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

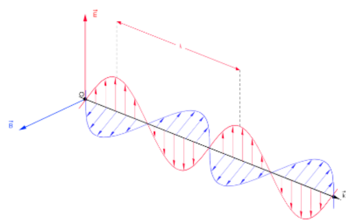
1. **麦克斯韦方程组** 1831-1879
2. 瑞利 1842-1919 因其对最重要气体密度的研究和氩气的发现，获得 1904 诺贝尔奖
   瑞利散射：解释了天空蓝色的成因(分子对太阳辐射的散射)
3. 维恩 1864-1928 发现辐射加热定律，获得 1911 诺贝尔奖
   维恩定律：一个确定黑体辐射分布的经验定律
4. 普朗克 1858-1947 发现量子，**普朗克定律**
5. 爱德华·普塞尔 1912-1997 核磁精确观测方法,离散偶极子近似 DDA：大气粒子单次散射特性
6. 萨婆罗门扬·钱德拉塞卡 1910-1995 行星结构和演变、**辐射传输**的奠基人

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

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

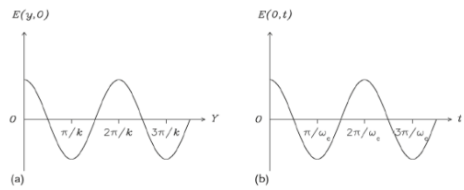
$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \qquad \nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$$

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

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

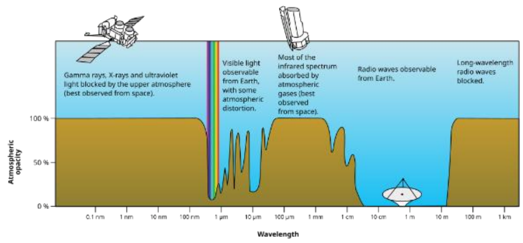
波数 cm^{-1}

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

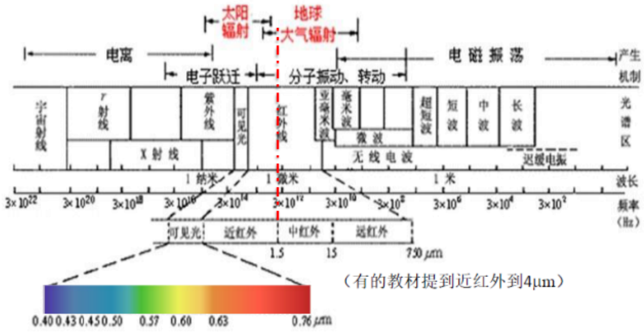
描述 ① 电磁辐射可以视为以光速传播的**波包**

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

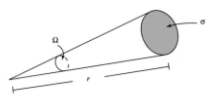


4.2 辐射参量

4.2.1 立体角

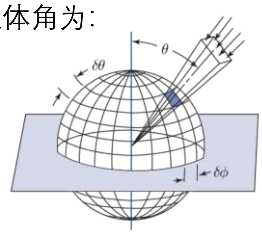
立体角 几何中立体角是二维角度在三维空间的表现，即在某一点所正对的目标，是对处于该点观察者所观察物体大小的量度。立体角可以表达为**立体角所正对的球面面积与半径平方之比**。

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$+\theta = \pi/2$

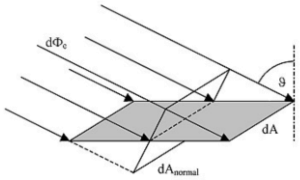
示例 通过对立体角积分，计算由**水平面上一个点观察到的天空所正对着的立体角**的弧度

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

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）

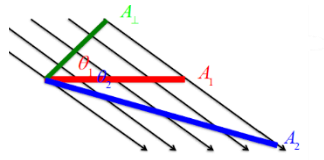
辐射通量Φ $d\Phi=\frac{dE}{dt}$ （W） **单位时间通过的能量**

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

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



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Φ_λ $\Phi_\lambda=\frac{d\Phi}{d\lambda}=\frac{dE}{dtd\lambda}$

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

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

光谱/单色辐亮度I_λ $I_\lambda=\frac{dI}{d\lambda}=\frac{dE}{dt(\cos\theta dA)d\Omega d\lambda}=\frac{dE}{dtdA_{\perp}d\Omega d\lambda}$ 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Φ_ν $\Phi_\nu=\frac{d\Phi}{d\nu}=\frac{dE}{dtd\nu}$

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

光谱/单色辐亮度I_ν $I_\nu=\frac{dI}{d\nu}=\frac{dE}{dt(\cos\theta dA)d\Omega d\nu}=\frac{dE}{dtdA_{\perp}d\Omega d\nu}$ 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 $I_\nu=\frac{dI}{d\nu}=\frac{dI}{d\lambda}\left|\frac{d\lambda}{d\nu}\right|=I_\lambda\frac{1}{\nu^2}=I_\lambda\lambda^2$

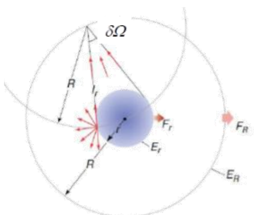
波段辐射强度 $Q=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}Q_\lambda d\lambda$ $I=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}I_\lambda d\lambda$

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 $\frac{\delta\Omega}{2\pi}=\frac{\pi R_s^2}{2\pi d^2}$ $\delta\Omega=6.84\times10^{-5}Sr$

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