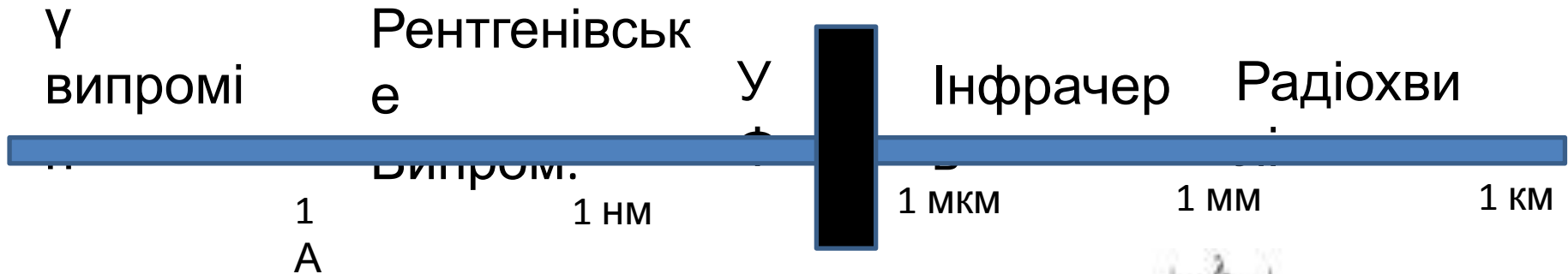
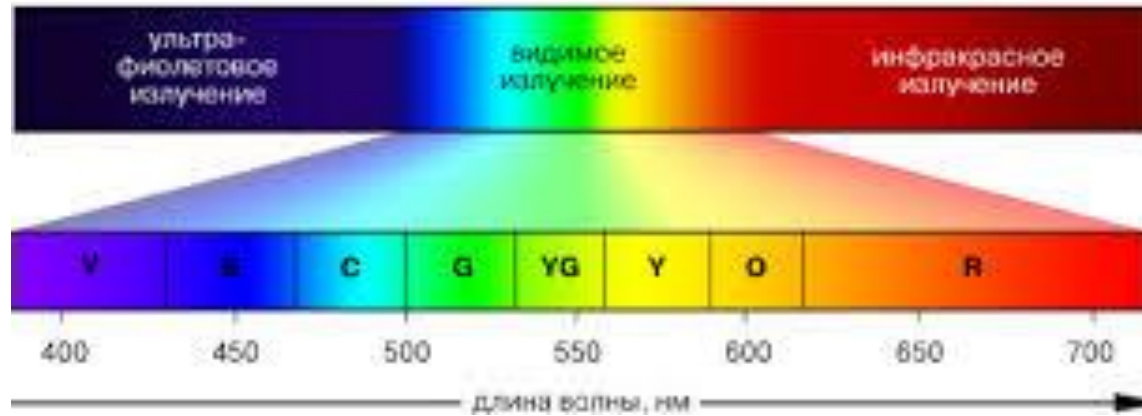


Оптика і квантова фізика

Світло



Видиме світло:
 $\lambda=400-760$ нм
 $\nu=0.39-0.75 \cdot 10^{15}$
Гц



Корпускулярно-хвильовий дуалізм

Світлова хвиля

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu} \quad \text{Довжина хвилі у вакуумі}$$

$$n = \frac{c}{V}$$

Показник (абсолютний) заломлення світла

(характеризує оптичну густину середовища)

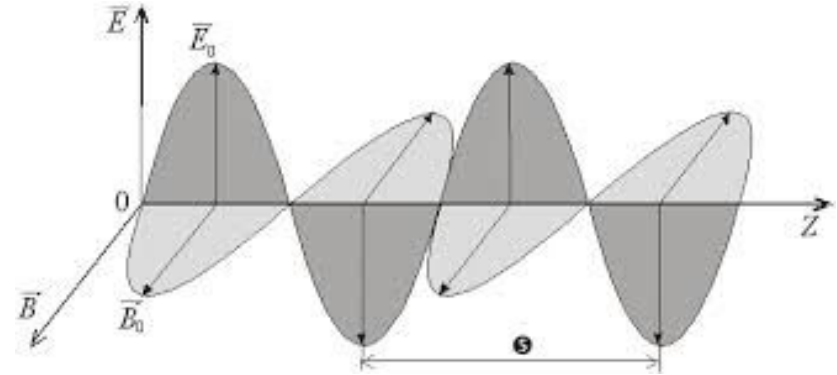
При $n_1 > n_2$
 Оптично гущіше – оптично рідше середовища

Довжина хвилі в середовищі змінюється

відносно довжини хвилі у вакуумі

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{c}{\nu n} = \frac{\lambda_0}{n}$$

Випромінювання тіла, що світиться - сумарне випромінювання великої кількості окремих атомів (10^{-8} с кожен)



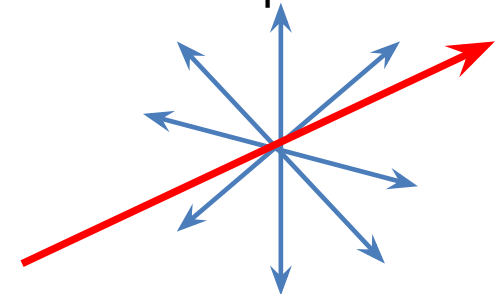
$$n = \sqrt{\epsilon\mu}$$

$n=1$ (вакуум, повітря)

1.3 лід, вода

1.5-1.9 скло

4 кремній
 Поляризоване і неполяризоване світло



Закони геометричної оптики

- геометрична або променева оптика не розглядає хвильову природу світла (тобто береться граничний випадок з $\lambda \rightarrow 0$)

- В однорідних середовищах світло поширюється прямолінійно – променями (по шляху, якому відповідає найменший час поширення – принцип Ферма)
- Світлові промені при перехрещенні не збуджують один одного
- Закон відбиття світла
- Закон заломлення світла

Геометрична оптика

$$dt = \frac{dS}{V} = \frac{n dS}{c}$$

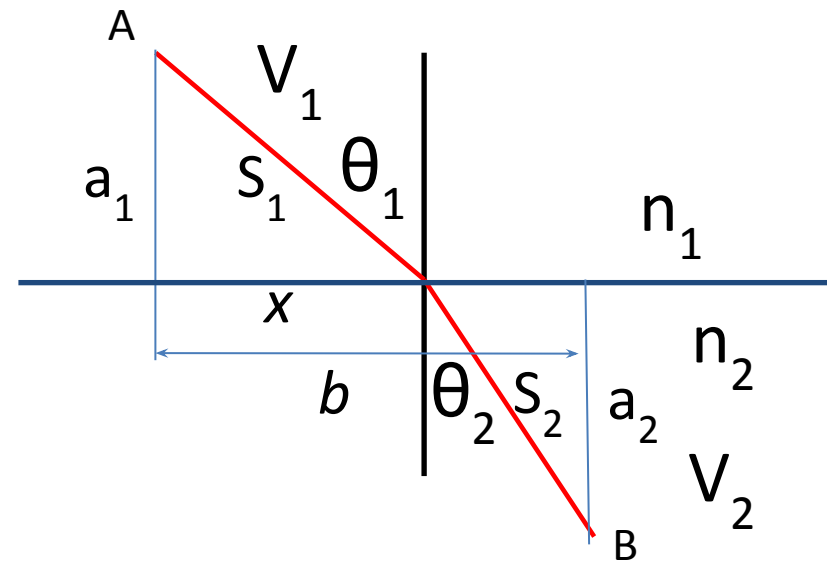
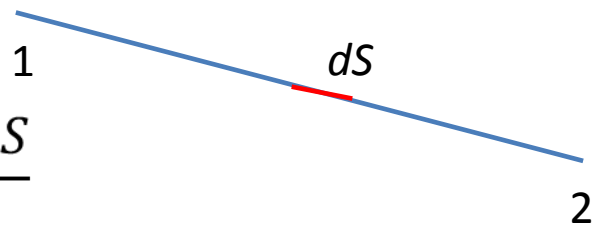
$$t = \frac{1}{c} nS = \frac{L}{c}$$

$L = nS$ Оптична довжина шляху
світла

Світло розповсюджується по такому
шляху,

де L – мінімальна (принцип Ферма)

$$L = n_1 S_1 + n_2 S_2 = n_1 \sqrt{a_1^2 + x^2} + n_2 \sqrt{a_2^2 + (b-x)^2}$$

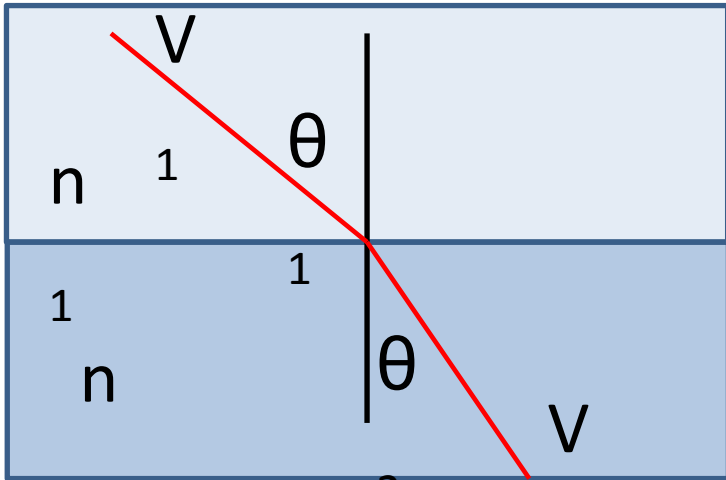


$$\frac{dL}{dx} = \frac{xn_1}{\sqrt{a_1^2 + x^2}} - \frac{n_2(b-x)}{\sqrt{a_2^2 + (b-x)^2}} = n_1 \sin \theta_1 - n_2 \sin \theta_2 = 0$$

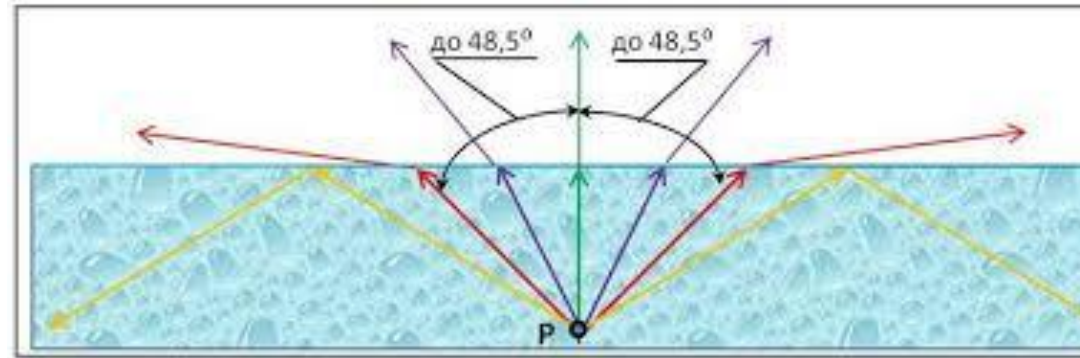
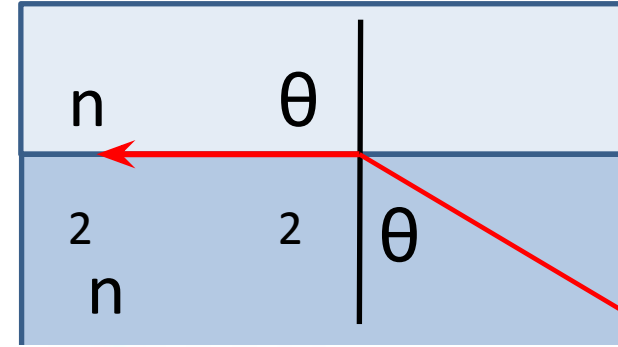
$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Закони відбивання і заломлення світла

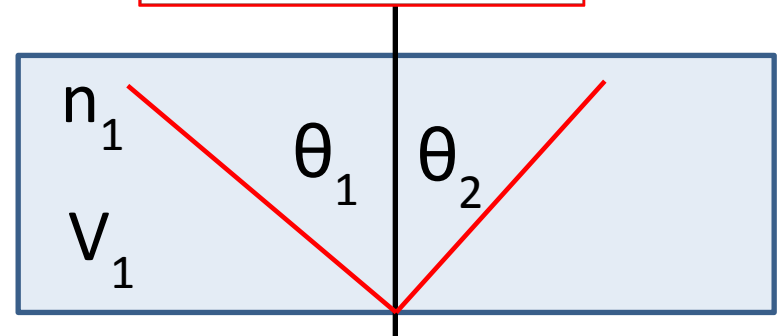
$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$



Повне внутрішнє відбивання: При $n_1 > n_2$

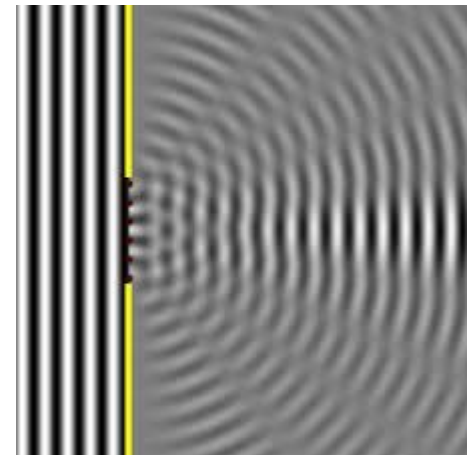
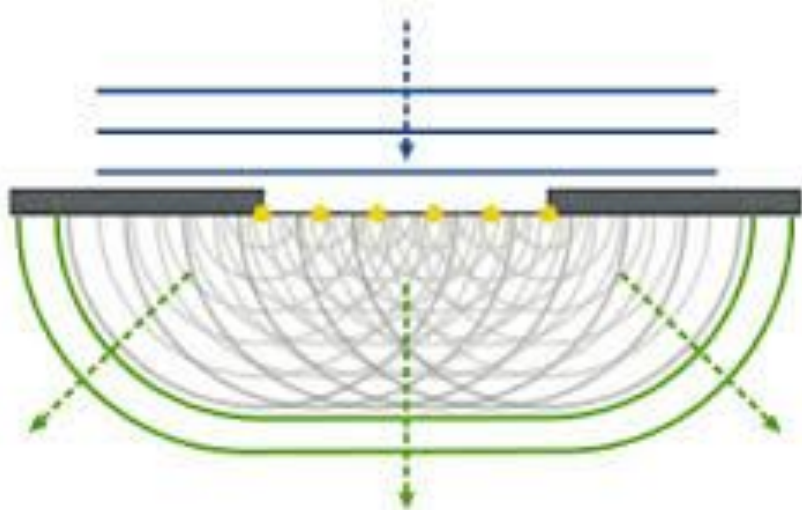


$$\sin \theta_1 = \sin \theta_2$$



Принцип Гюйгенса

- Кожна точка, до якої доходить світлова хвиля в момент часу t , є джерелом вторинних хвиль
- Огинаюча цих хвиль створює фронт хвилі в момент часу $t + \Delta t$



Дає якісне, але не кількісне пояснення проникнення світла в область геометричної тіні

Інтерференція світла

Дві світлові хвилі частоти ω накладаються в

просторі
 $A_1 \cos(\omega t + \varphi_1)$

Когерентні коливання:

$$A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$$

$$\delta = \varphi_2 - \varphi_1 = \text{const}$$

Амплітуда коливання в деякій точці

простору
 $A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$

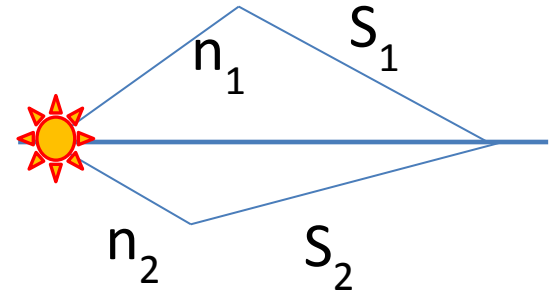
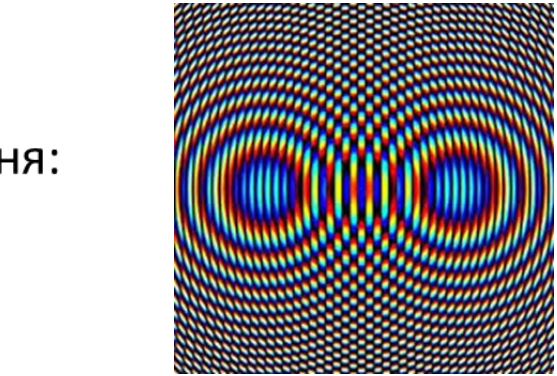
$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta$$

Інтенсивність
світлових коливань

$$\delta = \omega \left(\frac{S_2}{v_2} - \frac{S_1}{v_1} \right) = \frac{\omega}{c} (n_2 S_2 - n_1 S_1)$$

$$\delta = \frac{2\pi\nu}{c} (n_2 S_2 - n_1 S_1) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta$$

$\Delta = n_2 S_2 - n_1 S_1$ Оптична різниця ходу



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

$$\Delta = \pm m\lambda$$

Умова максимумів

$$\Delta = \pm \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda \quad m=0,1,2,3,\dots$$

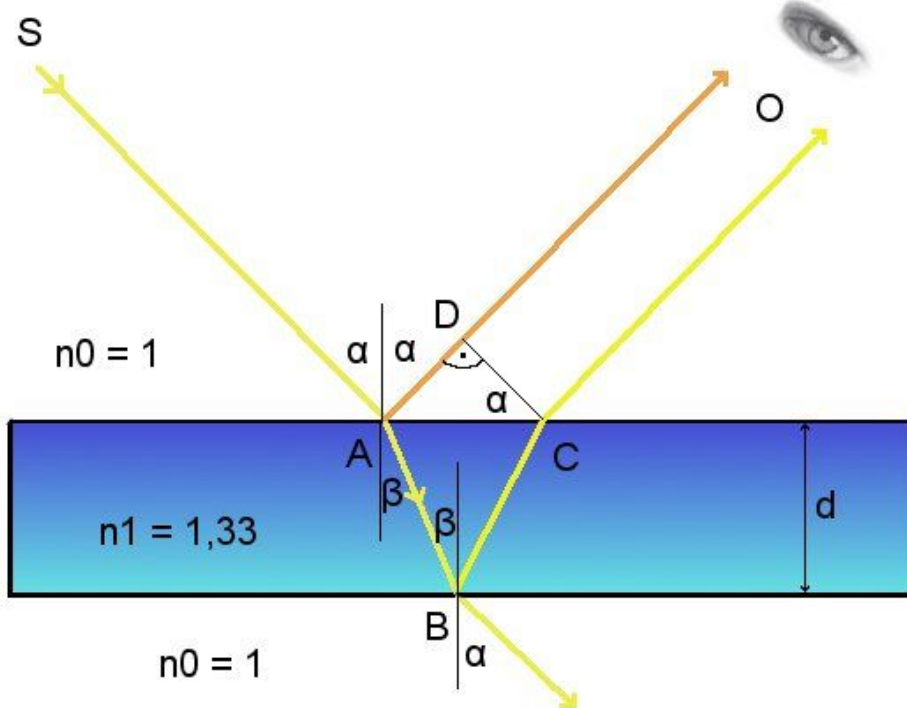
Умова мінімумів

Інтерференція – накладання в просторі двох хвиль, в результаті чого утворюються точки з максимумами і мінімумами інтенсивності

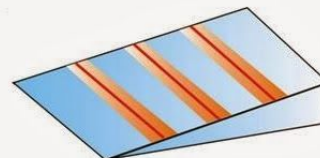
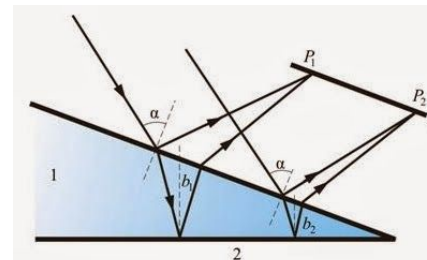
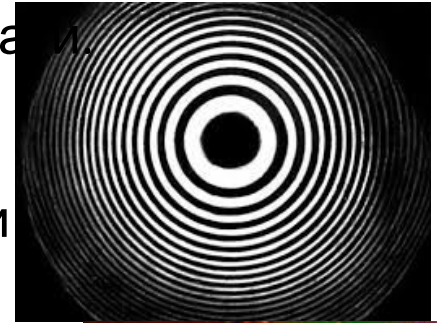
Інтерференція світла (приклад)

При попаданні світла на плоску плівку (пластинку) виникає дві хвилі, відбитих від її поверхонь. Ці хвилі можуть інтерферувати. Інтерференційні смуги рівного нахилу (кут α постійний) і рівної товщини (товщина d є постійною)

$$\Delta = 2d\sqrt{n_1^2 - \sin^2\alpha} - \frac{\lambda_0}{2}$$



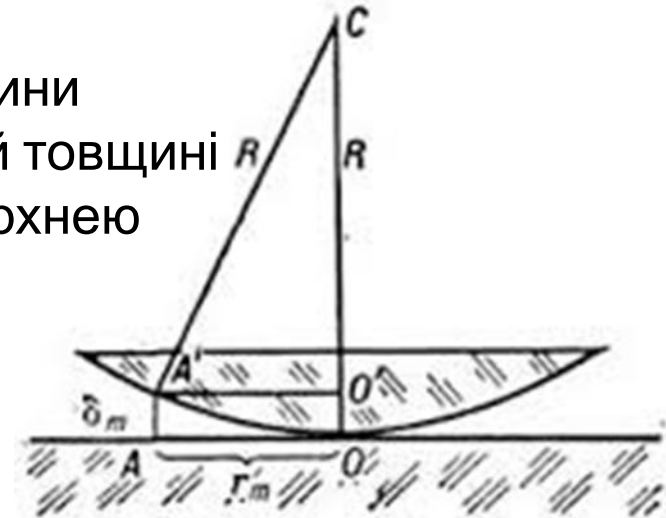
Фаза хвилі при відбиванні від оптично густішого середовища змінюється на π



Кільця Ньютона



Інтерференція рівної товщини
(кільця відповідають певній товщині
проміжку між лінзою і поверхнею)



$$\Delta = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2}$$

m – парні –
максимуми

Непарні – мінімуми
 $m=1,2,3,$



Радіус кілець

Ньютона

$$r_m = \sqrt{R\lambda\left(m - \frac{1}{2}\right)}$$

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

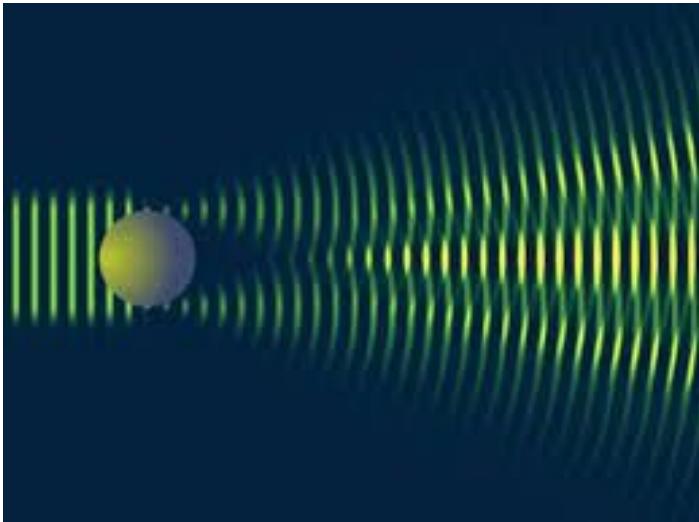
для світлих кілець
(максимуми),

для темних (мінімуми)

$$\Delta = m \frac{\lambda}{2}$$

Дифракція світла

Дифракція – сукупність явищ при розповсюдженні світла в середовищі з різкими неоднорідностями (малі отвори, або перешкоди, краї непрозорих предметів), внаслідок чого спостерігається відхилення від законів геометричної оптики.



Приклад дифракції:
огинання світлом країв
перешкод

Принцип Гюйгенса пояснює попадання світла в область геометричної тіні, але нездатний пояснити виникнення неоднорідного розподілу інтенсивностей за перешкодою

Принцип Гюйгенса-Френеля

Для пояснення неоднорідного розподілу інтенсивності світлової картини Френель розвив принцип Гюйгенса, доповнивши його поняттям інтерференції хвиль від вторинних джерел

Фронт хвилі ділиться на зони Френеля

(джерела вторинних хвиль)

$$A = A_1 - A_2 + A_3 - \dots - (-1)^k A_k$$

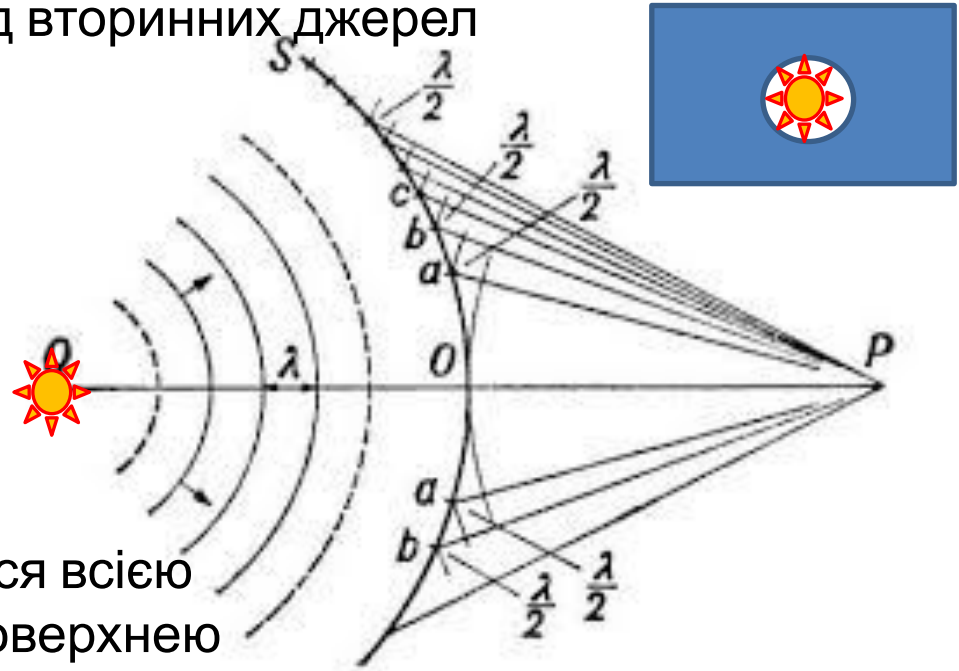
$$A = \frac{A_1}{2} + \left(\frac{A_1}{2} - A_2 + \frac{A_3}{2} \right) + \dots$$

$$A = \frac{A_1}{2} \quad \text{Амплітуда, що створюється всією сферичною хвильовою поверхнею}$$

Амплітуда коливань в точці P залежить від кількості m відкритих зон Френеля: парне (мінімум) або непарне (максимум)

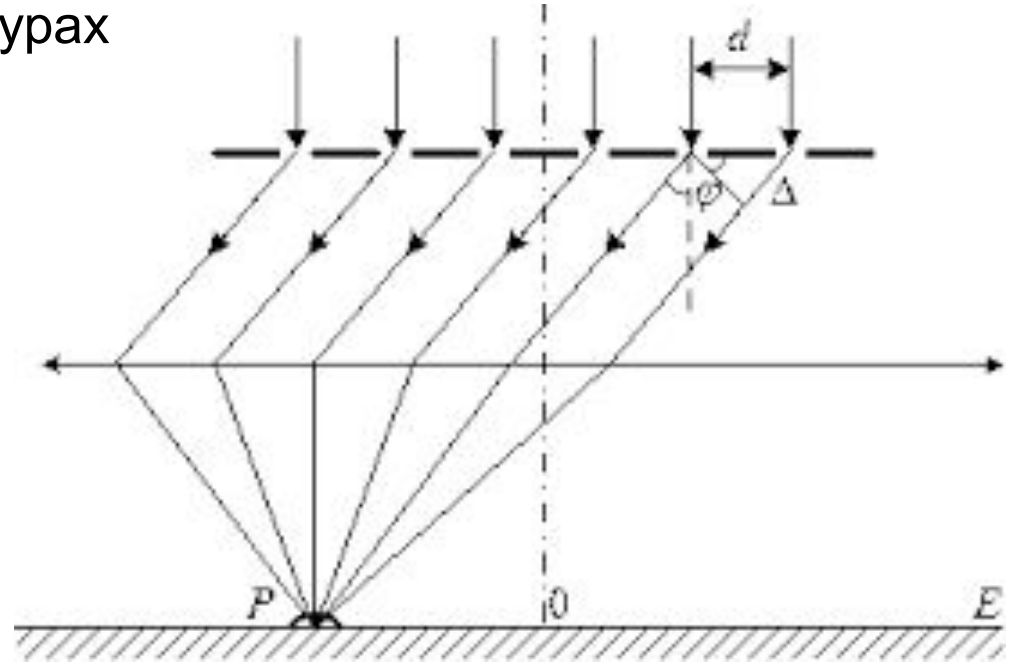
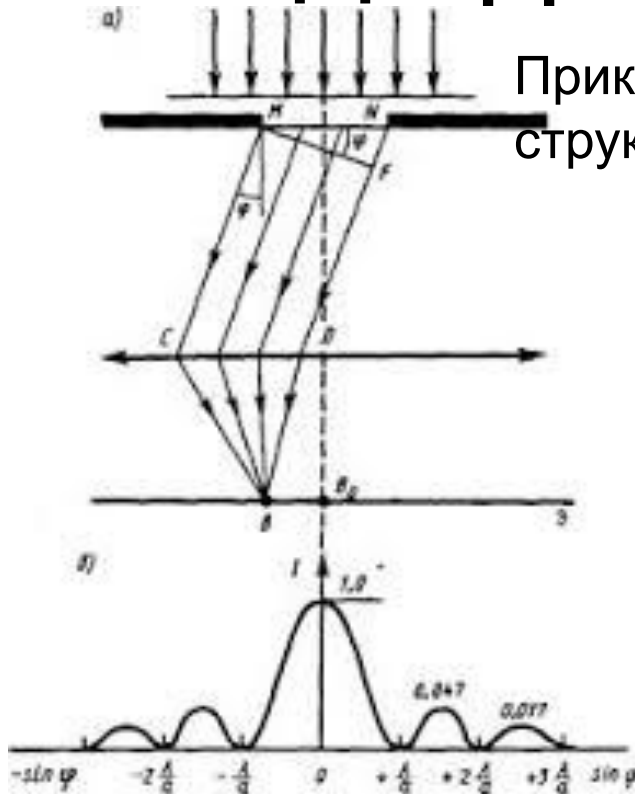
$$A = \frac{A_1 + A_{m-1}}{2} - A_m$$

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



Дифракційна ґратка

Приклад дифракції світла на періодичних структурах

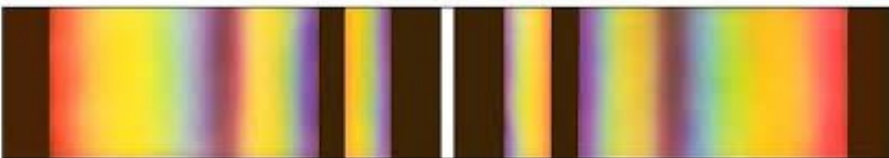


$$\Delta = d \sin \varphi$$

$$d \sin \varphi = \pm n \lambda$$

$n=1, 2, 3 \dots$

Умови головних максимумів n -порядку



$k=3$ $k=2$ $k=1$ $k=0$ $k=1$ $k=2$ $k=3$

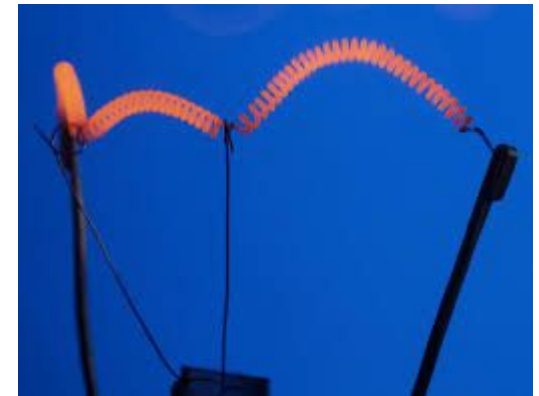
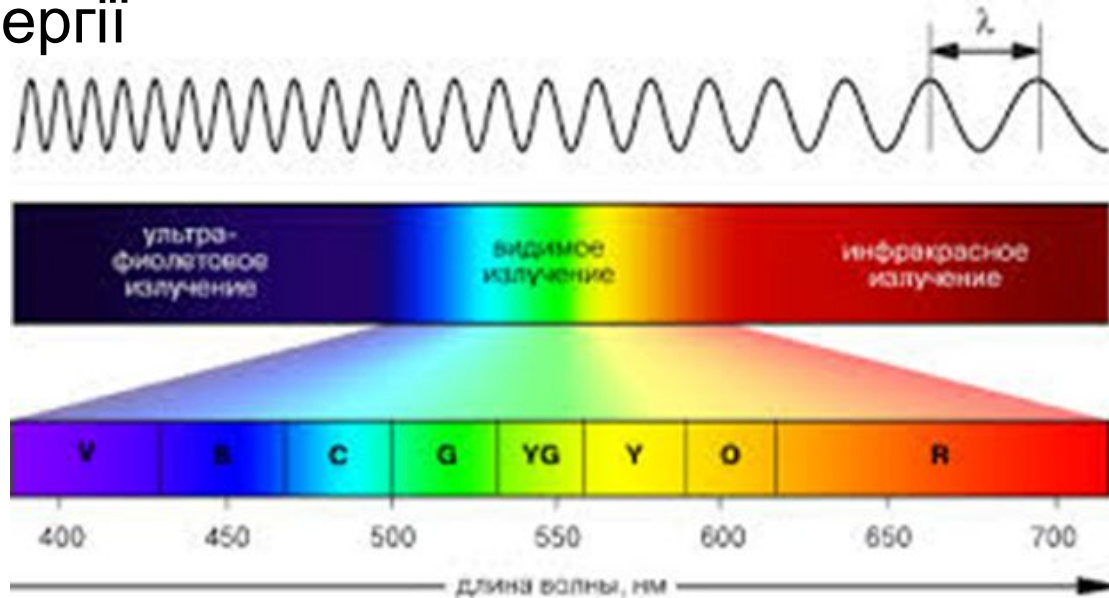


Центральний максимум

Квантова оптика

Теплове випромінювання

Випромінювання електромагнітних (в тому числі світлових) хвиль нагрітими тілами за рахунок їх теплової (внутрішньої) енергії



Випромінювання є невидимим (інфрачервоний спектр) при низьких температурах (до 600°C), Видимий спектр при температурах вище 600°C

Тіла можуть не тільки випромінювати, але і поглинати електромагнітні хвилі (тобто обмінюватися таким чином теплом із зовнішнім середовищем)

Закон Кірхгофа

Потік енергії, що випромінює одиниця поверхні тіла (в усіх напрямках) – енергетична світимість $R = f(\omega, T)$

$$dR_{\omega} = r_{\omega} d\omega$$

Випромінювальна здатність тіла $r = f(\omega, T)$

$$R_T = \int dR_{\omega T} = \int_0^{\infty} r_{\omega T} d\omega$$

Поглинальна здатність

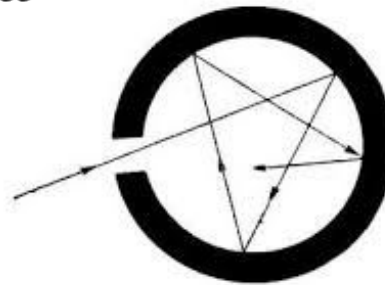
$$a_{\omega T} = \frac{d\Phi'_{\omega}}{d\Phi_{\omega}}$$

Абсолютно чорне тіло: поглинає всю енергію, що падає на його

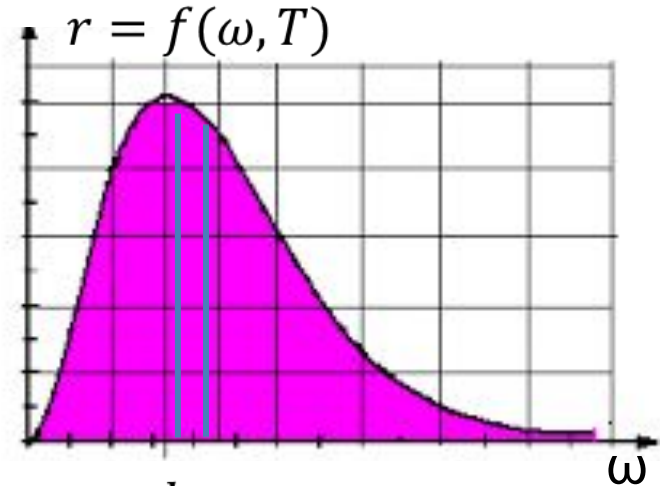
поверхню

$$\frac{r_{\omega T}}{a_{\omega T}} = f(\omega, T)$$

Випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла



$$a_{\omega T} = 1$$



$$\lambda = \frac{2\pi c}{\omega} = \frac{c}{\nu}$$

$$dR_{\lambda} = r_{\lambda} \frac{d\lambda}{\lambda^2}$$

$$r_{\omega} = r_{\lambda} \frac{1}{2\pi c}$$

Закон Кірхгофа: Відношення випромінювальної здатності тіла до його поглинальної здатності не залежить від природи тіла, а є універсальною функцією температури й частоти (тобто довжини хвилі)

Закон Стефана-Больцмана і закон Віна

Необхідно було отримати вигляд функції спектрального розподілу енергії $f(\omega, T)$ – універсальної функції Кірхгофа, яка описує випромінювання абсолютно чорного тіла

Енергетична світимість абсолютно чорного тіла

Постійна Стефана-Больцмана

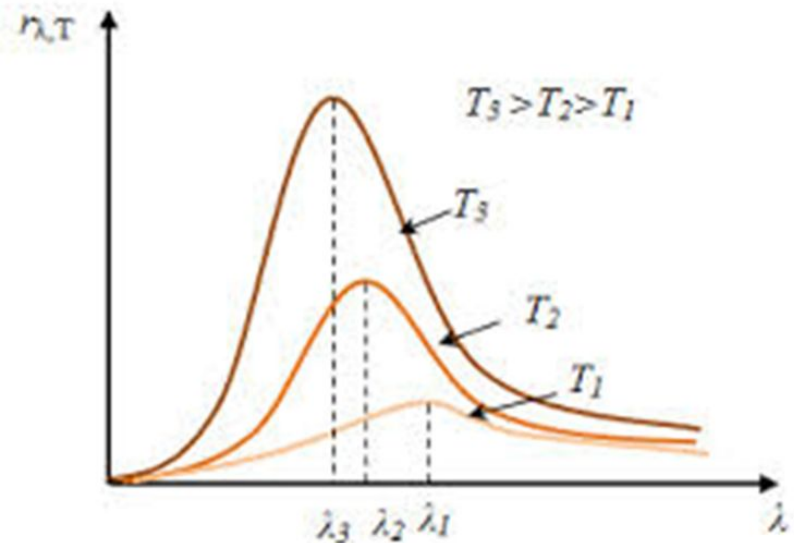
$$\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$$

$$T\lambda_m = b$$

$$b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$$

Він встановив залежність між температурою тіла та довжиною хвилі λ_m , на яку припадає максимум випромінювання

$$R = \int_0^{\infty} f(\omega, T) d\omega = \sigma T^4$$

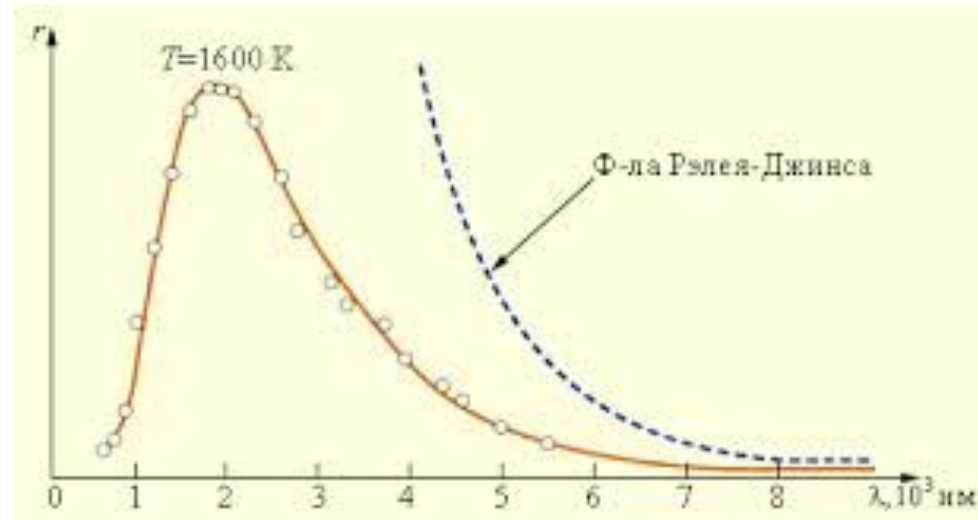


Формула Релея-Джинса

Припущення: на кожне електромагнітне коливання припадає енергія $2 \times \frac{1}{2} kT$
(електрична + магнітна енергія)

$$f(\omega, T) = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} kT$$

- Не працює в області великих частот (тобто коротких хвиль) – «ультрафіолетова катастрофа».



Працюють певні закони, несумісні з уявленнями класичної фізики

Гіпотеза і формула Планка

Планк допустив, що електромагнітні хвилі випромінюються певними порціями - квантами

$$E = \hbar\omega = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Постійна
Планка
 $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ [Дж·с]

$$E_n = n\hbar\omega$$

$n=0, 1, 2, 3,$

Енергія
випромінювання

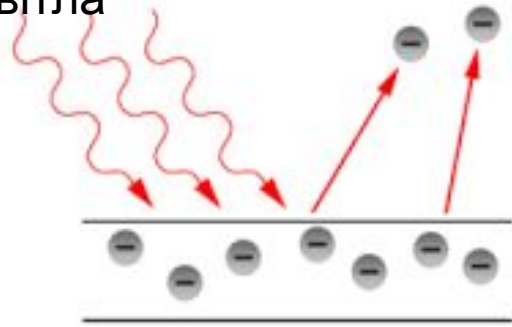
Формула Планка для випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла (тобто відношення випромінювальної здатності до поглинальної здатності усіх тіл)

$$f(\omega, T) = \frac{\hbar\omega^3}{4\pi^2c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right) - 1}$$

Точно описує теплове випромінювання у відповідності до експериментальних явищ

Фотони і фотоефект

Кількість електронів пропорційна інтенсивності світла, а їх швидкість – частоті світла



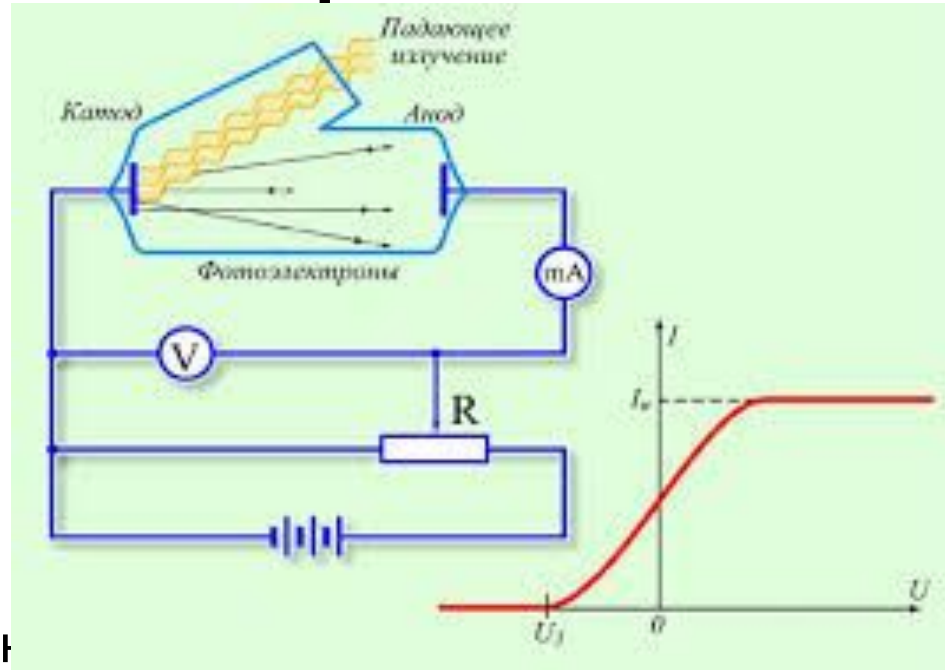
Ейнштейн висловив пояснення фотоефекту: гіпотезу (квантову теорію фотоефекту), що світло не тільки випромінюється, але й поглинається і розповсюджується квантами – фотонами (корпускулярно-хвильовий дуалізм світла)

Енергія фотона

$$E = h\nu = h\omega = h\nu$$

Імпульс фотона

$$p = \frac{h}{\lambda}$$



$$h\nu = A_{\text{вих}} + \frac{mv^2}{2}$$

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{hc}{A}$$

Червона межа фотоефекту

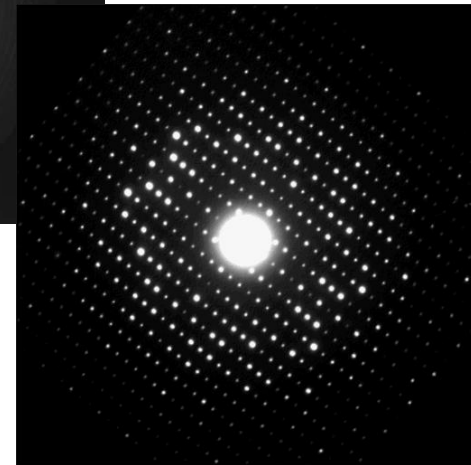
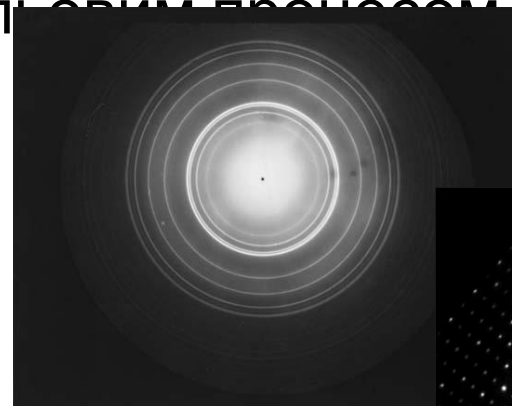
Хвилі де Бройля

Світло проявляє не тільки хвильові, але і корпускулярні властивості (фотони)

Де Бройль висловив зворотну гіпотезу: частинки, що рухаються (електрони, протони, нейтрони, атоми) характеризуються певним хвильовим процесом

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

$$\omega = \frac{E}{\hbar}$$



Хвильові властивості електронів:

- дифракція на періодичних структурах (кристалічні ґратки),
- висока роздільна здатність електронних мікроскопів

Частинки не є матеріальними точками (квантова механіка)

Частинки – матеріальні точки (класичні уявлення)

Принцип невизначеності Гейзенберга

За законами квантової механіки мікрочастинки описуються хвилями, що не дозволяє точно описати їх положення та імпульси в кожний момент часу (хвиля не має точної координати)

Координату X та проекцію імпульсу P_x принципово можливо визначити лише з точністю до певних погрешностей:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$$

(співвідношення невизначеності між координатою та імпульсом частинки)



$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$$

(співвідношення невизначеності між енергією частинки та часом, який частинка перебуває в даному енергетичному стані)

Рівняння Шредінгера

Шредінгер запропонував описувати рух мікрочастинок комплексною функцією координат і часу (хвильова функція або Ψ -функція):

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\Psi + U\Psi = i\hbar\frac{\partial\Psi}{\partial t}$$

Рівняння Шредінгера - основне рівняння нерелятивістської квантової механіки. Визначає вид Ψ -функції для кожного стану частинок

$$\Delta\Psi = \frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\Psi}{\partial z^2}$$

Δ - оператор Лапласа

U – комплексна функція координат і часу, антиградієнт $\left(-\frac{\partial U}{\partial x}; -\frac{\partial U}{\partial y}; -\frac{\partial U}{\partial z}\right)$ якої визначає силу, що діє на частинку. Якщо $U \neq U(t)$, то це – потенціальна енергія

Вигляд Ψ -функції, якщо силове поле не змінюється з часом (стаціонарно)

$$\Psi(x, y, z, t) = \psi(x, y, z)\exp\left(-i\frac{E}{\hbar}t\right)$$

E – повна енергія частинки

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\Psi + U\Psi = E\Psi$$

Рівняння Шредінгера для стаціонарних станів

$$\Delta\Psi + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)\Psi = 0$$

Смисл Ψ -функції

Квадрат модуля Ψ -функції визначає вірогідність dP того, що частинка знаходиться в об'ємі dV (або щільність вірогідності P/V того, що частинка знаходиться у відповідному місці простору)

$$dP = A|\Psi|^2 dV$$

$$P = A \int_V |\Psi|^2 dV = 1$$

- вірогідність того, що частинка знаходиться в одній з точок простору (тобто існує)

Ψ -функція, та її похідні мають бути скінчені, однозначні і

Квантова механіка: ^{неперервні}

- має статистичний характер
- Не дозволяє точно встановити координати частинки або її імпульс (траєкторію руху)
- дозволяє лише встановити вірогідність того, що частинка знаходиться в певних точках простору.

Квантування енергії

Рівняння

Шредингера

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)\Psi = 0$$

$$\Psi(0) = \Psi(l) = 0$$

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}E\Psi = 0 \quad 0 < x < l$$

$$k^2 = \frac{2m}{\hbar^2}E$$

$$\Psi(x) = a \sin(kx + \alpha) \quad \text{Рішення рівняння}$$

Шредингера

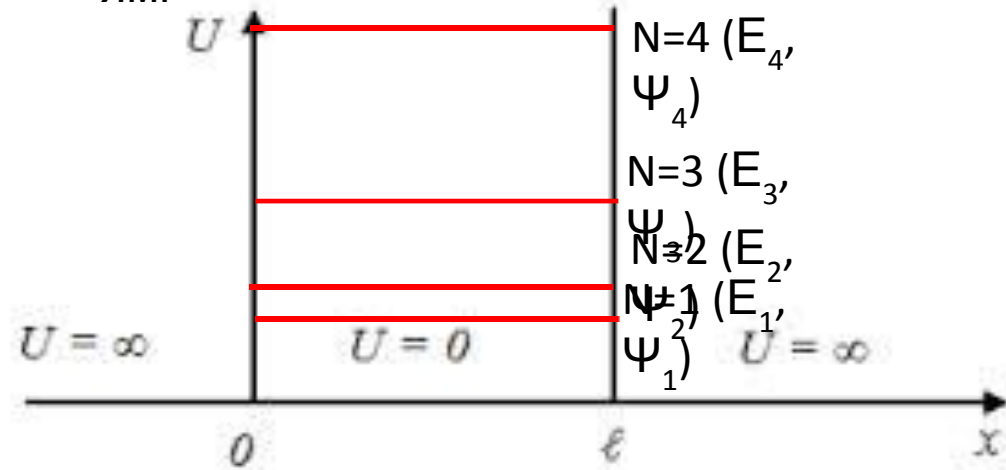
$$\Psi(0) = a \sin \alpha = \Psi(l) = a \sin kl = 0$$

$$kl = \pm N\pi \quad N=1,2,3,$$

$$E_N = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ml^2} N^2$$

Рішення рівняння Шредингера можливе лише при деяких дискретних значеннях параметра E (повної енергії частинок)

Частинка в потенціальній ямі

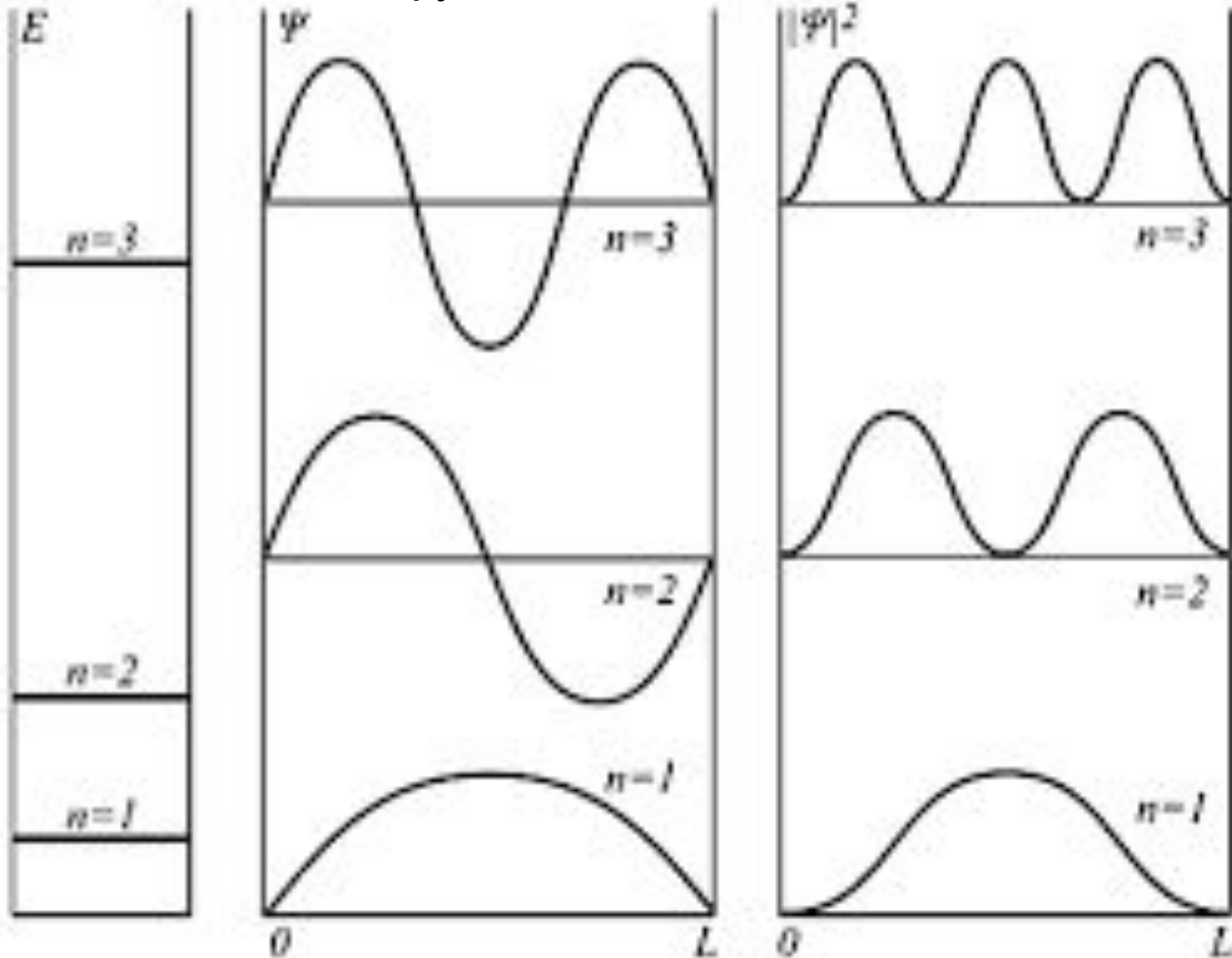


Квантування енергії

Енергетичні рівні

Ψ -
функція

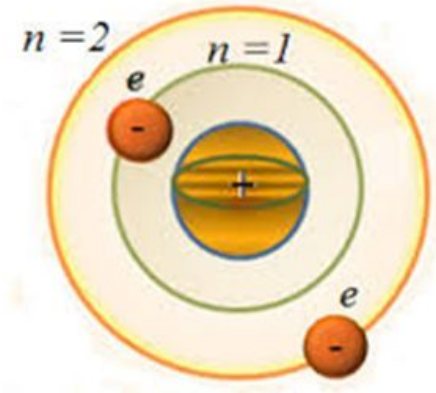
Щільність вірогідності знаходження
частинки



Будова атома

Постулати Бора:

- Існують стаціонарні стани атома з відповідними значеннями енергії E_N , яким відповідають стаціонарні орбіти електронів
- Для кожного стаціонарного стану атома електрон, що рухається по орбіті навколо ядра, має квантовані значення моменту імпульсу
- Під час переходу атома з одного стаціонарного стану в інший поглинається або випромінюється 1 фотон з енергією = різниці енергій двох стаціонарних станів



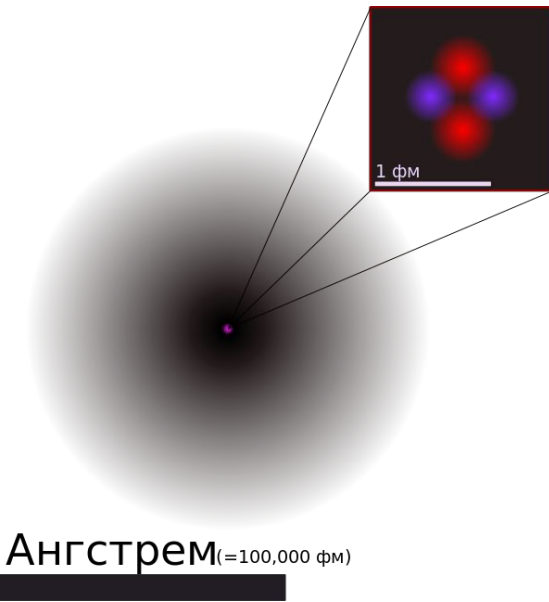
Електронна хмара в 100 000 разів більше розмірів ядра
Складається з кількох електронних оболонок, які містять орбіталі:

К оболонка - 1 s орбіталь, 2 електрони,

L оболонка - 1s+3p орбіталі, до 8 електронів

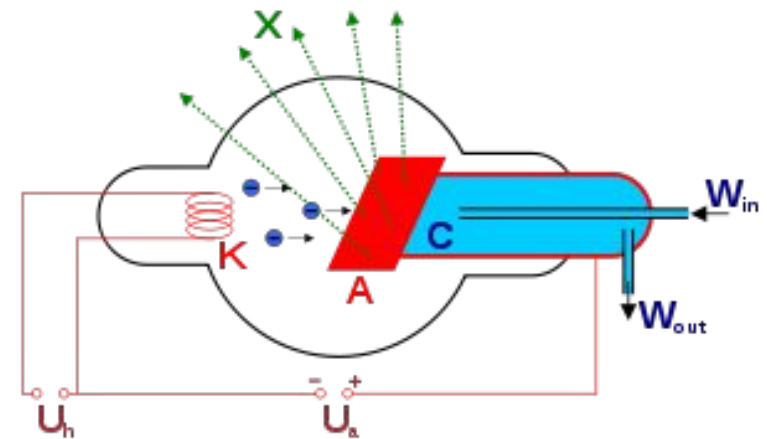
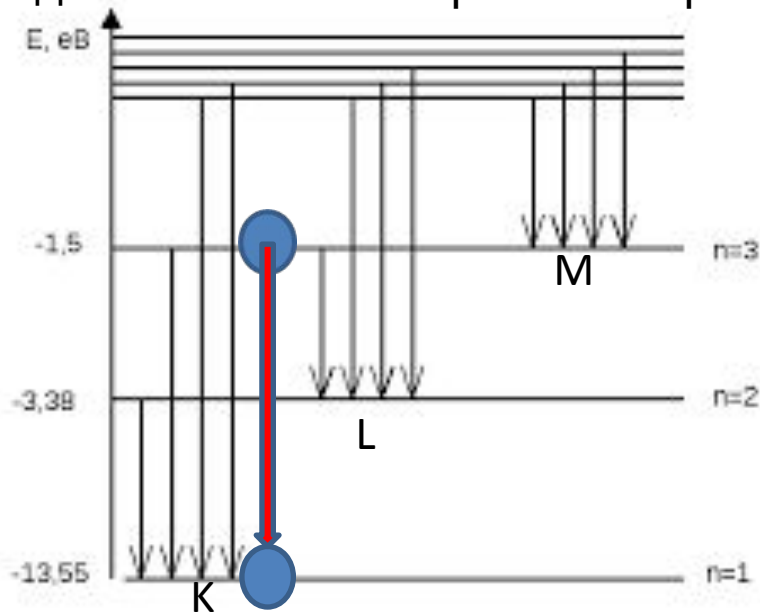
M оболонка - 1s+3p+5d орбіталей, до 18 електронів.

Принцип Паулі: в багаточастинковій системі ніякі дві частинки не можуть характеризуватися хвильовими функціями з однаковим набором квантових чисел. Слідство: розподіл електронів по енергетичним рівням, оболонкам і орбіталям в атомі



Характеристичне рентгенівське випромінювання

відповідає квантовомеханічним переходам між різними енергетичними рівнями атомів. Зовнішній електрон вибиває електрон із внутрішньої оболонки атома-матеріалу мішені, і електрон із зовнішньої оболонки атома (з вищим енергетичним рівнем) переходить на нижчий енергетичний рівень



$$h\nu = E_2 - E_1$$

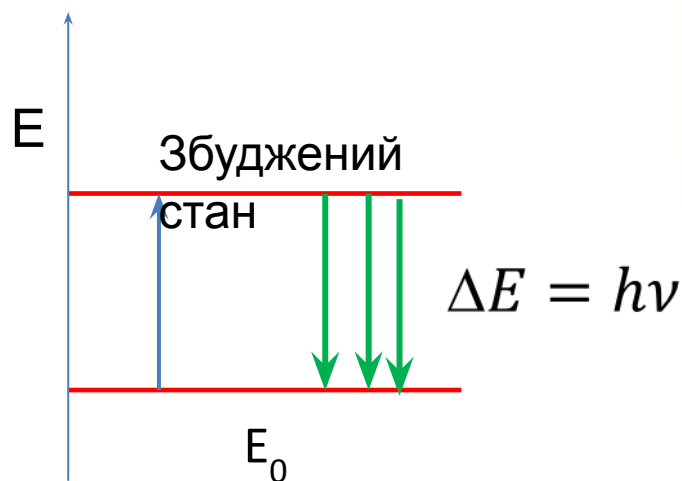
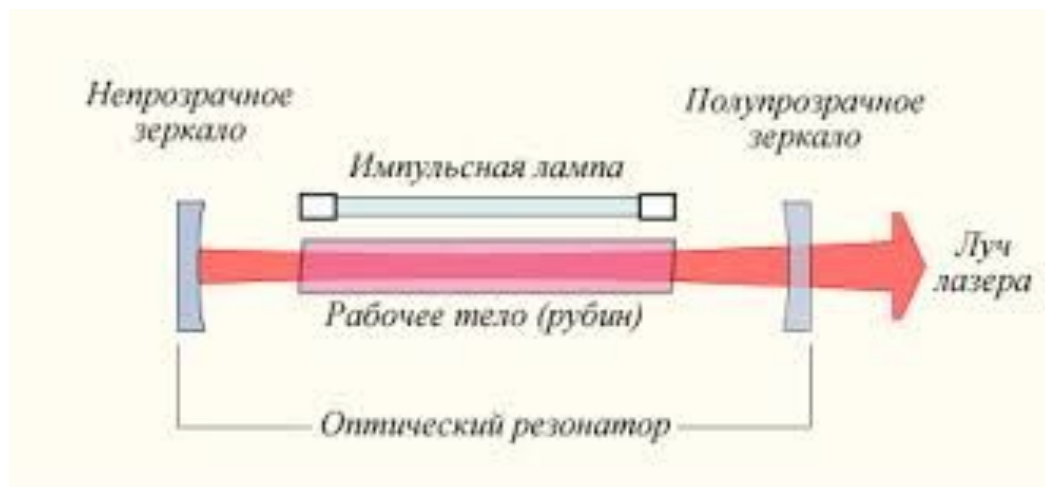
Довжина хвиль: $10^{-8} \dots 10^{-12}$



Лазери (оптичні квантові генератори)



- Генерує або підсилює монохроматичне світло
- вузькі пучки світла, здатні поширюватися на великі відстані без розсіювання
- велика густина потужності випромінювання



Атоми речовини взаємодіють із зовнішнім випромінюванням, змінюючи свій енергетичний стан під дією фотонів (поглинають і випромінюють)

Необхідно створити інверсну заселеність – більшу кількість атомів на вищих енергетичних рівнях

Голограми

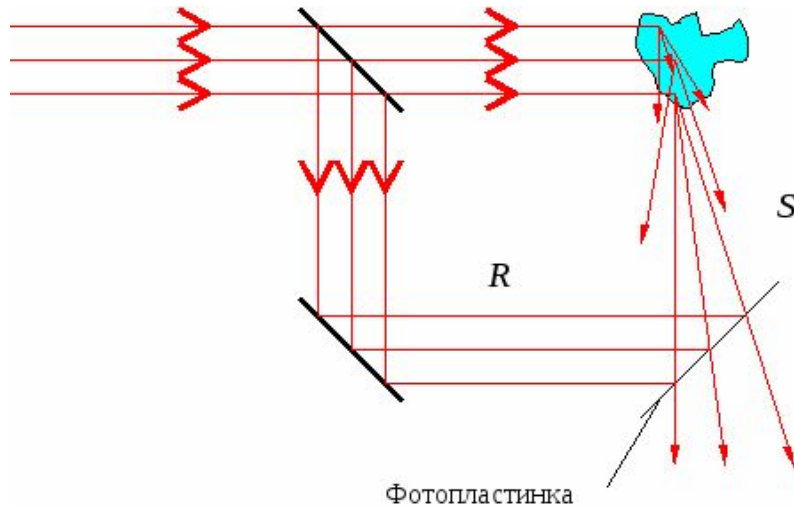
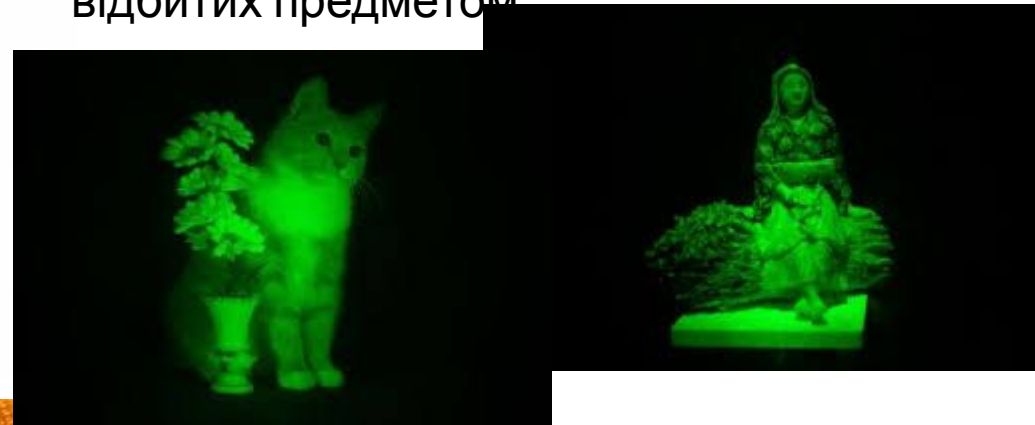


Рис. 6.15. Схема записи голограмм по методу Лейта и Упатнієкса.

Особливий спосіб фіксації світлової хвилі, відбитої предметом: Фіксується інтерференційна картина від опорного променя і променів, відбитих предметом.



Зображення фіксується на фотопластинки, фотохромні та фотополімерні плівки