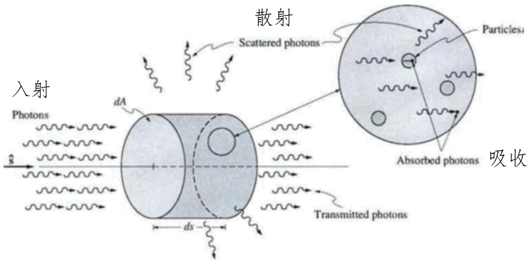
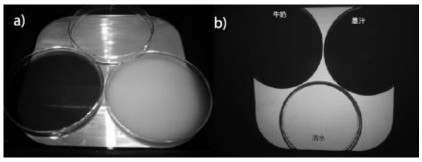
第六章 大气的辐射特性



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 Exinction= 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**σ_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β_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**

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

$\boldsymbol{\beta_e = \rho k_e = N\sigma_e}$ ρ为物质密度(介质密度)，N 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 $\sigma_a, Q_a, \beta_a, k_a$

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

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

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 $\boldsymbol{I_{出射} = \sigma_{e消光界面} I_{入射}}$ 其与**宏观几何截面**A的关系是：$\boldsymbol{\sigma_e = 2A}$ 消光悖论 $\boldsymbol{Q_e = 2}$

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。

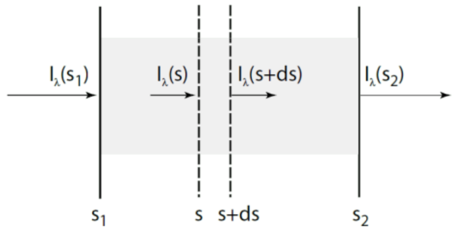
	(a)	(b)	(c)	(d)
$k_e[\mathrm{m}^2/kg]$	3.89×10^2	?	0.45	?
$N[\mathrm{m}^{-3}]$	?	?	80	10^9
$A[\mathrm{m}^2]$	2.8×10^{-19}	7.07×10^{-14}	?	3.14×10^{-10}
Q_e	?	0.2	0.6	?
$\tilde{\omega}$	0	0.1	?	0.9
$m[\mathrm{kg}]$	7.3×10^{-26}	1.41×10^{-17}	?	4.19×10^{-12}
$\rho[\mathrm{kg/m^3}]$	4.8×10^{-4}	?	3.35×10^{-4}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

第一列： 由于$\tilde{\omega} = 0 \Rightarrow \beta_s = 0$ 由 $k_e, m \Rightarrow$ $\sigma_e = k_e m = 2.83\times10^{-23}$

由 $\beta_e = \rho k_e = 0.187$ 由 $N = \beta_e/\sigma_e = 6.6\times10^{21}$ 或 $N = \rho/m$

$Q_e = \sigma_e/A = 1\times10^{-4}$

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：

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

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**：$\boldsymbol{\tau(s_1,s_2) = \int_{s_1}^{s_2}\beta_e(s)ds}$

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($\tau \to \infty$)至1($\tau = 0$))：$t(s_1,s_2) \equiv \frac{I_\lambda(s_2)}{I_\lambda(s_1)} \equiv \boldsymbol{e^{-\tau(s_1,s_2)}}$

性质

① 如果β_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**：$\tau(s_1,s_N) = \tau(s_1,s_2) + \tau(s_2,s_3) + \cdots + \tau(s_{N-1},s_N)$ 截面相加

③ **透过率的乘法定律**：$t(s_1,s_N) = t(s_1,s_2)\cdot t(s_2,s_3)\cdot \cdots \cdot t(s_{N-1},s_N)$ 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：$\lim_{N\to\infty}\left(1 - \frac{\tau}{N}\right)^N = e^{-\tau}$ 表示理论自洽。

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**：$\beta_e(x,y,z) \approx \beta_e(z)$　$T(x,y,z) \approx T(z)$

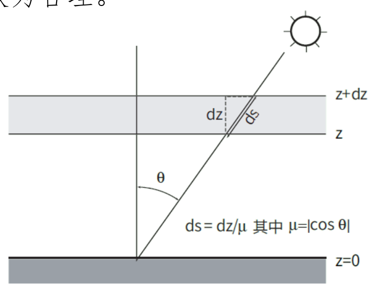
分子大气(无云/气溶胶)十分合理，压强、温度主要变化于垂直方向(不考虑地球曲率情况)

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$\tau(z_1,z_2,\cos\theta) = \int_{s_1}^{s_2}\beta_e(s)ds = \int_{s_1}^{s_2}\beta_e(s)\frac{dz}{\cos\theta} = \boldsymbol{\frac{\tau(z_1,z_2)}{\cos\theta}}$

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



在平面平行大气中倾斜路径和垂直路径之间的关系

注意：$\boldsymbol{\mu = \cos\theta}$ 为惯例

透过率　z_1和z_2之间沿μ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μ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$\rho_w = 0.1\ gm^{-3}$ 和厚度$\Delta z = 100\ m$。在某特定波长上，云粒子的质量消光系数$k_{e,w} = 150\ m^2/kg$，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$\beta_a, v = 10\ km^{-1}$和单次散射反照率$\tilde{\omega}_v = 0$。

(a) 计算混合大气成分的联合β_e、β_a和β_s。

(b) 计算云层总的光学厚度τ。

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

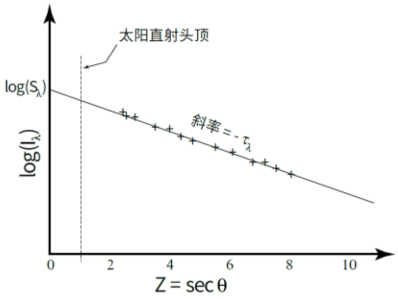
(a) 混合大气成分的联合光学特性 $\beta_e = k_{e,w}\rho_w + \beta_{a,v} = 25\ \mathrm{km}^{-1}$

$\beta_s = k_{e,w}\rho_w\tilde{\omega}_w + \beta_{a,v}\tilde{\omega}_v = 15\mathrm{km}^{-1}$ $\beta_a = k_{e,w}\rho_w(1-\tilde{\omega}_w) + \beta_{a,v}(1-\tilde{\omega}_v) = 10\mathrm{km}^{-1}$

(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 $I_{\lambda,\mathrm{bot}} = I_{\lambda,\mathrm{top}} \exp\left[-\frac{\tau}{\cos\theta}\right] = 0.7\% I_{\lambda,\mathrm{top}}$ 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 $I_{\lambda\text{地面接收}} = \boldsymbol{S}_{\lambda\text{太阳入射}} e^{-\tau_\lambda/\mu}$

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**：

$\Upsilon = mZ + B$ 其中 $\Upsilon \equiv \log(I_\lambda)$，**斜率 $\boldsymbol{m} \equiv -\boldsymbol{\tau}_\lambda$ 截距 $\boldsymbol{B} \equiv \log(\boldsymbol{S}_\lambda)$**

图表解释 对于光学厚度 τ_λ 的大气，波长 λ 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**。