

# 第六章 散射和吸收-PART1

## (Scatter and Absorption)

§ 6.1 描述衰减的术语 (Terms Describing Attenuation)

§ 6.2 辐射传输方程 I (Radiative Transfer Equation I)

§ 6.3 大气层和大气窗 (Aerosphere & Atmospheric Windows)

§ 6.4 辐射传输方程 II (Radiative Transfer Equation II)

## § 6.1 描述衰减的术语

1. 复折射率和穿透深度
  - 复折射率
  - 皮层深度
  - 穿透深度
2. 衰减系数和光学厚度
3. 漫衰减系数和光束衰减系数
4. 体积散射函数
5. 粒子的尺度分布函数和单粒子衰减界面
6. 米氏散射和瑞利散射

# 1.1 复折射率(Complex Index of Refraction)

- 复折射率 (complex index of refraction)

$$\mathbf{n} = n' - in'' = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \approx \sqrt{\epsilon_r}$$

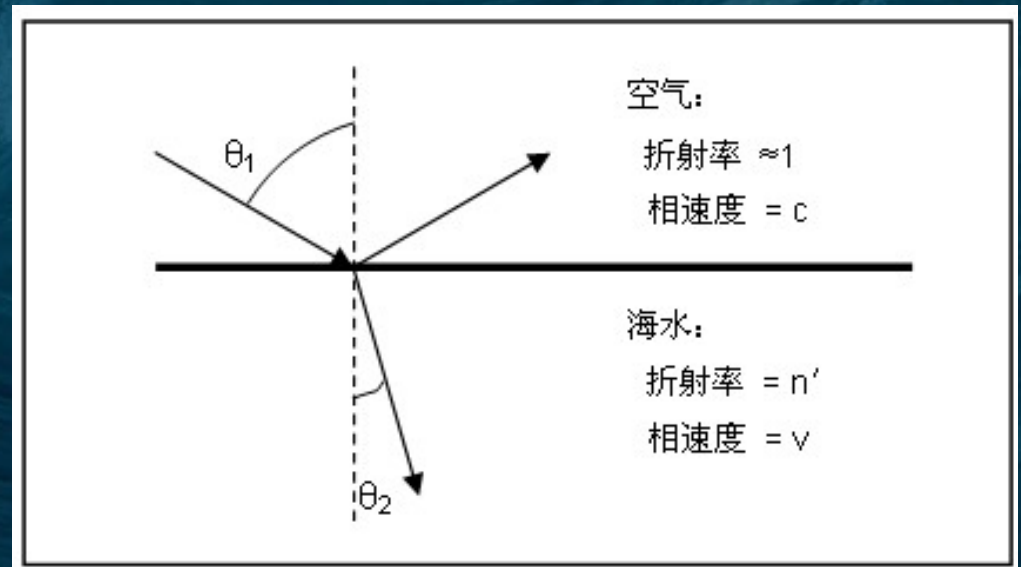
- 实部 $n'$ ，描述电磁波在两介质的界面处传播速度和方向的变化；
- 虚部 $n''$  表示电磁波在介质内部传播的衰减程度。

# 复折射率的实部的物理意义？

- 斯奈尔折射定律 (Snell's Refraction Law)

$$n' = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{c}{v}$$

- 式中  $n'$  是电磁波从空气向海水传播时在海水的折射率， $\theta_1$  是入射角， $\theta_2$  是折射角。



# 复折射率的虚部的物理意义？

- 电磁波波动方程的解：

$$E = E_0 \exp[i(\omega t - kz)] = E_0 \exp\left[i \cdot \omega \left(t - \frac{nz}{c}\right)\right]$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{v} = \frac{2\pi fn}{c} = \frac{\omega n}{c}$$

$$n = n' - i \cdot n''$$

$$E_x(\omega, z) = E_{x0} e^{-\frac{\omega n''}{c} z} \exp[i(\omega t - kz)] = E_{x0} e^{-k_e z} \exp\left[i\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} z\right)\right]$$

$$k_e = \omega \times n'' / c$$

# 复折射率的虚部的物理意义？

- $k_e$  是电场强度的衰减系数，代表电场强度  $E_x(\omega, z)$  的衰减项

$$k_e = \omega \times n'' / c$$

- 上式表明了电场强度的衰减系数  $k_e(\omega)$  与复折射率的虚部  $n''$  二者之间的关系
- 这个公式直接地揭示了  $n''$  的物理意义：复折射率的虚部  $n''$  是描述电磁波在传播过程中能量衰减快慢程度的物理量。

## 如何计算复折射率 $n$ ?

如果已知海水的相对电容率 $\epsilon_r$ ，则可用

$$\mathbf{n} = \sqrt{\epsilon_r}$$

来计算复折射率 $n = n' - i n''$ 。

在微波波段里，相对电容率 $\epsilon_r$ 可从德拜方程获得。

## 1.2 皮层深度 (skin depth)

- 电场强度 (electric field intensity) 的表达式

$$E_x(\omega, z) = E_{x0} e^{-\frac{\omega n''}{c} z} \exp[i(\omega t - kz)] = E_{x0} e^{-k_e z} \exp[i(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} z)]$$

- 如果在 $z=d$ 处的电场强度 $E_x(\omega, d)$ 衰减为初始值 $E_x(\omega, 0)$ 的 $1/e$ , 那么我们定义从 $z=0$ 到 $z=d$ 的距离为皮层深度 (skin depth)

$$d_{skin} = \frac{1}{k_e} = \frac{c}{\omega n''} = \frac{c}{2\pi f n''}$$

- 辐亮度与电场强度的平方成比例。电场强度衰减为初始值的 $1/e$ , 这意味着辐亮度衰减为初始值的 $(1/e)^2 \approx 0.135$ 。这里 $e$ 是自然数,  $e \approx 2.71828$

# 皮层深度有多大？

- 对于频率为**10GHZ**，**波长为3cm**的微波，**20°C**，**35psu**的海水

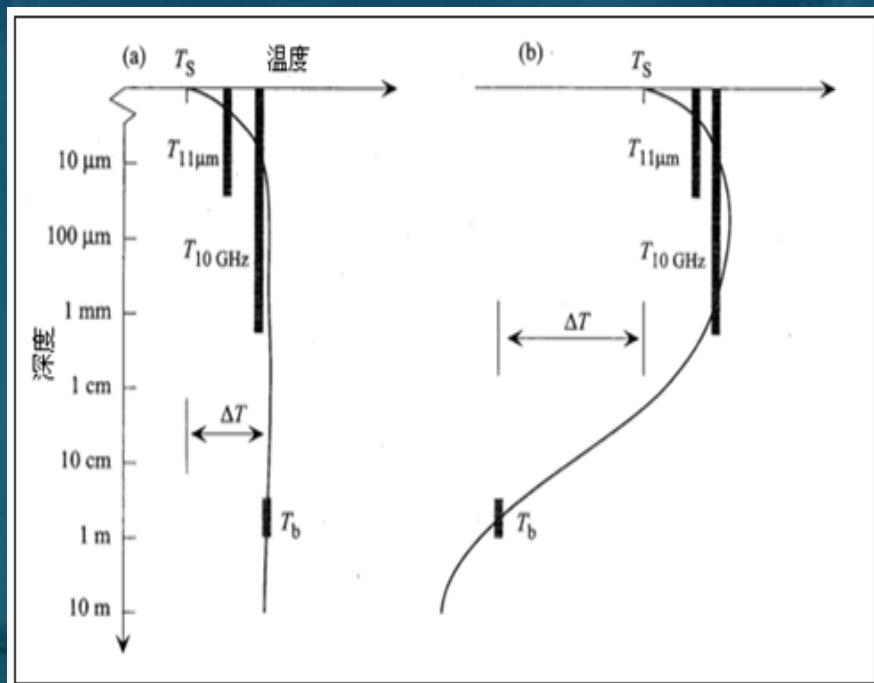
$$\epsilon_r = 52 - 37i, \quad \mathbf{n} = n' - in'' = \sqrt{\epsilon_r} = 7.61 - 2.43i$$

$$d_{skin} = \frac{1}{k_e} = \frac{c}{\omega n''} = \frac{c}{2\pi f n''}$$

$$d = 1.96 \text{ mm}$$

- 在如此短的距离内，电场强度衰减为初始值的 $1/e$ ，辐亮度就已衰减到初始值的 $(1/e)^2 \approx 0.135$ 。
- 只有接近海面非常薄的水层的水分子发射的电磁波能够溢出水面！

左图表示无论夜间还是白天，当强风 ( $U_{10} > 6 \text{ m/s}$ ) 时充分混合的上表层温度剖面；  
右图表示在白天强日照和弱风条件下层化的上表层温度剖面。



$T_{11\mu\text{m}}$  : 波长为  $11 \mu\text{m}$  的热红外光辐射计

$T_{10\text{GHz}}$  : 频率为  $10 \text{ GHz}$  的微波辐射计

$T_b$  : 浮标测量的温度

$T_s$  : 海表面温度

$\Delta T$  :  $|T_s - T_b|$

三条黑色线段分别代表对以上三个测量温度有贡献的海水厚度层；

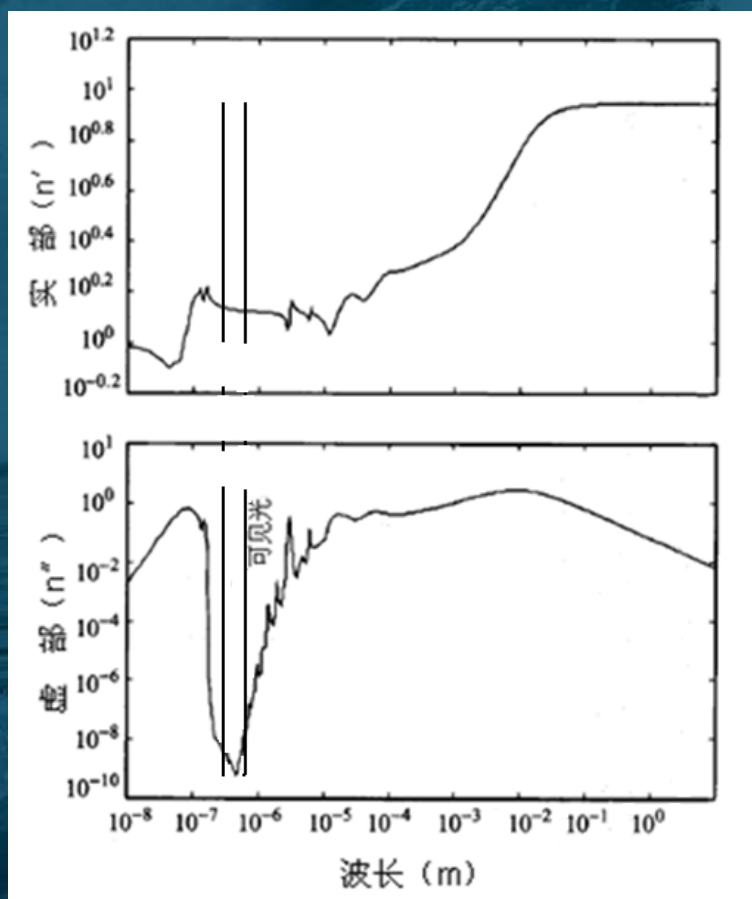
$T_{11\mu\text{m}}$  和  $T_{10\text{GHz}}$  的两条黑色线段的下端分别对应着两个不同波段的皮层深度。

皮层深度有多深？卫星遥感观测的SST代表什么？

风速  $> 5 \text{ m/s}$  时，skin和sub-skin的典型温差为  $0.17^\circ\text{C}$

## 1.3 穿透深度 $Z_{90}$

- 皮层深度 (skin depth)  $d_{\text{skin}}$  描述微波在海水中的衰减;
- 穿透深度 (penetration depth)  $z_{90}$  描述可见光和红外光在海水中的衰减。



$$n = n' - i \cdot n''$$

- 电磁波在纯水的复折射率 $n$ 的实部 $n'$ 和虚部 $n''$ 随波长的变化

- 因为辐亮度与电场强度的平方成比例，所以穿透深度 $z_{90}$ 与皮层深度的定义有所不同

$$k_a = 2k_e = \frac{2\omega n''}{c} = \frac{4\pi f n''}{c}$$

- **穿透深度** (penetration depth)  $z_{90}$ 描述可见光和红外光在海水中的衰减。

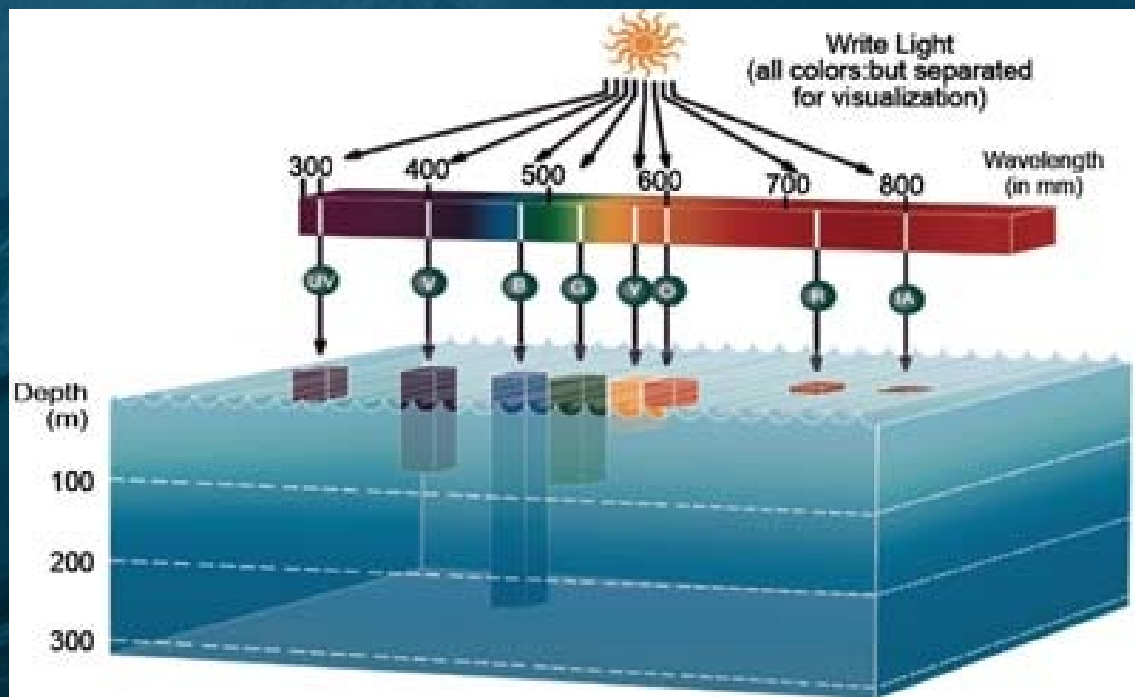
$$z_{90} = \frac{1}{k_a} = \frac{c}{4\pi f n''} = \frac{d_{skin}}{2}$$

## 穿透深度 $Z_{90}$

$$Z_{90} = \frac{1}{k_a} = \frac{c}{4\pi fn''} = \frac{d_{skin}}{2}$$

- 根据计算在穿透深度 $Z_{90}$ 以上海水层粒子的后向散射对离水辐亮度 $L(\lambda)$ 的贡献占有90%的份额，所以人们使用90作为穿透深度 $Z_{90}$ 的下角标。
- 可以使用水下辐照度剖面仪测量的数据获得穿透深度 $Z_{90}$ 的估计。

# 穿透深度有多深？



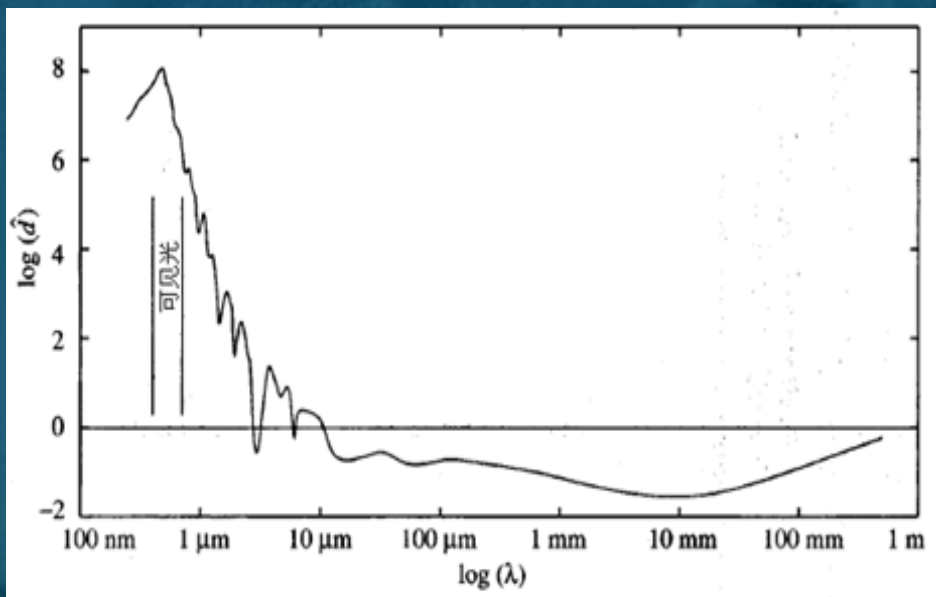
- 在比较清澈的南海某海域，490 nm蓝绿光的穿透深度大约是30米，430~480 nm蓝光和500~580 nm绿光的穿透深度大约是20米，400~430 nm紫光和590~610 nm黄光的穿透深度大约是10米，620~700 nm红光的穿透深度大约是1~3米；

# 穿透深度有多深？

- 在渤海海域，490 nm 蓝绿光的平均穿透深度仅达7米，700 nm 红光的平均穿透深度仅达1米；
- 在高浑浊度的水域，如悬浮泥沙浓度极高的河口海域，所有波长的可见光的穿透深度可能都在1米以内；
- 一般地，490 nm 蓝绿光的穿透深度最大，波长超过490 nm 的可见光在海水中的穿透深度随可见光波长的增加而减小。

## 穿透/吸收深度在哪个波段最小，你会判断吗？

- 电磁波在纯水中的无因次化吸收深度随波长的变化



- 对于  $\lambda > 3\mu\text{m}, \hat{d} < 1 \Rightarrow d_a < \lambda$
- 透射只是在可见光波段比较重要

	发射	表面反射	水体散射	深度
可见光	×	√	√	米
热红外	√	√	×	1-100 $\mu\text{m}$
微波	√	√	×	1~3mm

## 2.1 衰减系数 (Attenuation Coefficient)

- **衰减系数**  $k_a(\lambda)$  描述电磁波在传播中由于介质吸收和散射产生的衰减的轻重程度
- 可由朗伯-比尔透射定律的微分形式计算，即：

$$k_a(\lambda) = -\frac{1}{L(\lambda)} \frac{dL(\lambda, z)}{dz}$$

- 式中  $L(\lambda, z)$  是辐亮度，衰减系数  $k_a(\lambda)$  描述介质的**固有光学性质 (IOP; inherent optical properties)**。

$$k_a(\lambda) = -\frac{1}{L(\lambda)} \frac{dL(\lambda, z)}{dz}$$

- 辐照度和辐亮度描述**表观光学性质 (AOP)** 的光学量，它们的初始值依赖于外部光源强度，它们在空间的分布取决于**外部光源强度和介质内部衰减率**这两个方面。
- **衰减系数**的值是由介质内部各个组分的物理吸收特性、几何散射特性以及各个组分的浓度决定的，与外部光源（或电磁波源）本身的强度无关。

## 2.2 光学厚度

吸收和散射都引起衰减;

衰减系数 (attenuation coefficient)  $k_a(\lambda) =$

吸收系数 (absorption coefficient)  $k_{ab}(\lambda) +$

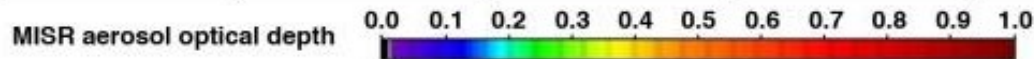
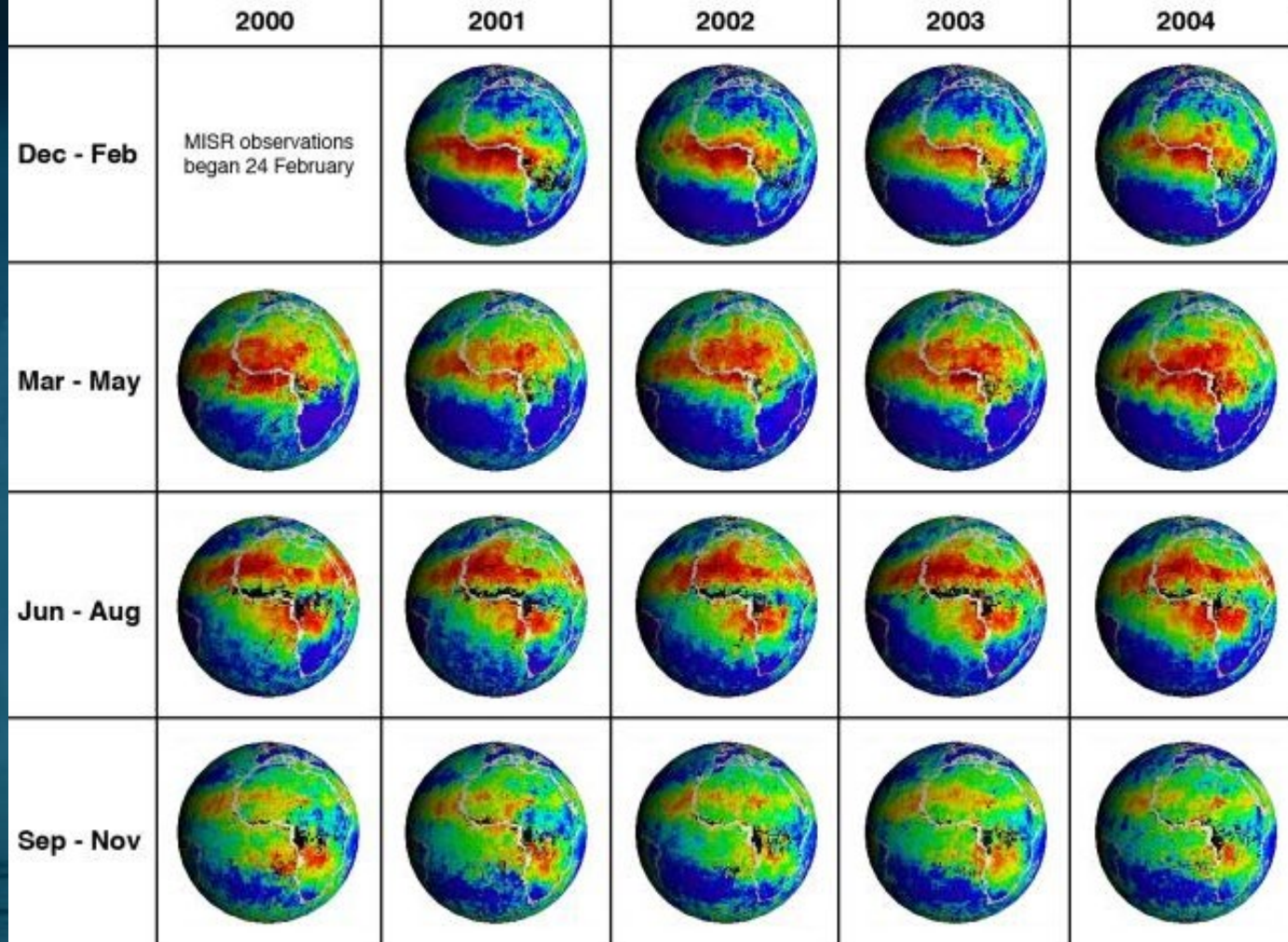
散射系数 (scattering coefficient)  $k_{sc}(\lambda)$

$$k_a(\lambda) = k_{ab}(\lambda) + k_{sc}(\lambda)$$

衰减系数沿传播路径上的积分

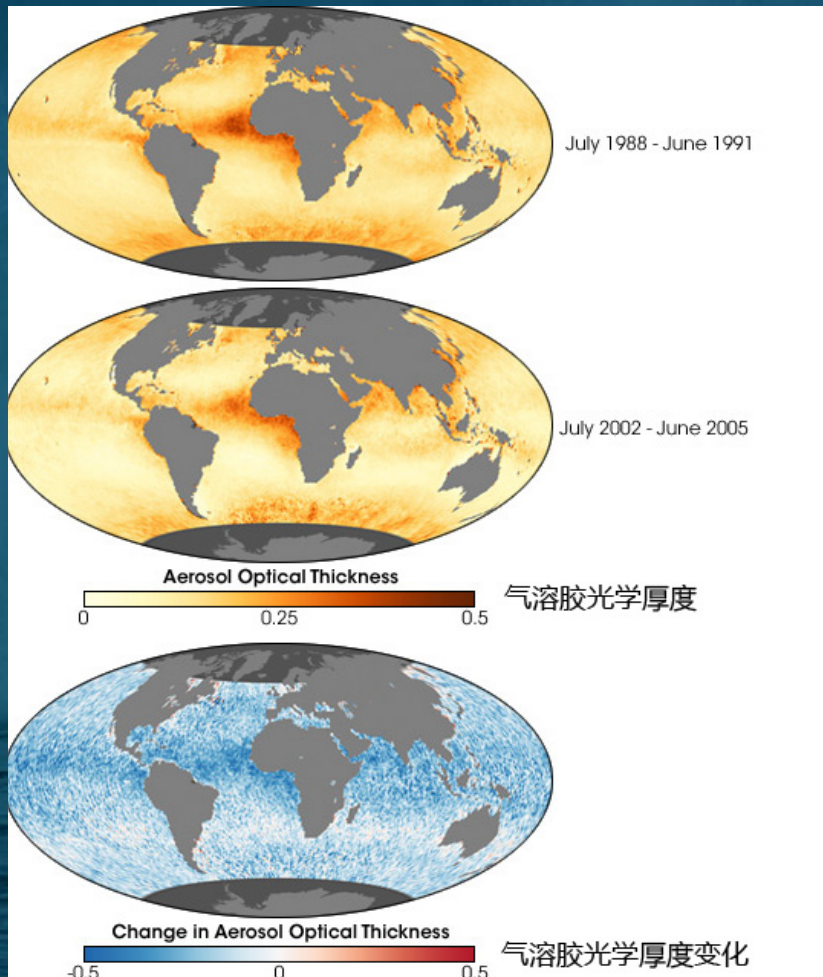
$$\tau_a(\lambda, z) = \int_{z_0}^z k_a(\lambda) dz$$

称为从位置 $z_0$ 到 $z$ 的**光学厚度(optical thickness)**。式中衰减系数 $k_a$ 、吸收系数 $k_{ab}$ 和散射系数 $k_{sc}$ 的单位是 $m^{-1}$ ，光学厚度 $\tau_a$ 没有量纲， $z_0$ 和 $z$ 是介质中电磁波传播路径的边界。



Target Name:	Earth
Is a satellite of:	Sol (our sun)
Mission:	Earth Observing System (EOS)
Spacecraft:	Terra
Instrument:	Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR)
Product Size:	1548 samples x 1224 lines
Produced By:	JPL

# Thinning Aerosols May Affect Temperatures!!!!



- Overall, aerosols are a very complex part of the atmosphere, which can **reflect or absorb** sunlight.
- The researchers say that because aerosols may **counterbalance** greenhouse gas warming, the decline in aerosol dimming power may have made the greenhouse warming trend more evident during the past decade.

[http://www.waturnunc.com/fr2007/Earth\\_Observatory\\_Aerosol\\_2007.php](http://www.waturnunc.com/fr2007/Earth_Observatory_Aerosol_2007.php)

Mishchenko et al.,(2007). *Science*, 315, 1543.

# 朗伯-比尔透射定律的积分形式和透射率？

衰减系数

$$k_a(\lambda) = -\frac{1}{L(\lambda)} \frac{dL(\lambda, z)}{dz}$$

积分

$$\tau_a(\lambda, z) = \int_{z_0}^z k_a(\lambda) dz$$

$$L(\lambda, z) = L(\lambda, z_0) \exp[-\tau_a(\lambda, z_0, z)]$$

该式是朗伯-比尔透射定律 (Lamber-Beer Transmittance Law) 的积分形式。

透射率  $t(\lambda)$  等于在位置  $z$  和位置  $z_0$  的辐亮度之比，将该定义代入到以上公式，可知

$$t(\lambda) = \exp[-\tau_a(\lambda, z_0, z)]$$

# 3.1 漫衰减系数和光束衰减系数

(Diffuse Attenuation Coefficient & Beam Attenuation Coefficient)

- 使用不同方法测量的衰减系数可分为“漫衰减系数”和“光束衰减系数”两种；
- “漫衰减系数”是在自然光场下测量获得的，“光束衰减系数”是在人为设置的“准直光束”光场条件下测量获得的
- 与漫衰减系数对应的透射率被称为漫透射率，与光束衰减系数对应的透射率被称为光束透射率。

# 辐照度衰减系数的定义？

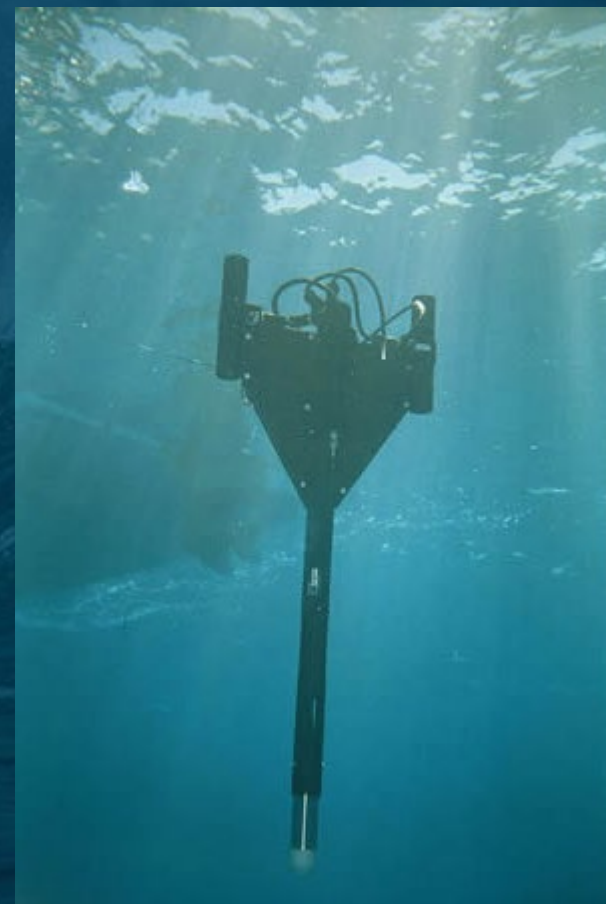
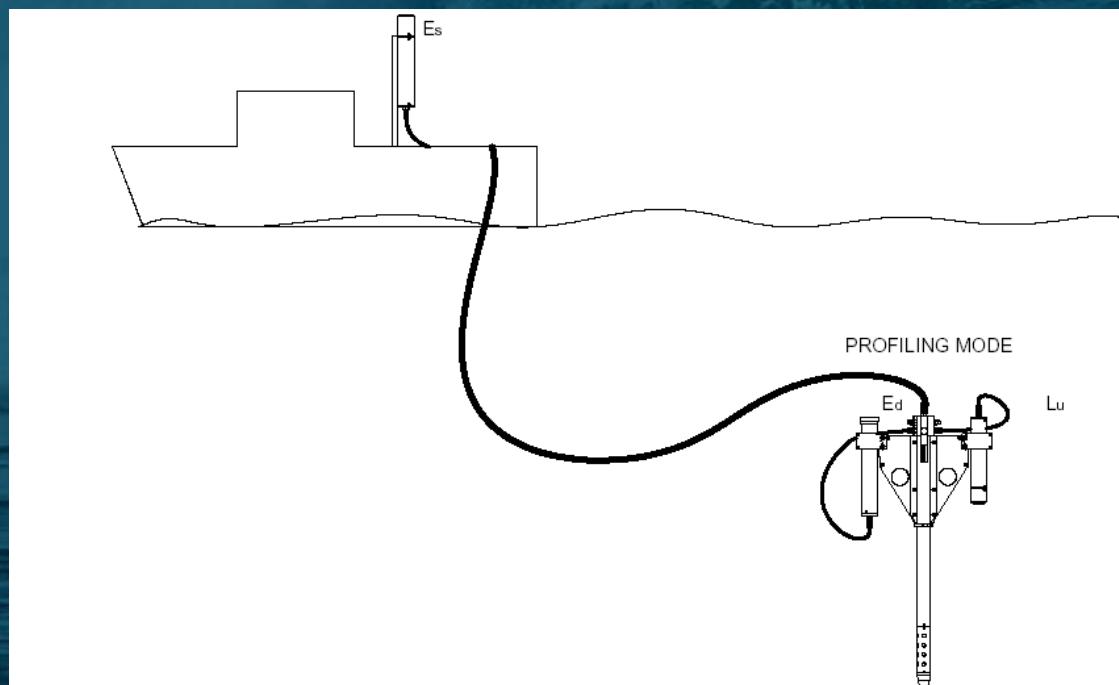
- 在自然光场条件下，可以通过测量辐照度的垂直剖面分布获得**辐照度衰减系数**（irradiance attenuation coefficient） $K(\lambda)$ ，即

$$K(\lambda) = -\frac{1}{E(\lambda)} \frac{dE(\lambda, z)}{dz}$$

- 式中 $E(\lambda, z)$  是辐照度（irradiance）， $K(\lambda)$  是辐照度衰减系数。辐照度衰减系数 $K(\lambda)$  也称为**漫衰减系数**（diffuse attenuation coefficient）。
- 使用水下光谱剖面仪测量的辐照度剖面数据，依据上述公式计算可获得海水的漫衰减系数

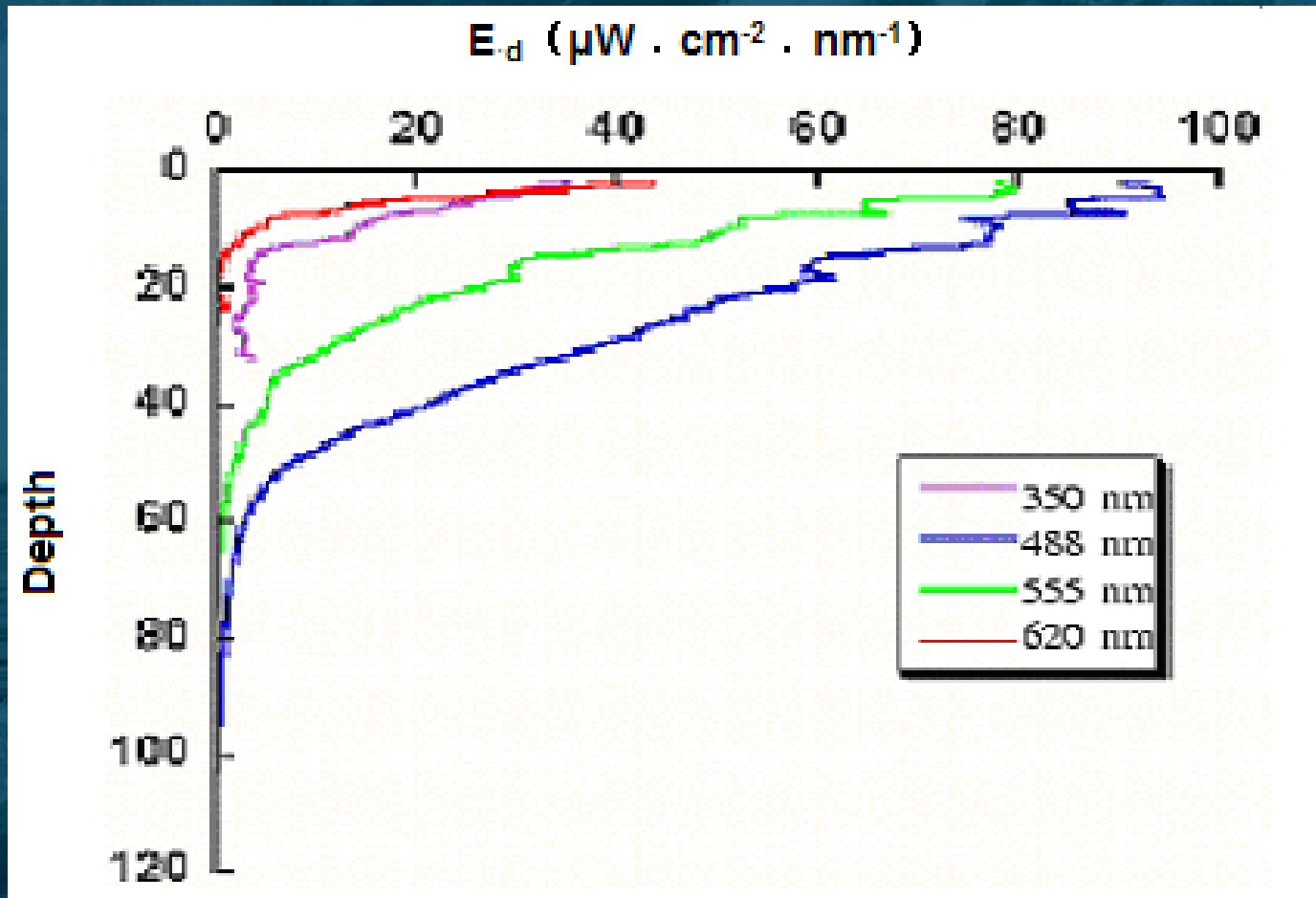
# 水下辐照度和辐亮度测量仪的剖面测量方式

(引自[www.satlantic.com](http://www.satlantic.com))

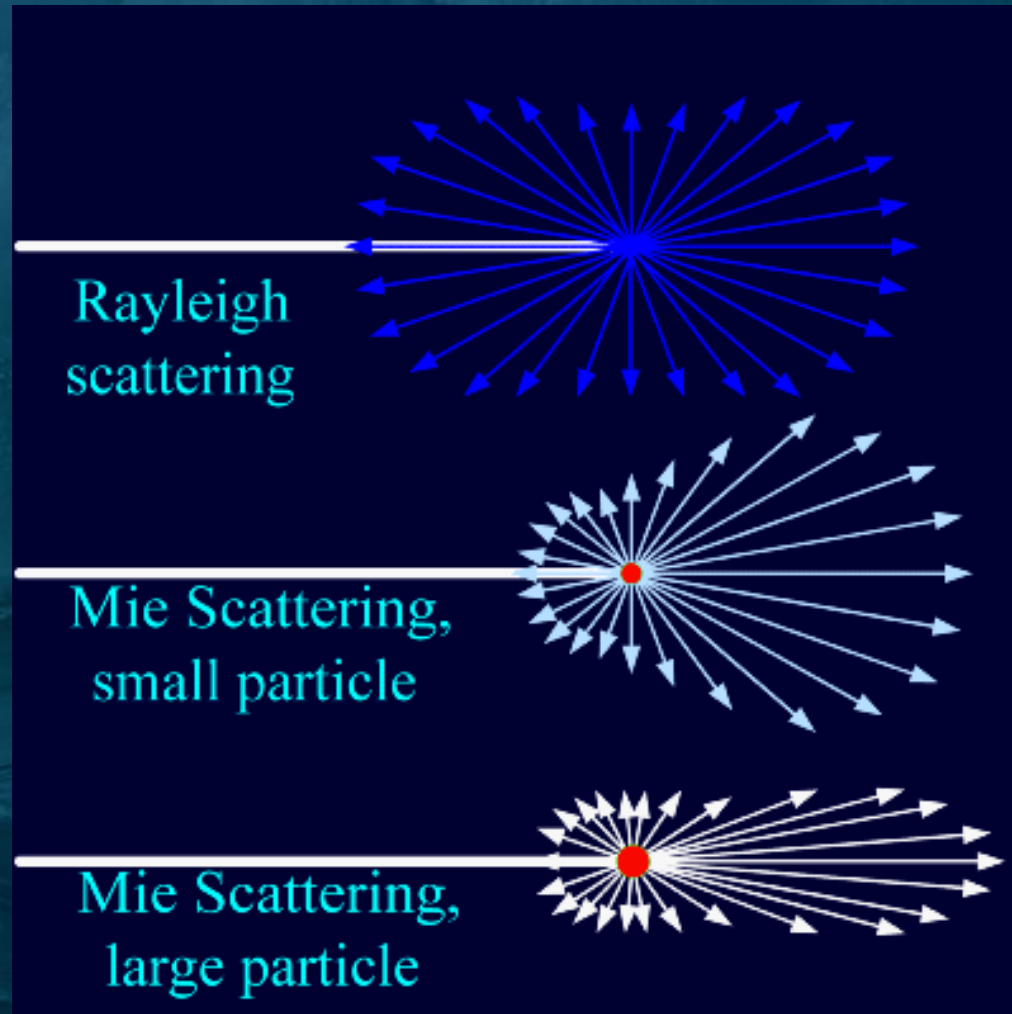


# 水下向下辐照度 $E_d(\lambda)$

(引自 [www.satlantic.com](http://www.satlantic.com))



## 6.1 米氏散射和瑞利散射 (Mie Scatter & Rayleigh Scatter)



- 散射是由于介质中存在的微小粒子或者介质分子对光的作用，使光束偏离原来的传播方向而向四周传播的现象
- 球形有限尺度粒子的米氏散射理论：

$$\sigma_a = \frac{2\pi r^2}{q^2} \sum_{m=1}^{\infty} (2m+1) \operatorname{Re}[a_m(\mathbf{n}, q) + b_m(\mathbf{n}, q)]$$

$$\sigma_{sc} = \frac{2\pi r^2}{q^2} \sum_{m=1}^{\infty} (2m+1) [|a_m(\mathbf{n}, q)|^2 + |b_m(\mathbf{n}, q)|^2]$$

- 式中代表粒子的周长与电磁波波长之比 $q$ 是

$$q = 2\pi r / \lambda$$

- 如果代表粒子尺寸的无量纲因子 $q$ 远小于1, 即 $q \ll 1$ , 可以在上述低阶散射系数中忽略比 $q^3$ 更小的高阶项。这时, **米氏散射 (Mie scatter)** 变为**瑞利散射 (Rayleigh scatter)**。

- 在**瑞利散射**中, 球形粒子的单粒子吸收截面 $\sigma_{ab}$ 和单粒子散射截面 $\sigma_{sc}$ 可以简化展开为

$$\sigma_{ab} = \frac{8\pi^2 r^3}{\lambda} \text{Im}\left[-\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2}\right]$$

$$\sigma_{sc} = \frac{128\pi^5 r^6}{3\lambda^4} \left| \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right|^2$$

## 瑞利散射的适用范围: $q < 0.05$ (满足 $q \ll 1$ 条件)

- 频率为 **3 GHz** 的微波波长约为 **10 cm**, 无量纲的粒子尺寸  $q < 0.05$  要求对应的粒子半径  $r < 0.8 \text{ mm}$ , 只有小雨点满足该条件; 比小雨点还小的气溶胶粒子和空气分子对微波的散射属于瑞利散射, 但由于它们引起的衰减太小, 可以忽略不计
- 热红外波段, 若  $\lambda = 10 \text{ } \mu\text{m}$ , 无量纲的粒子尺寸  $q < 0.05$  要求粒子半径  $r < 0.08 \text{ } \mu\text{m}$ , 但是大气中绝大多数气溶胶粒子超过这个范围。在可见光波段, 除了对于大气层空气分子 (指氮气和氧气分子) 和海水的水分子可用瑞利散射理论, 对于其它粒子必须使用米氏理论

- 无量纲的粒子尺度  $q \geq 1$ ，米氏散射和瑞利散射的微观理论都不适用。
- 米氏散射 (Mie Scatter) 理论适用于描述  $q$  (即粒子的周长与电磁波波长之比) 小于1的球形粒子对电磁波的散射现象。
- 瑞利散射理论适用于描述  $q$  远小于1的球形粒子对电磁波的散射现象。

## 天空为什么是蓝色???

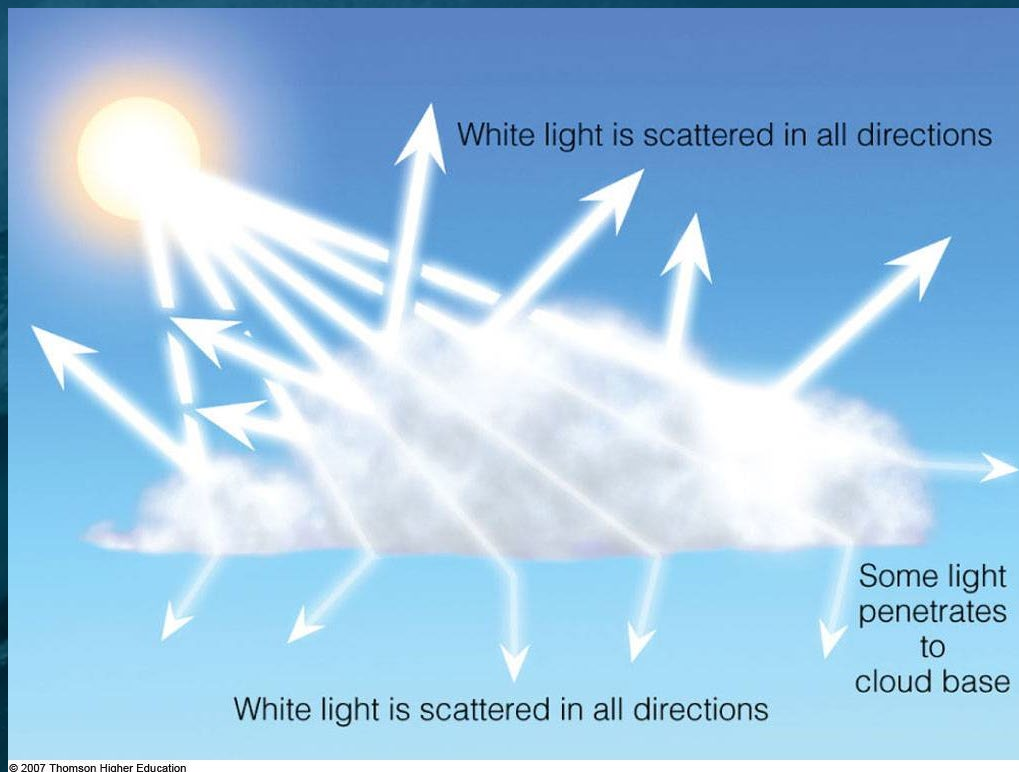
$$\sigma_{sc} = \frac{128\pi^5 r^6}{3\lambda^4} \left| \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right|^2$$



- 瑞利散射的强度与波长的四次方成反比；
- 可见光的波长范围是400 nm（蓝紫光）到700 nm（红光），红光波长是蓝紫光波长的1.75倍，因此蓝紫光散射强度接近红光散射强度的十倍。

在太阳光谱中蓝光的能量远大于紫光的能量，加上大气中的分子（氮气和氧气分子）对蓝光的瑞利散射效应，所以我们通过散射光看到的天空是蓝色的。

## 丁达尔散射



阴天的云层很厚，而且大颗粒物较多，少量阳光照射到云层上发生丁达尔散射（白光散射后仍然是白光），大量阳光遇到云层后直接漫射开来，整个天空就像是一块大的柔光布，所以阴天的自然光很少有颜色上的倾向而显现出灰白色。