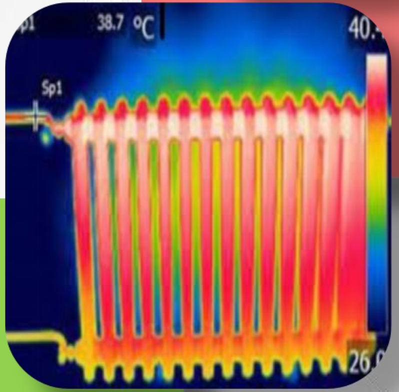


传热学

辐射传热I

授课老师：苗雨

目录
CONTENTS

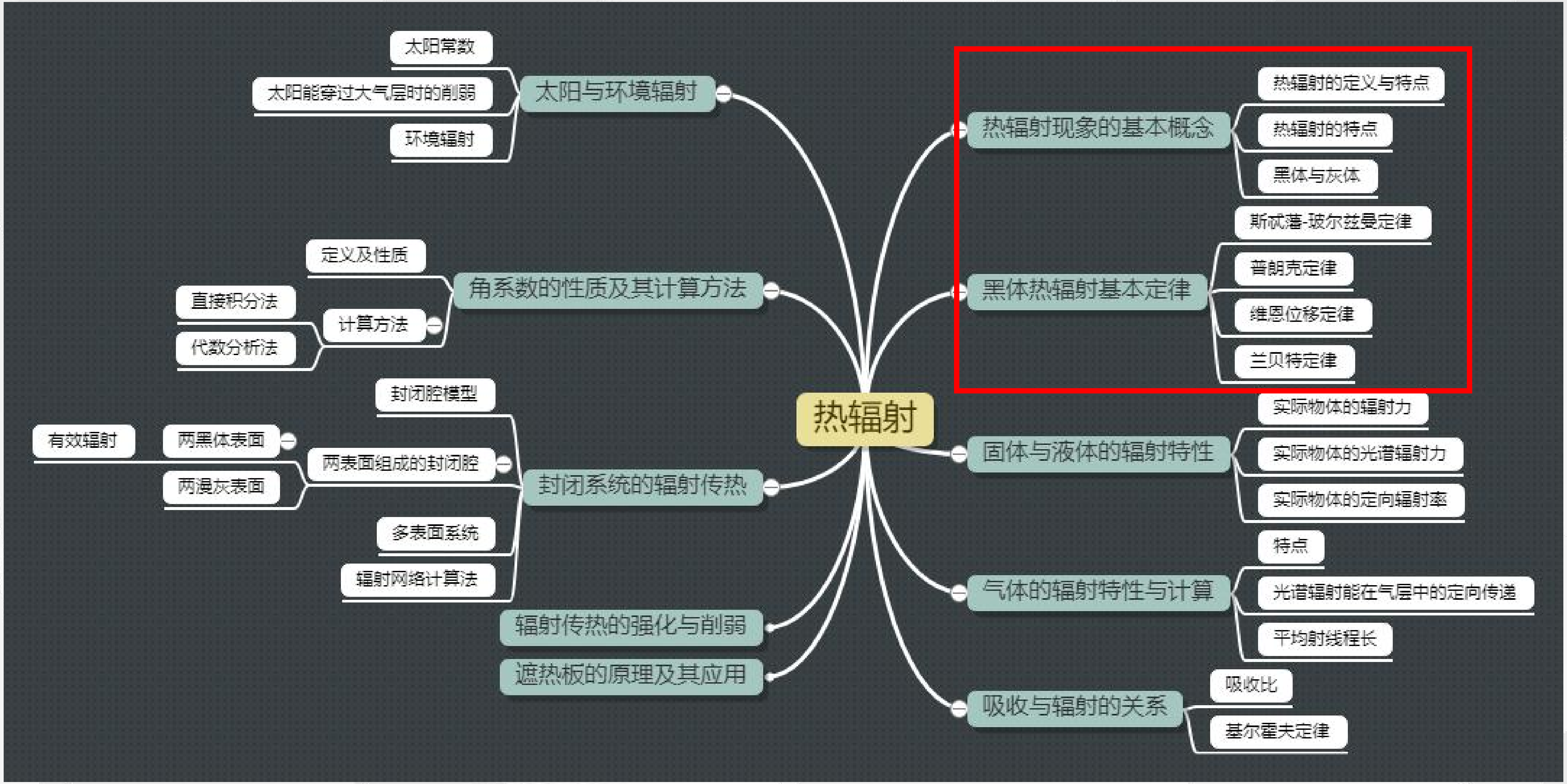
01

课前回顾及导引

课前回顾及导引

1 格拉晓夫数的表达式？ $Gr = \dfrac{g\alpha_V \Delta t l^3}{\upsilon^2}$

课前回顾及导引

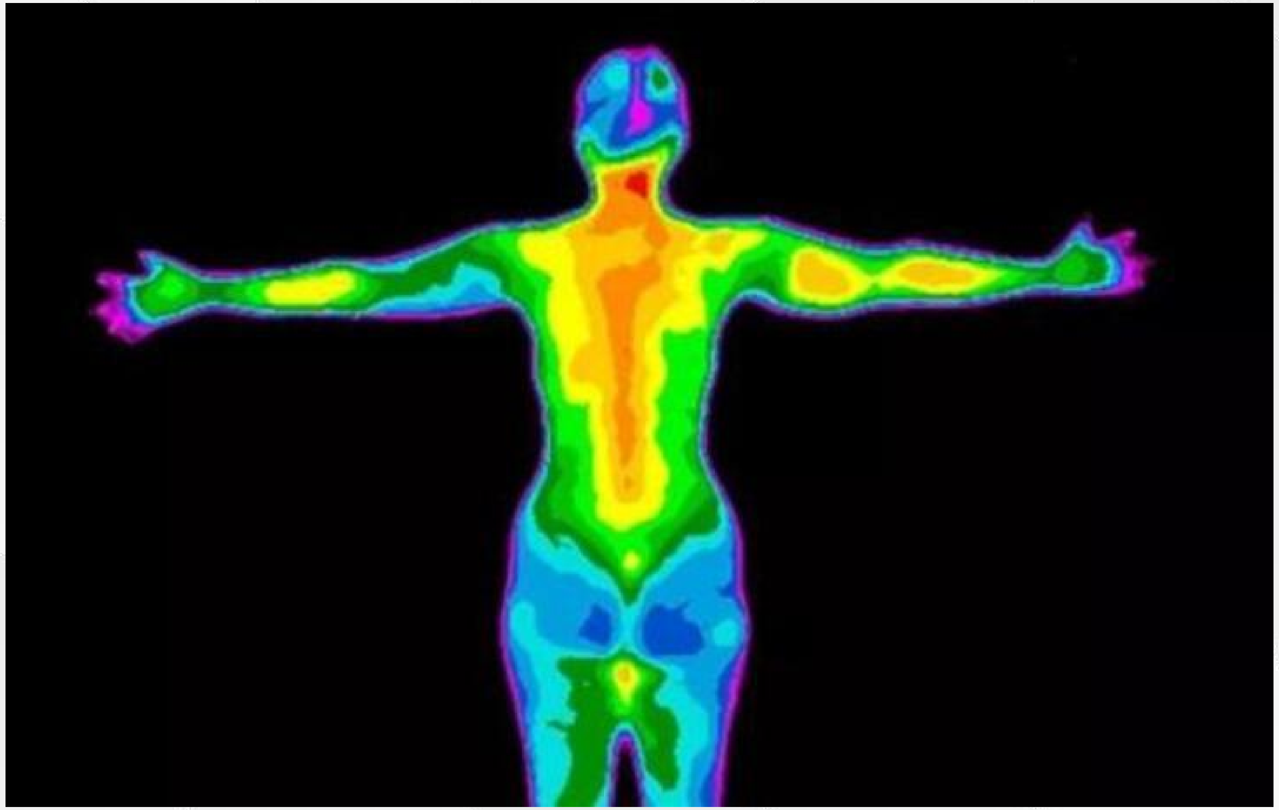

热辐射
太阳与环境辐射
太阳常数
太阳能穿过大气层时的削弱
环境辐射
角系数的性质及其计算方法
定义及性质
计算方法
直接积分法
代数分析法
封闭系统的辐射传热
封闭腔模型
两表面组成的封闭腔
两黑体表面
有效辐射
两漫灰表面
多表面系统
辐射网络计算法
辐射传热的强化与削弱
遮热板的原理及其应用
热辐射现象的基本概念
热辐射的定义与特点
热辐射的特点
黑体与灰体
黑体热辐射基本定律
斯忒藩-玻尔兹曼定律
普朗克定律
维恩位移定律
兰贝特定律
固体与液体的辐射特性
实际物体的辐射力
实际物体的光谱辐射力
实际物体的定向辐射率
气体的辐射特性与计算
特点
光谱辐射能在气层中的定向传递
平均射线程长
吸收与辐射的关系
吸收比
基尔霍夫定律

02

热辐射现象的基本概念

- 热辐射定义和特点
- 吸收比、反射比和穿透比
- 镜面反射和漫反射
- 黑体与灰体
- 研究的热辐射问题

热辐射定义和特点



物体通过**电磁波**来传递能量的方式称为**辐射**

其中由于热的原因而产生的**电磁波**辐射称为**热辐射**

热辐射定义和特点

1 任何物体，只要温度高于0K，就会不停地向周围空间发出热辐射

2 可以在真空中传播

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 辐射力的大小取决于温度的4次方

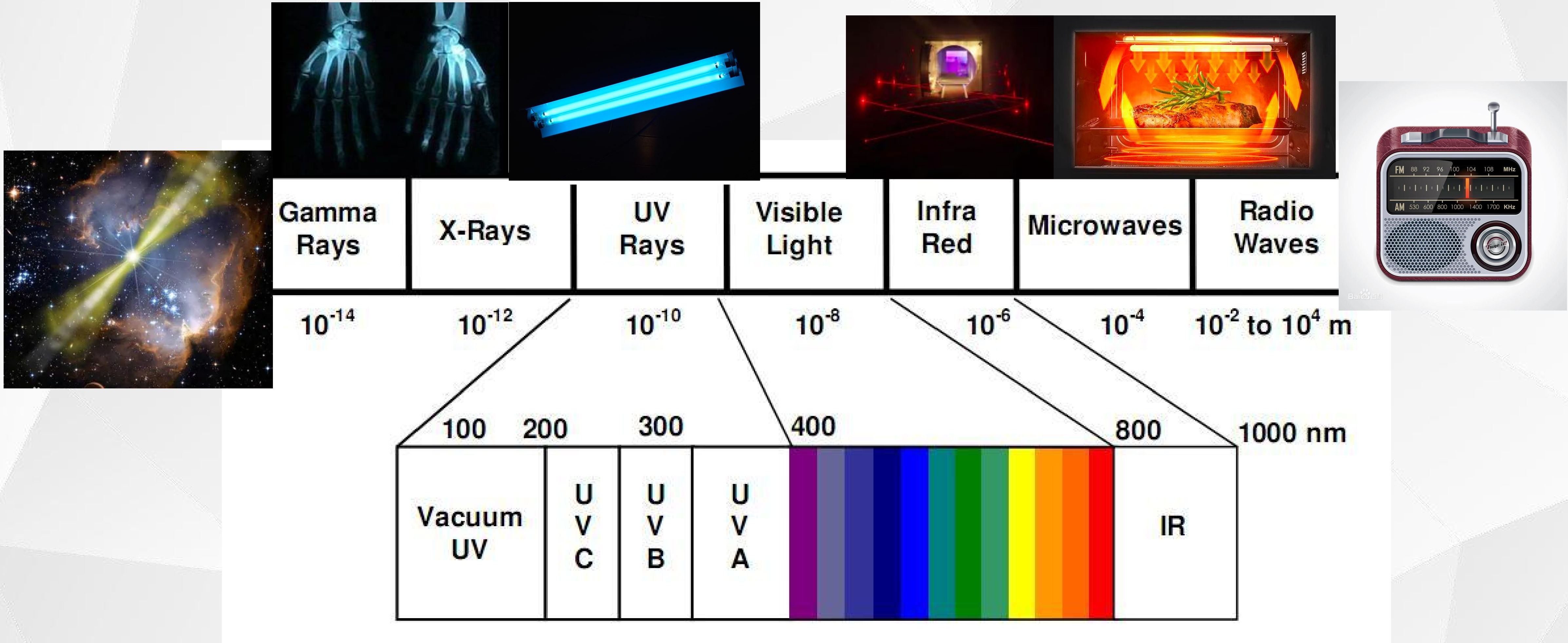
热辐射定义和特点

热辐射具有一般辐射现象的共性：各种电磁波都以光速在空间传播，热辐射也是如此

电磁波的速率　　$c = f\lambda$

f 是频率，单位s^{-1}

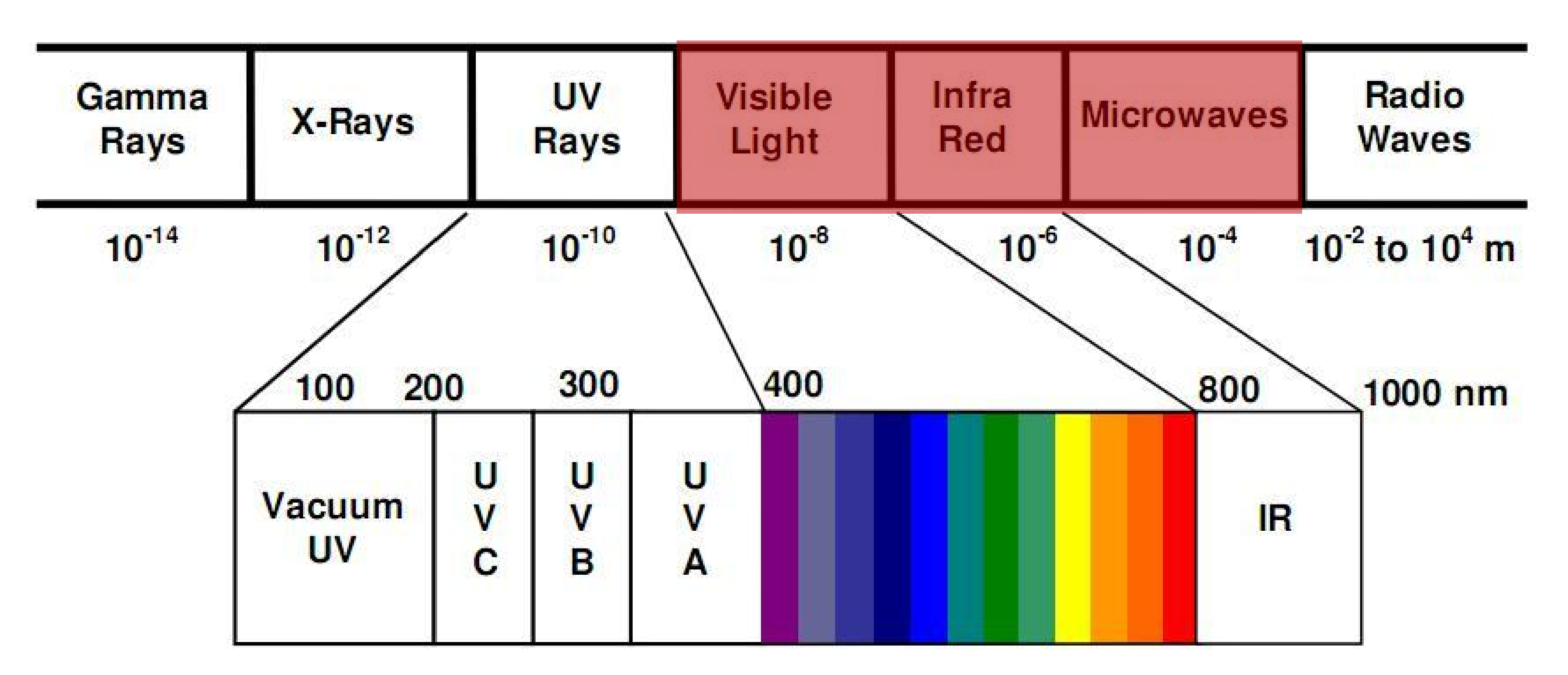
λ 是波长，常用单位μm



热辐射定义和特点

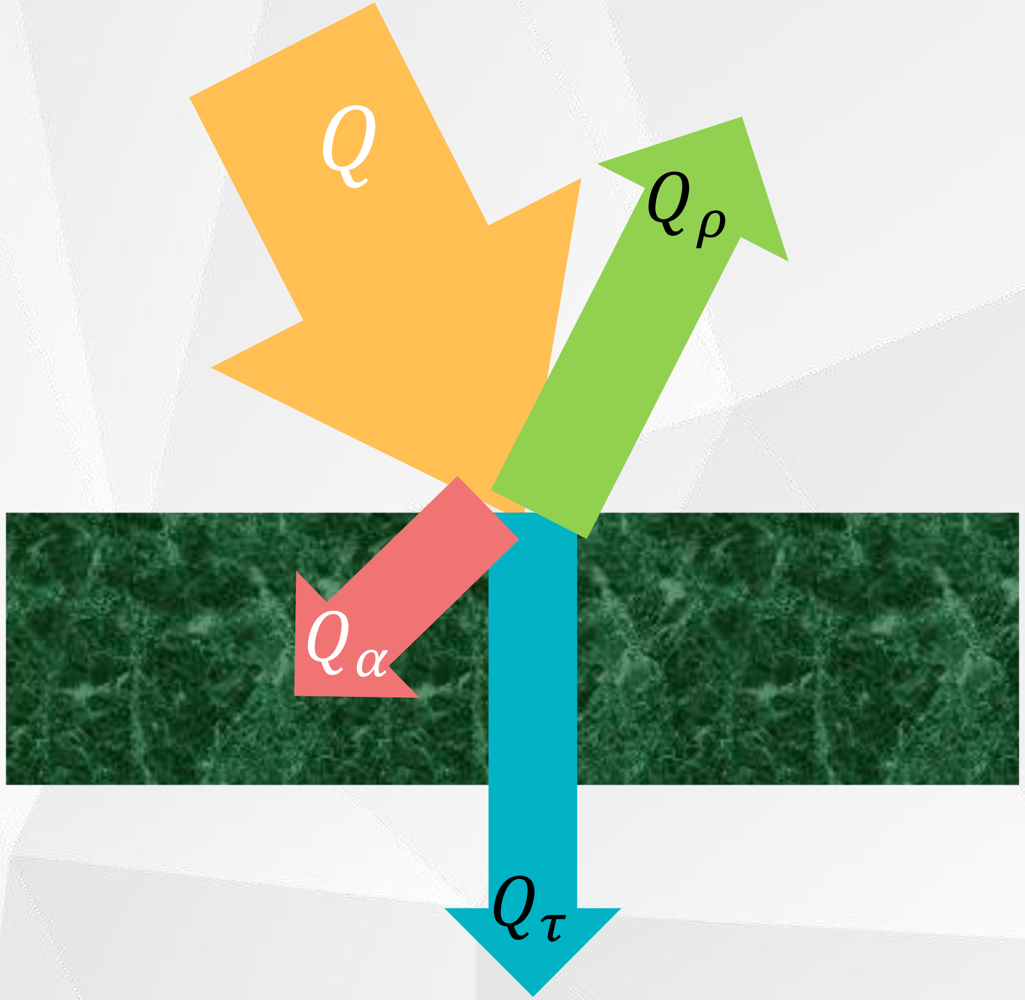
工业上所遇到的温度范围在2000K以下，有实际意义的热辐射波长在0.8~100μ m之间

如果把温度范围扩大到太阳辐射（5800K），热辐射波长区段为0.1~100μ m



吸收比、反射比和穿透比

物体表面对热辐射的吸收、反射和穿透的关系



$$Q = Q_\alpha + Q_\rho + Q_\tau$$

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

吸收比α　反射比ρ　穿透比τ

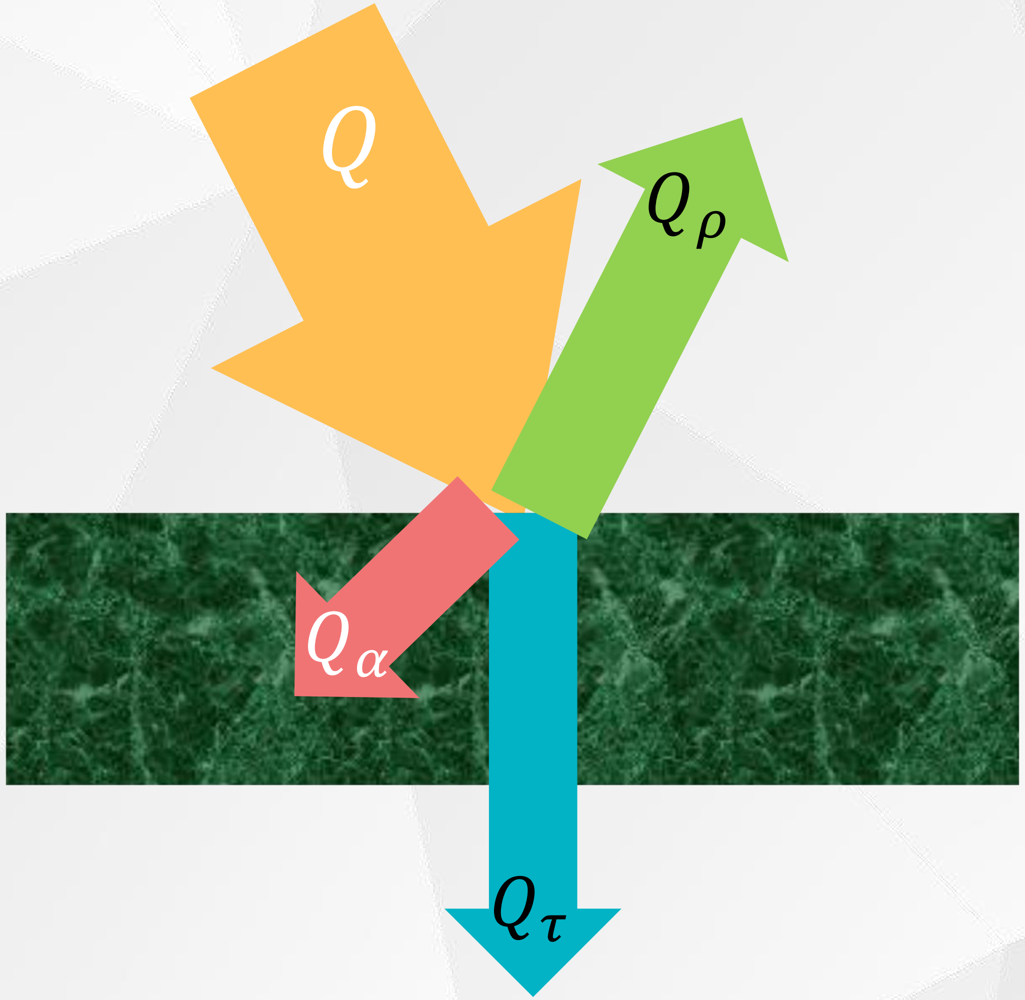
$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

吸收比、反射比和穿透比

吸收比α

反射比ρ

穿透比τ



对于大多数的固体与液体，

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

对于不含颗粒的气体

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

对于黑体 $\alpha = 1$

对于白体或镜体 $\rho = 1$

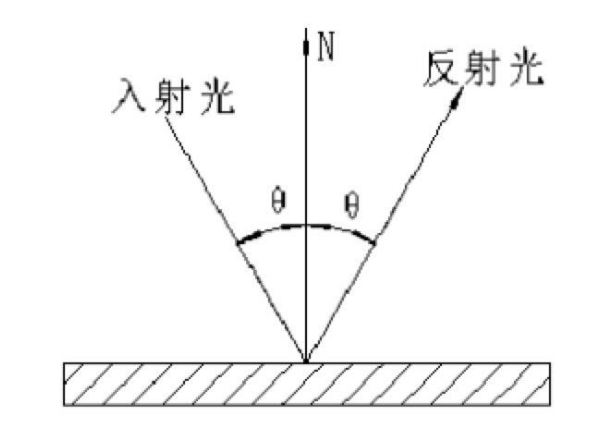
对于透明体 $\tau = 1$

镜面反射和漫反射

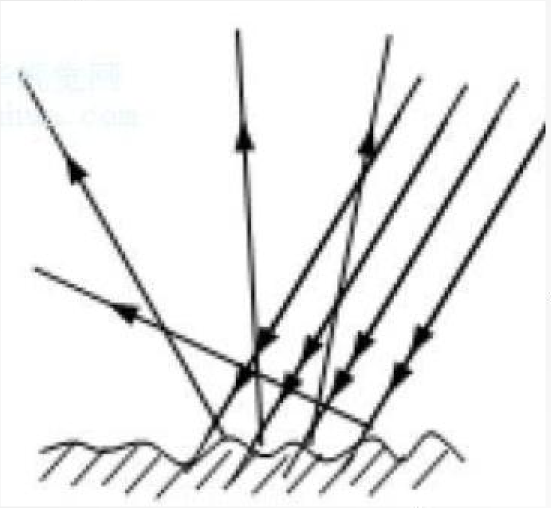
辐射能投射到固体表面的两种反射

取决于表面不平整尺寸的大小（表面粗糙程度）

镜面反射



漫反射



黑体与灰体

黑体

- 能吸收投入其表面上的**所有**热辐射能量的物体
- 黑体的吸收本领和辐射本领在同温度的物体中是**最大的**
- 吸收比 $\alpha=1$

灰体

- 光谱吸收比与波长**无关**的物体
- 吸收比 $\alpha=const.$
- 工业上的辐射传热计算一般都按灰体来处理

对于漫灰表面，吸收比α = 发射率ε，称为**漫灰体**
在一定温度下，光谱发射率ε=常数，也与波长无关

研究的热辐射问题

导热、对流传热

由于物体的微观粒子的热运动和宏观运动所造成的能量转移

辐射传热

由于物质的电磁运动所引起的热能传递

特性

计算

03

黑体热辐射基本定律

- 辐射力E和光谱辐射力E_λ
- 斯忒藩-玻尔兹曼定律
- 普朗克定律和维恩位移定律
- 立体角
- 定向辐射强度
- 兰贝特定律

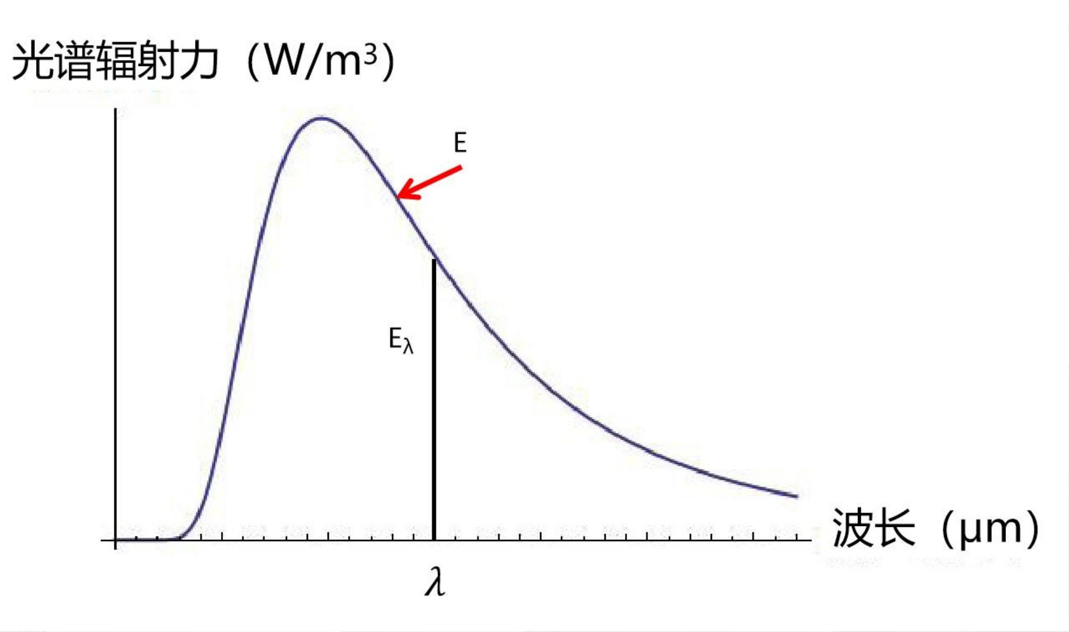
辐射力E和光谱辐射力E_λ

辐射力（E）：单位时间内，物体的单位表面积向其上的半球空间的所有方向辐射出去的全部波长范围内的能量，单位：W/m^2

光谱辐射力（E_λ）：单位时间内，单位表面积向其上的半球空间的所有方向辐射出去的在包含波长λ在内的单位波长内的能量，单位：$W/(m^2 \cdot \mu m)$

μm: 热辐射的波长宽度

光谱辐射力和辐射力E的关系：$E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda$



斯忒藩-玻尔兹曼定律

斯忒藩-玻尔兹曼定律，又称四次方定律，研究黑体在半球内的辐射力E_b与**温度t**的关系

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

表示黑体

黑体辐射常数σ，其值为5.67×10^{-8}W/(m^2·K^4)

黑体辐射系数C_0，其值为5.67W/(m^2·K^4)

该定律给出了黑体辐射力与热力学温度的依变关系： $E \sim T^4$

普朗克定律和维恩位移定律

普朗克定律：研究黑体光谱辐射力$E_{b\lambda}$按**波长分布**的规律

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

黑体的光谱辐射力$E_{b\lambda}$，单位：W/(m^2·μm)

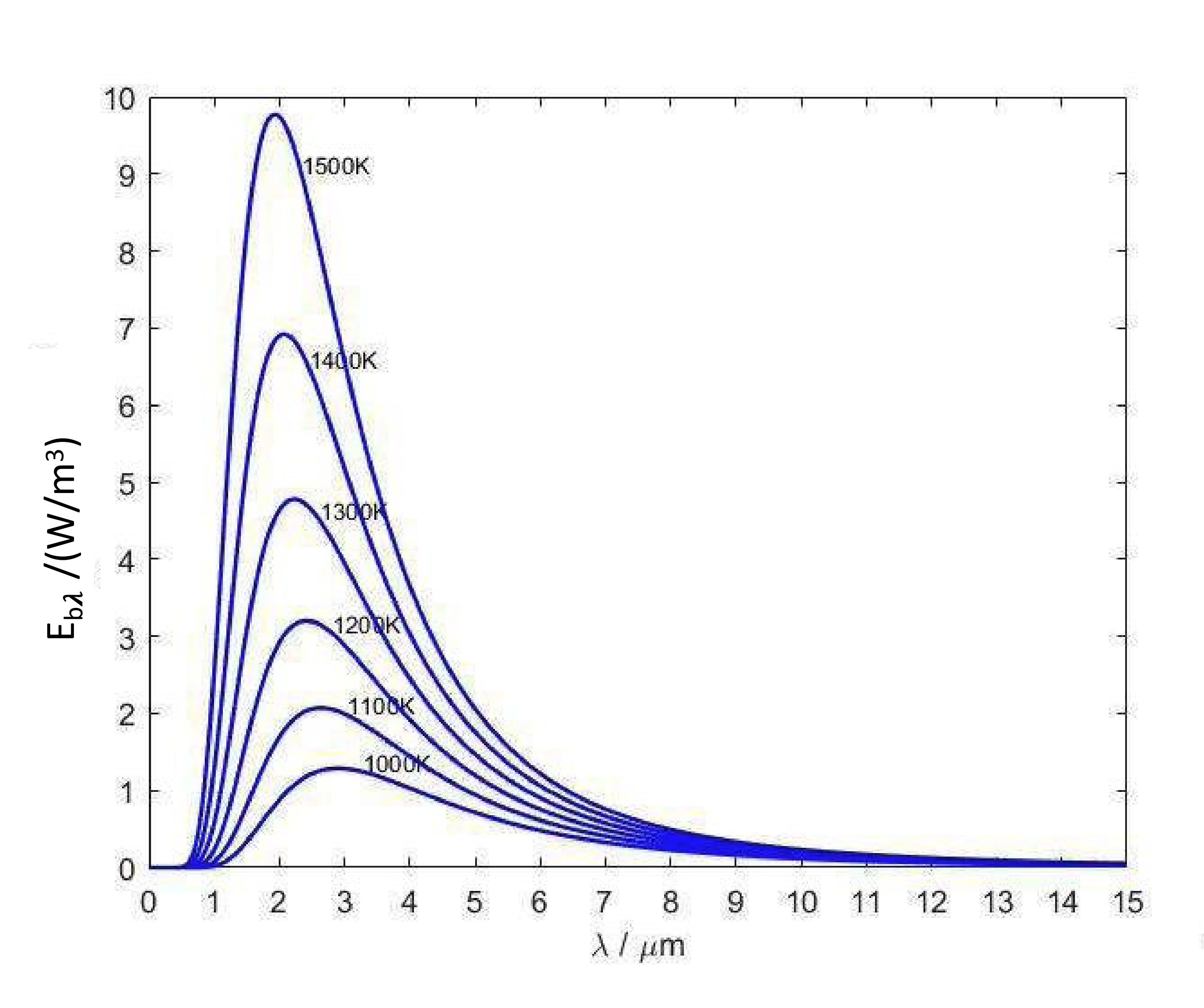
第一辐射常量c_1，3.7419×10^{-16} W·m^2

第二辐射常量c_2，1.4388×10^{-2} m·K

普朗克定律与斯忒藩-玻尔兹曼定律之间的关系：

$$E_b = \int_0^{\infty} E_{b\lambda} d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} d\lambda = \sigma T^4$$

普朗克定律和维恩位移定律

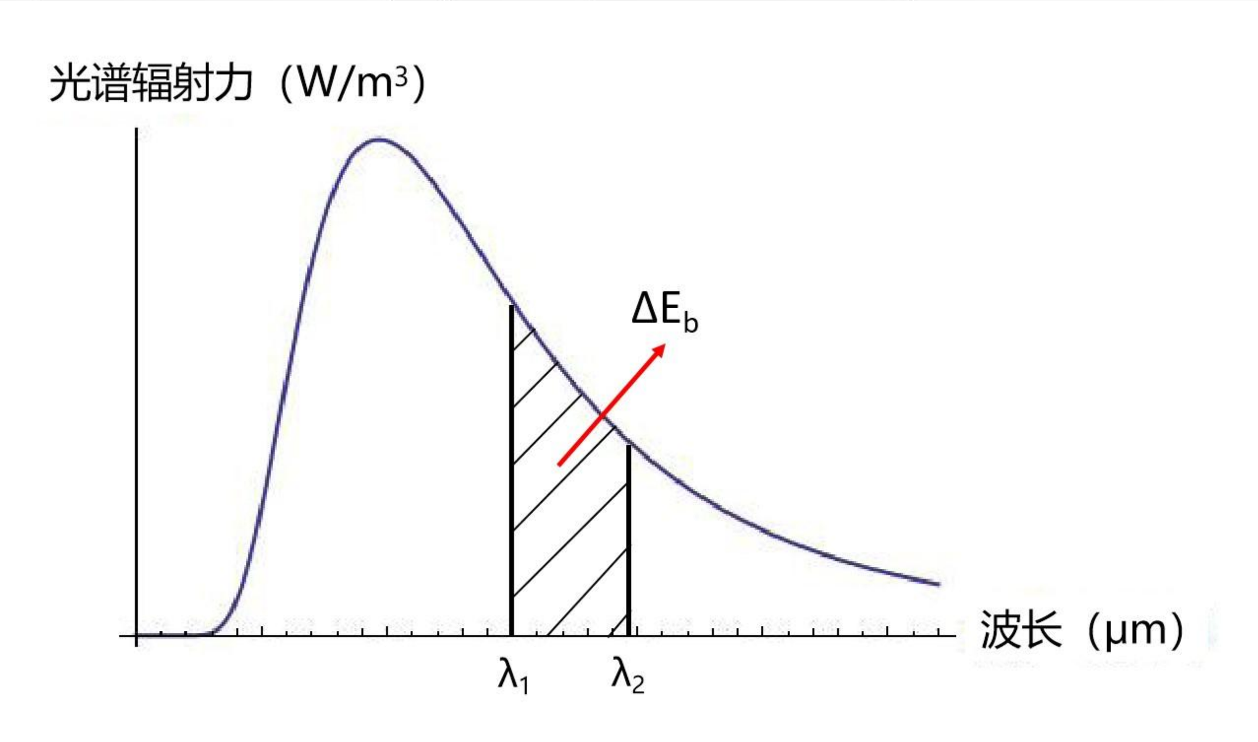


- 黑体的光谱辐射力随着波长的增加，先增大或减小
- 光谱辐射力的最大处的波长λ_m随着温度变化
- 随着温度升高，曲线的峰值向较短波长方向移动
- 对于最大光谱辐射力的波长λ_m与温度T之间存在如下关系：

维恩位移定律

$$\lambda_m T = 2.8976 \times 10^{-3} m \cdot K$$
$$\approx 2.9 \times 10^{-3} m \cdot K$$

普朗克定律和维恩位移定律



实际问题中，有时需要某一特定波长范围的辐射能量，即λ_1和λ_2区段内所发射的辐射力

$$\Delta E_b = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{b\lambda} d\lambda$$

但该式并不利于工程计算

黑体辐射函数 $F_{b(\lambda_2 - \lambda_1)} = \dfrac{\Delta E_b}{E_b} = f(\lambda T)$

表示黑体辐射力中所占的百分数

普朗克定律和维恩位移定律

黑体辐射函数

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

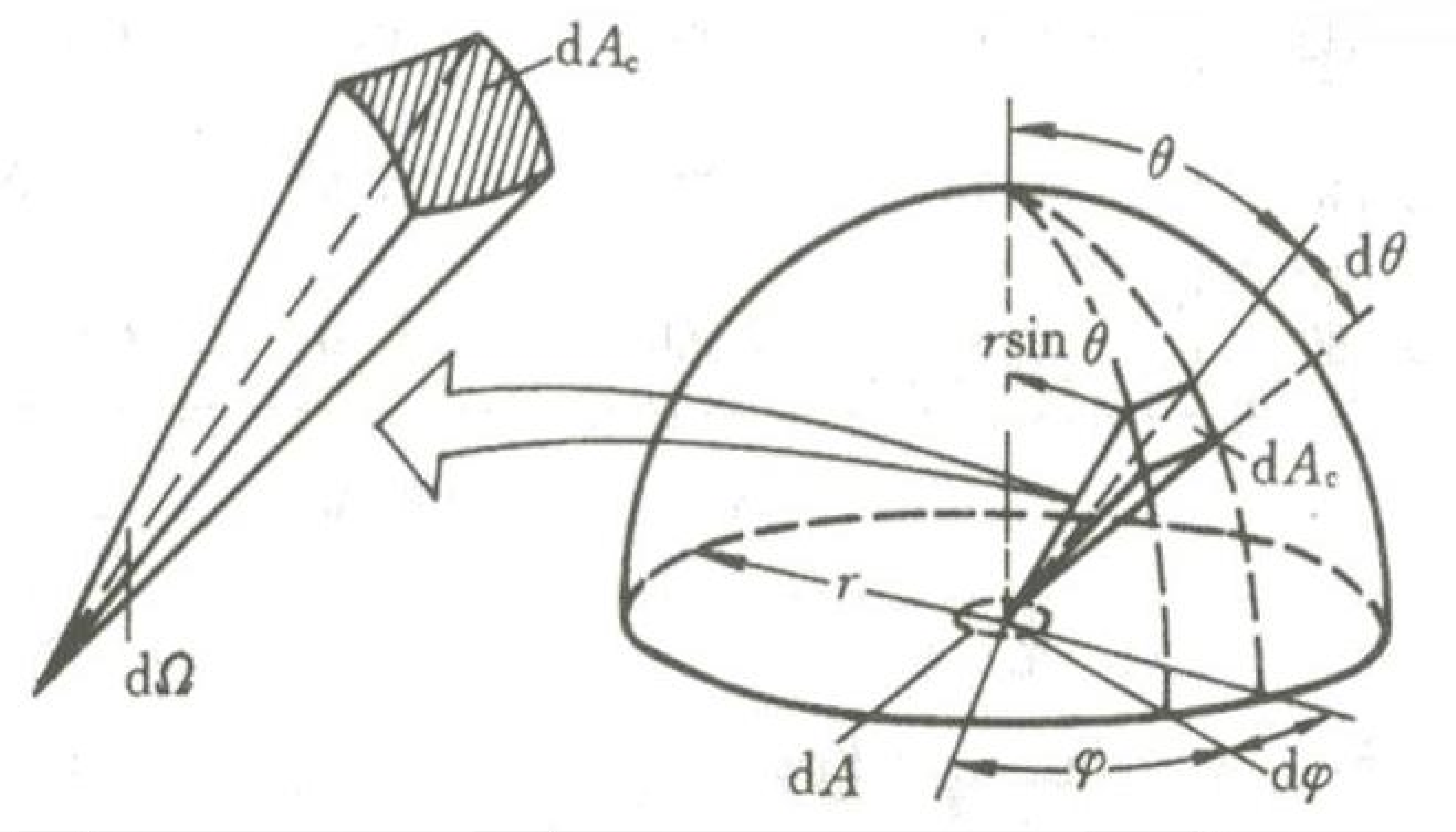
$$=\frac{1}{\sigma T^4}\left(\int_0^{\lambda_2}E_{b\lambda}d\lambda-\int_0^{\lambda_1}E_{b\lambda}d\lambda\right)$$

$$=F_{b(\lambda_2-0)}-F_{b(\lambda_1-0)}=f(\lambda_2T)-f(\lambda_1T)$$

$$\Delta E_{b(\lambda_2-\lambda_1)}=F_{b(\lambda_2-\lambda_1)}E_b=\left(F_{b(\lambda_2-0)}-F_{b(\lambda_1-0)}\right)E_b$$

立体角

立体角：球面面积除以球半径的平方，表示某一方向空间所占的大小
单位：空间度，记为sr



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

Ω ：立体角
φ ：经度角
θ ：纬度角

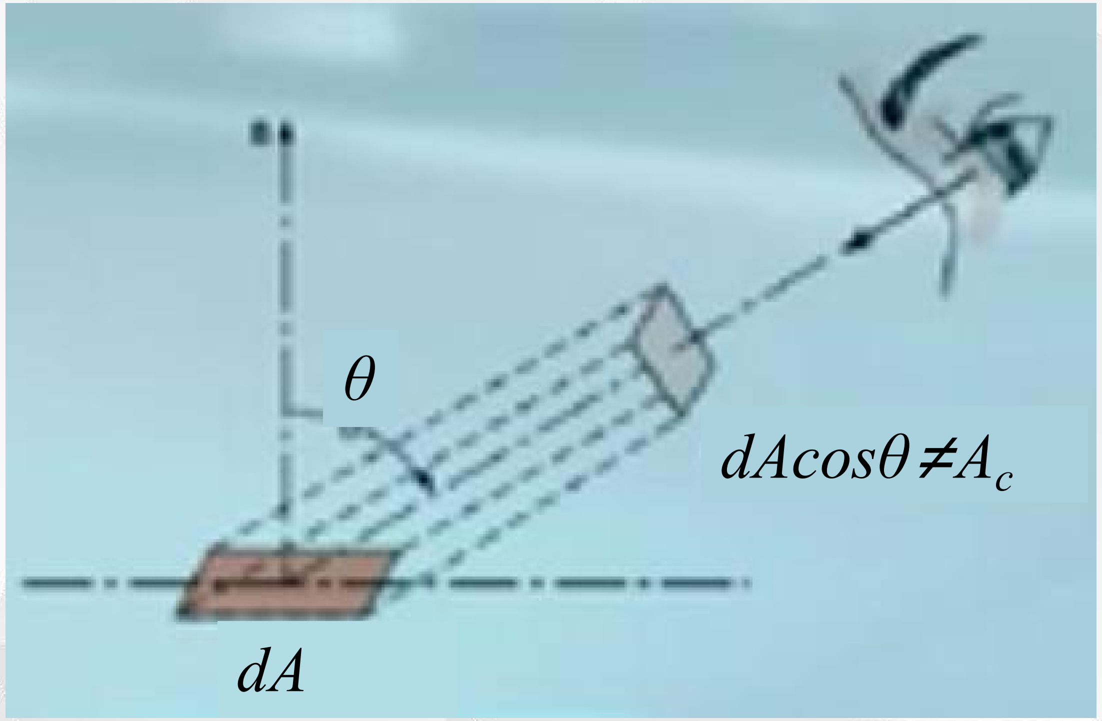
$$dA_c = rd\theta \cdot r\sin\theta\, d\varphi$$

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

兰贝特定律

定向辐射强度 I： 单位可见辐射面积向半球空间θ方向的单位立体角中辐射出去的各个波长能量的总和，单位：W/(m²·sr)

设面积为dA的黑体微元面积向围绕空间纬度角 θ 方向的微元立体角 $d\Omega$ 内辐射出去的能量为 $d\Omega$



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

$dA\cos\theta$：θ方向看过去的面积，称为可见面积

兰贝特定律：又称余弦定律，研究黑体辐射能按**空间方向**的分布规律

定向辐射强度为常数，与空间方向无关

兰贝特定律

$$d\Phi(\theta) = I\, dA d\Omega \cos\theta$$

黑体单位面积辐射出去的能量在空间的不同方向分布式不均匀的，按空间纬度角 θ 的余弦规律变化：在垂直于该表面的方向最大，而与表面平行的方向为零

兰贝特定律与斯忒藩-玻尔兹曼定律之间的关系：

$$E_b = \int_{\Omega=2\pi} \frac{d\Phi(\theta)}{dA} = \int_{\Omega=2\pi} I_b \cos\theta\, d\Omega = I_b \iint \cos\theta \sin\theta\, d\theta d\varphi$$
$$= I_b \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \cos\theta \sin\theta\, d\theta = \pi I_b$$

注意：黑体的定性辐射强度I是以单位可见面积为度量依据的，而黑体的辐射力E是以单位面积为度量依据的

→ I与空间方向无关，E与空间方向有关

兰贝特定律

$$d\Phi(\theta) = I\, dA d\Omega \cos\theta$$

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

I_b与空间方向无关

$$E = \int_{\Omega=2\pi} \frac{d\Phi(\theta)}{dA} = \int_{\Omega=2\pi} I\cos\theta\, d\Omega = I \iint \cos\theta\, sin\,\theta\, d\theta d\varphi$$

$$= I \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\theta} \cos\theta\, sin\,\theta\, d\theta$$

E与空间方向有关

对于黑体，θ从0到π/2，

$$E_b = I_b \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \cos\theta\, sin\,\theta\, d\theta = \pi I_b$$

黑体热辐射基本定律

例题：如图所示，微小黑体dA_b, 向两个微小表面dA_1和dA_2发生热辐射，其中dA_1在dA_b的法向线上，$r=0.5m$, dA_b、dA_1和dA_2的表面积均为$10^{-3}m^2$，微小黑体dA_b对两个微元面积的定向辐射强度I相等， 问：dA_b辐射至dA_1与辐射至dA_2的热流量之比是多少？若dA_b辐射至dA_2的热流量$d\Phi_2=10^{-3}W$，推知dA_b的辐射力E是多少?