

## Условие существования атмосферы

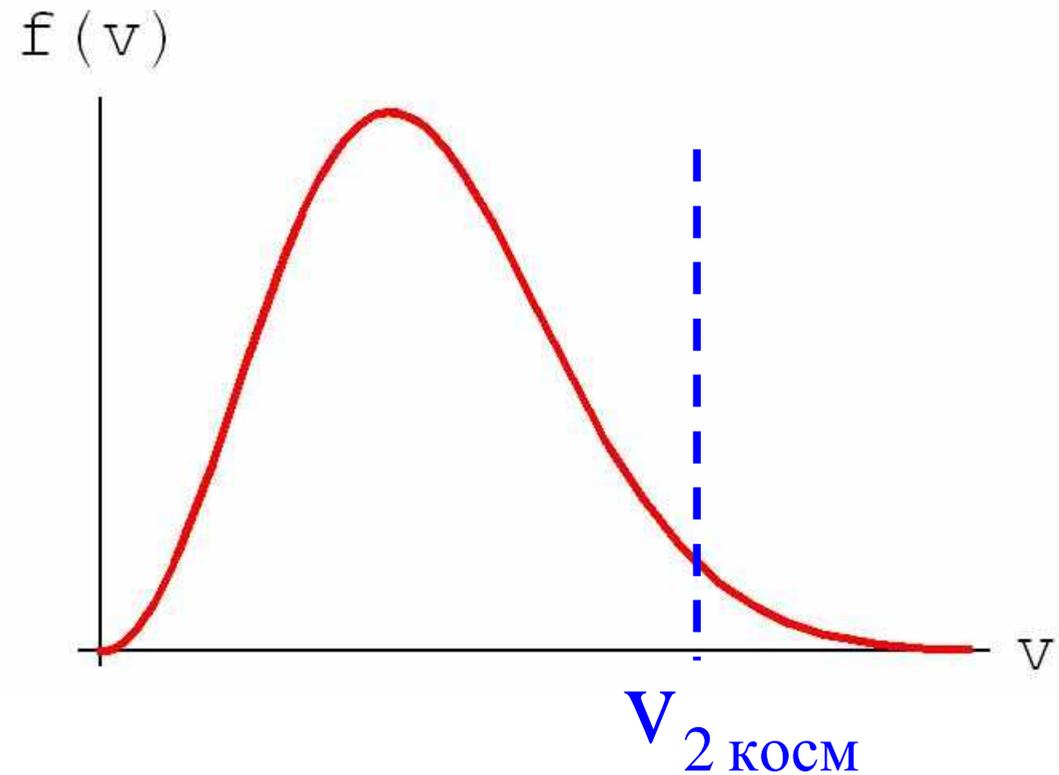
$$V_{2 \text{ косм}} = \sqrt{2gR} \approx 11.2 \text{ км/с}$$

$$v \sim \sqrt{kT/m}$$

при  $T = 300 \text{ К}$

$$V_{\text{H}_2} \approx 1.1 \text{ км/с}$$

$$V_{\text{N}_2} \approx 0.3 \text{ км/с}$$



# Условия существования гидросферы (океана)

1. Температура на планете должна быть выше температуры плавления вещества, из которого состоит океан;
2. Парциальное давление газообразной фазы этого вещества должно быть выше насыщающего давления;
3. Температура и давление должны быть ниже критической точки (для воды: 647.3К, 22.12МПа).

## Основные крупномасштабные формы рельефа дна

<i>Форма</i>	<i>Глубины, м</i>	<i>Уклон</i>
<b>Шельф</b>	<b>0-200</b>	<b>0.002 (ср.)</b>
<b>Материковый склон</b>	<b>200-3000</b>	<b>~0.01-0.1</b>
<b>Материковое подножие</b>	<b>3000-4000</b>	<b>~0.001-0.01</b>
<b>Ложе океана, Океанические котловины</b>	<b>4000-6000</b>	
<b>Серединно-океанические хребты</b>	<b>2500-4000</b>	<b>~0.005</b>
<b>Глубоководные желоба</b>	<b>&gt;6000</b>	<b>~0.1</b>

## Главные компоненты примеси в морской воде

компонента		% массы
Натрий	$\text{Na}^+$	30.6
Магний	$\text{Mg}^{2+}$	3.68
Кальций	$\text{Ca}^{2+}$	1.17
Калий	$\text{K}^+$	1.13
Стронций	$\text{Sr}^{2+}$	0.0226
Хлор	$\text{Cl}^-$	55.02
Сульфат	$\text{SO}_4^{2-}$	7.71
Гидрокарбонат	$\text{HCO}_3^-$	0.405
Бром	$\text{Br}^-$	0.19
Борная кислота	$\text{H}_3\text{BO}_3$	0.073
Фтор	$\text{F}^-$	0.0037

# Соленость морской воды

$$S = \frac{m_{\text{примеси}}}{m_{\text{примеси}} + m_{\text{чистой воды}}}$$

$$S = 1000 s \quad [\text{‰} \quad \text{промилле}]$$

Средняя соленость Мирового океана

~35‰

Общее количество соли

~4.9·10<sup>19</sup> кг

Соль способна покрыть Землю слоем

~150 м

**!!! Вдали от берегов  
относительное содержание  
главных компонент примеси в  
морской воде постоянно!!!**

# Уникальные свойства воды

## Высокие значения:

теплоемкости	4186 Дж/кг К
теплота плавления	332400 Дж/кг
теплота парообразования	2256200 Дж/кг
пов. натяжения	0.075 Н/м

- Вода – эффективный растворитель;
- На Земле вода встречается в трех фазах;
- Широкий диапазон существования жидкой фазы.

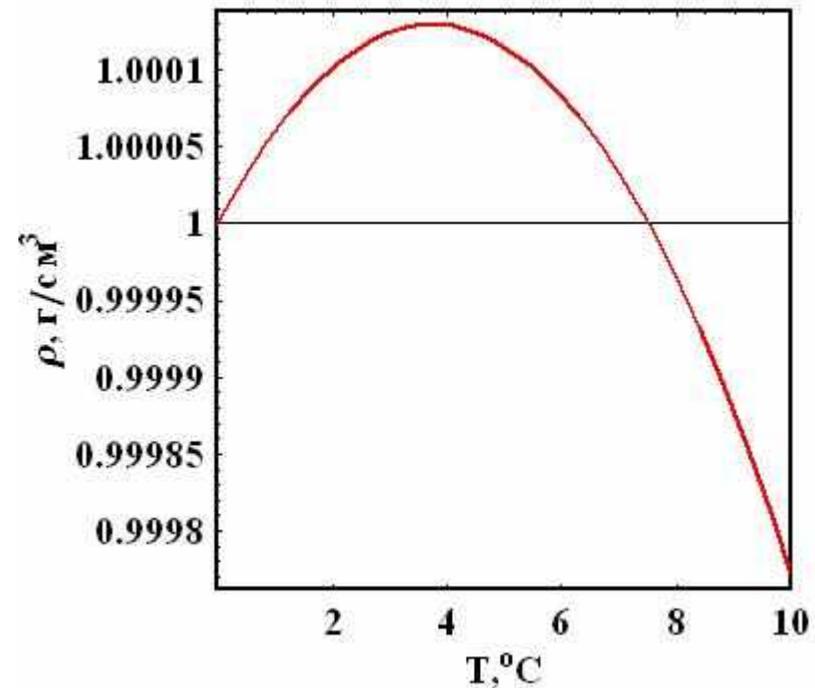
# Уникальные свойства воды

**ПЛОТНОСТЬ ЛЬДА < ПЛОТНОСТИ ВОДЫ**

**917 кг/м<sup>3</sup>**

**999.8 кг/м<sup>3</sup>**

**существование  
температуры  
максимальной  
плотности у пресных  
(солонватых) вод**



# Уравнение состояния морской воды

$$\rho = \rho(s, T, p)$$

$$\rho \approx 1 + 10^{-3} (\varepsilon_1 s + \varepsilon_2 T - \varepsilon_3 s T - \varepsilon_4 T^2 + \varepsilon_5 p) \quad [\text{г/см}^3]$$

$$\varepsilon_1 = 0.82$$

$$\varepsilon_2 = 0.0689$$

$$\varepsilon_3 = 0.0039$$

$$\varepsilon_4 = 0.00918$$

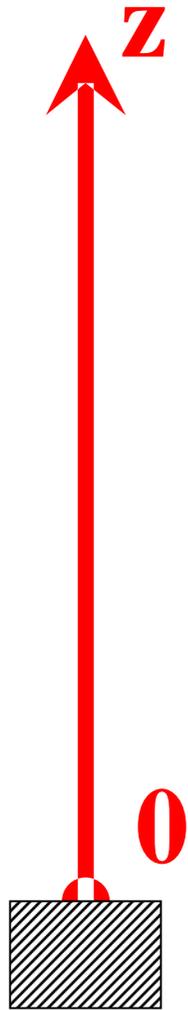
$$\varepsilon_5 = 4.5 \cdot 10^{-3}$$

$$s \quad [^{\circ}/_{\infty}]$$

$$T \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$p \quad [\text{дбар}]$$

# Барометрическая формула



$$dp = -g \rho dz \quad \rho = \frac{p}{R_a T}$$

$$dp = -g \frac{p}{R_a T} dz \quad \Rightarrow \quad \frac{dp}{p} = -\frac{g}{R_a T} dz$$

пусть  $T = \text{const} \neq f(z)$

$$p = p_0 e^{-\frac{g}{R_a T} z} \equiv p_0 e^{-z/H}, \quad H = \frac{R_a T}{g} \approx 8 \text{ км}$$

**H – шкала высот (высота однородной атмосферы)**

**Барометрическая формула**  
**неоднородная атмосфера**

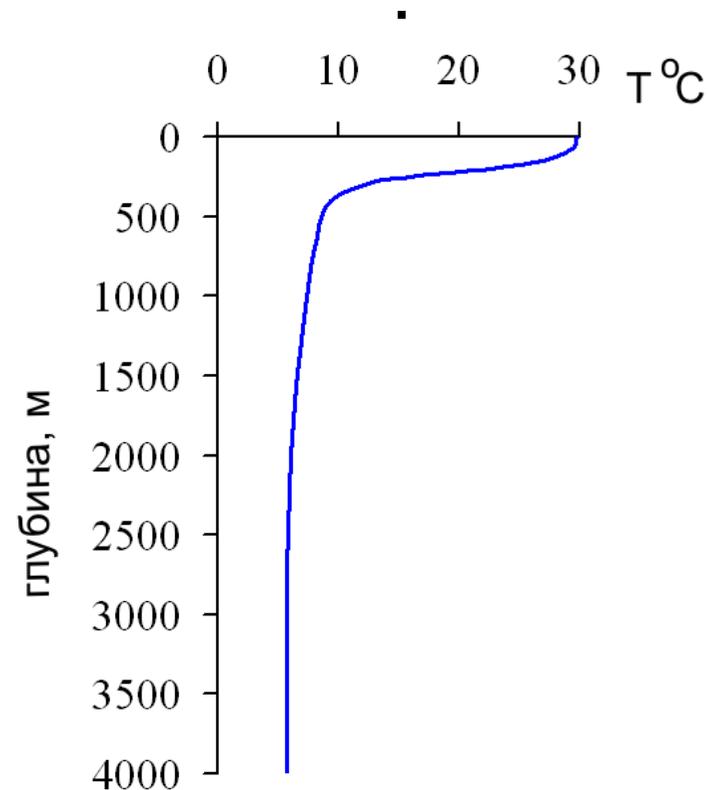
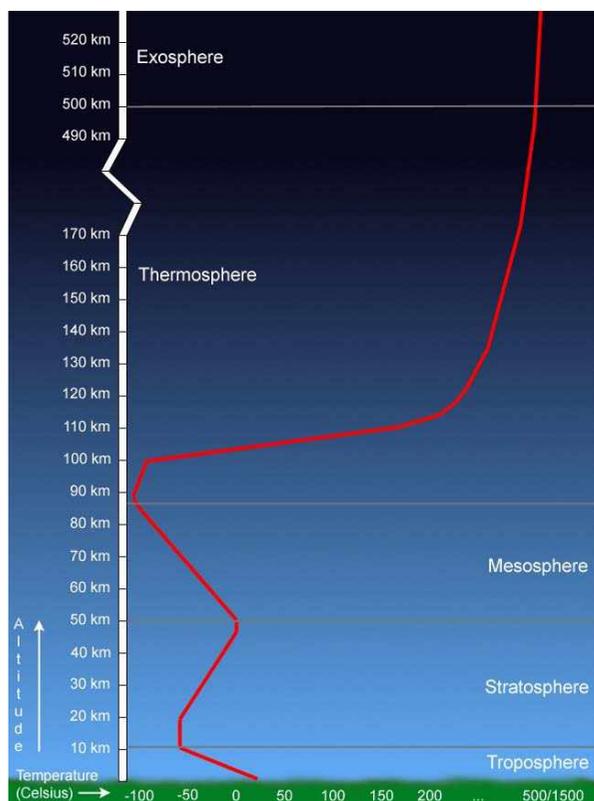
$$T = T(z), \quad g = g(z)$$

$$p = p_0 e^{-\int_0^z \frac{g(z^*)}{R_a T(z^*)} dz^*}$$

# Стратификация –

(лат. *stratum* настил слой+ *facere* делать)

распределение по вертикали слоев воды или воздуха с различной плотностью, температурой, соленостью, etc.



# Законы теплового излучения

# Закон излучения Киргхофа [G.R.Kirchhoff, 1859г]

Отношение *испускающей способности* поверхности непрозрачного тела к его *поглощательной способности* одинаково для всех тел и является универсальной функцией длины волны  $\lambda$  (частоты  $\nu$ ) и абсолютной температуры  $T$

**Абсолютно черное тело (АЧТ) –**  
понятие теории теплового излучения,  
означающее тело, которое полностью  
поглощает любое падающее на его  
поверхность электромагнитное  
излучение, независимо от  
температуры этого тела

**понятие АЧТ введено Г.Р.Кирхгофом в 1859г  
(G.R.Kirchhoff)**

# Свойства АЧТ:

- 1. Поглощательная способность равна 1 при излучениях всех частот, всех направлений и любых поляризациях;**
- 2. Плотность энергии и спектральный состав излучения, испускаемого единицей поверхности зависят только от его температуры, но не от природы излучающего вещества;**
- 3. Излучение АЧТ (\*) может находиться в равновесии с веществом при равенстве потоков излучения, испускаемого и поглощаемого АЧТ, имеющим определенную температуру.**

**(\*)** Такое излучение представляет собой излучение равновесное, которое подчиняется закону излучения Планка

# Испускательная способность АЧТ

(закон излучения Планка [M.Planck, 1900; A.Einstein, 1916] )

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left[\frac{hc}{\lambda k T}\right] - 1} \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \text{с}} \cdot \frac{1}{\text{м}} \right]$$

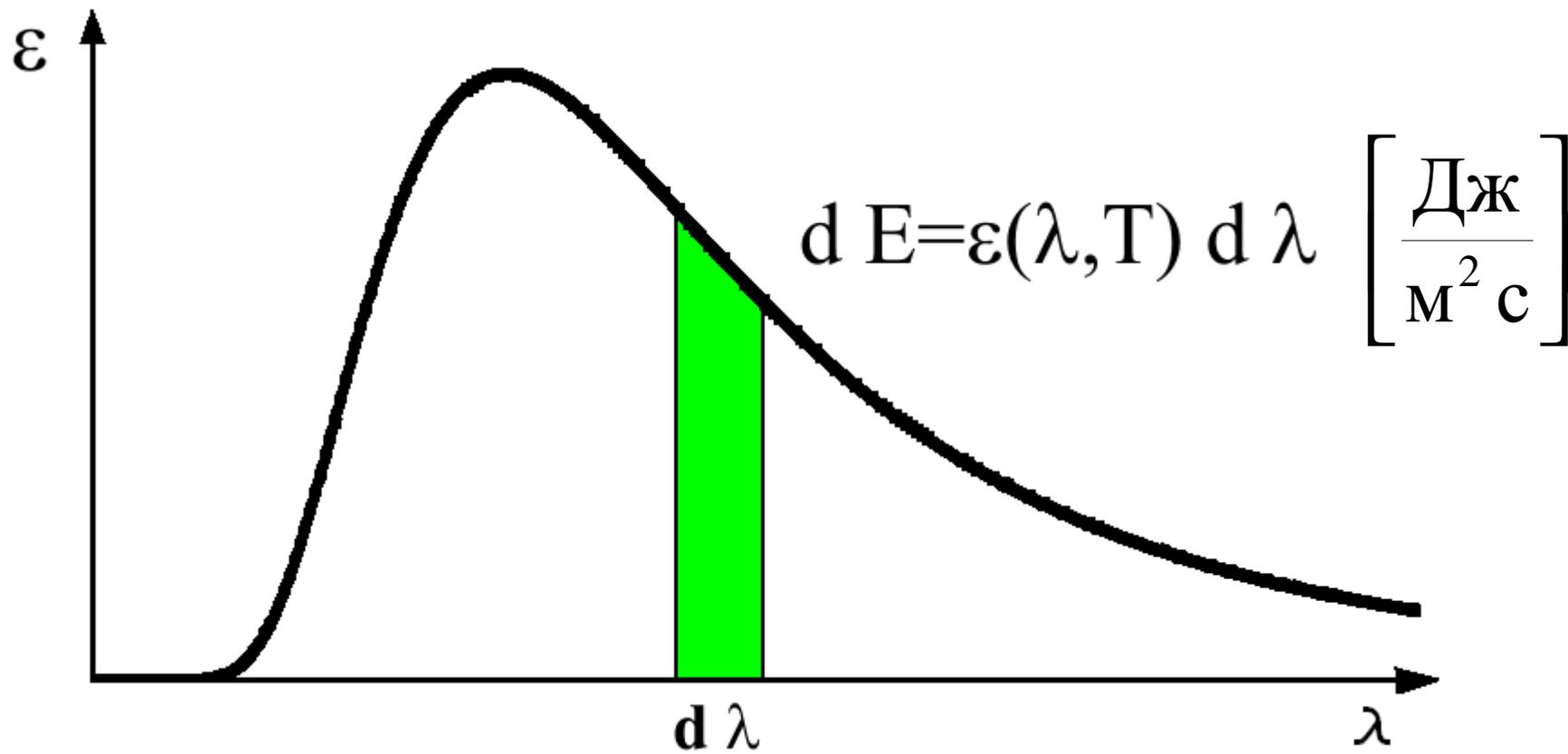
$\lambda$  – длина волны;

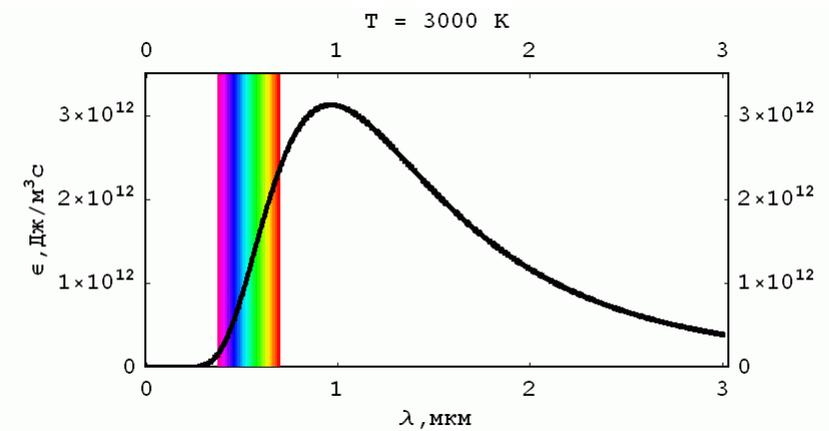
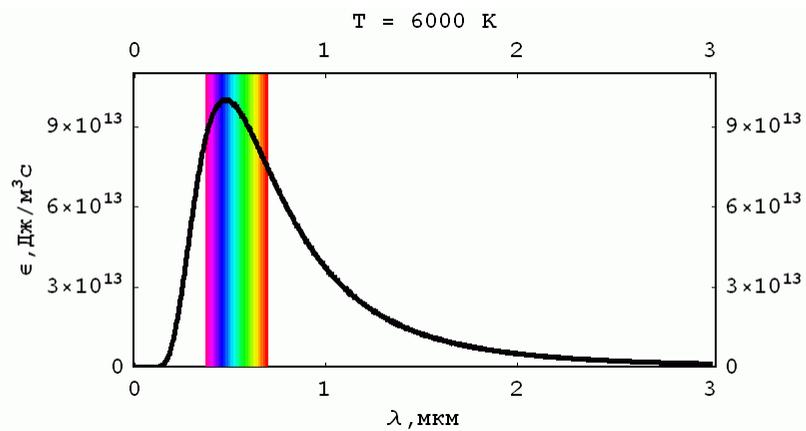
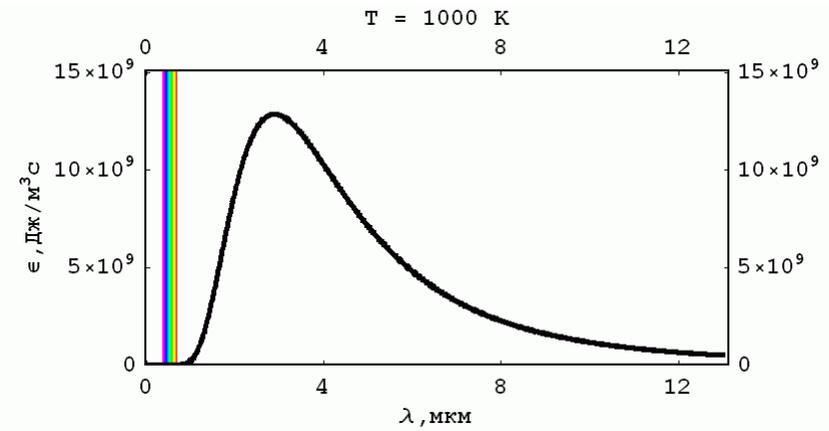
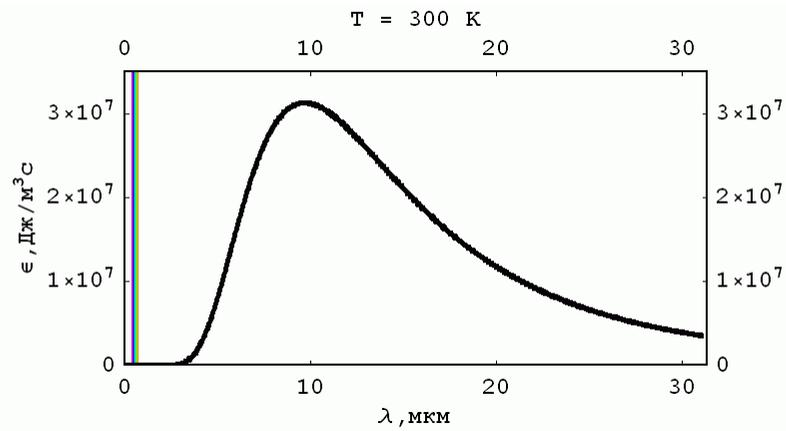
$T$  – температура;

$c$  – скорость света;

$h = 6.63 \cdot 10^{-34}$  Дж · с – постоянная Планка;

$k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж / К – постоянная Больцмана.





# Следствия из закона Планка

закон  
смещения Вина

закон  
Стефана-Больцмана

# Закон смещения Вина [W. Wien, 1893]

$$\varepsilon(\lambda, T)d\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left[\frac{hc}{\lambda kT}\right] - 1} d\lambda$$

$$\varepsilon(\lambda, T)d\lambda = \left\{ \alpha \equiv \lambda T \right\} = \frac{F(\alpha)}{\alpha_{\max} \alpha^5} d\alpha$$

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} \left( \frac{F(\alpha)}{\alpha^5} \right) = 0 \quad \Rightarrow \quad \alpha_{\max}$$

$$\alpha_{\max} = 2.898 \cdot 10^{-3} \text{ [м} \cdot \text{К]} - \text{постоянная Вина}$$

$$\lambda_{\max} T = \alpha_{\max}$$

# Закон Стефана-Больцмана

[J.Stefan, 1879; L.Boltzmann, 1884]

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left[\frac{hc}{\lambda kT}\right] - 1}$$

$$E = \int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4$$

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5.67 \cdot 10^{-8} \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К}^4} \right]$$

**СОЛНЕЧНАЯ ПОСТОЯННАЯ** ( $S_0$ ) - суммарный поток солнечного излучения, проходящий через единичную площадку, перпендикулярную направлению лучей и находящуюся вне земной атмосферы на расстоянии  $r=1$  а. е. ( $149.6 \cdot 10^9$  м) от Солнца.

$$S_0 \approx 1370 \text{ Вт/м}^2; \quad \Delta S_0 / S_0 < 0.01$$

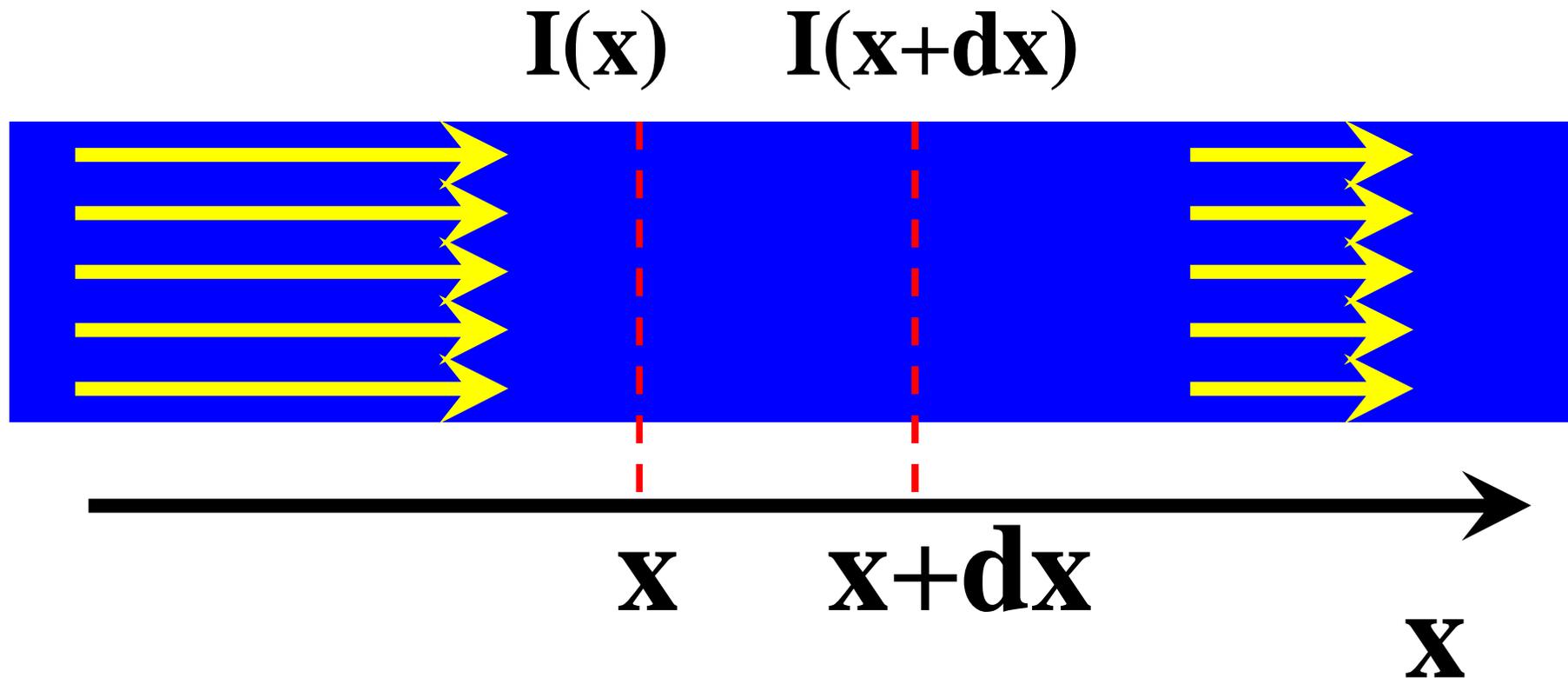
**Светимость Солнца:**  $L_{\odot} = S_0 \cdot 4\pi r^2 \approx 3.84 \cdot 10^{26}$  Вт

**Земля получает:**  $L_{\oplus} = S_0 \pi R_{\oplus}^2 \approx 1.75 \cdot 10^{17}$  Вт

$$L_{\oplus} / L_{\odot} = \pi R_{\oplus}^2 / 4\pi r_{\oplus}^2 \approx 4.4 \cdot 10^{-10}$$

**Мерцание звёзд** - быстрые изменения блеска и цвета звёзд. М. з. вызывается преломлением лучей в быстро пробегающих струях воздуха, которые из-за различной плотности имеют различный показатель преломления. Вследствие дисперсии луч разлагается на лучи различных цветов, которые идут по разным путям, расходящимся тем больше, чем звезда ближе к горизонту места наблюдения; расстояние между красными и фиолетовыми лучами у поверхности Земли может достигать 10 м. В глаз наблюдателя одновременно попадают разноцветные лучи звезды, прошедшие атмосферу по неодинаковым траекториям и встретившие на пути различные воздушные струи, которые по-разному собирают или рассеивают лучи.

# Закон Бугера (1729 г.)



$$dI = I(x + dx) - I(x) = -\sigma I dx$$

## Закон Бугера (1729 г.)

$$dI = -\sigma I dx \quad \Rightarrow \quad \frac{dI}{I} = -\sigma dx;$$

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = -\int_0^x \sigma dx \quad \Rightarrow \quad \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\sigma x;$$

$$I(x) = I_0 e^{-\sigma x};$$

$\sigma$  – коэффициент поглощения  
(ослабления)

## Закон Бугера (1729 г.)

$$I(x) = I_0 e^{-\sigma x}, \quad \sigma \text{ [M}^{-1}\text{]};$$

$$I(x) = I_0 e^{-x/\delta}, \quad \delta = \frac{1}{\sigma} \text{ [M]};$$

$$\sigma = \sigma(\lambda).$$

в атмосфере  
и в океане

# Ослабление электромагнитного излучения есть следствие факторов:

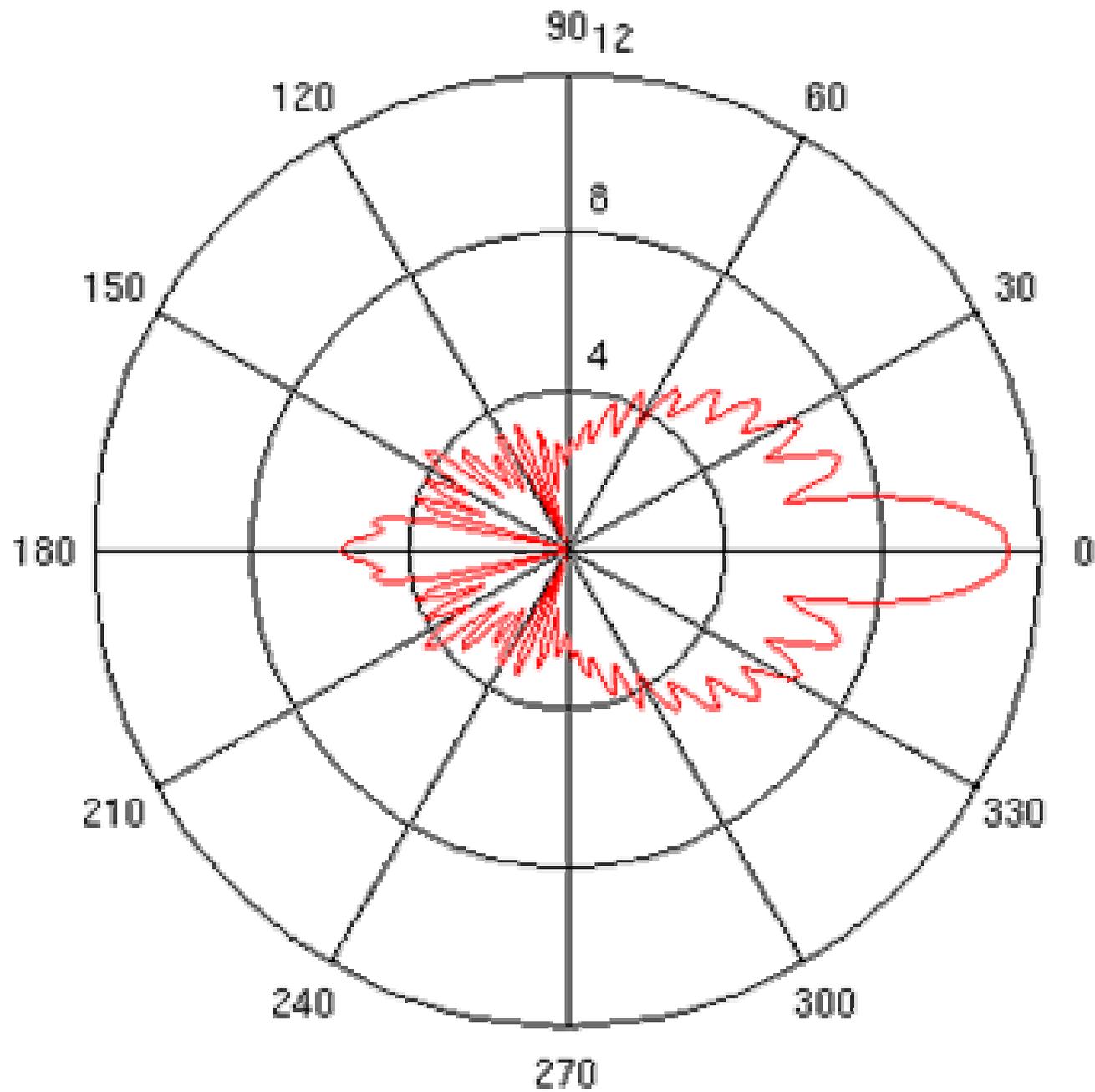
1. Поглощения (переход энергии в тепло);
2. Рассеяния («переизлучения»)



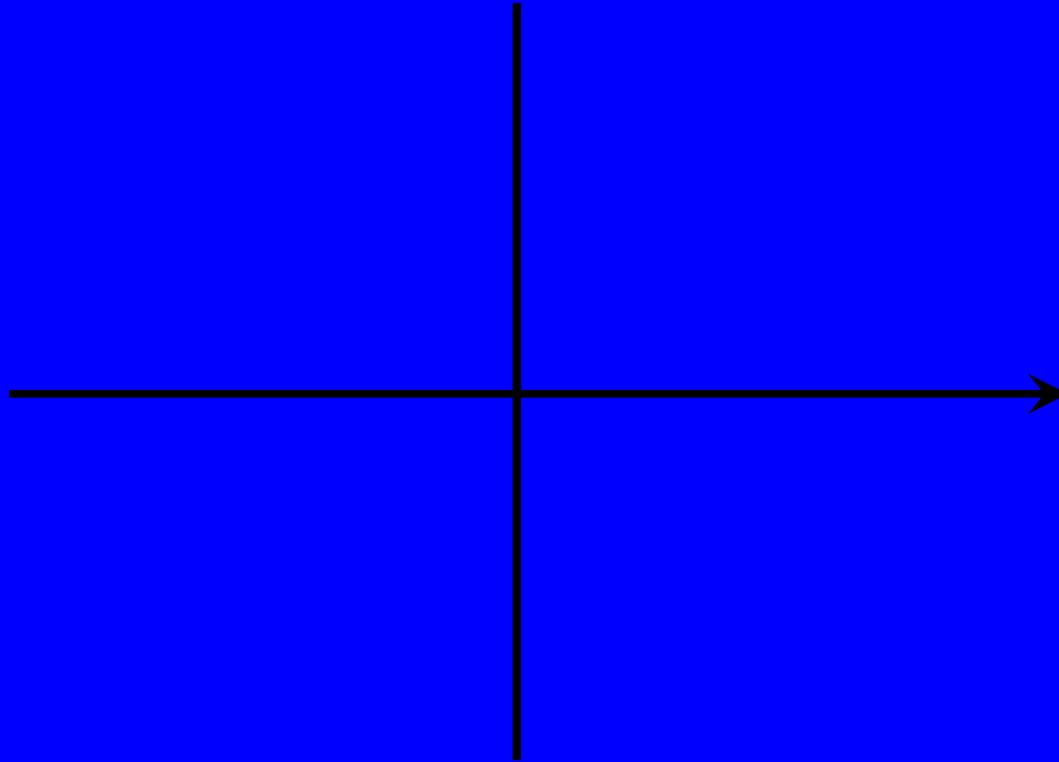
**рассеяние Ми**



**рассеяние Рэля  
или молекулярное**



Mie scattering from spherical particle ( $m=1.25$ ,  $x=20$ )  
(log scale)



**определяет цвет  
неба и цвет  
солнца на закате**

$$I \sim \frac{1}{\lambda^4} [1 + \cos^2 \vartheta]$$

## Типичные значения ( $\lambda = 0.55$ мкм)

Среда	Показатель поглощения $k, \text{м}^{-1}$	Показатель рассеяния $e, \text{м}^{-1}$	Показатель ослабления $S, \text{м}^{-1}$
Океан	<b>0.07</b>	<b>0.16</b>	<b>0.23</b>
Атмосфера	<b>0</b>	<b><math>2 \cdot 10^{-4}</math></b>	<b><math>2 \cdot 10^{-4}</math></b>

## Экстремальные значения показателя ослабления в океане ( $\lambda = 0.546$ мкм)

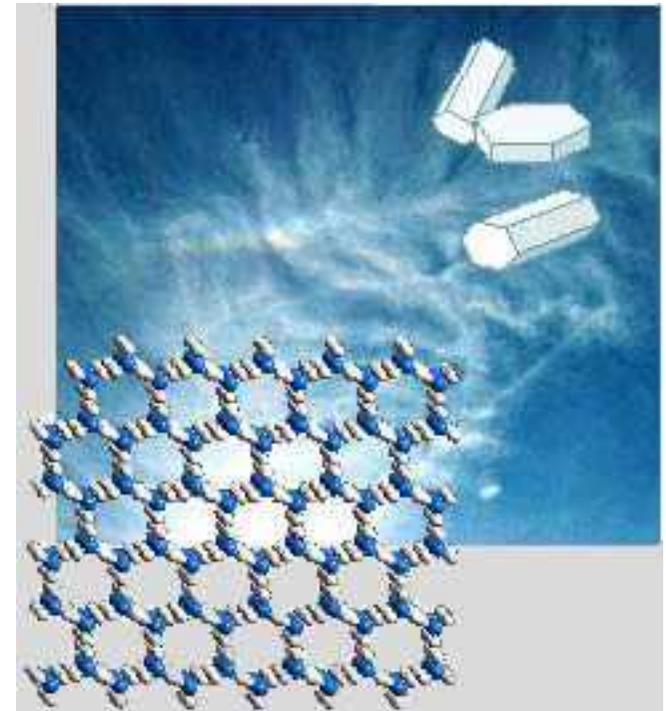
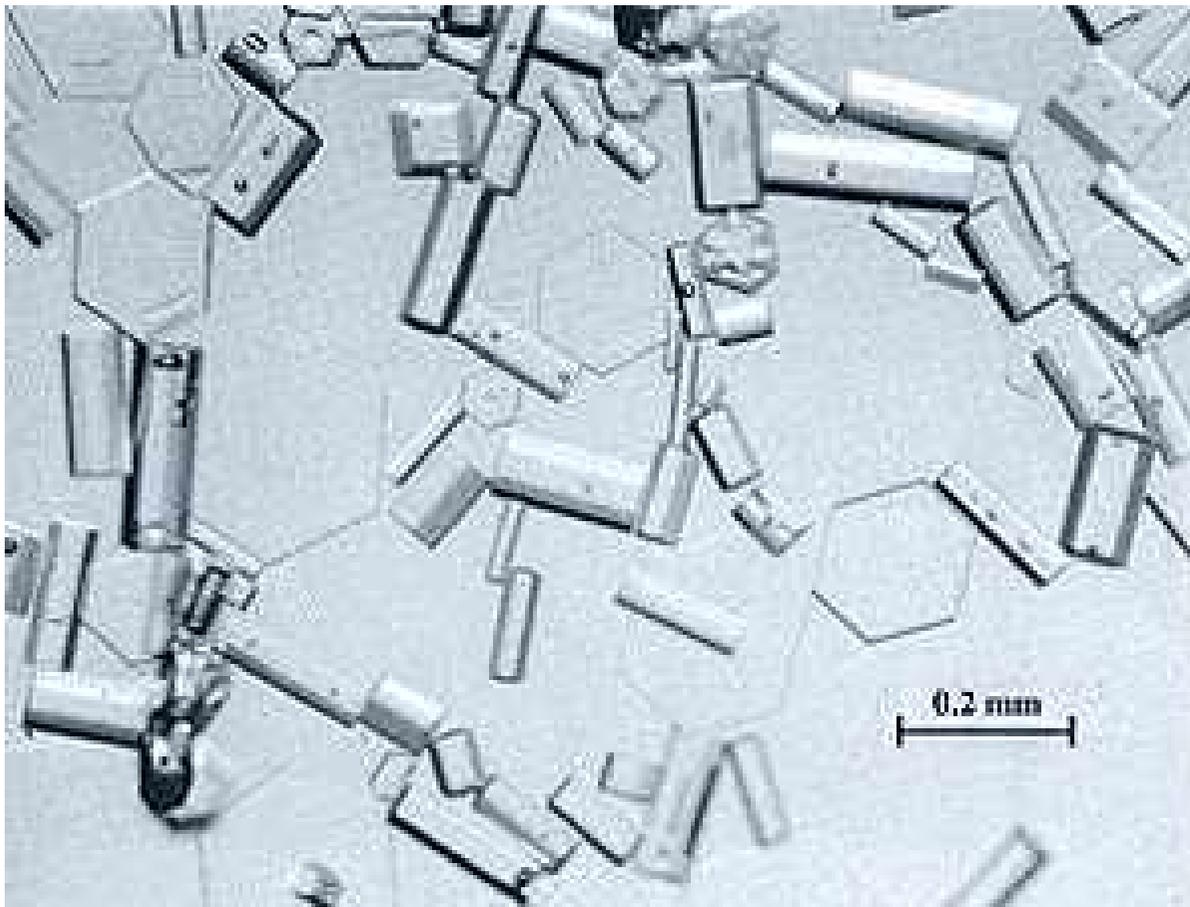
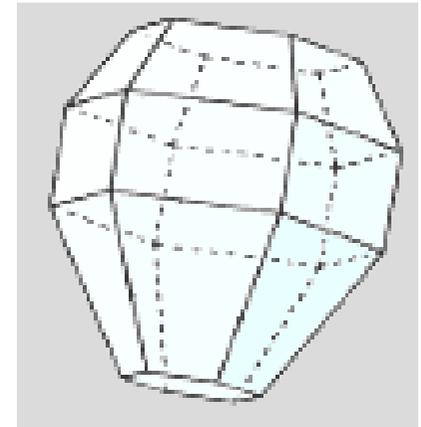
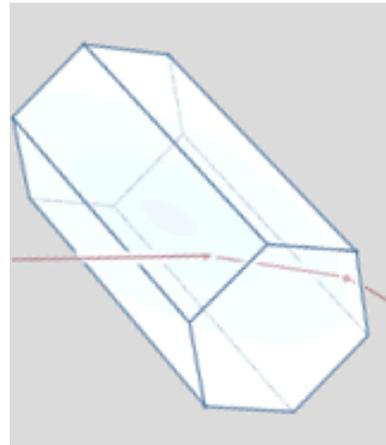
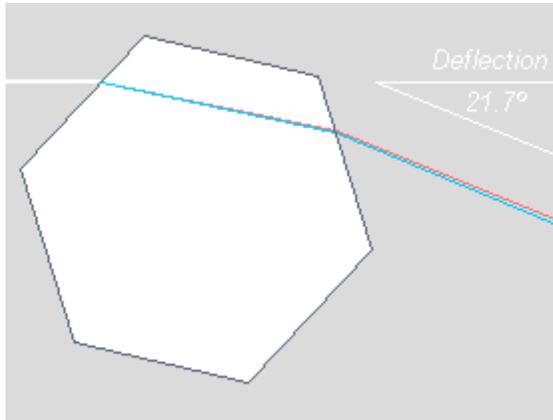
Саргассово море

$$0.058 < \sigma < 2.8 \text{ м}^{-1}$$

Перуанский шельф

# Оптические эффекты, вызываемые кристаллами льда





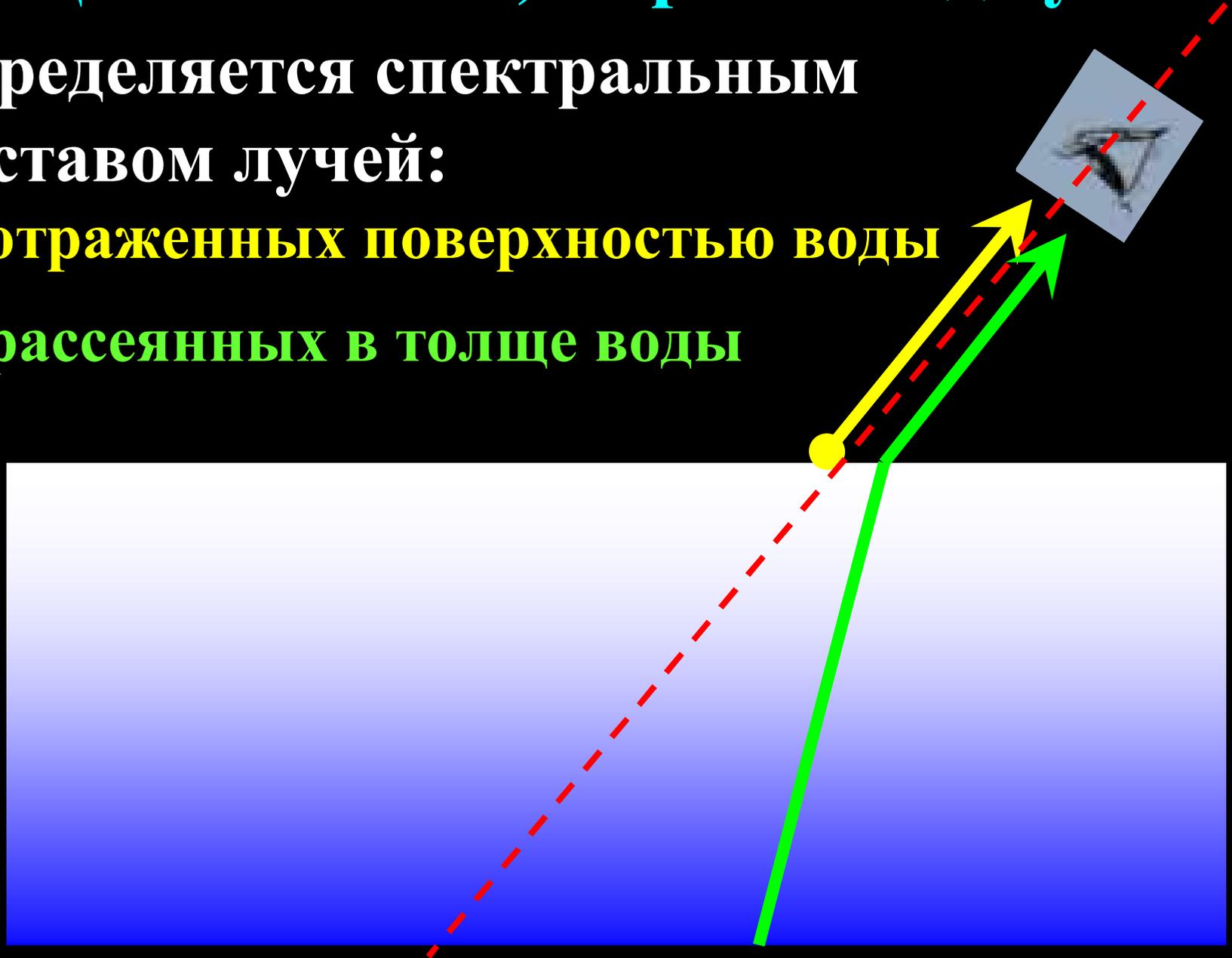
# Atmospheric Optics

<http://www.sundog.clara.co.uk/>

# Цвет океанов, морей и вод суши

определяется спектральным составом лучей:

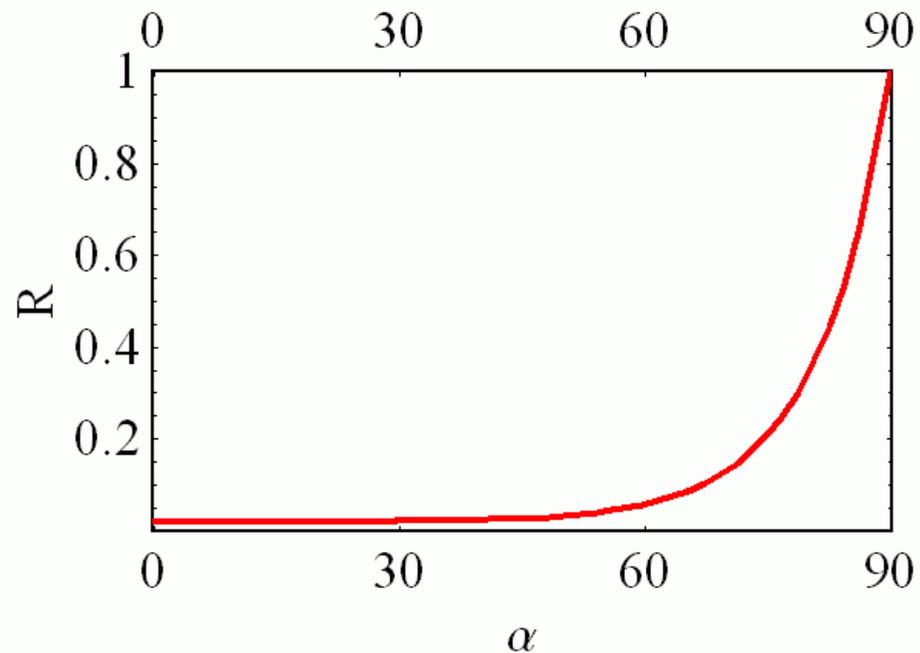
1. отраженных поверхностью воды
2. рассеянных в толще воды



1. коэффициент отражения на поверхности воздух-вода  $R \neq R(\lambda)$

2. коэффициент отражения

$$R = R(\alpha)$$



**Q** вклад отраженных лучей – «цвет неба»

**Q** интенсивность зависит от угла падения

# Интенсивность рассеяния зависит от

**1. длины волны  $\lambda$  :  $I \uparrow$  при  $\lambda \downarrow$**

*(рассеяние Рэлея  $\sim \lambda^{-4}$ , рассеяние Ми – слабая зависимость от  $\lambda$ )*

**2. рассеивающих частиц**

*(концентрации, размера, типа)*

**3....**

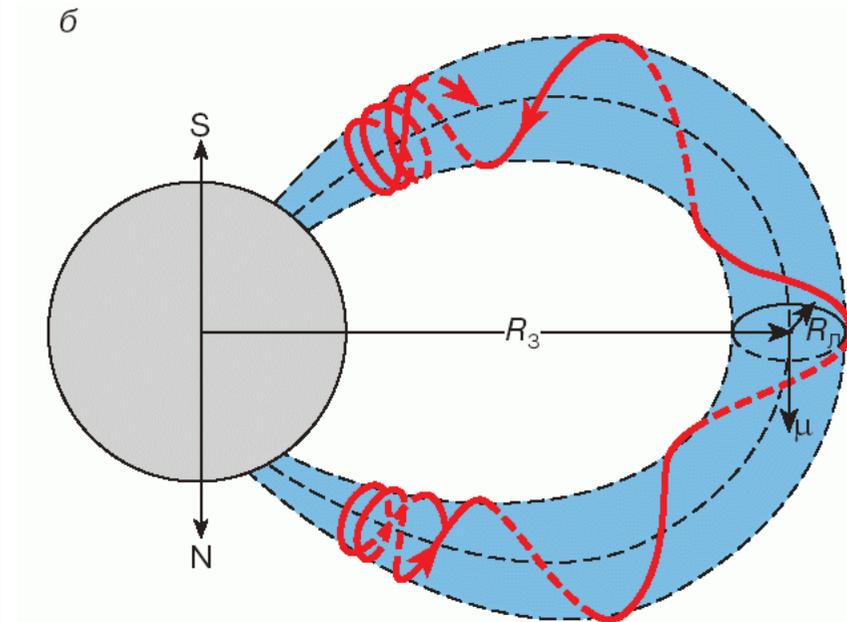
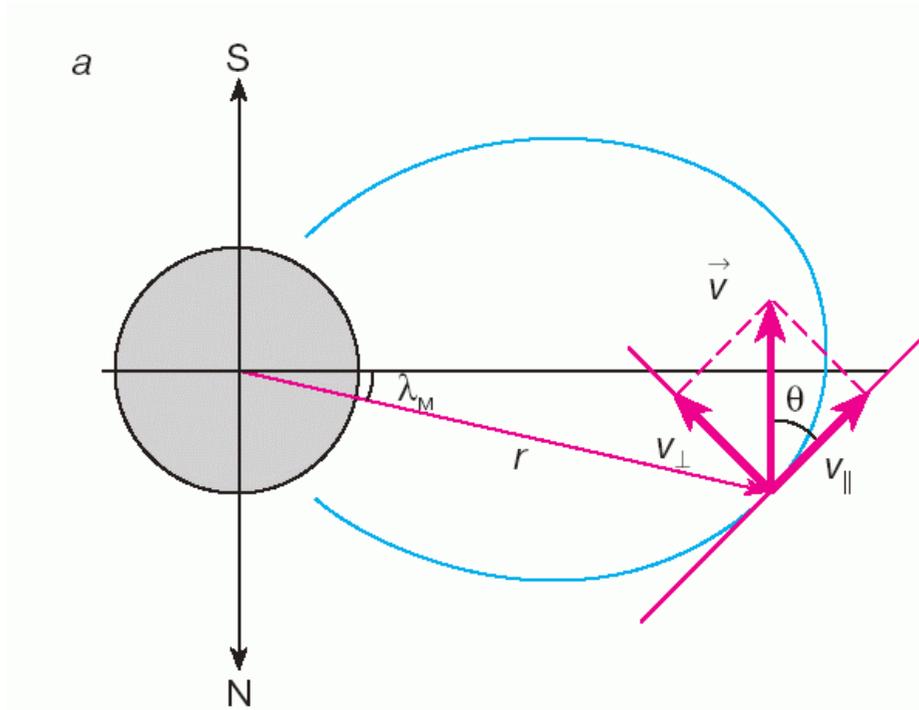
### 3. Спектральный состав рассеянного луча меняется при прохождении через водную толщу

$$I(x) = I_0 e^{-\sigma x}$$

$$\sigma = \sigma(\lambda)$$



# Геомагнитная ловушка



а – разложение вектора скорости на две составляющие; б – движение частицы между зеркальными точками

$$\frac{mv^2 \sin^2 \theta}{H} = \text{const};$$

$H$  – напряженность магн. поля;

$\theta$  – питч – угол;

$v$  – скорость частицы

**адиабатический  
инвариант**