

## § 45. ДИФРАКЦІЯ СВІТЛА

?!

Камінь, кинутий у воду, утворює на поверхні водойми хвилю. Якщо на своєму шляху хвиля зустріне перешкоду, наприклад скелю або очеретину, що стирчить із води, то за скелею утвориться тінь (тобто безпосередньо за скелею хвиля не проникне), а за очеретиною тінь не утвориться (хвиля просто обійде її). Отже, хвилі можуть огинати перешкоди. Якщо світло — хвиля, то воно також має огинати перешкоди. З'ясуємо, чи так це.

1

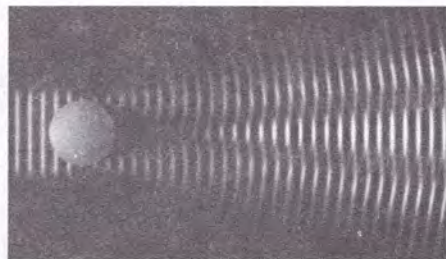
### Чи може світло огинати перешкоди

Явище огинання хвилями перешкод називається **дифракцією** (від лат. *difraktus* — розламаний).

У наведеному прикладі дифракція хвиль відбувається на очеретині й не відбувається на скелі. Але це не зовсім так. Якщо скеля достатньо віддалена від берега, то на певній відстані від неї тінь зникне — хвиля обігне й скелю. Річ у тім, що дифракція спостерігається у двох випадках: 1) коли лінійні розміри перешкод, на які падає хвиля (або розміри отворів, через які хвиля поширюється), порівнянні з довжиною хвилі або менші за неї; 2) коли відстань  $l$  від перешкоди до місця спостереження в багато разів більша за розмір перешкоди.

Хвилі, що огинають перешкоду, когерентні, тому дифракція завжди супроводжується інтерференцією (рис. 45.1). Інтерференційна картина, отримана внаслідок дифракції, називається *дифракційною картиною*.

Оскільки світло є хвилею, в разі виконання зазначених умов можна спостерігати і дифракцію світла. Але світло — це дуже коротка хвиля (від 400 до 760 нм), тому дифракцію на предметі розміром, наприклад, 1 см можна помітити лише на відстані порядку 10 км. Якщо ж розміри



**Рис. 45.1.** Дифракція хвиль на кулі: на певній відстані від кулі тінь зникає, а хвилі, накладаючись одна на одну, створюють дифракційну картину

перешкод менше 1 мм, то дифракцію можна спостерігати й на відстанях порядку 1 м.

**Дифракцією світла** називається огинання світловими хвилями межі непрозорих тіл і проникнення світла в ділянку геометричної тіні.

На рис. 45.2 показано, як виглядають на фотографіях дифракційні картини від різних перешкод, що освітлюються монохроматичним світлом. Бачимо, що тінь від тонкого дроту з обох боків оточена поперемінними світлими і темними смугами, а в центрі тіні розташована світла смуга. Тінь від непрозорого круглого екрана також оточена світлими і темними концентричними кільцями, в центрі тіні — світла кругла пляма (*пляма Пуассона*). Так само оточена світлими і темними кільцями кругла пляма світла, що пройшло від точкового джерела світла крізь невеликий круглий отвір; зменшуючи діаметр отвору, можна отримати в центрі картини і темну пляму. Якщо освітлювати перешкоду або отвір пучком білого світла, то світлі смуги змінюються на райдужні, які легко побачити, дивлячись на джерело світла крізь клаптик капрону. Подібні дифракційні картини нерідко спостерігаються і в природі (рис. 45.3).

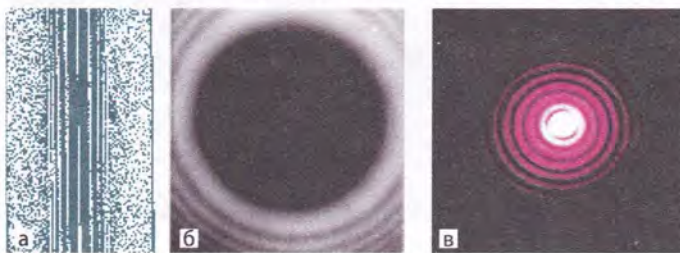
## 2 У чому полягає принцип Гюйгенса — Френеля

Кількісну теорію дифракції світла побудував Френель, сформулювавши принцип, який з часом отримав назву **принцип Гюйгенса — Френеля**:

Кожна точка хвильової поверхні є джерелом вторинної хвилі; вторинні джерела світла, які розташовані на одній хвильовій поверхні, є когерентними; хвильова поверхня в будь-який момент часу є результатом інтерференції вторинних хвиль.

Для знаходження результату інтерференції Френель запропонував метод розбиття хвильового фронту на зони — так звані **зони Френеля** (рис. 45.4). ★

Якщо на вузьку щілину падає плоска світлова хвиля, то на екрані, який розташований на досить великій відстані від щілини, можна спостерігати



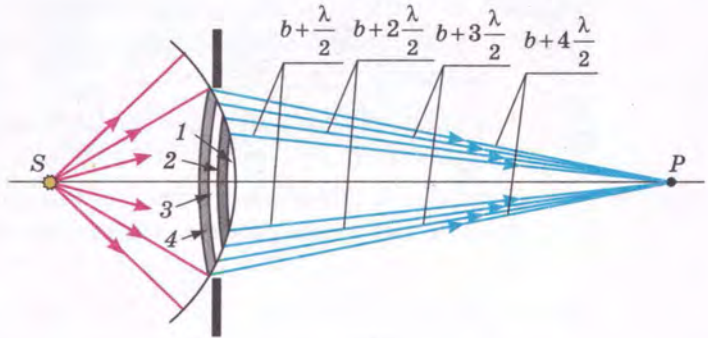
**Рис. 45.2.** Дифракційні картини від різних перешкод: тонкого дроту (а); невеликого непрозорого екрана (б); невеликого круглого отвору (в)



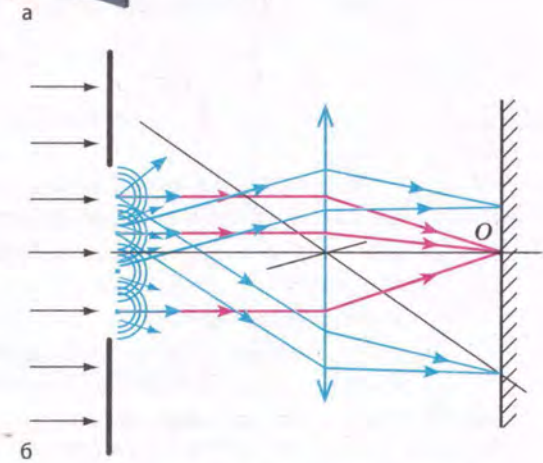
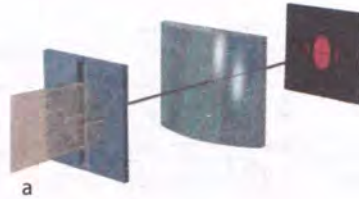
**Рис. 45.3.** Природне явище «сяйво Будди» виникає внаслідок дифракції світла на дрібненьких крапельках води, коли світло від сонця пробивається крізь туман або хмару



**Рис. 45.4.** Розбиття хвильового фронту від точкового джерела світла  $S$  на зони Френеля (1, 2, 3, 4). Радіус кожної наступної зони відрізняється від попередньої на  $\lambda/2$ . Отвір перекриває парна кількість зон Френеля, тому в точці  $P$  спостерігається мінімум інтерференції



дифракційну картину (рис. 45.5, а). Пояснимо її появу, користуючись принципом Гюйгенса — Френеля.

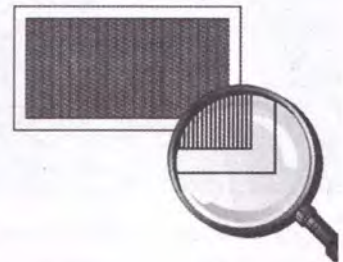


**Рис. 45.5.** Дифракція паралельного пучка світла на вузькій щілині: а — схема досліду; б — хід променів

### 3 Дифракційна ґратка

Дифракційна картина від плоскої хвилі спостерігається тільки на відстанях, коли ширина щілини є в багато разів меншою, ніж відстань до екрана. За цієї умови на екран потрапляє дуже мало світла. Щоб отримати яскравішу дифракційну картину використовують *дифракційну ґратку*, що являє собою велику кількість вузьких щілин, розділених непрозорими проміжками.

Для виготовлення дифракційних ґраток (рис. 45.6) на металеву або скляну пластинку наносять велику кількість паралельних штрихів



**Рис. 45.6.** Дифракційна ґратка

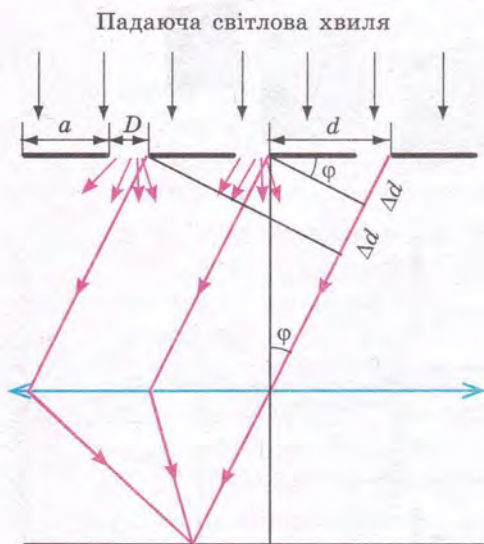
(до 2000 штрихів на один міліметр поверхні). Спостереження на металевих ґратках проводяться тільки у відбитому світлі, а на скляних — найчастіше у прохідному.

**Дифракційна ґратка** — це спектральний прилад, що слугує для розкладання світла у спектр і вимірювання довжини хвилі.

Величину  $d$ , що дорівнює відстані між двома сусідніми щілинами, називають **періодом ґратки**, або **сталом ґратки**:

$$d = a + D = \frac{l}{N},$$

де  $a$  — ширина непрозорої ділянки;  $D$  — ширина щілини;  $N$  — кількість штрихів на відрізку довжиною  $l$ .



**Рис. 45.7.** Схема ходу променів під час дифракції плоскої світлової хвилі на дифракційній ґратці

Нехай на ґратку падає паралельний пучок світла. Вторинні джерела світла від кожної щілини створюють когерентні хвилі, що поширюються в усіх напрямках. Якщо на шляху цих хвиль розташувати збиральну лінзу, то всі паралельні промені збиратимуться на екрані у фокальній площині лінзи (рис. 45.7). Знайдемо умову, за якої ці хвилі посилюють одна одну.

З рисунка бачимо, що різниця ходу  $\Delta d$  для двох крайніх хвиль, що поширюються від сусідніх щілин під кутом  $\varphi$ , дорівнює:  $\Delta d = d \sin \varphi$ .

Щоб у точці  $P$  спостерігався інтерференційний максимум, різниця ходу  $\Delta d$  має дорівнювати цілому числу довжин хвиль  $\Delta d = k\lambda$ .

Звідси маємо **формулу дифракційної ґратки**:

$$d \sin \varphi = k\lambda, \quad (*)$$

де  $k = 0, 1, 2, \dots$

$k = 0$  відповідає центральному (нульовому) максимуму,  $k = 1$  — максимумам першого порядку, що розташовані симетрично з обох боків від центрального, і т. д. Слід мати на увазі, що при виконанні умови (\*) посилюються хвилі, що йдуть від будь-якої точки щілини, оскільки для будь-якої точки щілини існує точка в сусідній щілині, розташована на відстані  $d$  від першої точки.

★ Зверніть увагу:

1. Кут  $\varphi$ , під яким спостерігається інтерференційний максимум, залежить від довжини хвилі, тому **дифракційні ґратки розкладають немонохроматичне світло у спектр** (рис. 45.8). Такий спектр називається **дифракційним**.



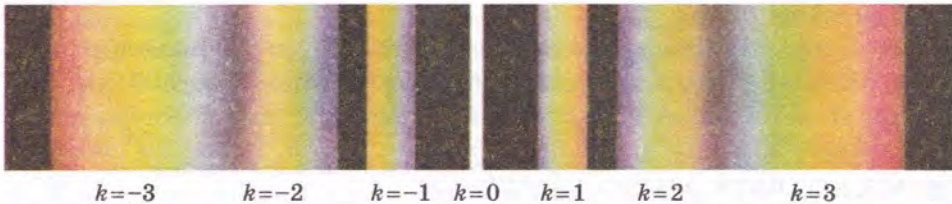


Рис. 45.8. Дифракційний спектр

2. Внаслідок того що довжина хвилі фіолетового кольору менша, ніж довжина хвилі червоного кольору, *в дифракційному спектрі червоні лінії розташовані далі від центрального максимуму, ніж фіолетові.*

3. Для центрального максимуму різниця ходу хвиль будь-якої довжини дорівнює нулю, тому він завжди має колір світла, що освітлює ґратку.

4. Вимірюючи кут  $\varphi$ , під яким спостерігається інтерференційний максимум  $k$ -го порядку, та знаючи період дифракційної ґратки, можна виміряти довжину світлової хвилі:  $\lambda = \frac{d \sin \varphi}{k}$ . ★

#### ★ 4 Вплив дифракції на роздільну здатність оптичних приладів

Будь-яка фізична теорія має межі застосування, в тому числі й геометрична оптика. Закони геометричної оптики виконуються досить точно тільки у випадку, коли розміри перешкод, що зустрічаються на шляху світлової хвилі, набагато більші, ніж довжина цієї хвилі. Описуючи дію оптичних пристроїв, ми користувалися законами геометричної оптики. Здавалося б, відповідно до цих законів за допомогою мікроскопів можна розрізняти як завгодно маленькі деталі об'єкта, а за допомогою телескопів спостерігати за як завгодно віддаленими об'єктами. Але це не так.

Дифракція не дозволяє отримати чіткі зображення дрібних предметів, розміри яких порівнянні з довжиною хвилі, оскільки такі предмети світло огинає.

Відстань  $l$  між двома найближчими точками, які можна побачити роздільно, називається *роздільною здатністю мікроскопа*.

Внаслідок дифракції хвиль на лінзі об'єктива телескопа зображення зорі має вигляд системи світлих і темних кілець (рис. 45.9). Якщо дві зорі розташовані на малій кутовій відстані, то їхні зображення збігаються. Найменший кут  $\varphi$ , під яким дві світні точки видно роздільно, називається *роздільною здатністю телескопа*. ★



Рис. 45.9. Зображення двох зір, розташованих на малій кутовій відстані одна від одної



**5 Учимися розв'язувати задачі**

**Задача.** На дифракційну ґратку, що містить 200 штрихів на 1 мм, падає плоска монохроматична хвиля довжиною 500 нм. Визначте: а) найбільший порядок спектра, який можна спостерігати за нормального падіння променів на ґратку; б) кут, під яким спостерігається максимум другого порядку.

$k_{\max}$  — ?  
 $\varphi$  — ?

Дано:

$$\lambda = 5,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$N = 200$$

$$l = 10^{-3} \text{ м}$$

$$k = 2$$

*Аналіз фізичної проблеми, розв'язання*

Формула дифракційної ґратки має вигляд:  $d \sin \varphi = k \lambda$ ,

де  $d = \frac{l}{N}$ . Звідси маємо:  $\sin \varphi = \frac{N k \lambda}{l}$ . Максимальному

$k$  відповідає  $\sin \varphi = 1$ , отже,  $k_{\max} = \frac{d}{\lambda} = \frac{l}{N \lambda}$ .

Визначимо значення шуканих величин:

$$\sin \varphi = \frac{200 \cdot 2 \cdot 5,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}}{10^{-3} \text{ м}} = 0,20, \text{ звідси } \varphi \approx 0,20 \text{ рад};$$

$$k_{\max} = \frac{10^{-3} \text{ м}}{200 \cdot 5,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}} = 10.$$

*Відповідь:*  $k_{\max} = 10$ ;  $\varphi \approx 0,20$  рад.

**! Підбиваємо підсумки**

Дифракцією світла називається огинання світловими хвилями межі непрозорих тіл і проникнення світла в ділянку геометричної тіні.

Кількісну теорію дифракції світла побудував Френель, сформулювавши принцип, який з часом отримав назву принцип Гюйгенса — Френеля: кожна точка хвильової поверхні є джерелом вторинної хвилі; вторинні джерела світла, які розташовані на одній хвильовій поверхні, є когерентними; хвильова поверхня в будь-який момент часу є результатом інтерференції вторинних хвиль.

Дифракційна ґратка — це спектральний прилад, що має вигляд періодично розташованих щілин та слугує для розкладання світла у спектр і вимірювання довжини хвилі. Головна характеристика ґратки — стала ґратки  $d$ , яка є її періодом:  $d = a + D = \frac{l}{N}$ .

Формула дифракційної ґратки:  $d \sin \varphi = k \lambda$ , де  $\varphi$  — кут, під яким спостерігаються головні максимуми  $k$ -го порядку для плоскої хвилі довжиною  $\lambda$ , що падає перпендикулярно до поверхні ґратки.

**? Контрольні запитання**

1. Що називається дифракцією? 2. Чому в повсякденному житті ми не спостерігаємо дифракцію світла? 3. Сформулюйте принцип Гюйгенса — Френеля. За яких умов спостерігається дифракція? За яких умов явищем дифракції можна знехтувати, описуючи поширення світла? 4. Опишіть дифракційні картини від різних перешкод. 5. Що таке дифракційна ґратка? У чому її принципова відмінність від окремої щілини? 6. Як впливає дифракція на роздільну здатність оптичних приладів?

**Вправа № 34**

1. Дифракційна ґратка має 250 штрихів на 1 мм. На ґратку падає монохроматичне світло з довжиною хвилі 550 нм. Під яким кутом видно перший дифракційний максимум? Скільки всього максимумів дає ґратка?
2. Визначте довжину хвилі монохроматичного світла, що падає на ґратку з періодом 3,33 мкм, якщо максимум першого порядку видно під кутом  $10^\circ$ .
3. Для вимірювання довжини світлової хвилі застосовано дифракційну ґратку, що має 1000 штрихів на 1 мм. Максимум першого порядку на екрані отримано на відстані 24 см від центрального. Визначте довжину хвилі, якщо відстань від дифракційної ґратки до екрана 1,0 м.
4. Дифракційна ґратка, що має 200 штрихів на 1 мм, розташована на відстані 2 м від екрана. На ґратку падає біле світло, максимальна довжина хвилі якого 720 нм, мінімальна — 430 нм. Знайдіть ширину спектра першого порядку.