

## § 15-1 黑体辐射(*black-body radiation*)

### 一、热辐射(*heat radiation*)

任何物体  
在任何温度下 都能辐射电磁波

一定时间内 物体辐射能量的多少 与物体的温度有关  
辐射能量按波长的分布

这种与温度有关的辐射称为 **热辐射**

设某物体  $\frac{\text{单位时间}}{\text{单位面积}}$  在某波长  $\lambda \sim \lambda + d\lambda$  微区域  
的辐射能为  $dM_\lambda$

定义  $M_\lambda(T) = \frac{dM_\lambda}{d\lambda}$

为 该物体对波长  $\lambda$  的  
单色辐射出射度 简称 单色辐出度

$M_\lambda(T)$  是辐射体的辐射波长  $\lambda$  和热力学温度  $T$  的函数，  
且与物体的材料及表面情况有关。

$$M_{\lambda}(T) = \frac{dM_{\lambda}}{d\lambda} \quad \text{单色辐出度}$$

其单位为 瓦·米<sup>-3</sup> 即 W·m<sup>-3</sup>

单位时间的辐射能 ← 单位面积 (米<sup>-2</sup>) · 单位波长 (米<sup>-1</sup>)

从物体单位表面上辐射的**各种波长**的总辐射功率为

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

$M(T)$  称为物体的辐射出射度, 简称 **辐出度**

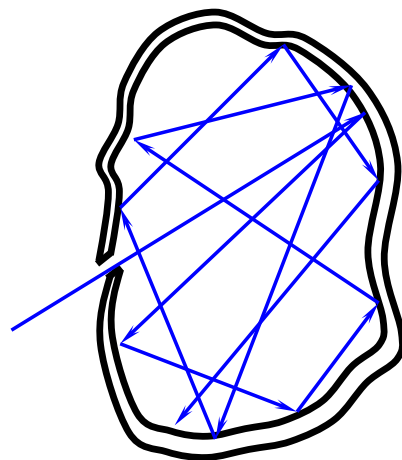
其单位为 瓦·米<sup>-2</sup> 即 W·m<sup>-2</sup>

**单色吸收比**  $\alpha(\lambda, T)$ ：温度为  $T$  的物体吸收波长在  $\lambda$  到  $\lambda + d\lambda$  范围内的电磁波能量与相应波长的入射电磁波能量之比。

**单色反射比**  $r(\lambda, T)$ ：温度为  $T$  的物体反射波长在  $\lambda$  到  $\lambda + d\lambda$  范围内的电磁波能量与相应波长的入射电磁波能量之比。

$$\text{两者关系 } \alpha(\lambda, T) + r(\lambda, T) = 1$$

假如有一个物体在任何温度下对任何波长的入射辐射能的吸收比都等于1，即  $\alpha_0(\lambda, T) = 1$ ，这种理想物体为**绝对黑体**，简称**黑体**。



空腔的电磁辐射就可以认为是黑体辐射。

任一物体辐射出去的能量必定等于在相同时间内吸收的能量，这种热辐射称为平衡辐射。

热平衡时

$$\frac{M_{\lambda 1}(T)}{\alpha_1(\lambda, T)} = \frac{M_{\lambda 2}(T)}{\alpha_2(\lambda, T)} = \dots = \frac{M_{\lambda 0}(T)}{\alpha_0(\lambda, T)}$$

绝对黑体， $\alpha_0(\lambda, T) = 1$ ，所以

$$\frac{M_{\lambda}(T)}{\alpha(\lambda, T)} = M_{\lambda 0}(T)$$

这表示，任何物体的单色辐出度与单色吸收比之比，等于同一温度下绝对黑体的单色辐出度，这就是基尔霍夫辐射定律。

## 二、黑体辐射的基本规律

- 黑体的辐出度  $M_B(T) \propto T^4$

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

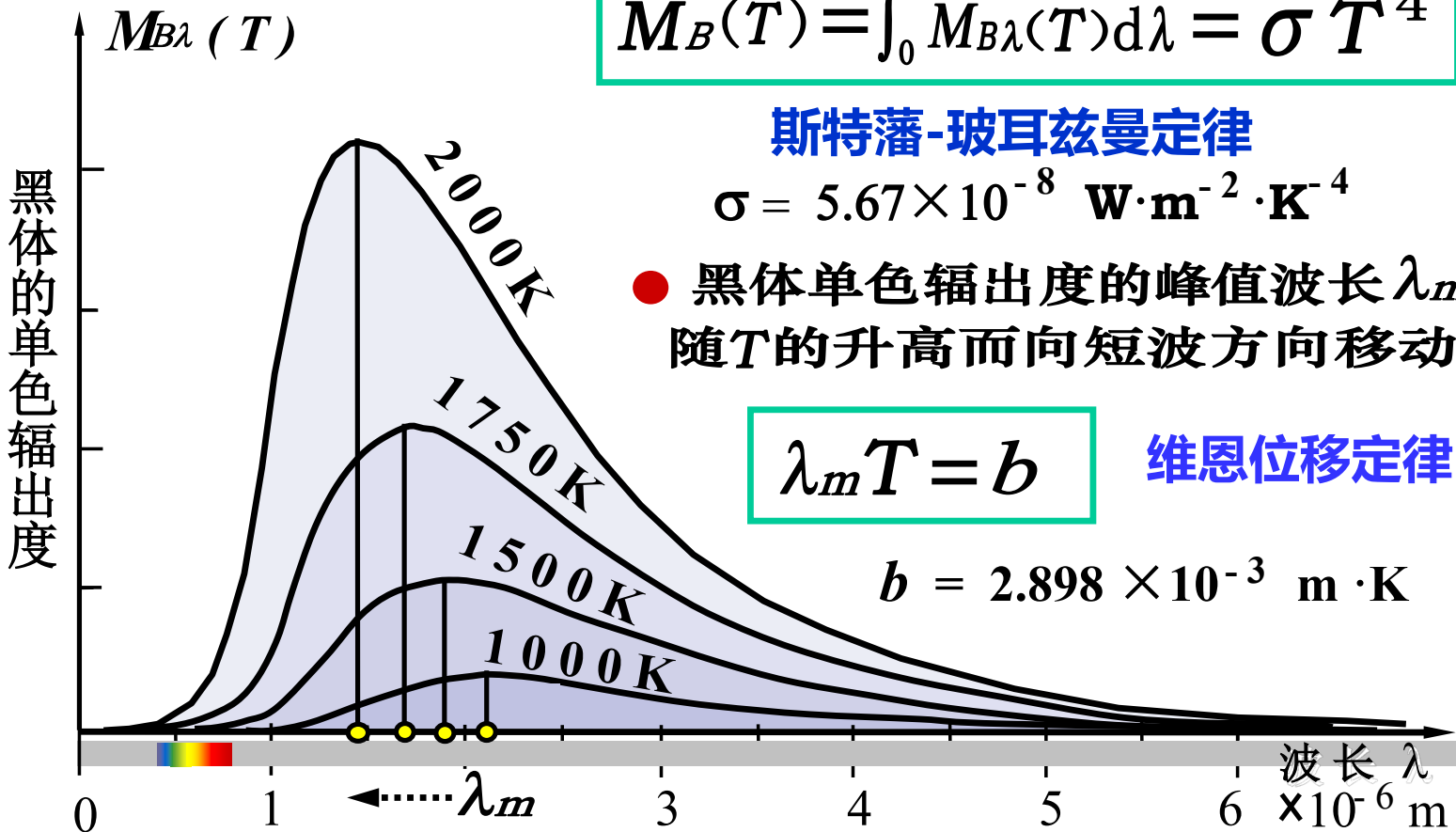
斯特藩-玻耳兹曼定律

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

- 黑体单色辐出度的峰值波长  $\lambda_m$  随  $T$  的升高而向短波方向移动

$$\lambda_m T = b \quad \text{维恩位移定律}$$

$$b = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$



### 三、普朗克辐射公式和能量子的概念

沿用经典物理概念（如经典电磁辐射理论和能量均分定理）去推导一个符合实验规律的黑体单色辐射度函数  $M_{B\lambda}(T)$  均遇到困难。其中二个著名的推导结果是

由经典统计物理学方法导出

维恩公式:

$$M_{\lambda 0}(T) = \frac{c_1}{\lambda^5} e^{-c_2 / \lambda T}$$

维恩公式只是在短波段与实验曲线相符。

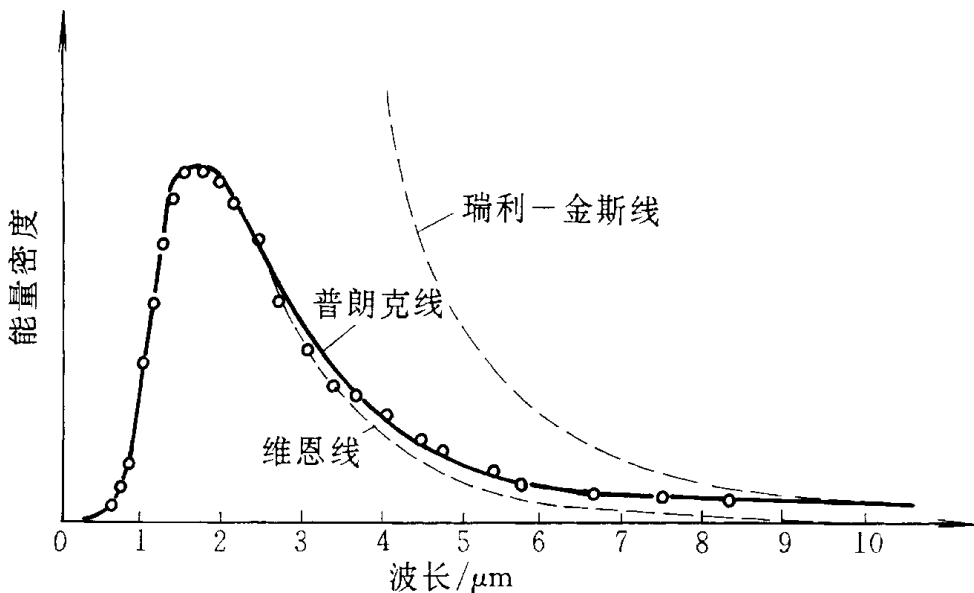
$$M_{B\lambda}(T) = \frac{2\pi c}{\lambda^4} k T$$

(瑞利—金斯公式)

当  $\lambda \longrightarrow 0$  时,

即波长向短波 (紫外)  
方向不断变短时,

则  $M_{B\lambda}(T) \longrightarrow \infty$



经典物理概念竟然得出如此荒唐的结论，物理学史上称之为“**紫外灾难**”黑体辐射问题所处的困境成为十九世末“物理学天空中的一朵乌云”，但它却孕育着一个新物理概念的诞生。



## ▲ 普朗克公式

1900年10月19日，德国物理学家普朗克提出了一个描述黑体单色辐出度分布规律的数学公式，其波长表达式为

$$M_{B\lambda}(T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h c}{k T \lambda}} - 1}$$

$c$  — 光在真空中的速率       $k$  — 玻耳兹曼常量

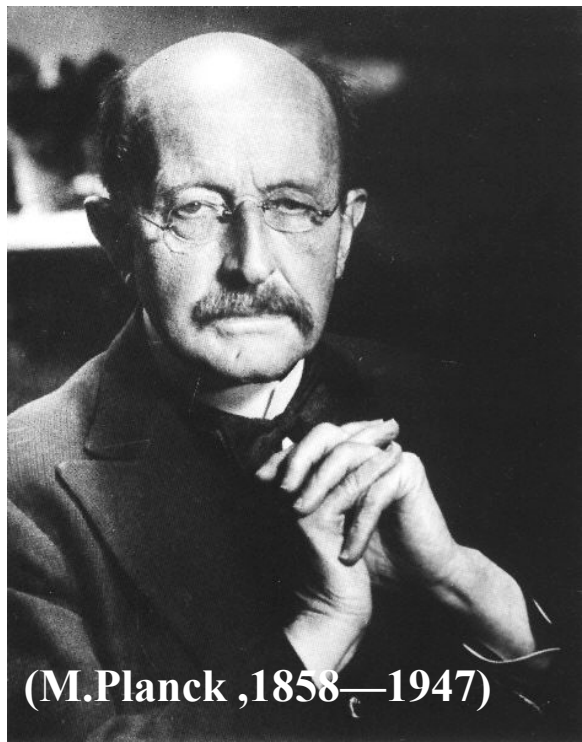
$h$  — 普朗克常量    数值为  $6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

并很快被检验与实验结果相符。

普朗克的能量子思想使物理学发生了划时代的变化。

# ▲ 普朗克的能量量子假设

1900年12月24日，普朗克在《关于正常光谱的能量分布定律的理论》一文中提出能量量子化假设，量子论诞生。



- 组成黑体腔壁的分子或原子可视为带电的线性谐振子；
- 这些谐振子和空腔中的辐射场相互作用过程中吸收和发射的能量是量子化的，只能取一些分立值： $\varepsilon$ ， $2\varepsilon$ ， $\cdots$ ， $n\varepsilon$ ；
- 频率为 $\nu$ 的谐振子，吸收和发射能量的最小值  $\varepsilon = h\nu$  称为能量量子（或量子）

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

称为普朗克常量

意义:

- (1) 导出与实验曲线相吻合的经验公式，解决了黑体辐射的困难。
- (2) 引入能量量子化的概念，是量子物理开端，为爱因斯坦光子论和玻尔氢原子理论奠定基础。

“敲响近代物理晨钟”

1900年12月14日      《正常光谱中能量分布律的理论》

量子物理誕生日      普朗克获1918年诺贝尔物理奖

- (3) 普朗克恒量  $h$  已经成为物理学中最基本、最重要的常数之一。

## 1、近代物理学的两大理论支柱是？

- (A) 超导理论与相对论 (B) 相对论与量子力学  
(C) 光电效应与相对论 (D) 量子力学与牛顿力学

## 2、下列各物体,哪个是绝对黑体？

- A: 不辐射可见光的物体    B: 不辐射任何光线的物体  
C: 不能反射可见光的物体    D: 不能反射任何光线的物体

## 3、随着绝对温度的升高,黑体的最大辐射能量将？

- A. 取决于周围的环境    B. 不受影响  
C. 向长波方面移动    D. 向短波方面移动

## 4、当绝对黑体的温度从 $27^{\circ}\text{C}$ 升高到 $327^{\circ}\text{C}$ 时，其辐射出射度增加为原来的多少倍？（ ）。

- A. 16;    B. 8;    C. 4;    D. 2。

**例**

假定恒星表面的行为和黑体表面一样，如果测得太阳和北极星辐射波谱的分别为 $5100 \text{ \AA}$ 和 $3500\text{\AA}$ ，试估计这些恒星的表面温度以及单位面积上所发射出的功率。

$$b = 2.8978 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{k} \quad \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ w m}^{-2} \text{ k}^{-4}$$

由维恩位移定律  $\lambda_m T = b$

$$T_1 = \frac{b}{\lambda_{m1}} = 5682 \text{ k} \quad T_2 = \frac{b}{\lambda_{m2}} = 8279 \text{ k}$$

由斯特藩波尔兹曼定律  $M = \sigma T^4$

$$M_1 = 5.91 \times 10^7 (\text{w} / \text{m}^2) \quad M_2 = 2.66 \times 10^8 (\text{w} / \text{m}^2)$$

# 作业：

- 15-1