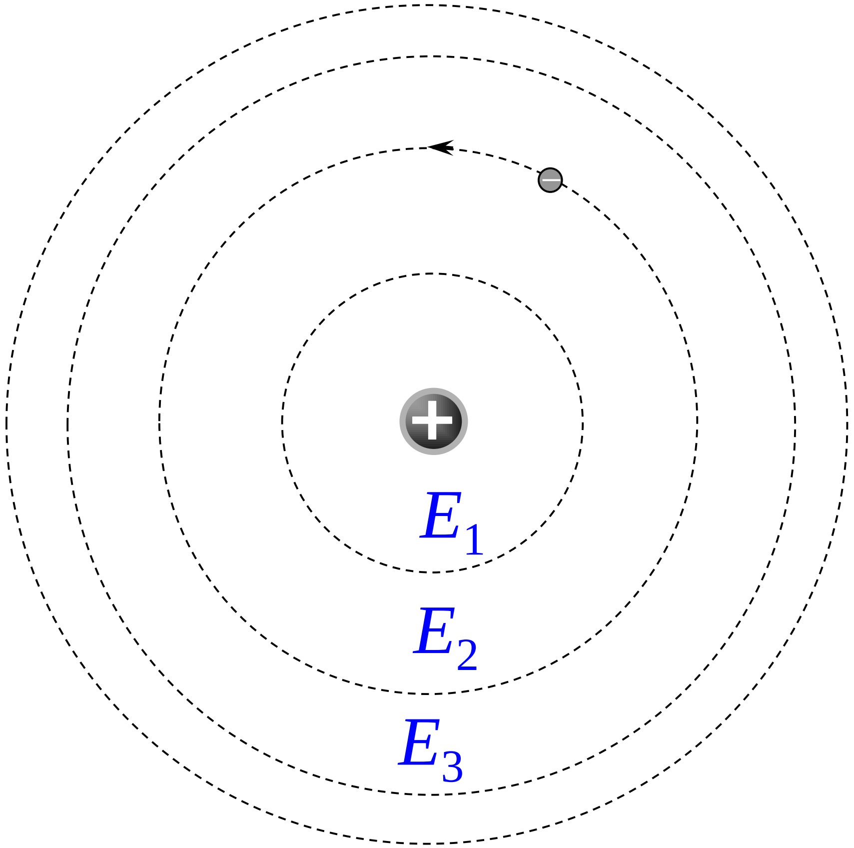
在这些轨道上运动的电子不辐射（或吸收）能量而处于稳定状态，称为**定态**。

相应的轨道称为**定态轨道**

与定态相应的能量（**能级**）

分别为：E_1， E_2， E_3…

$$E_1 < E_2 < E_3 < \cdots$$



玻尔的氢原子理论的三个重要假设

1)定态假设； 2)角动量量子化条件假设； 3)频率条件假设

角动量量子化条件假设

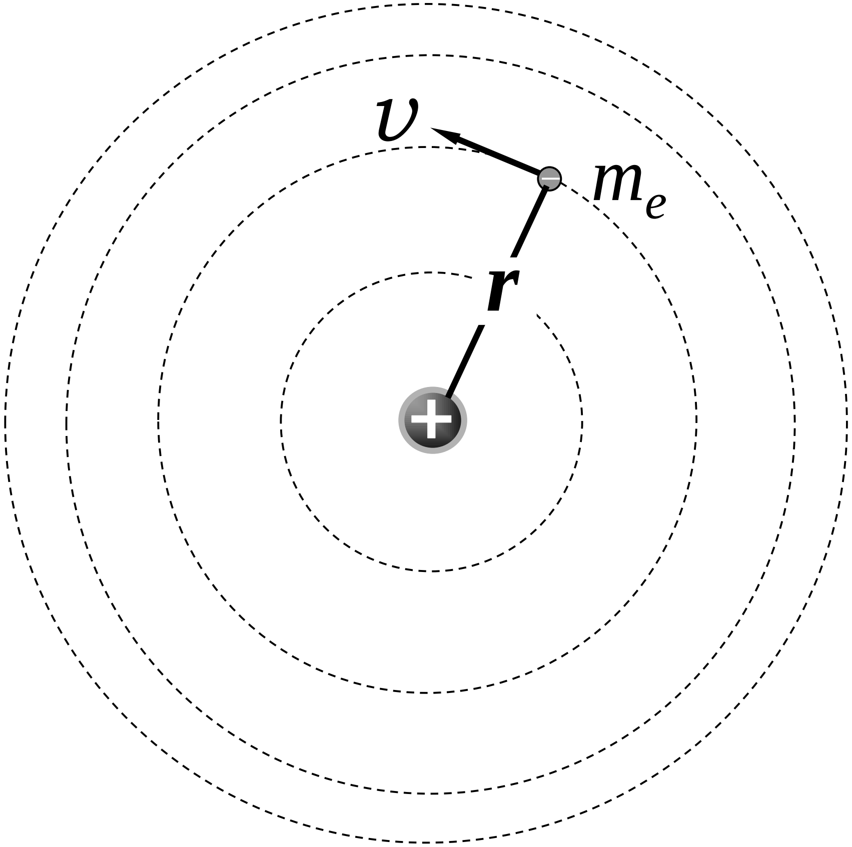
在定态轨道上运动的电子，其角动量只能取 $h/(2\pi)$ 的整数倍，即：

$$\boxed{L = m_e v r = n\frac{h}{2\pi} = n\hbar}$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$ -----约化普朗克常数

称为：角动量量子化条件

$n = 1, 2, 3, \cdots$ 为主量子数



玻尔的氢原子理论的三个重要假设

1)定态假设；　2)角动量量子化条件假设；　3)频率条件假设

● 频率条件假设

电子从某一定态向另一定态跃迁时将发射（或吸收）光子。

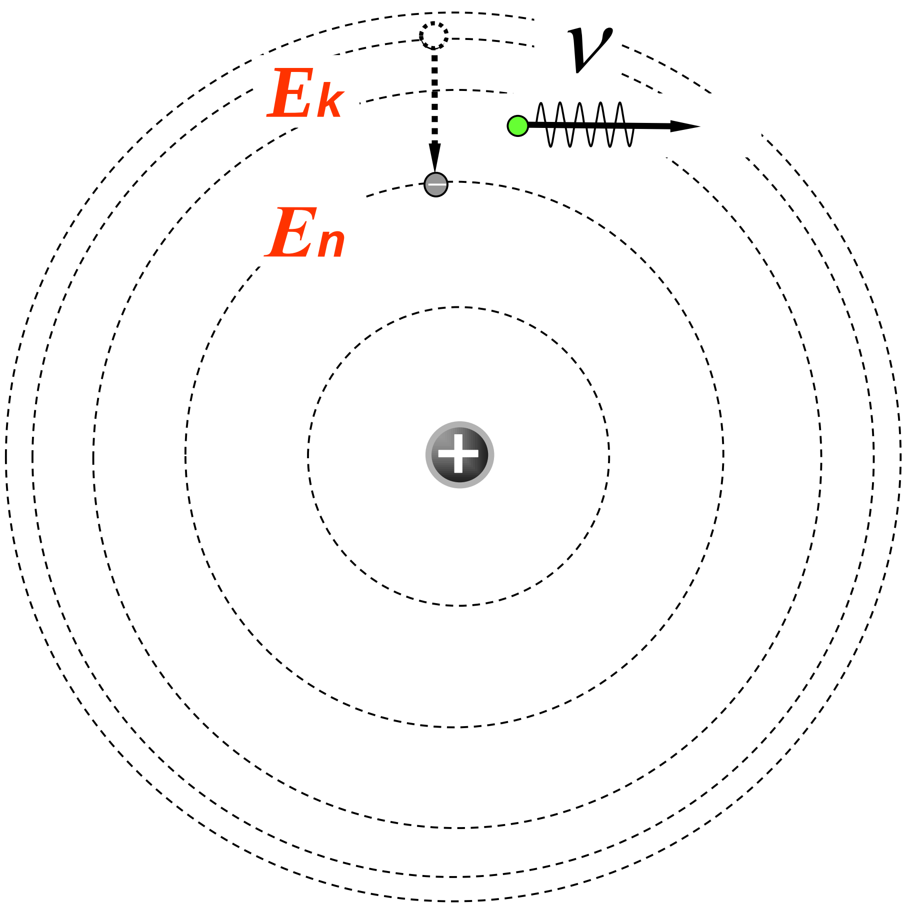
若初态和终态的能量分别为 E_k 和 E_n

$E_k > E_n$------发射光子,
$E_k < E_n$------吸收光子

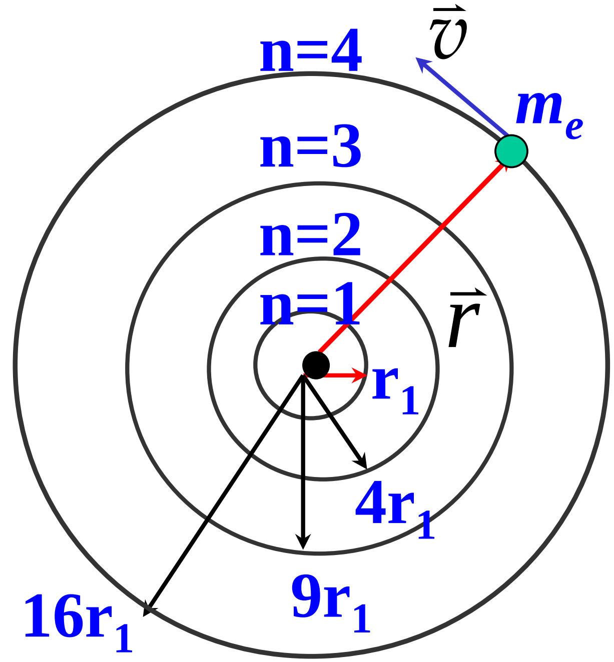
则发射或吸收光子的频率为：

$$\nu_{kn} = \frac{|E_n - E_k|}{h}$$

称为：　玻尔的频率条件



3、氢原子轨道半径的计算



由量子化条件及牛顿定律：

$$\begin{cases} m_e v r = n\dfrac{h}{2\pi}, & \text{角动量量子化} \\ F_e = \dfrac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2} = \dfrac{m_e v^2}{r}, & \text{库仑力=向心力} \end{cases}$$

$$r_n = n^2 \frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2}, \quad \frac{1}{2} m_e v_n{}^2 = \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r_n}$$

轨道量子化

$$n = 1, 2, 3 \cdots$$

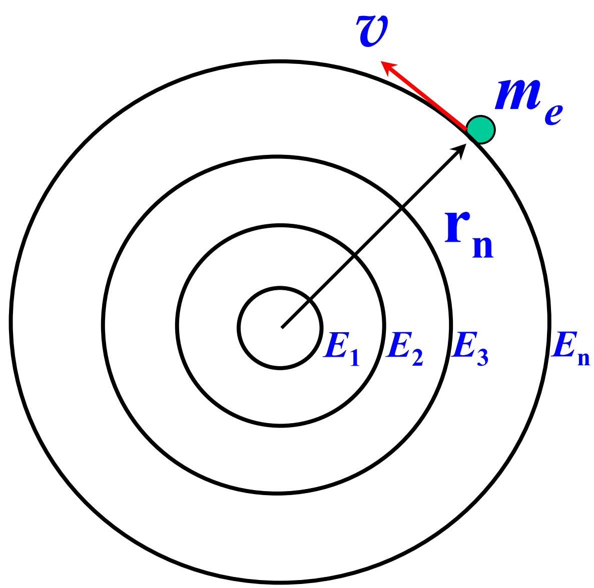
$$\boxed{r_n = n^2 r_1}$$

$n = 1$，玻尔半径

$$r_1 = 5 \cdot 3 \times 10^{-11}\,\mathrm{m} = 0 \cdot 53\,\overset{0}{\mathrm{A}}$$

4、能量的计算

电子在量子数为n的轨道上运动时，原子系统总能量是：



$$E_n = \frac{1}{2} m_e v_n^2 - \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r_n}$$

$$r_n = n^2 \frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2}, \qquad \frac{1}{2} m_e v_n^{\ 2} = \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r_n}$$

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2}, \qquad \boxed{E_n = \frac{E_1}{n^2}}$$

基态能量:

$n=1$ 时，

$E_1 = -13.6\ \mathrm{eV}$

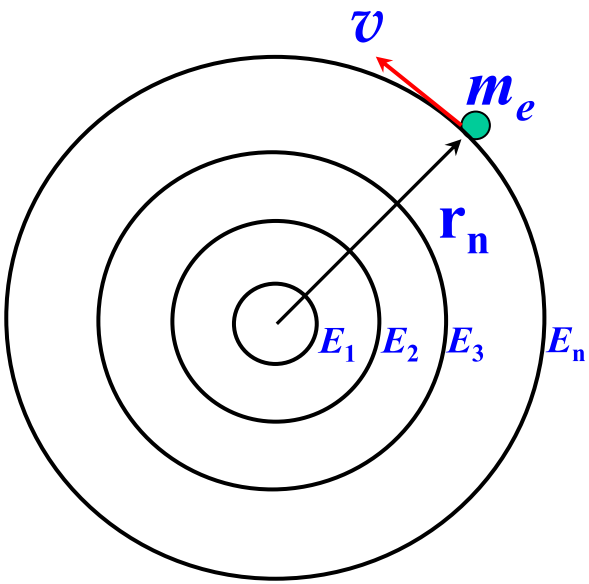
$n = 1, 2, 3, \cdots$ 这种量子化的能量称为能级

与量子力学的结论一致

4、能量的计算

能级： $\boxed{E_n = \dfrac{E_1}{n^2}}$

$$n = 1,\ 2,\ 3,\ \cdots$$



1）基态能量： $n = 1,\quad E_1 = -13{\cdot}6\ \mathrm{eV}$

此时能量最低，原子最稳定

2）激发态： $n > 1$

第一激发态：$n = 2$；第二激发态：$n = 3$；……

3）电离状态： $n \to \infty,\quad r_n \to \infty,\quad E_n \to 0$

把电子从氢原子基态轨道移至无限远处($n\to\infty$，$E_\infty=0$)所需要的最少能量值，即电离能 (Ionization Energy)。

$$E_{电离能} = 13{\cdot}6\ \mathrm{eV}$$

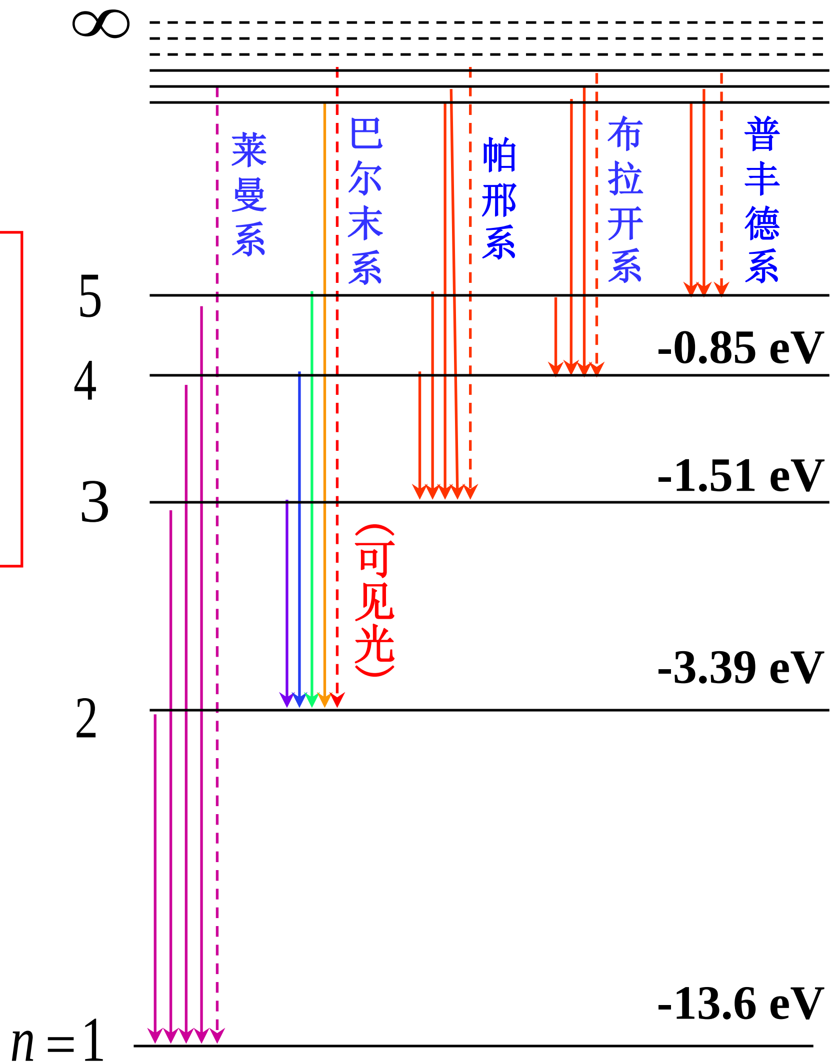
5、氢原子光谱的理论解释

$$E_n = -\frac{1}{n^2}\frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2}$$

$$\nu_{kn} = \frac{E_n - E_k}{h}$$

$$\tilde{\nu}_{kn} = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^3 c}\left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

$$R_H = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^3 c} = 1{\cdot}097373\times10^7\,\mathrm{m}^{-1}$$



从其它能级到同一能级的跃迁属于同一谱线系。

四、玻尔理论意义与局限性

1、玻尔的贡献

玻尔关于“定态”和“能级跃迁决定谱线频率”的假设是两个重要的基本概念，在量子力学理论中占有重要的地位。

1）正确地指出原子能级的存在（原子能量量子化）；

2）正确地指出定态和角动量量子化的概念；

3）正确的解释了氢原子及类氢离子（单电子）光谱；

四、玻尔理论意义与局限性

2、玻尔理论的局限性

1）对稍复杂的原子光谱，定性、定量都不能解释；

2）对氢原子谱线的强度、宽度、偏振等问题无法处理；

3）把微观粒子的运动视为有确定的轨道是不准确的；

4）是半经典半量子理论，玻尔理论的出发点是经典力学，又加上一些与经典理论不相容的量子化条件来限定稳定状态，这些条件又不能从经典理论中给出解释，是一种不自洽的理论。即把微观粒子看成是遵守经典力学的质点，同时，又赋予它们量子化的特征。

这本身就决定了理论本身的局限性。

例 13: 1）使氢原子基态下的电子移离原子（电离），至少需要多少能量？

2）如用光照射实现氢原子电离，光的波长多大？

解：1） 把电子从氢原子基态轨道移至无限远处所需要的能量值，即**电离能**，

$$E_{电离}=E_{\infty}-E_{1}=13.6\,\mathrm{eV}$$

2） $\varepsilon=h\nu=h\dfrac{c}{\lambda}=E_{电离}$，

$$\Rightarrow\lambda=\frac{ch}{E_{电离}}=\frac{3\times10^{8}\times6.63\times10^{-34}}{13.6\times1.60\times10^{-19}}=91.2\,\mathrm{nm}$$

（紫外光）

例 14: 实验发现基态氢原子可吸收能量为 **12.75 eV** 的光子，

求: 1) 氢原子吸收该光子后将被激发到哪个能级？

2) 受激发的该氢原子系统向低能级跃迁时，

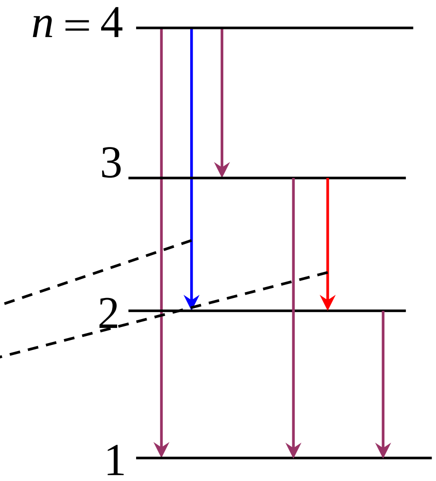
可能发出哪几条光谱线？有几条可见光谱线？

解：1） 设氢原子吸收该光子后，最高能激发到第n个能级，

此能级的能量为: $E_n = -\dfrac{13.6}{n^2}\mathrm{eV}$

$$E_n - E_1 = 12.75\,\mathrm{eV},\quad -\frac{13.6}{n^2}\mathrm{eV} - (-13.6\,\mathrm{eV}) = 12.75\,\mathrm{eV} \;\Rightarrow\; n = 4$$

2）氢原子最高能激发到 n =4 的能级



如图所示，可发出6条谱线

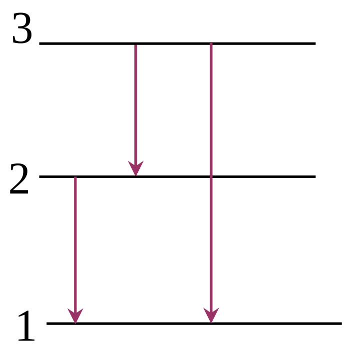
其中2条谱线为可见光

例 15: 用某频率的单色光照射基态氢原子系统，使氢原子系统发射出三种频率的谱线，

求： 该单色光的频率为多少？

解： 基态氢原子吸收该光子后，激发到n=3能级，

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2}\,\mathrm{eV}$$



$$\varepsilon = h\nu = E_n - E_1$$

$$= \left(-\frac{13.6}{3^2}\,\mathrm{eV}\right) - \left(-\frac{13.6}{1^2}\,\mathrm{eV}\right),$$

$$\Rightarrow \nu = \frac{8}{9h} \times 13.6\,\mathrm{eV} \Rightarrow \nu = 2.917 \times 10^{15}\ \mathrm{Hz}$$