

# 第五章 地表的辐射特性

## 5.1 均匀介质的反射和折射

### 5.1.1 均匀介质

**均匀介质** 在与辐射波长相当的尺度上是光滑和均匀的介质，或者说在介质内单个分子的尺寸和间距以及其他不规则度都远小于辐射的波长。从麦克斯韦方程组角度，介质中有唯一参数：折射率

- 示例**
- ① 在可见光、红外和微波波段，水、玻璃、空气、红酒、枫糖浆、液态水银和固态黄金（分子或原子量级 $10^{-10}m$ ）是有效均匀介质，但是对于X射线和伽马射线谱带，这些物质则是不均匀的。
  - ② 由直径 $10\mu m$ 的水滴组成的云相对于可见光( $0.4 - 0.76\mu m$ )和红外辐射非常不均匀，但是相对于微波辐射( $1cm$ )的波长则表现得像均匀介质，差了三个量级，所以非常均匀。
  - ③ 厘米和米尺度的湍流涡动和湿度波动甚至会使大气相对于无线电和微波辐射显得不均匀。

### 5.1.2 折射率

**折射率**  $N = n_r + in_i$

**实部 $n_r$**  在很大程度上影响介质反射和折射特性

**虚部 $n_i$**  确定介质内吸收

**水的折射率** 在可见光范围内未见大的变化：**1.33**

**相位速度** 介质的相位速度  $c' = c/n_r$

**辐射强度** 沿 $x$ 方向传输的辐射强度  $I(x) = I_0 e^{-\beta_a x}$

其中 $\lambda$ 是真空中波长，吸收系数为 $\beta_a = \frac{4\pi n_i}{\lambda}$

### 5.1.3 均匀介质的反射和折射

**反射**  $\theta_r = \theta_i$  入射角等于反射角

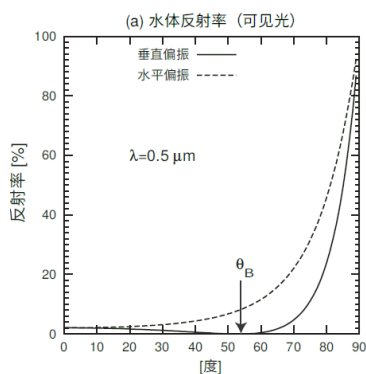
**斯涅尔定律**  $\frac{\sin \theta_t}{N_1} = \frac{\sin \theta_i}{N_2}$

**全反射**  $\theta_0 \equiv \arcsin\left(\frac{N_1}{N_2}\right)$  从折射率大的往小发射 在水中， $\theta_0 \approx 49^\circ$

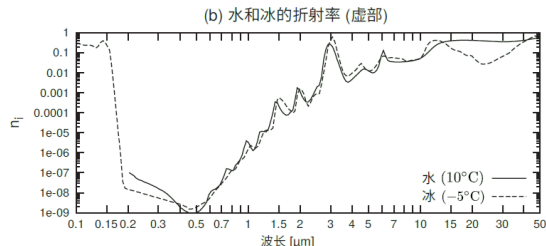
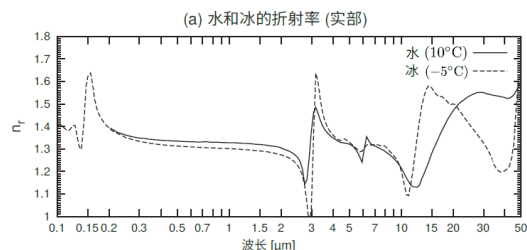
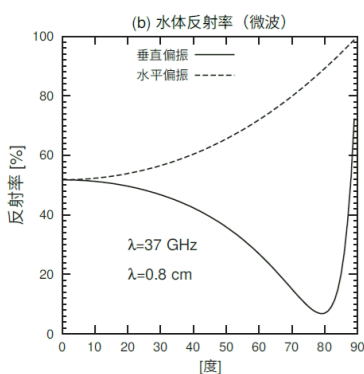
**菲涅耳定律** 电场矢量平行于入射平面的反射率： $R_p = \left| \frac{\cos \theta_t - m \cos \theta_i}{\cos \theta_t + m \cos \theta_i} \right|^2$

电场矢量垂直于入射平面的反射率： $R_s = \left| \frac{\cos \theta_t - m \cos \theta_i}{\cos \theta_t + m \cos \theta_i} \right|^2$

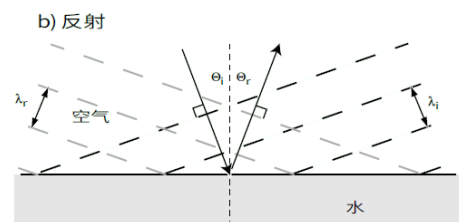
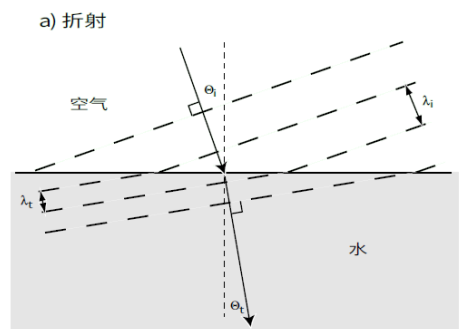
平行的情况反射率可能出现零，称为布儒斯特角。



垂直偏振出现零点



水和冰的折射率虚部可见光非常小，则吸收小



相对折射率  $m = N_2/N_1$

布儒斯特角  $\theta_B = \arcsin \sqrt{\frac{m^2}{m^2+1}}$  对于可见光, 水的  $\theta_B = 53^\circ$

在该角度, **非偏振光经过反射变为偏振光**, 适用于遥感。

**注意:** 平行于入射平面的偏振通常称为垂直偏振, 而垂直于入射平面的偏振称为水平偏振。相应的反射率则写为  $R_v$  和  $R_h$ 。水平偏振垂直于入射平面, 与水平表面是平行的。

## 讨论

入射角很小时, 水体反射率非常小; 而入射角大时, 对应清晨或傍晚, 太阳辐射又很小。

因此, 海洋的总体反射率很低, 大部分被吸收。进一步的, 如果南北两极冰川融化, 则热库增大。

## 5.1.4 彩虹

### 基本模型

雨滴量级为毫米量级, 可见光为微米量级, 可以视作平面。

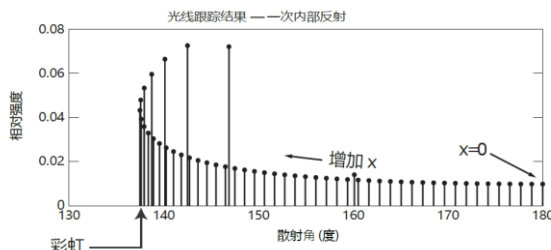
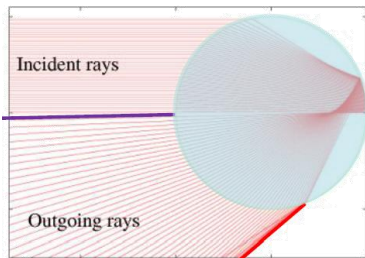
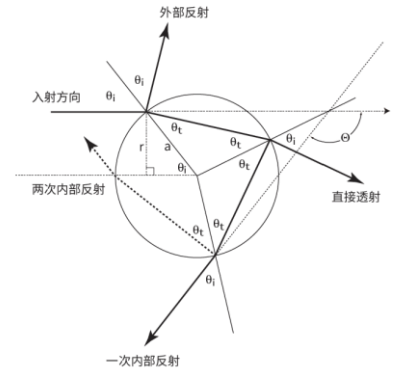
### 光线追踪

阳光以入射角  $\theta_1$  射入球形水滴, 发生折射 (斯涅尔定律)

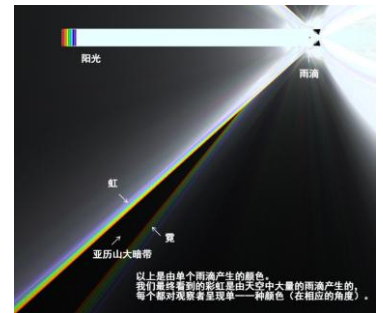
折射后的光线在水滴内壁发生 **一次内部反射**, 反射后的光线再次折射出水滴, 当偏向角最小时 (约  $138^\circ$ ), 光线集中形成主虹。

**由于不同颜色光线的最小散射角不同, 导致边缘出现光的色散。**

观察者以  $42^\circ$  角 ( $180^\circ - 138^\circ$ ) 背对太阳看到主虹, 红光在外 (折射率低, 偏折小), 紫光在内。



光线集中在这里



## 5.2 自然地表的辐射特性

射线光学模拟 <https://phydemo.app/ray-optics/simulator>

### 5.2.1 理想化为平面边界的自然表面

#### 辐射情况

上述分析仅存在于平静的湖面或海面, 下面我们来讨论陆面或波动的水面的复杂的辐射情况, 有专门学科研究: 植被大气辐射传输。

如右图, 我们将不规则的地表处理成等价的假想平面地表。当辐射入射地球表面时, **部分被反射, 剩余被吸收**。前者的比例为 **吸收率  $a$** , 后者的比例为 **反射率  $r$** 。不考虑发射

通常  $a$  和  $r$  与 **波长  $\lambda$** 、**入射辐射的方向  $\hat{\Omega} = (\theta, \phi)$**  有关。

#### 性质

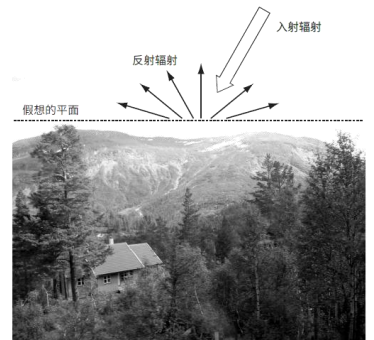
① 对于任意给定入射方向和波长, **反射率和吸收率之和等于一**:

$$a_\lambda(\theta, \phi) + r_\lambda(\theta, \phi) = 1$$

② 对于辐射有辐射强度和辐射通量密度可以描述。我们**使用通量密度来描述反射率**。因为反射率代表反射的概率, 关注的是总的能量, 不关注特定的方向, 反射方向为四面八方。

对于方向依赖很弱的自然地表, 反射和入射的单体辐射通量  $F_{\lambda,r}$  和  $F_{\lambda,0}$  之间有:  **$F_{\lambda,r} = r_\lambda F_{\lambda,0}$**

吸收率有: 地表吸收的辐射通量为  $F_{\lambda,0} - F_{\lambda,r} = a_\lambda F_{\lambda,0}$



### 5.2.2 反射光谱实例

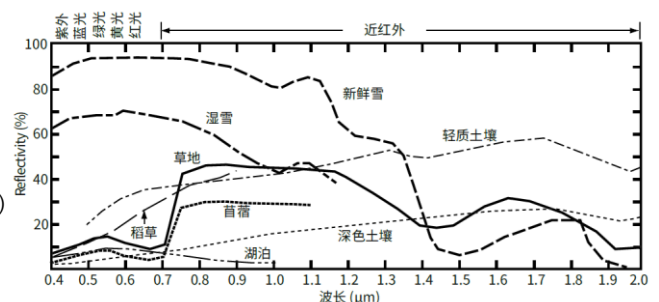
#### 实例性质

① 经典地表包括**积雪、植被、湖泊、土壤**四种。

② **积雪**: 可见光**反射率最高**(微粒结构强散射), 湿雪反射率稍低(水融化透明)。

③ **植被**: **反射率很低**(绿色护眼,  $0.55\mu\text{m}$  高峰绿光)

④ **轻质土壤**: 含水量较低, 反射率较高



- ⑤ **湖泊**：反射率非常非常低，除了镜面反射的角度，水的颜色很深。
- ⑥ **到近红外波段**，积雪的反射率快速下降。这与云的性质不同，故可以区分云和雪。
- 植被的反射率瞬间上升**（叶绿素专门吸收可见光），后方波动表征水的吸收带。
- 土壤的反射率随波长变长而缓慢上升。水体的反射率不断下降。（因此海色遥感非常困难）

**气候效应** ① 积雪融化变为水，则反射辐射→吸收辐射 ② 植被退化，反射率上升，产生气候效应

## 5.2.3 灰体近似

**灰体近似** 指定一个**单一的平均吸收率**来**代表整个谱带**的吸收率，这称之为灰体近似。

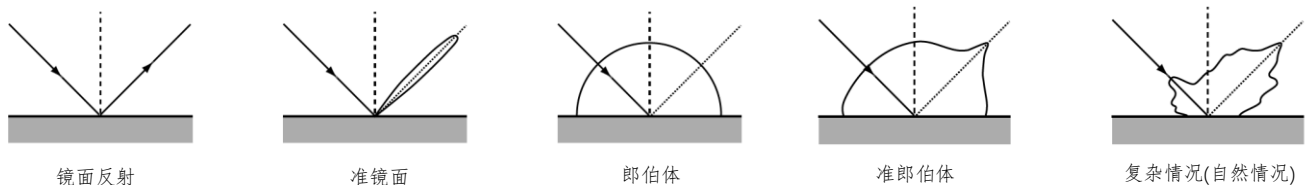
**吸收率常数** 给**整个短波**或者太阳谱带分配一个**吸收率常数** $a_{sw}$ ，给**长波或者热红外谱带**分配另一个**吸收率常数** $a_{lw}$

**特征** ① 对大多数**陆面来说**， $a_{lw}$ 接近**1**（黑体近似），而 $a_{sw}$ 可以高度变化（反射光谱实例，各种地物不同），从深雪数值接近零到森林和水体数值接近一。

② 短波吸收率 $a_{sw}$ 的补充就是**短波反射率**  $r_{sw} = 1 - a_{sw}$ ，普遍称之为**短波反照率**。

## 5.2.4 反射辐射的角分布

**引入** 研究反射辐射仅有反射率仍然不足，但反射辐射在空间各个方向上的分布信息仍未揭示。



**角分布** 采用极坐标形式呈现的各种地表反射类型的实例，其中曲线距离地表反射位置的距离代表该方向上反射辐射的相对强度。

**郎伯体** **反射辐射在各个方向上辐射强度相同。** 例如墙面、地面等。

**准镜面** 对于 cox-munk 海表模型，如果有风浪(粗糙度)，那么反射辐射在靠近镜面辐射方向的一定范围内分布。

## 5.2.5 镜面和朗伯反射实例

### 5.2.5.1 镜面和朗伯反射

**问题** 如上图，有若干品种的墙壁油漆出售，包括**光泽(glossy)**、**半光泽(semigloss)** 和**平光(flat)**。

可见平光更接近郎伯体(各方向相同)，光泽则为镜面反射。



### 5.2.5.2 双向反射分布函数 BRDF

**引入**

**BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function**

描述反射辐射的分布情况。

**BRDF**

$$\rho(\hat{\Omega}_i; \hat{\Omega}_r) = \frac{dI^\uparrow(\hat{\Omega}_r)}{I^\downarrow(\hat{\Omega}_i)|\hat{n} \cdot \hat{\Omega}_i|d\omega_i} = \frac{dp}{dx} \quad \text{至少 4 维}$$

**入射**： $d\omega_i$  小立体角 权重 $|\hat{n} \cdot \hat{\Omega}_i|$  单位水平面元接收能量

**反射**： $dI^\uparrow(\hat{\Omega}_r)|\hat{n} \cdot \hat{\Omega}_r|d\omega_r$  反射到立体角的总辐射通量密度

$$\text{综合: } \rho(\hat{\Omega}_i; \hat{\Omega}_r) = \left( \frac{I^\uparrow(\hat{\Omega}_r)|\hat{n} \cdot \hat{\Omega}_r|d\omega_r}{I^\downarrow(\hat{\Omega}_i)|\hat{n} \cdot \hat{\Omega}_i|d\omega_i} \right)_{\text{代表 } dp} \times \left( \frac{1}{|\hat{n} \cdot \hat{\Omega}_r|d\omega_r} \right)_{\text{代表 } \frac{1}{dx}}$$

**反射辐射强度**

$$I^\uparrow(\hat{\Omega}_r) = \int_{2\pi} \rho(\hat{\Omega}_i; \hat{\Omega}_r) I^\downarrow(\hat{\Omega}_i) |\hat{n} \cdot \hat{\Omega}_i| d\omega_i \quad \text{积分表示所有方向对该方向的贡献}$$

**反照率**

$$r = \frac{F_r}{F_i} = \frac{\int_{2\pi} I^\uparrow(\hat{\Omega}_r) |\hat{n} \cdot \hat{\Omega}_r| d\omega_r}{\int_{2\pi} I^\downarrow(\hat{\Omega}_i) |\hat{n} \cdot \hat{\Omega}_i| d\omega_i}$$

**反射辐射通量**

$$F_r = \int_{2\pi} \int_{2\pi} \rho(\hat{\Omega}_i; \hat{\Omega}_r) I^\downarrow(\hat{\Omega}_i) |\hat{n} \cdot \hat{\Omega}_i| |\hat{n} \cdot \hat{\Omega}_r| d\omega_i d\omega_r$$

**两者关系**

如果入射辐射为平行光，则  $r(\hat{\Omega}_i) = \int_{2\pi} \rho(\hat{\Omega}_i; \hat{\Omega}_r) |\hat{n} \cdot \hat{\Omega}_r| d\omega_r$  需要利用 Dirac 函数

**朗伯体反射**

其反射与入射、反射都没有关系。  $\rho(\hat{\Omega}_i; \hat{\Omega}_r) = \rho_L$  满足简单关系： $r = \pi \rho_L$

$$\text{证明: } r = \frac{F_r}{F_i} = \frac{\pi \rho_L \int_{2\pi} I^\downarrow(\hat{\Omega}_i) |\hat{n} \cdot \hat{\Omega}_i| d\omega_i}{F_i} = \frac{\pi \rho_L F_i}{F_i} = \pi \rho_L$$

**镜面反射特性**

$$\rho(\mu_i, \phi_i, \mu_r, \phi_r) = \rho(\mu_r) \delta(\mu_r + \mu_i) \delta(\phi_r - \phi_i)$$

