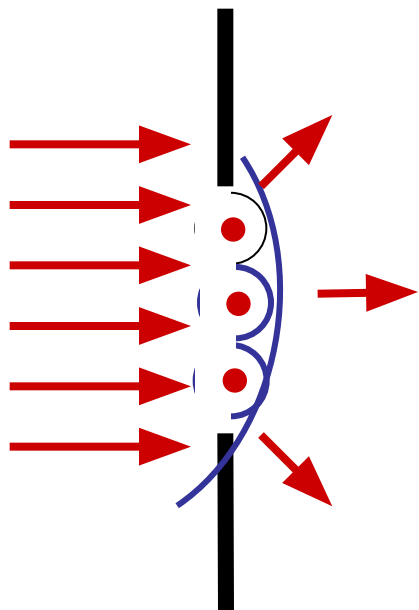


# Дифракція світла



**Дифракція світла** - це явище відхилення світла від прямолінійного поширення при зіткненні з неоднорідностями середовища, розміри яких є порівняними з довжиною хвилі падаючого випромінювання. **Принцип Гюйгенса** - кожна точка середовища, до якої доходить світло є самостійним джерело сферичних хвиль.

**Френель** доповнив принцип Гюйгенса, увівши уявлення про те, що хвильове збурення в будь-якій точці простору можна розглядати як

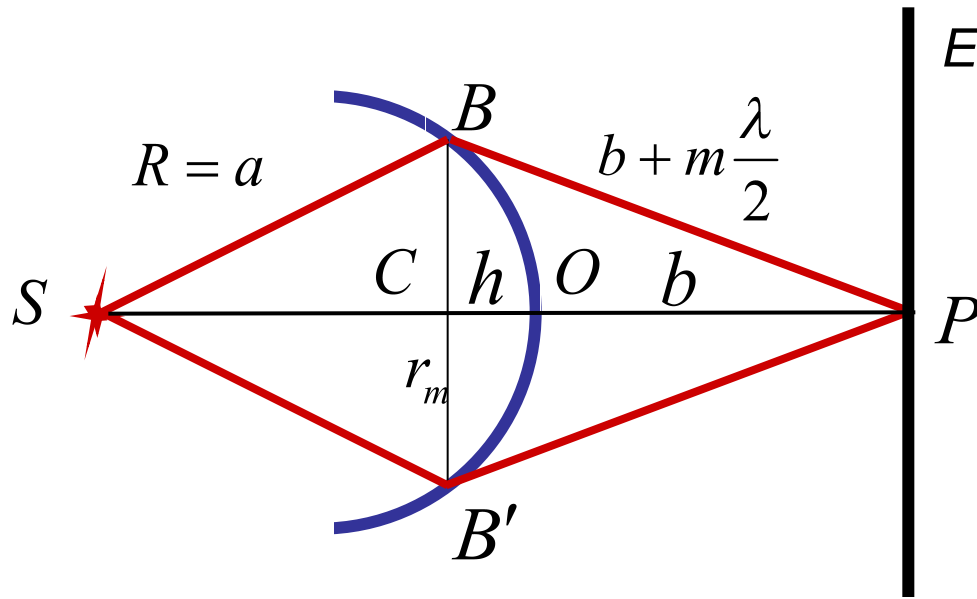
результат інтерференції вторинних хвиль від фіктивних джерел, на які розбивається хвильовий фронт. Френель уперше висловив припущення, що ці фіктивні джерела когерентні і тому можуть інтерферувати в будь-якій точці простору, внаслідок чого елементарні хвилі можуть гасити або підсилювати одна одну.

## Розрізняють два випадки дифракції світла:

**Дифракція Френеля** або дифракція в збіжних променях, коли на перешкоду падає плоска або сферична хвиля, і дифракційна картина спостерігається на екрані, що перебуває на кінцевій відстані від нього

**Дифракція Фраунгофера** або дифракція в паралельних променях, коли на перешкоду падає плоска хвиля, і дифракційна картина спостерігається на екрані, що перебуває у фокальній площині збиральної лінзи, встановленої на шляху світла

# Зони Френеля



Екран

$$r_m^2 = a^2 - (a - h)^2$$

$$r_m^2 = a^2 - a^2 + 2ah - h^2$$

$$r_m^2 = 2ah - h^2$$

$$r_m^2 = \left(b + m \frac{\lambda}{2}\right)^2 - (b + h)^2$$

$$\lambda \ll h$$

$$r_m^2 = b^2 + bm\lambda + m^2 \frac{\lambda^2}{4} - b^2 - 2bh - h^2 \Rightarrow r_m^2 = bm\lambda - 2bh - h^2$$

$$2ah - h^2 = bm\lambda - 2bh - h^2 \Rightarrow h = \frac{bm\lambda}{2(a+b)}$$

$$r_m = \sqrt{2ah} = \sqrt{\frac{ab}{(a+b)}} m\lambda$$

$$S_m = 2\pi R h$$

$$\Delta S_m = S_m - S_{m-1}$$

$$\Delta S_m = 2\pi R \left( \frac{bm\lambda}{2(a+b)} - \frac{b(m-1)\lambda}{2(a+b)} \right) = \frac{\pi R b \lambda}{a+b} (m - m + 1) = \frac{\pi R b \lambda}{a+b}$$

**Амплітуда результуючих коливань в точці  $P$  дорівнює**

$$A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + \dots + A_m$$

$$A = A_1 > A_2 > A_3 > A_4 > \dots > A_m > A_{m+1} > \dots$$

$$A_m = \frac{A_{m-1} + A_{m+1}}{2}$$

**Амплітуда, створювана у точці  $P$  усією хвильовою поверхнею, дорівнює половині амплітуди від однієї центральної зони.**

$$A = \frac{A_1}{2}$$



## **Христіан Гюйгенс** (1629 - 1695)

танення льоду та точку кипіння води. За допомогою сконструйованого ним самим телескопа в 1665 відкрив кільце Сатурна й перший супутник Сатурна – Титан та визначив його період обертання навколо планети. Значних результатів досяг у математиці.

Голландський фізик, механік, математик і астроном. Фізичні дослідження в області механіки, оптики, молекулярної фізики. Сконструював перші маятникові годинники зі спусковим механізмом (1656), розробив їхню теорію (1673) та вирішив низку проблем, пов'язаних з ними. Розробив хвильову теорію світла (принцип Гюйгенса). Виходячи зі своєї теорії світла, пояснив ряд оптичних явищ. Відкрив в 1678 поляризацію світла. Вивчав оптично анізотропні кристали. Увів поняття "вісь кристала". Разом з Гуком установив (1665) постійні точки термометра - точку



**Френель Огюстен Жан**

(1788 - 1827)

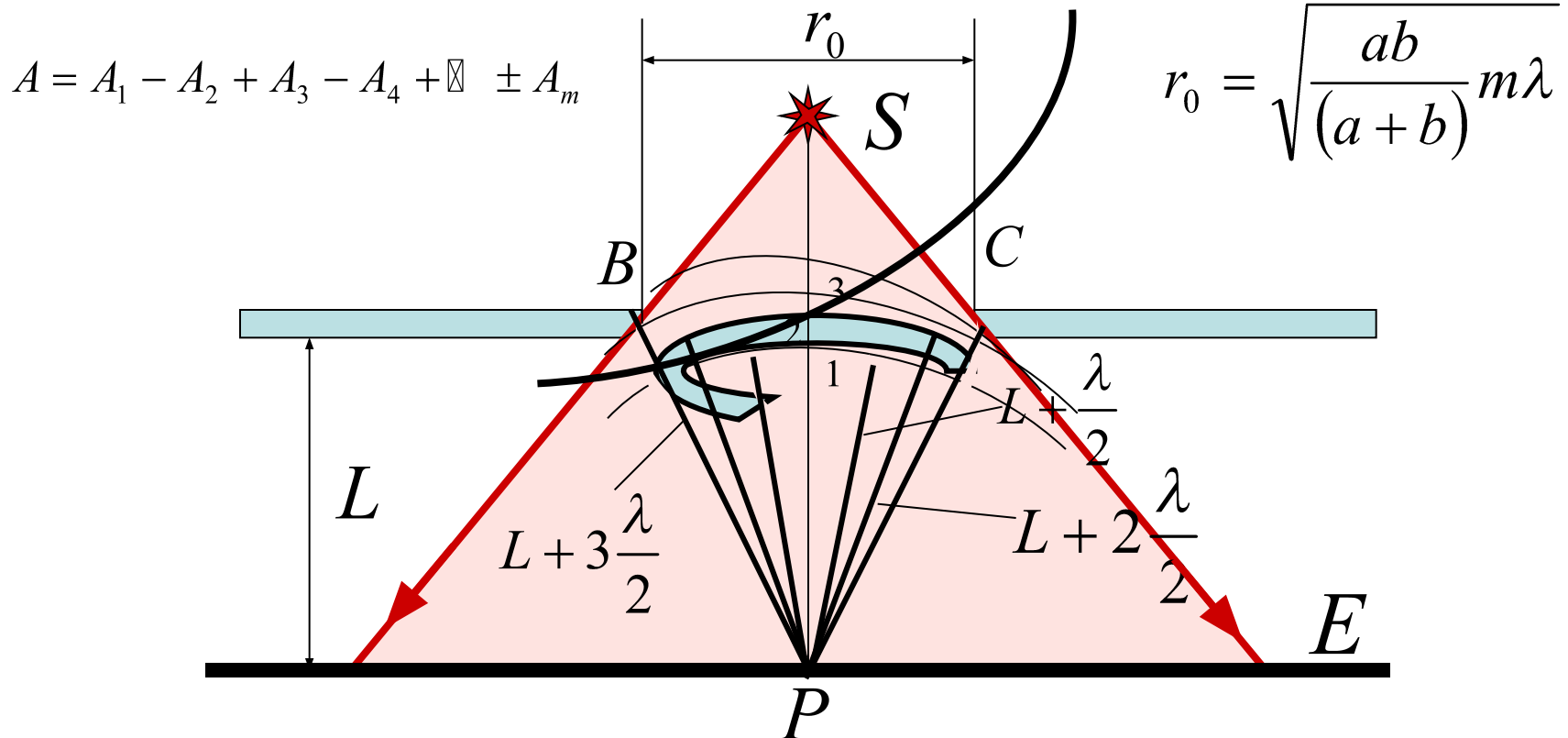
Член Лондонського  
королівського  
товариства (з 1825).

Французький фізик, один із засновників хвильової оптики. Закінчив Політехнічну школу (1806) та Школу доріг і мостів (1809) у Парижі. Працював інженером з ремонту доріг. Створив теорію дифракції, поклавши в основу принцип Гюйгенса та доповнивши його фундаментальною ідеєю про інтерференцію елементарних хвиль (принцип Гюйгенса – Френеля). Пояснив на основі цього принципу закони геометричної оптики. Ним вперше розглянута дифракція від краю екрана та круглого отвору. Френель — автор дослідів з бідзеркалами (1816) і біпризмами (1819), що стали класичними методами демонстрації інтерференційних явищ. Він уперше пояснив поляризаційні явища виходячи з гіпотези про поперечність світлових хвиль і встановив кількісні закони поляризації світла при його відбиванні та заломленні (формули Френеля, 1823).

*Ігнатенко В.М. ЗТФ*

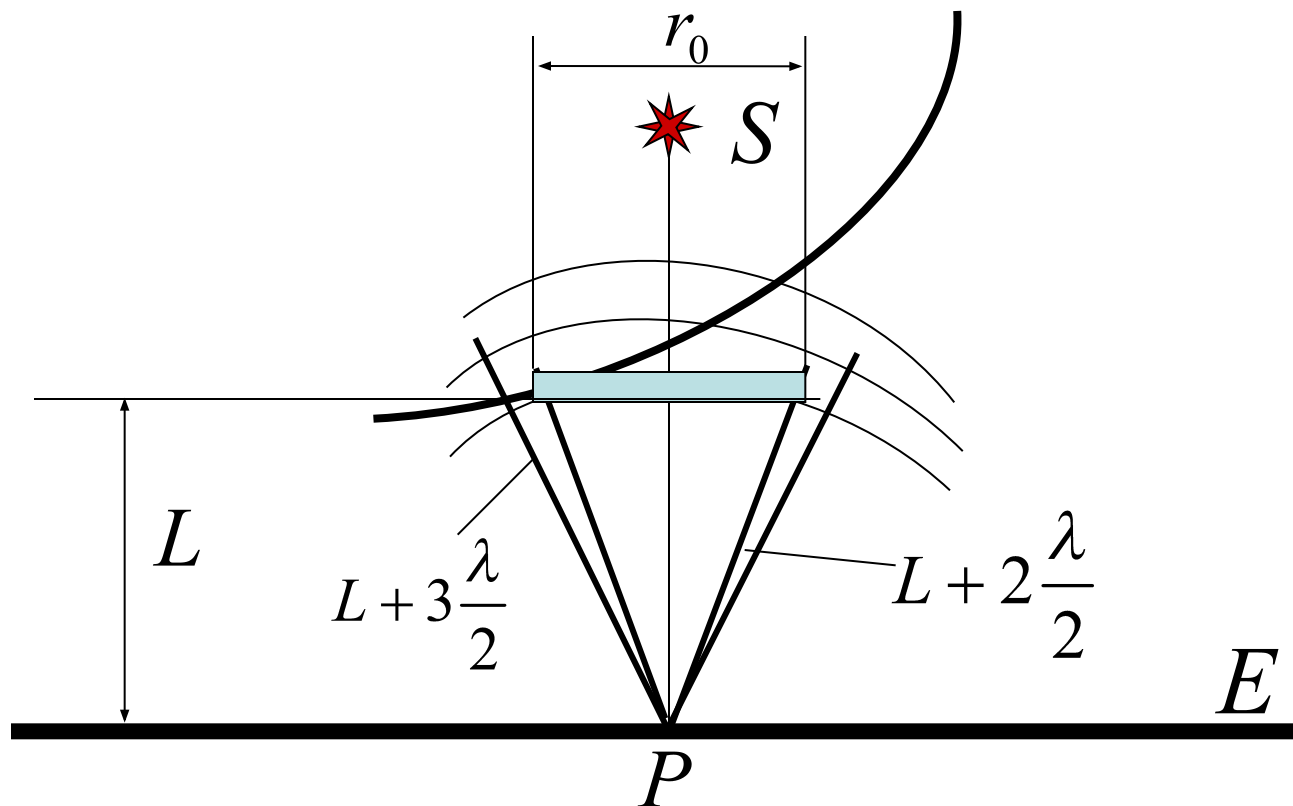
# Дифракція Френеля від круглого отвору

Отвір залишить відкритими  $m$  зон Френеля



$$A = \frac{A_1 + A_m}{2} \quad m - \text{нечетне (максимум)} \quad A = \frac{A_1 - A_m}{2} \quad m - \text{парне (мінімум)}$$

# Дифракція від круглого диску

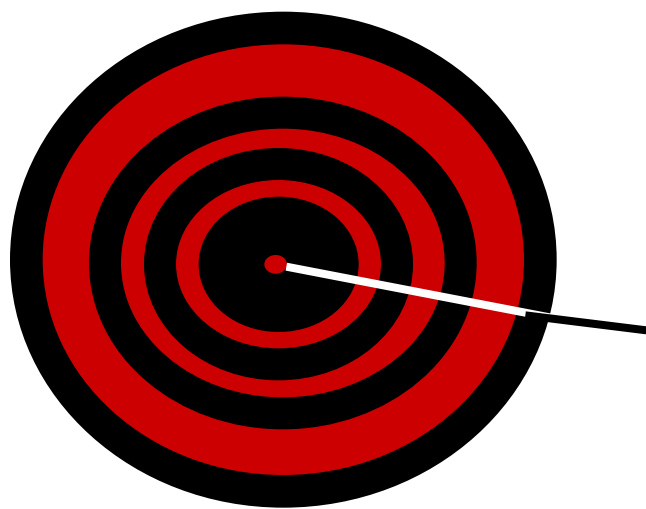


Диск закріє  $m$  перших зон Френеля

**У випадку непрозорого круглого диску дифракційна картина має вигляд низки світлих і темних концентричних кілець.**

$$A = A_{m+1} - A_{m+2} + A_{m+3} - \dots = \frac{A_{m+1}}{2} + \left( \frac{A_{m+1}}{2} - A_{m+2} + \frac{A_{m+3}}{2} \right) + \dots$$

**В центрі картини знаходиться світла пляма (пляма Пуассона)**



$$A = \frac{A_{m+1}}{2}$$

**Пляма Пуассона**

# Дифракція Фраунгофера від щілини в паралельних променях (1821-1822рр.)

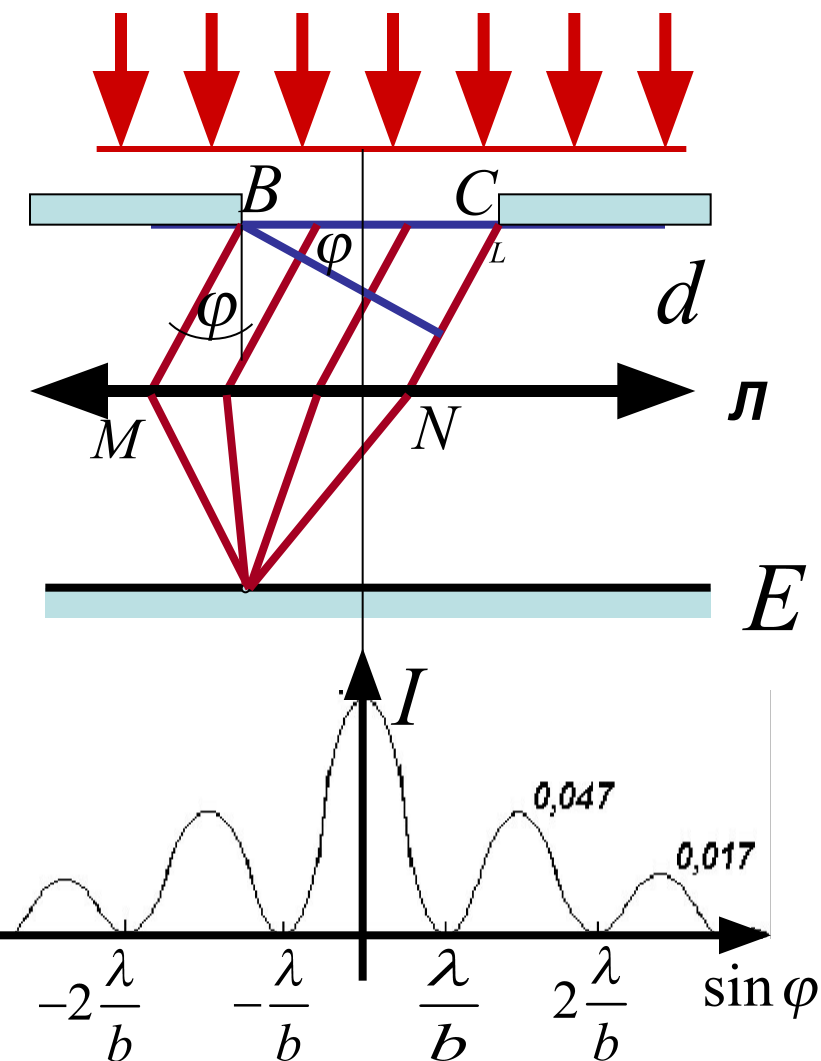
Паралельний пучок монохроматичного світла падає нормально на непрозорий екран, з вузькою щілиною шириною  $BC=b$  та довжиною  $l \gg b$ . Оптична різниця ходу між крайніми променями  $BM$  і  $CN$ , що йдуть під кутом  $\varphi$  до оптичної осі лінзи

$$d = b \sin \varphi$$

Розіб'ємо щілину  $BC$  на зони Френеля, які мають вигляд смуг, паралельних ребру  $B$  щілини. Ширина кожної зони вибирається такою, щоб різниця ходу від країв цих зон дорівнювала

$$\lambda/2$$

Ігнатенко В.М. ЗТФ



При інтерференції світла від кожної пари сусідніх зон амплітуда результуючих коливань дорівнює нулю, оскільки ці зони викликають коливання з однаковими амплітудами, але протилежними фазами. Усього на ширині щілини міститься

$$\Delta / \frac{\lambda}{2} = b \sin \varphi / \frac{\lambda}{2}$$

зон.

У випадку, коли кількість зон - парна, тобто

$$b \sin \varphi / \frac{\lambda}{2} = 2k \quad \text{або} \quad b \sin \varphi = k \lambda$$

то спостерігається **дифракційний мінімум** (темна смуга).

Для непарного числа зон спостерігається **дифракційний максимум**

$$b \sin \varphi / \frac{\lambda}{2} = 2k + 1 \quad \text{або} \quad b \sin \varphi = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

У напрямку  $\varphi = 0$  спостерігається найінтенсивніший центральний максимум нульового порядку.

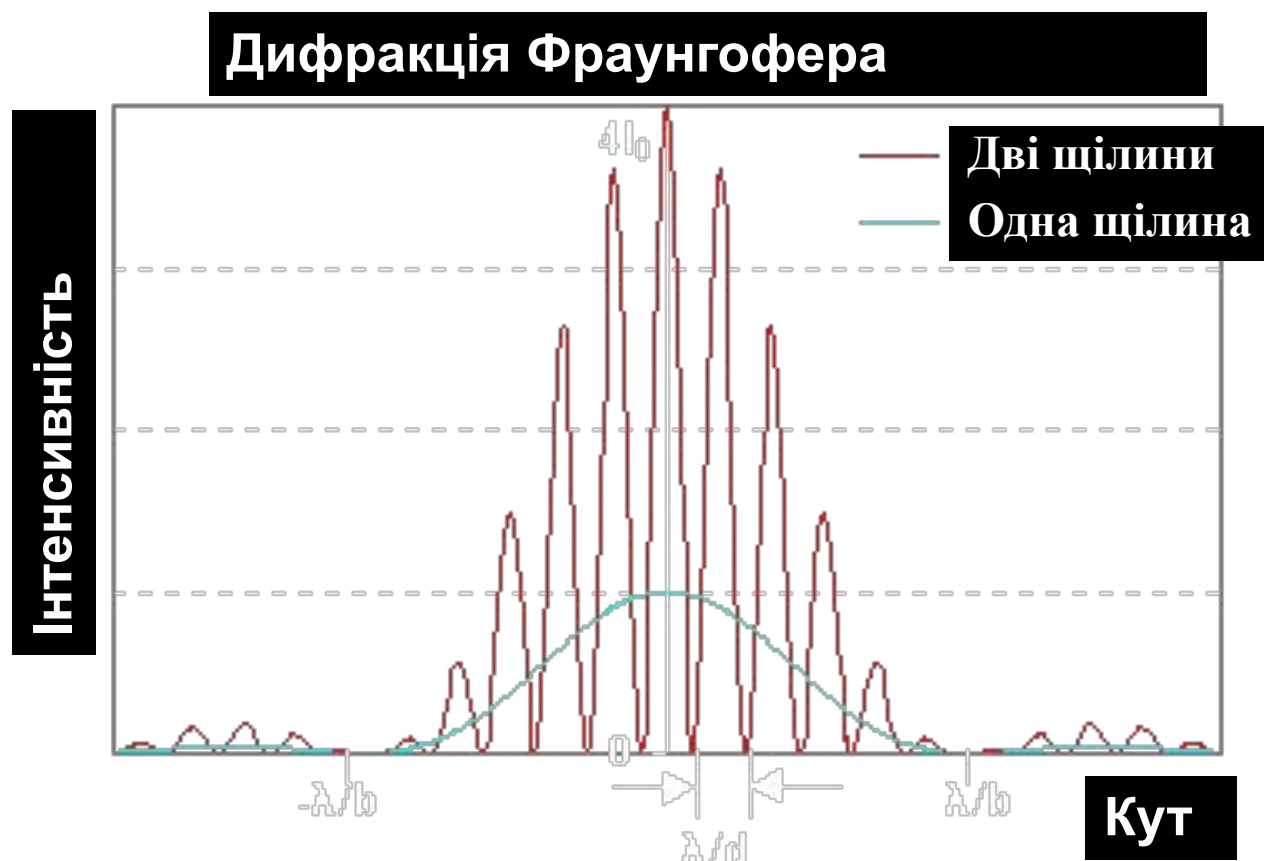
Анімація показує експеримент з дифракцією Фраунгофера на одній щілині. Ширина  $b$  щілини змінюється у діапазоні 500-1500 нм, довжина хвилі світла - 600 нм.



Анімація показує експеримент з дифракцією Фраунгофера на двох щілинах, за умови, що ширина кожної щілини  $b$  змінюється, а відстань між щілинами  $d$  залишається сталою. З анімації видно, що при зменшенні  $b$  ширина дифракційної картини збільшується, а її яскравість зменшується. При цьому період інтерференційних смуг не змінюється.



Розподіл інтенсивності світла при дифракції Фраунгофера від однієї та двох паралельних щілин.



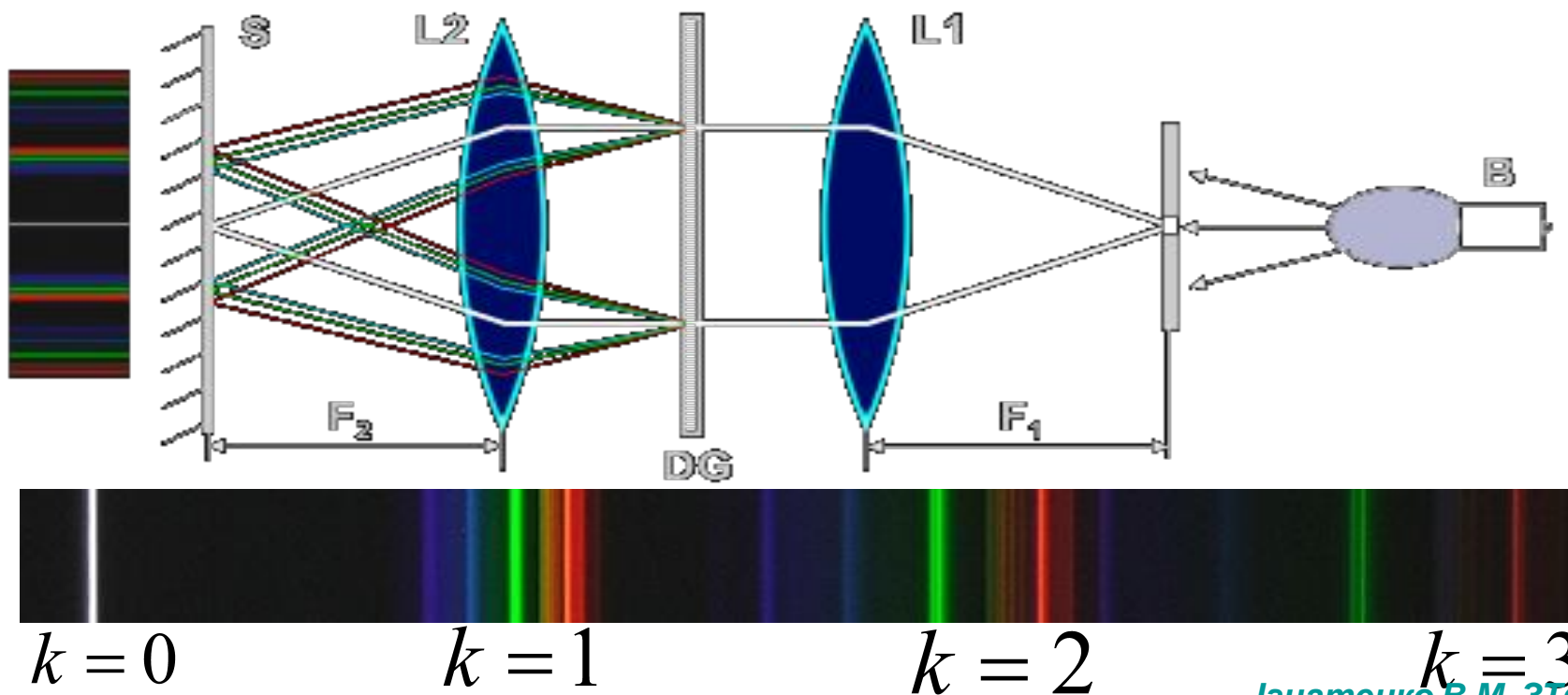
Анімація показує експеримент з дифракцією Фраунгофера на двох щілинах, за умови, що ширина щілин  $b$  залишається сталою (1000 нм), а відстань між щілинами  $d$  змінюється у діапазоні 1000-10000 нм. Довжина світлової хвилі - 600 нм. Частота розміщення дифракційних смуг збільшується пропорційно відстані  $d$  між щілинами, в той час як ширина дифракційної картини не змінюється і залежить тільки від  $b$ .



# Дифракційна решітка

**Дифракційна решітка** – оптичний прилад для аналізу спектрального складу оптичного випромінювання.

**Дифракційна решітка** складається з тисяч вузьких та близько розміщених щілин.



Сума ширини прозорої щілини і непрозорої смужки **називається періодом решітки  $d$** . У найкращих сучасних решітках наносять до 1200 штрихів на 1мм, так що період решітки може бути близьким до 0,8мкм.

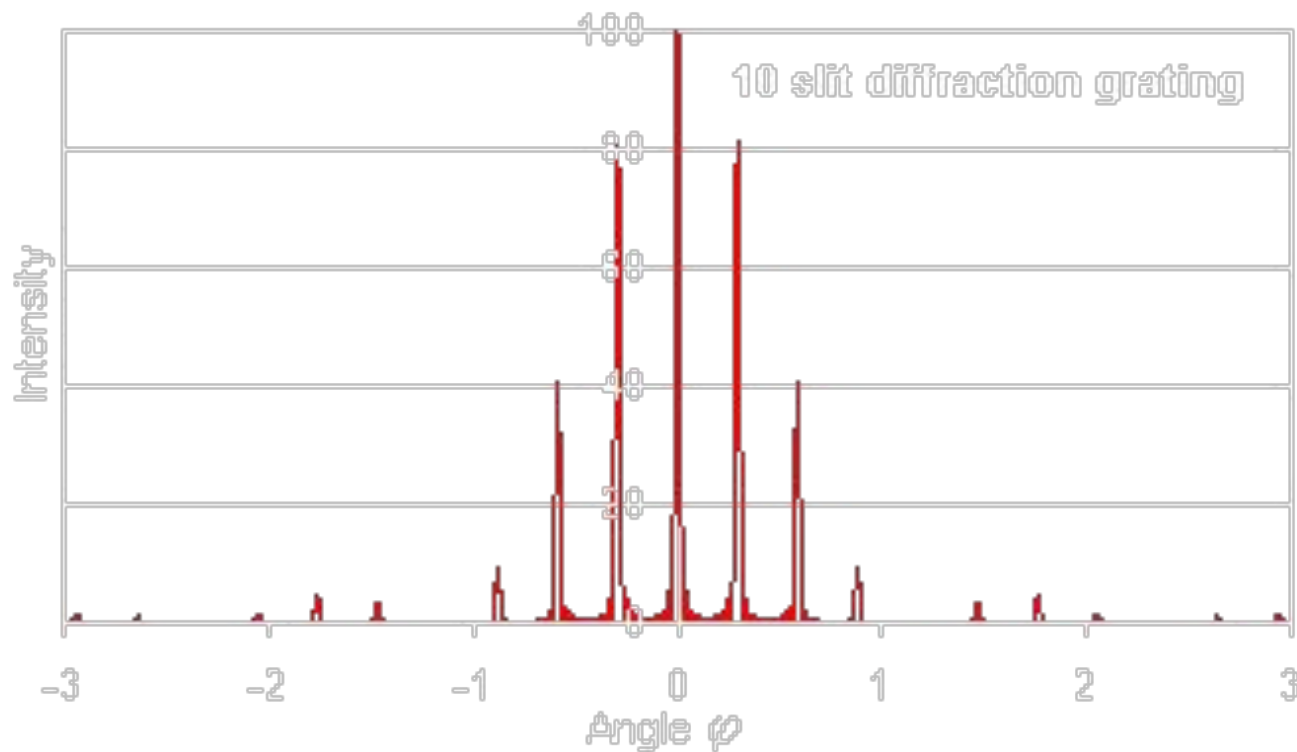
Можна довести, користуючись принципом Гюйгенса – Френеля **формулу дифракційної решітки – умову утворення головних максимумів:**

$$d \sin \varphi = \pm k \lambda \qquad k = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Між головними максимумами утворюються **головні мінімуми** згідно до умови:

$$b \sin \varphi = \pm m \lambda \qquad m = 1, 2, 3, \dots$$

# Розподіл інтенсивності світла при дифракції світла від дифракційної решітки, яка містить $N$ паралельних щілин



# Формула Вульфа - Бреггів

**Просторовою або трьохвимірною дифракційною решіткою** називається таке оптично неоднорідне середовище, неоднорідності якого періодично повторюються при зміні всіх трьох просторових координат.

Прикладом просторовою решітки є кристалічна решітка твердого тіла. Спостереження дифракційної картини можливе тільки при певних співвідношеннях між довжиною хвилі і розмірами неоднорідностей:

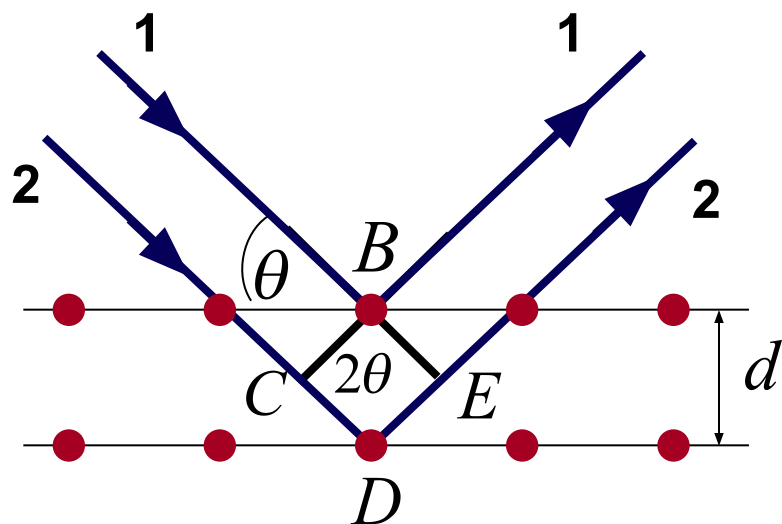
$$\lambda \geq 2d_{\max}$$

Це можливо тільки для короткохвильового випромінювання, тобто для рентгенівських променів.

Абсолютний показник заломлення усіх середовищ для рентгенівського випромінювання близький до одиниці, тому оптична різниця ходу між променями 1- і 2-, які відбиваються від кристалографічних площин

$$\Delta = CD + DE = 2d \sin \theta$$

де  $d$  – відстань між площинами, в яких містяться вузли (атоми) кристалічної решітки,  $\theta$  – кут ковзання променів.



**Формула Вульфа-Бреггів для дифракційних максимумів:**

$$k\lambda = 2d \sin \theta,$$
$$(k = \pm 1; \pm 2, \pm 3 \dots)$$

# Взаємодія світла з речовиною

**Поглинання світла (абсорбція)** – це явище зменшення енергії світлової хвилі при її розповсюдженні у речовині внаслідок перетворення енергії світлової хвилі у інші види енергії.

Закон поглинання світла (**закон Бугера**)

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

де  $I, I_0$  - інтенсивність світла на виході та вході у шар речовини, товщиною  $x$ ;  $\mu$  – показник поглинання (залежить від  $\lambda$ ).

Коефіцієнт поглинання - величина, обернена товщині шару, при проходженні якого інтенсивність світла зменшується у  $e$  разів.

Для діелектриків  $\mu = 10^{-1} \text{ м}^{-1} \div 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ , для металів  $\mu = 10^5 \div 10^7 \text{ м}^{-1}$ , тому метали непрозорі для світла.

Залежністю  $\mu(\lambda)$  пояснюються **кольори тіл**.

Явище вибіркового поглинання світла певних довжин хвиль використовується при конструюванні **світлофільтрів**, які залежно від хімічного складу пропускають світло певних довжин хвиль та поглинають світло інших довжин.

Абсорбційний спектральний аналіз суміші газів ґрунтується на вимірювання спектрів частот та інтенсивностей ліній (смуг) поглинання.

Структура спектрів поглинання визначається складом та будовою молекул, тому вивчення спектрів поглинання є одним із основних методів кількісного та якісного дослідження речовин.

# Розсіювання світла. Закон Релея

Дифракцію на маленьких неоднорідностях називають **розсіюванням світла**.

Коли розміри неоднорідностей малі порівняно з довжиною хвилі (не більші, ніж  $\lambda/10$ ), то інтенсивність розсіяного світла обернено пропорційна четвертій степені довжини хвилі (**Закон Релея**)

$$I_{\text{роз}} \sim \frac{1}{\lambda^4}$$

Розсіювання світла також спостерігається в чистих середовищах, які не містять сторонніх частинок. Наприклад, воно може відбуватися на флуктуаціях (випадкових відхиленнях) густини, анізотропії або концентрації. Таке розсіювання називають молекулярним. Воно пояснює блакитний колір неба. Дійсно короткі хвилі (фіолетові та сині) згідно до закону Релея розсіюються краще, ніж довгі (червоні і жовті).

Інтенсивність світла є модулем вектора Пойнтінга

$$I = \left| \vec{S} \right| = \frac{dW}{dS \cdot dt}$$

# Дисперсія світла

## (Ньютон 1672р.)

**Дисперсія** хвиль - це залежність фазової швидкості хвиль у середовищі від їх довжини хвилі (частоти).

Оскільки  $v = c/n$ , то **дисперсія світла - це залежність показника заломлення середовища від частоти світлової хвилі.**

Дисперсія  $D$  дорівнює величині зміни фазової швидкості при зміні довжини хвилі на одиницю

$$D = \frac{dv}{d\lambda}$$

Оскільки,  $v = c/n$ , де  $c$  – швидкість світла у вакуумі.

Величини

$$\left[ \begin{array}{l} D_{\lambda} = \frac{dn}{d\lambda} \\ D_v = \frac{dn}{dv} \end{array} \right. \quad \text{дисперсія речовини}$$

1 У середовищі **немає дисперсії** за умови

$$D = \frac{dv}{d\lambda} = 0$$

Наприклад, дисперсія вакууму

$$v = c = \text{const} \Rightarrow D = \frac{dv}{d\lambda} = 0$$

2 **Нормальною дисперсією** називають зростання показника заломлення із збільшенням частоти світла.

Вона спостерігається за умови

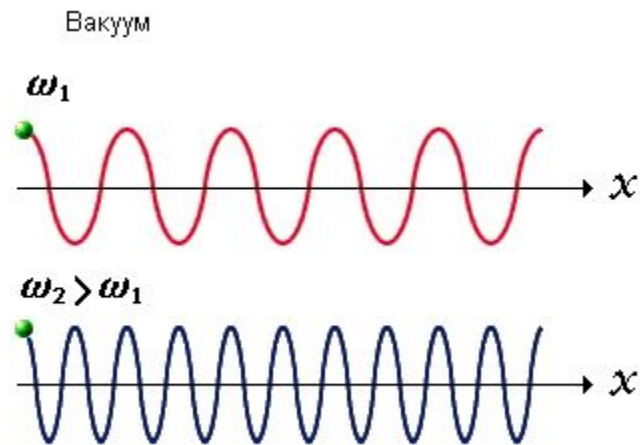
$$\frac{dv}{d\lambda} > 0 \quad \frac{dn}{dv} > 0 \quad \frac{dn}{d\lambda} < 0$$

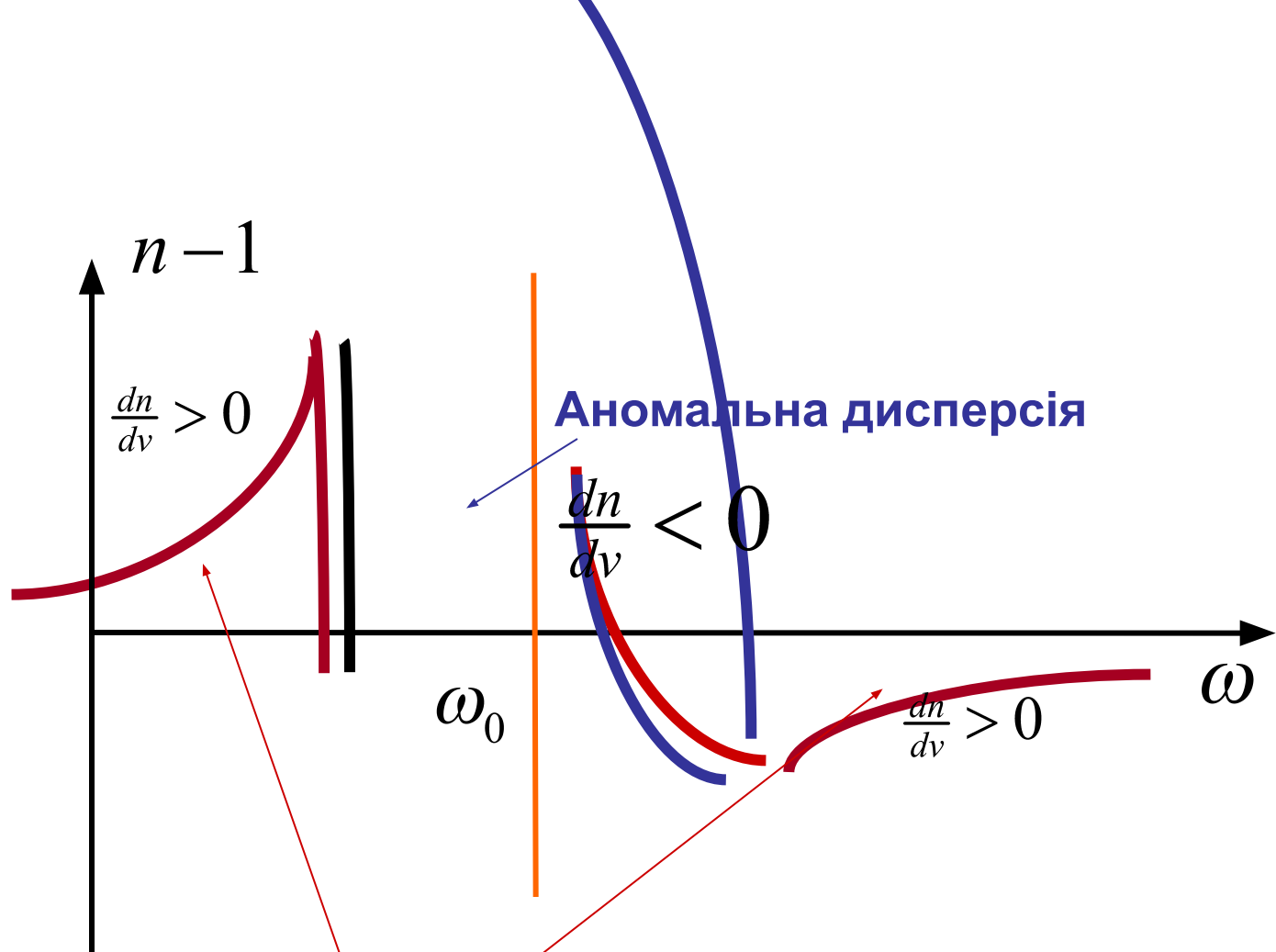
3 **Аномальною дисперсією** називають зменшення показника заломлення із збільшенням частоти світла.

Вона спостерігається за умови

$$\frac{dv}{d\lambda} < 0 \quad \frac{dn}{d\lambda} > 0 \quad \frac{dn}{dv} < 0$$

# Дисперсія хвиль





Нормальна дисперсія

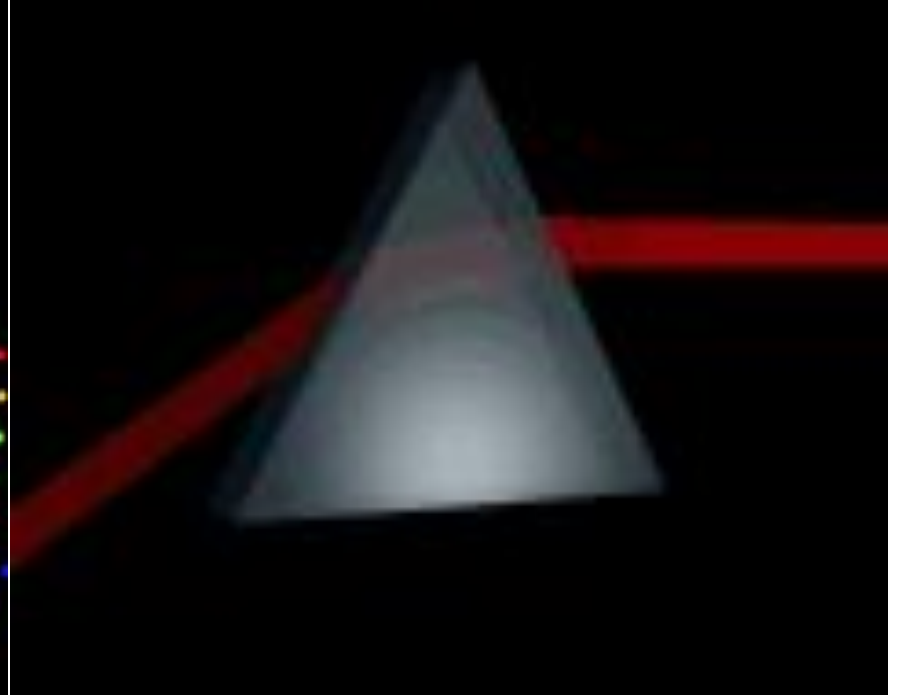
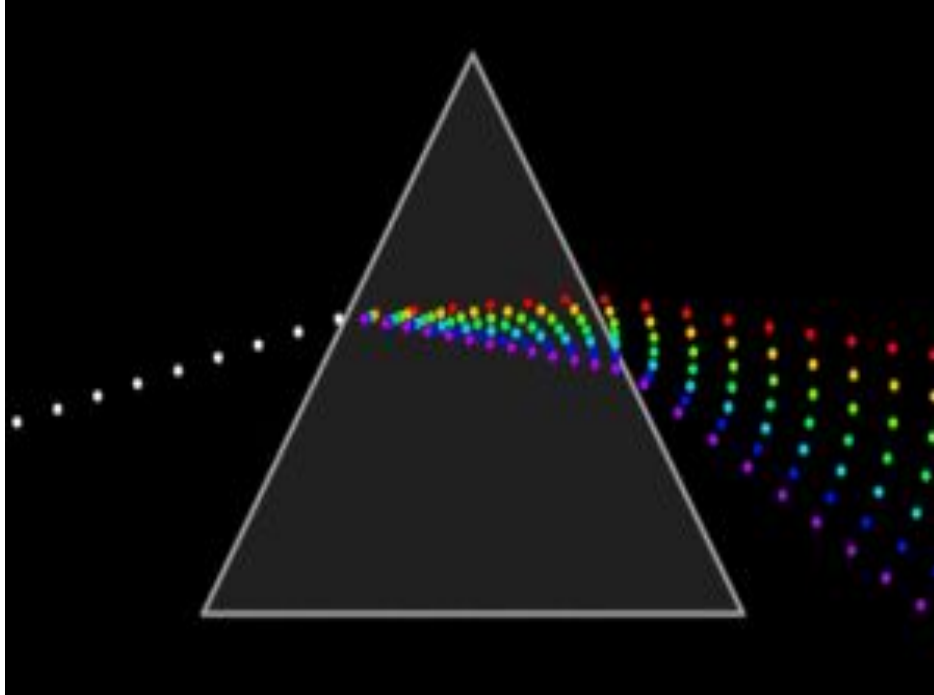
$\omega_0$  - резонансна частота (власна частота коливань електрона);

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \text{ де } m - \text{ маса електрона.}$$

Усі середовища за винятком абсолютного вакууму мають дисперсію.

Дисперсію пояснює **електрона теорія дисперсії** (класична теорія дисперсії (Лоренц Х.А.).

Вона виникає за рахунок змушених коливань електронів та іонів під впливом змінного поля електромагнітної хвилі.



## Дати коротку відповідь на нижченаведені питання

- 1 Дифракція світла спостерігається за умови, що оптичні неоднорідності середовища є **а)**  $\gg \lambda$  ; **б)**  $\ll \lambda$  ; **в)**  $\sim \lambda$ .
- 2 Дифракція від точкового джерела світла на отворі це:  
**а)** дифракція Френеля ; **б)** дифракція Фраунгофера.
- 3 Якщо відкриті три зони Френеля, то на екрані буде спостерігатися :  
**а)** мінімум; **б)** максимум; **в)** рівномірно освітлений екран.
- 4 На щілину падає плоска хвиля  $\lambda = 600 \text{ нм}$  . Напрямок на третій мінімум  $30^\circ$ . Ширина щілини дорівнює **а)** 2100 нм; **б)**  $1800/\sqrt{3}$  нм; **в)** 3600 нм
- 5 Загальна кількість дифракційних максимумів при дифракції на решітці з періодом  $d = 4,5\lambda$  дорівнює: **а)** 8; **б)** 9; **в)** 4; **г)** 5; **д)** 10
- 6 Коефіцієнт поглинання діелектрика  $\mu = 10^{-2} \text{ м}^{-1}$ . Чому дорівнює товщина шару, в якому інтенсивність світла зменшується у  $e$  разів?  
**а)** 100 м; **б)** 9; **в)**  $10^{-2} \text{ м}$ ; **г)**  $e \text{ м}$ ; **д)** 10м
- 7 Вкажіть одиниці вимірювання інтенсивності світла.
- 8 Веселка це наслідок **а)** абсорбції; **б)** розсіювання; **в)** дисперсії?
- 9 Відношення інтенсивностей двох хвиль з  $\lambda = 0,5 \text{ мкм}$  та  $\lambda = 0,75 \text{ мкм}$ , які розсіюються у повітрі дорівнює: **а)**  $\approx 1,5$ ; **б)**  $\approx 2,25$ ; **в)**  $\approx 0,7$ ; **г)**  $\approx 0,2$ ; **д)**  $\approx 5$
- 10 При проходженні через призму на більший кут відхиляються  
**а)** блакитні; **б)** жовті; **в)** зелені хвилі