4 大气辐射基础

4.1 绪论

相关基础知识
1. 太阳辐射是地球最重要的能量来源
2. 地球与宇宙其他物体所有的能量交换是通过辐射传输发生的
3. 辐射是大气与下地表以及大气不同层次能量交换的机质
4. 在高层大气的一些化学反应和光化学烟雾的行程中有重要作用(高层云、臭氧反应、地面污染)
5. 大气的红外辐射是卫星遥感的基础
6. 地气系统、纬度的辐射差额是天气变化和其后形成及其演变的基本因素

辐射概要 太阳辐射的 30%被直接反射回太空。地球反照率：0.3

辐射
① 任何物体只要**温度在绝对零度以上**，都以电磁波形式**向外发射能量**，同时又接收周围的电磁波
② **辐射传输**是以电磁辐射的形式进行能量传输的物理现象
③ 辐射通过一种**媒介**（比如地气系统）的传播受到**发射、吸收和散射**过程的影响
④ 电磁辐射的基本性质就是**波粒二象性**：即在经典电磁波理论中，能量的传播依靠**电磁场的连续波动**来完成；在量子理论中增加了**辐射的粒子特征**，物质发射或吸收的辐射能都以光子为单位。
⑤ **大气**对太阳光的散射和吸收以及**大气、陆地和海洋**对红外辐射的吸收和发射共同决定地球气候

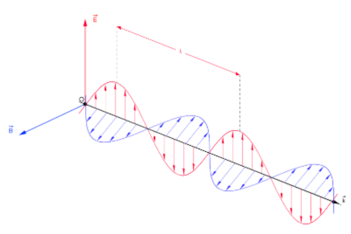
辐射领域发展
1. **麦克斯韦方程组** 1831-1879
2. 瑞利 1842-1919 因其对最重要气体密度的研究和氩气的发现，获得 1904 诺贝尔奖
   瑞利散射：解释了天空蓝色的成因(分子对太阳辐射的散射)
3. 维恩 1864-1928 发现辐射加热定律，获得 1911 诺贝尔奖
   维恩定律：一个确定黑体辐射分布的经验定律
4. 普朗克 1858-1947 发现量子，**普朗克定律**
5. 爱德华·普塞尔 1912-1997 核磁精确观测方法,离散偶极子近似 DDA：大气粒子单次散射特性
6. 萨婆罗门扬·钱德拉塞卡 1910-1995 行星结构和演变、**辐射传输**的奠基人

4.1.1 电磁波

发现 1865，麦克斯韦发表了他著名的方程组，展示了电磁波的存在与光是一种电磁波。

真空中的平面电磁波

电磁波示意，红色电波，蓝色磁波



内容
① 波由**时变的电场 E 和磁场 H** 组成（其中电场和磁场均用矢量表示
② E 和 H **相互垂直**
③ 电磁波的传播方向由$E \times H$ 给出，它既垂直于 E 又垂直于 H

麦克斯韦方程

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \qquad \nabla \times \vec{E} = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

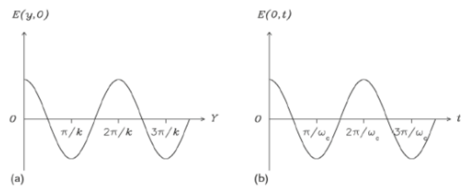
$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \qquad \nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$$

推导

$$\nabla \times \left(\nabla \times \vec{E}\right) = \nabla \times \left(-\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}\right) = -\mu \frac{\partial}{\partial t}\left(\nabla \cdot \vec{H}\right) = -\varepsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial^2 t}$$

$$\nabla \times \left(\nabla \times \vec{E}\right) = \nabla\left(\nabla \cdot \vec{E}\right) - \nabla^2 \vec{E}$$

两式相减得：$\nabla^2 \vec{E} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$



左侧时间为零，右侧位置为零

一般式 $\nabla^2 \vec{E} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad \Rightarrow \quad \vec{E}(y,t) = E_o(y,t)\vec{z} = \boldsymbol{E_o \cos(ky - \omega t)\,\vec{z}}$

描述 使用频率f，波长λ，波数ν来描述

关系 $\boldsymbol{\lambda \cdot f = c} \qquad \boldsymbol{\nu = \frac{1}{\lambda} = \frac{f}{c}}$

单位　**波长**　$1cm = 10^{-2}m$　$1\mu m = 10^{-6}m$　$1nm = 10^{-9}m$　$\mathbf{1Å = 10^{-10}m}$ **(ångström)**

频率　$1Hz = 1s^{-1}$　$1GHz = 10^9Hz = 10^9s^{-1}$

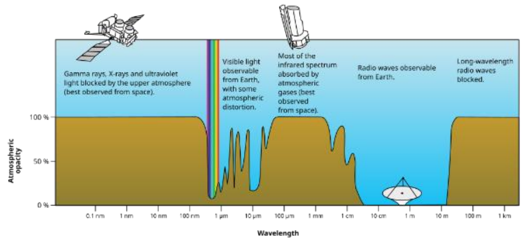
波数　cm^{-1}

例题　1. 计算波长为10 μm的辐射的频率和波数

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3\times10^8 m/s}{10\times10^{-6}m} = 3\times10^{13}Hz = 30000GHz \qquad \nu = \frac{1}{\lambda} = \frac{f}{c} = \frac{1}{10\times10^{-6}m} = 1000cm^{-1}$$

2. 如果波长增加到10.1μm，波数将变化多少?

$$\nu = \frac{1}{10.1\times10^{-6}m} = 990cm^{-1}$$



大气窗口

4.1.2 光谱

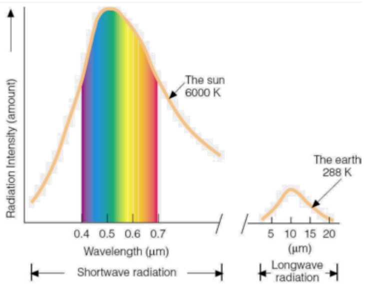
描述　① 电磁辐射可以视为以光速传播的**波包**

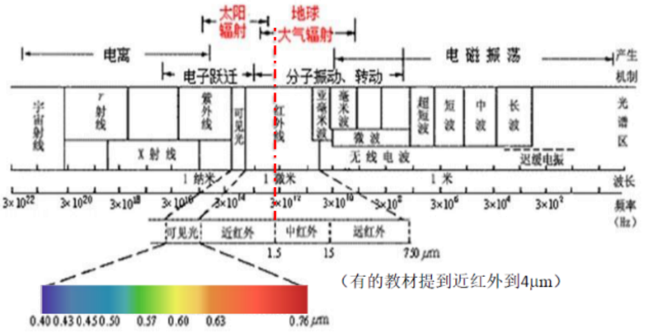
② 如同其它任何以已知速度传播的波，其频率、波长和波数之间是相互依赖的

③ 波长、频率和波数可交互用于表示辐射特征

④ 大气辐射是具有连续波长和频率的波包，其荷载的能量可以划分为来自各种波长的波段（比如：短波($< 4\mu m$)、长波($> 4\mu m$)）的贡献

微波辐射	$100\mu m - 10cm$	在**地球能量平衡中不重要**，但它被广泛**应用于遥感**，因其能够穿透云层
可见光	$0.40 - 0.76\mu m$	可见光是太阳和其它类似的恒星所发射的大部分辐射的频域（进化事实）
太阳辐射	$0.20 - 4\mu m$	短波，包含**部分紫外+可见光+近红外波段**，太阳黑体约为 6000K
地球热红外	$4 - 100\mu m$	长波地球辐射，包含**远红外**，地球黑体约为 288K
红外辐射	$0.76 - 100\mu m$	包含近红外+远红外





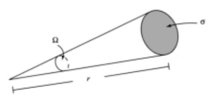
（有的教材提到近红外到4μm）

4.2 辐射参量

4.2.1 立体角

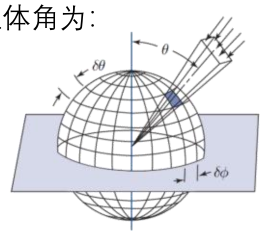
立体角　几何中立体角是二维角度在三维空间的表现，即在某一点所正对的目标，是对处于该点观察者所观察物体大小的量度。立体角可以表达为**立体角所正对的球面面积与半径平方之比**。

定义：$\boldsymbol{\Omega = \frac{\sigma}{r^2}}$　　**单位**：球面度 Sr　　一个球面的立体角为4π



示例　日地距离$d = 1.5\times10^8\ km$ 太阳半径为$R_\odot = 7.0\times10^5\ km$，从地球看太阳的立体角为：

$$\Omega = \frac{\pi R_\odot^2}{d^2} = \frac{3.14\times(7.0\times10^5)^2}{(1.5\times10^8)^2} = 6.76\times10^{-5}Sr$$



球标　$d\sigma = (rd\theta)_{南北}(r\sin\theta\, d\phi)_{东西}$　其中 **θ天顶角，ϕ方位角**

$$\boldsymbol{d\Omega = \frac{d\sigma}{r^2} = \sin\theta\, d\theta d\phi}$$　地球坐标中纬度 $+\ \theta = \pi/2$

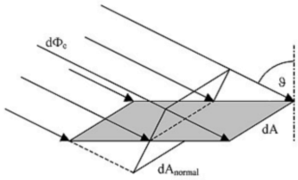
示例　通过对立体角积分，计算由**水平面上一个点观察到的天空所正对着的立体角**的弧度

$$\int_{2\pi} d\Omega = \int_{\phi=0}^{2\pi}\int_{\theta=0}^{\pi/2} \sin\theta\, d\theta d\phi = 2\pi\int_{\theta=0}^{\pi/2}\sin\theta\, d\theta = 2\pi$$

4.2.2 能量

当电磁辐射能量通过一表面，通过的能量与**表面面积、立体角范围(**辐射有效性**)、通过时间、波长/波数范围**有关

4.2.2.1 基本辐射参量



基本条件　电磁辐射在**时间$\boldsymbol{t}$到$\boldsymbol{t+dt}$**通过一个**面积为$\boldsymbol{dA}$**的表面的能量为dE（单位：焦耳）

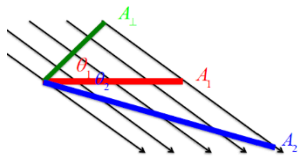
辐射通量Φ　$\boldsymbol{d\Phi = \frac{dE}{dt}}$ （W）　**单位时间通过的能量**

辐照度$\boldsymbol{F}$　$\boldsymbol{dF = \frac{d\Phi}{dA} = \frac{dE}{dtdA}}$ $(\mathrm{W\cdot m^{-2}})$　也称为**辐射通量密度**，**单位时间通过单位面积的能量**

辐亮度$\boldsymbol{I}$　$\boldsymbol{dI = \frac{dF}{\cos\theta d\Omega}} = \frac{dE}{dt(\cos\theta dA)d\Omega} = \boldsymbol{\frac{dE}{dtdA_\perp d\Omega}}(\mathrm{J\cdot s^{-1}\cdot m^{-2}\cdot Sr^{-1}})$

也称为**辐射强度，单位时间通过单位有效面积、单位立体角的能量**

有效辐射面积$\boldsymbol{A_\perp}$　$A_\perp = \cos\theta_1 A_1 = \cos\theta_2 A_2$　不同接收面的有效面积一致



有效面积

4.2.2.2 单色辐射参量

描述　进一步地，大气辐射是具有**连续波长和频率的波包**，其荷载的**能量可以划分为来自各种波长的波段**的贡献，本节考虑辐射能对波长的依赖关系。

光谱/单色通量$\boldsymbol{\Phi_\lambda}$　$\Phi_\lambda = \frac{d\Phi}{d\lambda} = \frac{dE}{dtd\lambda}$

光谱/单色辐照度$\boldsymbol{F_\lambda}$　$F_\lambda = \frac{dF}{d\lambda} = \frac{d\Phi}{dAd\lambda} = \frac{dE}{dtdAd\lambda}$

称为**单色辐射通量密度**。对三维空间中某一**给定波长**辐射以**某一角度**通过**单位面积**的某一平面的能量的量度。如果辐射是以某一方向照射到一个水平面上（比如由水平面上方），此时辐射通量密度称为**入射辐射的通量密度**　$\boldsymbol{F_\lambda = \int_{2\pi} I_\lambda \cos\theta d\Omega}$

光谱/单色辐亮度$\boldsymbol{I_\lambda}$　$I_\lambda = \frac{dI}{d\lambda} = \frac{dE}{dt(\cos\theta dA)d\Omega d\lambda} = \frac{dE}{dtdA_\perp d\Omega d\lambda}$　单位时间单位有效面积单位立体角单位**波长**的能量

光谱/单色通量$\boldsymbol{\Phi_\nu}$　$\Phi_\nu = \frac{d\Phi}{d\nu} = \frac{dE}{dtd\nu}$

光谱/单色辐照度$\boldsymbol{F_\nu}$　$F_\nu = \frac{dF}{d\nu} = \frac{d\Phi}{dAd\nu} = \frac{dE}{dtdAd\nu}$

光谱/单色辐亮度$\boldsymbol{I_\nu}$　$I_\nu = \frac{dI}{d\nu} = \frac{dE}{dt(\cos\theta dA)d\Omega d\nu} = \frac{dE}{dtdA_\perp d\Omega d\nu}$　单位时间单位有效面积单位立体角单位**波数**的能量

波长波数关系　$I_\nu = \frac{dI}{d\nu} = \frac{dI}{d\lambda}\left|\frac{d\lambda}{d\nu}\right| = I_\lambda \frac{1}{\nu^2} = I_\lambda \lambda^2$

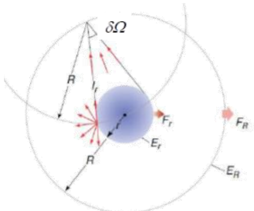
波段辐射强度　$Q = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_\lambda d\lambda$　　$I = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_\lambda d\lambda$

例题

1. 辐射来自于一个向四周均匀发射的水平面，那么发射辐射的通量密度是多少？

$$F = \int_{2\pi} I\cos\theta\, d\Omega = \int_{\phi=0}^{2\pi}\int_{\theta=0}^{\pi/2} I\cos\theta\sin\theta\, d\theta d\phi = \pi I$$

2. 太阳辐射以零度天顶角入射到地球大气顶一个水平面上的通量密度F_s为$1368Wm^{-2}$。计算太阳辐射的强度（假设太阳辐射是各向同性的，即太阳表面任何一点向所有方向发射辐射的强度相同，并且太阳半径$R_s = 7.00\times10^8\ m$，日地距离$d = 1.50\times10^{11}\ m$）



有$F_s = \int_{2\pi} I\cos\theta d\Omega$　因$\delta\Omega$非常小可忽略其随$\cos\theta$的变化．$F_s = I_s\times\cos\theta\times\delta\Omega$　$\theta = 0$

立体角之比=面积之比　$\frac{\delta\Omega}{2\pi} = \frac{\pi R_s^2}{2\pi d^2}$　　$\delta\Omega = 6.84\times10^{-5}Sr$

$I_s = \frac{F_s}{\delta\Omega} = \frac{1368}{6.84\times10^{-5}} = 2.00\times10^7\ Wm^{-2}Sr^{-1}$

4.3 黑体辐射

4.3.1 基本概念

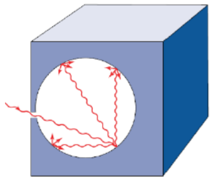
黑体 黑体是一个理想的物体，它能够吸收入射的所有的电磁辐射，无论入射辐射的频率或入射角是多少

黑体辐射 处于**热平衡状态**的**黑体**发射的辐射称之为黑体辐射,并具有如下特性:

① 辐射具有特定的**谱分布和强度**，且这些特性**只随物体的温度变化** 斯特蕃-玻尔兹曼定律

② 黑体是理想的发射体，即在任何频率，在相同温度下，它发射的辐射能都能**达到（或超过）**任何其他物体（灰体）发射的辐射能

③ 黑体发射辐射是**各向同性**的，与方向无关



黑体示意图

白体 对入射辐射不吸收

灰体 以**定常吸收率**吸收不同波长的入射辐射 也是理想物体

实体 对入射辐射**部分**吸收，且**吸收率随波长变化** 实际物体

普朗克定律 $F_B(\lambda,T)$ 一个在温度T 时处于热力平衡状态的黑体**发射的光谱辐射**

斯蒂芬-波尔茨曼定律 $F_B(T)$ 一个在温度T 时处于热力平衡状态的黑体**发射的总辐射**

维恩位移定律 $\lambda_m(T)$ 黑体辐射**最大强度所对应的波长**

基尔霍夫定律 $\varepsilon(\lambda,T)$ 发射率与吸收率之间的关系

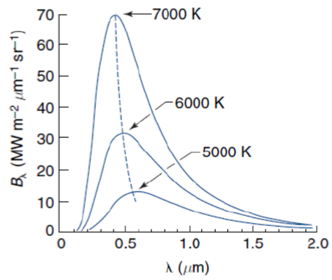
4.3.2 普朗克定律等定律

描述 一个温度为T，且处于热力平衡状态下的黑体发射辐射的**单色辐射率（单色辐出度）**

$$\boldsymbol{F_B(\lambda,T)=\frac{2\pi hc^2}{\lambda^5\left[\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right)-1\right]}}$$

其中$F_B(\lambda,T)$ 分光/单色辐出度、c 光速、$h=6.626\times10^{-34}J\cdot s$ 普朗克常数

$k=1.38\times10^{-23}\,J\cdot K^{-1}$ 波尔茨曼常数



具有所示绝对温度的黑体的发射光谱，以线性标度绘制为波长的函数。由这些光谱的集合形成的三维表面是普朗克函数。

量纲 $F_B(\lambda,T)=\frac{J\cdot s\cdot(m\cdot s^{-1})^{-2}}{m^5\left[\exp\left(\frac{J\cdot s\cdot(m\cdot s^{-1})}{J\cdot K^{-1}\cdot m\cdot K}\right)-1\right]}=\mathrm{J}\times\mathrm{m}^{-3}\times\mathrm{s}^{-1}=\mathrm{W}\times\mathrm{m}^{-2}\times\mathrm{m}^{-1}$

公式简化 $F_B(\lambda,T)=\frac{C_1}{\lambda^5[\exp(\frac{C_2}{\lambda T})-1]}$ $C_{1\,第一辐射常数}=2\pi hc^2$ $C_{2\,第二辐射常数}=\frac{hc}{k}$

普朗克函数 $B(\lambda,T)=B_\lambda(T)=\frac{1}{\pi}F_B(\lambda,T)=\frac{2hc^2}{\lambda^5\left[\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right)-1\right]}$

瑞利-琼斯分布 $B_{\lambda\to\infty}(T)=\frac{2hc^2}{\lambda^5\left[1+\frac{hc}{k\lambda T}-1\right]}=\frac{2ckT}{\lambda^4}$

长波发射辐射强度与波长 4 次方成反比

维恩分布 $B_{\lambda\to0}(T)=\frac{2hc^2}{\lambda^5\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right)}$ **短波发射强度分布**

总辐射 **推导** $F_B(T)=\int_0^\infty F_B(\lambda,T)d\lambda=\int_0^\infty\frac{2\pi hc^2}{\lambda^5\left[\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right)-1\right]}d\lambda=\cdots=\sigma T^4$ **斯蒂芬-波尔茨曼定律**

描述 黑体的总能量通量密度与黑体温度T的 4 次方成正比

公式 $\boldsymbol{F_B(T)=\int_0^\infty F_B(\lambda,T)d\lambda=\sigma T^4}$ $\sigma=5.67\times10^{-8}\,\mathrm{Jm^{-2}s^{-1}K^{-4}}$ 斯蒂芬-波尔茨曼常数

应用 比较地球和太阳的总辐射通量密度：$\frac{F_{sun}}{F_{earth}}=\left(\frac{T_{sun}}{T_{earth}}\right)^4=\left(\frac{6000}{300}\right)^4=160000$ 十六万倍

辐射可以用来探测黑体的温度：$F_B\to T_{相当黑体温度}$ 或 $T_{E有效发射温度}$

例题 1. 根据下面给出的信息计算太阳光球（即太阳可见光的最外层)的相当黑体温度T_E

已知太阳辐射通量密度F_S 为$1368\ W\ m^{-2}$ 日地距离$d=1.50\times10^{11}m$ 太阳光球半径$R_s=7.00\times10^8m$

大气层顶的太阳辐射通量密度：$F=F_s\left(\frac{R_s}{d}\right)^{-2}=1368\times\left(\frac{1.50\times10^{11}}{7.00\times10^8}\right)^2=6.28\times10^7\ Wm^{-2}$

$\sigma T_E^4 = 6.28 \times 10^7 \qquad T_E = \left(\frac{6.28\times10^7}{5.67\times10^{-8}}\right)^{1/4} = 5770K$

2. 假设**行星反照率**（即没有吸收而被反射回太空的太阳入射辐射的占比）为 0.3，计算地球的相当黑体温度（假设地球处于辐射平衡状态，即没有因辐射传输而获得或损失能量）

$F_E = \sigma T_E^4 = \frac{(1-A)F_{SE}}{4} = \frac{(1-0.3)\times1368}{4} = 239.4\ Wm^{-2} \qquad T_E = \sqrt[4]{\frac{F_E}{\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{239.4}{5.67\times10^{-8}}} = 255K$

维恩位移定律　黑体辐射**最大通量密度**的**波长**与**温度成反比**

$\boldsymbol{\lambda_m(T) = \frac{a}{T} = \frac{2897.8\mu m\cdot K}{T}}$　黑体温度 $T = 6000K$，$\lambda_m = 0.42\mu m$，为可见光

黑体温度 $T = 290K$，$\lambda_m = 10\ \mu m$，为红外线

由**维恩位移定律**确定的温度称为色温

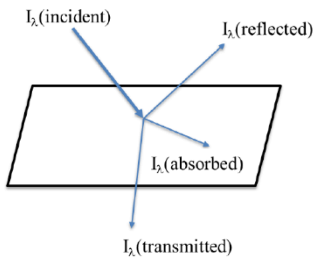
例如，太阳最大辐射波长为$0.475\mu m$，则其温度为$T = \frac{2897.8}{0.475} = 6100K$

维恩位移定律解释了为什么太阳辐射集中在光谱的可见光(0.4–0.7μm）和红外(0.7–4μm）区域而行星及其大气发射的辐射大部分限制在红外(4 μm)

处于热平衡状态下的**黑体**所发射的辐射称为**黑体辐射**,且它是一个**理想发射体**:

在**相同温度**下，它在**任何频率**发射的能量都**大于等于**其它任何物体所发射的能量

非黑体物质　与黑体不同（它能够吸收所有入射辐射），非黑体（比如气体媒介）能反射和透过辐射



发射率　**比辐射率**：$\boldsymbol{\varepsilon_{\lambda,T} = \frac{I_\lambda(发射)}{B_\lambda(T)}}$　**某一波长，发射强度与同温黑体发射强度之比**

吸收率　$\boldsymbol{A_\lambda} = \frac{I_\lambda(被吸收)}{I_\lambda(入射)}$　*absorbed*　**反射率**　$\boldsymbol{R_\lambda} = \frac{I_\lambda(被反射)}{I_\lambda(入射)}$　*reflected*

透过率　$\boldsymbol{T_\lambda} = \frac{I_\lambda(透过)}{I_\lambda(入射)}$　*transmitted*

关系　① $\boldsymbol{A_\lambda + R_\lambda + T_\lambda = 1}$　**吸收+反射+透过=1**

② 如果物体不透明，则透过率为零 $T_\lambda = 0$，故$A_\lambda + R_\lambda = 1$

基尔霍夫定律

描述　一种媒介吸收某一特定波长的辐射,同时也以同样波长发射辐射。发射的速率是温度和波长的函数

公式　在热力学平衡状态下，一种媒介在**某一特定波长**的**发射率等于其吸收率**，即 $\varepsilon_\lambda = A_\lambda$

① 对于黑体辐射，有：$\varepsilon_\lambda = A_\lambda = 1$

② 非黑体的特征是不完全吸收和发射，可以描述为：$\varepsilon_\lambda = A_\lambda < 1$

意义　给出了发射率与吸收率，以及黑体辐射与非黑体辐射之间的关系