

第七章 光的量子性

黑体辐射的实验定律

Plank的量子假设

光电效应

Einstein的光量子模型

光的波粒二象性

晴朗的经典物理天空的乌云



地球相对
以太的运动



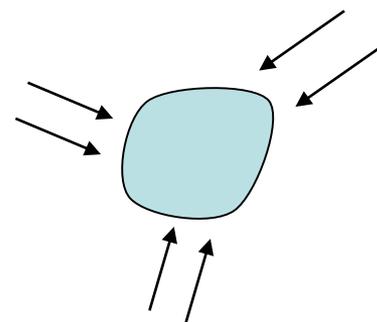
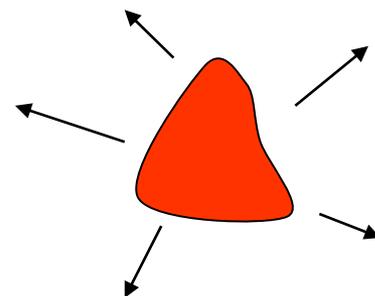
黑体辐射
的实验结果

物理世界上空的两朵乌云

7.1 黑体辐射和普朗克(Plank)的量子假设

1. 热辐射

- 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**。
- 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**。
- 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。

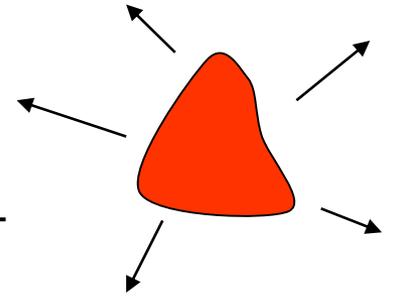


2. 辐射场

- 辐射的电磁波形成一个波场，即**辐射场**。
- 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**，**辐射通量**等。

辐射本领（辐射谱密度）：温度为 T 时，辐射场单位时间、单位面积内，频率 ν 附近单位频率间隔内的辐射能量，亦称**单色辐出度**。

$$r(\nu, T) = \frac{dE(\nu, T)}{d\nu dS} \quad \text{或} \quad r(\lambda, T) = \frac{dE(\lambda, T)}{d\lambda dS}$$

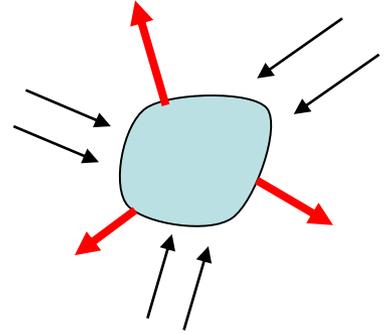


总辐射本领：
$$R(T) = \int_0^{\infty} r(\lambda, T) d\lambda$$

吸收本领(吸收比)

辐射到物体上的光能量 $dE(\nu, T)$

其中被物体吸收的能量 $dE'(\nu, T)$



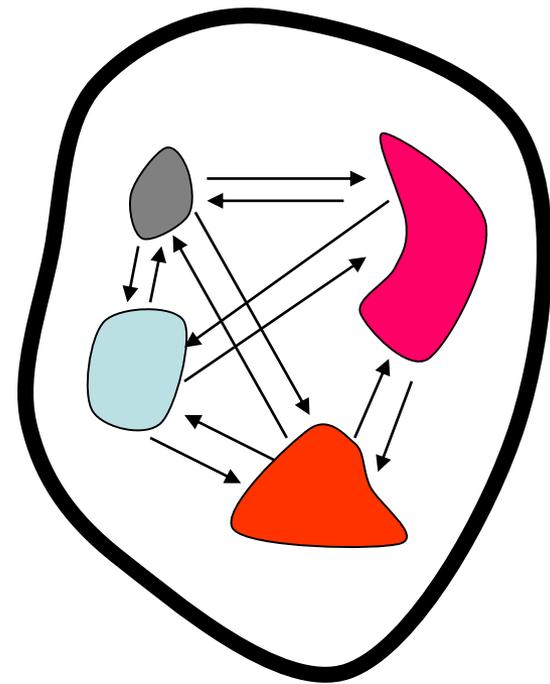
则

$$A(\nu, T) = \frac{dE'(\nu, T)}{dE(\nu, T)}$$

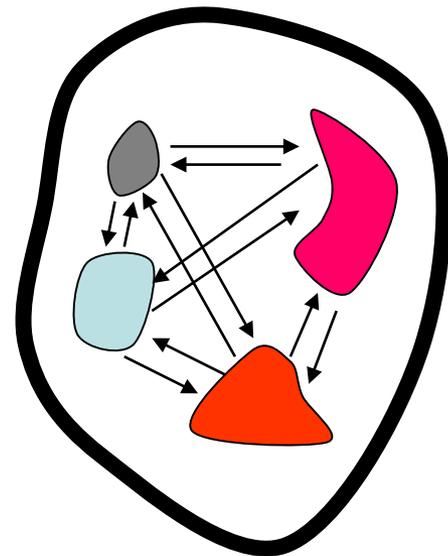
称为吸收本领或吸收比

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



- 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 ， V 有关。



基尔霍夫（Gustav Robert Kirchhoff, 1824~1887），德国物理学家。

$$\frac{r(\nu, T)}{A(\nu, T)} = f(\nu, T) \quad \text{吸收大, 辐射也大。}$$

$f(\nu, T)$ 是普适函数, 与物质无关,
与空腔形状无关。

如果知道 $f(\nu, T)$, 可对热辐射进行全面深入研究

通过实验测量 $f(\nu, T)$

必须同时测量 $r(\nu, T)$ 和 $A(\nu, T)$, $A(\nu, T)$ 不易测量

如果让 $A(\nu, T) \equiv 1$ 则 $f(\nu, T) \equiv r(\nu, T)$

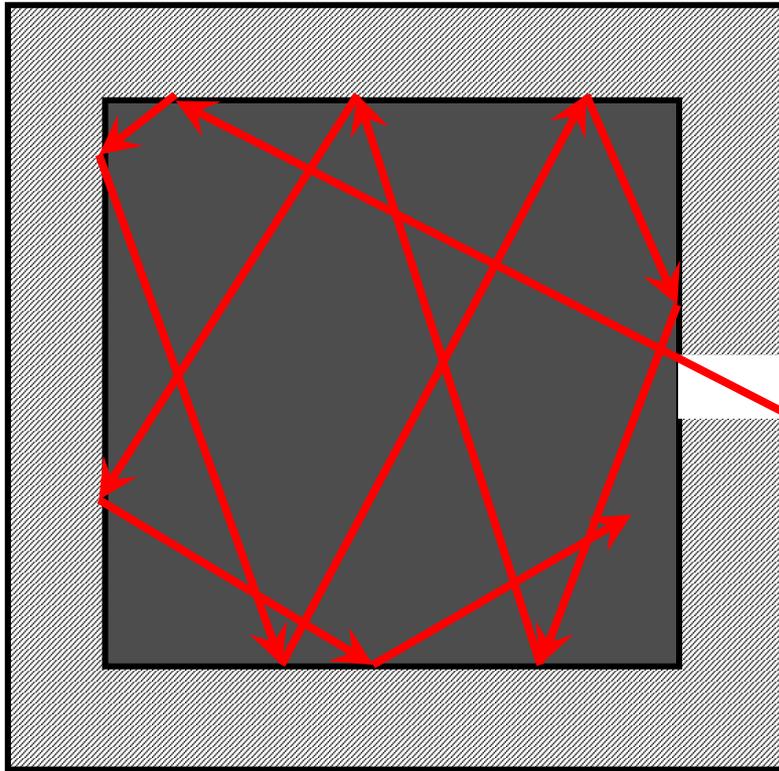
$A(\nu, T) \equiv 1$ 的物体, 称为绝对黑体,

辐射到物体表面的能量全部被吸收, 没有反射。

7.2 绝对黑体和黑体辐射定律

绝对黑体

- 一个开有小孔的空腔，对射入其中的光几乎可以全部吸收

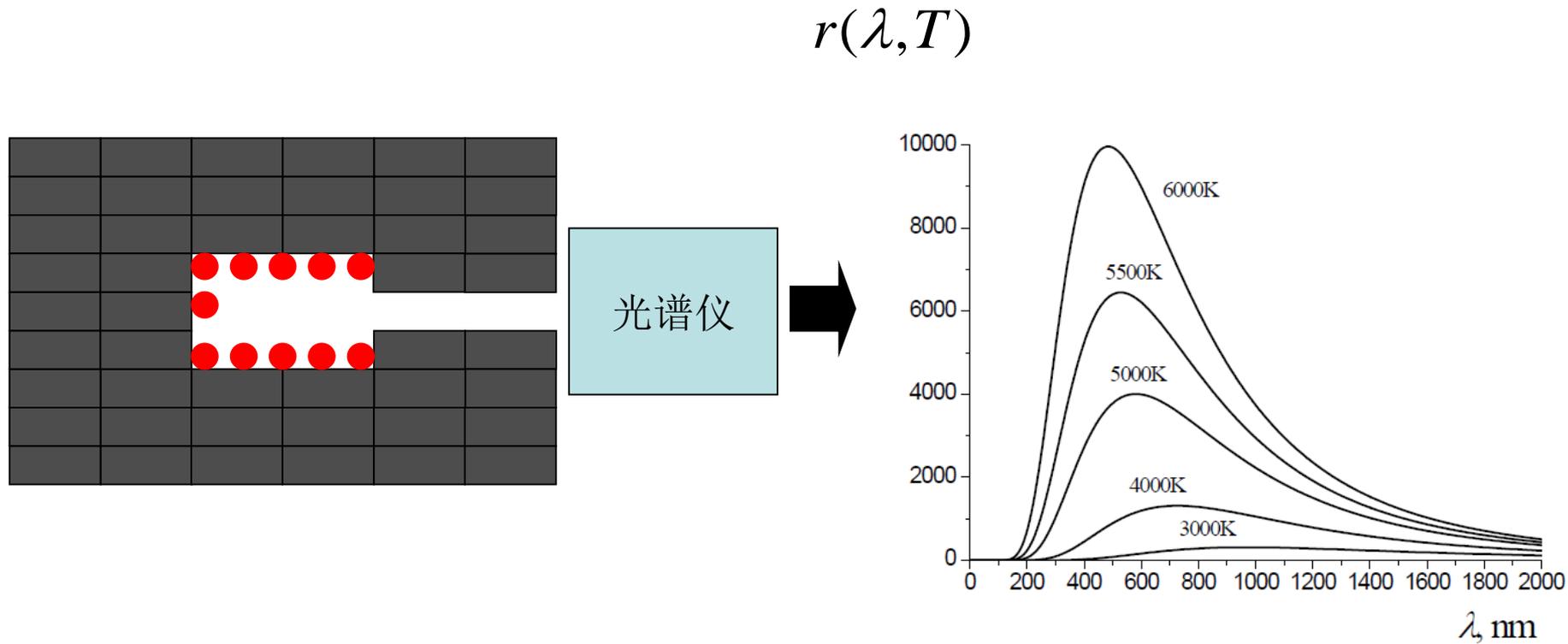


- 等效于绝对黑体

测量空腔开口处的辐射本领

- 即可以得到 $r(\nu, T)$

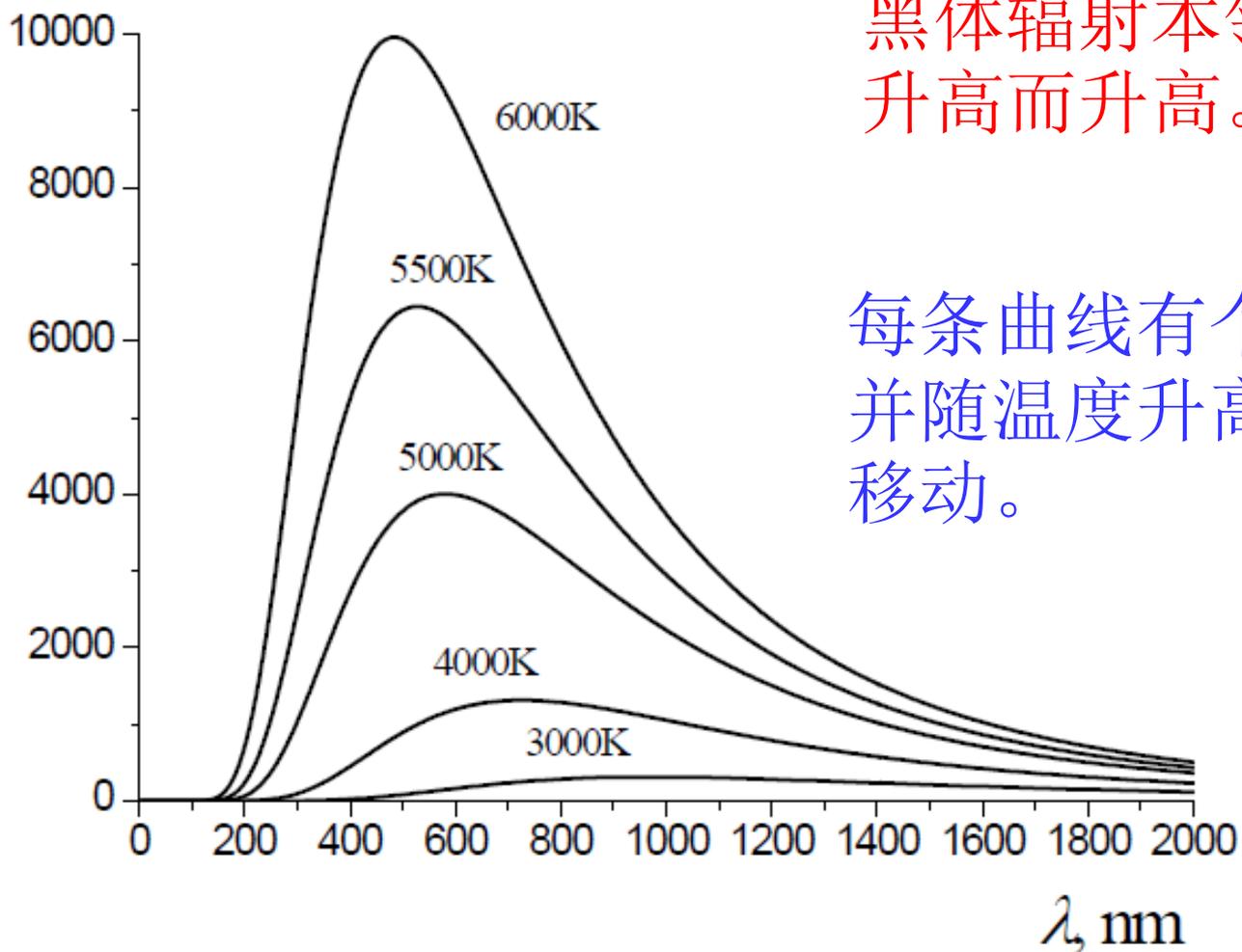
$$f(\nu, T) = r(\nu, T)$$



测量黑体辐射的实验装置

实验测量的结果

$$r(\lambda, T)$$



黑体辐射本领随温度升高而升高。

每条曲线有个最大值，并随温度升高向短波移动。

黑体辐射的定律

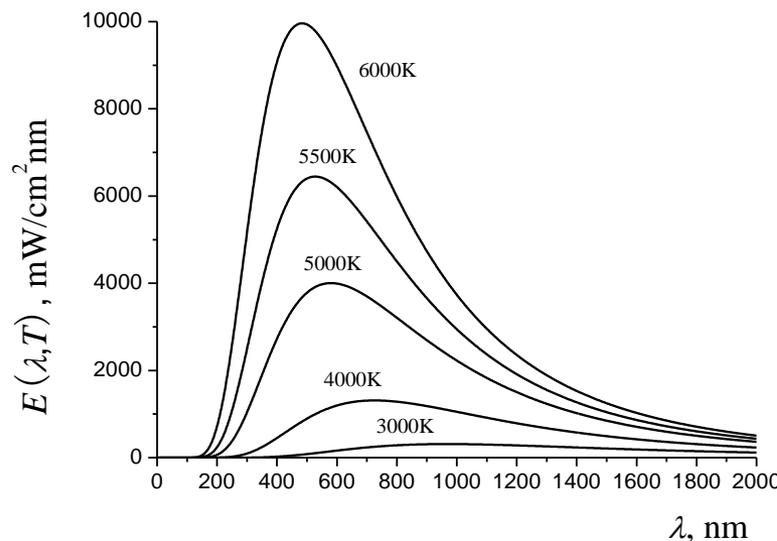
1. 斯特藩-玻尔兹曼(Stefan-Boltzmann)定律

从实验和理论上得出：辐射的总能量，即曲线下的面积与 T^4 成正比

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

$$\sigma = 5.67032 \times 10^{-18} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$$

Stefan-Boltzmann常数



2. 维恩(Wien)位移定律

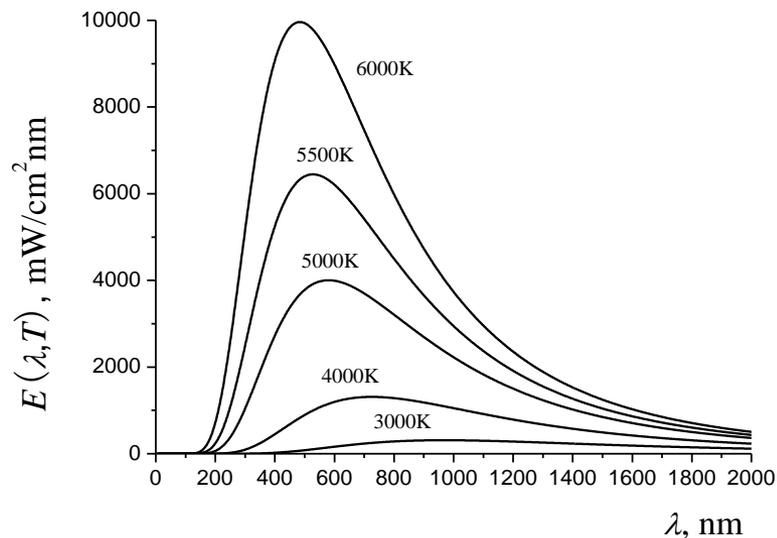
- 曲线的极大值对应的波长与温度成反比

$$T\lambda_m = b$$

$$b = 2.8978 \times 10^{-3} \text{ mK}$$

普适常数

$$T = b / \lambda_m \quad \text{用于温度预测}$$



3. Wien公式

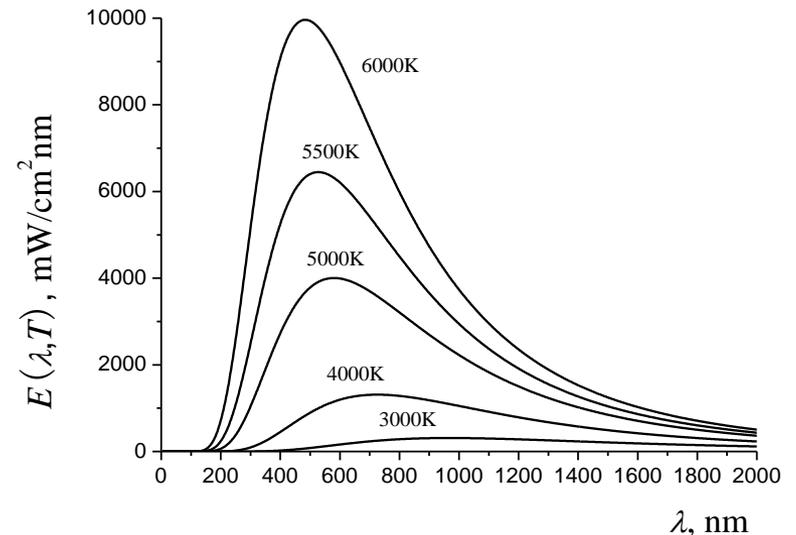
(热力学理论+特殊假设)

1893年，Wien从热力学导出了
黑体热辐射能量分布公式

$$r(\lambda, T) = c_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}}$$

c_1 和 c_2 是普适常数

半经验公式



4. 瑞利-金斯(Rayleigh-Jeans)定律 (1900, 1905)

(经典电磁理论+统计物理理论)

- 绝对黑体空腔内的光以驻波的形式存在
- 一系列驻波可看成是一种波型的电磁场
- 腔内单位体积频率间隔 $d\nu$ 电磁驻波数目为 $dn = \frac{8\pi\nu^2 d\nu}{c^3}$
- 每一种电磁驻波的能量为 kT (电场能 $kT/2$, 磁场能 $kT/2$)
k为玻尔兹曼常数
- 腔内频率在 $\nu \sim \nu + d\nu$ 电磁能量密度为

$$\rho(\nu, T)d\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT d\nu$$

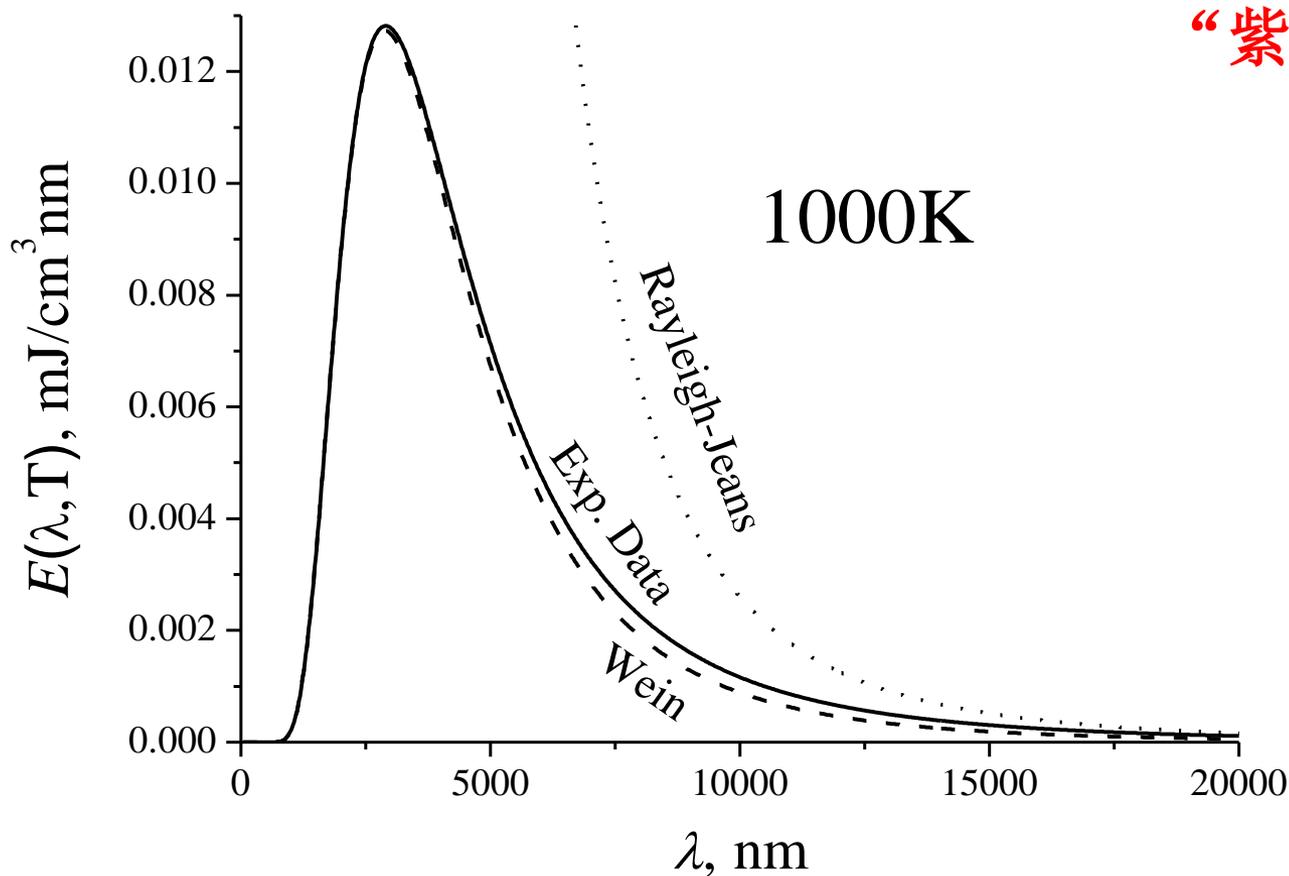
小孔辐射本领为 $r(\lambda, T)d\nu = \frac{c}{4} \rho(\nu, T) = \frac{2\pi}{c^2} \nu^2 kT d\nu = \frac{2\pi c}{\lambda^4} kT d\lambda$

理论与实验

Wien: 短波符合, 长波偏离

Rayleigh-Jeans: 长波符合, 短波发散

“紫外灾难”



5. 普朗克假说（普朗克公式） $E(\nu, T) = \frac{2\pi h}{c^2} \frac{\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$

- 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 $\varepsilon = 0, \varepsilon_0, 2\varepsilon_0, 3\varepsilon_0, 4\varepsilon_0 \dots$

$$\varepsilon_0 = h\nu \quad h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

- ◆ 则一个谐振子处于能态 $E_n = n\varepsilon_0$ 的几率为 $e^{-\frac{n\varepsilon_0}{kT}}$

$3\varepsilon_0$ _____ ◆ 一个谐振子的平均能量为

$2\varepsilon_0$ _____

ε_0 _____

0 _____

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum_n n\varepsilon_0 e^{-\frac{n\varepsilon_0}{kT}}}{\sum_n e^{-\frac{n\varepsilon_0}{kT}}} = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

黑体的辐射本领为

$$E(\nu, T) = \frac{2\pi h}{c^2} \frac{\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad \text{或} \quad E(\lambda, T) = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

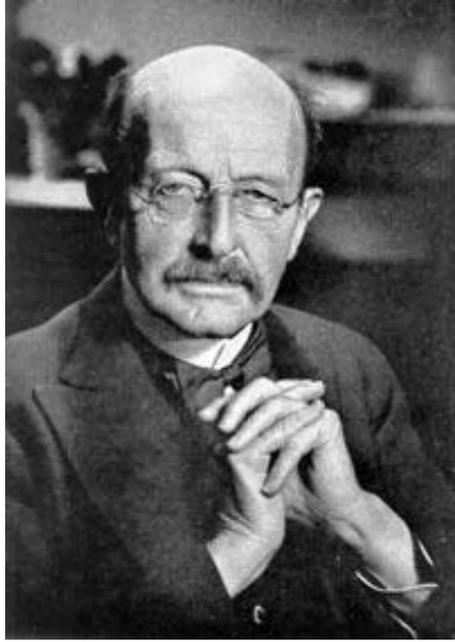
长波段 $h\nu \ll kT$ $\frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \approx \frac{1}{1 + \frac{h\nu}{kT} - 1} = \frac{kT}{h\nu}$

$E(\nu, T) = \frac{2\pi}{c^2} \nu^2 kT$ **Rayleigh-Jeans公式**

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

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

Wien公式 $2\pi hc^2 = c_1$
 $hc / k = c_2$



马克斯·普朗克 (Max Planck, 1858~1947), 德国物理学家

重要意义：引入了量子化概念，能量的吸收是量子化的。

7.3 光电效应

1. 光电效应实验

实验装置:

实验现象:

1) 无光照, 无电子逸出, 无电流

2) 光照金属 (阴极) 表面

a. 光的频率

$\nu < \nu_0$ 即使光强很大, 也无电流

$\nu > \nu_0$ 有电子发射

b. 逸出电子具有初动能, 反向截止电压

$$eV_0 = mv_m^2 / 2$$

c. 出射电子的数目与光强成正比, 单个电子的能量与光强无关

d. 电子的发射与光照同时发生, 没有延迟。

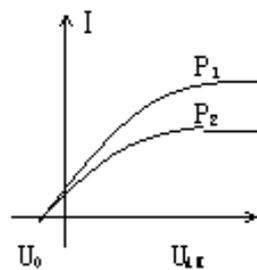
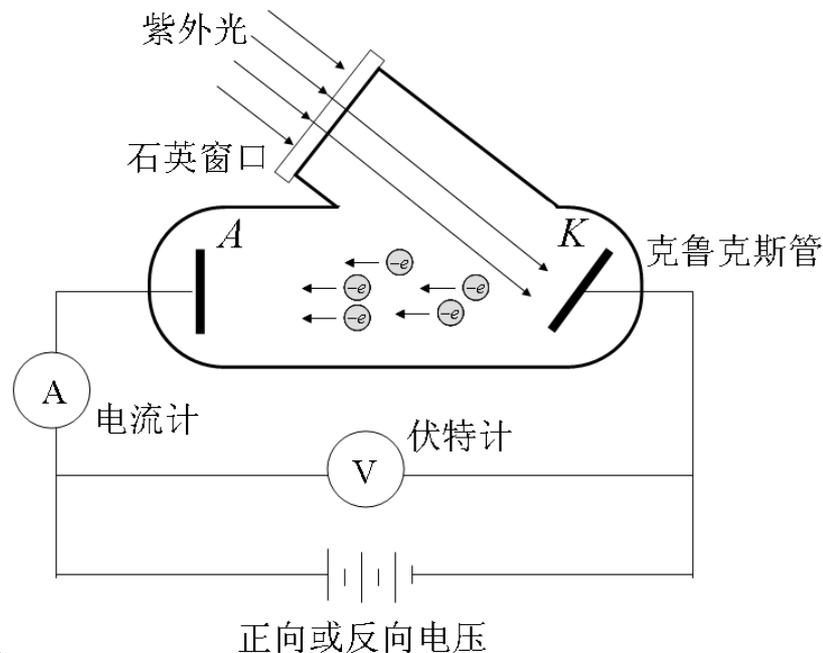


图 2

同一频率, 不同光强时
光电管的伏安特性曲线

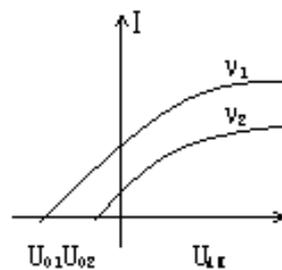


图 3

不同频率时光电管的
伏安特性曲线

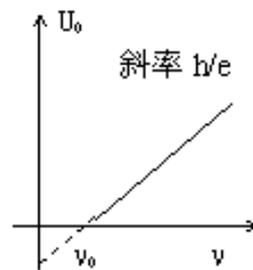


图 4

截止电压 U 与入射光频率 ν 的关系图

2. 经典理论解释失败

1) 电子能量与频率的关系

经典物理：决定电子能量是强度，不是光的频率。

2) 响应时间

经典物理：光照，电子吸收能量，应有一定的响应时间。

3. 爱因斯坦光量子假设

1905年,爱因斯坦用光量子假设进行了解释

(1) 电磁波由大量光量子（光子）组成，
一个光子能量

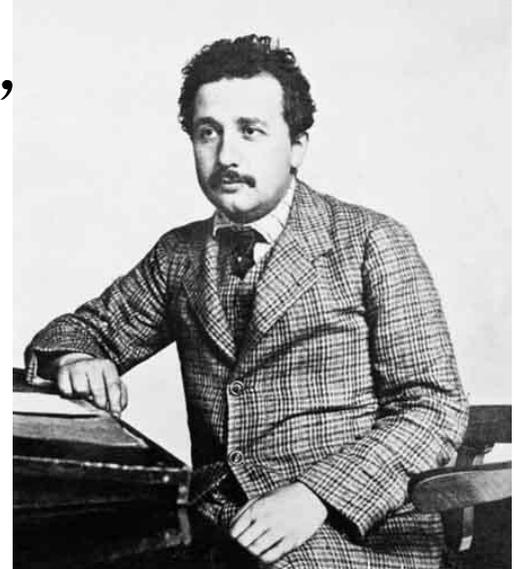
$$\varepsilon = h\nu \quad (\text{其中} h \text{ 是普朗克常数})$$

(2) 光子具有“整体性”，一个光子
只能整个地被电子吸收或发射。

(3) 对光电效应的解释

电子逸出时动能

$$mv_m^2 / 2 = h\nu - A = h(\nu - \nu_0)$$



Albert Einstein

1879~1955

1905年用光量子假
说解释光电效应

- ◆ 两个经典实验结果：黑体辐射、光电效应
- ◆ 经典物理理论无法给出圆满的解释
- ◆ 引入新的概念：能量量子化、光子，从而完全解释了黑体辐射及光电效应的实验结果
- ◆ 新的概念突出了光的粒子性及波粒二象性的统一

7.4 光的波粒二象性

光既是波，又是粒子，具有波粒二象性。

粒子性	$E = h\nu = \hbar\omega$	波动性
	$P = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} = \hbar k$	

完整性、颗粒性、不可分割

叠加性

德布罗意假设：实物粒子具有波粒二象性

波动性	$\nu = \frac{E}{h}$	粒子性
	$\lambda = \frac{h}{P}$	

经典理论的困难

量子理论的建立

量子光学

量子通信