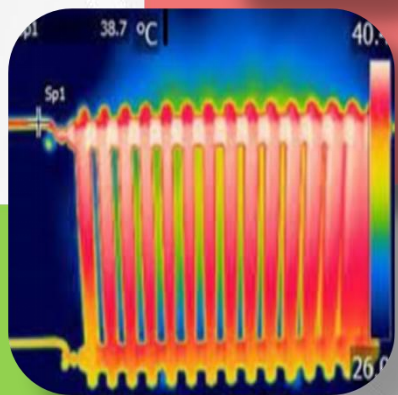




传热学

辐射传热II

授课老师：苗雨



目录

CONTENTS



華東理工大學

01

课前回顾及
导引

02

固体和液
体的辐射
特性

03

气体的辐射
特性与计算

04

吸收与辐射
的关系

05

太阳与环境
辐射

01

课前回顾及导引

课前回顾及导引

1 其中由于热的原因而产生的电磁波辐射称为热辐射

2 物体表面对热辐射的吸收比、反射比和穿透比的关系? $\alpha + \rho + \tau = 1$

3 黑体与灰体的吸收比? 黑体 $\alpha=1$; 灰体 $\alpha=\text{常数}$

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

4 斯忒藩—玻尔兹曼定律研究的是黑体在半球内辐射力与温度的关系, 表达式?

5 普朗克定律研究的是黑体辐射能按波长分布的规律, 表达式?

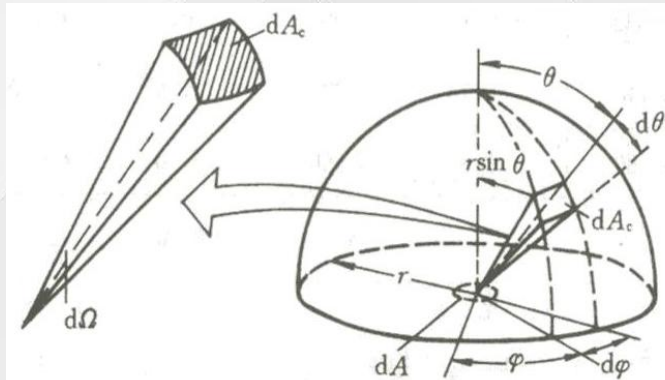
$$E_{b\lambda} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}$$

6 维恩位移定律的表达式? $\lambda_m T = 2.9 \times 10^{-3} m \cdot K$

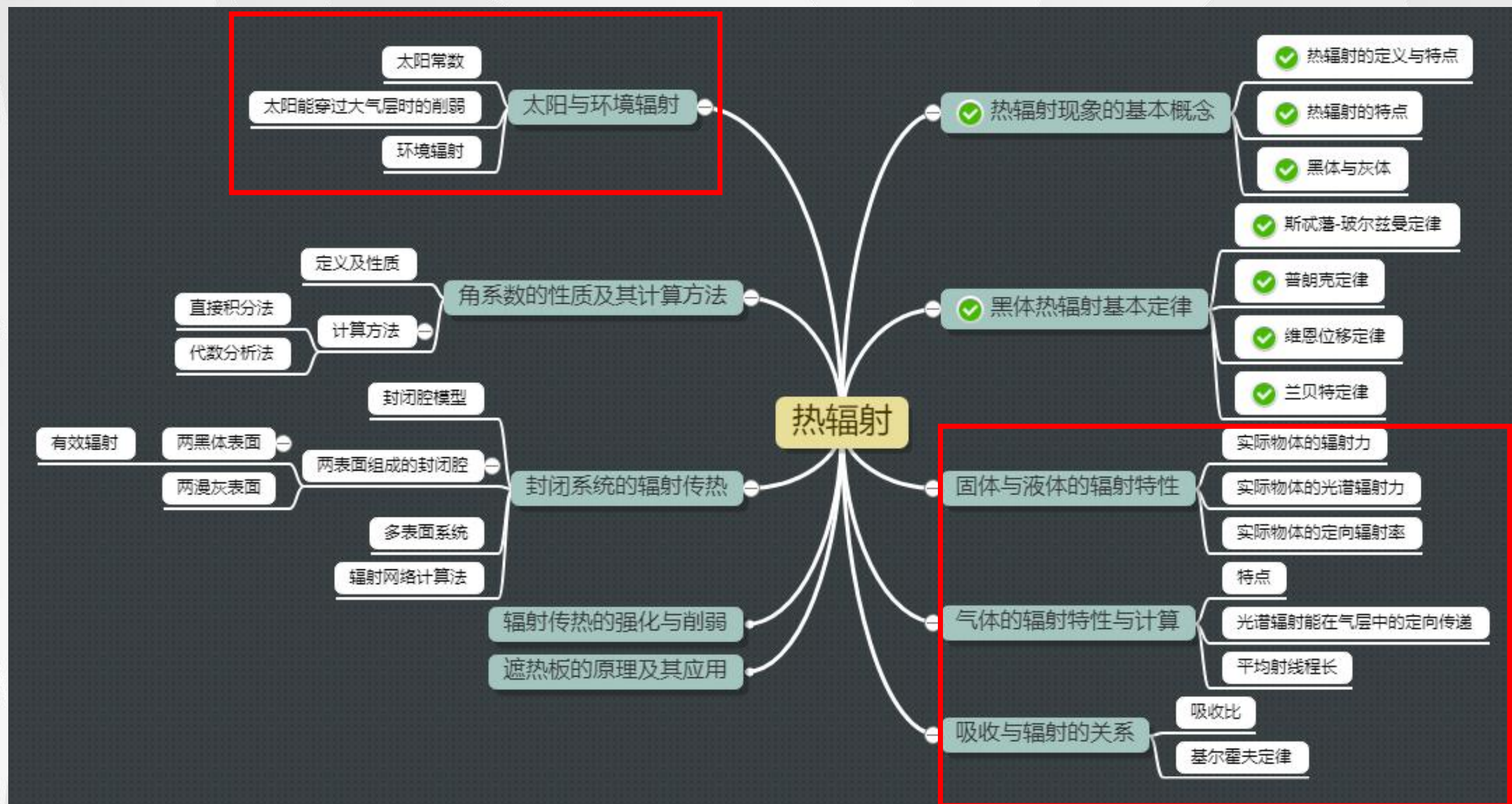
7 兰贝特定律研究的是黑体辐射能按空间方向的分布规律, 表达式

$$I = \frac{d\Phi(\theta)}{d\Omega dA \cos \theta}$$

8 右上角图片中的 $d\Omega$ 、 θ 、 φ 表示什么? 立体角、纬度角、经度角



课前回顾及导引



02

固体和液体的辐射特性

- 实际物体的辐射力 E
- 实际物体的光谱辐射力 E_λ
- 实际物体的定向辐射强度 $I(\theta)$



实际物体的辐射力E

$$\frac{E}{E_b} = \varepsilon \quad \text{发射率 (也称黑度)}$$

- 发射率 ε 一般是通过实验测定的
- 仅取决于物体自身 (性质、物体的温度、表面状态、射线波长和方向)
- 与周围环境条件无关
- ε 在0~1之间, 黑体的发射率 $\varepsilon=1$

实际物体的辐射力 E 总是**小于**同温度下黑体的辐射力 E_b

实际物体的斯忒藩-玻尔兹曼定律

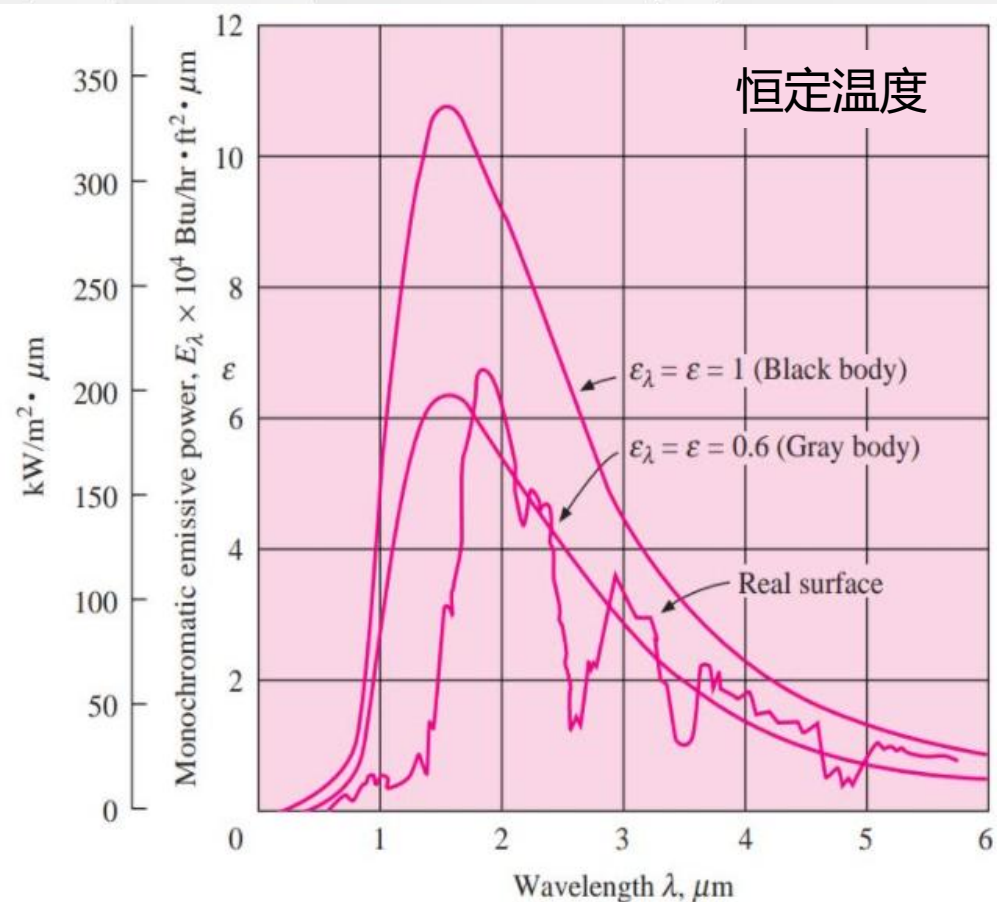
$$E = \varepsilon E_b = \varepsilon \sigma T^4 = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4$$



实际物体的光谱辐射力 E_λ

实际物体的光谱辐射力 E_λ 往往随着波长作不规则变化

按波长分布的规律与**普朗克定律**不同，但定性上是一致的



实际物体的光谱辐射力 E_λ 总是**小于**同温度下黑体的光谱辐射力 $E_{b\lambda}$

$$\frac{E_\lambda}{E_{b\lambda}} = \epsilon(\lambda) \quad \text{光谱发射率}$$

$\epsilon(\lambda)$ 在0~1之间

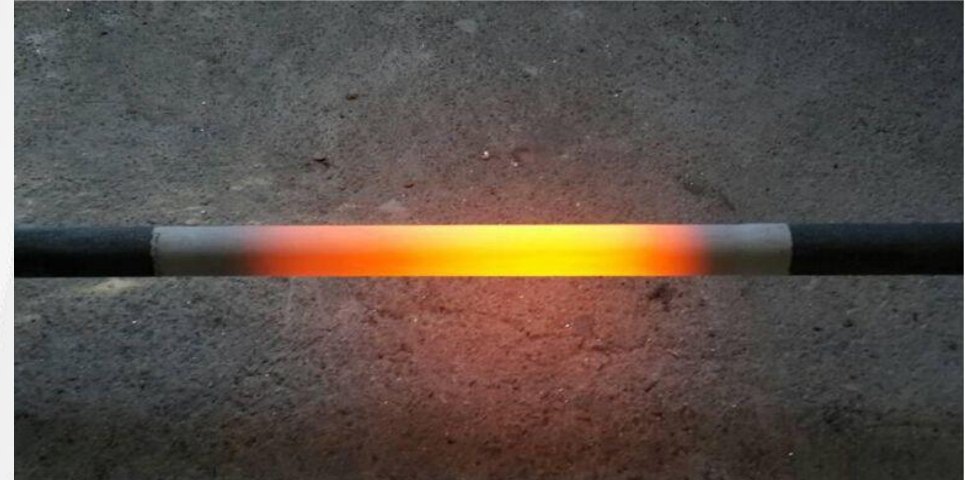
黑体 $\epsilon(\lambda)=1$

灰体：实际物体的理想化，
假设光谱发射率 $\epsilon(\lambda)$ 与波长无关
实际物体在红外波长范围可近似看作灰体

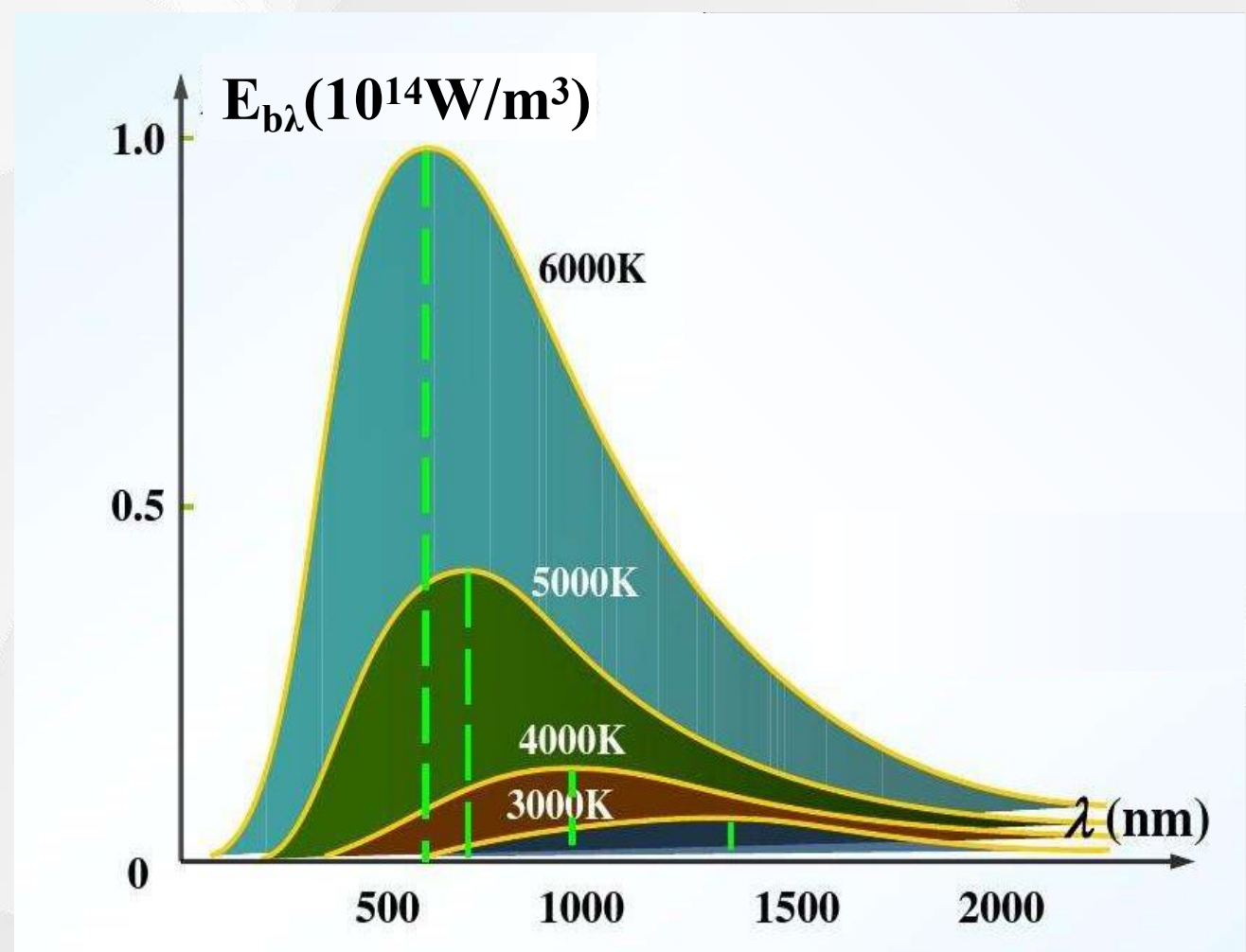
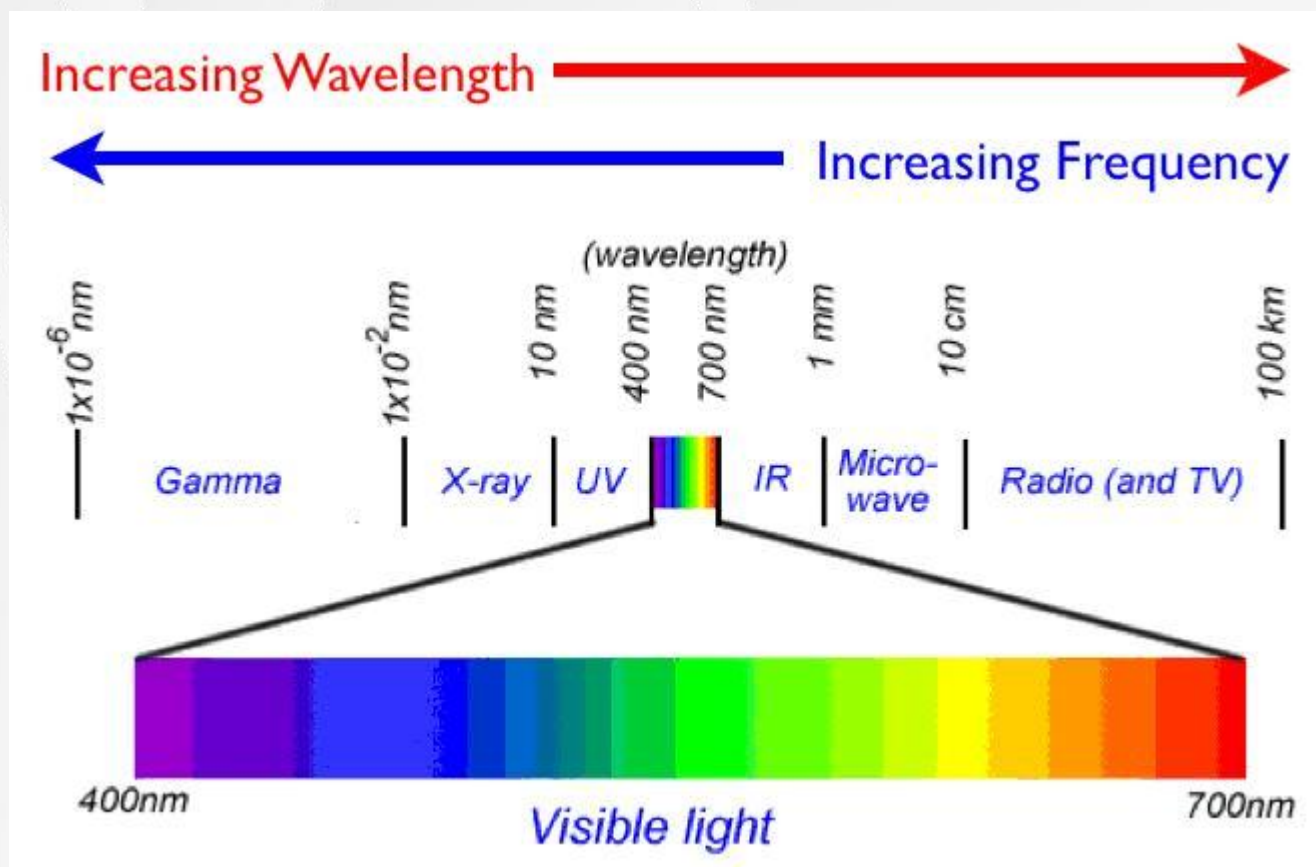


实际物体的光谱辐射力 E_λ

加热金属，颜色：无可见光→暗红、鲜红、橘黄→白炽
随着温度升高，热辐射中可见光中短波的比例不断增加



温度升高， λ 减小，符合**维恩位移定律**





实际物体的光谱辐射力 E_λ

实际物体的**光谱发射率** $\varepsilon(\lambda)$ 与**发射率** ε 之间的关系:

实际物体光谱辐射力和辐射力的关系: $E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda$

黑体光谱辐射力和辐射力的关系: $E_b = \int_0^\infty E_{b\lambda} d\lambda$

发射率 (黑度) : $\frac{E}{E_b} = \varepsilon$

光谱发射率: $\frac{E_\lambda}{E_{b\lambda}} = \varepsilon(\lambda)$

$$\varepsilon = \frac{\int_0^\infty E_{b\lambda} \varepsilon(\lambda) d\lambda}{\sigma T^4}$$

实际物体的定向辐射强度 $I(\theta)$

实际物体辐射按空间方向的分布，与兰贝特定律也不完全一样

黑体的定向辐射强度 I_b 与空间方向无关，
但实际物体的定向辐射强度 I 在不同方向上有所变化

$$\frac{I(\theta)}{I_b} = \varepsilon(\theta)$$

定向发射率（定向黑度）

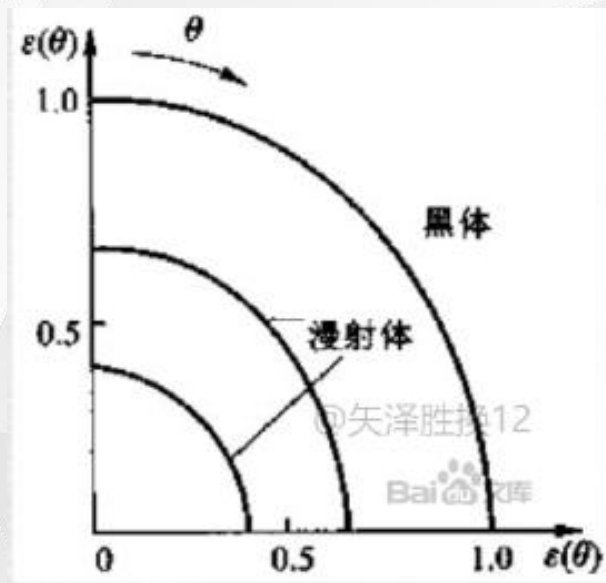
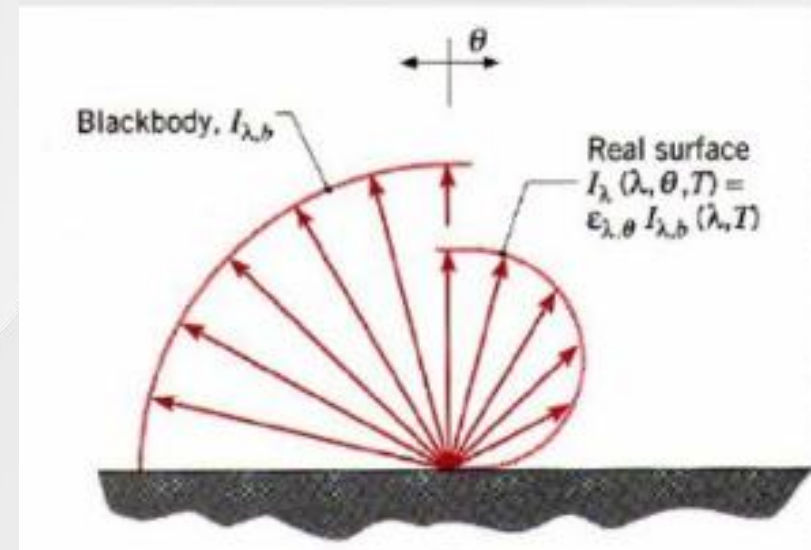
$I(\theta)$: 与辐射法向成 θ 角的方向上的定向辐射强度

定向发射率随 θ 角的变化规律

黑体：极坐标下使半径为1的半圆

漫射体：极坐标下半径小于1的半圆

漫射体：满足兰贝特定律，定向辐射强度与方向无关





实际物体的定向辐射强度 $I(\theta)$

金属材料:

- $\theta = 0 \sim$ 一定角度, $\varepsilon(\theta)$ 不变;
- 之后, θ 增加, $\varepsilon(\theta)$ 增大;
- θ 接近 90° , $\varepsilon(\theta)$ 减小到 0

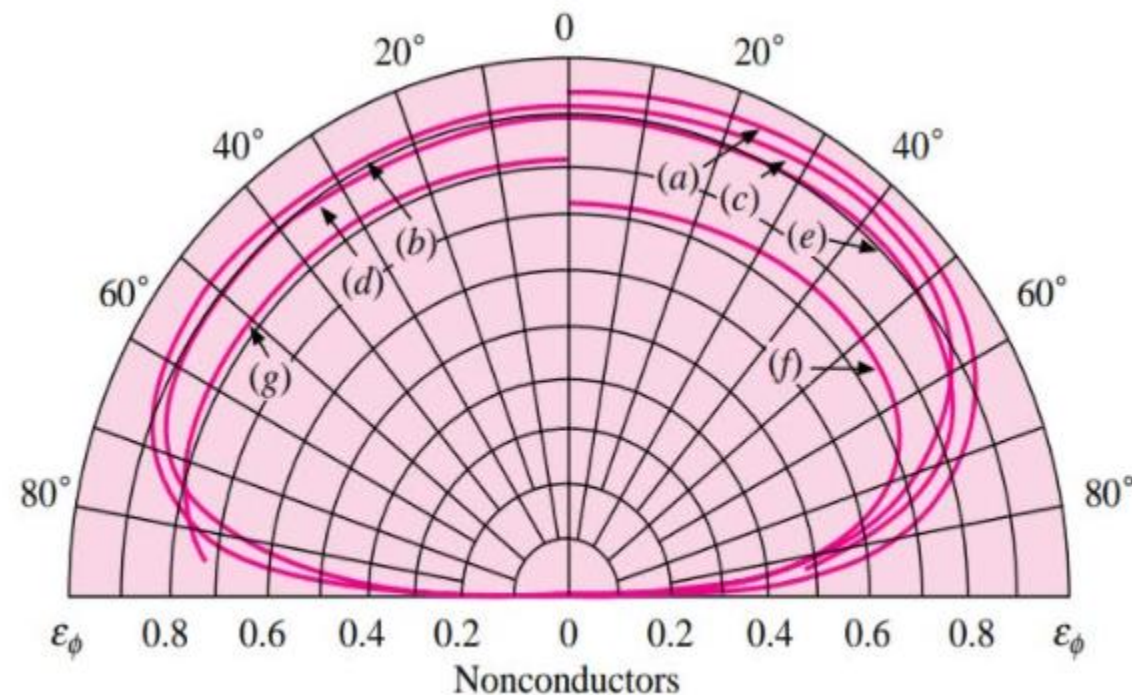
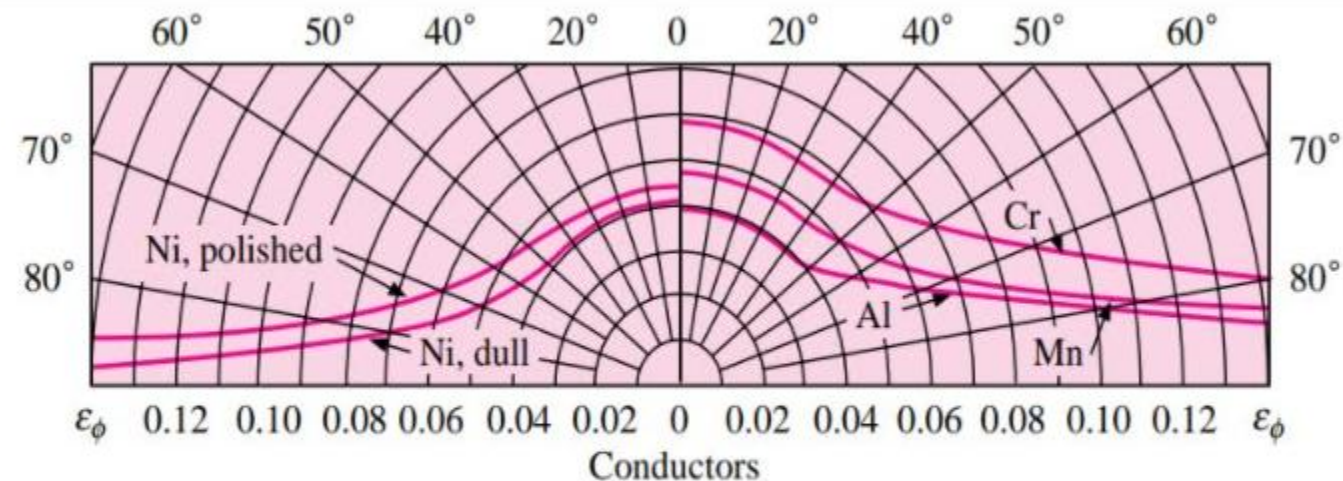
非导体:

- $\theta = 0 \sim 60^\circ$, $\varepsilon(\theta)$ 不变;
- $\theta > 60^\circ$, $\varepsilon(\theta)$ 减小;
- θ 接近 90° , $\varepsilon(\theta)$ 减小到 0

工程上, 定向发射率可用法向发射率近似代替

$$\varepsilon = M \varepsilon_n$$

除了高度磨光表面,
工程计算 $M=1$



物体表面发射率取决于物质种类、表面温度和表面状况, 不涉及外界条件



实际物体的定向辐射强度 $I(\theta)$

实际物体的定向发射率 $\varepsilon(\theta)$ 与发射率 ε 之间的关系

实际物体辐射力和定向辐射强度的关系: $E = \int_{\Omega=2\pi} I(\theta) \cos \theta d\Omega$

黑体辐射力和定向辐射强度的关系: $E_b = \pi I_b$

发射率 (黑度): $\frac{E}{E_b} = \varepsilon$

定向发射率: $\frac{I(\theta)}{I_b} = \varepsilon(\theta)$

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{E}{E_b} = \frac{\int_{\Omega=2\pi} I(\theta) \cos \theta d\Omega}{\pi I_b} \\ &= \frac{I_b \int_{\Omega=2\pi} \varepsilon(\theta) \cos \theta d\Omega}{\pi I_b} \\ &= \frac{\int_{\Omega=2\pi} \varepsilon(\theta) \cos \theta d\Omega}{\pi}\end{aligned}$$

03

气体的辐射特性与计算

- 气体辐射的特点
- 光谱辐射能在气层中的定向传递（贝尔定律）
- 平均射线程长的计算



气体辐射的特点

单原子或分子结构对称 的双原子气体

- 没有发射和吸收辐射能的能力
- 可认为是透明体
- 比如氦气 (He)、
氩气 (Ar)、
氢气 (H_2)、
氧气 (O_2)、
氮气 (N_2)、
空气 (氧气和氮气的混合物)

多原子或结构不对称 的双原子气体

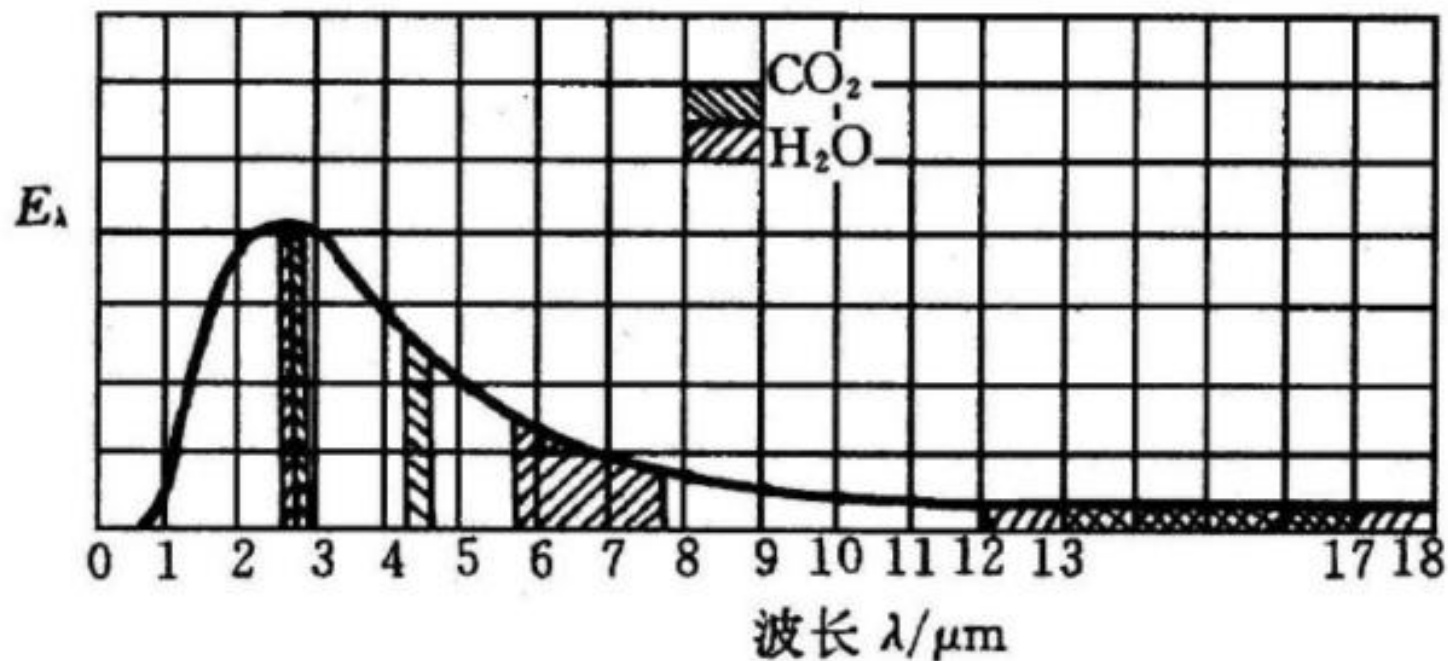
- 有相当大的辐射本领
- 比如臭氧 (O_3)、
二氧化碳 (CO_2)、
水蒸气 (H_2O)、
二氧化硫 (SO_2)、
甲烷 (CH_4)、
一氧化碳 (CO)





气体辐射的特点

1. 气体辐射对波长有选择性



- 气体只在某些波长区段有辐射和吸收能力
- 有辐射能力的波长区段称为**光带**
- 在光带之外，气体既不辐射也不吸收，对热辐射呈现**透明体**的性质



气体辐射的特点

2. 气体的辐射和吸收是在整个容积中进行的

固体和液体的辐射与吸收都是在表面上进行的，气体则不同

- **吸收：**投射到气体层界面的辐射能要在行程中被吸收减弱
- **辐射：**气体层界面上所感受到的辐射为到达界面的整个容积气体的辐射

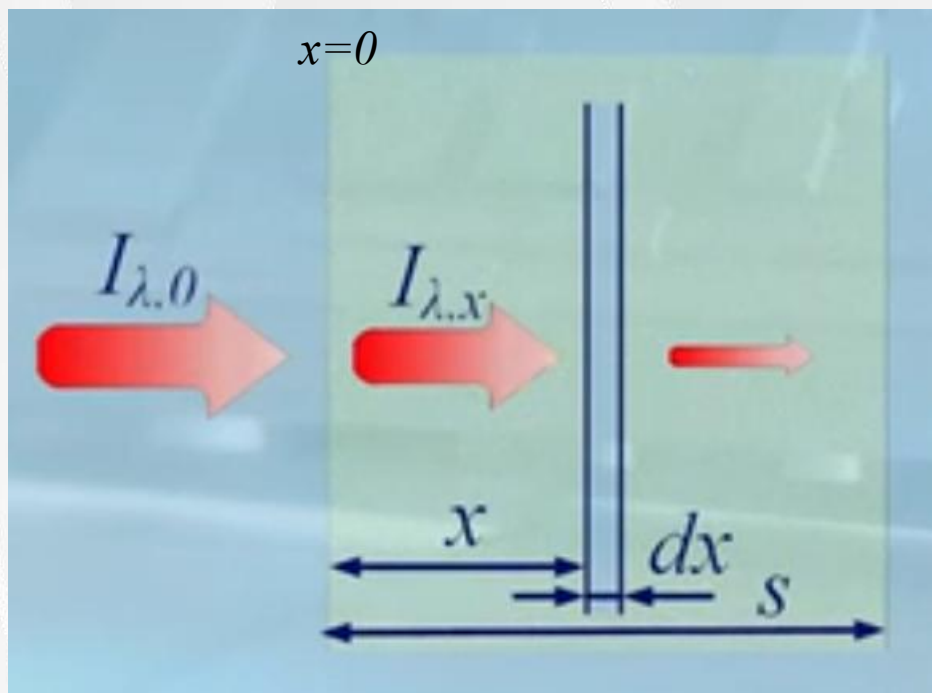
在计算气体的发射率 ε 和吸收比 α 时，必须说明气体所处的容器的形状和容积大小

光谱辐射能在气层中的定向传递 (贝尔定律)

当辐射能通过吸收性气体层时，沿途被气体吸收而削弱。

削弱程度取决于**光谱辐射强度** I_λ 及途中所碰到的**气体分子数目**。

气体分子数目与**射线行程长度** s 及**气体密度** ρ 有关。



辐射强度的相对减少量 dI/I 正比于气体层厚度 dx

$$\frac{dI_{\lambda,x}}{I_{\lambda,x}} = -k_\lambda dx$$

k_λ : 光谱减弱系数，取决于气体的种类、密度和波长
气体温度和压力为常数时， k_λ 不变

$$\int_{I_{\lambda,0}}^{I_{\lambda,s}} \frac{dI_{\lambda,x}}{I_{\lambda,x}} = -k_\lambda \int_0^s dx \quad \Rightarrow \quad \boxed{I_{\lambda,s} = I_{\lambda,0} e^{-k_\lambda s}}$$

贝尔定律：表明光谱辐射强度在吸收性气体中传播按指数规律衰减

射线行程长度 s ：取决于气体容积的形状和尺寸



光谱辐射能在气层中的定向传递（贝尔定律）

贝尔定律

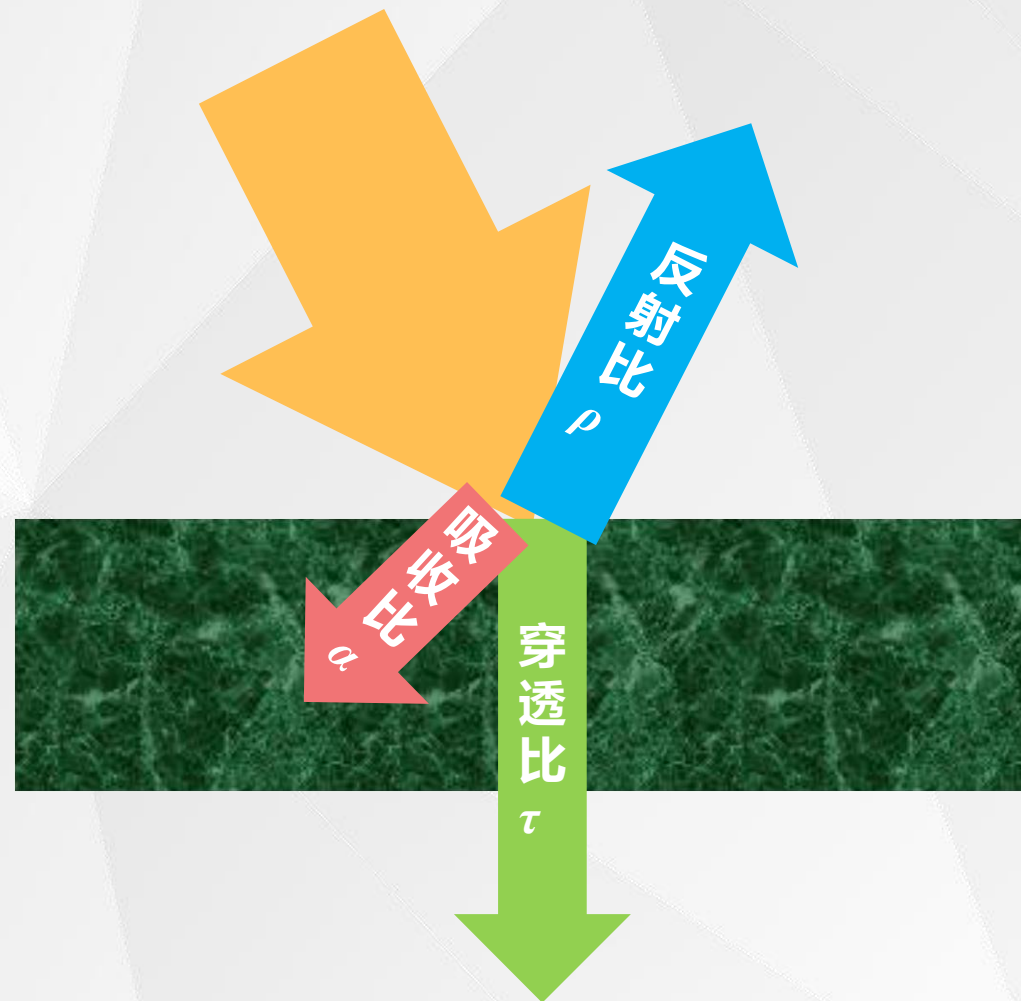
$$I_{\lambda,s} = I_{\lambda,0} e^{-k_{\lambda}s}$$

$$\frac{I_{\lambda,s}}{I_{\lambda,0}} = e^{-k_{\lambda}s} = \tau(\lambda, s) \quad \text{穿透比}$$

气体的反射比 $\rho = 0$ $\alpha + \rho + \tau = 1$

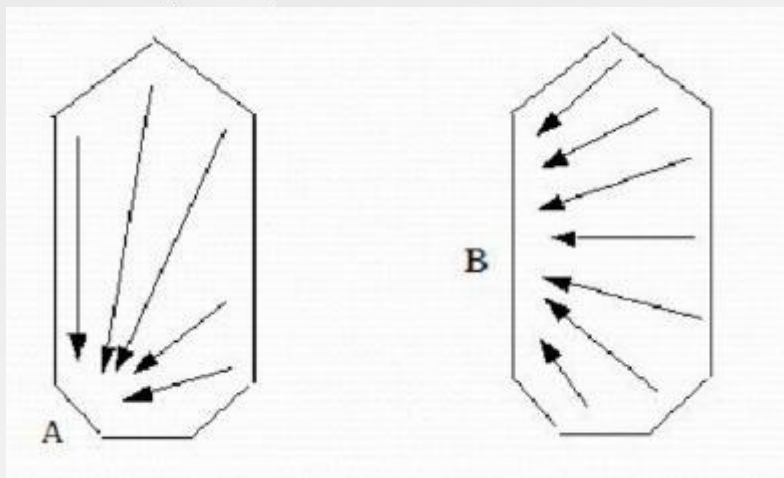
气体层的吸收比 $\alpha(\lambda, s) = 1 - \tau(\lambda, s) = 1 - e^{-k_{\lambda}s}$

当射线行程长度很大时，吸收比 $\alpha(\lambda, s)$ 趋近于1

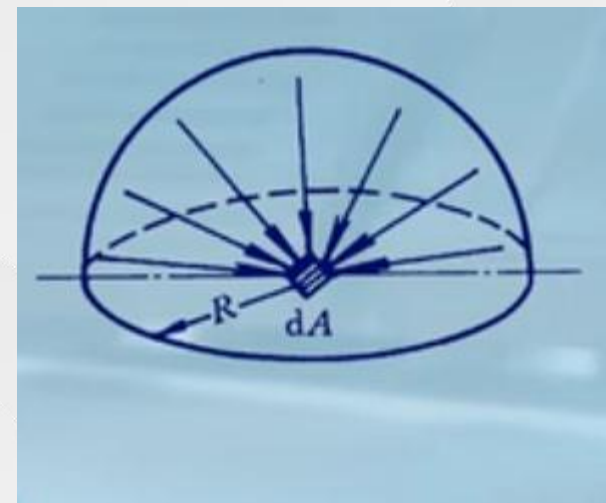


平均射线程长的计算

辐射力 E 与射线行程长度 s 有关，而射线程长取决于气体容积的形状和尺寸



对于半球气体容积，各个方向的射线程长都是一样的，即半径 R
对于其他气体形状，可采用**当量半球**来处理



当量半球：半球内的气体具有与研究的情况相同的温度、压力和成分时，该半球内气体对球心的辐射力等于所研究情况气体对指定地点的辐射力



平均射线程长的计算

| 气体容积形状 | 特征尺度 | 受到气体辐射的位置 | 平均射线程长 |
|-----------------|---------------------------------------|------------------|--|
| 球 | 直径d | 整个包壁或壁上任何地方 | 0.6d |
| 立方体 | 边长b | 整个包壁 | 0.6b |
| 高度等于直径的圆柱 | 直径d | 底面圆心、整个包壁 | 0.77d、0.6d |
| 两无限大平行平板间 | 平板间距H | 平板 | 1.8H |
| 无限长圆柱 | 直径d | 整个包壁 | 0.9d |
| 高度等于底圆直径两倍的圆柱体 | 直径d | 上下底面、侧面、整个包壁 | 0.6d、0.76d、0.73d |
| 相对尺寸为1×1×4的正方柱体 | 短边b | 1×4表面、1×1表面、整个包壁 | 0.82b、0.78b、0.81b |
| 位于叉排或顺排管束间的气体 | 节距s ₁ 、s ₂ 外直径d | 管束表面 | $0.9d\left(\frac{4s_1s_2}{\pi d^2} - 1\right)$ |

任意几何形状气体对整个包壁的平均射线程长

$s = 3.6 \frac{V}{A}$

V: 气体容积, m³

A: 包壁面积, m²

04

实际物体对辐射能的 吸收与辐射的关系

- 实际物体的吸收比
- 基尔霍夫定律

实际物体的吸收比

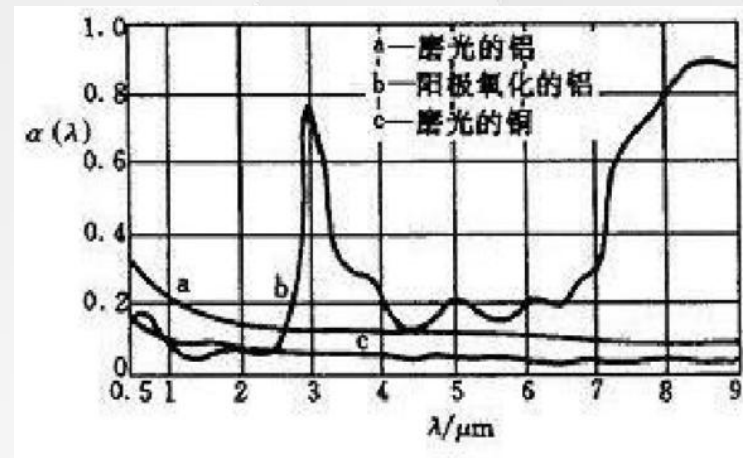
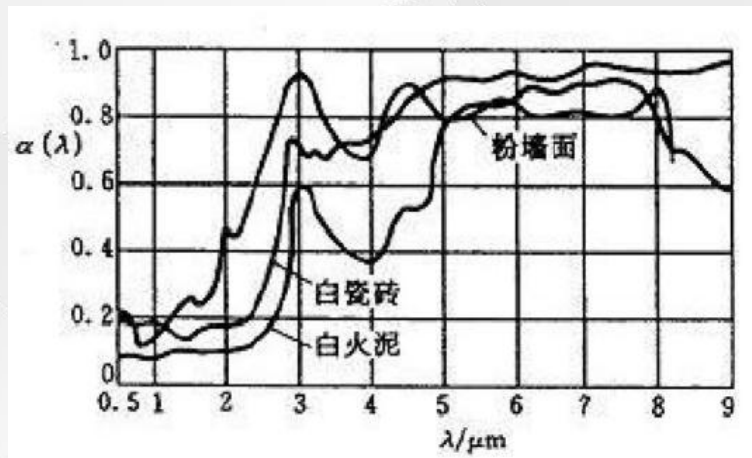
对于黑体, $\alpha=1$, $\varepsilon=1$, $\alpha=\varepsilon$

对于实际物体, $\alpha<1$, $\varepsilon<1$, α 和 ε 是什么关系?

吸收比 α 不仅取决于物体本身的情况 (种类、温度及表面状况), 也与投入辐射 G 的特性有关

吸收比 α 是对投入到物体表面上各种不同波长辐射能的总体吸收比, 是一个平均值

光谱吸收比 $\alpha(\lambda, T)$: 物体吸收**某一特定波长**辐射能的百分数



光谱吸收比随波长的变化



实际物体的吸收比

实际物体的吸收具有选择性



电焊护目镜吸收对人体有害的
紫外线

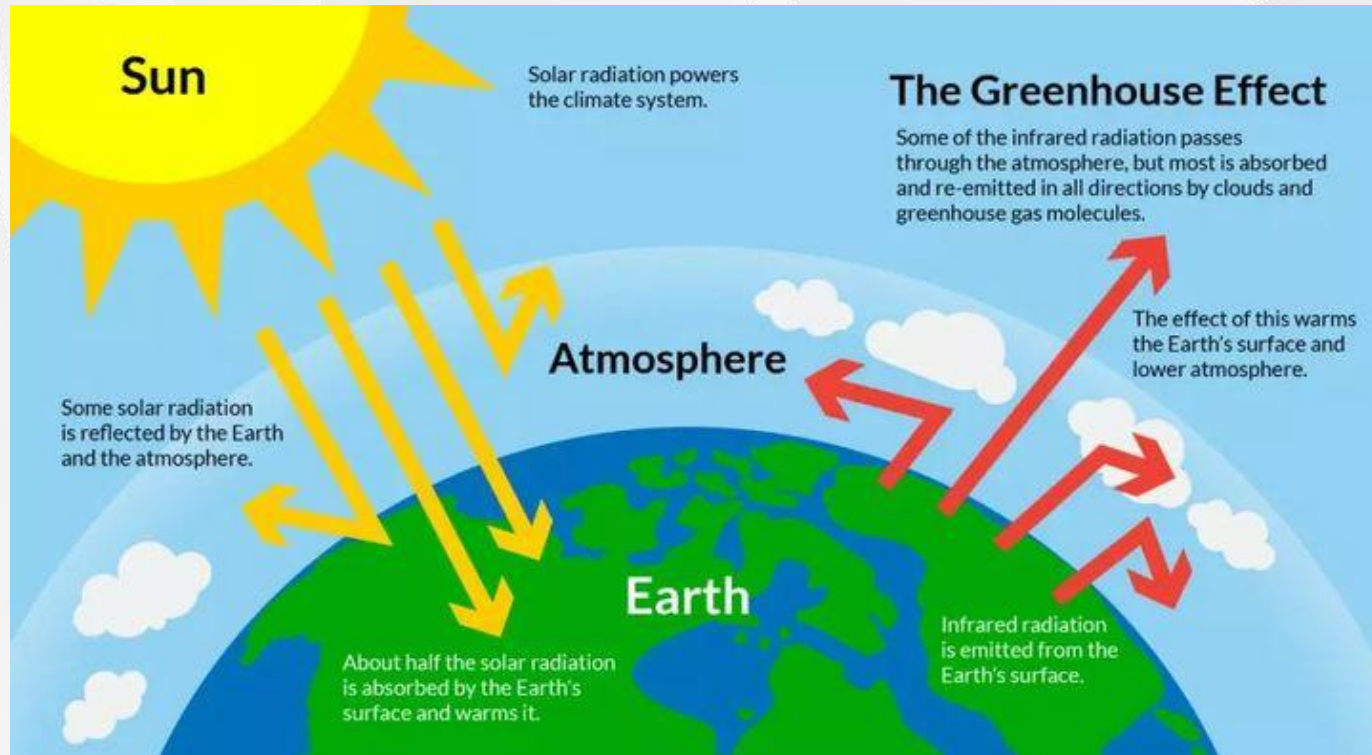


蓝色和紫色波长短，穿透能力强
红色波长较长，易被吸收

实际物体的吸收比



- 玻璃对太阳辐射的选择性吸收
- 太阳波长小于 $3\mu\text{m}$ ，可以透过玻璃
波长大于 $3\mu\text{m}$ ，很难穿透玻璃
室内温度 $40\sim 50^{\circ}\text{C}$ 的最长波长可达 $9\mu\text{m}$

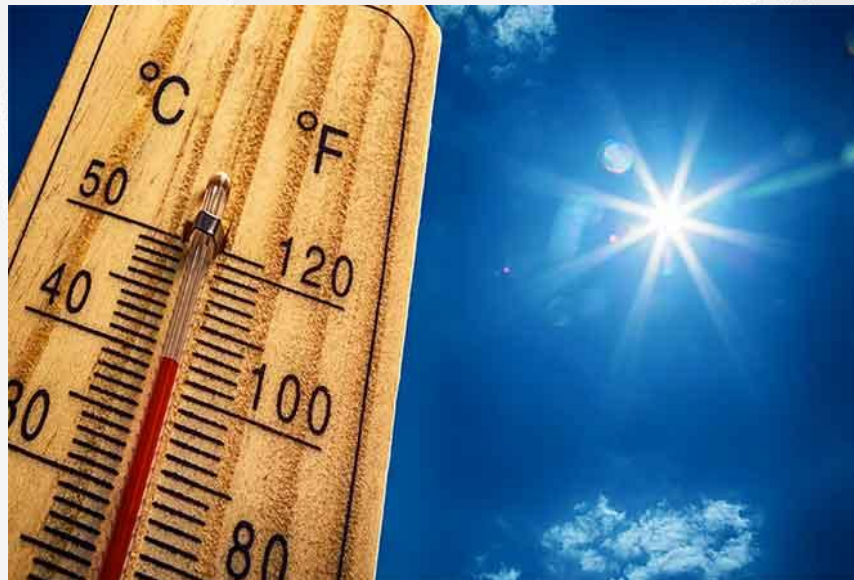


- 太阳短波辐射可以透过大气射入地面
- 地面增暖后的长波辐射却被云层和温室气体吸收或反射
- 如果没有大气，地表平均温度会下降到 -23°C ，而实际地表平均温度为 15°C



实际物体的吸收比

温室效应的危害



难以忽视的真相 An Inconvenient Truth





实际物体的吸收比

实际物体的选择性吸收给辐射传热计算带来了很大的困难

物体的吸收比 α 取决于 {

- 自身表面性质和温度 T_1
- 投入辐射按波长的能量分布
(取决于发出投入辐射物体的性质和温度 T_2)

$$\alpha_1 = \frac{E}{G} = \frac{\int_0^{\infty} \alpha(\lambda, T_1) \varepsilon(\lambda, T_2) E_{b\lambda}(T_2) d\lambda}{\int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda, T_2) E_{b\lambda}(T_2) d\lambda}$$

$= f(T_1, T_2, \text{表面1的性质}, \text{表面2的性质})$

灰体：实际物体的理想化，

假设吸收比 (α) 与波长无关

实际物体在红外波长范围可近似看作灰体

基尔霍夫定律

板1是黑体，辐射力 E_b ，吸收比 $\alpha_b=1$ ，表面温度 T_1

板2是任意物体，辐射力 E ，吸收比 α ，表面温度 T_2

板2的支出与收入的差额 $q = E - \alpha E_b$

当系统处于热平衡($T_1=T_2$)时, $q=0$ $\frac{E}{\alpha} = E_b$

$$\alpha = \frac{E}{E_b} = \varepsilon$$

基尔霍夫定律的两种数学表达式

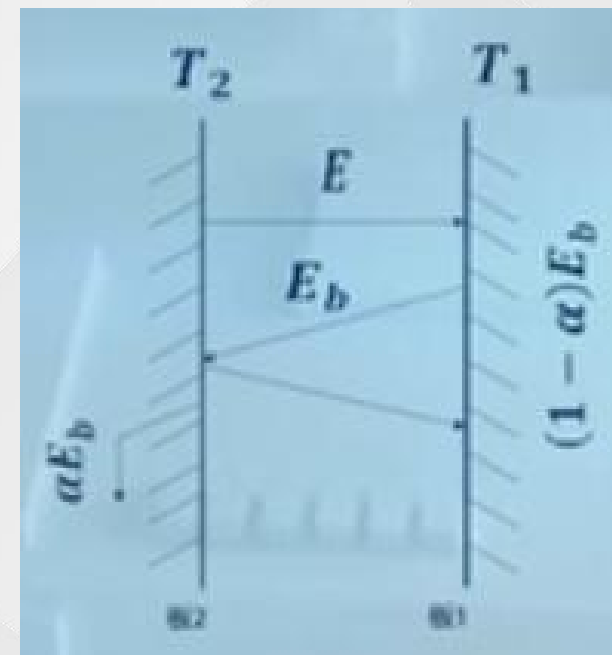
辐射能力越大，吸收能力越大

该定律有三个限制：

(1) 整个系统处于**热平衡状态**

(2) 只有在**同一温度**下，物体的吸收比 α 才等于发射率 ε

(3) 投射辐射源必须是同温度下的**黑体**





基尔霍夫定律

基尔霍夫定律的三个层次的表达式

| 层次 | 数学表达式 | 成立条件 |
|---------|--|------------------------------------|
| 光谱, 定向 | $\varepsilon(\lambda, \varphi, \theta, T) = \alpha(\lambda, \varphi, \theta, T)$ | 无条件, φ 为经度角, θ 为纬度角 |
| 光谱, 半球 | $\varepsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T)$ | 漫射表面 |
| 全波段, 半球 | $\varepsilon(T) = \alpha(T)$ | 与黑体处于热平衡或漫灰表面 |

漫射表面：发射或反射的定向辐射强度与空间方向 (φ, θ) 无关

灰体：光谱吸收比与波长 (λ) 无关

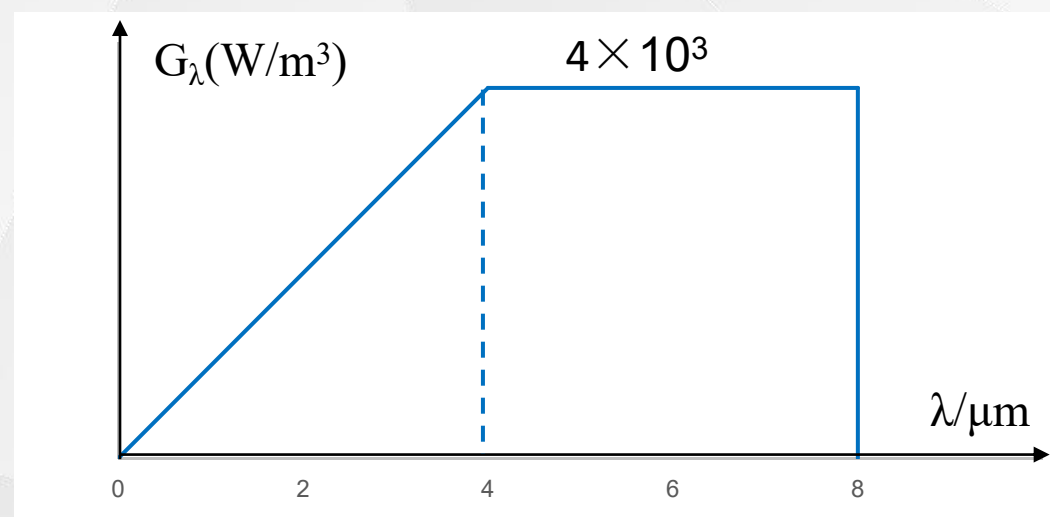
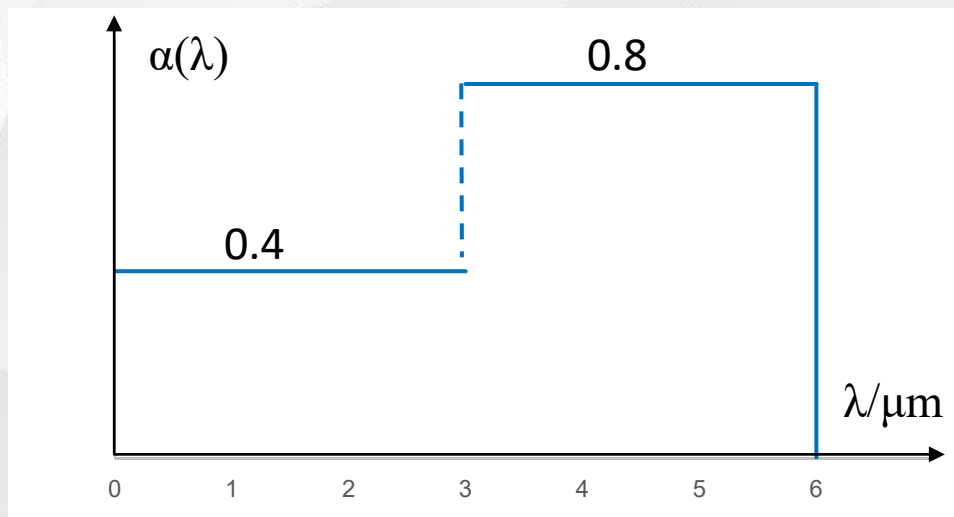
} 漫灰表面, $\alpha = \varepsilon$



实际物体对辐射能的吸收与辐射的关系

例题1：已知一漫灰表面的光谱吸收比与波长的关系以及投入辐射 G_λ 按波长分布的情形如附图所示。在某一瞬间，测得表面表面温度为1100K。

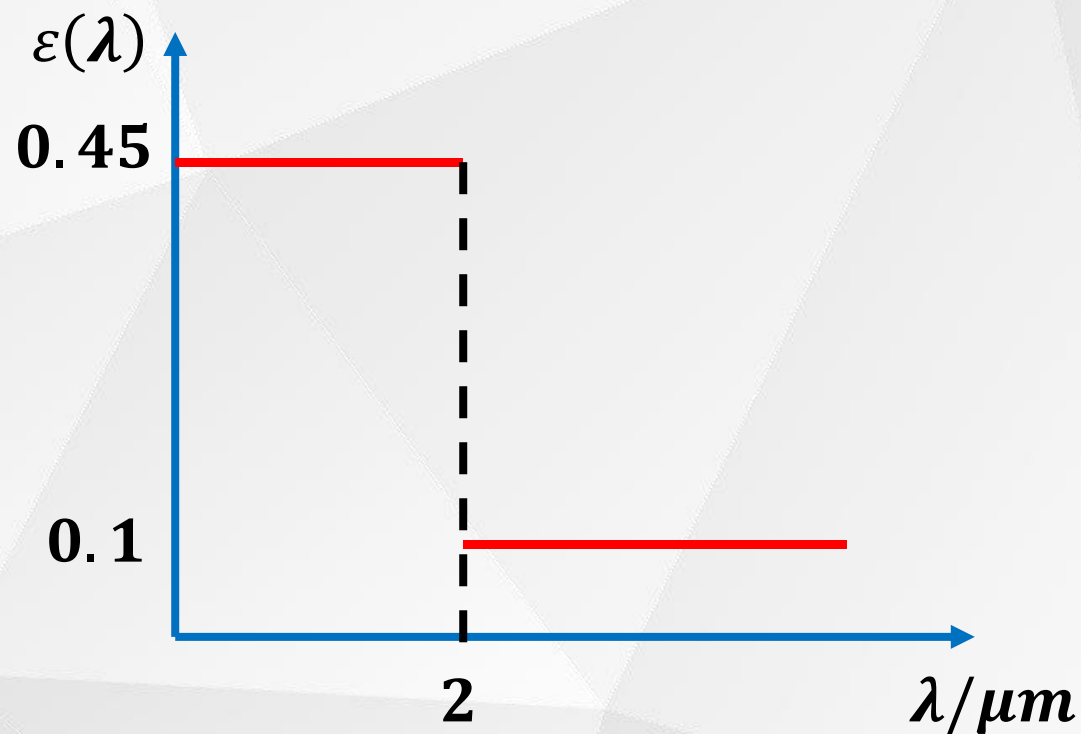
- (1) 计算单位表面积所吸收的辐射能；
- (2) 计算该表面的发射率及辐射力；
- (3) 确定在此条件下物体表面的温度随时间如何变化（增加还是减少），设物体无内热源，没有其他形式的热量传递。





实际物体对辐射能的吸收与辐射的关系

例题2：实验测得2500K钨丝的法向单色发射率如下图所示，试计算其辐射力。已知可见光的波长范围为 $0.38\sim 0.76\mu\text{ m}$ ，黑体辐射函数 $F_{b(0-0.38)}=0.0003$ ， $F_{b(0-0.76)}=0.0521$ ，求发光效率。



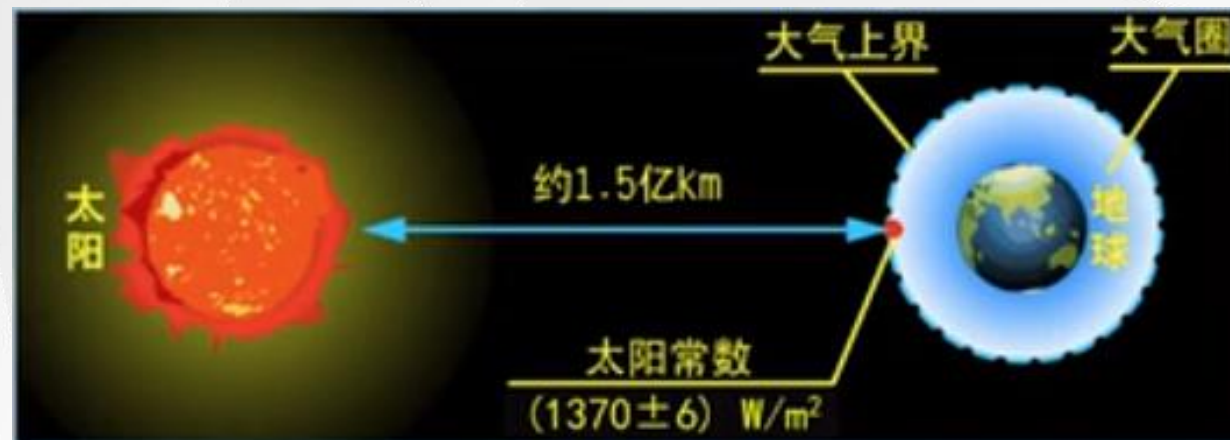
05

太阳与环境辐射

- 太阳常数
- 太阳能穿过大气层时的削弱
- 环境辐射

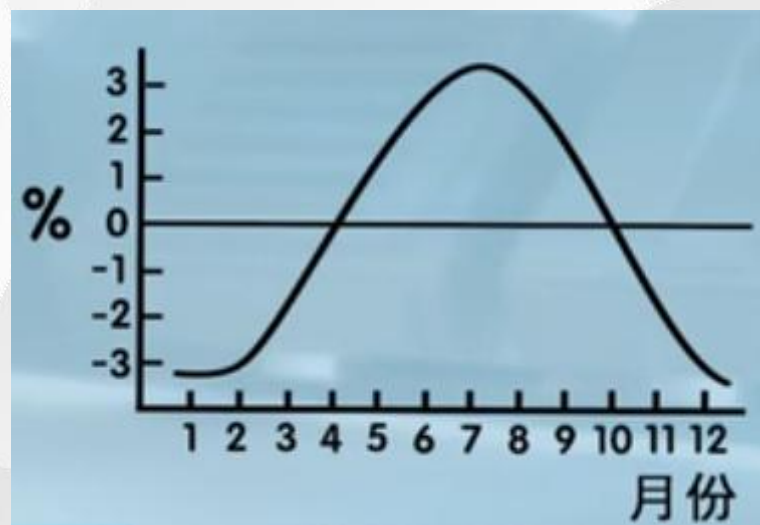
太阳常数

在日地平均距离处，大气层外缘与太阳射线相垂直的单位表面积所接受到的太阳辐射能



$$S_c = (1370 \pm 6) W/m^2$$

与地理位置或一天中的时间无关



大气层外缘水平面上每单位面积接受到的太阳投入辐射

$$G_{s,o} = S_c f \cos \theta$$

f : 日地距离修正系数。因为日地之间的平均距离有相差 $\pm 3.3\%$ 的变化, $f = 0.97 \sim 1.03$

θ : 由于日地距离遥远, 太阳辐射与大气层外缘任一表面法线的夹角



太阳常数

照射到地球上的太阳辐射能

$$G = S_c f \cos \theta \frac{\pi d^2}{4}$$
$$= 1370 \text{ W/m}^2 \times 1 \times 1 \times \frac{\pi \times (1.28 \times 10^7 \text{ m})^2}{4}$$
$$\approx 1.76 \times 10^{17} \text{ W}$$

每秒照射到地球上的太阳辐射能可达 $1.76 \times 10^{17} \text{ J}$

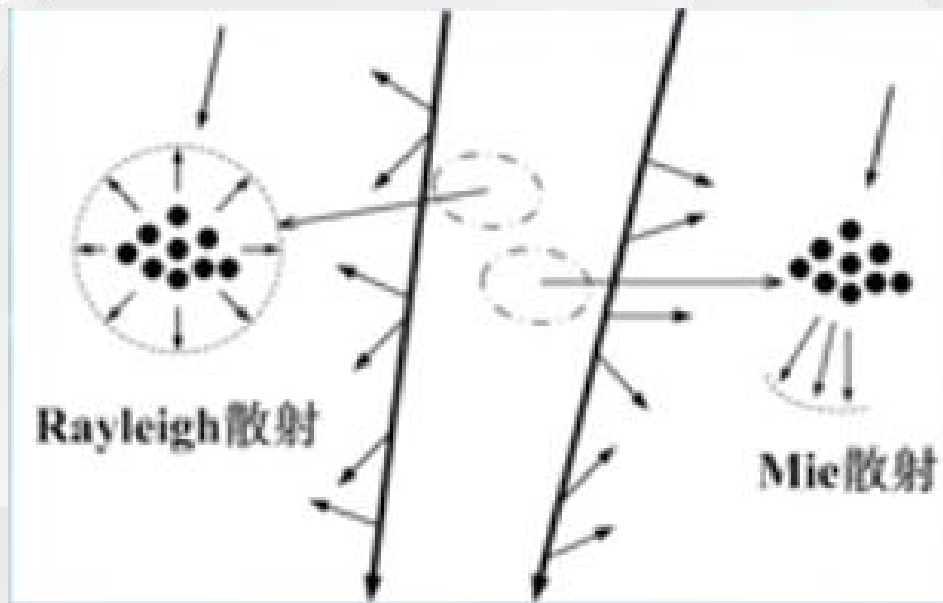
1kg标准煤的发热值是 $29.3 \times 10^6 \text{ J}$

6×10^{10} 倍!!!

太阳能穿过大气层时的削弱

太阳辐射在大气层时受到两种削弱作用：

- **吸收**：大气层中具有部分吸收能力的气体（如臭氧、水蒸气等）
- **散射**：对太阳投入辐射的重新辐射
 - ✓ **分子散射（Rayleigh散射）**：向整个空间均匀进行
 - ✓ **米散射（Mie散射）**：由于大气层中的尘埃与悬浮颗粒所造成



环境辐射

地球以及大气层中某些具有辐射能力成分的辐射

地球表面辐射力 $E = \pi d^2 \varepsilon \sigma T^4$

照射到地球上的太阳辐射能 $G = S_c \frac{\pi d^2}{4}$

当地球自身向宇宙发出的辐射能与照射到地球上的太阳辐射能平衡时，

$$\pi d^2 \varepsilon \sigma T^4 = S_c \frac{\pi d^2}{4}$$

$$T = \sqrt[4]{\frac{S_c}{4\varepsilon\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{1370W/m^2}{4 \times 1 \times 5.67W/(m^2 \cdot K^4)}} = 279K$$

地球表面的平均温度在
250~320K之间变动

取地球表面的平均温度为290K

根据维恩位移定律

$$\lambda_m = \frac{2.9 \times 10^{-3} m \cdot K}{290K} = 10\mu m$$
 地球的辐射能量以红外线最多



作业：《传热学》

P380 8-20

● P381 8-22 ●