第八章 光的量子性和激光

第一节 黑体辐射

8.1 黑体辐射

8.1.1 热辐射的特征和定量描述

8.1.2 基尔霍夫定律

8.1.3 绝对黑体和黑体辐射

8.1.4 维恩公式和瑞利—金斯公式

8.1.5 普朗克公式和能量子假说

8.1.1 热辐射的特征和定量描述

热辐射的一般特性：

温度高的物体辐射强，且向短波移动

解释

- 物体的温度与环境温度有差异时，两者之间将有能量交换，热辐射是能量交换的一种方式。
- 物体以电磁波的形式向外辐射能量，或吸收辐照到其表面的能量
- 分子(含有带电粒子)的热运动使物体辐射电磁波。这种辐射**与温度有关**，称为**热辐射**。

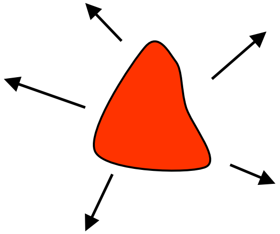
8.1.1 热辐射的特征和定量描述

热辐射的定量描述：

辐射的电磁波形成一个波场，即辐射场。辐射场与波长（频率）、温度、方向等有关。

辐射场的物理参数：温度T，波长λ或频率ν，辐射场的能量密度，辐射场的谱密度 $u(T, \lambda, \theta)$，辐射通量，辐射通量的谱密度，辐射照度，辐射照度的谱密度等。

辐射谱密度、辐射本领：温度为T时，频率ν附近单位频率间隔内的辐射能量，亦称**单色辐出度**。



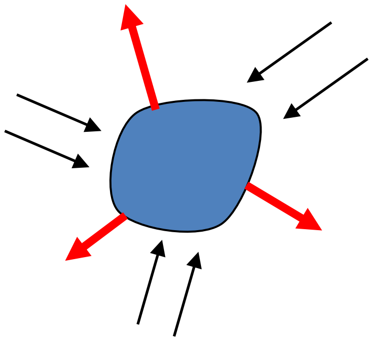
$$r(\nu, T)$$

辐射通量：温度为T时，频率ν附近$\mathrm{d}\nu$频率间隔内的辐射能量。

$$\mathrm{d}\Phi(\nu, T) = r(\nu, T)\mathrm{d}\nu$$

8.1.1 热辐射的特征和定量描述

热辐射的定量描述：



吸收本领、吸收比：

照射到物体上的通量 $\mathrm{d}\Phi(\nu,T)$

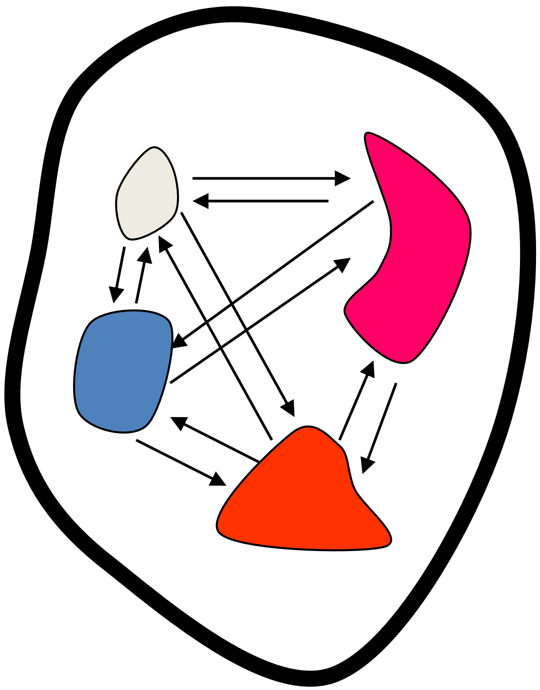
其中被物体吸收的通量 $\mathrm{d}\Phi'(\nu,T)$

$$a(\nu,T)=\frac{\mathrm{d}\Phi'(\nu,T)}{\mathrm{d}\Phi(\nu,T)}$$ 称为吸收本领或吸收比

8.1.2 基尔霍夫定律

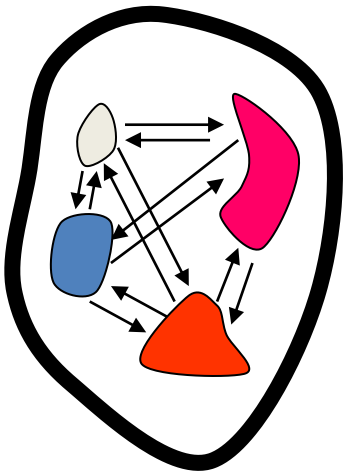
物体间的热交换：

- 与外界隔绝的几个物体，起初温度各不相同
- 假设相互间只能以热辐射的形式交换能量
- 每一个物体向外辐射能量，也吸收其它物体辐射到其表面的能量
- 温度低的，辐射小，吸收大；温度高的，辐射大，吸收小

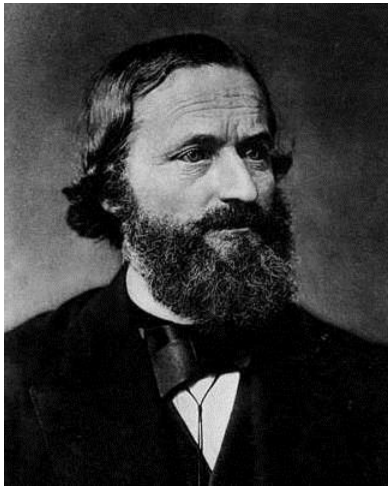


8.1.2 基尔霍夫定律

物体间的热交换：



- 经过一个过程后，所有物体的温度相同，达到热平衡
- 热平衡时，每一个物体辐射的能量等于其吸收的能量
- 热平衡状态下，吸收本领大，辐射本领也大
- 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T，ν有关。



Gustav Robert Kirchhoff，1824～1887），德国物理学家

8.1.2 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律：

热平衡状态下

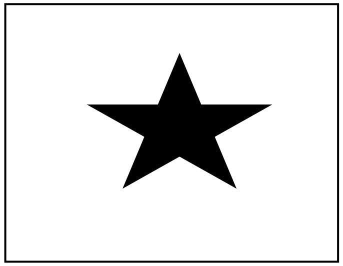
普适函数，与物质无关
应当通过实验测量

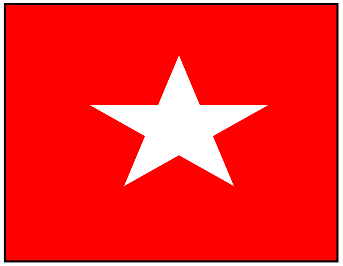
辐射本领

$$\frac{r(\nu,T)}{a(\nu,T)}=F(\nu,T)$$

吸收本领

吸收大，辐射也大。





必须同时测量 $r(\nu,T)$和$a(\nu,T)$ 才能得到 $F(\nu,T)$

如果让 $a(\nu,T)\equiv 1$ 则 $F(\nu,T)\equiv r(\nu,T)$

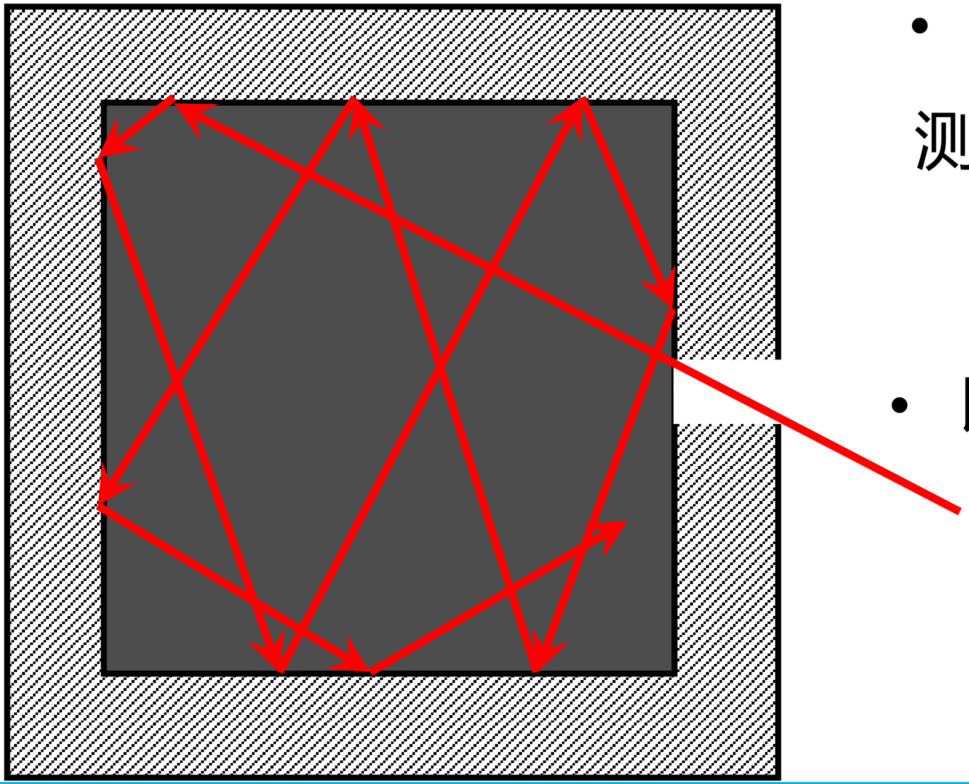
$a(\nu,T)\equiv 1$ 的物体，称为绝对黑体

8.1.3 绝对黑体和黑体辐射

绝对黑体：

$$a(\nu,T)\equiv 1$$

- 一个开有小孔的空腔，对射入其中的光几乎可以全部吸收



- 等效于绝对黑体

测量空腔开口处的辐射本领

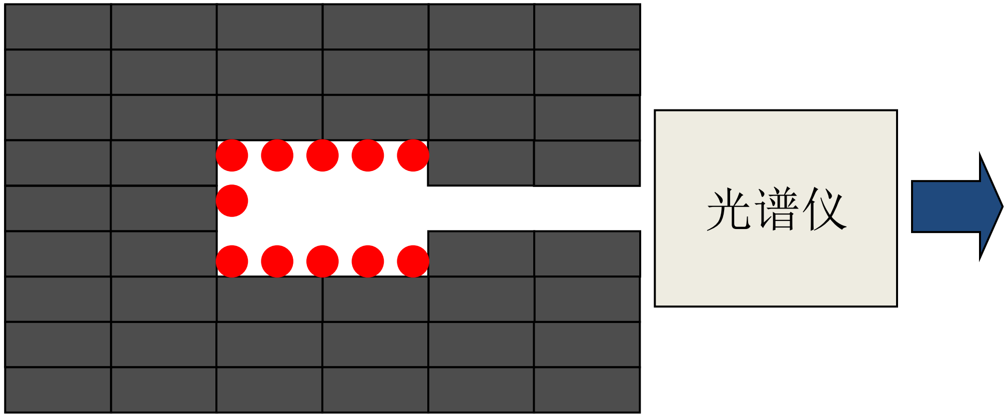
$$e(\nu,T)$$

- 即可以得到

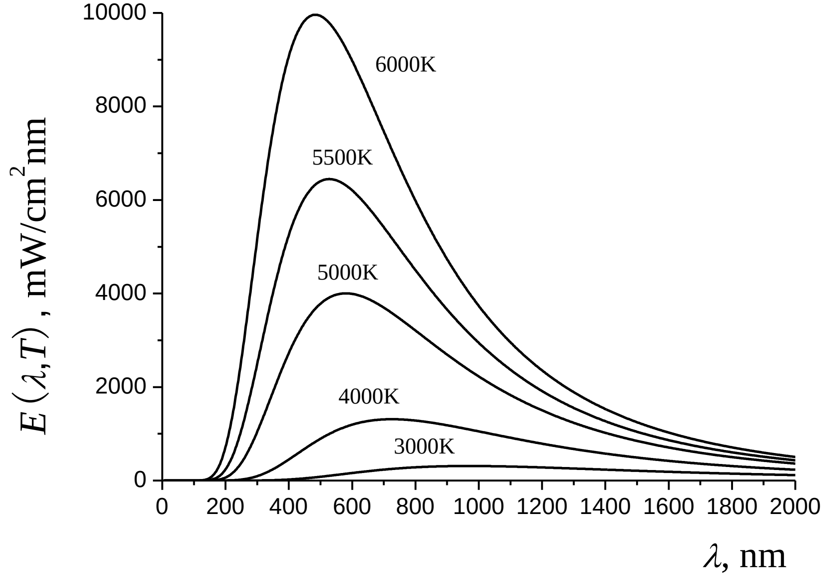
$$F(\nu,T)=e(\nu,T)$$

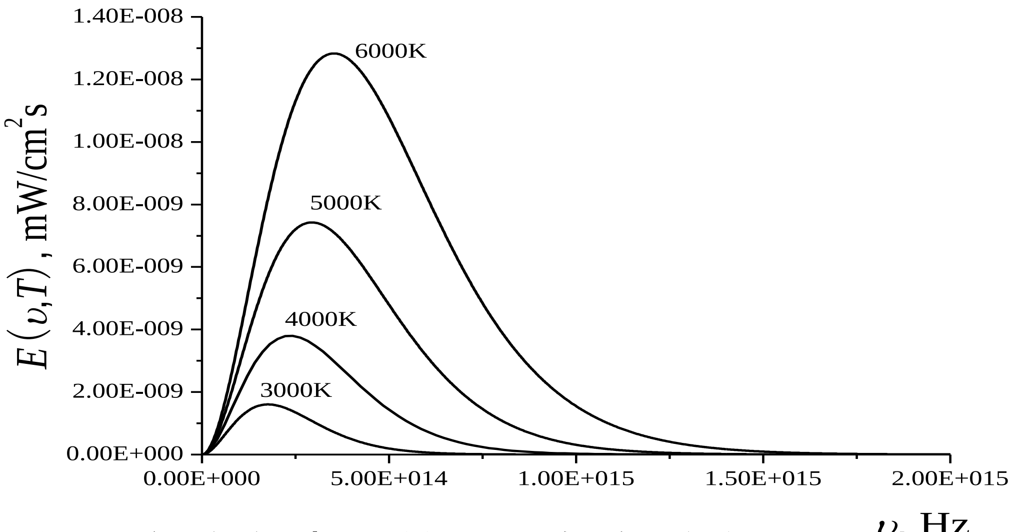
8.1.3 绝对黑体和黑体辐射

绝对黑体辐射的空腔辐射测量装置：



对空腔加热到不同温度





以频率分布表示的黑体辐射定律

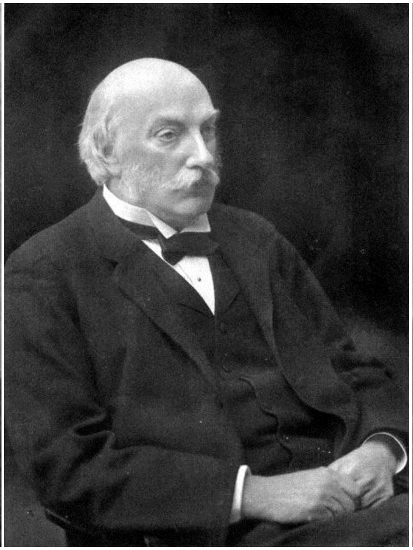
8.1.4 维恩公式和瑞利—金斯公式

黑体辐射的定律：

- 1、Stefan-Boltzmann定律（1879年、1884年）
- 2、Wien位移定律（1893年）
- 3、Rayleigh-Jeans定律（1900年，1905年）

Stefan

Wien



Rayleigh

Jeans

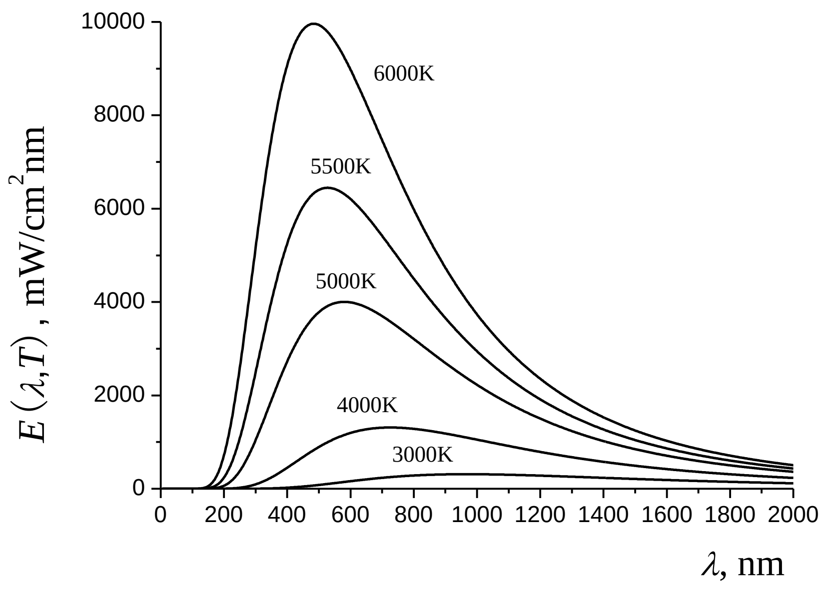
8.1.4 维恩公式和瑞利—金斯公式

Stefan-Boltzmann定律：

辐射的总能量(辐射本领)，即曲线下的面积和T^4成正比

$$\Phi(T)=\int_0^{\infty}e(\nu,T)\mathrm{d}\nu=\sigma T^4$$

$$\sigma=5.67032\times10^{-18}\,\mathrm{W/m^2K^4}$$



Stefan-Boltzmann（斯特藩-玻尔兹曼）常数

8.1.4 维恩公式和瑞利—金斯公式

Wien位移定律：

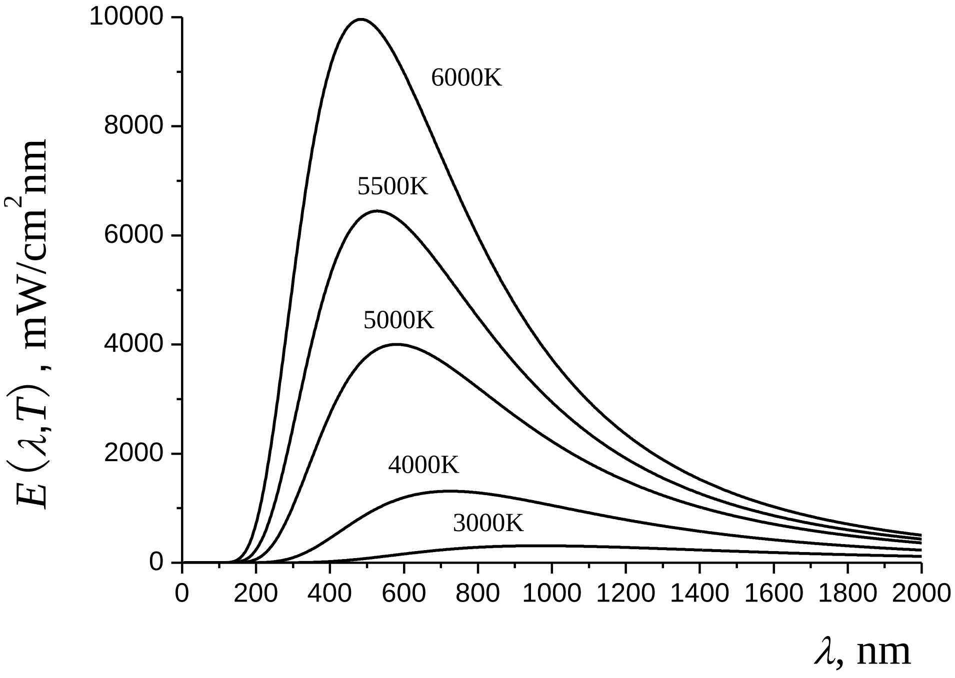
$$r(\nu,T)=\frac{c^5}{\lambda^5}f\left(\frac{c}{\lambda T}\right)$$

或

$$r(\nu,T)=\frac{\alpha\upsilon^3}{c^2}e^{-\beta\nu/T},$$

υ是分子的运动速度

$$r(\lambda)=\frac{\alpha c^2}{\lambda^5}e^{-\beta c/(\lambda T)}$$



- 曲线的极大值满足

$$T\lambda_m=b \qquad b=2.8978\times10^{-3}\,\mathrm{mK}$$

色温的定义

$$T=b/\lambda_m$$ 用于测量温度

8.1.4 维恩公式和瑞利—金斯公式

Rayleigh-Jeans定律（1900年，1905年）：

瑞利和金斯用经典电磁理论求得：在一个封闭空腔内的单位体积和频率间隔dv内的自由振动频率的数目是 $8\pi v^2 / c^3$

按照能均分定理，每种振动频率应配以平均能量 kT，因此求得频率间隔dv之内的能量密度$\rho(v,T)$为 $\rho(v,T) = 8\pi v^2 kT / c^3$

能量密度和辐射本领之间有关系： $\rho(v,T) = 4r(v,T) / c$

因此可得辐射本领为

$$r\left(v,T\right) = \frac{2\pi}{c^2} v^2 kT$$

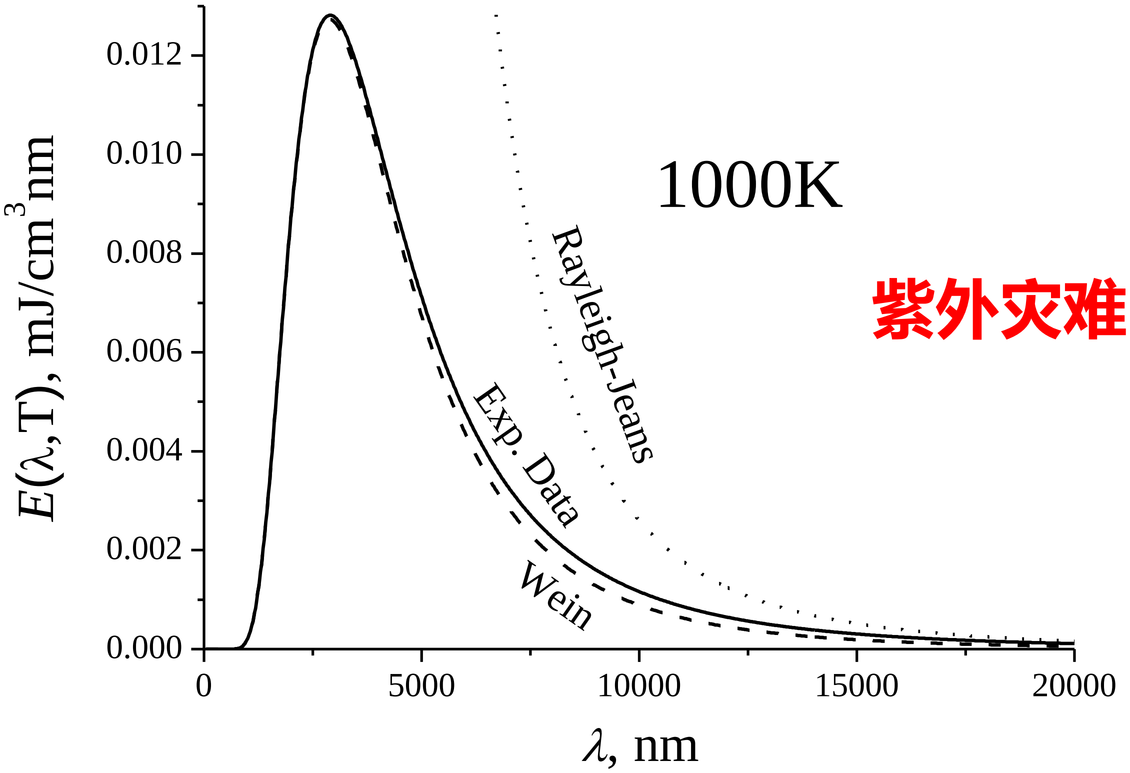
或

$$r\left(\lambda,T\right) = \frac{2\pi c}{\lambda^4} kT$$

k是Boltzmann常数

8.1.4 维恩公式和瑞利—金斯公式

理论与实验的差异



紫外灾难

- 短波段，瑞利 - 金斯公式严重偏离实验结果
- 看起来维恩的结果与实验偏差不大，但这是一种系统偏差，所拟合出的公式完全不同

8.1.4 维恩公式和瑞利—金斯公式

二十世纪初物理学天空的两朵乌云

“动力理论肯定了热和光是运动的两种方式，现在，它的美丽而晴朗的天空却被两朵乌云笼罩了，” “第一朵乌云出现在光的波动理论上，” “第二朵乌云出现在关于能量均分的麦克斯韦-玻尔兹曼理论上。”

--1900年新春，开尔文在送别旧世纪所做的演讲

指迈克尔逊—莫雷实验的结果和以太漂移说之间的矛盾！

狭义相对论

指热学中的能量均分定则在气体比热和辐射能谱的解释中与实验结果不符，其中尤其以黑体辐射中的“紫外灾难”最为突出。

量子力学

量子信息与安全导论 中国科学技术大学 陈巍

8.1.5 普朗克公式和能量子假说

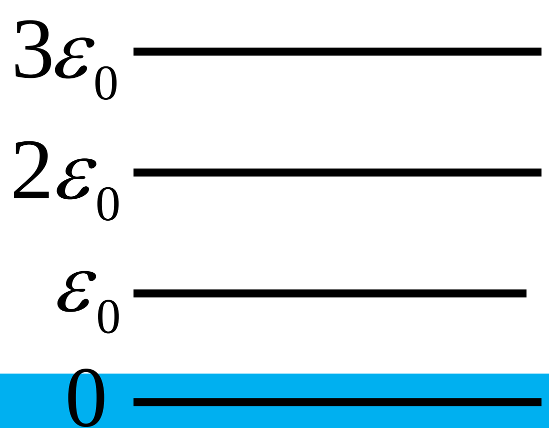
Planck假说：

谐振子能量量子化，只能取一些分立的能量，即

$$\varepsilon = 0, \varepsilon_0, 2\varepsilon_0, 3\varepsilon_0, 4\varepsilon_0 \cdots$$

$$\varepsilon_0 = h\nu \qquad h = 6.63\times10^{-34}\,Js$$

- 则一个谐振子处于能态$E_n=n\varepsilon_0$的几率为 $e^{-\frac{n\varepsilon_0}{kT}}$
- 一个谐振子的平均能量为 $\bar{\varepsilon} = \sum\limits_n n\varepsilon_0 e^{-\frac{n\varepsilon_0}{kT}} / \sum\limits_n e^{-\frac{n\varepsilon_0}{kT}}$



此时，黑体的辐射本领为

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

8.1.5 普朗克公式和能量子假说

Planck假说：

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

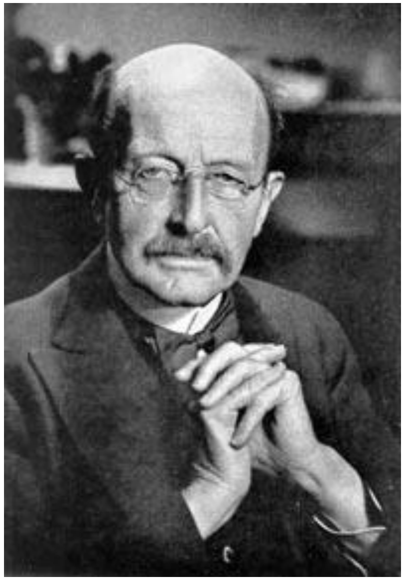
长波段 $h\nu << kT$ $\quad \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}}-1}\approx\frac{1}{1+\frac{h\nu}{kT}-1}=\frac{kT}{h\nu}$

$$e(\nu,T)=\frac{2\pi}{c^2}\nu^2 kT$$ **与Rayleigh-Jeans定律符合**

短波段 $h\nu >> kT$ $\quad \frac{\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}}-1}\approx\nu\frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}}}=\nu e^{-\frac{h\nu}{kT}}$

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

与实验结果一致



马克思·普朗克
(1858-1947)
德国物理学家

1900年提出能量子假说，1918年获Nobel奖

作业

p.275: 2, 3, 4

重排版

p.459: 2, 3, 4