



Частина I

Розділ 4

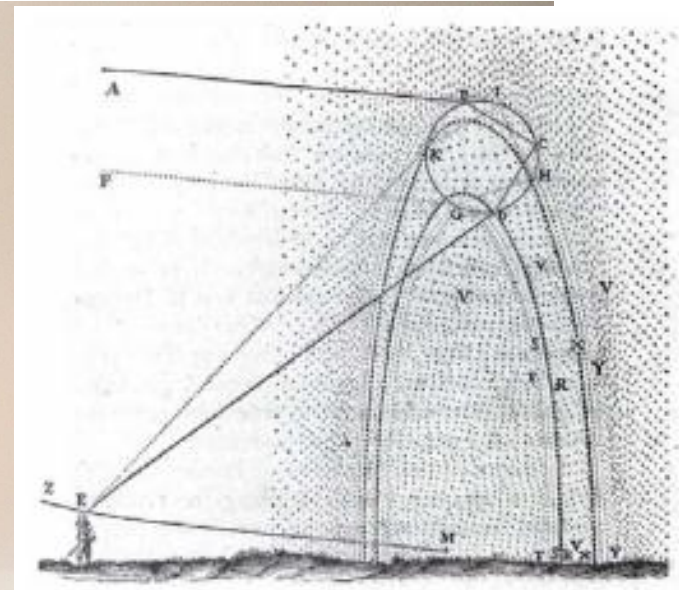
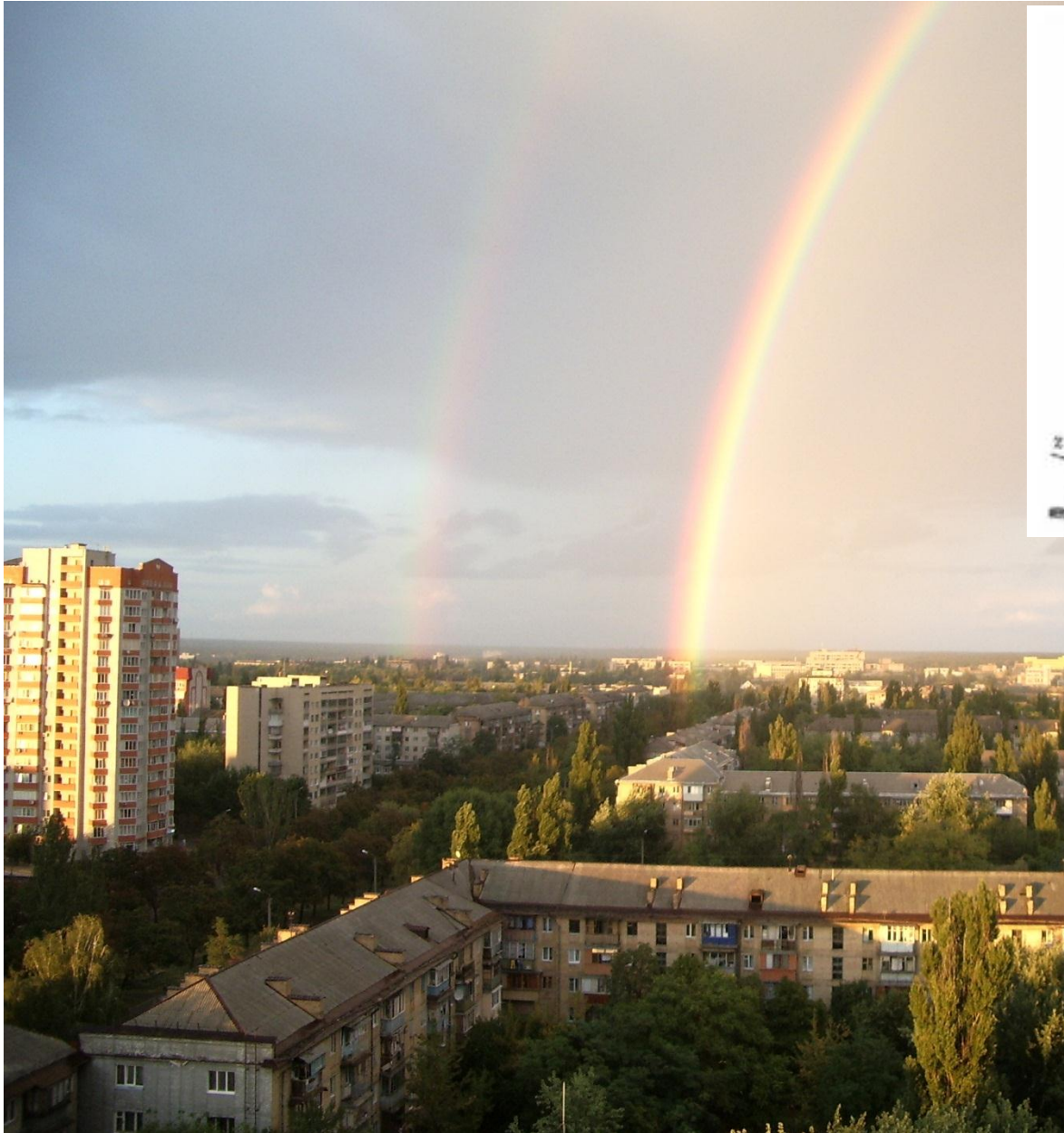
Фізи́чна оптика

Лекції 10-12

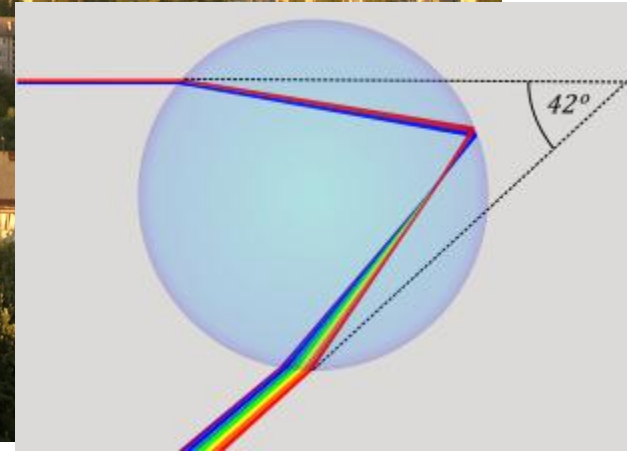
Іванова В.В.

ФТІ НТУУ “КПІ ім. І.Сікорського”

4.1. Дисперсія

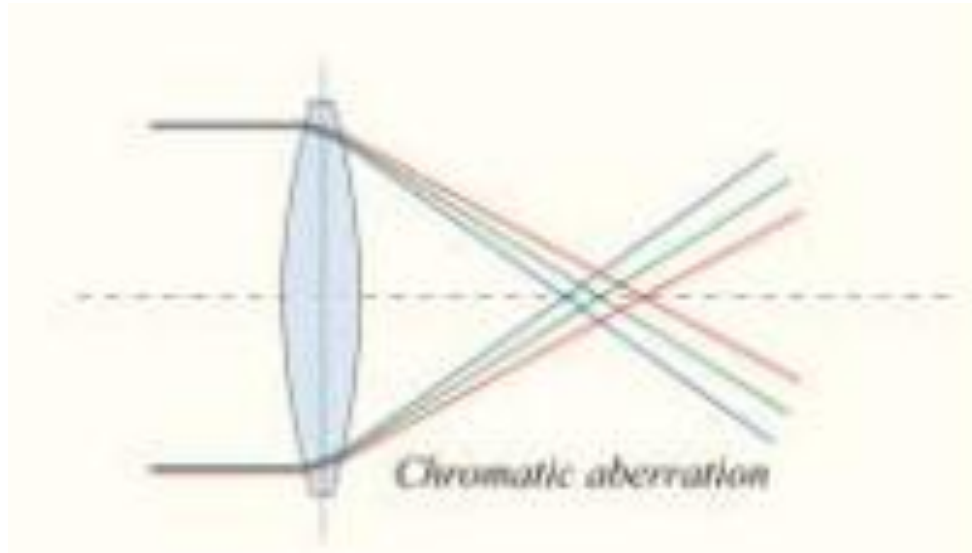


René Descartes' sketch from 1637 of how primary and secondary rainbows are formed



4.1. Дисперсія

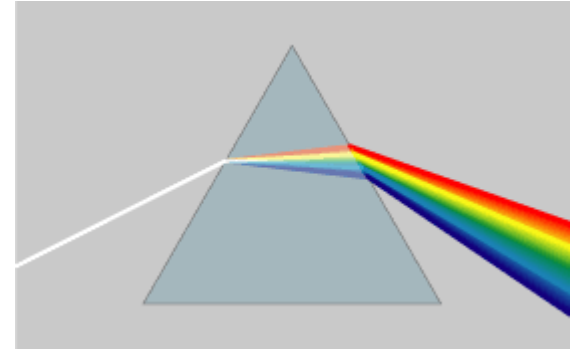
1. Нормальна та аномальна дисперсія
2. Електронна теорія дисперсії світла
3. Фазова і групова швидкості світла. Формула Релея



$$n = a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4} + \dots$$

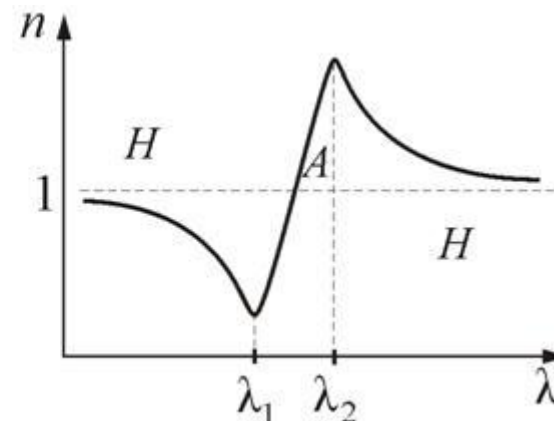
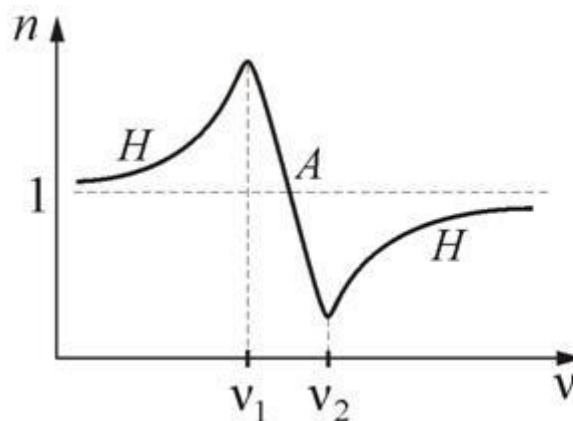
4.1. Дисперсія

Дисперсія світла - явище, обумовлене залежністю показника заломлення речовини від частоти електромагнітних хвиль (або довжини хвилі), які в ній розповсюджуються



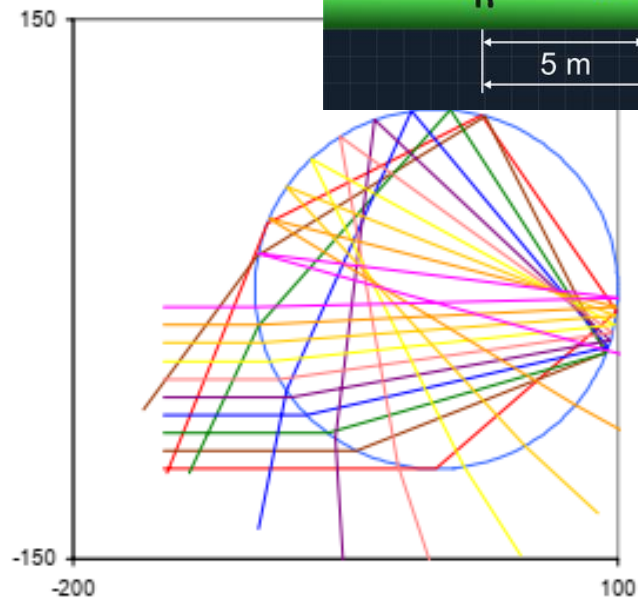
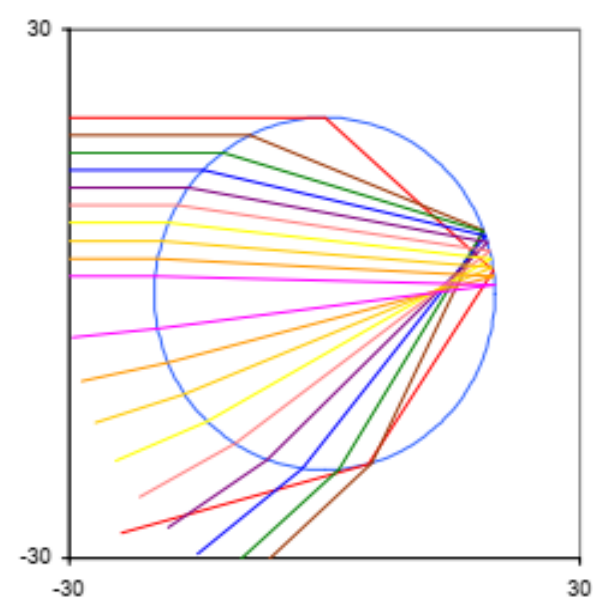
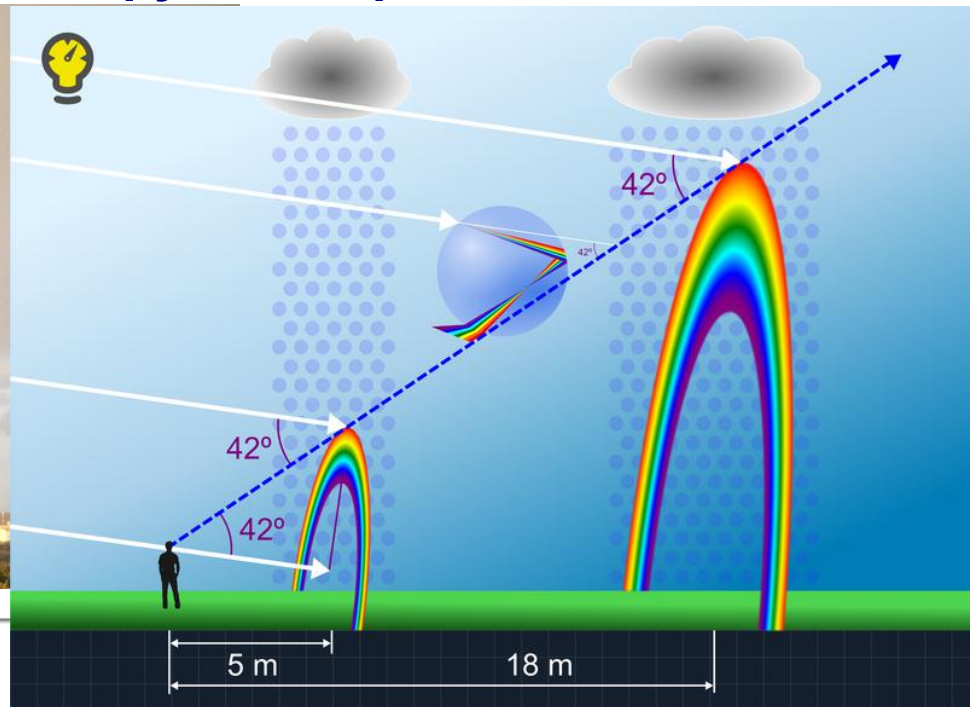
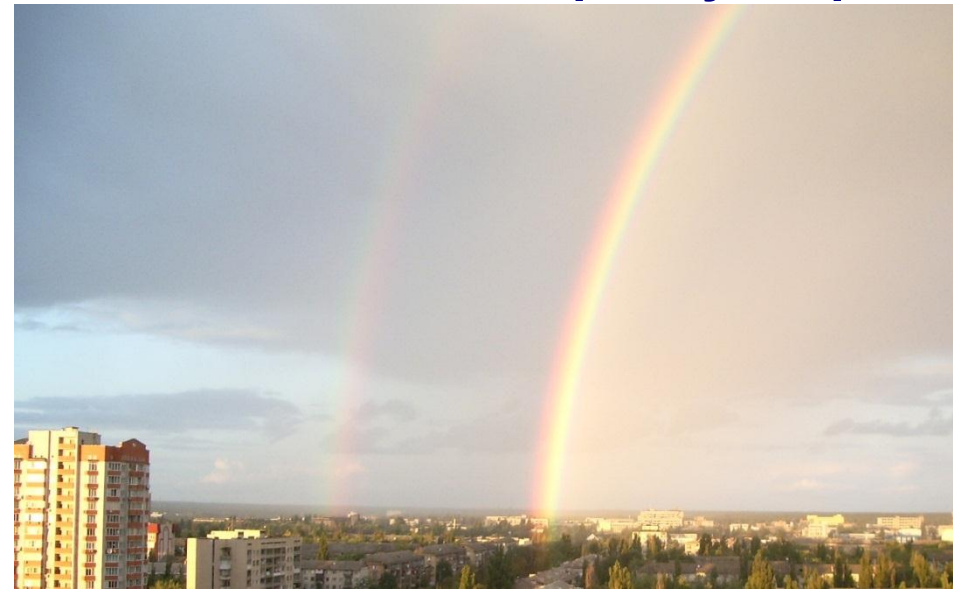
Нормальна дисперсія $\frac{dn}{d\lambda} < 0 \iff \frac{dn}{d\omega} > 0$

Аномальна дисперсія $\frac{dn}{d\lambda} > 0 \iff \frac{dn}{d\omega} < 0$



4.1. Дисперсія

Пояснення райдуг першого і другого порядків



$$\varphi_M \approx 42^\circ$$

4.1. Дисперсія

Класична теорія дисперсії

(Хенрік Антон Лоренц, нідерландський фізик-теоретик, 1853–1928, Нобелівська премія 1902 г. за теорію ефекту Зеємана)
на основі рівнянь Ньютона.

Всі електрони в атомі можна розділити на **зовнішні (оптичні)** і електрони внутрішніх оболонок. Для різних довжин хвиль різні електрони дають внесок в дисперсію. В **оптичному діапазоні** внесок дають тільки **зовнішні електрони**.

У класичній теорії дисперсії оптичний електрон (електрон зовнішньої оболонки атома) в атомі розглядається як затухаючий гармонійний осцилятор, що характеризується певною власною частотою ω_0 і постійною загасання γ

4.1. Дисперсія

Електронна теорія дисперсії світла

Дисперсія світла виникає в результаті вимушених згасаючих коливань електронів в атомах речовини в електричному полі електромагнітної хвилі. Ці коливання описуються другим законом Ньютона:

$$m\ddot{\vec{r}} = -k\vec{r} - b\dot{\vec{r}} + e\vec{E}, \quad (1)$$

$e\vec{E}$ – сила, що діє на електрон з боку електричного поля хвилі

$k\vec{r}$ – пружна сила, $b\dot{\vec{r}}$ – “сила тертя випромінювання”, (світло може поглинатись), без врахування затухання:

$$\ddot{\vec{r}} + \omega_0^2 \vec{r} = \frac{e}{m} \vec{E}, \quad (2) \quad \vec{E} = \vec{E}_0 \cos \omega t, \quad \text{розв'язок (2):} \quad \vec{r} = \frac{e/m}{\omega_0^2 - \omega^2} \vec{E},$$

$$\vec{p} = e\vec{r} = \frac{e^2/m}{\omega_0^2 - \omega^2} \vec{E}$$

$$\vec{P} = N\vec{p} = Ne\vec{r} = N \frac{e^2/m}{\omega_0^2 - \omega^2} \vec{E}$$

$$\varepsilon = 1 + \chi = 1 + \frac{\vec{P}}{\varepsilon_0 \vec{E}}$$

Дипольний момент електрона

Вектор поляризації

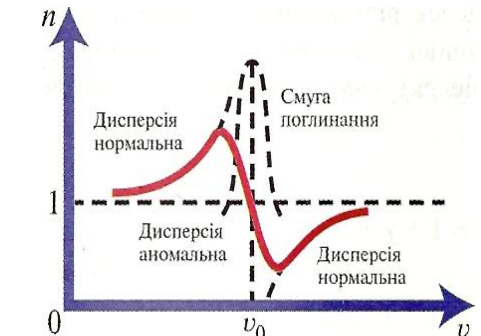
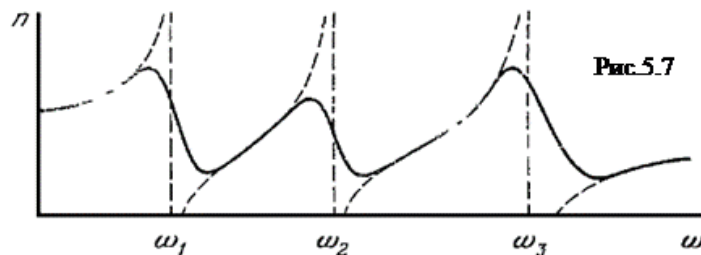
Діелектрична проникність

$$\varepsilon = n^2$$

Для частот вдалині від ліній поглинання

$$n^2 = 1 + \frac{N}{\varepsilon} \frac{e^2/m}{\omega_0^2 - \omega^2}$$

$$n^2 = 1 + \frac{e^2 N}{2m\varepsilon_0} \sum_{j=1}^k \frac{f_j}{\omega_{0j}^2 - \omega^2}$$



χ – діелектрична сприйнятливість середовища

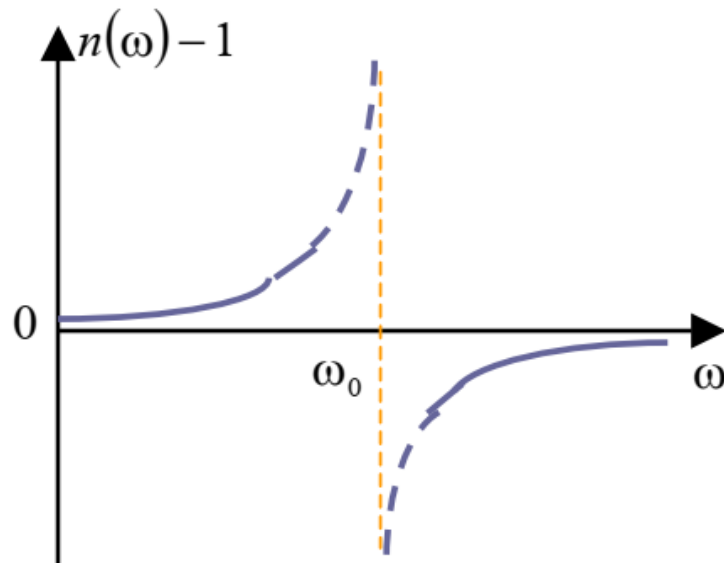
4.1. Дисперсія

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

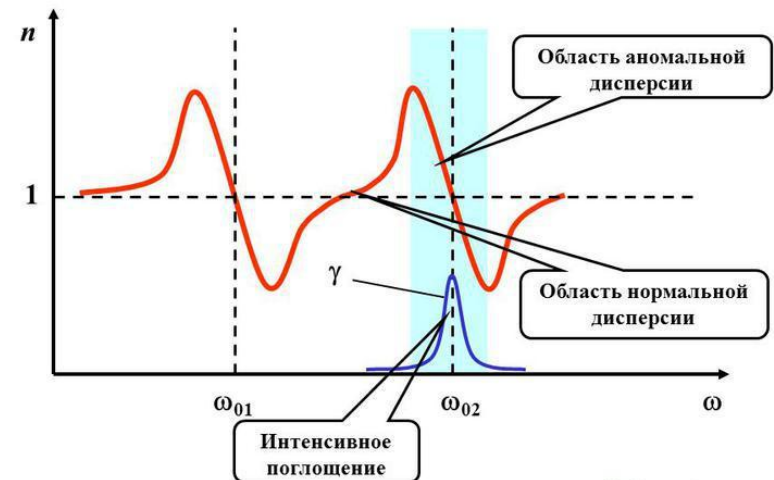
$$(\sqrt{1+x} \approx 1 + x/2 \text{ при } x \ll 1)$$

Для розріджених
середовищ і нормальної
дисперсії

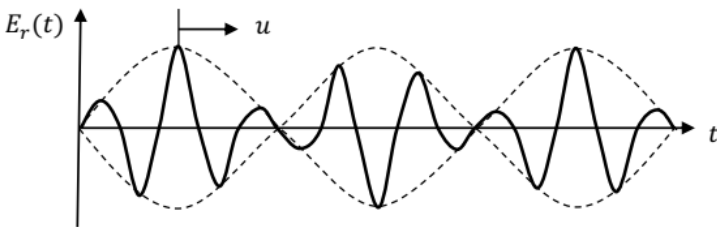
$$n(\omega) \approx 1 + \frac{2\pi N e^2}{m} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2}$$



Зависимость показателя преломления от частоты



Група хвиль



$$E_1 = E_0 \cos[j(\omega_1 t - k_1 x)] \text{ і } E_2 = E_0 \cos[j(\omega_2 t - k_2 x)],$$

де $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$; $\Delta k = k_1 - k_2$; $\omega_1 \approx \omega_2$; $k_1 \approx k_2$.

$$\begin{aligned} E_r &= E_1 + E_2 = E_0 \cos(\omega_1 t - k_1 x) + E_0 \cos(\omega_2 t - k_2 x) = \\ &= 2E_0 \cos\left[\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t - \frac{k_1 - k_2}{2} x\right] \cos\left[\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t - \frac{k_1 + k_2}{2} x\right] = \\ &= A_r \cos[\omega_1 t - k_1 x], \end{aligned}$$

$$A_r = 2E_0 \cos\left[\frac{\Delta\omega}{2} t - \frac{\Delta k}{2} x\right]$$

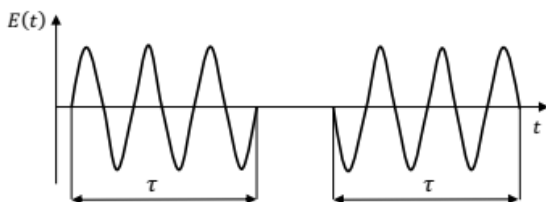
$$u = \frac{dx}{dt} = \frac{\Delta\omega}{\Delta k} = \frac{d\omega}{dk}.$$

Фазова швидкість

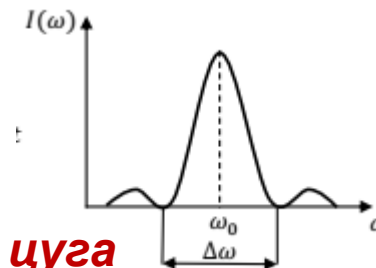
$$v_{faz} = \frac{\omega}{k}$$

Групова швидкість

$$u_{gp} = \frac{d\omega}{dk}$$



Цуги



Спектр цуга

Фазова і групова швидкості світла

Формула Релея

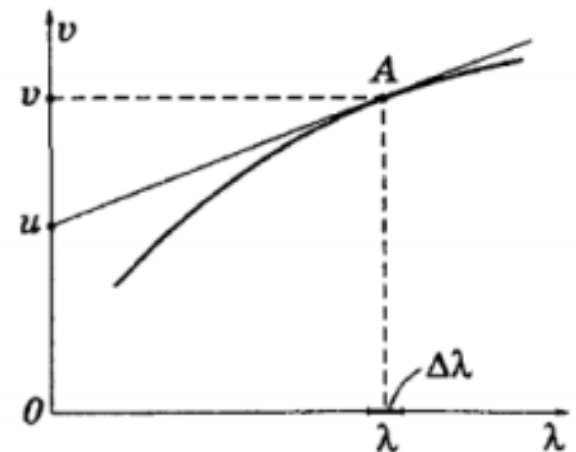
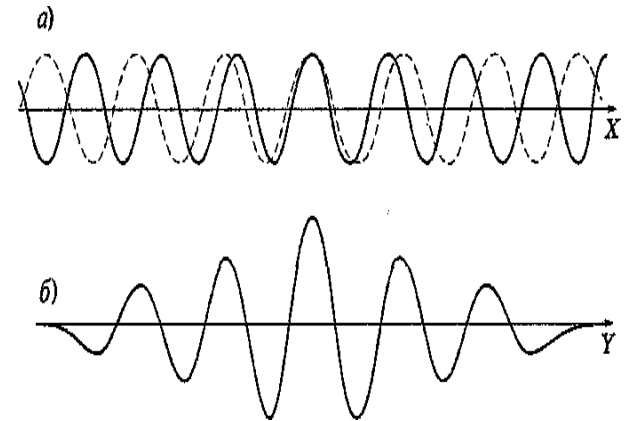
$$u = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d(vk)}{dk} = \frac{vdk + kdv}{dk} = v + k \frac{dv}{dk},$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad dk = -\frac{2\pi}{\lambda^2} d\lambda.$$

$$u = v - \frac{2\pi}{\lambda} \frac{dv}{\frac{2\pi}{\lambda^2} d\lambda} = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}.$$

$$\frac{dv}{d\lambda} = \frac{dv}{dn} \frac{dn}{d\lambda} = \frac{d\left(\frac{c}{n}\right)}{dn} \frac{dn}{d\lambda} = \frac{\left(\frac{-c}{n^2}\right) dn}{dn} \frac{dn}{d\lambda} = \frac{-c}{n^2} \frac{dn}{d\lambda}.$$

$$u = v + \frac{c}{n^2} \frac{dn}{d\lambda} = v \left(1 + \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda} \right)$$



4.1. Дисперсія

СГС

В плазмі $\omega_0 = 0$

Дисперсія в плазмі

$$n^2 = 1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^2$$

$$V = \frac{c}{n}, \quad V = \frac{\omega}{k}$$

плазмова або
Ленгмюрівська

$$\omega_p^2 = \frac{4\pi N e^2}{m}$$

частота

$$n^2 = \frac{c^2 k^2}{\omega^2}$$

(Ірвінг Ленгмюр, американський фізик, 1881–1957, Нобелівська премія 1932 г. по хімії)

$$c^2 k^2 = \omega^2 - \omega_p^2$$

$$V_{ph} V_{gr} = \frac{\omega}{k} \frac{d\omega}{dk} = \frac{d\omega^2}{dk^2} = c^2$$

$$V_{ph} V_{gr} = c^2$$

У плазмі фазова швидкість більша за c !

4.1. Дисперсія

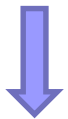
Дисперсія в плазмі

Принцип дальнього радіозв'язку

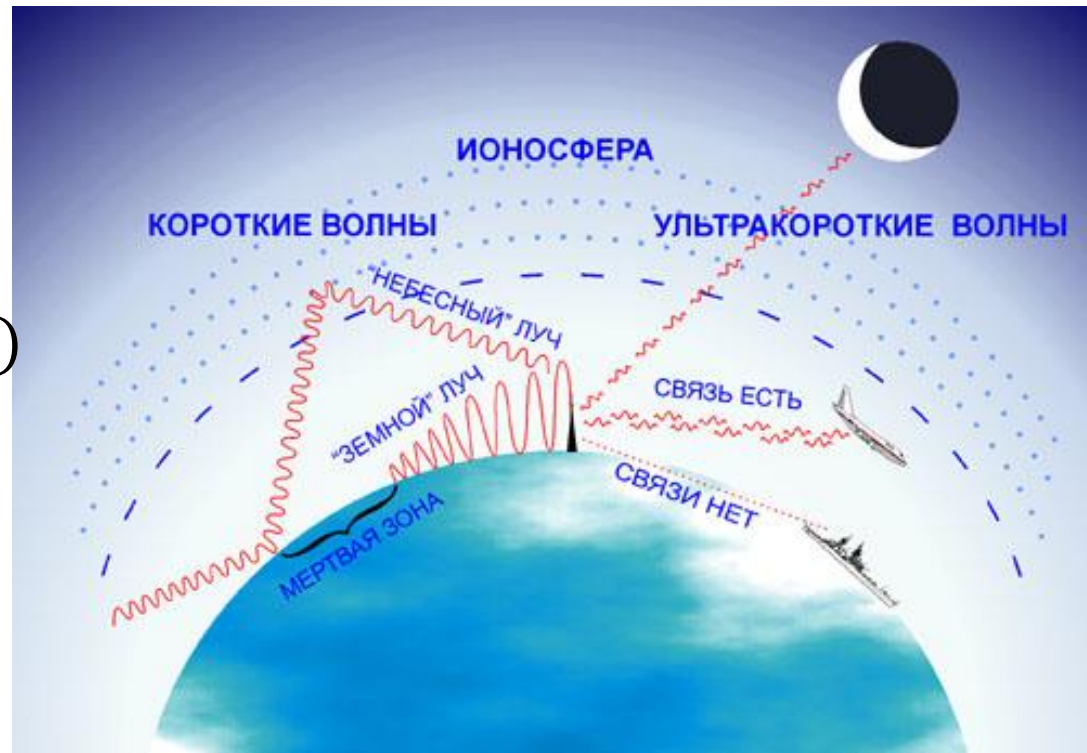
$$n^2 = 1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^2$$

При $\omega < \omega_p$ $\varepsilon < 0$ $n = \sqrt{\varepsilon} = -i\chi$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_0} n = -k_0 i\chi$$

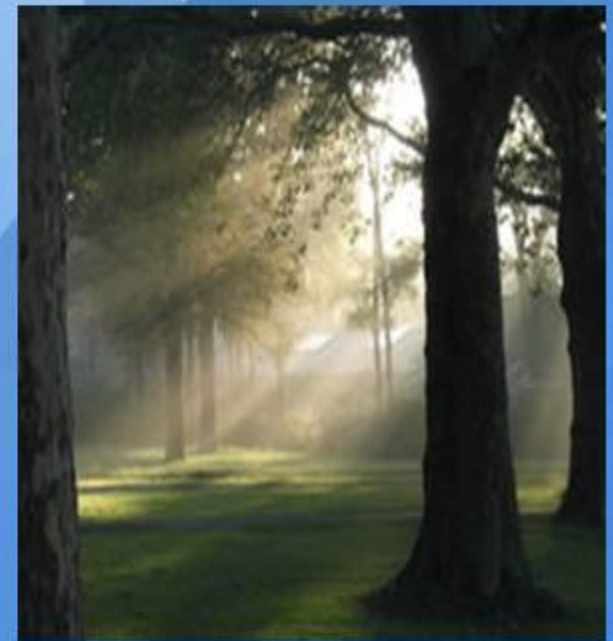
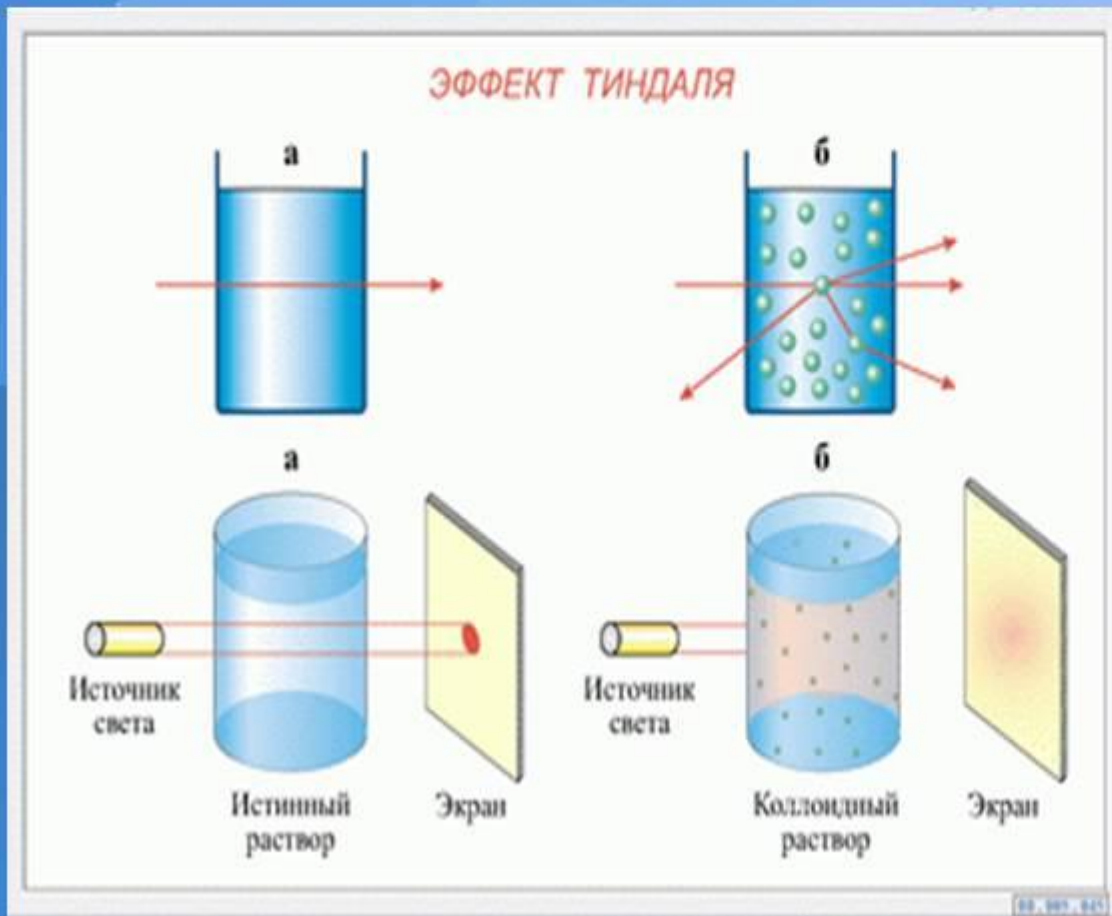


$$E = E_0 \exp\left(-\frac{2\pi}{\lambda_0} \chi x\right) \cos(\omega t)$$



Эффект Тиндала

рассеяние света при прохождении светового пучка через оптически неоднородную среду. Обычно наблюдается в виде светящегося конуса (конус Тиндала), видимого на тёмном фоне.



**Солнечные лучи
проходящие сквозь
туман.**

4.2. Розсіювання та поглинання світла

1. Розсіювання світла. Закон Релея. Молекулярне розсіювання
2. Поглинання світла. Закон Бугера-Ламберта. Коефіцієнти поглинання

Процес розсіювання світла складається із сприйняття частинками (молекулами і атомами) енергії електромагнітної хвилі, що розповсюджується в середовищі, і випромінювання цієї енергії в тілесний кут, вершиною якого є частинка.

В неперервних середовищах – оптично мутних - розсіювання відбувається за рахунок дифракції світла на оптичних неоднорідностях середовища.

4.2. Розсіювання світла

Типи розсіювання:

1. Розсіювання Релея, коли розміри частинок середовища набагато менші за розміри довжини хвилі світла, $r_m < \lambda/15$
2. Розсіювання Мі для довільних розмірів частинок. Для малих частинок розсіювання Мі перетворюється в розсіювання Релея.
3. Розсіювання Мандельштама-Бріллюена на акустичних хвилях.
4. Комбінаційне розсіювання при квантових енергетичних переходах в частинках.

4.2. Розсіювання та поглинання світла

Закон Релея

Інтенсивність розсіяного випромінювання обернено пропорційна четвертій степені довжини хвилі

$$J \sim \frac{1}{\lambda^4}$$

Явища:

Синій колір неба

Червоний колір сонця, що заходить

Чорний колір неба поза межами атмосфери

В напрямку, перпендикулярному падаючому променю, розсіяне світло повністю поляризоване !

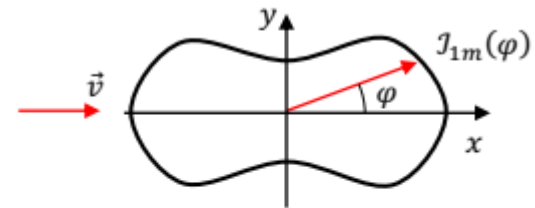


Рис. 10.4. Кутовий розподіл сили світла розсіяного випромінювання від неполяризованої хвилі

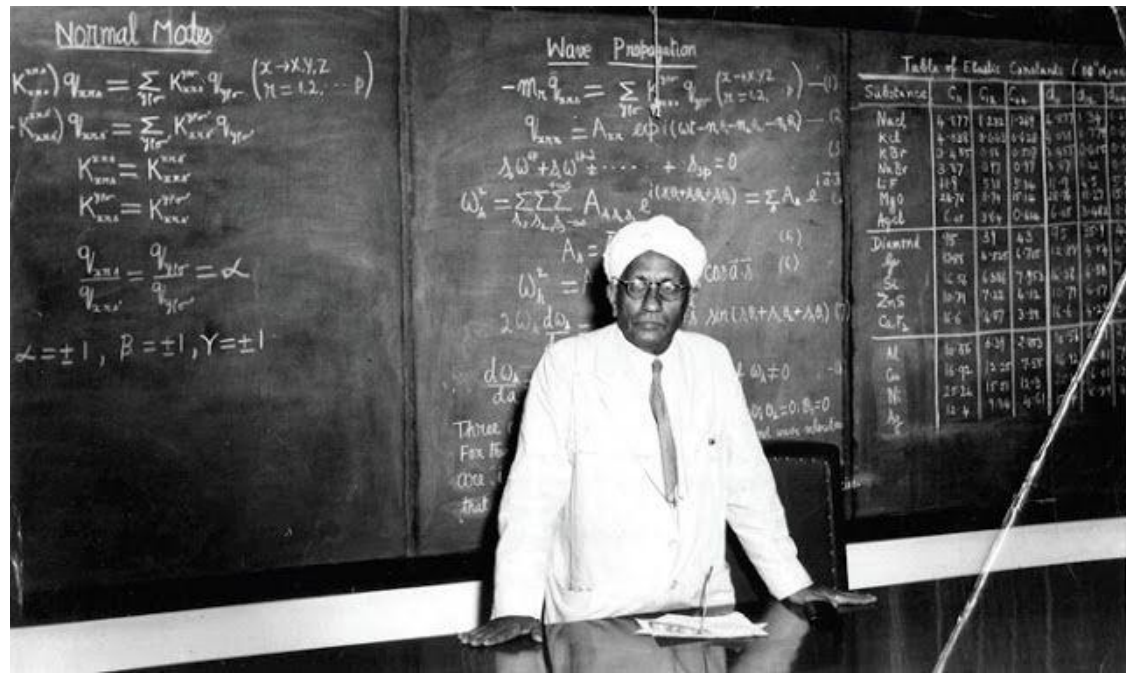
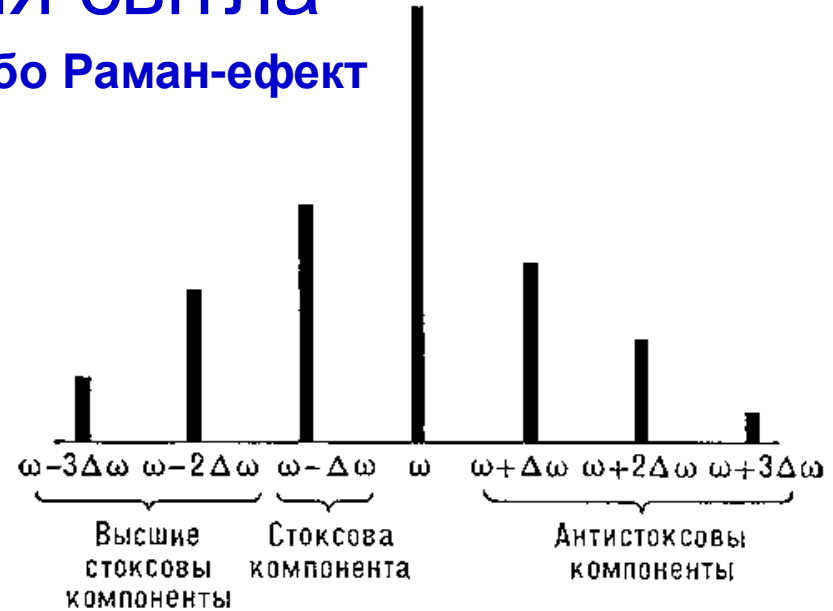
4.2. Розсіювання світла

Комбінаційне розсіювання або Раман-ефект

Нобелівська премія, 1930

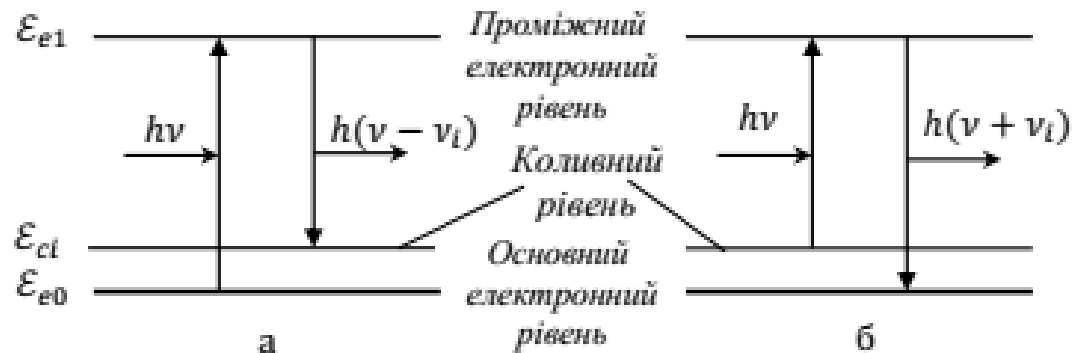


Чандрасекхара
Венката Раман (там.
சந்திரசேகர
வெங்கடராமன்)



4.2. Розсіювання світла

КРС було відкрито в 1928 році радянським фізиком Г.С. Ландау і індійським фізиком Ч.В. Раманом



Енергетична модель формування
стоксового (а) і антистоксового (б) комбінаційного розсіювання



Спектральні компоненти
розсіювання
Мандельштама – Бріллюена



Спектральні
компоненти
комбінаційного розсіювання

4.2. Розсіювання світла

Розсіювання Мандельштама – Бріллюена

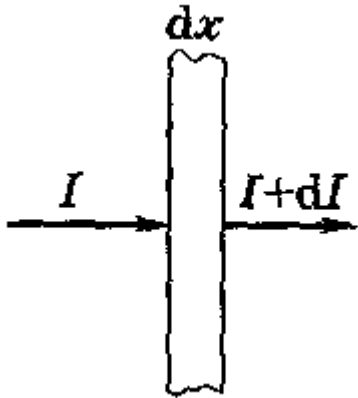
Такий вид розсіювання відбувається на акустичній хвилі, яка розповсюджується в середовищі. Звукова хвиля являє собою пружні коливання, які викликають гармонічні зміни показників заломлення і пропускання середовища, тобто в середовищі виникає гармонічна дифракційна ґратка із змінним коефіцієнтом пропускання.

При дифракції світла на такій ґратці виникають два дифракційні максимуми першого порядку. Амплітуда пропускання ґратки змінюється з частотою звукової хвилі Ω

$$E(t) = E_0 \cos \Omega_v t \cos \omega t = \frac{1}{2} E_0 [\cos(\omega + \Omega_v) t + \cos(\omega - \Omega_v) t].$$

4.3. Поглинання світла. Закон Бугера

Коефіцієнти поглинання

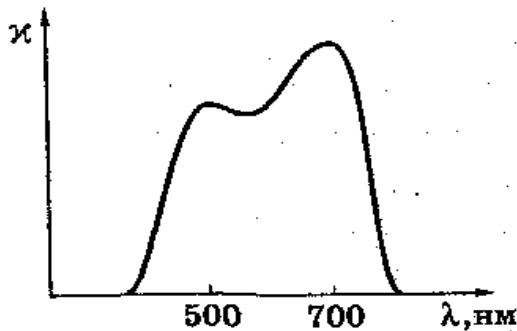


Проходження світлової хвилі крізь речовину супроводжується витратами енергії цієї хвилі на збудження коливань електронів. Тому інтенсивність світла при проходженні крізь речовину зменшується — світло поглинається в речовині. Зменшення інтенсивності світла :

$$-dI = \alpha I dx$$

де α - коефіцієнт поглинання

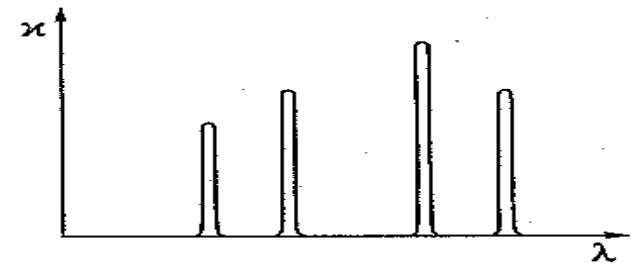
$$-dI/I = \alpha dx$$



Залежність коефіцієнта поглинання від довжини хвилі для твердих і рідких речовин

$$I = I_0 e^{-\alpha x}$$

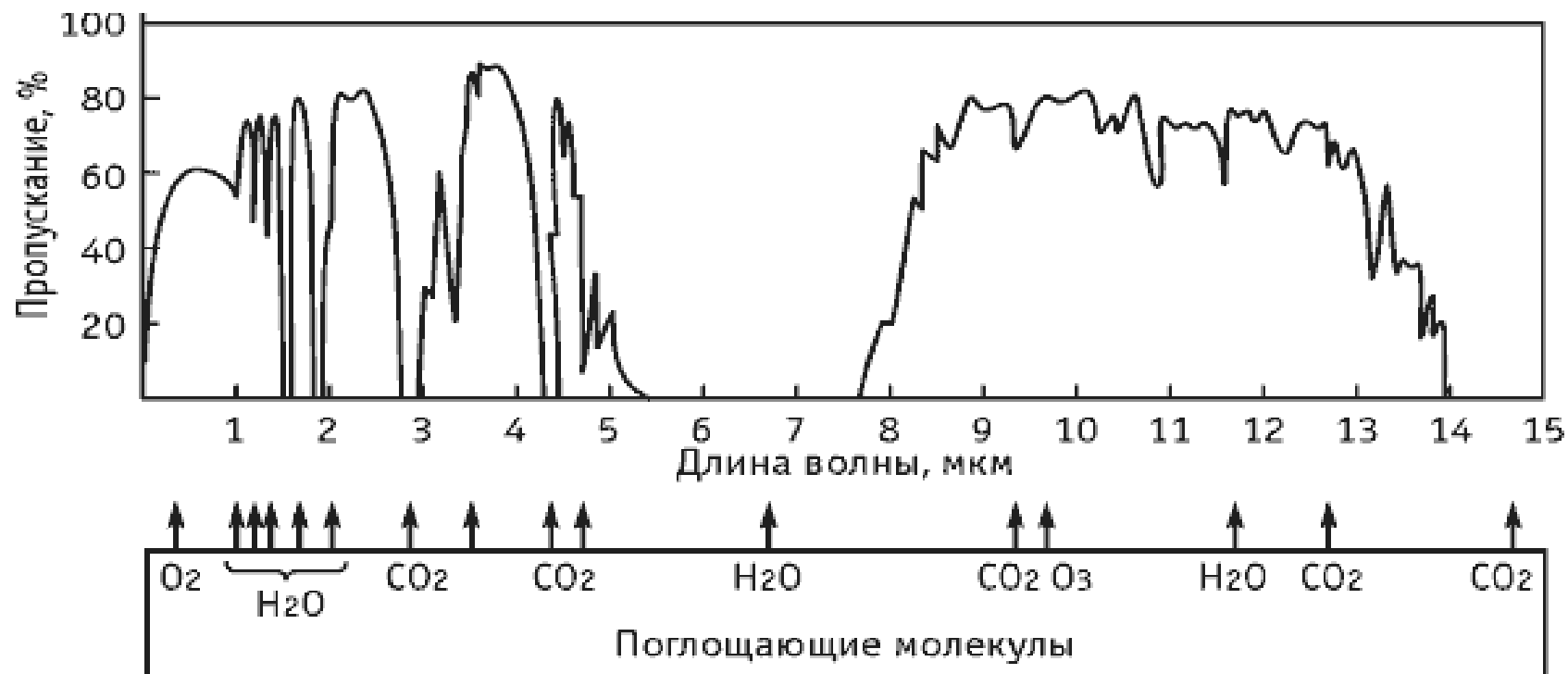
Закон Бугера



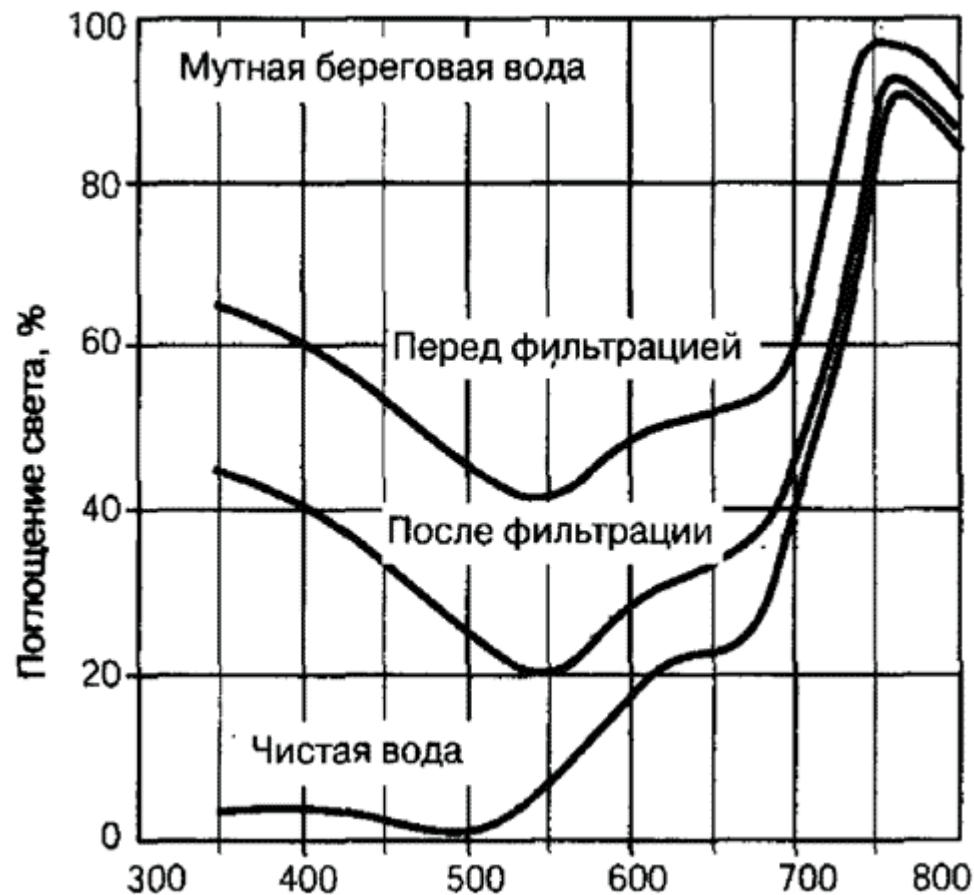
Залежність коефіцієнта поглинання від довжини хвилі для розріджених газів

4.3. Поглинання світла

Поглинання в атмосфері



4.3. Поглинання світла



При отражении света (см. § 16, 20) от поверхности наиболее интенсивно отражаются те участки спектра, которые при прохождении толщины вещества наиболее сильно поглощаются. Поэтому цвет вещества, возникающий за счет селективного отражения, является дополнительным к цвету того же вещества, возникающего в результате селективного поглощения.