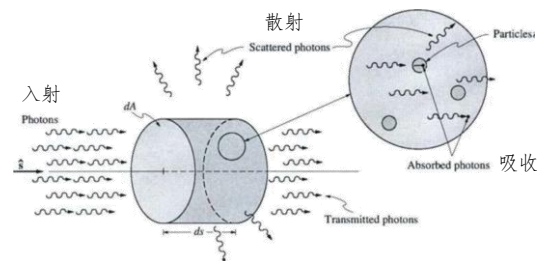


# 第六章 大气的辐射特性



## 6.1 消光、散射和吸收

### 6.1.1 描述消光的物理量

**引入实验** 利用高射投影仪演示辐射透射消光过程：(a) 三个盛有水的器皿，正好处于投影仪光源照射的位置。透明液体是水，黑色液体是稀释的墨汁（吸收介质），白色液体是稀释的牛奶（散射介质）。(b) 三个器皿的投影照片：牛奶和墨汁的黑色阴影表明吸收和散射在衰减透射辐射是有效相等的。

**机制分析** 散射和吸收机制：**透射消光 Extinction = 吸收 + 散射**

**稀疏介质** 粒子间距需要大于数倍的波长，由此消光截面可以直接相加。 大气适用，某些医学领域不适用。

**特性物理量** 对于消光过程，定义如下光学特性物理量：

粒子**消光截面** $\sigma_e$  单个粒子消光的横截面积 **量纲：面积**  
 粒子**消光效率** $Q_e$  粒子消光截面与其几何横截面积的比值 **量纲：无量纲**  
**体积消光系数** $\beta_e$  单位体积里所有粒子的消光截面之和 **量纲：面积/体积 = 1/长度**  
**质量消光系数** $k_e$  单位质量里所有粒子的消光截面之和 **量纲：面积/质量**

$$\sigma_e = k_e m = Q_e A \quad m \text{ 为单个粒子的质量, } A \text{ 为粒子的几何横截面积。}$$

$$\beta_e = \rho k_e = N \sigma_e \quad \rho \text{ 为物质密度(介质密度), } N \text{ 为粒子数密度。}$$

对于**散射和吸收**过程，定义类似的物理量： $\sigma_s, Q_s, \beta_s, k_s$  和  $\sigma_a, Q_a, \beta_a, k_a$

$$\beta_s = \rho k_s = N \sigma_s \quad \beta_a = \rho k_a = N \sigma_a \quad \sigma_s = k_s m = Q_s A \quad \sigma_a = k_a m = Q_a A$$

$$\sigma_e = \sigma_s + \sigma_a \quad Q_e = Q_s + Q_a \quad \beta_e = \beta_s + \beta_a \quad k_e = k_s + k_a$$

**反照率** 为描述介质散射和吸收的相对比重，定义**单次散射反照率**： $\tilde{\omega} = \frac{\beta_s}{\beta_e} = \frac{k_s}{k_e} = \frac{\sigma_s}{\sigma_e}$

**消光截面**  $I_{\text{出射}} = \sigma_e \text{消光界面} I_{\text{入射}}$  其与宏观几何截面  $A$  的关系是： $\sigma_e = 2A$  消光悖论  $Q_e = 2$   
 其与微观粒子几何截面的关系是：两者无明显关系。

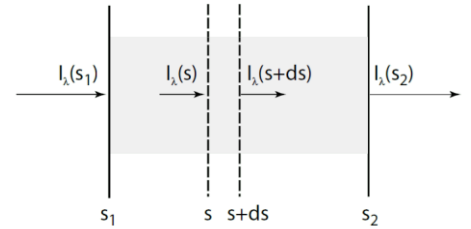
### 6.1.2 消光物理量示例

**问题** 完成下面的表格，利用各列中的信息确定相同列中的缺失数值。

	(a)	(b)	(c)	(d)
$k_e [\text{m}^2/\text{kg}]$	$3.89 \times 10^2$	?	0.45	?
$N [\text{m}^{-3}]$	?	?	80	$10^9$
$A [\text{m}^2]$	$2.8 \times 10^{-19}$	$7.07 \times 10^{-14}$	?	$3.14 \times 10^{-10}$
$Q_e$	?	0.2	0.6	?
$\tilde{\omega}$	0	0.1	?	0.9
$m [\text{kg}]$	$7.3 \times 10^{-26}$	$1.41 \times 10^{-17}$	?	$4.19 \times 10^{-12}$
$\rho [\text{kg}/\text{m}^3]$	$4.8 \times 10^{-4}$	?	$3.35 \times 10^{-4}$	?
$\sigma_e [\text{m}^2]$	?	?	$1.89 \times 10^{-6}$	?
$\beta_e [\text{m}^{-1}]$	?	$1.41 \times 10^{-4}$	?	0.628
$\beta_s [\text{m}^{-1}]$	?	$1.41 \times 10^{-5}$	$6.03 \times 10^{-5}$	?

第一列： 由于  $\tilde{\omega} = 0 \Rightarrow \beta_s = 0$  由  $k_e, m \Rightarrow \sigma_e = k_e m = 2.83 \times 10^{-23}$   
 由  $\beta_e = \rho k_e = 0.187$  由  $N = \beta_e / \sigma_e = 6.6 \times 10^{21}$  或  $N = \rho / m$   
 $Q_e = \sigma_e / A = 1 \times 10^{-4}$

## 6.2 比尔-布格-朗伯定律



### 6.2.1 比尔-布格-朗伯定律

**适用范围** 透射消光假设：忽略多次散射导致的辐射增强的贡献。

**传输方程** 沿任意路径上有限距离的辐射传输方程：

在消光介质中，经过微元路径 $ds$ 的辐射衰减： $dI_\lambda(s) = I_\lambda(s+ds) - I_\lambda(s) = -I_\lambda(s)\beta_e(s)ds$  单位面积对上式进行积分来描述 $s_1$ 和 $s_2$ 两点之间延伸路径的消光：

$$I_\lambda(s_2) = I_\lambda(s_1) \exp \left[ - \int_{s_1}^{s_2} \beta_e(s) ds \right]$$

### 6.2.2 与比尔定律相关的定义和结论

**光学厚度**  $s_1$ 和 $s_2$ 之间的**光学厚度**(无量纲)，又称为**光学路径**： $\tau(s_1, s_2) = \int_{s_1}^{s_2} \beta_e(s) ds$

1. 表示单位横截面(由此无量纲)，从 $s_1$ 到 $s_2$ 这段路径中**所有粒子的消光截面之和**。
2.  $d\tau(s) = \beta_e(s)ds$  微分路径上的光学厚度，表示消光的**比重(概率)**。

**透过率**  $s_1$ 和 $s_2$ 之间的**透过率**(无量纲，取值范围从零( $\tau \rightarrow \infty$ )至1( $\tau = 0$ ))： $t(s_1, s_2) \equiv \frac{I_\lambda(s_2)}{I_\lambda(s_1)} \equiv e^{-\tau(s_1, s_2)}$

- 性质**
- ① 如果 $\beta_e$ 在 $s_1$ 和 $s_2$ 之间保持不变，那么 $\tau = \beta_e(s_2 - s_1)$
  - ② **光学厚度的加法定律**： $\tau(s_1, s_N) = \tau(s_1, s_2) + \tau(s_2, s_3) + \dots + \tau(s_{N-1}, s_N)$  截面相加
  - ③ **透过率的乘法定律**： $t(s_1, s_N) = t(s_1, s_2) \cdot t(s_2, s_3) \cdot \dots \cdot t(s_{N-1}, s_N)$  指数项的性质
  - ④ 对于光学厚度 $\tau(s_1, s_2) \ll 1$ 的情况，透过率可近似： $t = \exp(-\tau) \approx 1 - \tau(s_1, s_2) = 1 - \beta_e(s_2 - s_1)$   
光学厚度非常小时，可以理解为微分路径上消光的概率，则减去后为透过的概率。

对于光学厚度不非常小时，可以从数学上论证： $\lim_{N \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{\tau}{N}\right)^N = e^{-\tau}$  表示理论自治。

- ⑤ 如果介质没有散射( $e_\omega = 0$ )，路径**吸收率**为  $a = 1 - t$

### 6.2.3 平面平行大气近似

**平行假设** 指定高度后，该层大气性质不随水平变化： $\beta_e(x, y, z) \approx \beta_e(z)$   $T(x, y, z) \approx T(z)$   
分子大气(无云/气溶胶)十分合理，压强、温度主要变化于垂直方向(不考虑地球曲率情况)  
太阳高度角小时，也不适用。有云大气，该假设不合理；对于层云，较为合理。

**光学厚度**  $z_1$ 和 $z_2$ 之间的**垂直光学厚度**  $\tau(z_1, z_2) = \int_{z_1}^{z_2} \beta_e(z) dz$

**倾斜情况**：有 $\tau(z_1, z_2, \cos \theta) = \int_{s_1}^{s_2} \beta_e(s) ds = \int_{z_1}^{z_2} \beta_e(z) \frac{dz}{\cos \theta} = \frac{\tau(z_1, z_2)}{\cos \theta}$

**高度 $z$ 的光学厚度**  $\tau(z) \equiv \tau(z, \infty) = \int_z^\infty \beta_e(z') dz'$

**透过率**  $z_1$ 和 $z_2$ 之间沿 $\mu$ 传输的**透过率**  $t(z_1, z_2) = \exp \left[ -\frac{1}{\mu} \tau(z_1, z_2) \right]$

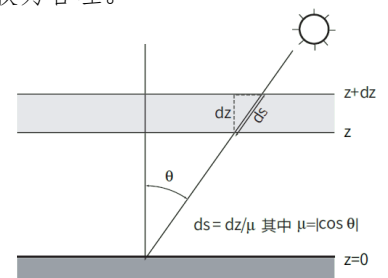
高度 $z$ 至大气顶沿 $\mu$ 传输的透过率  $t(z) \equiv \exp \left[ -\frac{1}{\mu} \tau(z) \right]$

**计算示例** 1. 某平面平行云的液态水云层密度 $\rho_w = 0.1 \text{ gm}^{-3}$ 和厚度 $\Delta z = 100 \text{ m}$ 。在某特定波长上，云粒子的质量消光系数 $k_{e,w} = 150 \text{ m}^2/\text{kg}$ ，单次散射反照率 $\tilde{\omega}_w = 1.0$ 。但是悬浮粒子的空气本身在此波长上存在吸收，体消光系数 $\beta_{a,v} = 10 \text{ km}^{-1}$ 和单次散射反照率 $\tilde{\omega}_v = 0$ 。

(a) 计算混合大气成分的联合 $\beta_e$ 、 $\beta_a$ 和 $\beta_s$ 。

(b) 计算云层总的光学厚度 $\tau$ 。

(c) 如果辐射强度 $I_{\lambda, \text{top}}$ 以天顶角 $\theta = 60^\circ$ 从云层顶部入射，请计算直接透射的辐射强度 $I_{\lambda, \text{bot}}$ 。



在平面平行大气中倾斜路径和垂直路径之间的关系

**注意：** $\mu = \cos \theta$  为惯例

- (a) 混合大气成分的联合光学特性  $\beta_e = k_{e,w}\rho_w + \beta_{a,v} = 25 \text{ km}^{-1}$   
 $\beta_s = k_{e,w}\rho_w\tilde{\omega}_w + \beta_{a,v}\tilde{\omega}_v = 15 \text{ km}^{-1}$   
 $\beta_a = k_{e,w}\rho_w(1 - \tilde{\omega}_w) + \beta_{a,v}(1 - \tilde{\omega}_v) = 10 \text{ km}^{-1}$
- (b) 云层总的光学厚度  $\tau = \beta_e \Delta z = 2.5$
- (c) 直接透射的辐射强度  $I_{\lambda,\text{bot}} = I_{\lambda,\text{top}} \exp\left[-\frac{\tau}{\cos\theta}\right] = 0.7\% I_{\lambda,\text{top}}$  非常小的值，需进一步考虑散射

## 6.3 地基观测太阳辐射强度

### 概述

卫星出现之前直接利用太阳光谱仪器观测太阳辐射强度是不可能的。地基观测总是一定程度上受大气吸收和散射造成的阳光衰减的影响。然而卫星观测之前，人们就可以合理估算太阳光谱。

### 具体方法

假设大气平面平行，大气特性在一整天里基本保持不变。

对于白天任意特定时间，**比尔定律**表明海平面观测的太阳辐射强度为  $I_{\lambda\text{地面接收}} = S_{\lambda\text{太阳入射}} e^{-\tau_{\lambda}/\mu}$  对两边求对数得到  $\log(I_{\lambda}) = -\tau_{\lambda}/\mu + \log(S_{\lambda})$  定义  $Z = 1/\mu = \sec\theta$  上述公式则改写为线性方程：

$Y = mZ + B$  其中  $Y \equiv \log(I_{\lambda})$ ，斜率  $m \equiv -\tau_{\lambda}$  截距  $B \equiv \log(S_{\lambda})$

### 图表解释

对于光学厚度 $\tau_{\lambda}$ 的大气，波长 $\lambda$ 太阳辐射强度对数和太阳天顶角正割之间的示意性关系。其中加号代表一天中不同时间的各个观测值，由此我们可以确定最佳拟合直线的斜率和截距。

### 示例

1. 单个 $O_2$ 分子的吸收截面在波长 $0.24 \mu\text{m}$ 上近似为 $7 \times 10^{-29} \text{ m}^2$ （对于更短的波长，它会显著增大）给定标准海平面压强 $p_0$ 等于 $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，氧气的摩尔分数21%，空气的平均分子质量 $\bar{m}$ 等于 $29 \text{ kg/kmole}$ ，重力加速度 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ，阿伏伽德罗常数 $N_A = 6.02 \times 10^{26} \text{ kmole}^{-1}$ ，计算

(a) 在流体静力平衡条件假设下单位面积的大气柱质量

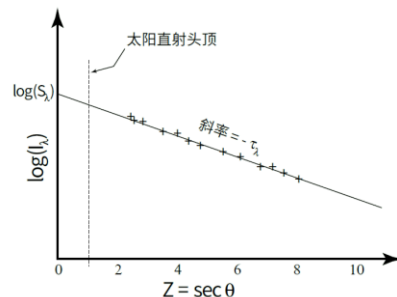
(b) 单位面积的氧气分子大气柱数目

(c) 在波长 $0.24 \mu\text{m}$ 上分子氧气所产生的光学厚度和垂直透过率。

① 单位面积的大气柱质量  $L = P_0/g = (1.01 \times 10^5 \text{ Pa})/(9.81 \text{ m/s}^2) \approx 1 \times 10^4 \text{ kgm}^{-2}$

② 单位面积的氧气分子的大气柱数目  $N = L/\bar{m} \times N_A \times 21\% = 1 \times 10^4/(29) \times (6.02 \times 10^{26}) \times 21\% \approx 4.49 \times 10^{28} \text{ m}^{-2}$

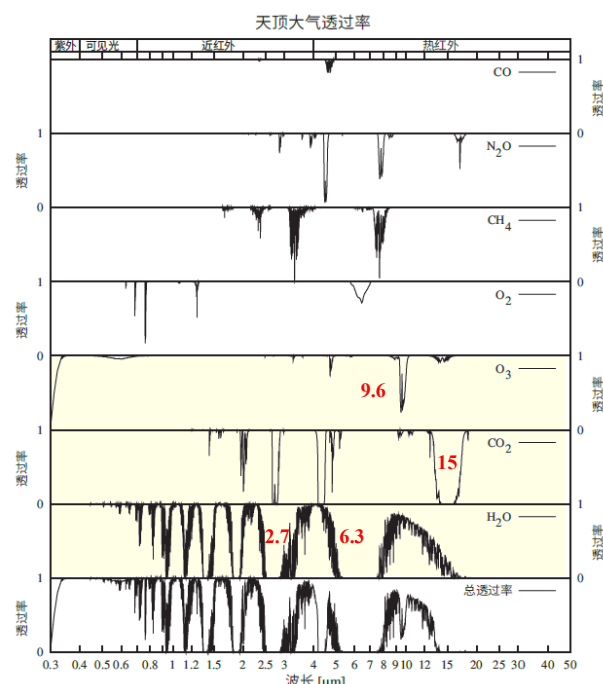
③ 分子氧气所产生的光学厚度和垂直透过率  $\tau = N \times \sigma_a = (4.49 \times 10^{28} \text{ m}^{-2}) \times (7 \times 10^{-29} \text{ m}^2) \approx 3.14$   
 $t = \exp(-\tau) = \exp(-3.14) \approx 0.043$



## 6.4 大气透射光谱

### 6.4.1 关键空气成分的吸收带

成分	体积比	吸收带及注意事项
$N_2$	78.1%	无重要的吸收带
$O_2$	20.9%	UV-C、60 和 118 GHz 附近微波、可见光和红外中的弱谱带
$H_2O$	(0~2%)	贯穿红外的无数强谱带 在时空上高度变化 重要吸收带：6.3、2.7 $\mu\text{m}$
Ar 惰性	0.936%	单原子无吸收
$CO_2$	370ppm	2.8、4.3 和 15 $\mu\text{m}$ 附近，浓度增加
$CH_4$	1.7ppm	3.3 和 7.8 $\mu\text{m}$ 附近，人类活动引起的增加
$N_2O$	0.335ppm	4.5、7.8 和 17 $\mu\text{m}$
$CO$	0.07ppm	4.7 $\mu\text{m}$ (弱)
$O_3$	$\sim 10^{-8}$	UV-B、9.6 $\mu\text{m}$ (热红外) 浓度高度变化 在平流层和污染空气中浓度高
$CFCl_3$	$\sim 10^{-10}$	氟氯烃，吸收红外，来源于工业排放



只考虑吸收消光的透过率

## 6.4.2 大气透射光谱

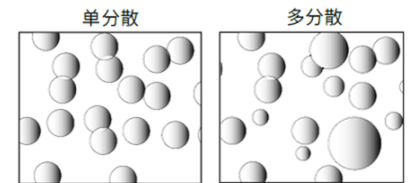
- 描述
- ① 对于典型的中纬度夏季(水汽较多)大气条件(上页右图), 不考虑云和气溶胶的大气的天顶透过率
  - ② 上面的各个子图描述了一个单一大气成分产生的吸收贡献
  - ③ 最下面的子图描绘了所有成分的联合效应(透过率的乘法定律)
  - ④ 当波长大概短于  $0.5 \mu\text{m}$  时分子散射逐渐变得重要, 但是在这些图并没有做考虑。
  - ⑤ 可见水汽对总的透过率贡献最大, 两者高度相似。

## 6.5 云层的光学厚度和透过率

### 6.5.1 云层的辐射过程

#### 6.5.1.1 云层的基本物理性质

- 云层性质
- ① 云由悬浮在空气中的大量非常小的水滴和/或冰晶组成。
  - ② 液态水云的典型液滴半径落于  $5 \mu\text{m}$  至  $15 \mu\text{m}$  之间。
  - ③ 典型的云滴浓度范围为  $10^2$  到  $10^3$  个每立方厘米。
  - ④ 典型的液态水云密度落于  $0.1 - 1 \text{ g/m}^3$  之间。



云滴的单分散和多分散定义示意图

#### 6.5.1.2 太阳辐射在云层中的可能经历的过程

- 直射透过率 可能直接穿透云层, 没有经历一次散射或者吸收, 使用比尔定律描述。以这种方式直接穿透云层的入射辐射比重称之为直射透过率  $t_{\text{dir}}$
- 漫射透过率 可能被散射一次或者多次, 然后从云层底部出射。这对应的入射辐射比重称之为漫射透过率  $t_{\text{diff}}$
- 反射率 可能被散射一次或者多次, 然后从云层顶部出射。这对应的入射通量比重称之为反射率或反照率  $r$
- 吸收率 既没有透射云层, 也没有被云层反射回去, 而是被云层给吸收。这部分比重称之为云内吸收率  $a$
- 关系式  $t + r + a = 1$  总的透射率等于漫射和直射透过率之和, 即  $t = t_{\text{dir}} + t_{\text{diff}}$

### 6.5.2 单分散云层的光学厚度和透过率

单分散 所有粒子的大小都一致的云层。相对应的, 多分散指粒子大小不一致的云层。

云水密度 对于单分散云, 云水密度  $\rho_w$  恰好是液滴数密度  $N$  乘以单个液滴的质量  $\rho_w = N \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_l$

其中  $\rho_l \approx 1000 \text{ kg/m}^3$  是纯水密度,  $r$  为粒子半径。

液态水路径 液态水路径  $L$  (每单位水平面积的垂直积分云水质量) 定义为  $L \equiv \int_{z_{\text{bot}}}^{z_{\text{top}}} \rho_w(z) dz$  单位:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$

消光系数 由体积消光系数与消光效率和质量消光系数的数学关系可知

$$\beta_e = N Q_e \pi r^2 = k_e \rho_w = k_e N \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_l \Rightarrow k_e = \frac{3 Q_e}{4 \rho_l r}$$

光学厚度 云底  $z_{\text{bot}}$  和云顶  $z_{\text{top}}$  之间的光学厚度  $\tau^* = \int_{z_{\text{bot}}}^{z_{\text{top}}} \beta_e(z) dz = \int_{z_{\text{bot}}}^{z_{\text{top}}} k_e \rho_w(z) dz$

假设  $k_e$  为常数, 则  $\tau^* = k_e L$  大粒子  $Q_e \approx 2$ , 总光学厚度正比于液态水路径  $L$ , 反比于云滴半径:

$\tau^* \approx \frac{3L}{2\rho_l r}$  小粒子的光学厚度反而更大, 反射率也更大, 降温 卫星云图白色, 积雨云呈现黑色

案例 设典型的较厚层积云,  $L = 0.5 \text{ kg m}^{-2}$ ,  $r = 10 \mu\text{m}$ , 则  $\tau^* = 75$ ,  $t_{\text{dir}} = 0$ 。除了特别薄的云层外, 几乎所有的云对直射太阳辐射都是不透明的。