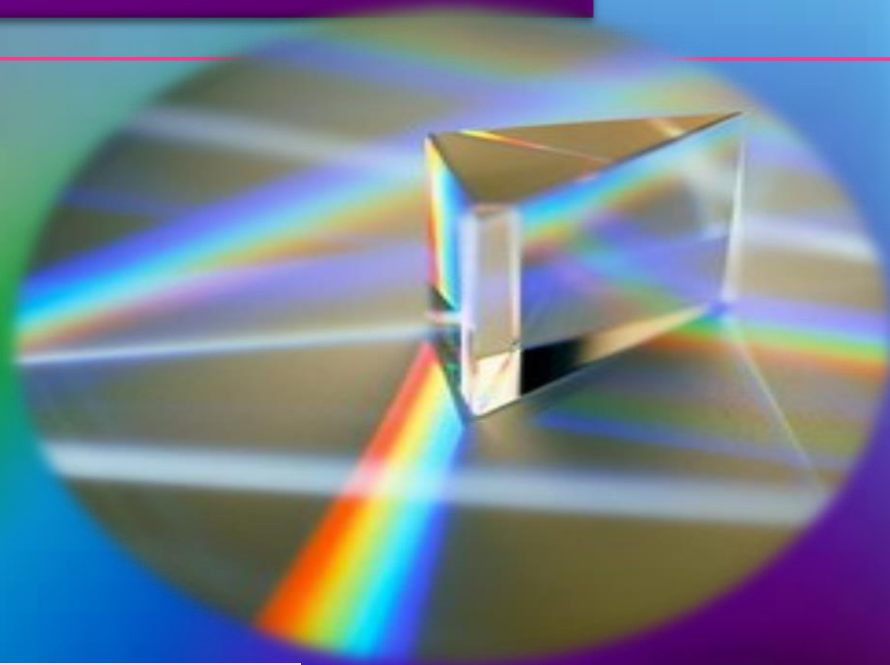


# 5. ХВИЛЬОВА ОПТИКА



Базується на уявленні про світло як **хвильовий процес**: розповсюдження світла описує принцип Гюйгенса-Френеля, а взаємодія світла з речовиною носить неперервний характер.

Дає змогу пояснити явища: інтерференції, дифракції, дисперсії та поляризації світла.

## 5.2. Інтерференція

5.2.1. Інтерференція світла. Когерентні хвилі. Часова та просторова когерентність.

5.2.2. Дослід Юнга. Геометрична та оптична різниця ходу. Умови мах та міні інтерференції.

5.2.3. Методи отримання когерентних джерел світла. Інтерференція на плоскопаралельній пластині. Кільця Ньютона.

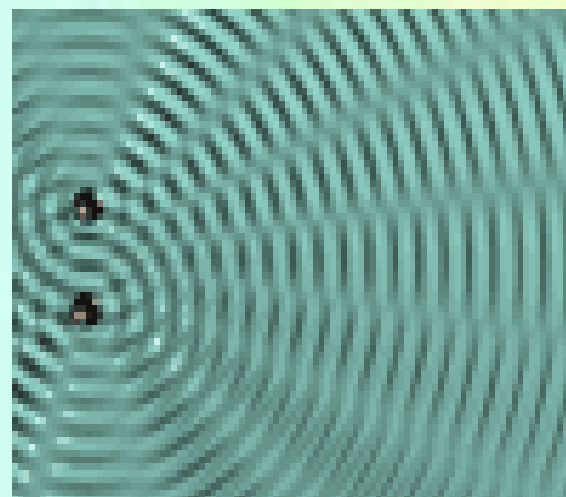
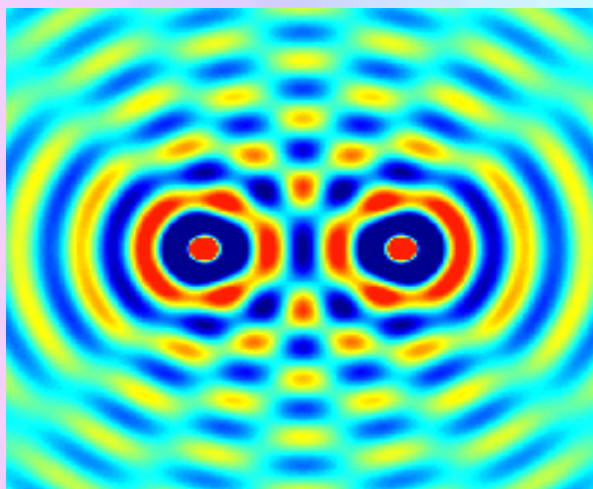
5.2.4. Застосування інтерференції.

## 5.2.1. Інтерференція світла. Когерентні хвилі

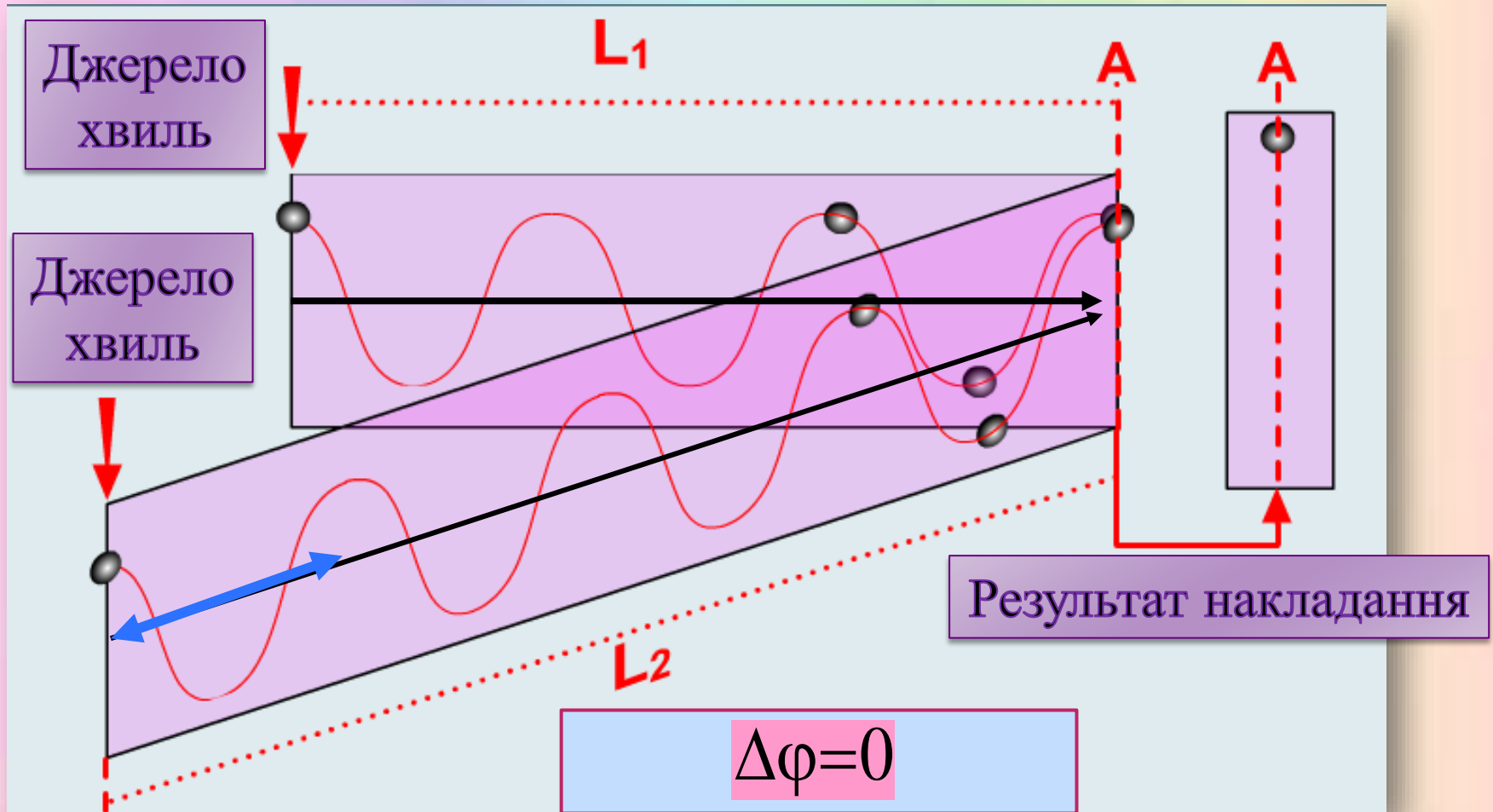
Інтерференція від лат. *inter* (взаємно, між собою) та *fario* (вдаряти).

Явище перерозподілу інтенсивності світлового потоку в просторі (поява мінімумів та максимумів інтенсивності) при накладанні двох (або більше) **когерентних** світлових хвиль.

**Когерентними** називають хвилі, різниця фаз між якими залишається незмінною в часі.

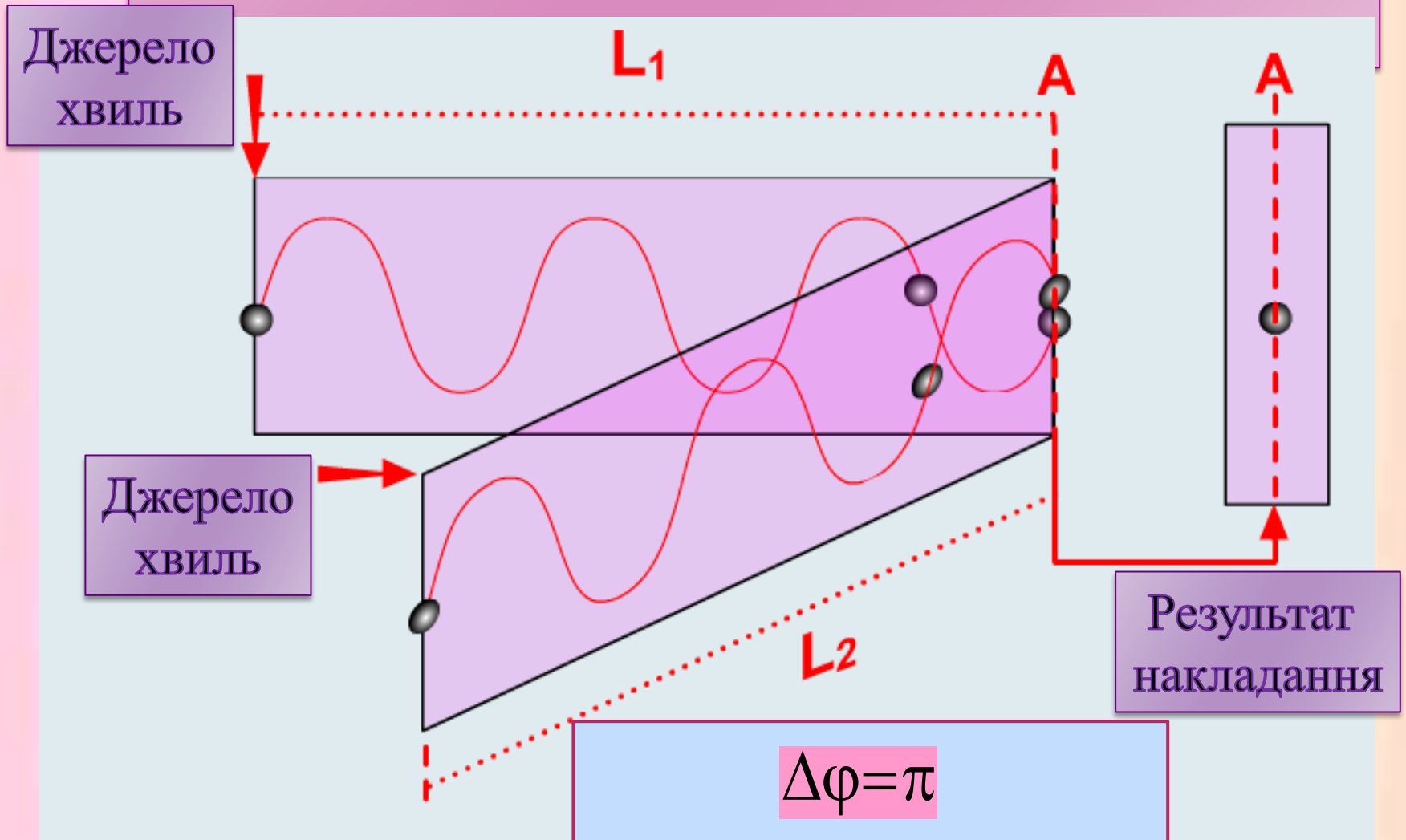


Утворення інтерференційних максимумів:  
при накладанні двох когерентних хвиль різниця фаз  
кратна  $2\pi$ : ( $\Delta\varphi = m \cdot 2\pi$ , де  $m=0,1,2,\dots$ )





Утворення інтерференційних мінімумів:  
при накладанні двох когерентних хвиль різниця фаз  
кратна непарній кількості  $\pi$ : ( $\Delta\varphi = (2m + 1)\pi$ ,  
де  $m=0,1,2,\dots$ )



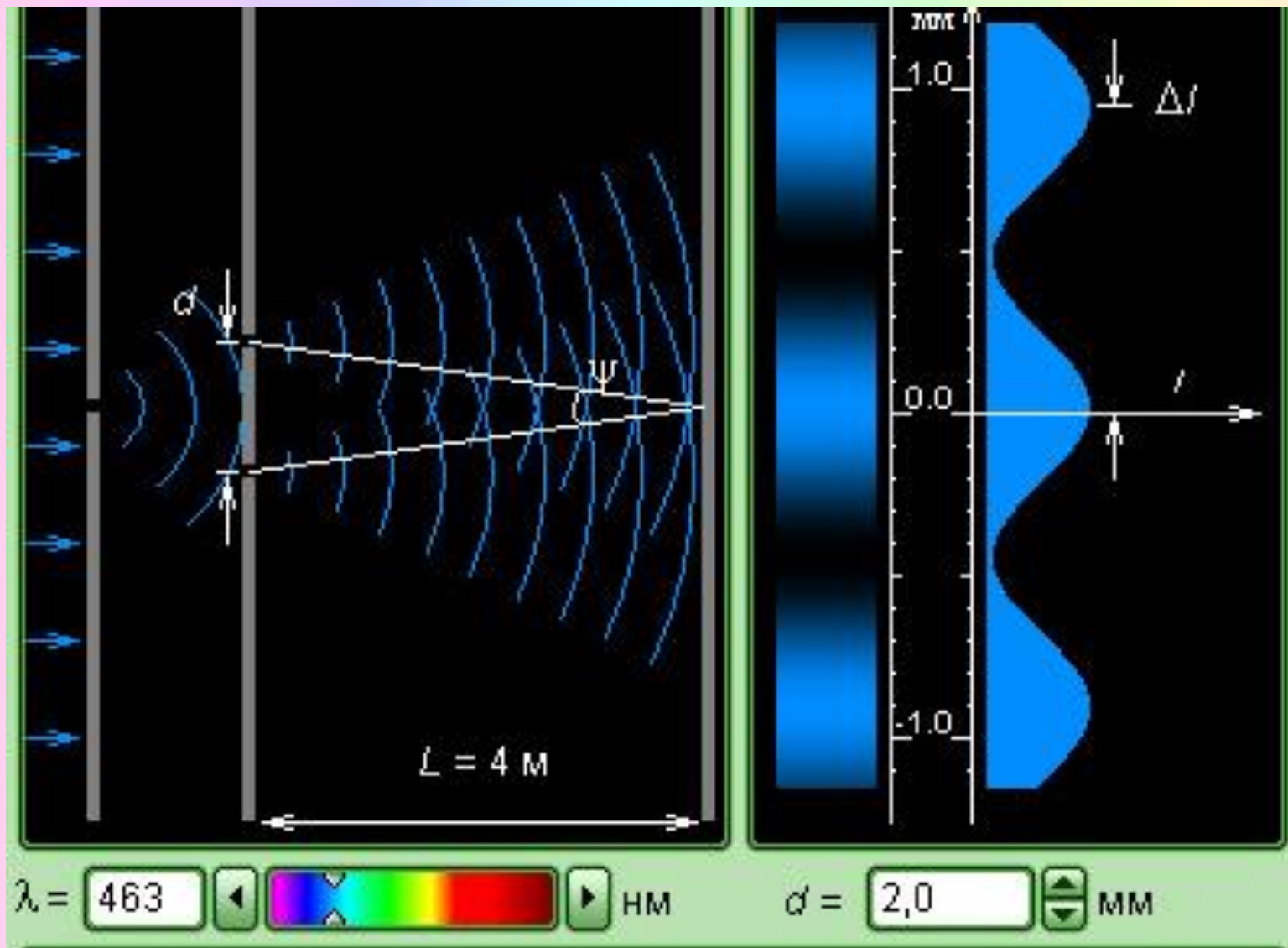
# Томас Юнг



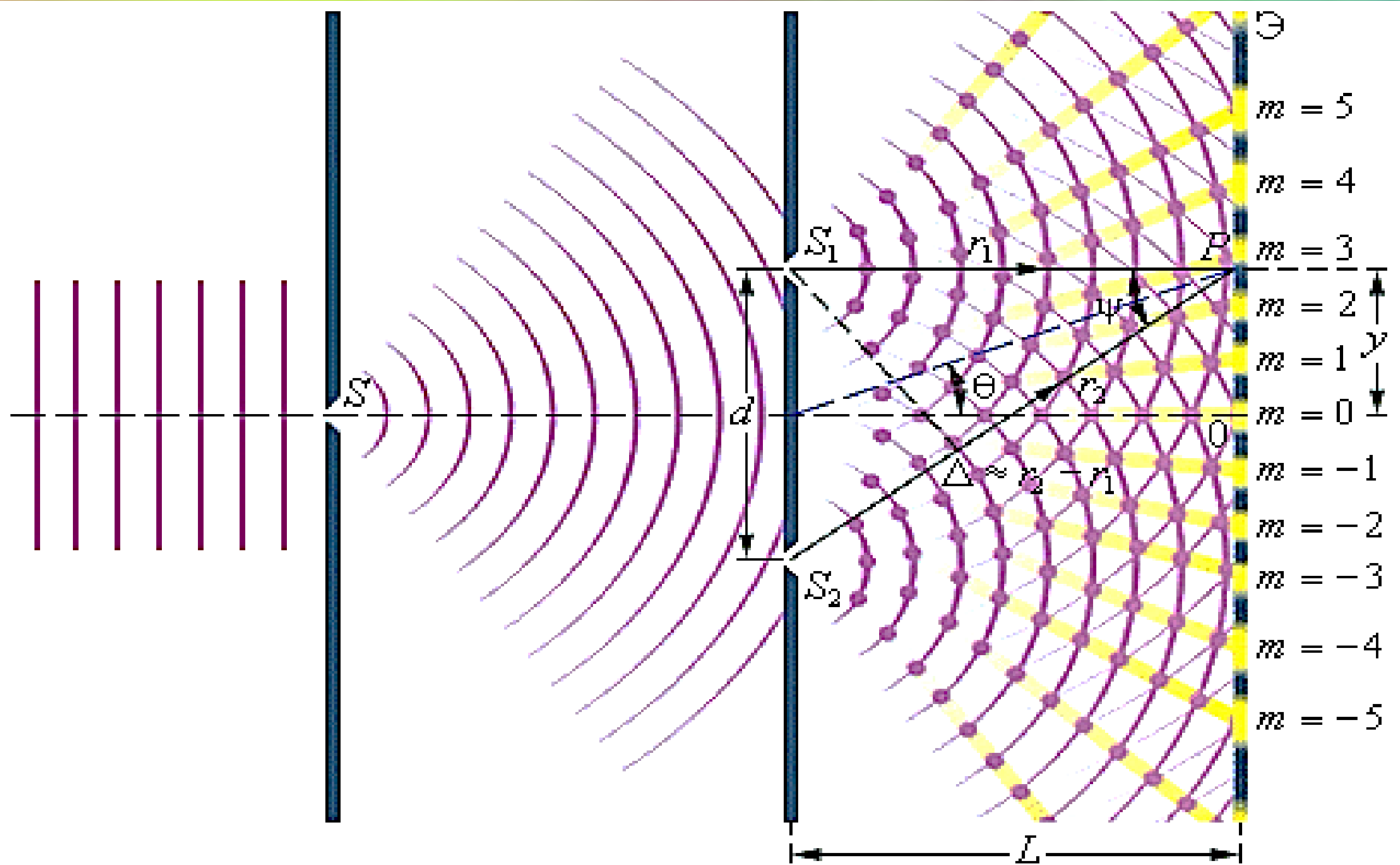
13.06.1773—  
10.05.1829

- Дав пояснення природи акомодації, астигматизму та колірному зору.
- Вперше вказав на посилення та послаблення звуку і запропонував принцип суперпозиції хвиль.
- В 1801 році пояснив явище інтерференції світла.
- Дав тлумачення кілець Ньютона.
- Отримав два когерентні джерела світла (1802).
- У 1803 намагався пояснити дифракцію світла.
- Виказав гіпотезу про поперечні коливання світлових хвиль.
- Виміряв довжини хвиль світла різних кольорів.
- Ввів характеристику пружності - модуль стиску та розтягу (модуль Юнга).

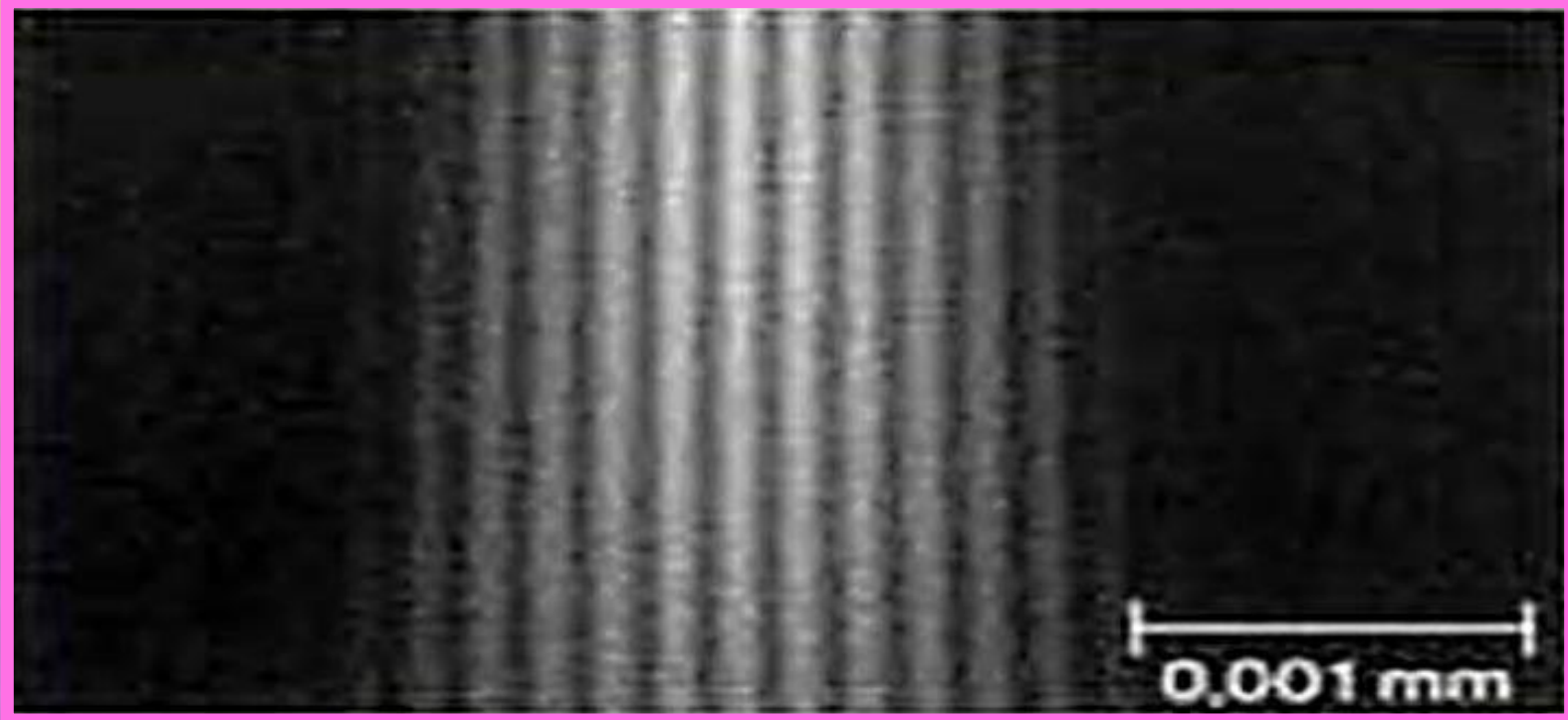
## 5.2.2. Дослід Юнга 1802 р.



# Дослід Юнга



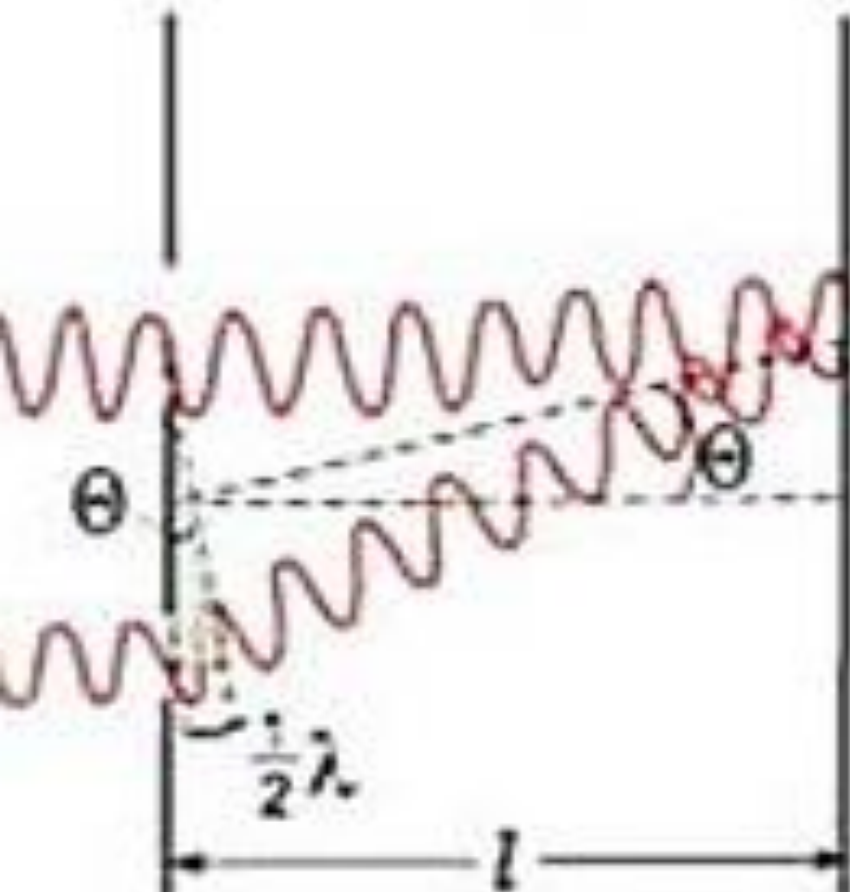
## Інтерференційна картина від двох щілин



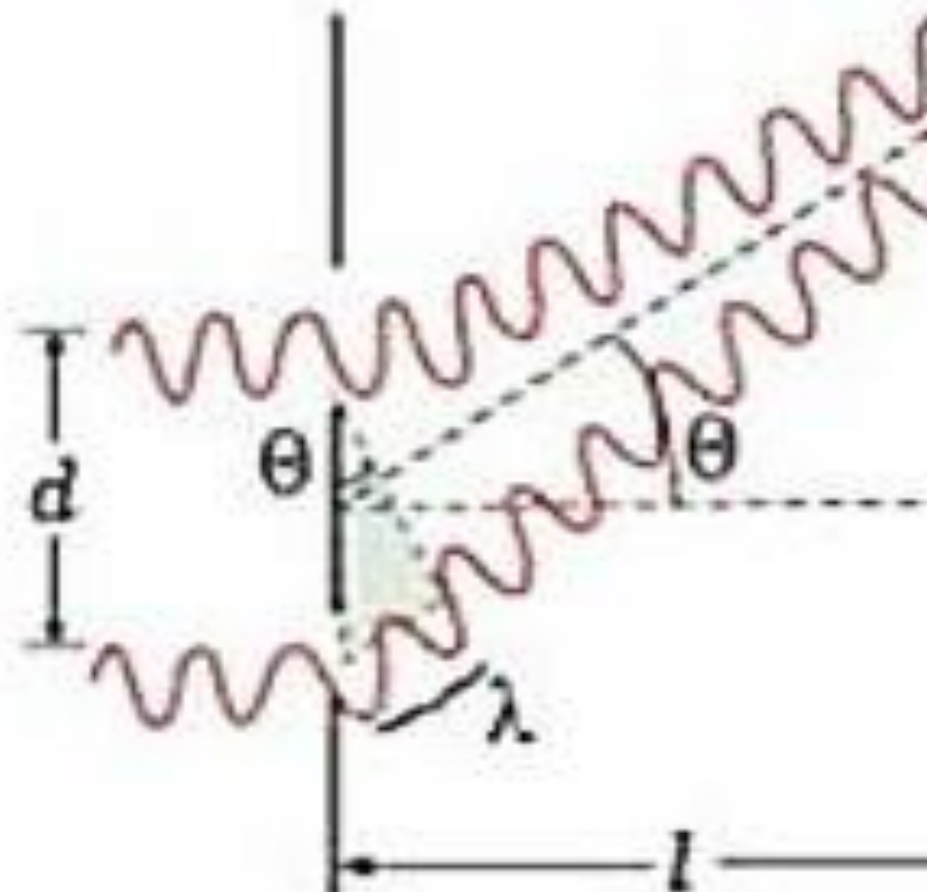
За допомогою досліду Т. Юнг *вперше* виміряв довжини хвиль світла різних кольорів



# Інтерференційні максимуми та мінімуми від двох щілин



мінімум  
першого порядку  $m = 1$



максимум  
першого порядку  $m = 1$

# Геометрична та оптична різниця ходу

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = (\omega t - kr_1 + \varphi_{01}) - (\omega t - kr_2 + \varphi_{02}).$$

Якщо  $\varphi_{01} = \varphi_{02}$ , отже  $\Delta\varphi = k(r_2 - r_1)$ .

Або  $\Delta\varphi = k \Delta r$ .

Остаточно:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r$$

$\Delta r$  – геометрична різниця ходу.

$\Delta = n_2 r_2 - n_1 r_1$  – оптична різниця ходу.

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta$$

max:  $\frac{2\pi}{\lambda} \Delta = 2\pi m \Rightarrow \Delta = m \lambda$ , де  $m=0,1,2,\dots$

min:  $\frac{2\pi}{\lambda} \Delta = (2m + 1)\pi \Rightarrow \Delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$ , де  $m=0,1,2,\dots$

## Почасова когерентність

Обмеження на когерентність, обумовлене **скінченністю часу** випромінювання хвилі атомарними системами  $\Delta t_{\text{випр}}$ .

Тоді **довжина когерентності** вздовж світлового променя не перевищує величини  $r_{\text{когер}} \leq c \Delta t_{\text{випр}}$ .

При довших різницях ходу хвиль когерентність зникає.

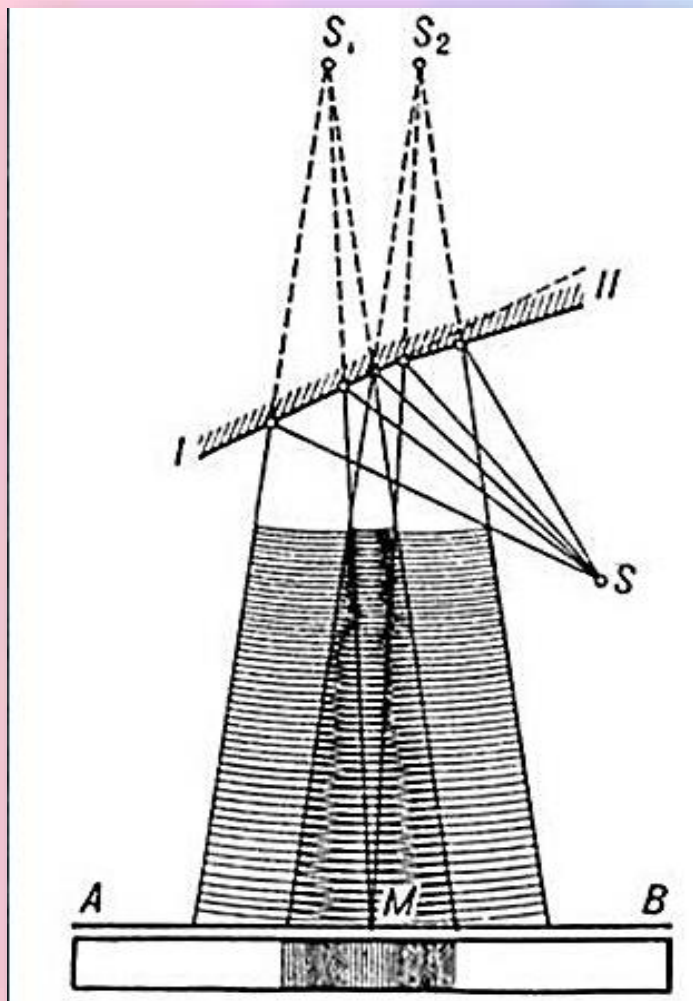
## Просторова когерентність

Обмеження на когерентність в напрямках, що відхиляються від осі світлового потоку, обумовлене **поперечною протяжністю**  $b_{\text{дж}}$  джерела світла.

При кутах спостереження  $\varphi$ , що задовольняють умову  $b_{\text{дж}} \sin \varphi \geq \lambda/2$ , когерентність зникає.

5.2.3. Методи отримання когерентних  
джерел світла.  
Інтерференція на плоскопаралельній  
пластині.  
Кільця Ньютона.

# Дзеркала Френеля

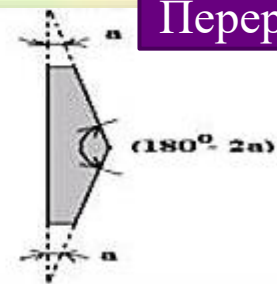


# Біпризма Френеля

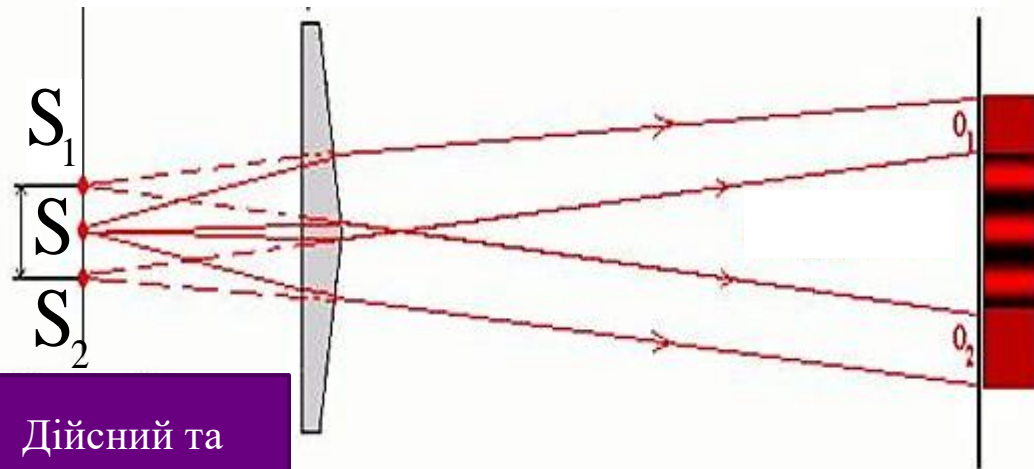
Зовнішній вигляд



Переріз



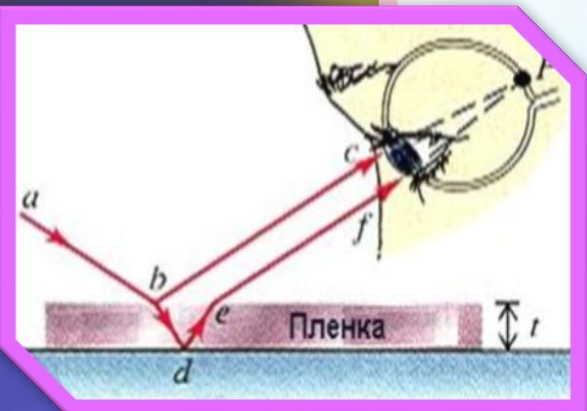
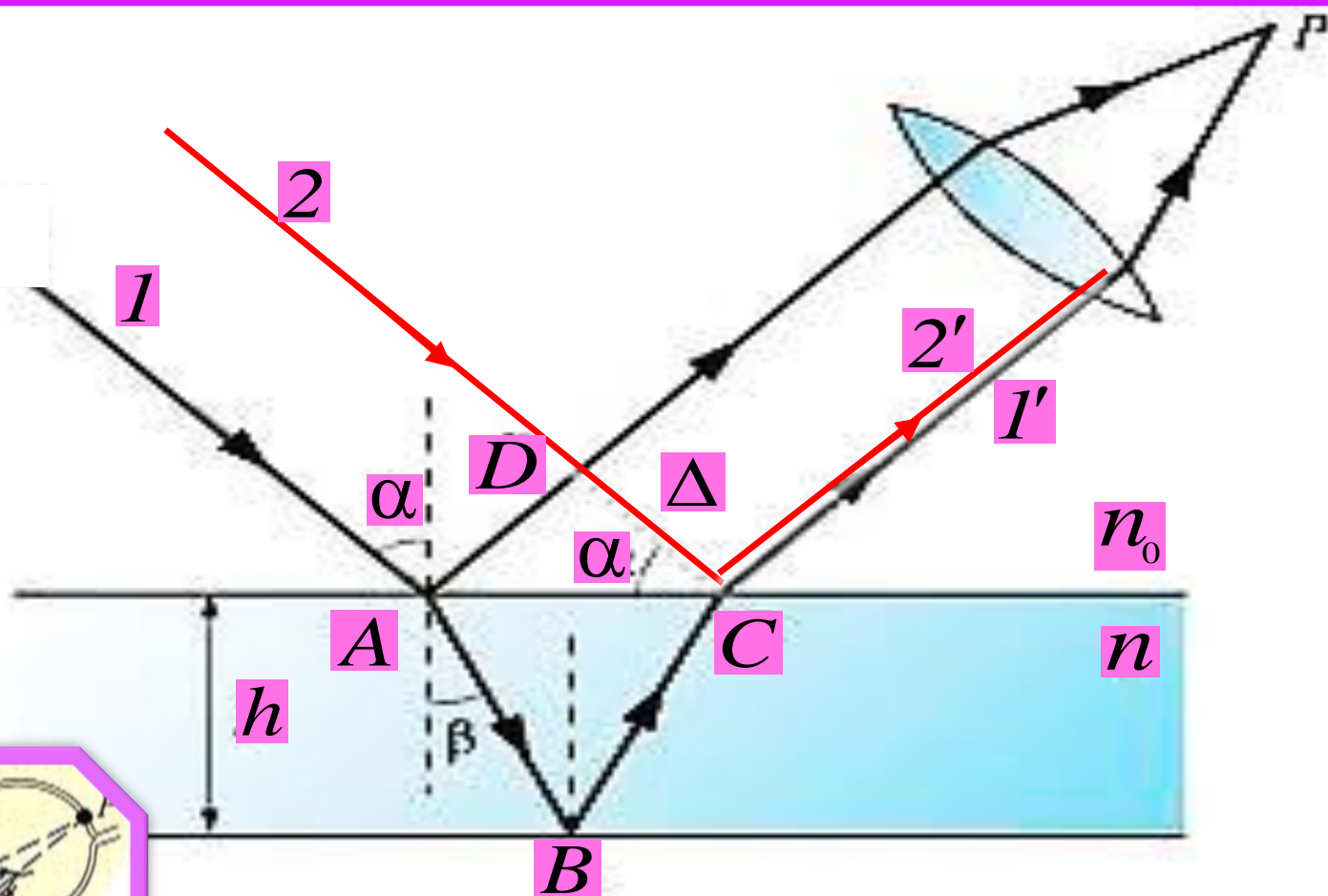
Хід променів у біпризмі



Дійсний та  
2 уявні джерела

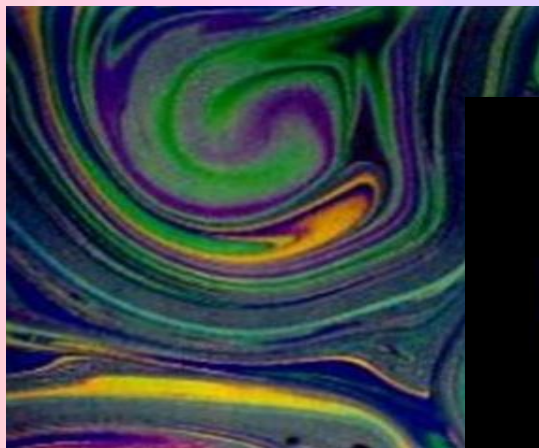
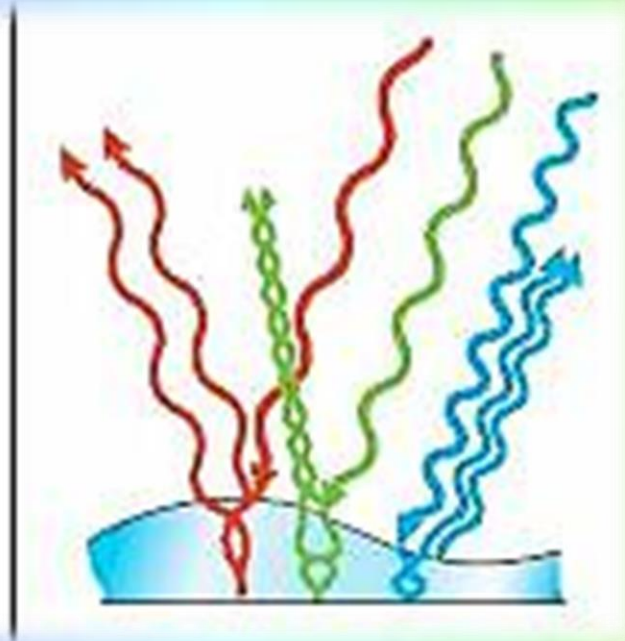
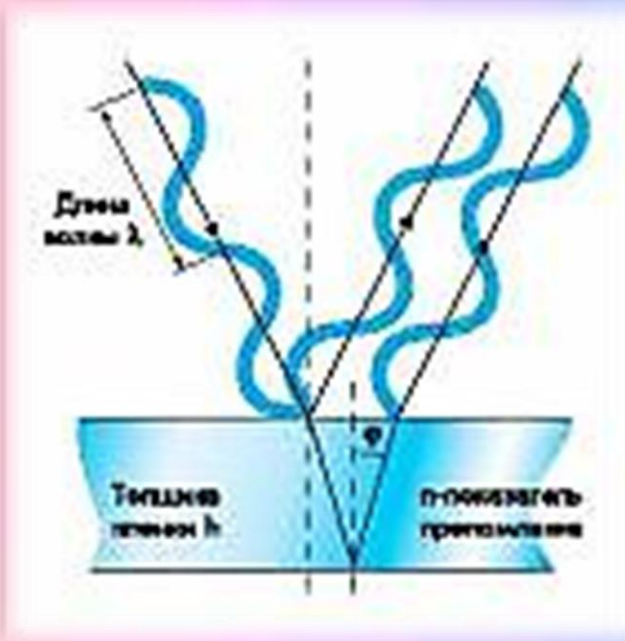


# Інтерференція на плоскопаралельній пластині (в тонких плівках)



$$\Delta = (AB + BC)n - (CDn_0 + \frac{\lambda}{2})$$

# Виникнення різнокольорового спектру при інтерференції

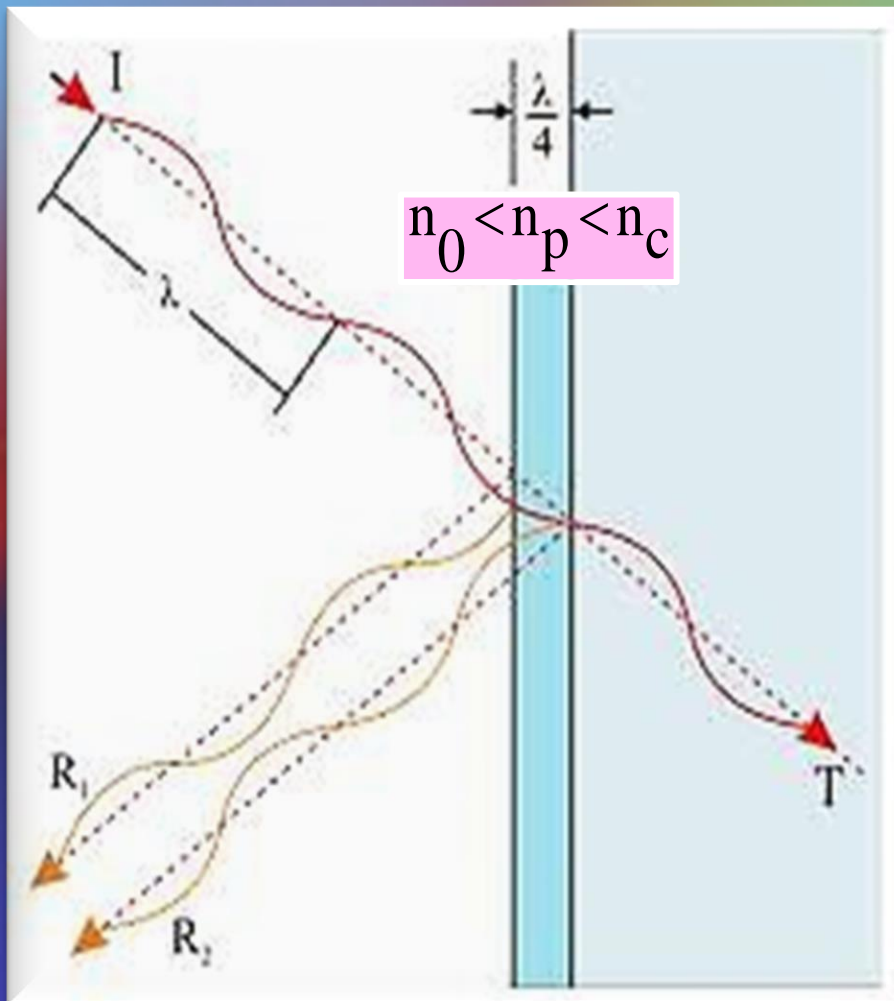






## 5.2.3. Застосування інтерференції

### Просвітлення оптики



При  $\alpha=0$  оптична різниця ходу для умови  $\min$ :

$$\Delta = 2d \cdot n_p = (2m+1) \lambda/2.$$

Для мінімальної товщини плівки  $m=0$ .

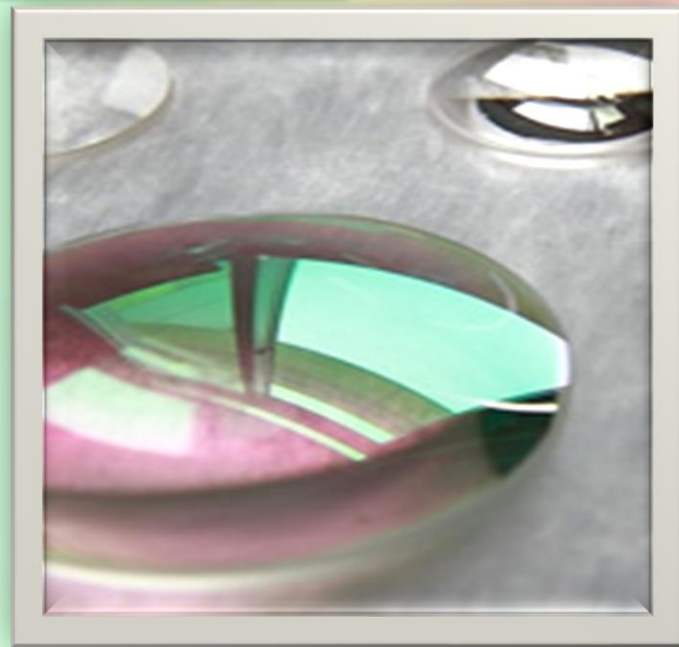
$$d_{\min} = \frac{\lambda}{4n_p}.$$

## 5.2.3. Застосування інтерференції

### Просвітлення оптики

Результат:

- Уникнення відблисків
- Зменшення втрат енергії

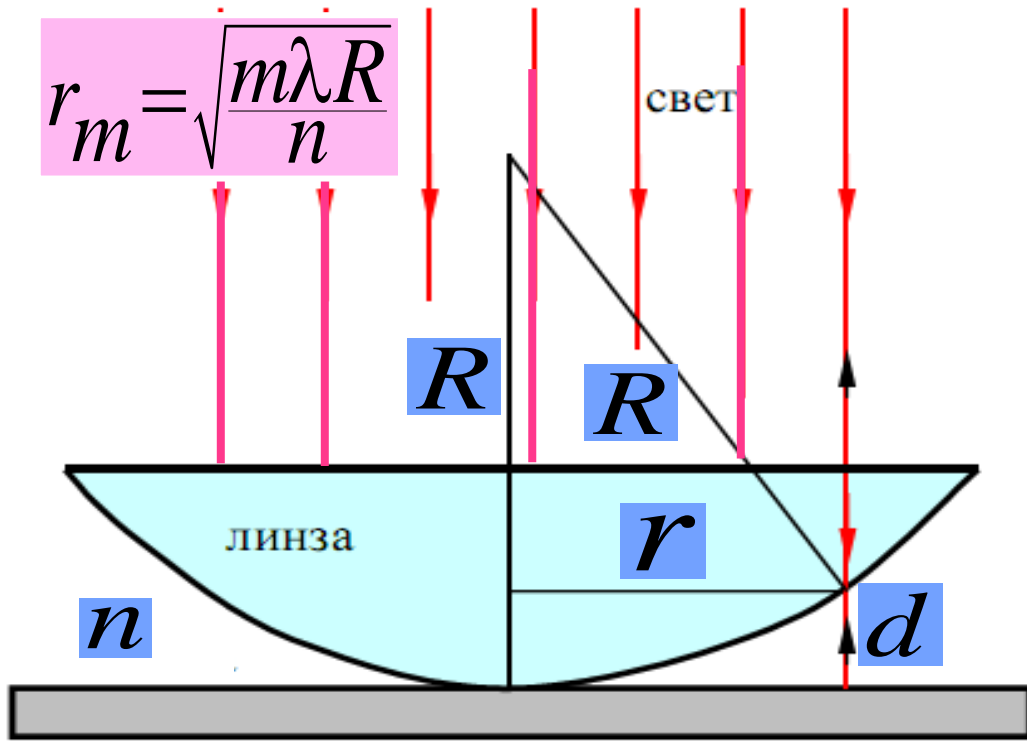


Для жовто-зелених  
(природніх) променів колір  
лінз буде червоно-  
фіолетовим.

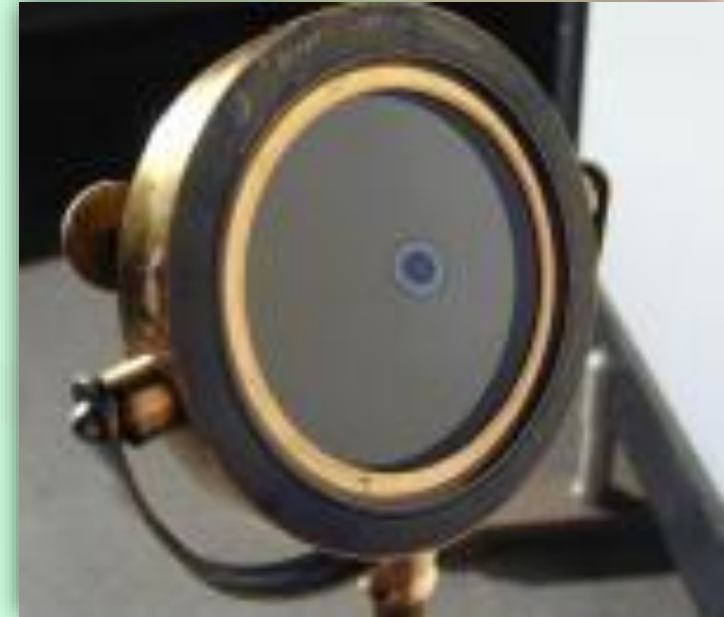
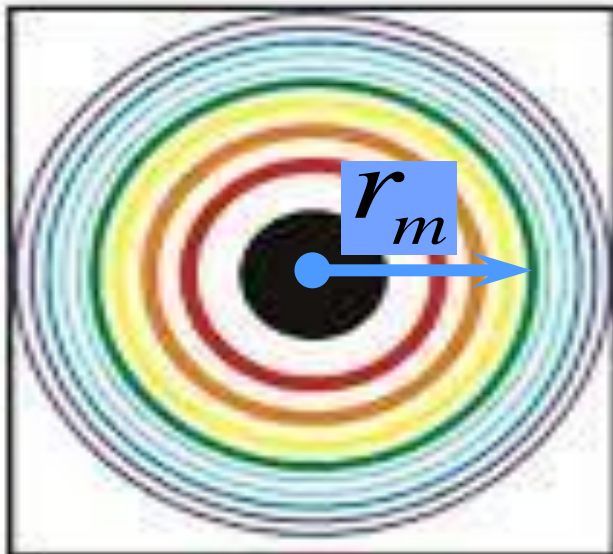




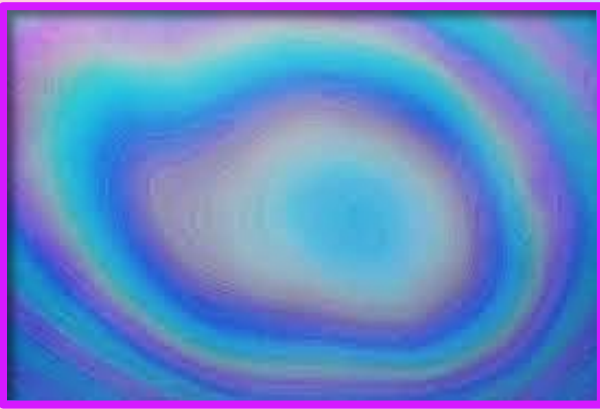
# Кільця Ньютона



$$r_m = \sqrt{\frac{m\lambda R}{n}}$$

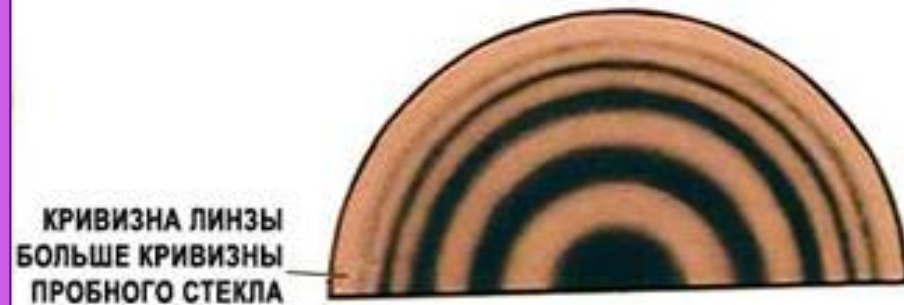
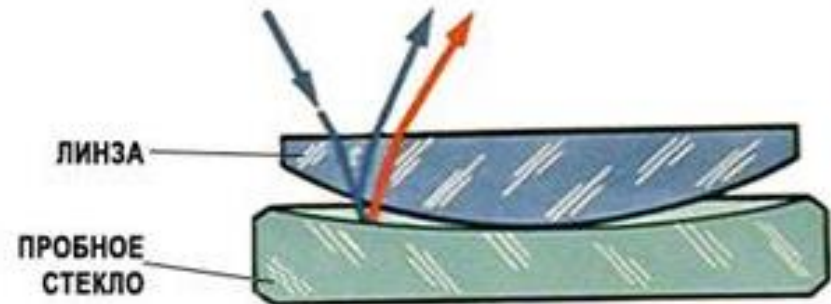


# Застосування інтерференції



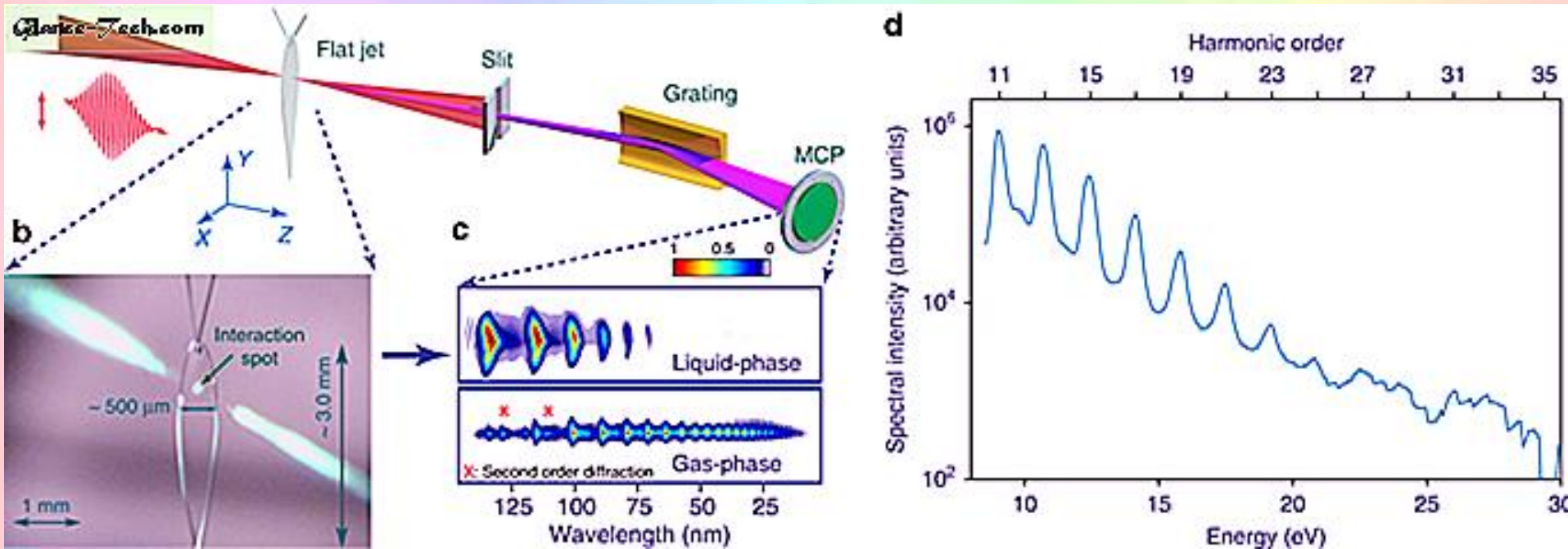
## Кільця Ньютона

1. Радіус кривизни лінзи
2. Довжину хвилі невідомого випромінювання
3. Показник заломлення невідомої речовини між склом та лінзою
4. Якість деталей



# Застосування інтерференції

## Створення інтерференційних спектрометрів високої роздільної здатності





# Застосування інтерференції

Створення діелектричних дзеркал для лазерів та лазерних гіроскопів



## 5.3. Дифракція

5.3.1. Принцип Гюйгенса - Френеля.

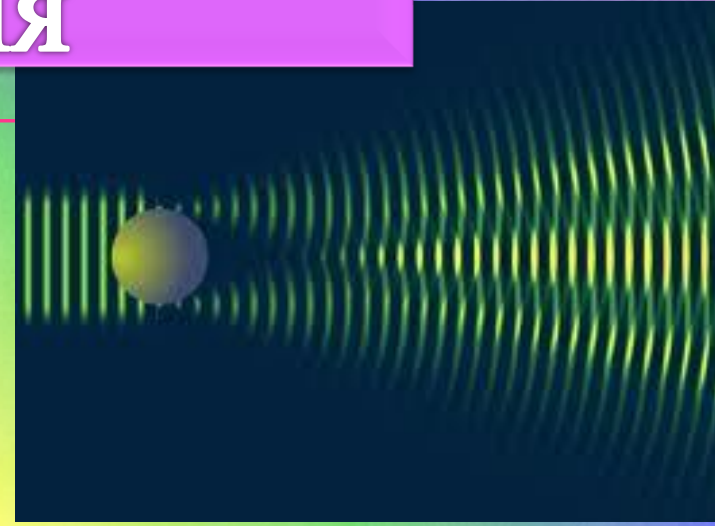
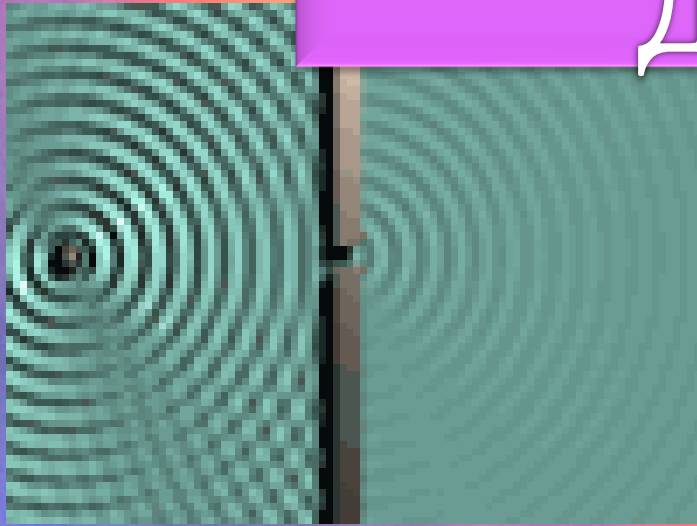
5.2.2. Метод зон Френеля. Дифракція від круглого отвору та непрозорого диску.

5.2.3. Дифракція Фраунгофера. Дифракційна ґратка.

5.2.4. Дифракція рентгенівських променів. Формула Вульфа – Бреггів. Рентгеноструктурний аналіз.



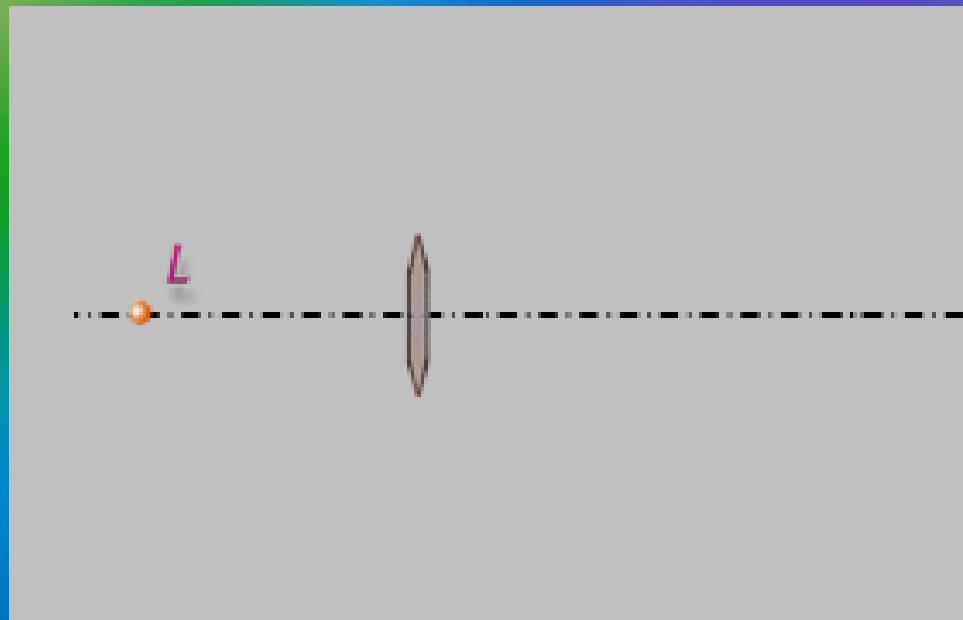
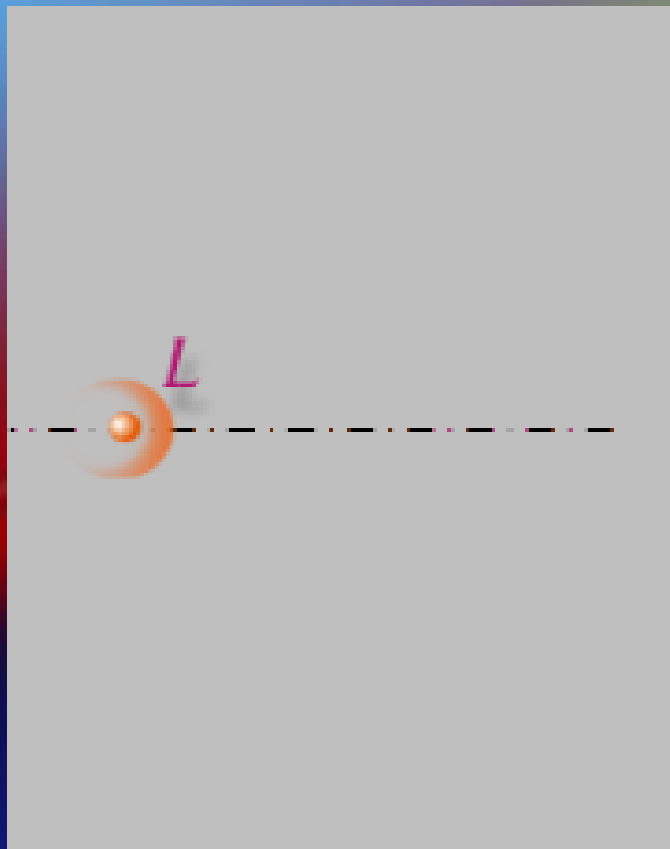
# Дифракція



У широкому розумінні *дифракція* є випадком *багатопроменевої інтерференції* вторинних хвиль, які виникають при огинанні світлом перешкод або при розсіюванні світла на *періодичних неоднорідностях* середовища.

У вузькому розумінні *явищем дифракції* називають *відхилення* від законів геометричної оптики *при огинанні* світлом перешкод, *порівняних за розміром з довжиною хвилі*.

## 5.3.1. Принцип Гюйгенса



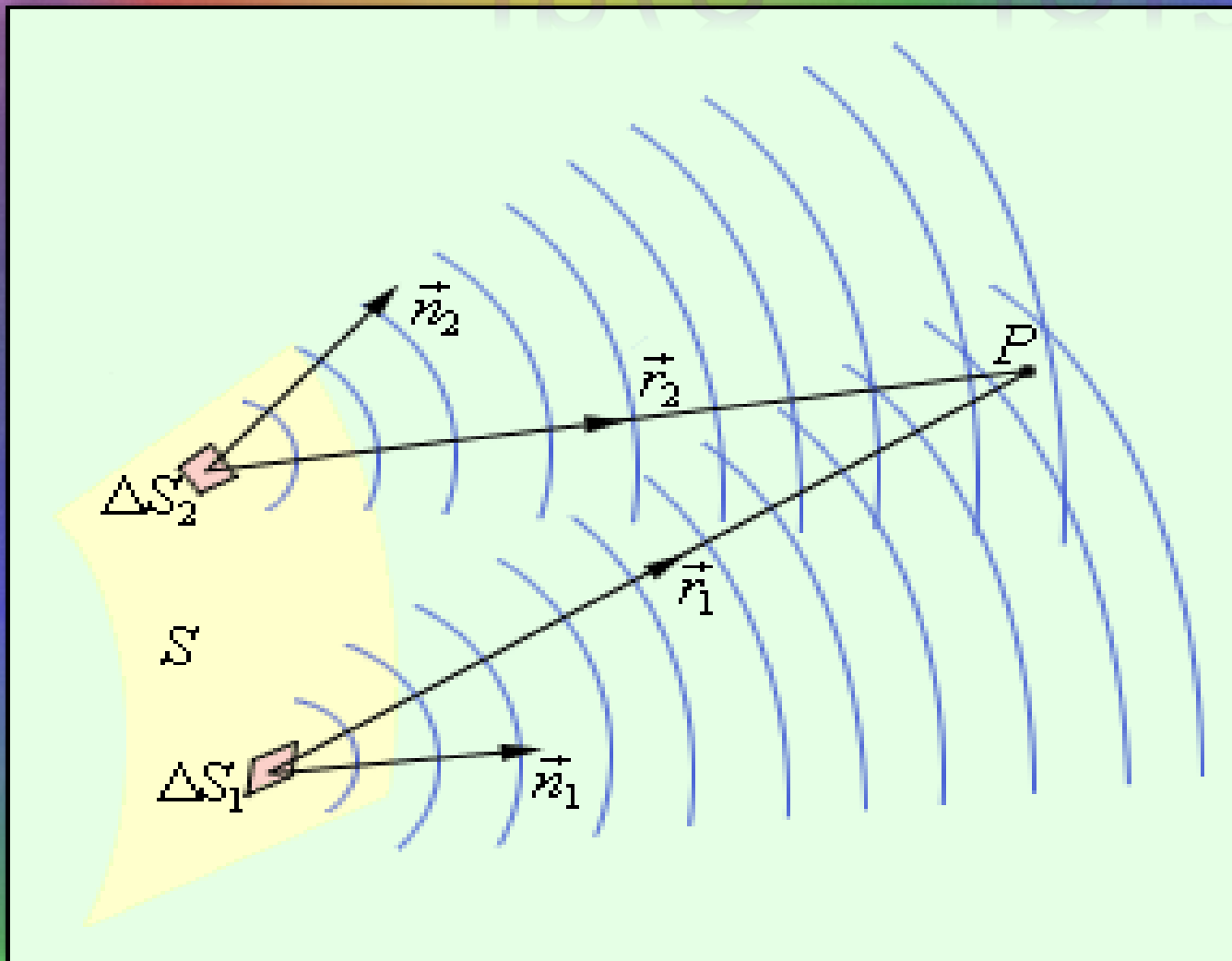
## 5.3.1. Принцип Гюйгенса-Френеля

- 1) сукупність точок простору, до яких в даний момент часу дійшло хвильове збурення, утворює *хвильовий фронт*;
- 2) кожна точка хвильового фронту стає **вторинним точковим джерелом сферичних хвиль**;
- 3) новий хвильовий фронт проводять як поверхню, що *огинає* всі *сферичні хвильові фронти вторинних точкових* джерел;
- 4) всі вторинні точкові джерела, що належать одному й тому самому хвильовому фронту, *когерентні* між собою та *синфазні*;
- 5) інтенсивність хвилі, яка приходить в довільну точку простору, розраховують як *інтерференцію* (суперпозицію) сферичних хвиль всіх вторинних точкових джерел даного хвильового фронту.

# Принцип Гюйгенса - Френеля

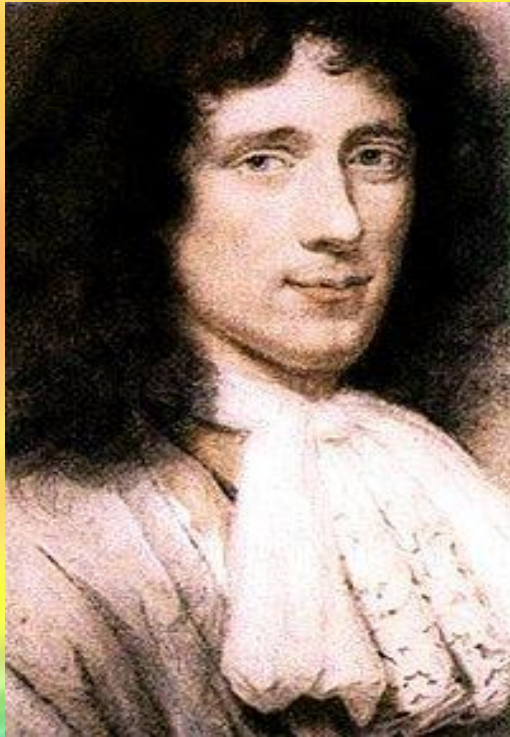
1678

1815





# Христіан Гюйгенс



**14.04.1629 –  
08.07.1695**

- Нідерландський вчений.
- Винайшов (1657) маятниковий годинник із пусковим механізмом
- Встановив закони коливань фізичного маятника.
- Створив (1678) та опублікував (1690) хвильову теорію світла
- Пояснив відбиття, заломлення та подвійне променезаломлення світла
- Удосконалив телескоп (до 92 кратного збільшення)
- Відкрив кільце Сатурну і супутник Сатурну Титан.
- Автор однієї з перших праць з теорії ймовірностей (1657)
- Запатентував кишеньковий годинник

# Огюстен Френель

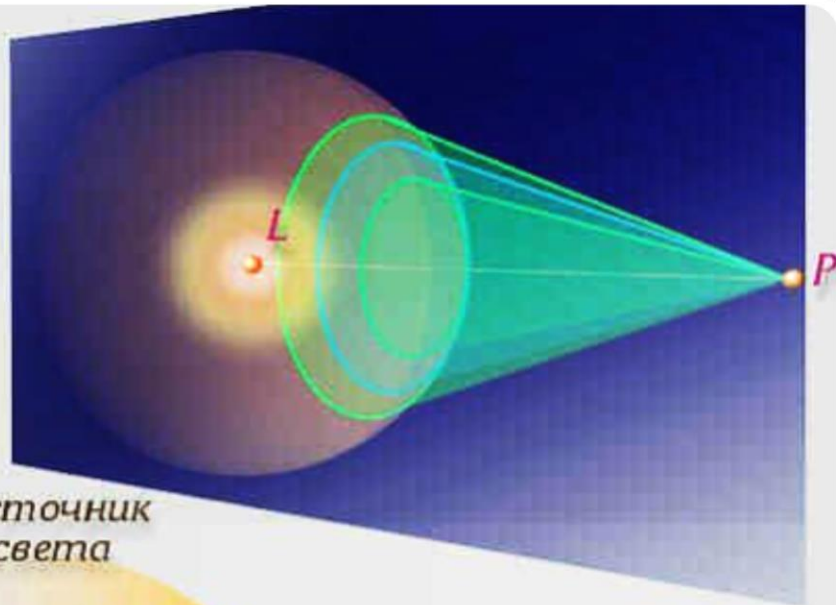


**10.05.1788 –  
14.06.1827**

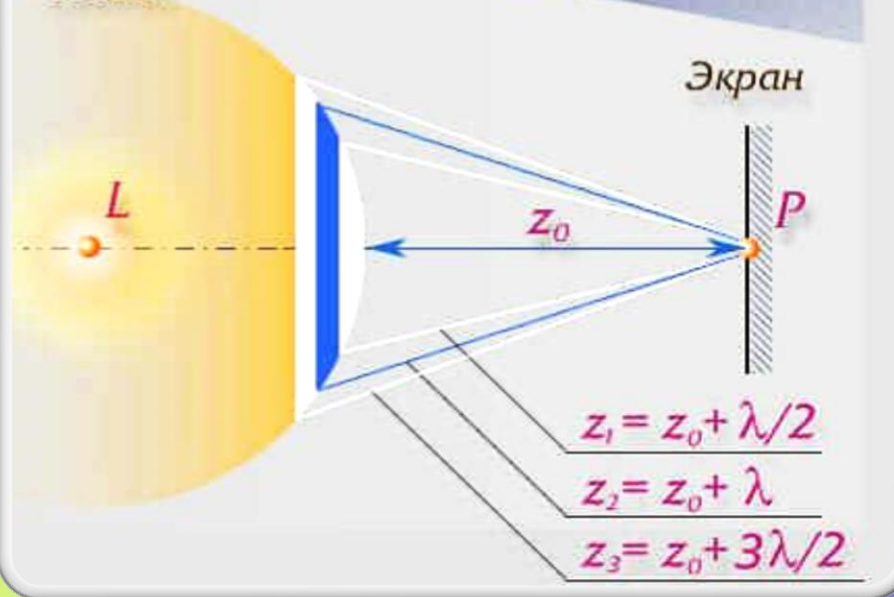
- ❑ Французський фізик
- ❑ 1816 ввів уявлення про **когерентність**, доповнивши принцип Гюйгенса
- ❑ 1818 розробив теорію дифракції світла (метод зон)
- ❑ 1821 довів поперечність світлових хвиль
- ❑ 1823 встановив закони поляризації світла при його відбитті та заломленні (формули Френеля)
- ❑ Винайшов ряд інтерференційних приладів



## 5.3.2. Дифракція Френеля



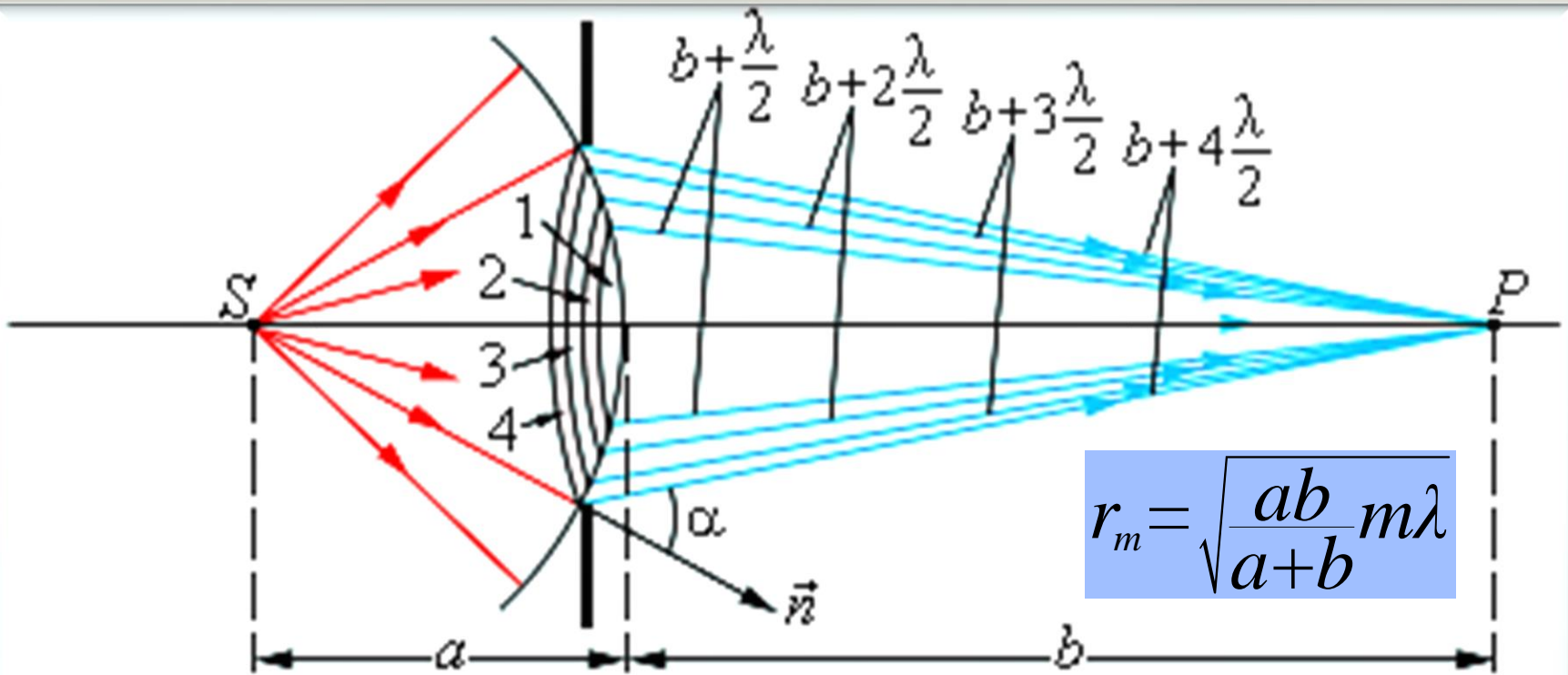
Источник  
света



Це дифракція в *збіжних променях*, які приходять від кожної точки хвильового фронту.

Розраховують таку дифракцію за допомогою методу *зон Френеля*.

# Дифракція сферичних хвиль на круглому отворі (метод зон Френеля)





# Дифракція сферичних хвиль на круглому отворі (метод зон Френеля)

Метод розрахунку інтенсивності світла в *дифракції Френеля* базується на розбиванні відкритої частини сферичного фронту на окремі зони.

Відстань до точки спостереження у сусідніх зон відрізняється (в довжинах хвиль) на  $\lambda/2$ .

Це означає, що амплітуди випромінювання у сусідніх зонах знаходяться в протифазі. Тому результуюча амплітуда в точці спостереження залежить від кількості відкритих зон:  $A_{\Sigma} = A_0 - A_1 + A_2 - A_3 \dots$

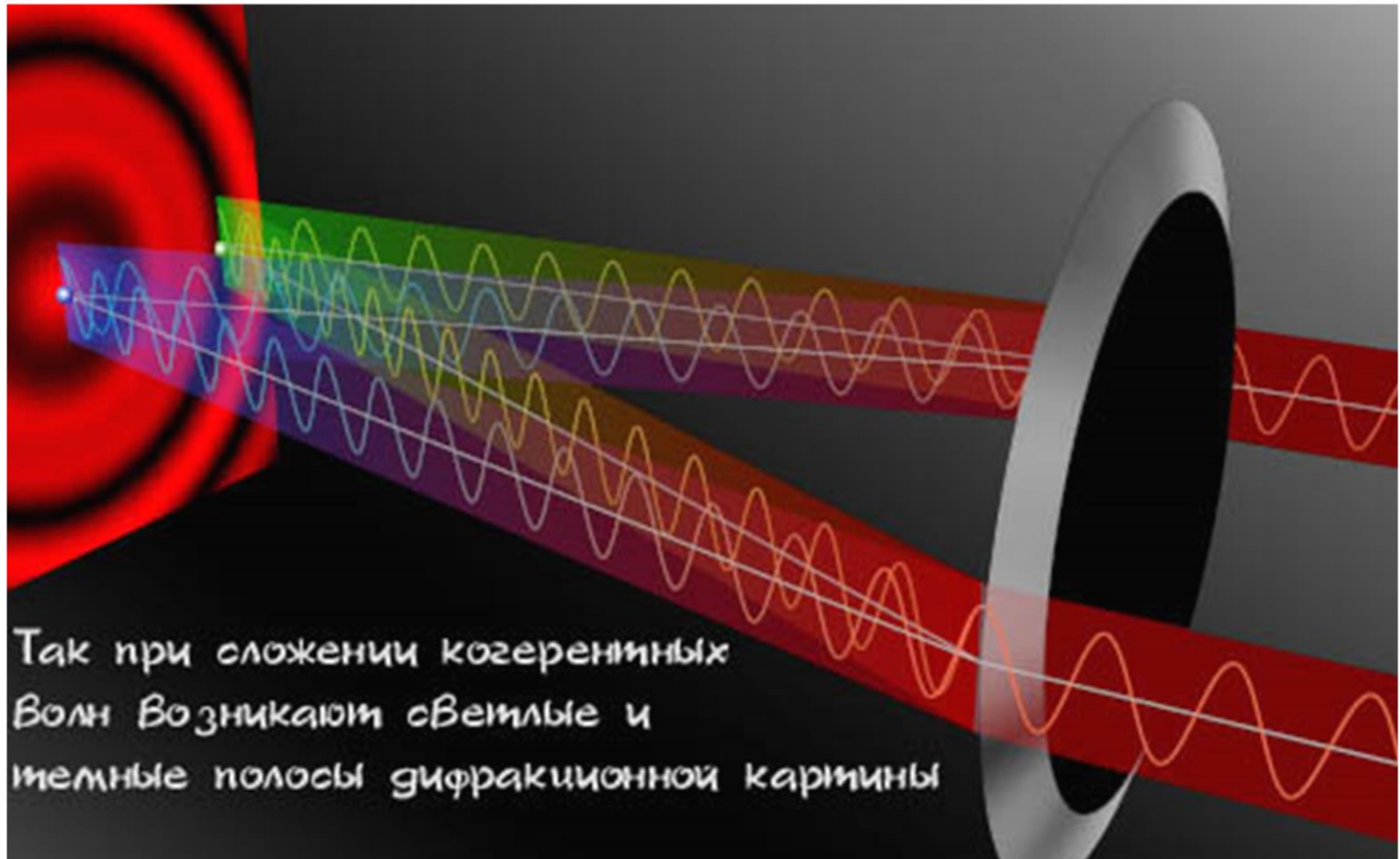
Отже:

- для парної кількості зон Френеля у точці Р буде спостерігатись темна пляма ( $A_{\Sigma} = 0$ ,  $I = 0$  інтерференційний мінімум)
- для парної кількості зон у точці Р буде спостерігатись світла пляма ( $A_{\Sigma} = A_0$ ,  $I = \max$  інтерференційний максимум)

Використання методу зон Френеля знаходить у *фазових лінзах* – лінзах з нерівномірною поверхнею, в яких, за рахунок товщини матеріалу, добиваються зсуву фази на  $\pi$  для всіх непарних зон. Тоді результуюча амплітуда  $A_{\Sigma} = A_0 + A_1 + A_2 + A_3 \dots$  тільки збільшується, а *інтенсивність в окремій точці може зрости в тисячі разів*.

Використовують в системах запису інформації.

# Дифракція сферичних хвиль на непрозорому диску



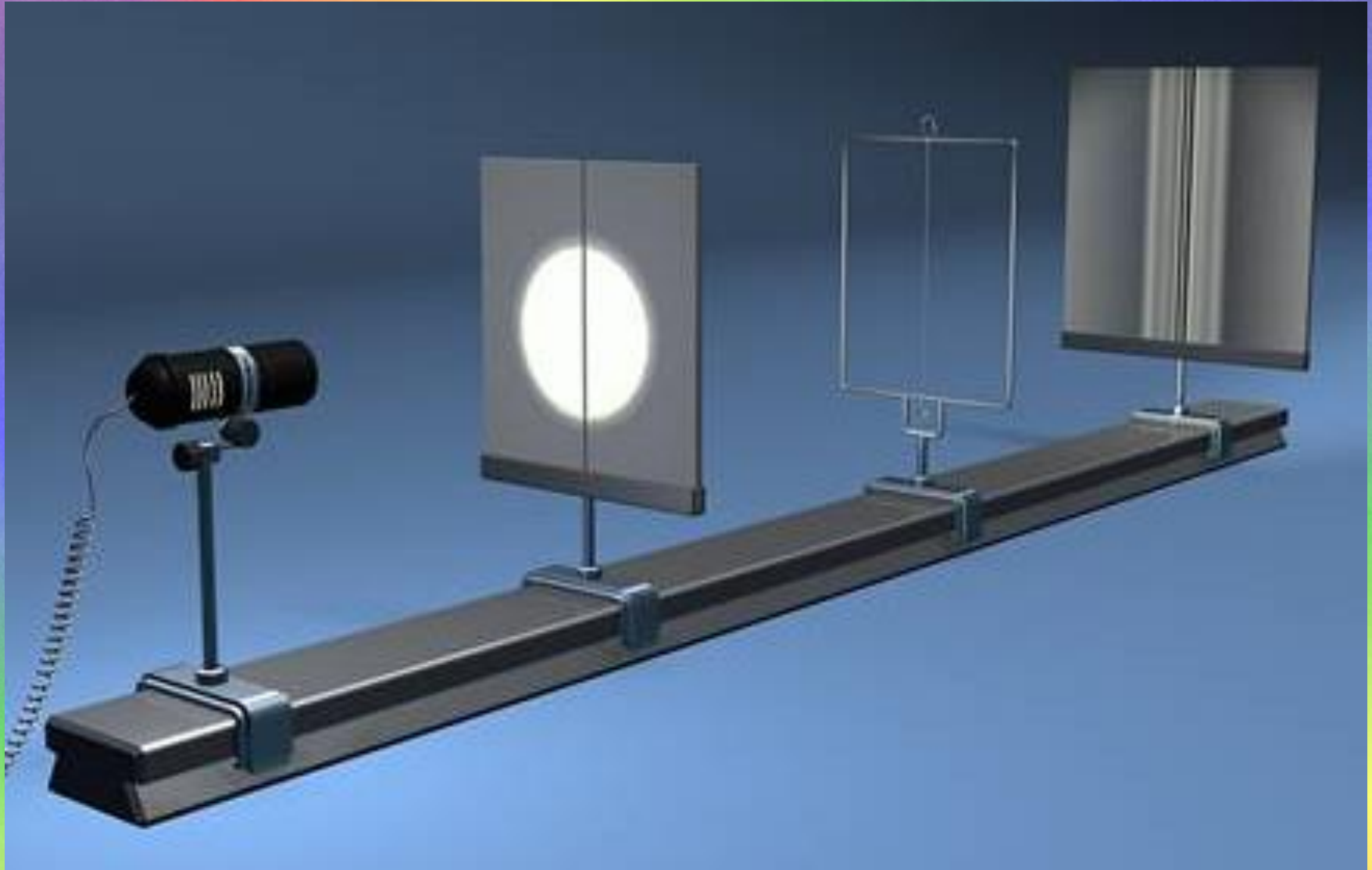
Дифракційна картина від  
круглого отвору



Дифракційна картина від  
непрозорого диску

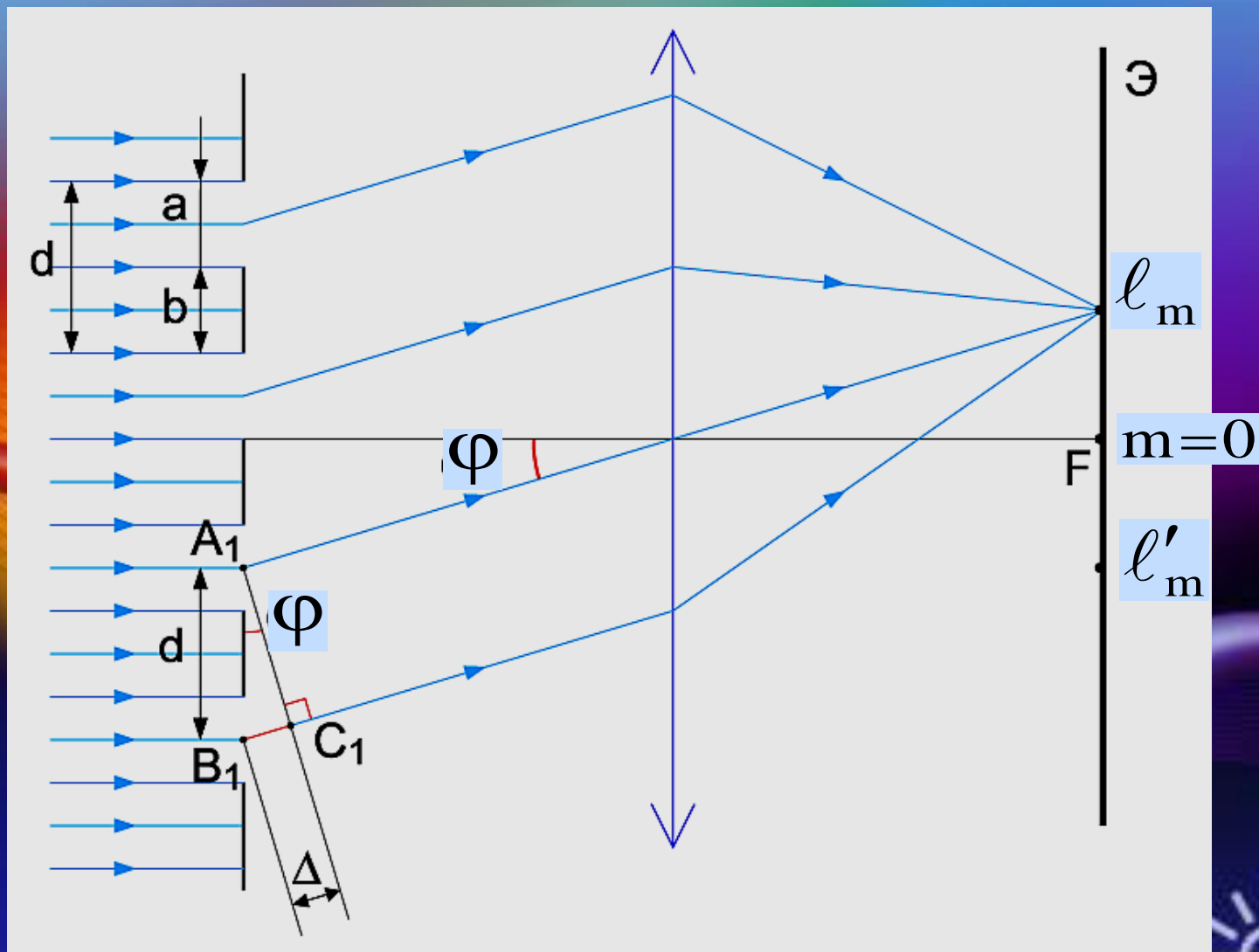


### 5.3.3. Дифракція Фраунгофера. Дифракційна ґратка





# Хід променів у дифракційній ґратці



# Формула дифракційної решітки

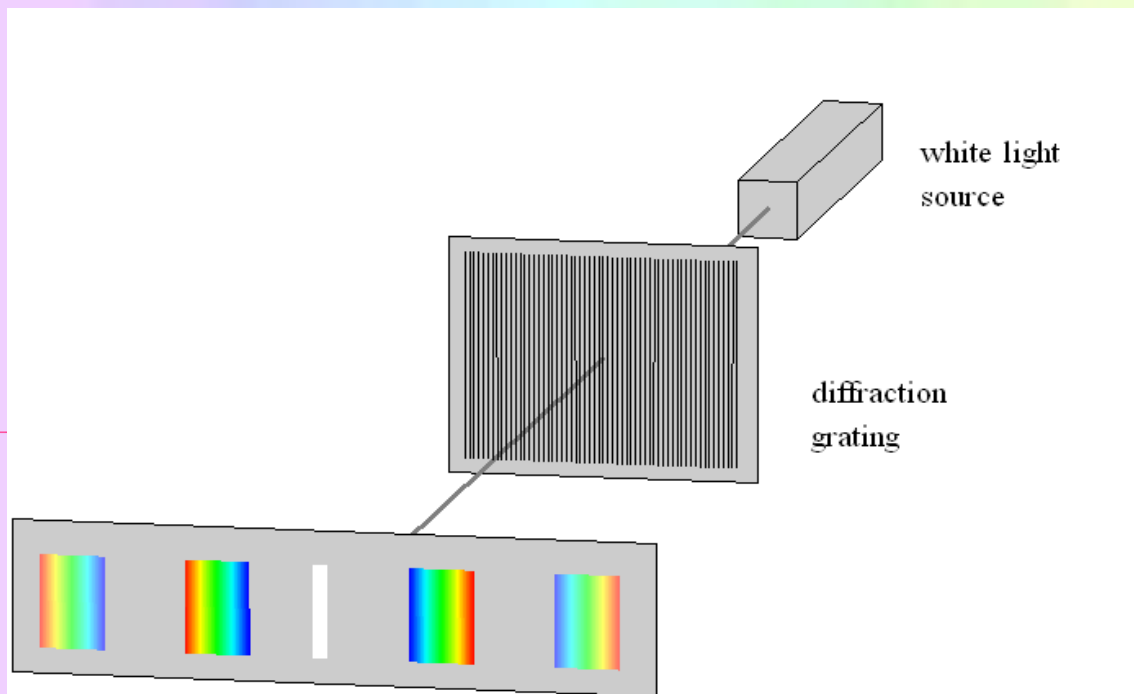
Є умовою для головних максимумів дифракційної решітки:

$$d \cdot \sin\varphi = \pm m\lambda$$

$d$  - стала решітки:

$$d = L/N$$

$m = 0; 1; 2; \dots$  визначає порядковий номер максимуму.



# Дифракційна ґратка як спектральний прилад

Дифракція у білому світлі

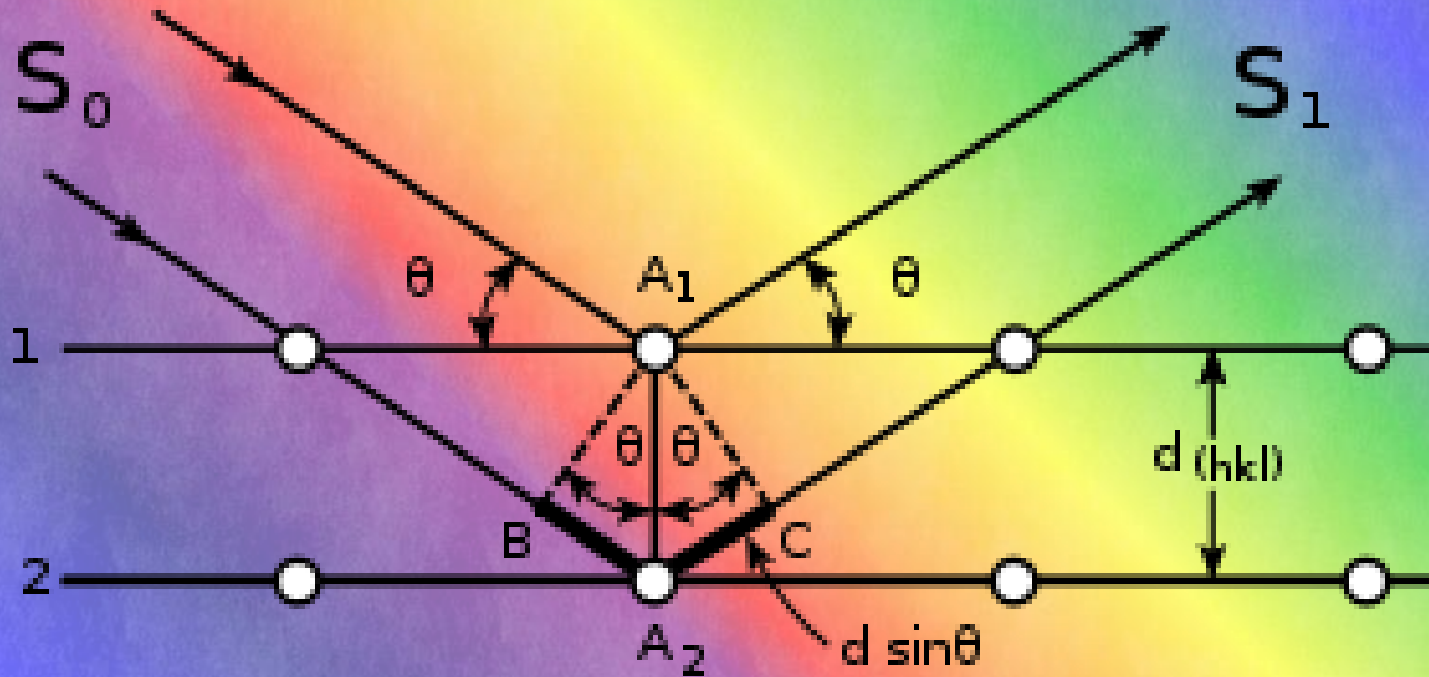


Дифракція у червоному світлі



### 5.3.4. Дифракція рентгенівських променів. Формула Вульфа – Бреггів

1913



$$2d\sin\theta = m\lambda$$

$\theta$  – кут падіння,

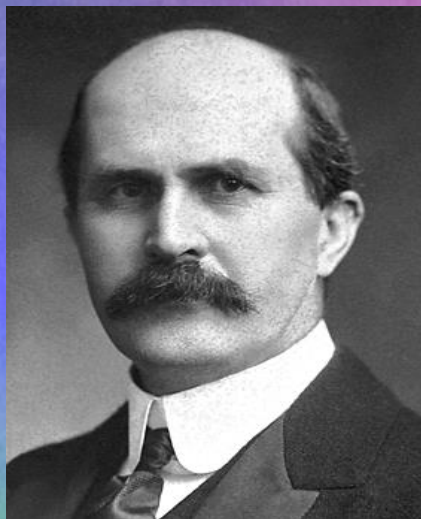
$\lambda$  – довжина хвилі,

$m$  – ціле число, яке називається порядком дифракційного максимуму.

Є основою рентгеноструктурного аналізу матеріалів

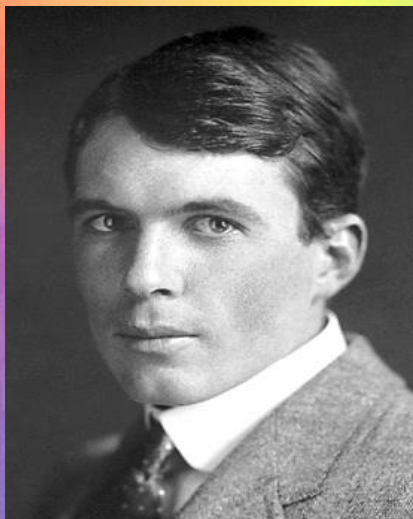


**Брегг  
Уільям Генри**



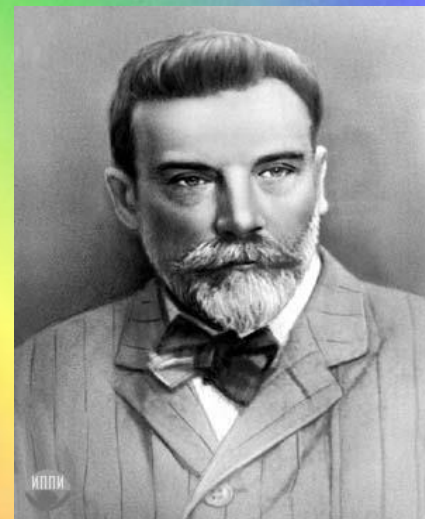
**02.07.1862 –  
12.03.1942**

**Брегг  
Уільям Лоренс**



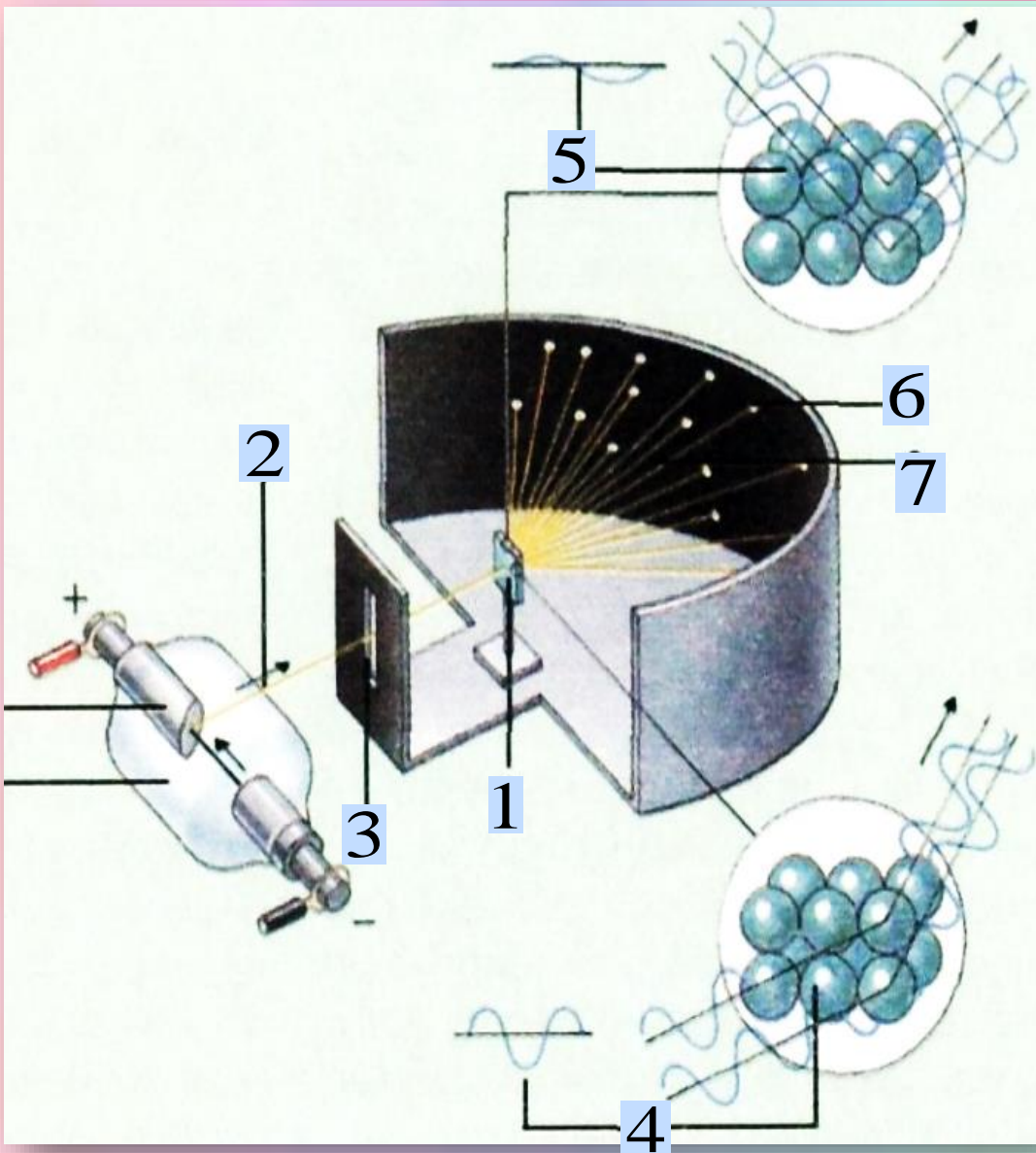
**31.03.1890 –  
01.07.1971**

**Вульф  
Юрій Віктрович**



**22.06.1863 –  
21.12.1925**

# Рентгеноструктурний аналіз



- ✓ Кристалічний зразок (1);
- ✓ Рентгенівські промені (2);
- ✓ Щілина (3) фокусує промені на кристалі;
- ✓ Підсилення променів (4);
- ✓ Послаблення променів (5);
- ✓ Світлі плями (6, 7) на фотоплівці.



## 5.4. Поляризація

5.4.1. Природне та поляризоване світло.

5.4.2. Способи утворення поляризованого світла.

5.4.3. Властивості поляризованого світла. Закон Малюса.

5.2.4. Штучна анізотропія. Комірка Керра.

# Поляризація світла –

ХАРАКТЕРИЗУЄ СТУПІНЬ ПРОСТОРОВОЇ

ВПОРЯДКОВАНOSTІ ПЛОЩИН ПОЛЯРИЗАЦІЇ СВІТЛА В  
СВІТЛОВОМУ ПОТОЦІ,

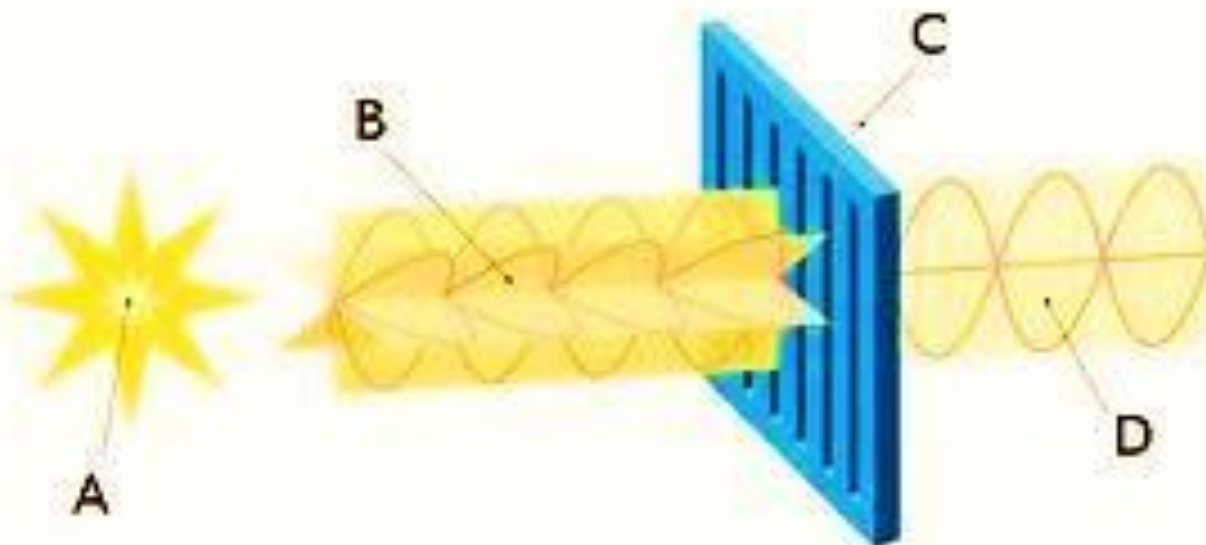
ТОБТО ПЛОЩИН, В ЯКИХ КОЛИВАЄТЬСЯ ВЕКТОР  $E$

НАПРУЖЕНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ.



## 5.4.1. Природне та поляризоване світло

**неполяризоване світло:**  
всі площини поляризації рівноймовірні  
(природне світло)

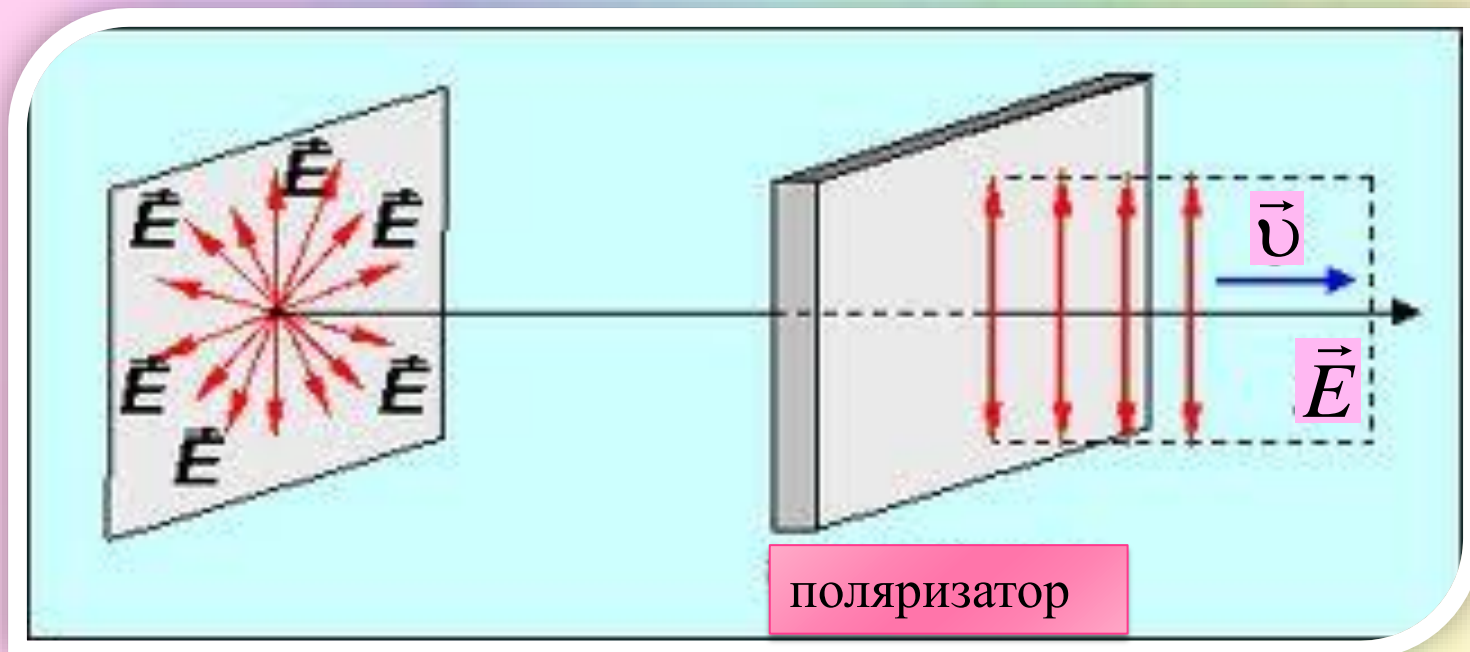


## 5.4.1. Природне та поляризоване світло

### плоскополяризоване світло:

світло, у якого вектор напруженості  $E$  електричної складової хвилі коливається в межах однієї площини.

Цю площину, в якій знаходиться вектор  $E$  та вектор швидкості  $v$  розповсюдження хвилі, називають **площиною поляризації**.



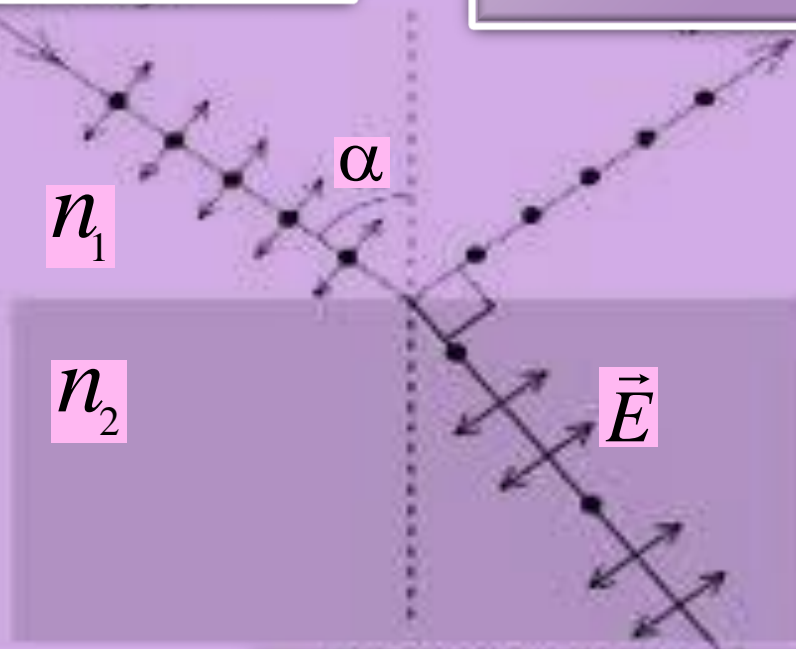
## 5.4.2. Способи утворення поляризованого світла

1913

### Закон Брюстера

Природне світло

Повністю поляризоване  
світло



$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{Br}} = n_{21}$$

Частково поляризоване світло

# Закон Брюстера

1. Спостерігається на границі розподілу двох середовищ при відбиванні та заломленні світла

2. Відбитий промінь стає повністю плоскополяризованим, заломлений частково поляризований, а кут між ними становить  $90^\circ$

2. При деякому куті падіння відбитий промінь стає повністю плоскополяризованим, заломлений частково поляризований, а кут між ними становить  $90^\circ$

Тоді:

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{Br}} = n_{21}$$

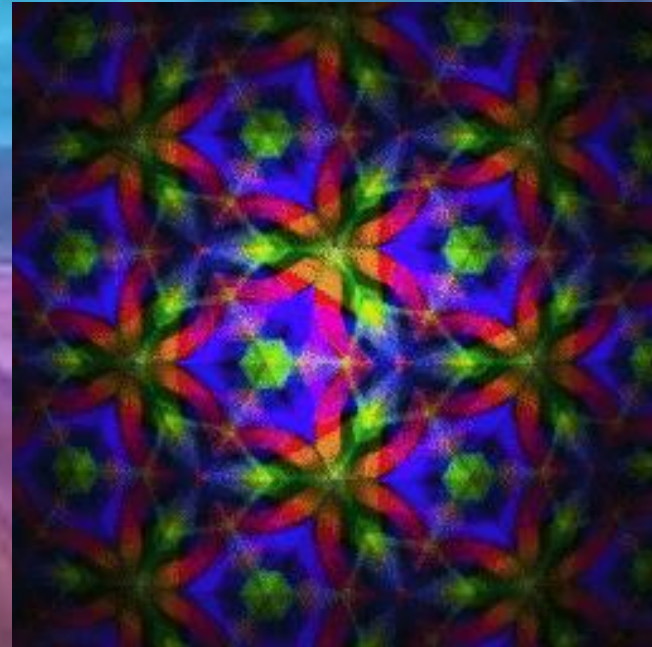


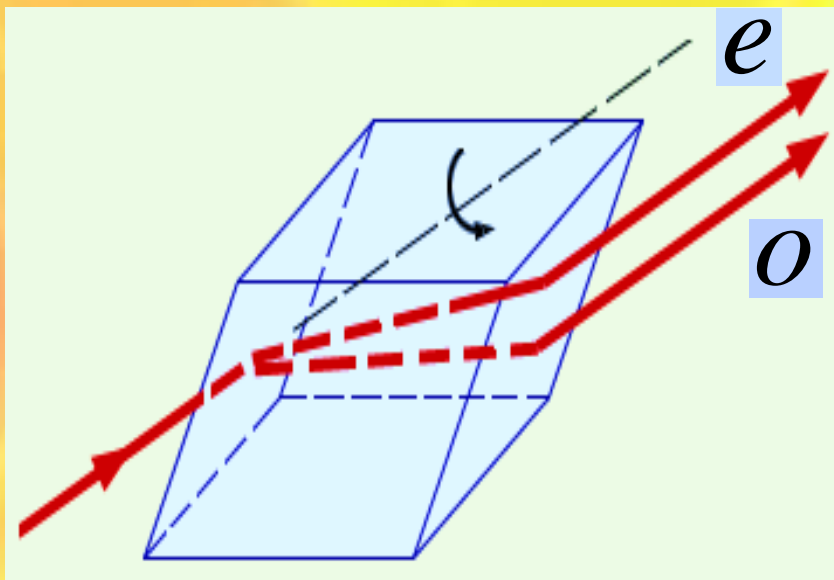


# Девід Брюстер

- Шотландський фізик
- Відкрив закон, що носить його ім'я
- У 1816 винайшов калейдоскоп
- На його честь названо мінерал - бріюстеріт

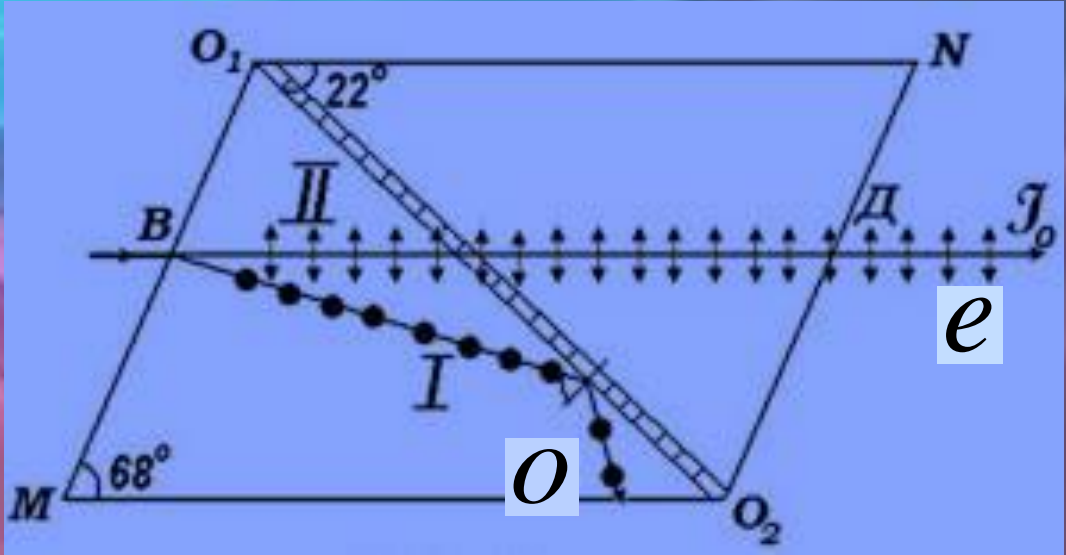
**11.12.1781 –  
10.02.1868**





Подвійне  
променезаломлення в  
кристалі ісландського  
шпату (кінець XVIII  
сторіччя)

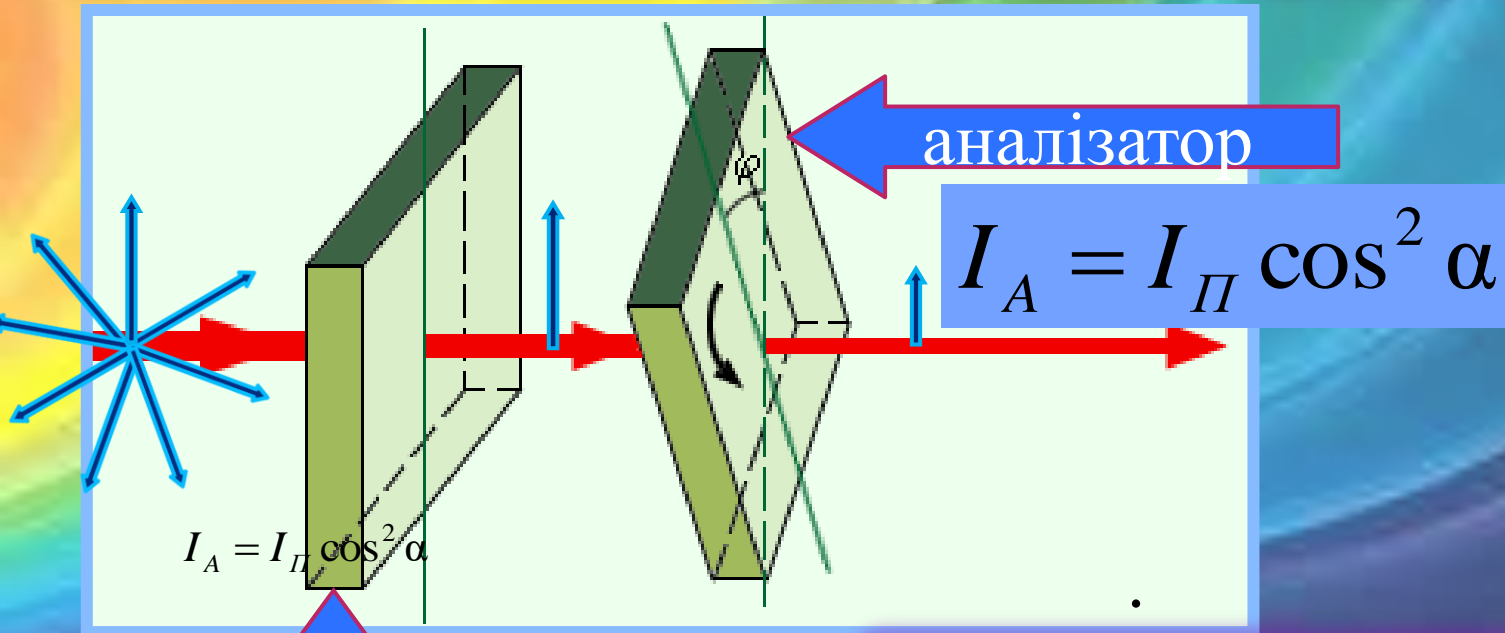
Призма Ніколя



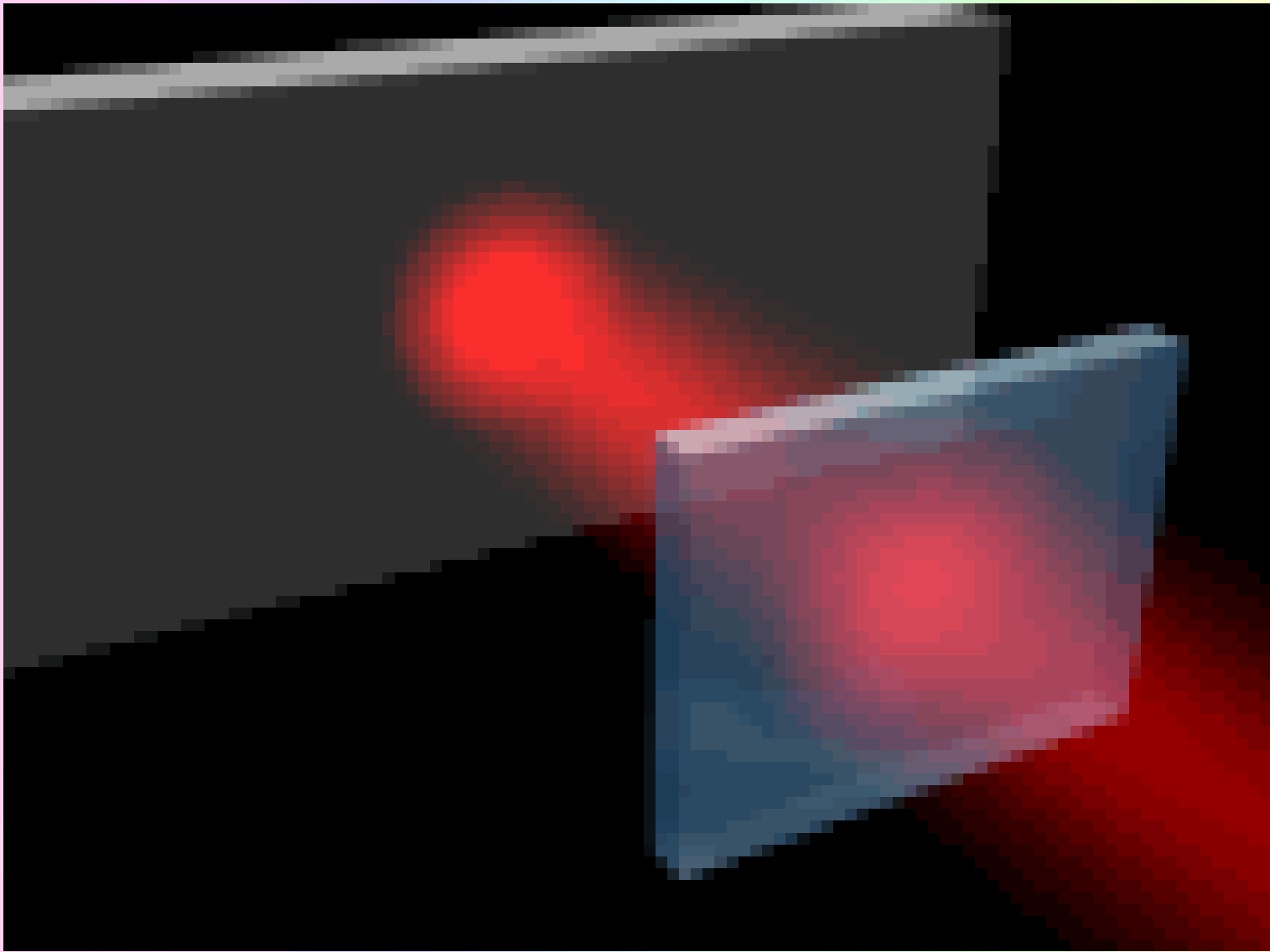
## 5.4.3. Властивості поляризованого світла.

### Закон Малюса

1810



Встановлює зв'язок між інтенсивністю  $I_A$  плоскополяризованого світла, яке проходить через **аналізатор**, та інтенсивністю  $I_{\Pi}$  світла, що пройшло **поляризатор**, в залежності від кута  $\alpha$  між площинами поляризації поляризатора та аналізатора





# Застосування поляризації світла



## 5.5. Властивості світла та їхнє використання

5.5.1. Поглинання світлових хвиль.  
Закон Бугера – Ламберта – Бера.

5.5.2. Розсіяння світлових хвиль.  
Закон Релея.

5.4.3. Дисперсія світлових хвиль.

## 5.5.1. Поглинання світла

Закон Бугера (1729) – Ламберта (1760) – Бера (1852)

### ЗАКОН БУГЕРА-ЛАМБЕРТА-БЕРА

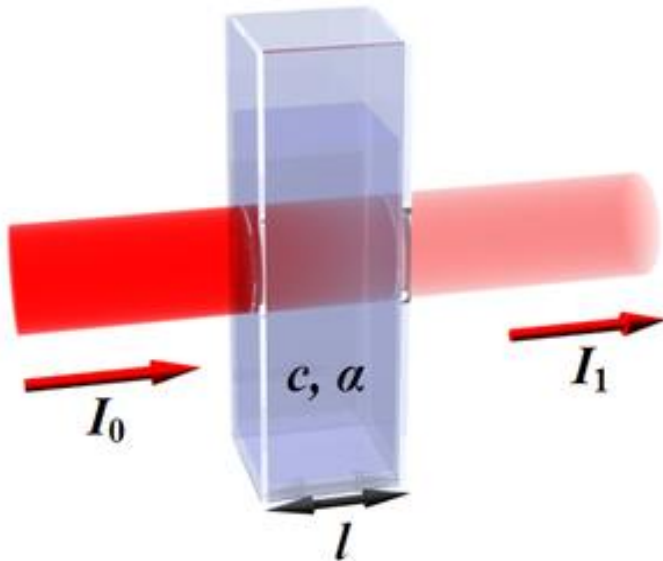
Інтенсивність входящего пучка  $I_0$ , следовательно, интенсивность потока  $I$  на расстоянии  $d$

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = \int_0^d k_\lambda \cdot dx$$

$$I = I_0 \cdot e^{-k_\lambda \cdot d}$$

$k_\lambda$  - показатель поглощения, зависящий от свойств вещества и длины волны  $\lambda$  (частоты падающего света).

Інтенсивність світла зменшується в геометричній прогресії, якщо товщина слоя збільшується в арифметичній прогресії.  $k_\lambda$  - величина, обернена відстані, на якій інтенсивність світла зменшується в результаті поглинання середою в  $e$  раз.



## Застосування Закону Бутера – Ламберта – Бера

- Метеорологія та кліматологія
- Астрономія (альbedo)
- Медицина
- Аналітична хімія
- Біологія
- Оптика





## 5.5.2. Розсіяння світла

**Розсіяння світла або світлорозсіяння** —  
недзеркальне відображення світла, як, наприклад, матовими  
поверхнями

Релея - пружне розсіяння на малих частинках, розміром набагато менше за довжину хвилі

Тіндаля - пружне розсіювання світла неоднорідними середовищами

Мі - пружне розсіювання на великих частинках

Мандельштама - Бріллюена - непружне розсіяння на коливаннях кристалічної ґратки.

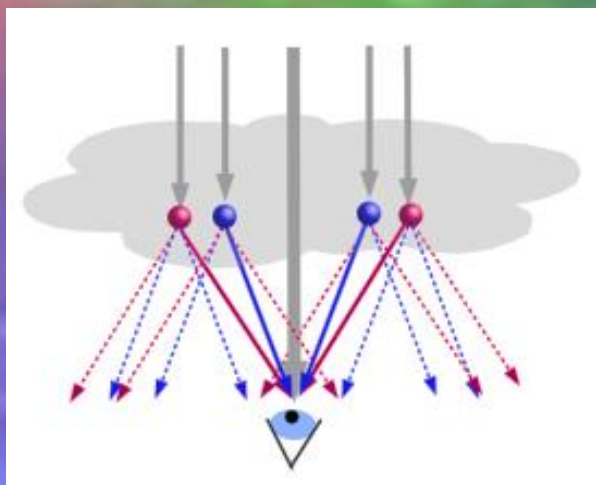
Розсіювання Рамана - непружне розсіяння на атомних коливаннях в молекулі

# Закон Релея (1871)

- когерентне розсіювання світла без зміни довжини хвилі (зване також пружним розсіюванням) на частинках, неоднородностях або інших об'єктах, коли частота падаючого світла істотно менше власної частоти об'єкта або системи, на яку світло падає.

Еквівалентна формулювання:

розсіювання світла на об'єктах, розміри яких менше його довжини хвилі.



Голубий колір неба

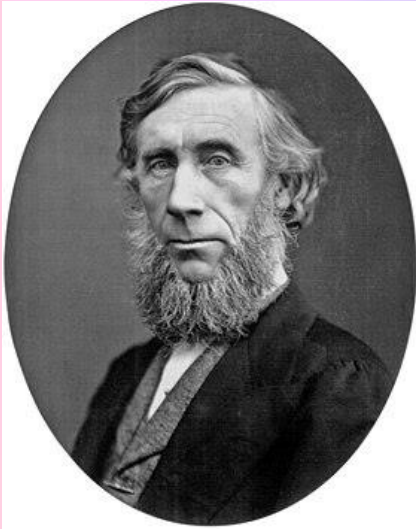
Релеєвське розсіювання в опалесцентному склі: воно виглядає синім з боку, але помаранчевим на просвіт.



Голубий колір  
молока

# ✘ Колір неба

Повітря, що оточує Землю, — це суміш газів: азоту,  
В атмосфері присутні ще водяна пара і кри



Джон Тіндаль

1820 - 1893

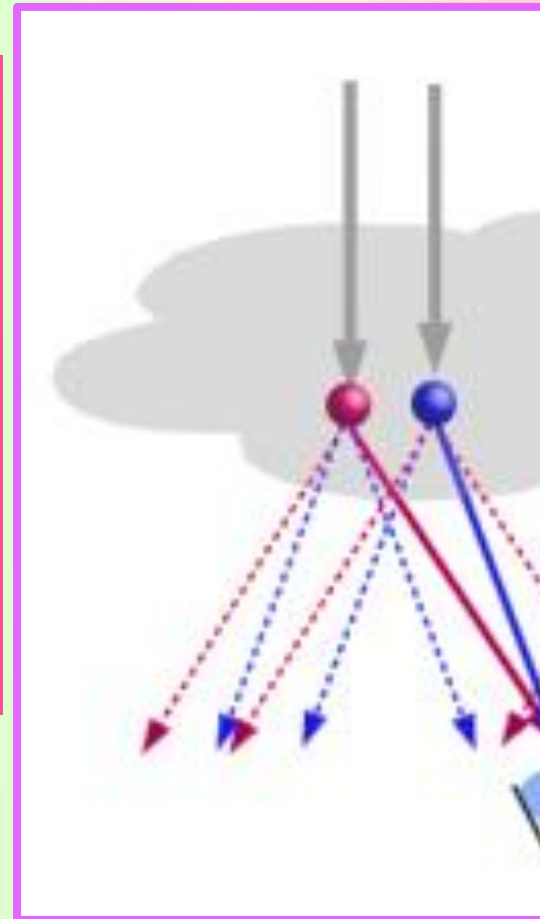
У 1869 році англієць Джон Тіндаль припустив, що пил та інші ч

Синє світло розсіюється найменше і проходить шари таких част  
Землі.

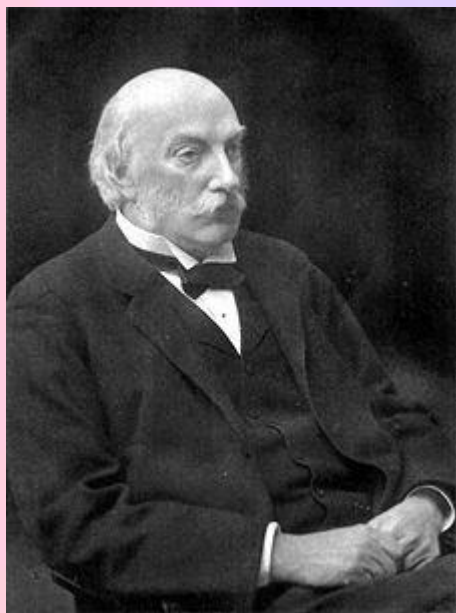
У своїй лабораторії він створив модель смогу і висвітлив її яскравим білим променем.

Смог перетворився в глибокий синій колір.

Тіндаль вирішив, що якби повітря було абсолютно чисте, то ніщо б не розсіювало світло, і ми могли б милуватися яскравим білим небом.



# × Колір неба



Джон Релей

1842 - 1919

Лорд Релей теж підтримував ідею Тіндалля, але недовго. У 1899 році він опублікував своє пояснення: саме **повітря**, а не пил або дим, забарвлює небо в блакитний колір.

## Пояснення чому небо блакитне

- Більша частина сонячних променів поглинається газовими молекулами.
- При поглинанні фотонів молекули збуджуються, тобто заряджаються енергією, а потім випускають її у вигляді знову-таки фотонів.
- Ці вторинні фотони мають різну довжину хвилі і можуть бути будь-якого кольору — від червоного до фіолетового.
- Розлітаються вони у всіх напрямках: і до Землі, і до Сонця, і в сторони.
- Лорд Релей припустив, що **колір вихідного променя** залежить від переваги в промені квантів того чи іншого кольору.
- При зіткненні молекули газу з фотонами сонячних променів на **один вторинний квант червоного кольору** припадає **вісім квантів синього**.



# Приклади розсіяння світла

Гало



Ефект Тіндаля

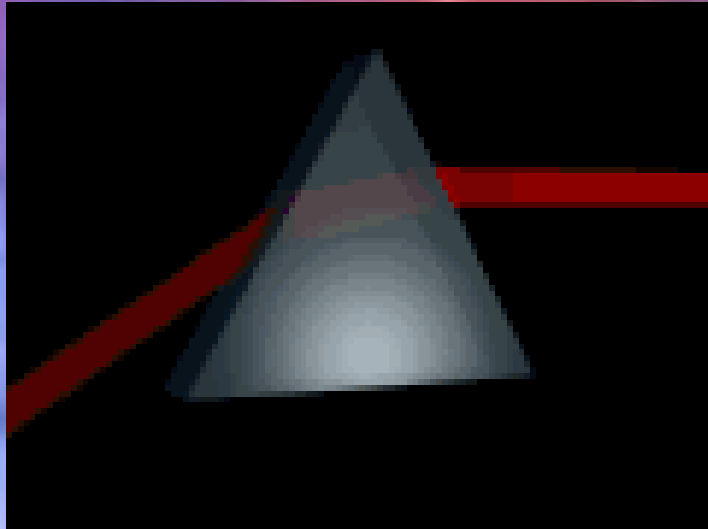
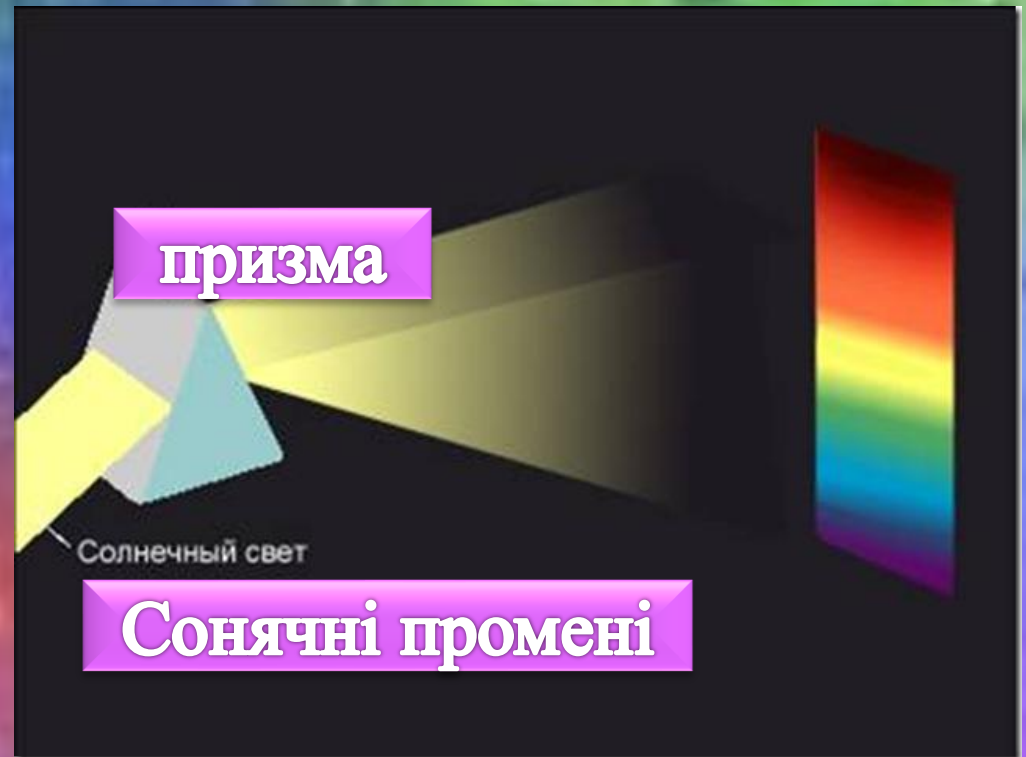
## 5.5.3. Дисперсія світла

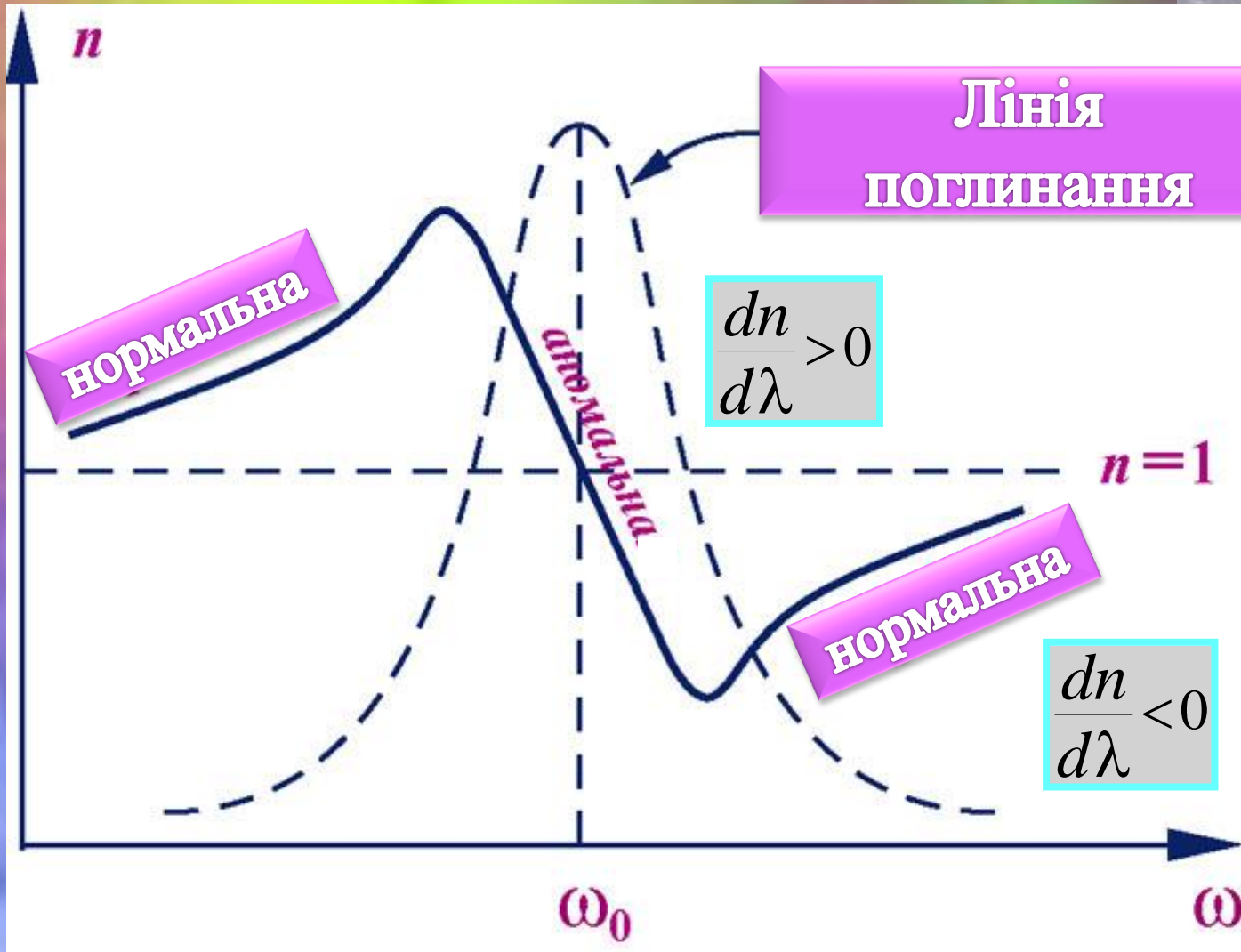
1672

**Дисперсія світла** — залежність показника заломлення (або діелектричної проникності) середовища від частоти світла.

Внаслідок зміни показника заломлення змінюється також довжина хвилі.

$$n = \sqrt{\epsilon\mu} = \frac{c}{v}$$





## 5.6. Енергетичні характеристики світла

**Потік випромінювання** – фізична величина, що дорівнює енергії випромінювання за одиницю часу:

$$\Phi_e = \frac{dW_e}{dt}, [\Phi_e] = \text{Вт}$$

**Світловий потік** – фізична величина, що визначає потужність оптичного випромінювання за світловими відчуттями, що викликаються:

$$\Phi = \frac{dW}{dt}, [\Phi] = \text{Лм (люмен)}$$

**Енергетична сила світла** – фізична величина, яка чисельно дорівнює потоку, що випромінюється точковим джерелом світла через одиничний тілесний кут:

$$I = \frac{d\Phi}{dt}, [I] = \text{Кд (кандела)}$$

**Світловий потік** – фізична величина, що визначає потужність оптичного випромінювання за світловими відчуттями, що викликаються:

$$I_e = \frac{d\Phi}{dt}, [I_e] = \frac{\text{Вт}}{\text{ср}}$$



## 5.6. Енергетичні характеристики світла

**Енергетична світність** – фізична величина чисельно рівна відношенню потоку, що випромінюється, до площі перерізу через який цей потік випромінюється:

$$R_e = \frac{d\Phi_e}{dS}, [R_e] = \frac{Вт}{м^2}$$

**Світність** – фізична величина чисельно рівна відношенню світлового потоку, що випромінюється до площі перерізу через який цей потік випромінюється:

$$R = \frac{d\Phi}{dS}, [R] = \frac{Лм}{м^2}$$

**Енергетична яскравість** – фізична величина чисельно рівна відношенню енергетичної сили світла елемента поверхні, що випромінює, до площі проекції цього елемента на площу, перпендикулярну напрямку спостереження:

$$B_e = \frac{dI_e}{dS}, [B_e] = \frac{Кд}{ср \cdot м^2}$$

**Яскравість** – фізична величина чисельно рівна відношенню сили світла елемента поверхні, що випромінює, до площі проекції цього елемента на площу, перпендикулярну напрямку спостереження:

$$B = \frac{dI}{dS}, [B] = \frac{Кд}{м^2}$$

**Енергетична освітленість** – фізична величина чисельно рівна потоку випромінювання, що попадає на одиничну площу освітленої поверхні:

$$F_e = \frac{d\Phi_e}{dS}, [F_e] = \frac{Вт}{м^2}$$

**Освітленість** – фізична величина чисельно рівна світловому потоку випромінювання, що попадає на одиничну площу освітленої поверхні:

$$E = \frac{d\Phi}{dS}, [E] = \frac{Лм}{м^2}$$