第十一章黑体辐射与光的量子性

§ 11-1 黑体辐射

一 热辐射

辐射通量：温度为 T 时，频率ν附近单位频率间隔$d\nu$内的辐射能量。

$d\Phi(\nu,T)=E(\nu,T)d\nu$， $E(\nu,T)$ ：辐射谱密度、辐射本领。

吸收本领、吸收比：照射到物体上的通量$d\Phi(\nu,T)$，其中被物体吸收的通量

$d\Phi'(\nu,T)$，比例$A(\nu,T)=\dfrac{d\Phi'(\nu,T)}{d\Phi(\nu,T)}$，称为吸收本领或吸收比。

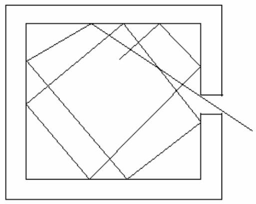
基尔霍夫热辐射定律：热平衡状态下物体的辐射本领与吸收本领成正比，比值只与ν,T有关。即$\dfrac{E(\nu,T)}{A(\nu,T)}=f(\nu,T)$， $f(\nu,T)$是普适函数，与物质无关。

吸收大，辐射也大。

二 黑体辐射

1．绝对黑体：只有吸收，没有反射。即吸收本领$A(\nu,T)=1$。

则此时，$f(\nu,T)=E(\nu,T)$，通过研究辐射本领就可以得知普适函数的特性，使得对物质热辐射的研究大为方便。



只开有一个小口的空腔，对于射入其中的光，可以完全吸收，故该空腔的开口可以作为绝对黑体。

2．绝对黑体热辐射的实验规律，可以用辐射本领与波场的关系描述。

三 黑体辐射的定律

1．Stefan-Boltzmann 定律

$\Phi(T)=\int_0^\infty E(\nu,T)d\nu=\sigma T^4$ ， $\sigma=5.67032\times10^{-18}W/m^2k^4$ ，Stefan-Boltzmann 常数。

辐射的总能量，即曲线下的面积与T^4成正比。

2．Wien 位移定律

$E(\nu,T)=c\nu^3 f(\frac{\nu}{T})=\frac{c^5}{\lambda^5}f(\frac{c}{\lambda T})$ ，函数的极大值满足 $T\lambda_m=b$ ，

$b=2.8978\times10^{-3}mk$

3．Rayleigh-Jeans 定律

绝对黑体空腔内的光以驻波的形式存在，单位体积内、频率在ν到$\nu+d\nu$之

间的驻波数为

$\rho d\nu=\dfrac{8\pi}{c^3}\nu^2 d\nu$，而从小孔辐射出的驻波数为$\Gamma=\dfrac{1}{4}c\rho$，辐射出的能量，即辐射本领为

$$E(\nu,T)=\Gamma kT=\frac{2\pi}{c^2}\nu^2 kT \qquad \text{或} \qquad E(\lambda,T)=\Gamma kT=\frac{2\pi c}{\lambda^4}kT \quad 。$$

$\lambda\to 0,\ E(\lambda,T)\to\infty$，与实验结果偏离。称为“紫外灾难”。

四 Plank 的量子假设（1900 年提出，1918 年获 Nobel 奖）

空腔中的驻波是一系列的谐振子，只能取一些分立的能量，即

$\varepsilon=0,\varepsilon_0,2\varepsilon_0,3\varepsilon_0,4\varepsilon_0\cdots$，且$\varepsilon_0=h\nu$，$h=6.63\times 10^{-34}\,Js$，Plank 常数。

则一个谐振子处于$E_n=n\varepsilon_0$态的几率为$e^{-\frac{n\varepsilon_0}{kT}}$，空腔内每一个驻波，即每一个谐振子的平均能量为

$$\bar{\varepsilon}=\frac{\sum_n n\varepsilon_0 e^{-\frac{n\varepsilon_0}{kT}}}{\sum_n e^{-\frac{n\varepsilon_0}{kT}}}=$$

$$\frac{\sum_n n\varepsilon_0 e^{-n\varepsilon_0\beta}}{\sum_n e^{-n\varepsilon_0\beta}}=-\frac{\partial}{\partial\beta}[\ln\sum_{n=0}^{\infty}e^{-n\varepsilon_0\beta}]=-\frac{\partial}{\partial\beta}[\ln\frac{1}{1-e^{-\varepsilon_0\beta}}]$$

$$=\frac{\partial}{\partial\beta}\ln(1-e^{-\varepsilon_0\beta})=\frac{\varepsilon_0 e^{-\varepsilon_0\beta}}{1-e^{-\varepsilon_0\beta}}\frac{e^{\varepsilon_0\beta}}{e^{\varepsilon_0\beta}}=\frac{\varepsilon_0}{e^{\varepsilon_0\beta}-1}=\frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}}-1}\neq kT$$

黑体的辐射本领为

$$E(\nu,T)=\frac{2\pi}{c^2}\nu^2\frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}}-1}=\frac{2\pi h\nu^3}{c^3}\frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}}-1}$$

长波段，$h\nu << kT$，$\frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}}-1}=\frac{1}{1+\frac{h\nu}{kT}-1}=\frac{kT}{h\nu}$，

$E(\nu,T)=\frac{2\pi}{c^2}h\nu^3\frac{kT}{h\nu}=\frac{2\pi}{c^2}\nu^2\ kT$ 与 Rayleigh-Jeans 定律符合。

短波段，$h\nu >> kT$，

$E(\nu,T)=\frac{2\pi}{c^2}h\nu^3\ e^{-\frac{h\nu}{kT}}$，与实验结果一致。

§ 11-2 Einstein 光量子

一 光电效应的解释

光的粒子性，$E=h\nu$

二 光的波粒二象性

粒子性 $E=h\nu$，波动性 $p=\frac{E}{c}=\frac{h\nu}{c}=\frac{h}{\lambda}$，即 $\lambda=\frac{h}{p}=\frac{h}{mv}$，推广得出物质波的概念。

由 de Broglie 提出。

对于光而言，由于 $E=h\nu$，$p=mc$，$E=mc^2$，所以 $m=\frac{h\nu}{c^2}$，为光子的

运动质量。而其静止质量 $m_0 = 0$。

粒子性表现在光与物质的相互作用，主要是高频的光波。波动性表现在光的传播，干涉、衍射方面，主要是低频的光。