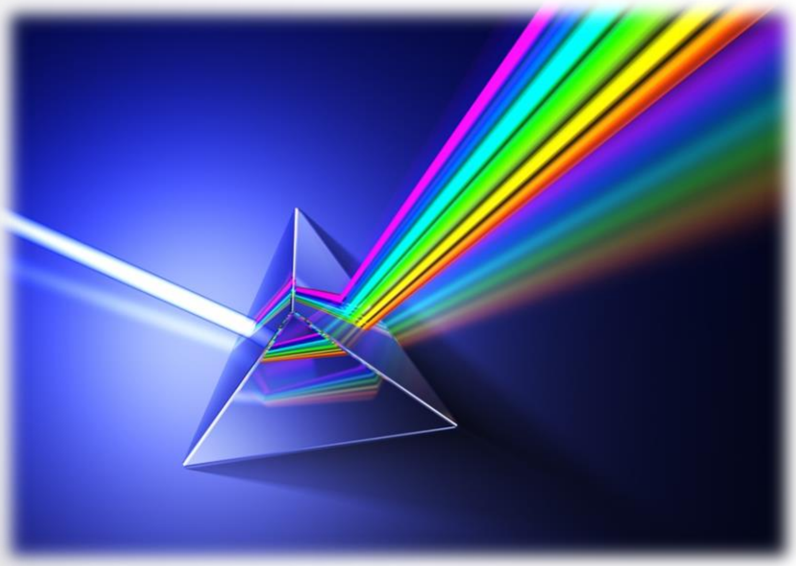
Сегодня: пятница, 15 марта 2024 г.

Общая физика

Модуль: Волновая оптика

Лекция 9. Дисперсия света



1. *Взаимодействие света с веществом*
2. *Дисперсия света*
3. *Геометрический принцип расчета дисперсии*
4. *Частотная и пространственная дисперсия среды*
5. *Классическая элементарная теория дисперсии*

доцент КОФ ФТИ ТПУ, к.физ.-мат.н Купрекова Елена Ивановна

Классическая элементарная теория дисперсии

Базируется на рассмотрении воздействия светового поля на оптический электрон в атоме, обладающий осциллирующим дипольным моментом в эффективном поле

$$p(t) = ex(t)$$

$$E_{эф}(t) = E_0 e^{i\omega t}$$

Электрон совершает вынужденные колебания

$$m\ddot{x}+\beta\dot{x}+kx=eE_0e^{i\omega t}$$

m, e **– масса и заряд электрона,**
k **– коэффициент упругой силы,**
β **- коэффициент «радиационного трения»**

$$p_i=\varepsilon_0\sum_{j=1}^{3}\alpha_{ij}(\omega)E_{\text{эф}j}$$

$\boldsymbol{\alpha_{ij}(\omega)}$ **= компонента тензора поляризуемости**
N **– число молекул в единице объема**

$$P_i=\sum_{j=1}^{3}p_{ij}=N\langle p_i\rangle$$

$\boldsymbol{\langle p_i\rangle}$ **= среднее значение проекции дипольного момента молекулы (по всем ориентациям молекул в единице объема)**

В газе все ориентации молекул одинаковы

$$\langle p_i \rangle = \varepsilon_0 \sum_{j=1}^{3} \langle \alpha_{ij} \rangle E_{эфj} = \varepsilon_0 \frac{\alpha_{11} + \alpha_{22} + \alpha_{33}}{3} E_{эфi}$$

$$\boxed{P_i = N\varepsilon_0 \alpha E_{эфi}}$$

газ из анизотропных молекул, является изотропным

$$P = \varepsilon_0 \chi E; \quad D = \varepsilon_0 E + P = \varepsilon_0 (1 + \chi) E = \varepsilon_0 \varepsilon E$$

Для разреженных газов

$$E_{эф} = E$$

$$\boxed{\chi = N\alpha; \quad \varepsilon - 1 = N\alpha}$$

Для плотных газов, жидкостей, кристаллов

$$E_{эф} = E + \frac{P}{3\varepsilon_0} \longleftrightarrow \boxed{P_i = N\varepsilon_0 \alpha E_{эфi}}$$

Поле, действующее на молекулу, больше поля *E*, на $P/3\varepsilon_0$, определяющего напряженность поля соседних поляризованных молекул - поле Лоренца

$$P = \varepsilon_0 \frac{N\alpha}{1 - \frac{N\alpha}{3}} E = \varepsilon_0 \chi E = \varepsilon_0 (\varepsilon - 1) E$$

$$\varepsilon - 1 = \frac{N\alpha}{1 - \frac{N\alpha}{3}}$$

$$\boxed{\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \frac{N\alpha}{3}}$$

Формула Х. Лоренц-Л. Лоренца (Клаузиуса-Моссоти)

Перейдем к дипольному моменту

$$\ddot{p} + 2\delta\dot{p} + \omega_0^2 p = \frac{e}{m} E_0 e^{i\omega t}$$

$$\boxed{\delta = \frac{\beta}{2m}}$$

Показатель затухания

Собственная частота колебаний электрона

$$\boxed{\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}}$$

Решение

$$\boxed{p(t) = \frac{e^2}{m} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\delta\omega} E_0 e^{i\omega t}}$$

$$\langle p \rangle = \varepsilon_0 \sum_{j=1}^{3} \langle \alpha_{ij} \rangle E_{эфj} = \varepsilon_0 \frac{\alpha_{11} + \alpha_{22} + \alpha_{33}}{3} E_{эфi}$$

Средняя поляризуемость

$$\boxed{\alpha(\omega) = \frac{e^2}{m\varepsilon_0} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\delta\omega}}$$

$$\boxed{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon+2}=\frac{Ne^2}{3m\varepsilon_0}\frac{1}{\omega_0^2-\omega^2+2i\delta\omega}}$$

Формула Лоренц-Лоренца

Диэлектрическая проницаемость комплексна, что обусловлено поглощением, когда ω приближается к ω_0.

$$\boxed{\frac{n_k^2-1}{n_k^2+2}=\frac{Ne^2}{3m\varepsilon_0}\frac{1}{\omega_0^2-\omega^2+2i\delta\omega}}$$

В разреженных газах $E_{эф}$ = E, $|\varepsilon| \sim 1$.

$$n_k^2+2\cong\left\{\sqrt{n_k}=\varepsilon\right\}=3$$

$$n_k^2-1=(n_k-1)(n_k+1)\approx 2(n_k-1)$$

$$n_k - 1 = \frac{Ne^2}{2m\varepsilon_0}\frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\delta\omega}$$

$$n_k = n - i\eta$$

Показатель преломления

$$\boxed{n = 1 + \frac{Ne^2}{2m\varepsilon_0}\frac{1}{\left(\omega_0^2 - \omega^2\right)^2 + 4\delta^2\omega^2}}$$

Показатель поглощения

$$\boxed{\eta = \frac{Ne^2}{2m\varepsilon_0}\frac{2\delta\omega}{\left(\omega_0^2 - \omega^2\right)^2 + 4\delta^2\omega^2}}$$

Изменяются наиболее сильно при $\omega \to \omega_0$.

$$\boxed{\omega_p^2 = \frac{Ne^2}{m\varepsilon_0}}$$

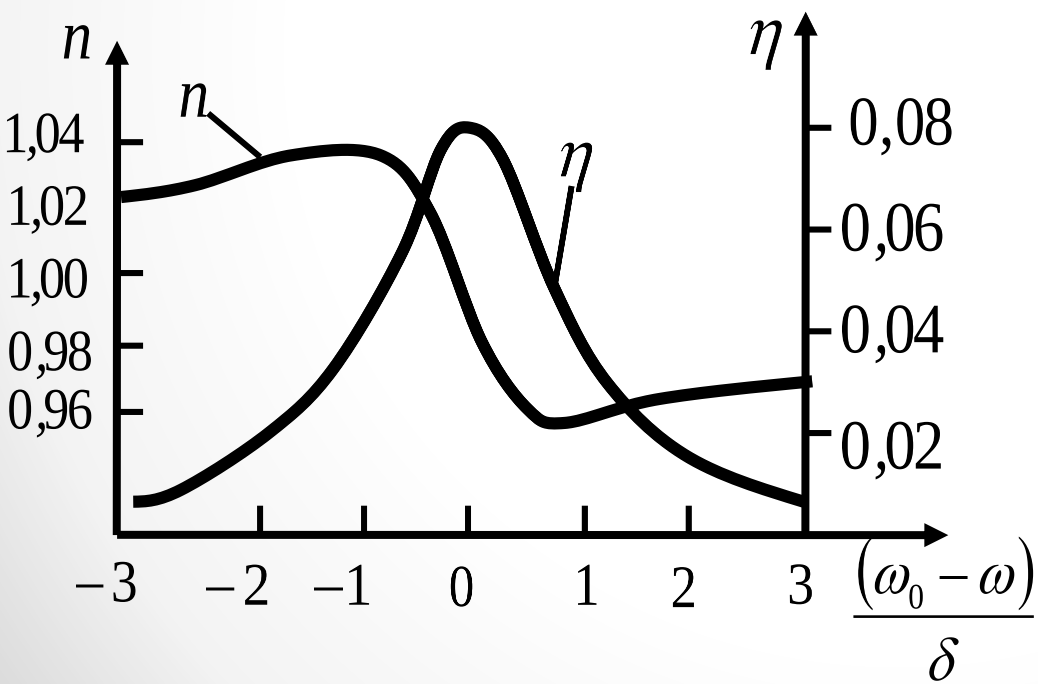
Плазменная частота

$$n = 1 + \frac{\omega_p^2}{4\omega_0\delta}\frac{\dfrac{(\omega_0-\omega)}{\delta}}{\dfrac{(\omega_0^2-\omega^2)^2}{\delta^2}+1}$$

$$\eta = \frac{\omega_p^2}{4\omega_0\delta}\frac{1}{\dfrac{(\omega_0^2-\omega^2)^2}{\delta^2}+1}$$

$\omega_0 = 10^{16}$ с $^{-1}$ (УФ диапазон). При времени затухания $\tau = 10^{-11}$ с
$\delta = 1/\tau = 10^{11}$ с$^{-1}$. Если принять N = 10^{23} м$^{-3}$, то $\omega_p = 2{,}93 \cdot 10^{13}$ с$^{-1}$

$$\frac{\omega_p^2}{4\omega_0\delta} = 0{,}08$$

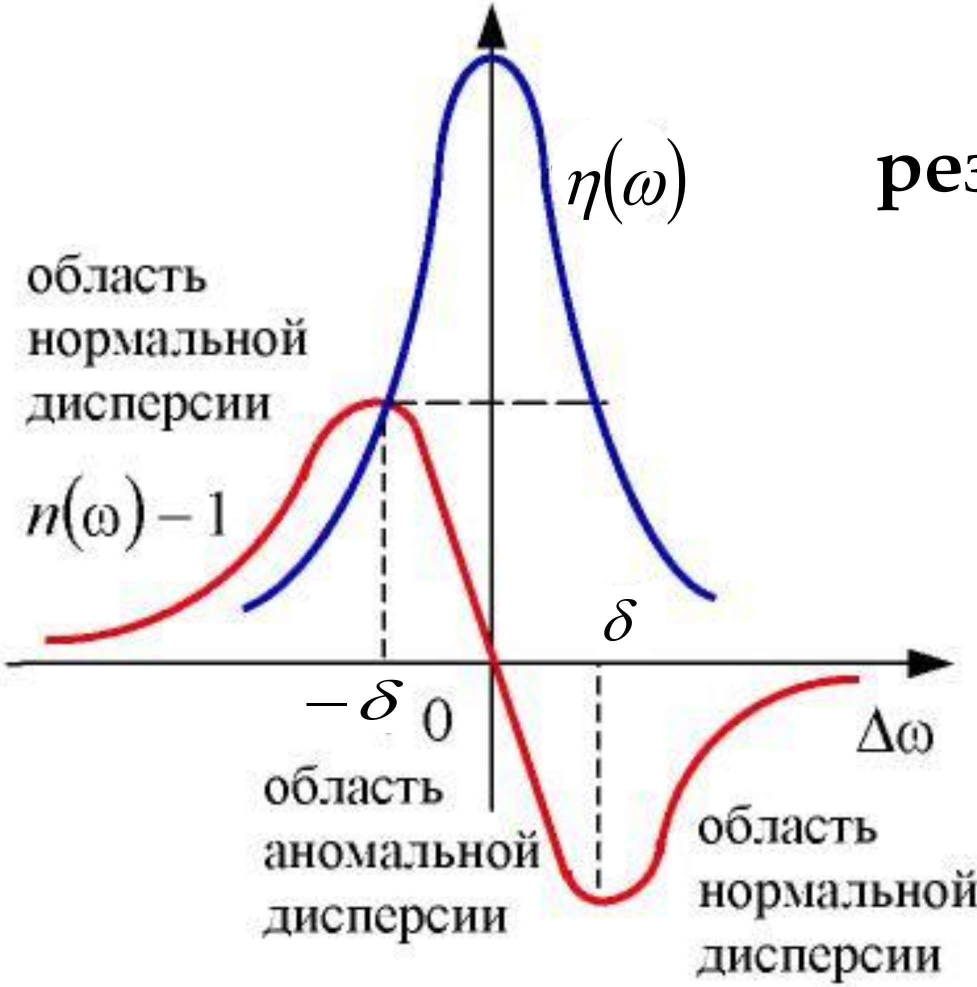


В областях частот, близким к собственным частотам электронов (ω_0) = аномальная дисперсия $dn/d\omega > 0$, а в остальных областях – нормальная дисперсия $dn/d\omega < 0$.

Дисперсия - **зависимость фазовой скорости монохроматических волн от частоты (зависимость показателя преломления от частоты).**

Если показатель преломления возрастает с увеличением частоты ω, то есть $dn/d\omega > 0$, то дисперсия называется «нормальной».
Если $dn/d\omega < 0$, то дисперсия называется «аномальной».

Области аномальной дисперсии являются резонансными областями.



Поглощение и дисперсия в линейной изотропной среде

При резонансе обеспечивается максимальная скорость поступления энергии в систему. Скорость поступления энергии сбалансирована скоростью потерь на работу против сил сопротивления. Часть энергии, от первичной волны, вновь излучается в виде вторичных волн, а другая часть преобразуется в энергию поступательного движения атомов и молекул, т.е. во внутреннюю энергию вещества.

Области аномальной дисперсии – области эффективного поглощения (полосы поглощения).

Схема опыта по наблюдению дисперсии материала призм

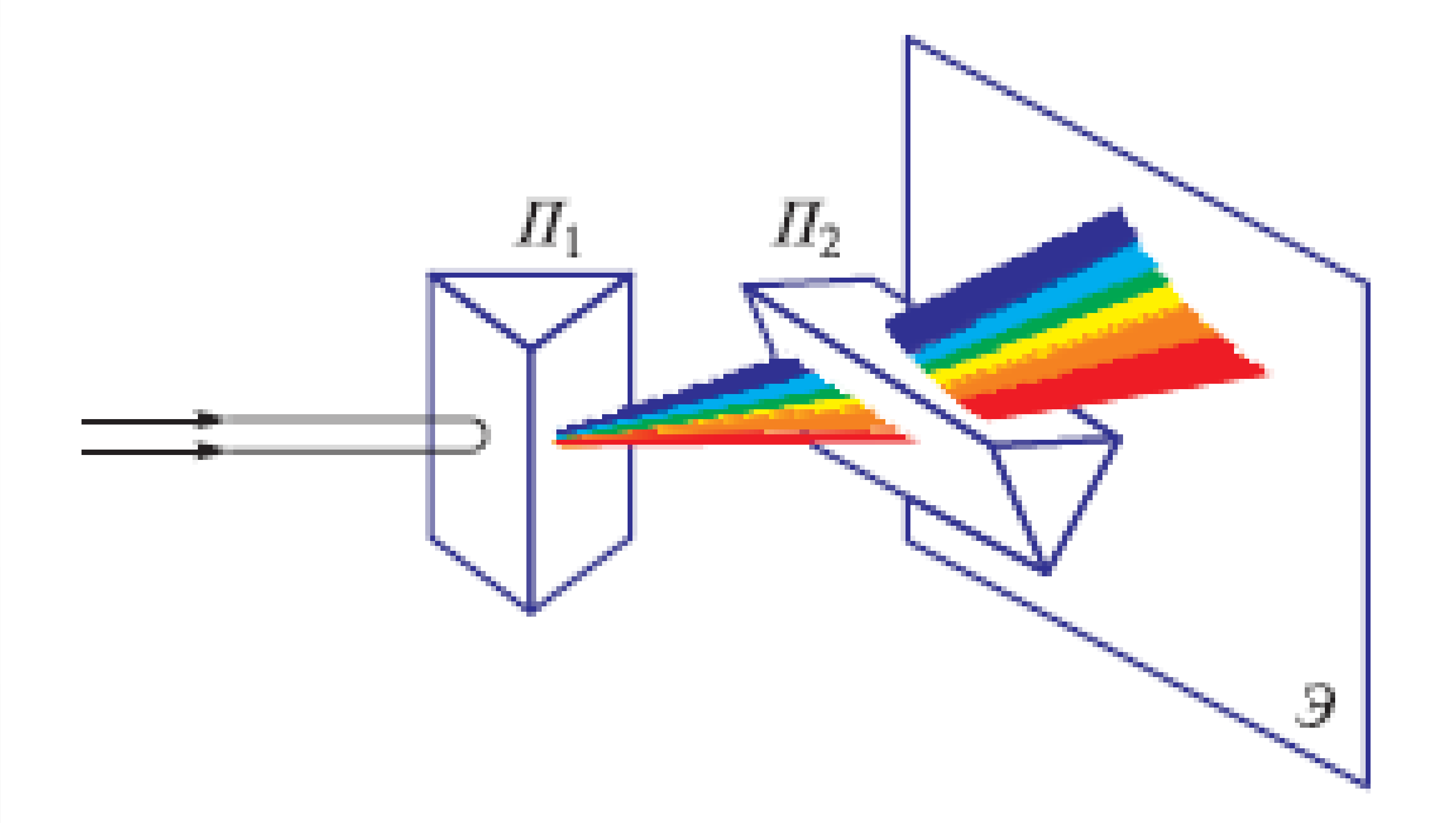
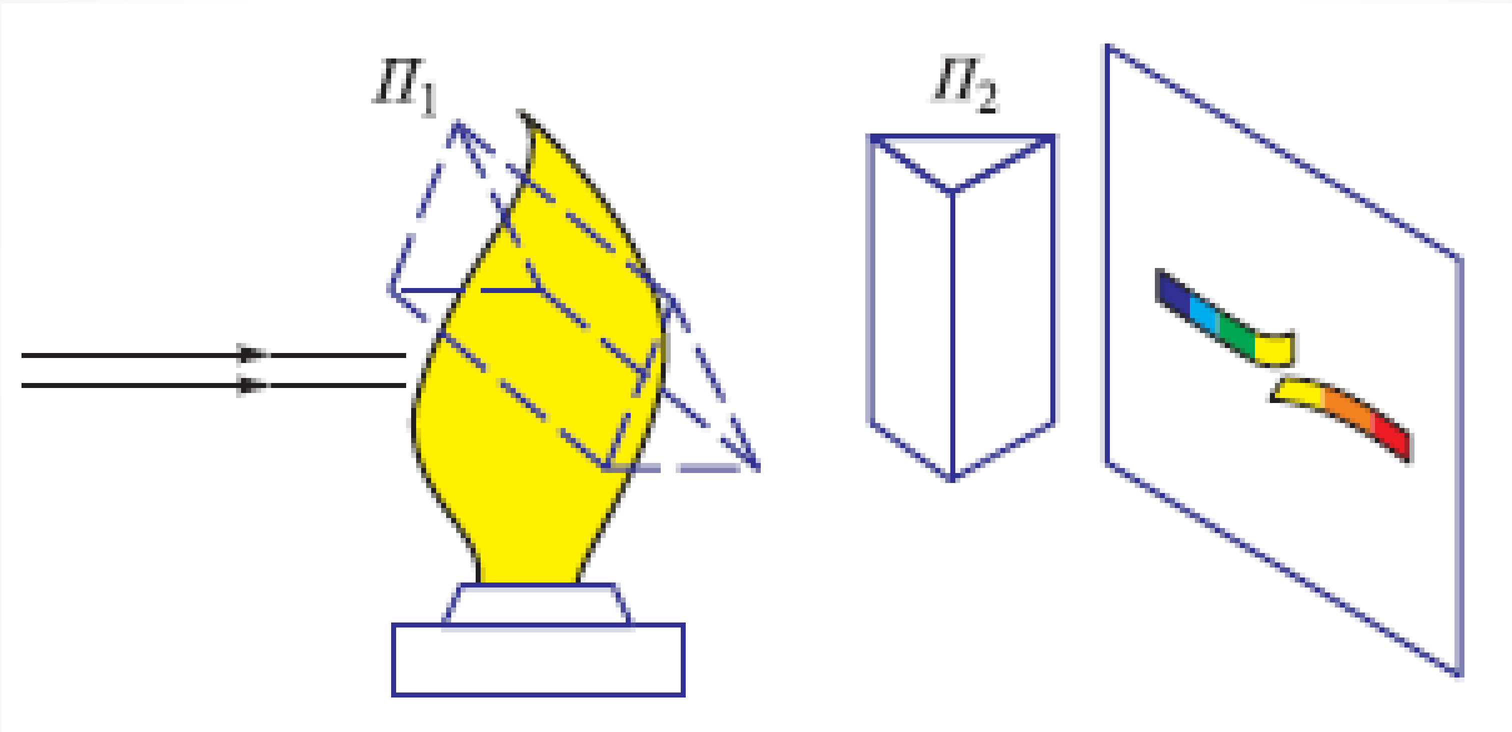
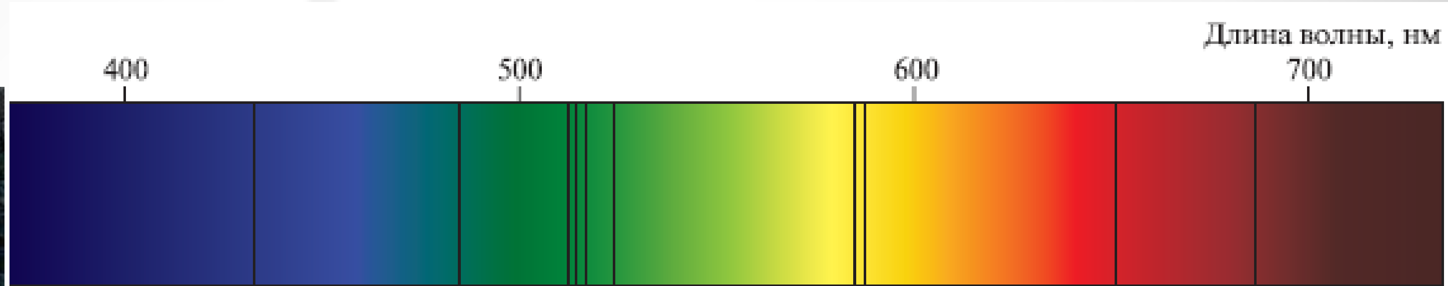
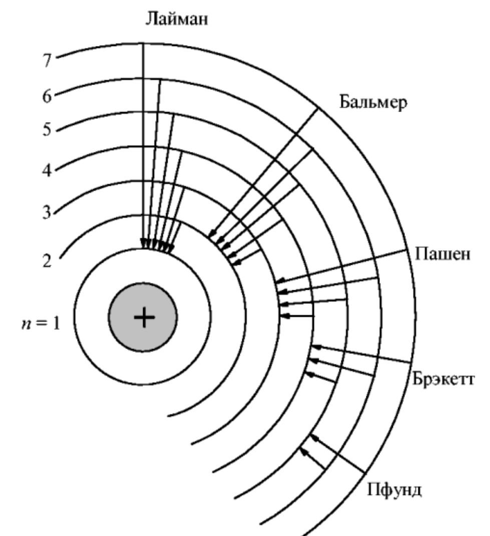


Схема опыта по наблюдению дисперсии света вблизи линии поглощения



Спектры поглощения газов





Уильям Хайд Волластон

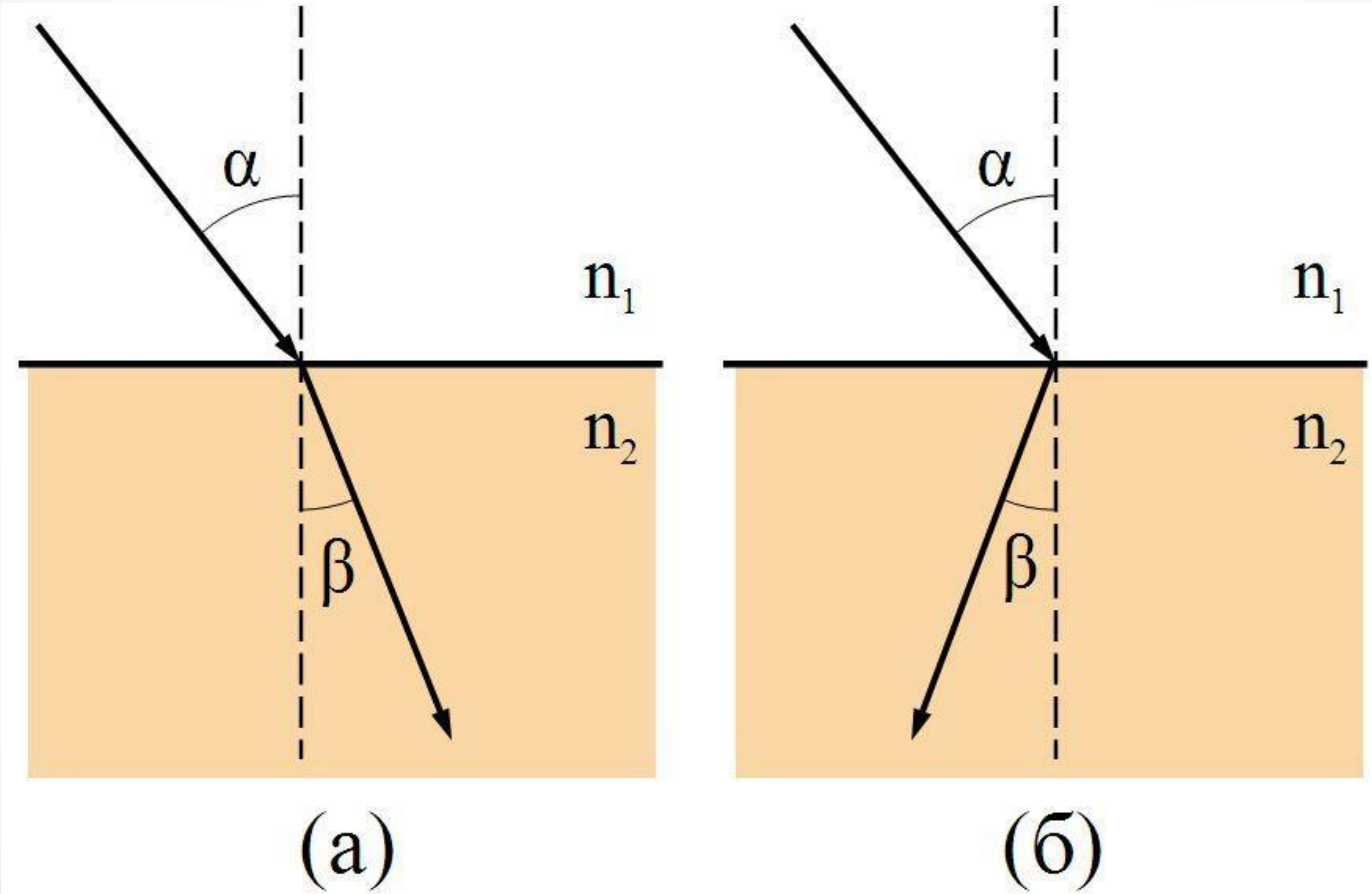
Темные линии в спектре Солнц – результат поглощения света газами, входящими в состав земной атмосферы.

$$\boxed{T = e^{-\alpha l}}$$

пропускание

D = αl – оптическая плотность среды

Среды с отрицательным показателем преломления



1968 г. в СССР В.Г. Веселаго - идея о возможности создания сред с отрицательным показателем преломления.

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H} \quad (\mu \neq 1) \Rightarrow n = \sqrt{\mu\varepsilon}$$

Если μ < 0 и ε < 0

$$\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E}$$

$$\boxed{n = \pm\sqrt{\mu\varepsilon}}$$