第 20 章　电磁辐射的量子性

一　黑体辐射

1. 基本概念

① **辐射**

· 物体内部因带电粒子热运动发射电磁波的现象。物体发射辐射能的同时也在吸收辐射能

② **单色辐出度** $M_\lambda(T)$

· 单位时间、**单位表面积**上发射的波长在 λ 到 $\lambda+\mathrm{d}\lambda$ 范围内的辐射能为 $\mathrm{d}M_\lambda$，则

$$\boxed{M_\lambda(T)=\frac{\mathrm{d}M_\lambda}{\mathrm{d}\lambda}} \rightarrow T \text{ 和 } \lambda \text{ 的函数}$$

③ **辐射出射度**

· 单位时间、**单位表面积**上发射全波长范围内的辐射能

$$\boxed{M(T)=\int_0^\infty M_\lambda(T)\mathrm{d}\lambda}$$

③ **吸收、反射、透射**

入射进来的能量 ＝ 吸收进来 ＋ 反射出去 ＋ 透射过去的能量，占比就是**吸收系数** α 与**反射系数** r

· α 和 r 是 λ 与 T 的二元函数，对于不透明物体 $\alpha+r=1$

④ **绝对黑体**

· 入射进来的能量全部吸收的物体　$\alpha_B(\lambda,T)=1$

· 基尔霍夫定律：任何物体的单色辐出度与单色吸收系数的比值都满足 $\dfrac{M_\lambda(T)}{\alpha(\lambda,T)}=M_{B\lambda}(T)$

2. 绝对黑体辐射的特征

① **Stefan-Boltzmann 定律**

$$\boxed{M_B(T)=\int_0^\infty M_{B\lambda}(T)\mathrm{d}\lambda=\sigma T^4}$$

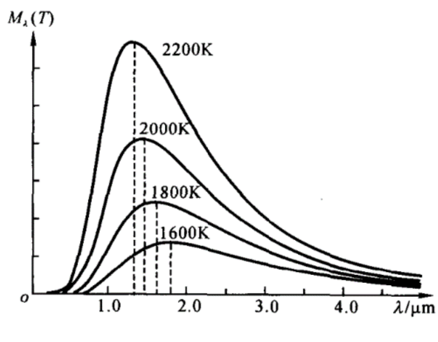
· $M_B(T)$：特定温度下绝对黑体的总辐射能量

· σ：常数，$5.67\times10^{-8}\ \mathrm{W/m^2\cdot K^4}$

② **Wien 位移定律**

$$\boxed{T\lambda_m=b}$$

· λ_m：图中曲线峰值对应波长　　b：常数，$2.898\times10^{-3}\mathrm{m\cdot K}$



例 1　黑体在某温度时的辐射出射度为 $5.7\times10^4\mathrm{W/m^2}$，则该温度 $T=$ ________，该温度下辐射波谱的峰值波长 $\lambda_m=$ ________。

解　由 S–B 定律，$\sigma T^4=5.7\times10^4\ \mathrm{W/m^2}$，解得 $T=1.001\times10^3\,\mathrm{K}$

由维恩位移定律，$T\lambda_m=b$，代入数据解得 $\lambda_m=2.898\times10^{-6}\mathrm{m}$

二　光电效应

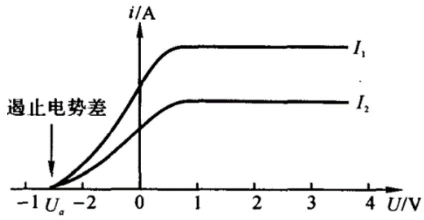
1. **光子**

· 电磁辐射在空间中的传播是离散的，量子化的，称为**光子**（视为一种粒子）

· 单个光子的性质：$\boxed{E=h\nu} \xrightarrow{E=mc^2} \boxed{m=\dfrac{h\nu}{c^2}=\dfrac{h\lambda}{c}} \xrightarrow{p=mc} \boxed{p=\dfrac{h\nu}{c}=\dfrac{h}{\lambda}}$

能量　　　　**质量**　　　　**动量**

2. **光电效应**



① 基本现象：在光的照射下电子从金属表面逸出

② 解释与性质

· 一个电子获得一个光子的能量，首先用于克服表面阻力所需的**逸出功** A，剩余的能量作为**最大初动能** E_{km}

$$\boxed{h\nu=E_{km}+A}$$

· 因此需要加反向电压才能遏制光电子运动，加**遏止电压** U_a 时，光电流为 0

$$\boxed{E_{\text{km}}=e|U_a|}$$

· 当光频率小于等于**截止频率**（又称**红限频率**）ν_0 时，电子获得的能量小于等于逸出功无光电子激发或激发的光电子没有动能，因而无光电流

$$\boxed{h\nu_0=A}$$

· 随着电压增大，光电流增大至饱和值，该值与激发的光电子数量有关（等于光子数量）光子数量 n 与光强 I 的关系为

$$\boxed{I=nh\nu}$$

例 2　设用频率为 ν_1 和 ν_2 的两种单色光，先后照射同一种金属均能产生光电效应。已知金属的红限频率为 ν_0，测得两次照射时的遏止电压 $|U_{a2}|=2|U_{a1}|$，则这两种单色光的频率关系式为____________。（用 ν_1、ν_2 和 ν_0 表示）

解　由光电效应中遏止电压与光频率的关系 $h\nu=E_{km}+A$，代入 $E_{\text{km}}=e|U_a|$ 以及 $h\nu_0=A$：

$$h\nu-h\nu_0=e|U_a|$$

两束单色光照射的是同一金属，因此 A 相等，即 ν_0 相同，从而有

$$\begin{cases} h\nu_1-h\nu_0=e|U_{a1}| \\ h\nu_2-h\nu_0=e|U_{a2}| \end{cases}$$ 由 $|U_{a2}|=2|U_{a1}|$ 有 $h\nu_2-h\nu_0=2\ h\nu_1-h\nu_0$，整理得 $\nu_2=2\nu_1-\nu_0$

例 3　分别以频率 ν_1 和 ν_2 的单色光照射某一光电管。若 $\nu_1>\nu_2$（均大于红限频率 ν_0），则当两种频率的入射光的光强相同时，所产生的饱和光电流 I_{s1}____________I_{s2}（填“>”“=”或“<”）

解　饱和光电流与光电子数正相关，因而与光子数正相关，由 $I=nh\nu$，光强 I 相同时，频率越大，光电子越少，因此 $I_{s1}<I_{s2}$

三　康普顿效应

1. 现象

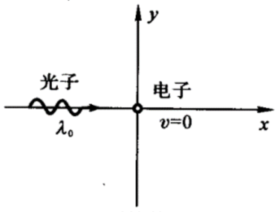
· 单色 X 射线投射到石墨晶体及其他材料上时，散射光线除了有与入射线波长 λ_0 相同的成分外还含有波长大于 λ_0 的部分，且波长变化 $\Delta\lambda=\lambda-\lambda_0$ 随散射角 φ 增大而增大，并与 λ_0 及物质无关

2. 解释：电子与光子碰撞模型

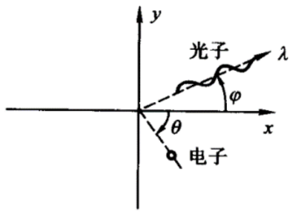
· 入射光子与电子发生碰撞（假设是弹性碰撞），光子部分能量转化为电子动能

· 能量守恒：$\boxed{h\nu_0+m_e c^2=h\nu+mc^2}$

动量守恒：$\begin{cases}\dfrac{h\nu_0}{c}=\dfrac{h\nu}{c}\cos\varphi+mv\cos\theta \\ 0=\dfrac{h\nu}{c}\sin\varphi-mv\sin\theta\end{cases}$



碰撞前



碰撞后

· m_e：电子静止质量　m：电子相对论质量

3. 常考物理量

① 波长改变量与散射角的关系

$$\boxed{\Delta\lambda=\lambda-\lambda_0=\frac{h}{m_e c}(1-\cos\varphi)}$$

· $\dfrac{h}{m_e c}=0.0024\text{nm}$ 称为电子的康普顿波长　· 散射角 φ 可以取到 180°

② 电子获得的动能

$$\boxed{E_k=h\nu_0-h\nu}$$

例 4　光子能量为 0.5MeV 的 X 射线，入射到某种物质上而发生康普顿散射。若反冲电子获得的能量为 0.1MeV，则散射光波长的改变量 $\Delta\lambda$ 与入射光波长 λ_0 的比值为________.

解　由光子能量表达式 $hc/\lambda_0=0.5\text{MeV}$，$hc/\lambda=0.4\text{MeV}$，两式相除得 $\lambda/\lambda_0=1.25$

因此 $\Delta\lambda/\lambda_0=(\lambda-\lambda_0)/\lambda_0=\lambda/\lambda_0-1=0.25$

例 5　康普顿散射实验中，入射光的波长为 0.0030nm，反冲电子的速度 $v=0.6c$，求

（1）散射光子的波长；（2）散射光子的散射角；（3）

解　（1）由能量守恒 $h\nu_0+m_e c^2=h\nu+mc^2$，代入 $m=\dfrac{m_e}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$ 与 $v=0.6c$：

$$h\frac{c}{\lambda_0}-0.25m_e c^2=h\frac{c}{\lambda}\ \rightarrow\ \frac{1}{\lambda_0}-0.25\frac{m_e c}{h}=\frac{1}{\lambda}$$

代入 $h/(m_e c)=0.0024\text{nm}$ 与 $\lambda_0=0.0030\text{nm}$，得 $\lambda=0.00434\text{nm}$

（2）由 $\lambda-\lambda_0=\dfrac{h}{m_e c}(1-\cos\varphi)$，代入解得 $\varphi\approx63°$（算出 $\cos\varphi$ 后用计算器的 arccos 函数）