8. 热辐射基本定律及物体的辐射特性

8.1 热辐射的基本概念

def.
- 热辐射：
- 辐射传热：

特点：①任何物体，只要温度高于0K，就会不停向周围空间发出热辐射

②可以在真空传播，可以穿过真空或低温区

③伴随能量形式转变

④具有强烈的方向性

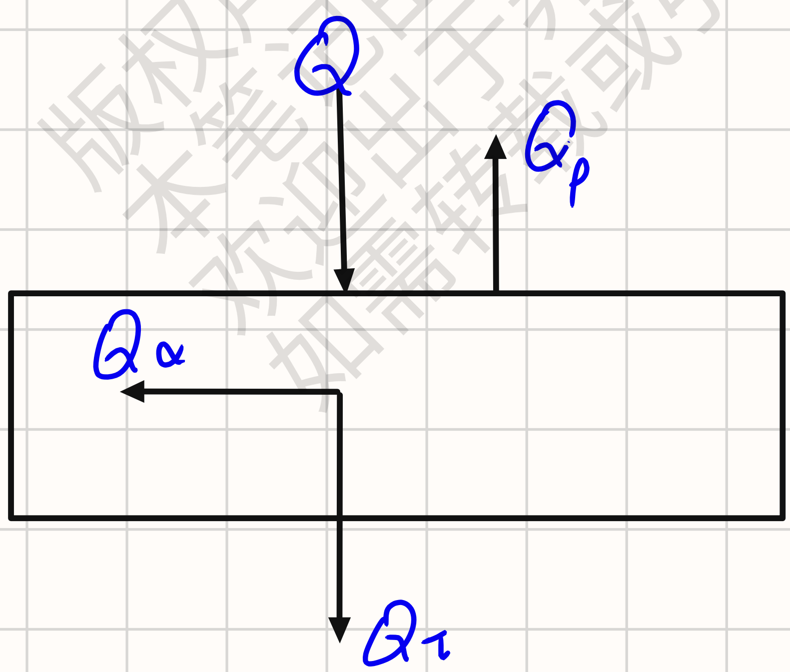
⑤辐射能与温度和波长均有关

⑥近程及远程效应

⑦换热不再与 $T_\infty - T_w$ 成正比，而是与 $T_1^4 - T_2^4$ 成正比

热辐射具有电磁波的共性：$\lambda f = C$，$\lambda \sim 10^{-1} - 10^{2}\ \mu m$

热辐射理论上覆盖整个电磁波谱
- 太阳（5800K）：$0.2 \sim 2\ \mu m$
- 可见光：$0.38 \sim 0.76\ \mu m$
- 红外线：$0.76 \sim 25 \sim 1000\ \mu m$



物体对热辐射的吸收、反射、穿透

$$Q = Q_\alpha + Q_\rho + Q_\tau \qquad \frac{Q_\alpha}{Q} + \frac{Q_\rho}{Q} + \frac{Q_\tau}{Q} = 1$$

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

大多数固体和液体，只涉及表面

$\tau = 0,\ \rho + \alpha = 1$

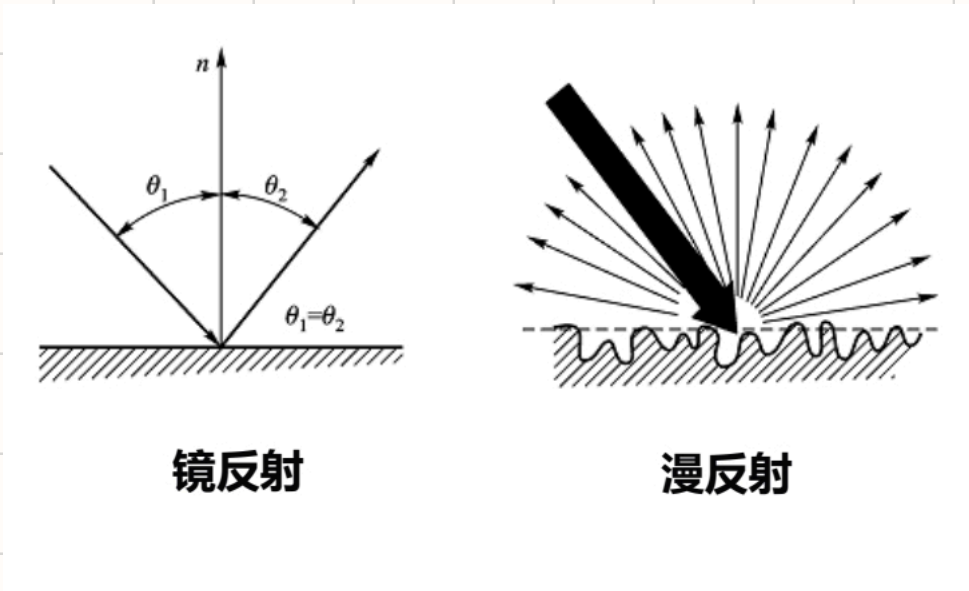
不含颗粒的气体，整个气体容积

$\rho = 0,\ \alpha + \tau = 1$

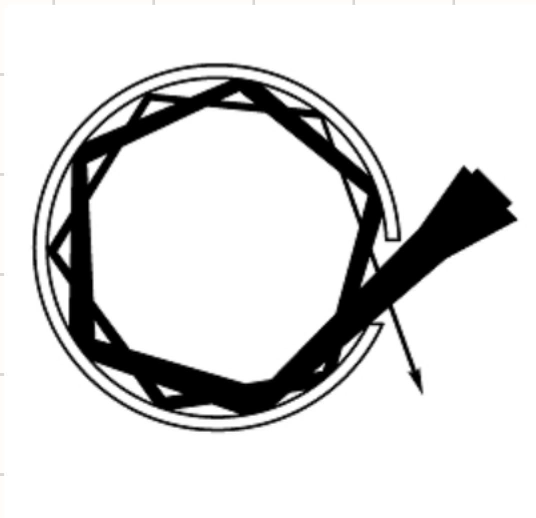
黑体 $\alpha = 1$　镜体/白体 $\rho = 1$

透明体 $\tau = 1$ ← 假想

镜反射与漫反射



黑体模型



带有小孔的温度均匀空腔

小孔孔径越小α越大

温度均匀是为了保证辐射均匀且各向同性

8.2 黑体辐射的基本定律

Stefan-Boltzmann's Law 辐射力 E W/m^2

$E_b = \sigma T^4$, $E_b = C_0\left(\frac{T}{100}\right)^4$

$\sigma = 5.67\times10^{-8}\ W/(m^2\cdot K^4)$

Planck's Law 光谱辐射力 E_λ $W/m^3 = W/m^2\cdot m$

单位波长

“内热源” 立

单位面积

$E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda = \sigma T^4$

$E_{b\lambda} = \dfrac{C_1\lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1}$ $\begin{cases} C_1 = 3.742\times10^{-16}\ W\cdot m^2 \\ C_2 = 1.4388\times10^{-2}\ W\cdot K \end{cases}$ $\lambda: m$ $T: K$

Wien位移定理

$\lambda_{max}T = 2.9\times10^{-3}\ m\cdot K$

黑体辐射函数

$$\Delta E_b = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{b\lambda}\, d\lambda = f(\lambda T)$$

$$F_{b(\lambda_1 \sim \lambda_2)} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{b\lambda}\, d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{b\lambda}\, d\lambda} = \frac{1}{\sigma T^4} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{b\lambda}\, d\lambda$$

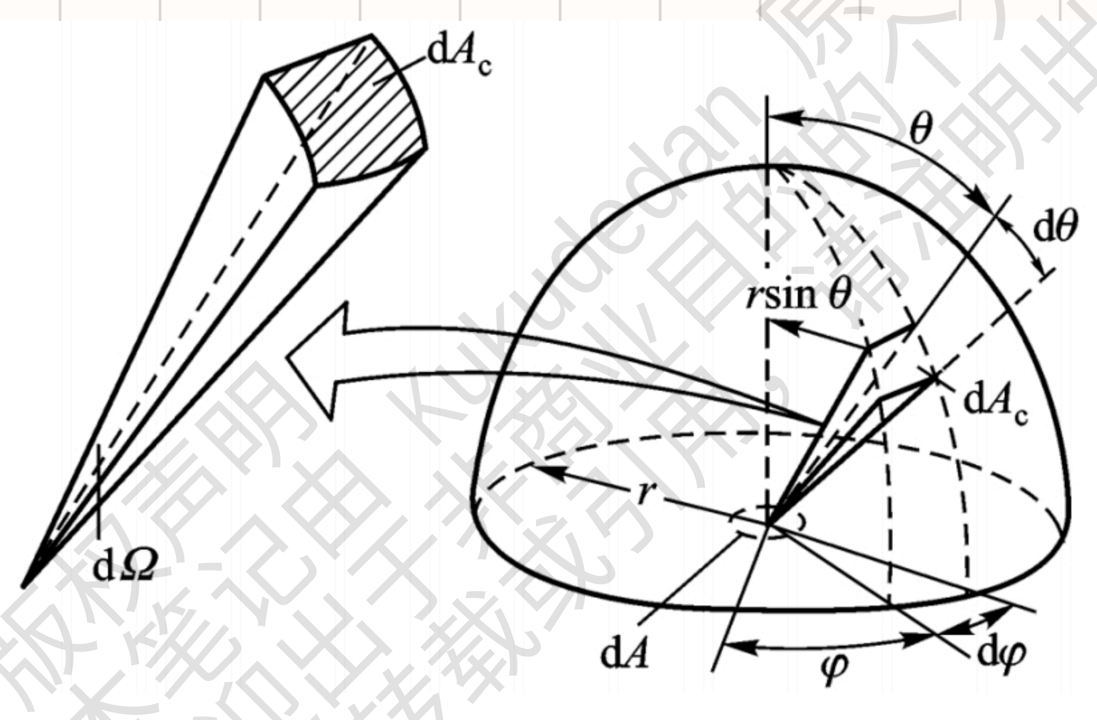
$$= \frac{1}{\sigma T^4} \left(\int_0^{\lambda_2} E_{b\lambda}\, d\lambda - \int_0^{\lambda_1} E_{b\lambda}\, d\lambda \right)$$

$$F_{b(0 \sim \lambda)} = \frac{\int_0^{\lambda} E_{b\lambda}\, d\lambda}{\sigma T^4} = f(\lambda T)$$

$$E_b(\lambda_1 \sim \lambda_2) = F_b(\lambda_1 \sim \lambda_2) \cdot E_b$$

$$F_b(\lambda_1 \sim \lambda_2) = F_b(0 \sim \lambda_2) - F_b(0 \sim \lambda_1)$$

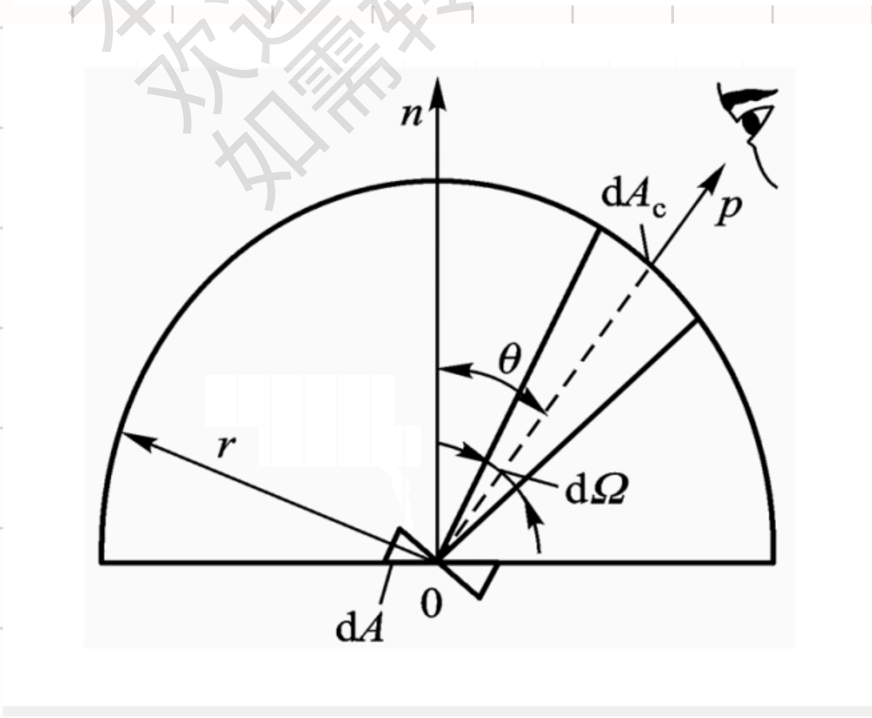
Lambert's Law



$$d\Omega = \frac{dA_c}{r^2}$$

$$dA_c = r\, d\theta \cdot r \sin\theta \cdot d\varphi$$

$$d\Omega = \sin\theta\, d\theta\, d\varphi$$



可见辐射面积：$dA\cos\theta$

定向辐射强度 $I(\theta,\varphi)$

def. 在单位时间内，可位可见辐射面积上，单位立体角内发射的一切波长的能量

$I(\theta)=\dfrac{d\Phi(\theta)}{dA\cos\theta d\Omega}$，单位：$W/m^2\ sr$

黑体的定向辐射强度：$I_b(\theta)=I=C$（与方向无关）

Lambert 定律：① 定向辐射强度与方向无关

② 对于服从 Lambert 定律的辐射

$\dfrac{d\Phi(\theta)}{dAd\Omega}=I\cos\theta$，漫射表面（余弦定律）

③ 黑体辐射法向方向最大，切线方向为 0

黑体定向辐射强度与辐射力之间的关系：

$\dfrac{d\Phi(\theta)}{dAd\Omega}=I\cos\theta$

$E_b=\int\dfrac{d\Phi(\theta)}{dA}=\int I_b\cos\theta d\Omega=\pi I_b$

8.3 实际固体和液体的辐射特性

发射率：$\varepsilon=\dfrac{E}{E_b}=\dfrac{E}{\sigma T^4}$ { 一般通过实验测定；只取决于物体本身，与外界无关

计算式：$E=\varepsilon E_b=\varepsilon\sigma T^4$

光谱发射率：$\varepsilon_\lambda=\dfrac{E_\lambda}{E_{b\lambda}}$，$\varepsilon_\lambda$：0~1，一般与波长有关

光谱辐射能力：$E_\lambda=\varepsilon_\lambda E_{b\lambda}$ $E_\lambda(T)<E_{b\lambda}(T)$

定向辐射强度 $I(\theta)<I_b(\theta)$

定向发射率：$\varepsilon(\theta)=\dfrac{I(\theta)}{I_b(\theta)}$，$\varepsilon(\theta)$：0~1，一般与 θ 有关，漫射表面

金属导体 { $0\sim30°$，$\varepsilon(\theta)\approx$ 常数；$\varepsilon(\theta)$ 随 θ 增大而增大，接近 $90°$ 时急剧减小

非金属 { $0\sim60^\circ$, $\varepsilon(\theta)$ ≈ 常数
然后随θ增大而急剧减小

金属发射率一般小于非金属

法向黑度 ε_n：实际物体 $\varepsilon(\theta)$ 随θ变化很大

半球平均发射率 { 高度磨光表面：$\varepsilon_n/\varepsilon=1.2$
粗糙表面：$\varepsilon_n/\varepsilon=0.98$
一般光滑表面：$\varepsilon_n/\varepsilon=0.95$

大多数工程材料 $\varepsilon \approx \varepsilon_n$

影响 ε，ε_λ，ε_θ 的因素（仅取决于物体自身） { 物体种类
物体表面温度
物体表面状况：氧化？光滑？

$\varepsilon_{粗糙面} > \varepsilon_{光滑面}$　　$\varepsilon_{氧化面} > \varepsilon_{非氧化面}$

工程上一般假设 $\varepsilon=\varepsilon(\theta)=\varepsilon_n$，即满足 Lambert 定律.

8.4 实际物体的吸收比和基尔霍夫定律

实际物体的吸收特性 { 投入辐射 G：
吸收比 α：

$$\alpha=\frac{吸收的能量}{投入的能量（投入辐射）}$$

{ 不仅取决于物体本身
还取决于投入辐射特性.

光谱吸收比 α_λ { 物体对某一特定波长的辐射所吸收的百分比
单色吸收比
实际物体的选择吸收的特性

两种处理方法 { 灰体法
谱带模型法

灰体 { def：物体的光谱吸收与波长无关
优点：对外界一视同仁
ideal：在一般工业温度水平，大多数工程材料均可视为灰体.

基尔霍夫定律（Kirchhoff）定律

黑体：$\alpha=1$，$\varepsilon=1$ $\Rightarrow$ $\alpha\equiv\varepsilon$

漫射灰体的吸收与发射率间的关系：

发射率：物性参数，与外界无关

吸收比：与波长无关/与外界无关.

$\alpha\equiv\varepsilon$ 漫射灰体表面.