

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 辐射

太阳辐射的 30%被直接反射回太空。地球反照率: 0.3

- 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**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

- 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

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{E} &= 0 & \nabla \times \vec{E} &= \varepsilon \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0 & \nabla \times \vec{B} &= -\mu \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\end{aligned}$$

推导

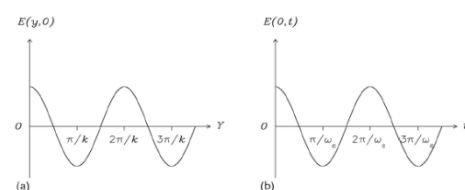
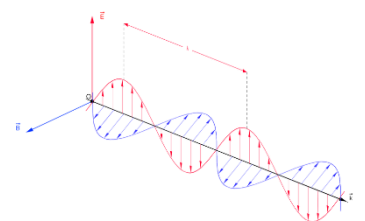
$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \nabla \times \left(-\mu \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) = -\mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \vec{B}) = -\varepsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$
$$\nabla \times (\nabla \times \vec{B}) = \nabla (\nabla \cdot \vec{B}) - \nabla^2 \vec{B} \quad \text{两式相减得: } \nabla^2 \vec{E} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

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

描述 使用频率 f , 波长 λ , 波数 ν 来描述

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

电磁波示意, 红色电波, 蓝色磁波



左侧时间为零, 右侧位置为零

单位 波长 $1\text{cm} = 10^{-2}\text{m}$ $1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$ $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$ $1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$ (ångström)
 频率 $1\text{Hz} = 1\text{s}^{-1}$ $1\text{GHz} = 10^9\text{Hz} = 10^9\text{s}^{-1}$
 波数 cm^{-1}

例题 1. 计算波长为 $10\mu\text{m}$ 的辐射的频率和波数

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

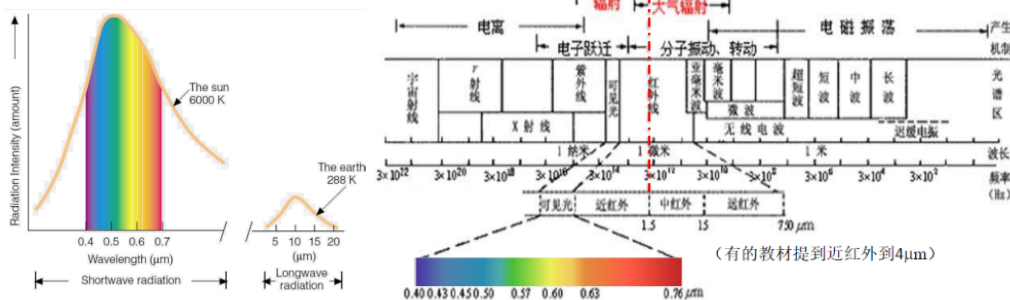
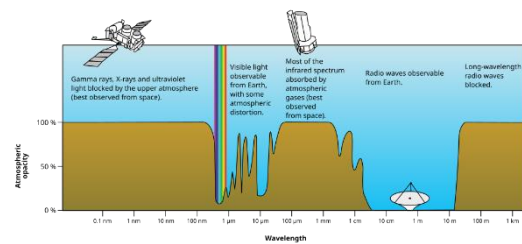
2. 如果波长增加到 $10.1\mu\text{m}$, 波数将变化多少?

$$\nu = \frac{1}{10.1 \times 10^{-6} \text{m}} = 990 \text{cm}^{-1}$$

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 ($< 4\mu\text{m}$)、长波 ($> 4\mu\text{m}$)) 的贡献

微波辐射 $100\mu\text{m} - 10\text{cm}$ 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 $0.40 - 0.76\mu\text{m}$ 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 $0.20 - 4\mu\text{m}$ 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 $4 - 100\mu\text{m}$ 长波地球辐射, 包含远红外, 地球黑体约为 288K
 红外辐射 $0.76 - 100\mu\text{m}$ 包含近红外+远红外



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

示例 日地距离 $d = 1.5 \times 10^8 \text{km}$ 太阳半径为 $R_{\odot} = 7.0 \times 10^5 \text{km}$, 从地球看太阳的立体角为:

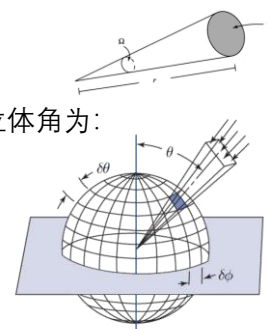
$$\Omega = \frac{\pi R_{\odot}^2}{d^2} = \frac{3.14 \times (7.0 \times 10^5)^2}{(1.5 \times 10^8)^2} = 6.76 \times 10^{-5} \text{Sr}$$

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

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

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 t 到 $t + dt$ 通过一个面积为 dA 的表面的能量为 dE (单位: 焦耳)

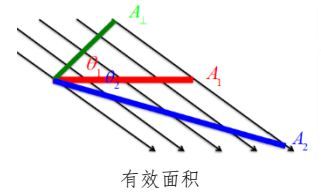
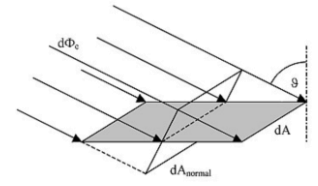
辐射通量 Φ $d\Phi = \frac{dE}{dt}$ (W) 单位时间通过的能量

辐照度 F $dF = \frac{d\Phi}{dA} = \frac{dE}{dt dA}$ ($W \cdot m^{-2}$) 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 I $dI = \frac{dF}{\cos \theta d\Omega} = \frac{dE}{dt (\cos \theta dA) d\Omega} = \frac{dE}{dt dA_{\perp} d\Omega}$ ($J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot Sr^{-1}$)

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 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



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 Φ_{λ} $\Phi_{\lambda} = \frac{d\Phi}{d\lambda} = \frac{dE}{dt d\lambda}$

光谱/单色辐照度 F_{λ} $F_{\lambda} = \frac{dF}{d\lambda} = \frac{d\Phi}{dA d\lambda} = \frac{dE}{dt dA d\lambda}$

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** $F_{\lambda} = \int_{2\pi} I_{\lambda} \cos \theta d\Omega$

光谱/单色辐亮度 I_{λ} $I_{\lambda} = \frac{dI}{d\lambda} = \frac{dE}{dt (\cos \theta dA) d\Omega d\lambda} = \frac{dE}{dt dA_{\perp} d\Omega d\lambda}$ 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 Φ_{ν} $\Phi_{\nu} = \frac{d\Phi}{d\nu} = \frac{dE}{dt d\nu}$

光谱/单色辐照度 F_{ν} $F_{\nu} = \frac{dF}{d\nu} = \frac{d\Phi}{dA d\nu} = \frac{dE}{dt dA d\nu}$

光谱/单色辐亮度 I_{ν} $I_{\nu} = \frac{dI}{d\nu} = \frac{dE}{dt (\cos \theta dA) d\Omega d\nu} = \frac{dE}{dt dA_{\perp} d\Omega d\nu}$ 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？

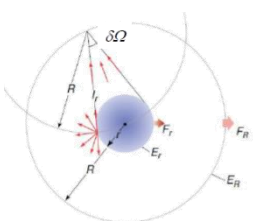
$$F = \int_{2\pi} I \cos \theta d\Omega = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} I \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi = \pi I$$

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 $1368 W m^{-2}$ 。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 $R_s = 7.00 \times 10^8 m$ ，日地距离 $d = 1.50 \times 10^{11} m$)

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 $\frac{\delta\Omega}{2\pi} = \frac{\pi R_s^2}{2\pi d^2}$ $\delta\Omega = 6.84 \times 10^{-5} Sr$

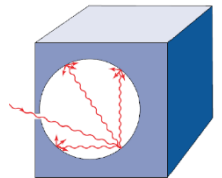
$$I_s = \frac{F_s}{\delta\Omega} = \frac{1368}{6.84 \times 10^{-5}} = 2.00 \times 10^7 W m^{-2} Sr^{-1}$$



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 斯特藩-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
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 时处于热平衡状态的黑体发射的光谱辐射
斯蒂芬-玻尔兹曼定律	$F_B(T)$ 一个在温度 T 时处于热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



黑体示意图

4.3.2 普朗克定律等定律

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

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

其中 $F_B(\lambda, T)$ 分光/单色辐出度、 c 光速、 $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 普朗克常数
 $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ 波尔兹曼常数

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

公式简化
$$F_B(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]}$$
 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
$$B_{\lambda \rightarrow \infty}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left[1 + \frac{hc}{k\lambda T} - 1 \right]} = \frac{2ckT}{\lambda^4}$$

长波发射辐射强度与波长 4 次方成反比

维恩分布
$$B_{\lambda \rightarrow 0}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right)}$$
 短波发射强度分布

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

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
$$F_B(T) = \int_0^\infty F_B(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4$$
 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Jm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{K}^{-4}$ 斯蒂芬-玻尔兹曼常数

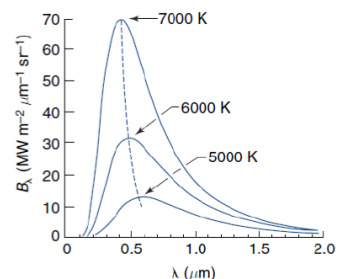
应用 比较地球和太阳的总辐射通量密度： $\frac{F_{\text{sun}}}{F_{\text{earth}}} = \left(\frac{T_{\text{sun}}}{T_{\text{earth}}} \right)^4 = \left(\frac{6000}{300} \right)^4 = 160000$ 十六万倍

辐射可以用来探测黑体的温度： $F_B \rightarrow T_{\text{相当黑体温度}}$ 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 $d = 1.50 \times 10^{11} \text{ m}$ 太阳光球半径 $R_s = 7.00 \times 10^8 \text{ m}$

大气层顶的太阳辐射通量密度： $F = F_s \left(\frac{R_s}{d} \right)^2 = 1368 \times \left(\frac{1.50 \times 10^{11}}{7.00 \times 10^8} \right)^2 = 6.28 \times 10^7 \text{ W m}^{-2}$



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。

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

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）

$$F_E = \sigma T_E^4 = \frac{(1-A)F_{SE}}{4} = \frac{(1-0.3) \times 1368}{4} = 239.4 \text{ Wm}^{-2} \quad T_E = \sqrt[4]{\frac{F_E}{\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{239.4}{5.67 \times 10^{-8}}} = 255K$$

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

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

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

由维恩位移定律确定的温度称为色温

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

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(0.4–0.7 μm) 和红外(0.7–4 μm) 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

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

非黑体物质

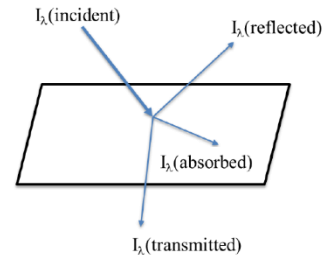
发射率 比辐射率: $\epsilon_{\lambda,T} = \frac{I_{\lambda}(\text{发射})}{B_{\lambda}(T)}$ 某一波长, 发射强度与同温黑体发射强度之比

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

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

关系 ① $A_{\lambda} + R_{\lambda} + T_{\lambda} = 1$ 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 $\epsilon_{\lambda} = A_{\lambda}$

① 对于黑体辐射, 有: $\epsilon_{\lambda} = A_{\lambda} = 1$

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

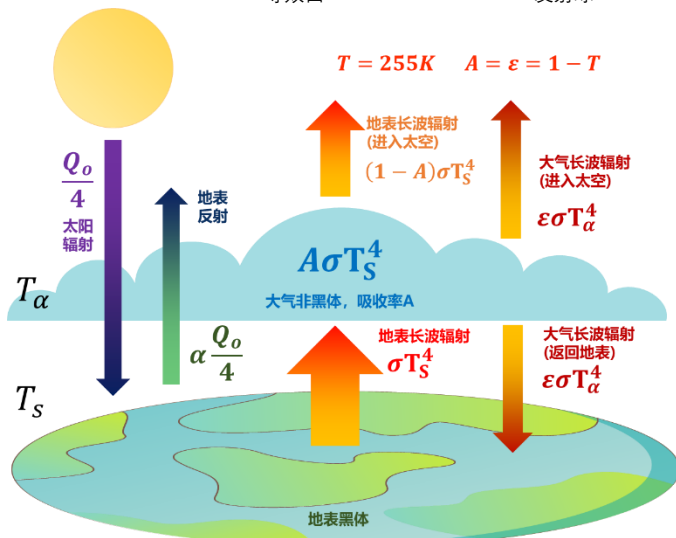
意义

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

4.3.3 地球系统辐射平衡

到达地球太阳辐照度: $Q_o = 1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 地表反照率: $\alpha = 0.3$ 地球辐照度: $Q_e = \sigma T^4$

$$\text{则有地表温度 } \pi R^2_{\text{等效面}} (1 - \alpha) Q_o = 4\pi R^2_{\text{发射球}} Q_e \Rightarrow \frac{(1-\alpha)Q_o}{4} = \sigma T^4 \Rightarrow T = \sqrt[4]{\frac{(1-\alpha)Q_o}{4\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{(1-0.3)1367}{4 \times 5.67 \times 10^{-8}}} = 255K$$



$$\text{大气能量平衡: } \sigma T_s^4 - (1 - A)\sigma T_s^4 = \epsilon \sigma T_s^4 = 2\epsilon \sigma T_a^4$$

$$\text{地表能量平衡: } (1 - \alpha) \frac{Q_o}{4} + \epsilon \sigma T_a^4 = \sigma T_s^4$$

$$\text{联立可解: } T_s^4 = \frac{1-\alpha}{1-\epsilon/2} \frac{Q_o}{4\sigma} \quad T_s^4 = 2T_a^4$$

$$T_{s\text{地表}} = 288K \quad T_{a\text{大气}} = 242K$$

温室效应可以通过更改 ϵ 实现, ϵ 越大, 地表温度越高

4.4 辐射传输基础

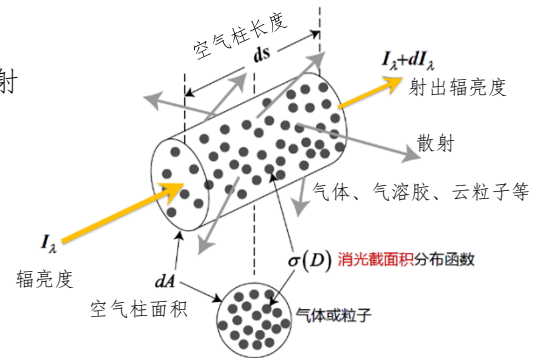
沿某一方向传播的辐射在介质中传播时，会与其中的物体发生相互作用而减弱或加强，探究引起变化的因素和原因。

4.4.1 辐射传输基本过程

基本过程 **发射**：其它形式能量变为辐射能 温室气体发射红外辐射
吸收：辐射能变为其它形式能量 温室气体吸收可见光
散射：能量传输改变方向，不改变能量大小

衰减/消光 主要包括**吸收和散射**

增强项 主要包括**发射和散射**（其他方向的光散射到目标方向）



4.4.2 辐射传输方程

4.4.2.1 消光 extinction

消光 用来描述电磁辐射被路途中的物质（气体和尘埃）**吸收和散射**的过程。狭义仅指可见光减弱。

影响因素

- ① 沿着光线方向在某一**点**的**辐射强度 I_λ** 强度越强，吸收越多
- ② 吸收散射的**气体/或粒子的局地浓度 ρ 或 $N\sigma$** 浓度越大，吸收越多
- ③ 吸收体或散射体的**效率 k_λ** 与光学、化学特性有关
- ④ 沿着光线方向穿过的**路径长度 ds** 路径越长，吸收越多

平行束太阳辐射通过大气薄层时的消光

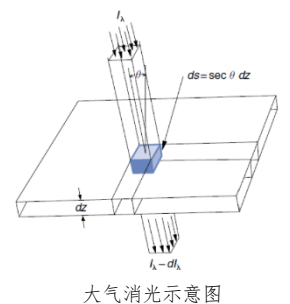
大气粒子成分 $dI_\lambda = -I_\lambda K_\lambda N \sigma ds$ $ds = \sec \theta dz$
 N 单位体积空气中的粒子数 σ 每个粒子的截面积
 K_λ : 无量纲散射或吸收系数 ds : 沿入射辐射路径的差分光程

气体大气成分 $dI_\lambda = -I_\lambda \rho k_\lambda ds$

ρ 气体密度 k_λ : 质量吸收系数(截面) 单位为 $m^2 kg^{-1}$

消光系数 $K_\lambda N \sigma$ ρk_λ 体积散射系数、体积吸收系数或体积消光系数, 单位为 m^{-1}

$K_\lambda(\text{消光}) = K_\lambda(\text{散射}) + K_\lambda(\text{吸收})$



4.4.2.2 消光截面 Exinction Cross Section

概述 辐射与物质的相互作用是通过消光截面来量化的，消光截面为**某一物体**呈现在辐射场中的**面积**。媒介中每一个物体（如一个气溶胶粒子、一个气体分子、或一个云滴）的消光截面都必须给定。

截面积 每一个目标物的截面积由 $\sigma(D)$ 表示（其中 D 表示粒子大小，比如直径）

平均截面积: $\bar{\sigma} = \frac{1}{N} \int_{D_{min}}^{D_{max}} \sigma(D') n(D') dD' = \frac{\int_{D_{min}}^{D_{max}} \sigma(D') n(D') dD'}{\int_{D_{min}}^{D_{max}} n(D') dD'}$

组成 消光截面为吸收截面与散射截面之和 $\sigma(D) = \sigma_{abs}(D) + \sigma_{sca}(D)$

辐射衰减 与辐射强度、衰减能力、物质密度、通过距离这四个因素成正比。

$dI_\lambda = -I_\lambda \rho k_\lambda ds$ 其中 k_λ 为**质量消光截面(系数)**，表示**单位质量**的物体所**吸收和散射**的辐射能相当于对应面积内从入射辐射场中所**截获**的辐射能 (m^2/kg)

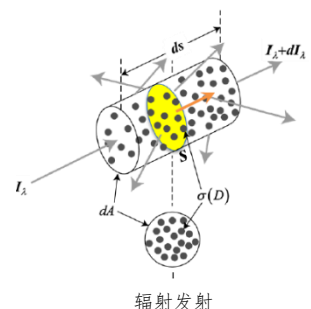
4.4.2.3 辐射传输方程

发射源 $dI_\lambda = j_\lambda \rho ds$ j_λ **源函数系数** 具有与质量消光截面 (k_λ) 和辐亮度 (I_λ) 乘积相同的物理意义。刻画由于**物质发射辐射**或其他方向的辐射被散射到该方向而加强的辐射。

方程 $dI_\lambda = -k_\lambda \rho I_\lambda ds + j_\lambda \rho ds$ 同时定义**源函数**: $J_\lambda = \frac{j_\lambda}{k_\lambda}$

$$\frac{dI_\lambda}{k_\lambda \rho ds} = -I_\lambda + J_\lambda$$

注意 辐射传输方程的最一般形式（未添加任何坐标系，是沿辐射传播的方向）。该通用方程是讨论任何辐射传输过程的基础）



4.4.3 比尔朗伯定律

概述 光吸收的基本定律，适用于所有的电磁辐射和所有的吸光物质

条件 对于**无散射和发射**的媒介(例如通过地球大气的太阳短波辐射) $J_\lambda = 0 \quad \frac{dI_\lambda}{k_\lambda \rho ds} = -I_\lambda$

令 $s = 0$ 时入射辐射强度 $I_\lambda(0)$ ，在任何一点 s ，辐射强度为 $I_\lambda(s) = I_\lambda(0)e^{-\int_0^s k_\lambda \rho ds}$

假设媒介是均匀的，即 k_λ 不随 s 变化，且定义 $u = \int_0^s \rho ds$ 为**等效面质量**，可推得：

方程 $I_\lambda(s) = I_\lambda(0)e^{-k_\lambda u}$ **e指数衰减** 该定律与方向无关，因此也可用于**通量或辐照度**

透过率 $T_\lambda = \frac{I_\lambda(s)}{I_\lambda(0)} = e^{-k_\lambda u} = e^{-\tau}$ **光学厚度**: $\tau = k_\lambda u$ 无量纲

吸收率 $A_\lambda = 1 - T_\lambda = 1 - e^{-k_\lambda u}$

例题 有100m厚的大气吸收层，吸收气体平均密度 0.1 kg/m^3 ，当与气层法向成 60° 角的平行辐射穿过气层时，求波长为 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 (其质量吸收系数分别为 10^{-3} 、 10^{-1} 、 $1 \text{ m}^2/\text{kg}$) 的辐射波的光学厚度、透过率、吸收率。

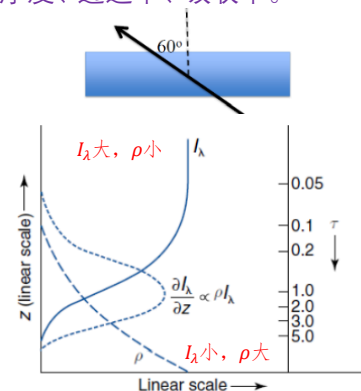
在辐射传输的路径上，吸收气体的质量为： $u = \sec \theta \int_{z_B}^{z_T} \rho dz$

其中 z_B 和 z_T 为吸收层的底高和顶高。代入得： $u = 2 \times 0.1 \times 100 = 20 \text{ kg m}^{-2}$

假设 k_λ 在层结中是均匀的： $T_\lambda = e^{-\tau_\lambda} = e^{-k_\lambda u}$ $\tau_\lambda = k_\lambda u$ $\alpha_\lambda = 1 - e^{-k_\lambda u}$

	$\lambda = \lambda_1$	$\lambda = \lambda_2$	$\lambda = \lambda_3$	
τ_λ	0.02	2	20	
T_λ	0.98	0.135	2×10^{-9}	同一大气对不同波长的光吸收能力不同
α_λ	0.02	0.865	1.00	

对于向下垂直传输的辐射，在 $\tau_\lambda = 1$ 层附近衰减最快，通常称为**单位光学厚度层**



4.4.4 施瓦氏方程

条件 考虑一个处于局地热力学平衡状态的非散射性媒介。

一束强度为 I 的辐射通过它时要同时经历**吸收和发射**过程 (类似温室气体)

这是**地球和大气发射的热红外辐射传输**的情形

基本背景 $\frac{dI_\lambda}{k_\lambda \rho ds} = -I_\lambda \text{ 衰减} + B_\lambda(T) \text{ 发射}$

推导 定义**光学厚度** τ : 由光路上单位横截面上所有物质产生的总消光

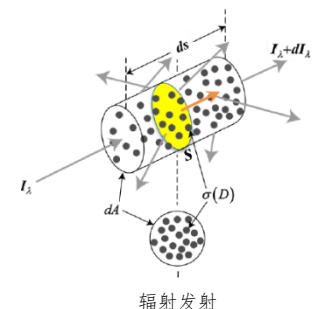
$$\tau(s) = \int_0^s k_\lambda \rho ds' \quad d\tau(s) = k_\lambda \rho ds \quad \text{回代公式: } I_\lambda(s) + \frac{dI_\lambda(s)}{d\tau(s)} = B_\lambda[T(s)]$$

$$\text{乘以 } e^{\tau(s)} d\tau(s): \quad I_\lambda(s) e^{\tau(s)} d\tau(s) + e^{\tau(s)} dI_\lambda(s) = B_\lambda[T(s)] e^{\tau(s)} d\tau(s) \Rightarrow$$

$$d[I_\lambda(s) e^{\tau(s)}] = B_\lambda[T(s)] e^{\tau(s)} d\tau(s) \Rightarrow \int_0^s d[I_\lambda(s') e^{\tau(s')}] = \int_0^s B_\lambda[T(s')] e^{\tau(s')} d\tau(s') \Rightarrow$$

$$I_\lambda(s) e^{\tau(s)} - I_\lambda(0) = \int_0^s B_\lambda[T(s')] e^{\tau(s')} d\tau(s') \quad \text{最终得到方程:}$$

$$I_\lambda(s) = I_\lambda(0) e^{-\tau(s)} + \int_0^s B_\lambda[T(s')] e^{-[\tau(s) - \tau(s')]} d\tau(s')$$



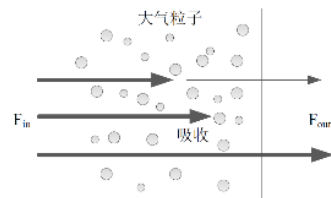
方程理解 ① $I_\lambda(0)e^{-\tau(s)}$ 为**消光项**，与光学厚度有关，表示由 $s = 0$ 入射，经过介质吸收衰减后剩余的辐射强度

② 后一项为**发射项**， $e^{-[\tau(s) - \tau(s')]}$ 表示发射的辐射也有消光， $e^{\tau(s')}$ 为真正增强的部分
表示介质发射的辐射 $B_\lambda[T(s')]$ 经过剩余路径 $e^{-[\tau(s) - \tau(s')]}$ 到达 s 处的累加积分。

③ 若传播路径上的**温度、光学厚度**已知，便可利用该式得到任意位置的辐射强度。

4.5 吸收

地球吸收情况 主要为地面发射的长波辐射的吸收，短波较少



4.5.1 吸收光谱

4.5.1.1 吸收

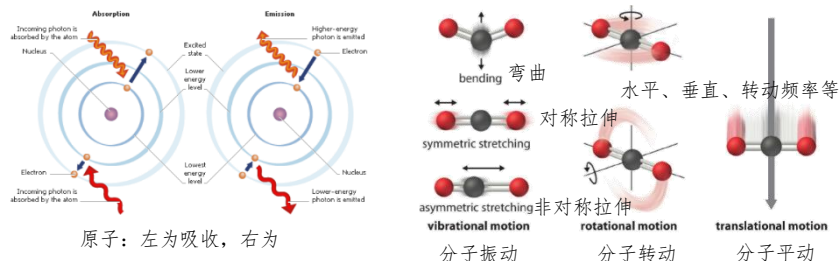
定义 辐射通过介质时，一部分能量被介质吸收而转化为热能或者内能，并且深入介质越深，辐射强度衰减越大，这就是介质对辐射的吸收现象

投射到介质上面的辐射能中的一部分被转变为物质本身的内能或其它形式的能量

介质 大气中的**气体分子、气溶胶和云粒子**均有可能吸收**特定波长**的辐射，本节只讨论气体分子的。
水汽是最重要的吸收气体，其次是二氧化碳、臭氧等其他分子。

特性 大气成分对辐射具有**选择吸收的特性**（不同分子对不同波长辐射吸收不同），是由**分子和原子结构**及其所处运动状态决定的

微观模型 **吸收发射模型**：原子的能级跃迁
分子的振动、转动和平移
发射出各种不同能量的光



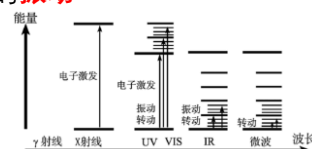
4.5.1.2 光谱

单个分子 气体分子或原子内的能量构成： $E = E_e + E_v + E_r$
 E_e 电子围绕原子核运动的能量（**轨道能量**） E_v 原子在其分子平均位置的**振动**
 E_r 分子绕其质量中心**转动**的能量

光谱 发射和吸收的**辐射谱**是非连续性的，构成原子的**线光谱**和分子的**带光谱**

$$\Delta E = h \cdot f$$
$$f = \frac{(\Delta E_e + \Delta E_v + \Delta E_r)_{\text{总能量}}}{h} = f_e + f_v + f_r$$
$$\nu_{\text{波数}} = \frac{\Delta E_e + \Delta E_v + \Delta E_r}{hc} = \nu_e + \nu_v + \nu_r$$

辐射频率(波数)与能量变化的关系



电子能级	ΔE_e	ΔE_v	ΔE_r
能量变化/eV	1~20	0.05~1	10^{-4} ~0.05
吸收线中心波长/ μm	0.062~1.24	1.24~24.8	24.8~12400.8
吸收线中心波数/ cm^{-1}	161290~8064.5	8064.5~403.2	403.2~0.8064

能量情况 电子轨道能量**>>**振动能量变化**>>**转动能量变化，主要为短波辐射

实际大气吸收谱中，振动带内存在转动谱线，而转动和振动能量的变化又常伴随着电子能级跃迁
可见伽马射线主要由电子激发发射能量，微波等长波发射和吸收的波长也变低、变多

4.5.1.3 光化反应和光致电离

概述 除分子选择吸收和发射辐射外，原子和分子还有**光化反应和光致电离**两种途径吸收和发射电磁辐射

光化反应 由光照射而引起的化学反应

大气的大多数光化反应都需要有**紫外辐射和可见光辐射** $O_2 + hf_{\text{紫外线}} \xrightarrow{\lambda < 0.2424 \mu\text{m}} 2 O_{\text{原子}}$

实例：近年来颗粒物治理得到改善，臭氧浓度却升高，有光化学烟雾等现象

光致电离效应 当光子的能量等于或大于原子电离能时，中性原子或分子**失去电子成为正离子**的过程
吸收**更短波长**的光子，引起电离的辐射波长通常 $< 0.1 \mu\text{m}$ (100nm)

4.5.1.4 吸收线 Absorption Line

分子能量 $E_{\text{mol}} = E_{\text{tra}} \text{平移能量} + E_{\text{nrot}} \text{旋转能量} + E_{\text{nvib}} \text{振动能量} + E_{\text{norb}} \text{电子轨道能量}$ 相关能量(以n为下标的)为量化表达

在热力学第一定律的讨论中，我们只考虑了 **E_{tra} 平移能量**（含有分子动能+分子内能）的变化

E_{norb} 也称电子能量或电子势能，由电子绕原子核运动的轨道状态决定。

E_{nvib} 是组成分子的原子相对于平衡位置振动的能量。 E_{nrot} 是围绕通过分子重心的轴旋转的能量。

电磁辐射 光(电磁辐射)是由**光子**组成的，光具有波粒二象性，每一个光子都有特定的能量，该能量 $E = hf$
一个光子携带的能量与辐射的波长成反比

吸收线 只有当**一光子的能量与能够发生能量转换的两个分子能量状态之间的能量相对应**时，光子才能被吸收

相类似，由分子发射的**光子能量**应该与能够发生能量转换的**分子能量层相对应**。分子以**特定的不连续波长吸收与发射辐射**，与**量子化的能量层**之间的能量转换相对应，称之为吸收线和发射线。

$$E_{\text{photon}} = \Delta E_{\text{mol},n,m} = E_{\text{mol},m} - E_{\text{mol},n} \quad m, n \text{ 表示两个不同能级}$$

能量关系

对于气体分子，一般有 $E_{n_{\text{rot}}} \text{转动} < E_{n_{\text{vib}}} \text{振动} < |E_{n_{\text{orb}}}| \text{轨道}$

能级跃迁：紫外、可见、近红外波段 **UV, VIS, NIR**

振动能级跃迁：红外波段 **IR**

转动能级跃迁：红外、微波波段 **FIR, MV**

同时，振动、转动能级跃迁通常会同时发生，形成**振动-转动吸收带**

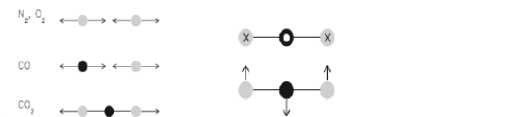
电子轨道能量吸收序列

固定能级之间的**每一次量子跃迁**都会导致发射或吸收某一**特定频率或波长的辐射**

振动能量吸收序列

量子化的振动能量： $E_{\text{vib},n} = h\nu_{\text{vib}}(n + 1/2)$

振动转换的选择性规则为： $n = \pm 1$



4.5.2 谱线增宽

自然增宽

量子不确定性使能级具有一定的宽度造成谱线本身也必然具有一定的宽度

压力加宽

也叫**碰撞加宽**，得到 **Lorentz 线型**

因**粒子频繁碰撞**导致发射辐射的位相发生**无规则变化**，使谱线加宽

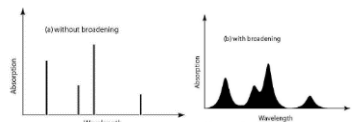
其主要随**P**气压变化，由于分子密度变大，分子不停受到其他分子碰撞扰动，产生无规则变化

多普勒增宽

由作热运动的粒子发射辐射的**多普勒频移**引起。与**T**有关，与**P**无关。

内容

由于谱线增宽，大气吸收线转变为吸收光谱



增宽现象

4.5.2.1 洛伦兹增宽 (压力增宽)

公式

$$k_{\nu} = \frac{S}{\pi} \frac{\alpha_L}{(\nu - \nu_0)^2 + \alpha_L^2} = S f_L(\nu - \nu_0)$$

k_{ν} 吸收系数 ν_0 某一理想单色谱线波数

α_L 谱线在最大值一半处的半宽 $f_L(\nu - \nu_0)$ 表示谱线的形状因子

谱线强度

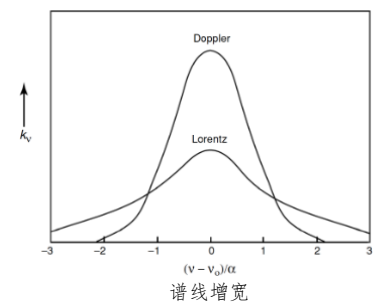
$$\int_0^{\infty} k_{\nu} d\nu = S$$

谱线半宽

$$\alpha_L = \alpha_0 \left(\frac{p}{p_0} \right) \left(\frac{T_0}{T} \right)^n$$

描述

在**~20 km**以下，**压力增宽是决定吸收谱线宽度的主导因子**，而50 km以上，由于那里的分子碰撞频率大为减少，多普勒增宽是主要决定因子。



谱线增宽

4.5.2.2 多普勒增宽

推导

假设在一种非常稀有的气体中没有碰撞增宽，处于某一量子状态的分子以波数 ν_0 向外发射辐射

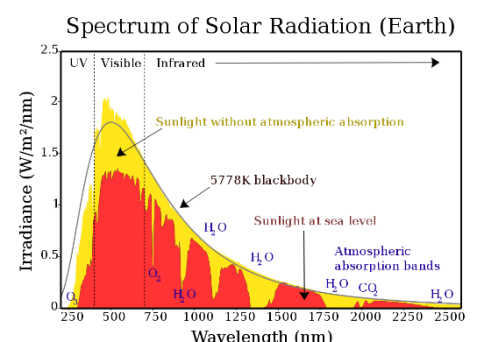
如果该分子在光线方向具有速度分量 v ，那么波数就变为： $\nu = \nu_0(1 \pm v/c)$

公式

$$k_{\nu} = \frac{S}{\alpha_D \sqrt{\pi}} \exp \left[-\left(\frac{\nu - \nu_0}{\alpha_D} \right)^2 \right] = S f_D(\nu - \nu_0)$$

$\alpha_D = \nu_0 (2KT/mc^2)^{1/2}$ 为谱线多普勒宽度的一种量度

谱线半宽为： $\alpha_D \sqrt{\ln 2}$



4.5.3 地球大气吸收带

4.5.3.1 大气成分的选择吸收

氮气氧气

电荷对称分布，不具有电偶极子结构，没有振动或转动谱
吸收和发射谱由电子轨道跃迁造成，位于紫外和可见光辐射区
所以太阳辐射中大部分能量最高的部分被氮氧气体吸收

氧气 O_2

舒曼-龙格吸收带 $0.125\sim 0.2\ \mu m$ 赫兹堡吸收带 $0.24\sim 0.26\ \mu m$

在可见光波段的吸收带较弱，主要在紫外部分

但因 $< 250nm$ 的太阳辐射能量不到0.2%，所以对太阳辐射削弱不大
但对高层大气光化学过程、臭氧层形成破坏影响很大

臭氧 O_3

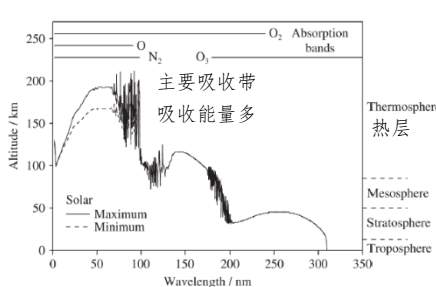
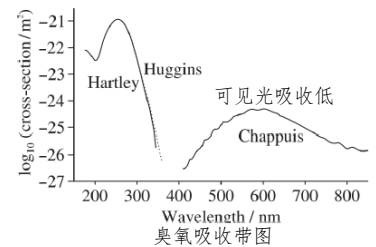
哈特来带最强 $0.22\sim 0.30\ \mu m$ 哈金斯带较弱 $0.32\sim 0.36\ \mu m$

可见光吸收较弱 还有红外区： $4.7\ \mu m$ 、 $9.6\ \mu m$ 和 $14.1\ \mu m$

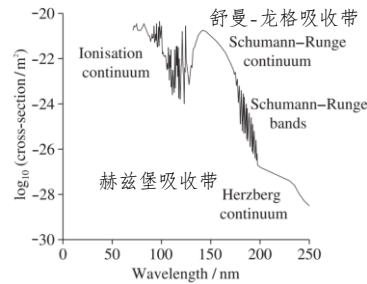
臭氧层约吸收太阳辐射能量的2%（紫外能量占比较低）

Molecule	Arrangement	Permanent Dipole Moment
N_2		No
O_2		No

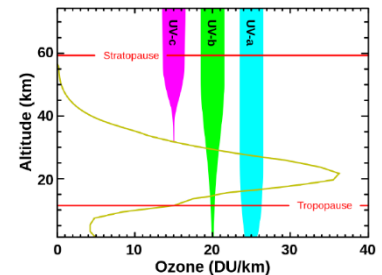
没有振动、转动



对于垂直入射太阳辐射单位光学厚度的高度



氧气吸收带图



臭氧层吸收不同紫外线

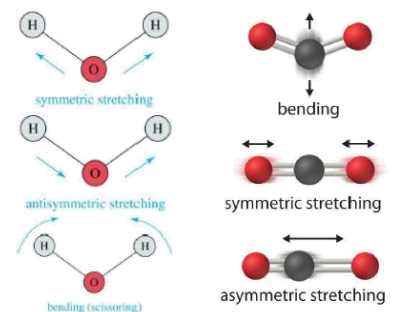
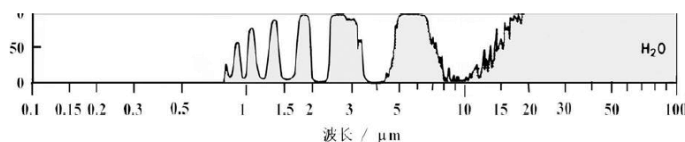
水汽 H_2O

是大气中最重要的吸收气体，位于红外辐射区、吸收约20%太阳辐射

振动能量：对称拉伸 $\lambda = 2.73\ \mu m$ 反对称拉伸 $\lambda = 2.66\ \mu m$ 扭曲 $\lambda = 6.25\ \mu m$

转动能量：转动 $\lambda > 12\ \mu m$

液态水(云)：吸收带与气态对应，向长波方向移动



二氧化碳

对称拉伸无吸收 反对称拉伸 $4.3\ \mu m$ 扭曲 $15\ \mu m$

吸收带主要分布于 $> 2\ \mu m$ 的红外区

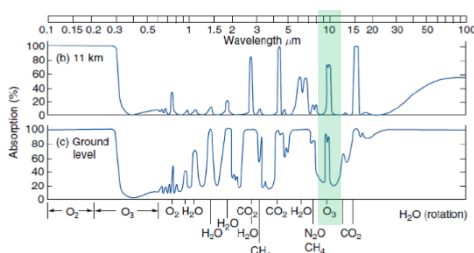
较强中心为 $2.7\ \mu m$ 、 $4.3\ \mu m$ 和 $15\ \mu m$

由于 $2.7\ \mu m$ 带与水汽吸收带重叠，且太阳辐射在 $2.7\ \mu m$ 处已很弱，所以 CO_2 对太阳辐射吸收一般不专门讨论，但对于长波辐射 $15\ \mu m$ 附近的吸收带最为重要。

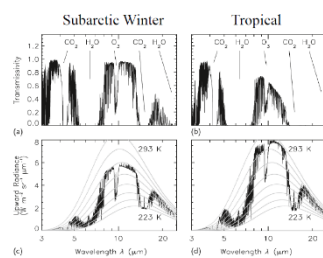
4.5.3.2 大气吸收光谱

内容

大气吸收具有选择性。根据基尔霍夫定律：吸收光谱=发射光谱



不同波长的吸收情况(地面与高空)



不同季节、地区的吸收不同

大气窗口

可见光窗区： $0.4\sim 0.76\ \mu m$ ，大气窗区： $8\sim 12\ \mu m$

观察臭氧的良好位置

