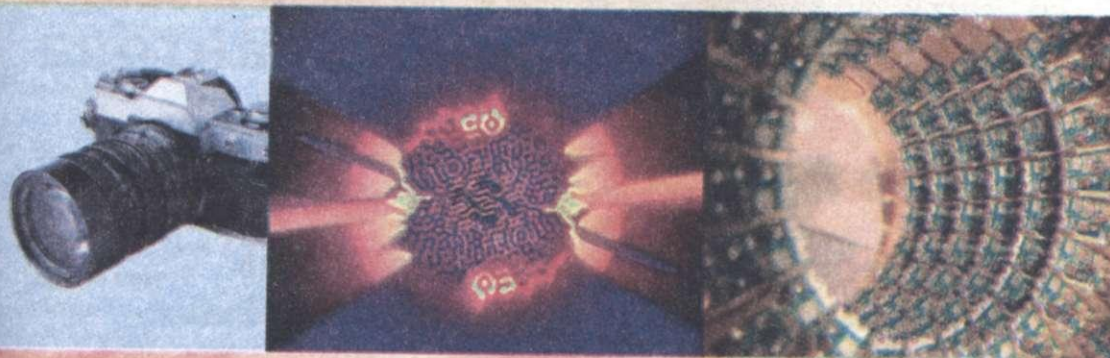


ОПТИКА І КВАНТОВА ФІЗИКА





Розділ 4 Хвильова і квантова оптика

- Розвиток поглядів на природу світла
- Поширення світла в різних середовищах. Явища на межі двох середовищ
- Інтерференція світла
- Дифракція світла
- Поляризація світла. Поперечність світлових хвиль і електромагнітна теорія світла
- Дисперсія світла
- Розвиток квантової фізики. Гіпотеза Планка
- Фотон. Енергія, маса, імпульс фотона. Фотоелектричний ефект
- Застосування фотоефекту
- Люмінесценція
- Квантові генератори та їх застосування
- Корпускулярно-хвильовий дуалізм світла

§ 31. РОЗВИТОК ПОГЛЯДІВ НА ПРИРОДУ СВІТЛА

Ви добре знаєте ще з 7 класу про те, що від джерела світла, наприклад від лампочки або свічки, світло поширюється в усі боки й падає на навколишні предмети, зокрема, нагріваючи їх. Потрапляючи в око, світло спричиняє зорове відчуття — ми бачимо те, що оточує нас. Можна сказати, що під час поширення світла передається дія від одного тіла — джерела світла — до іншого — приймача.

Взагалі ж одне тіло може діяти на інше двома різними способами: або переносити речовину від джерела до приймача, або ж змінювати стан середовища між тілами (у даному випадку речовина не переноситься).

Можна, наприклад, змусити задзвонити дзвінок, що перебуває на деякій відстані, вціливши в нього кулькою (мал. 140, а). При цьому відбувається перенесення речовини. Але можна діяти інакше: прив'язати шнур до осердя дзвінка і змусити дзвінок звучати, посилаючи по шнуру хвилі, які розгойдуватимуть його осердя (мал. 140, б). У цьому випадку речовина не переноситься. По шнуру буде поширюватися хвиля, змінюючи його стан (форму). Отже, дія від одного тіла до другого може передаватися хвилями.

Відповідно до двох можливих способів передавання дії від джерела до приймача виникли й почали розвиватися дві зовсім різні теорії про те, що таке світло і яка його природа. Причому виникли вони майже одночасно в XVII ст.

Одна теорія пов'язана з ім'ям І. Ньютона, а друга — з ім'ям К. Гюйгенса.

І. Ньютон дотримувався так званої **корпускулярної теорії світла**, згідно з якою **світло — це потік частинок**, що вилітають від джерела, прямуючи в усі боки (перенесення речовини).

За **хвильовою теорією К. Гюйгенса**, **світло — це хвилі**, що поширюються в особливому, гіпотетичному середовищі — ефірі, який заповнює увесь простір і проникає всередину всіх тіл.

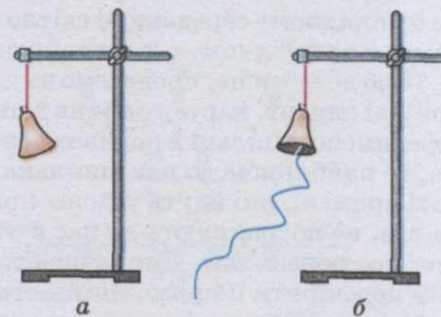
Обидві теорії тривалий час існували паралельно. Жодна з них не могла перемогти. Лише авторитет І. Ньютона змушував більшість учених віддавати перевагу корпускулярній теорії. Відомі на той час із дослідів закони поширення світла більш або менш успішно пояснювалися обома теоріями.

На основі корпускулярної теорії було важко пояснити, чому світлові пучки, перетинаючись у просторі, ніяк не діють один на одного. Адже світлові частинки повинні стикатися й розсіюватися.

Хвильова ж теорія це легко пояснювала. Хвилі, наприклад, на поверхні води вільно проходять одна крізь одну і не впливають одна на одну.

Проте за хвильовою теорією важко пояснити прямолінійне поширення світла, яке обумовлює утворення за предметами різких тіней. За корпускулярною ж теорією прямолінійне поширення світла — це просто наслідок закону інерції.

Таке непевне уявлення щодо природи світла тривало до початку XIX ст.,



Мал. 140

до того часу, поки не були відкриті явища дифракції (огинання світлом перешкод) та інтерференції світла (посилення або послаблення освітленості від накладання світлових пучків). Ці явища властиві тільки хвильовому руху. Пояснити їх за корпускулярною теорією не можна. Тому здавалося, що хвильова теорія остаточно перемогла.

Така впевненість особливо зросла після того, як Дж. Максвелл у другій половині XIX ст. показав, що світло є окремим випадком електромагнітних хвиль. Праці Максвелла заклали основи електромагнітної теорії світла.

Після того як Г. Герц експериментально виявив електромагнітні хвилі, ніяких сумнівів у тому, що **під час поширення світло поводить ся як хвиля, не лишилося.**

Проте на початку XX ст. уявлення про природу світла почали докорінно змінюватися. Несподівано з'ясувалося, що відкинута корпускулярна теорія все ж таки має під собою основу.

Під час випромінювання і поглинання світло поводить ся подібно до потоку частинок.

Було виявлено переривчасті, або, як кажуть, квантові властивості світла. Виникла незвичайна ситуація: явища інтерференції і дифракції, як і раніше, можна було пояснити, вважаючи світло хвилею, а явища випромінювання і поглинання — вважаючи світло потоком частинок. Ці два, здавалось би, несумісних одне з одним уявлення про природу світла в 30-х роках XX ст. вдалося несуперечливо об'єднати у новій видатній фізичній теорії — квантовій електродинаміці.

Пізніше з'ясувалося, що двоїстість властивостей характерна не тільки для світла, а й для будь-якої іншої форми матерії.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

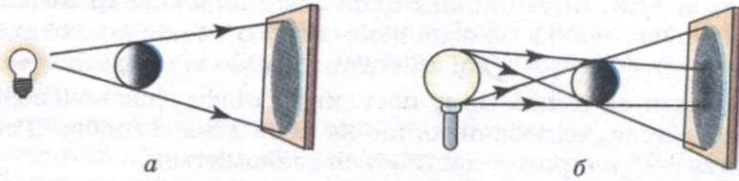
1. Які існують теорії світла і що вони пояснюють?
2. Хто є засновниками цих теорій?

§ 32. ПОШИРЕННЯ СВІТЛА В РІЗНИХ СЕРЕДОВИЩАХ. ЯВИЩА НА МЕЖІ ДВОХ СЕРЕДОВИЩ

1. Прямолінійне поширення світла. Як показують спостереження, в оптично однорідному середовищі світло поширюється прямолінійно. Іншими словами, в однорідному середовищі світлові промені — прямі лінії.

Щоб довести це, проведемо за допомогою лінійки відрізок прямої лінії на аркуші паперу, картону або на дошці. Увіткнемо біля кінців відрізка і в його середині по шпильці й подивимося вздовж накресленої лінії. Якщо лінія пряма, то найближча до нас шпилька закриватиме решту. Це означає, що світлові промені, які йдуть уздовж прямої від дальшої шпильки як від джерела світла, не потрапляють до нас в очі, тому що на їх шляху зустрічається непрозора перешкода. Дивлячись уздовж накресленої лінії, можна таким чином перевірити її прямолінійність.

Прямолінійністю поширення світла пояснюється утворення тіні, тобто ділянки, до якої не надходить світлова енергія. Якщо розміри джерела малі



Мал. 141

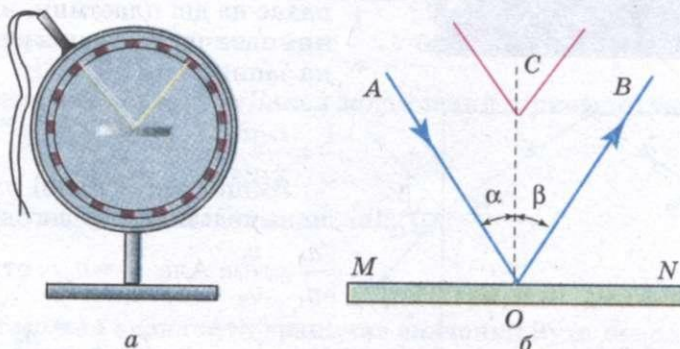
(світна точка), то спостерігається різко окреслена тінь (мал. 141, а). Якщо ж розміри джерела великі, то утворюються нерізкі тіні (мал. 141, б).

Справа в тому, що від кожної точки джерела світло поширюється прямолінійно, і предмет, освітлений вже двома світними точками, утворить дві тіні, які не суміщаються, й накладання яких дає нерівномірну тінь. Повна тінь від подовженого джерела утворюється лише на тих ділянках екрана, куди світло не потрапляє зовсім. По краях повної тіні проходить світліша ділянка. Це — **напівтінь**. У міру віддалення від повної тіні напівтінь стає все світлішою. Із повної тіні око зовсім не побачить джерело світла, а з напівтіні воно побачить лише частину його поверхні. У багатьох випадках тіні взагалі немає. Наприклад, у похмурий день не можна побачити тіні від стовпів, будинків та інших предметів. Під час хірургічних операцій операційне поле освітлюють безтіньовими лампами.

Внаслідок того, що в оптично однорідному середовищі світло поширюється прямолінійно, ми можемо спостерігати фази Місяця, сонячні й місячні затемнення.

2. Відбивання і заломлення світла.

Якщо за допомогою приладу (мал. 142, а) направити на дзеркальну поверхню в точку O пучок світла так, щоб промінь світла OA (мал. 142, б) лежав у площині приладу, то, дійшовши до поверхні, промінь світла змінить напрям свого поширення, тобто відбудеться відбивання світла. Завдяки досліді побачимо, що відбитий промінь OB також лежить у площині приладу. Якщо змінювати напрям падаючого променя, пересуваючи джерело світла, то при цьому буде змінюватися і напрям відбитого променя. Але обидва промені завжди будуть лежати в площині приладу. Можна провести перпендикуляр OC до поверхні, на яку падає промінь, і сформулювати закони відбивання світла:



Мал. 142

промінь падаючий, промінь відбитий і перпендикуляр до межі двох середовищ, проведений у точці падіння променя, лежать в одній площині. Кут відбивання β дорівнює куту падіння α .

Якщо направити на тонкостінну посудину з підфарбованою водою (мал. 143, а) промінь світла, то побачимо, що на межі двох середовищ світловий промінь змінить свій напрям — відіб'ється і заломиться.

Якщо виконати креслення (мал. 143, б), то побачимо, що кут відбивання β дорівнює куту падіння α , а при переході променя із повітря у воду кут заломлення γ менший за кут падіння α . Крім того, бачимо, що падаючий і заломлений промені лежать в одній площині з перпендикуляром, проведеним до межі двох середовищ у точці падіння променя. При переході променя із води в повітря кут заломлення γ_0 більший за кут падіння променя α_0 .

Отже, закони заломлення світла можна сформулювати так:

промінь падаючий, промінь заломлений і перпендикуляр до межі двох оптичних середовищ, проведений у точці падіння променя, лежать в одній площині.

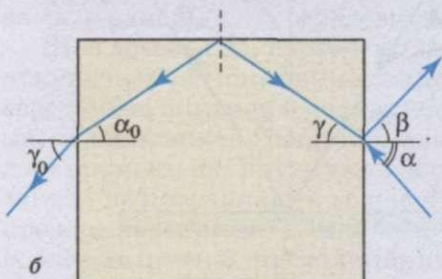
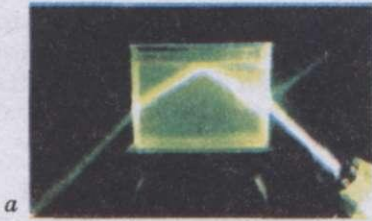
Відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення є величина стала для даних двох оптичних середовищ.

Цю величину називають **відносним показником заломлення** другого середовища відносно першого. Він визначається відношенням швидкості поширення світла в першому середовищі до швидкості світла в другому середовищі. Враховуючи розглянуте вище, запишемо:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21}.$$

Якщо першим середовищем є вакуум, то показник заломлення другого середовища називається **абсолютним показником заломлення**:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{c}{v} = n.$$



Мал. 143

Тепер визначимо співвідношення між відносним показником заломлення двох середовищ і їх абсолютними показниками заломлення. Нехай у вакуумі світло падає на дві пластини, виготовлені з різних оптично прозорих речовин. Тоді можна записати

$$n_1 = \frac{c}{v_1}, \quad n_2 = \frac{c}{v_2}.$$

Якщо ліві й праві частини цих рівнянь поділити одна на одну, то отримаємо

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}. \quad \text{Але } \frac{v_1}{v_2} = n_{21}, \quad \text{отже,}$$

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Таким чином, відносний показник заломлення двох оптично прозорих речовин визначається відношенням їх абсолютних показників заломлення.

3. Хід променів у трикутній призмі. У багатьох оптичних приладах використовується трикутна призма, виготовлена зі скла або інших прозорих матеріалів. Така призма — найважливіша деталь **спектроскопів** — приладів для дослідження кольорового складу світла. Її використовують у біноклях, перископах та багатьох інших приладах.

На мал. 144 зображено переріз скляної призми площиною, перпендикулярною до її бічних ребер. Промінь у призмі заломлюється двічі: на грані OA і на грані OB . Кут φ між цими гранями називають **заломним кутом призми**. Кут відхилення променя θ залежить від заломного кута призми φ , від показника заломлення n матеріалу призми і від кута падіння α .

4. Повне внутрішнє відбивання. Помістимо в посудину з водою спеціальне джерело світла, від якого в різні боки поширюються промені (мал. 145). Промінь, падаючий перпендикулярно до межі вода—повітря, не заломлюється. Промені, що падають під різними кутами до поверхні води, заломлюються по-різному. Але є промені, які взагалі не переходять з води у повітря, а повністю відбиваються від її поверхні.

Явище, коли промені світла не виходять із середовища і повністю відбиваються всередину, називається **повним внутрішнім відбиванням**.

Повністю світло відбивається від межі оптично більш густого середовища з оптично менш густим середовищем, коли кут падіння α дорівнює α_0 або більший за нього. Тому кут падіння α_0 , якому відповідає кут заломлення, що дорівнює 90° , називають **граничним кутом повного відбивання**.

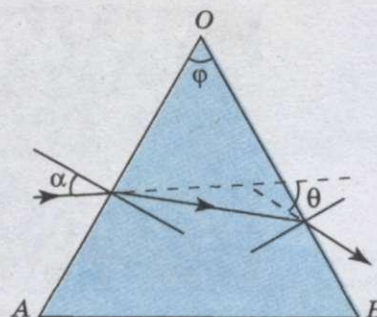
Якщо n — показник заломлення води відносно повітря ($n > 1$), то показник заломлення повітря відносно води буде $\frac{1}{n}$. У цьому випадку вода є першим середовищем, а повітря — другим. Закон заломлення записуємо так:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{1}{n}.$$

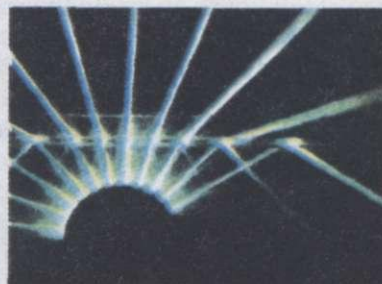
Якщо $\sin \gamma = 1$, то формула набуває вигляду

$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{n}.$$

З цієї рівності можна визначити граничне значення кута повного відбивання α_0 . Для води ($n = 1,33$) він дорівнює $48^\circ 35'$, для скла ($n = 1,5$) — $41^\circ 50'$, для алмазу ($n = 2,4$) — $24^\circ 40'$. В усіх випадках другим середовищем є повітря.



Мал. 144



Мал. 145



Мал. 146

Повне внутрішнє відбивання використовують у волоконній оптиці для передавання світла і зображення по пучках прозорих гнучких волокон — **світловодів** (мал. 146).

Якість зображення, що передається по світловоду, залежить від діаметра волокон і щільності їх укладання. Сьогодні є світлопроводи, діаметр волокон яких 1 нм, а число волокон досягає декількох десятків тисяч.

Волоконна оптика знайшла широке застосування в сучасній техніці й медицині. Так, для огляду внутрішніх органів хворого (шлунку, кишечника та ін.) застосовують волоконний гастроскоп, що складається з тонкого подвійного, дуже гнучкого світловода, який вводиться через стравохід або товсту кишку всередину порожнини, що оглядається. Через один із введених світловодів порожнина освітлюється, а через інший світловод оглядається або фотографується.

По світловодах, як по проводах, можна передавати будь-яку інформацію. Це дозволило створити автономні системи зв'язку, наприклад, на кораблях, в яких сигнали передаються по світловодах.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Які явища можуть відбуватися на межі двох середовищ?
2. Сформулюйте закони відбивання і заломлення світла.
3. Яка особливість поширення світла у тригранній призмі?
4. Обчисліть граничні кути для води і алмазу.
5. У воду опустили алмаз і такої ж форми скло. Що буде помітним у воді — алмаз або скло? Чому?
6. Що таке світловоди і де вони використовуються?



Це цікаво знати

Відкриття явища подвійного променезаломлення світла. У 1669 р. датський фізик **Е. Бартолін** (1625—1698) зробив два важливих відкриття, що були покладені в основу фізичної кристалографії. Так, в кристалах ісландського шпату вчений відкрив явище подвійного променезаломлення, а також встановив наявність у кристалах площин спайності. Результати своїх робіт Бартолін опублікував у Лейпцизі, Копенгагені, Лондоні. Але до цих важливих наукових відкриттів Англійське королівське товариство поставилось з недовірою, вважаючи їх випадковими. Тому вони були надовго забуті. Лише через 20 з лишнім років, у 1691 р. **К. Гюйгенс** (1628—1695) підтвердив правильність відкриття Бартоліна, спостерігаючи явище подвійного променезаломлення у кристалах кварцу (мал. 147).

Сьогодні відомо, що не лише ісландський шпат і кварц роздвоюють світло, а й багато інших кристалів мають цю властивість. Причиною подвійного променезаломлення є анізотропія швидкості світла в кристалах. До цих самих відкриттів Бартоліна і Гюйгенса прийшов І. Ньютон (1643—1727). Але довгий час дані експериментальні факти розцінювалися

як курйози, що притаманні тільки цим двом мінералам (ісландському шпату та кварцу).

Лише у 1801 р. **Р. Гаюї** у «Курсі мінералогії» наводить список мінералів, в яких спостерігається явище подвійного променезаломлення світла. Цей перелік він отримав за результатами власних досліджень. У праці також вперше було описано оптично ізотропні кристали, що мають ці властивості. Досліди Гаюї зводилися до того, що він розглядав крізь грані кристала (або крізь призму, виточену з нього) тонку голку для шиття. При цьому дослідник змінював положення голки. У випадку достатньо вираженого явища подвійного променезаломлення голка мала подвійне зображення. Вчений вже тоді помітив, що оптично ізотропні кристали повинні належати до однієї групи, яка сьогодні називається кубічною (правильною) сингонією. Розуміючи важливість урахування оптичних властивостей мінералів, Гаюї запропонував користуватися ними для визначення дорогіших каменів.



Мал. 147

Задачі та вправи

Розв'язуємо разом

Паралельний пучок світла падає на плоскопаралельну скляну пластинку під кутом α , синус якого дорівнює 0,8. Пучок, що вийшов з пластинки, зміщений щодо продовження падаючого пучка на відстань 2 см. Яка товщина пластинки l , якщо показник заломлення скла становить 1,7?

Розв'язання

Товщину пластинки визначимо із трикутника ABC (мал. 148): $l = AC \cos \beta$.

З формули $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$, маємо $\sin \beta = \frac{\sin \alpha}{n}$; $\sin \beta = 0,472$; $\beta = 28^\circ 6'$ і $\cos \beta = 0,882$.

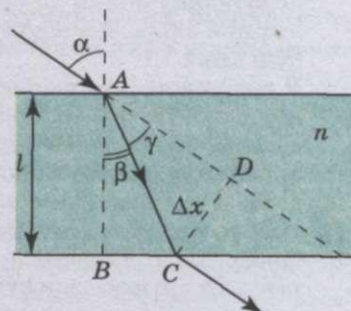
З трикутника ADC визначаємо

$$AC = \frac{\Delta x}{\sin \gamma} = \frac{\Delta x}{\sin(\alpha - \beta)}, \text{ тому що } \gamma = \alpha - \beta.$$

Оскільки $\sin \alpha = 0,8$, то $\alpha = 53^\circ 12'$.

$$\text{Остаточно маємо } l = \frac{\Delta x}{\sin(\alpha - \beta)} \cos \beta.$$

Підставивши значення відомих величин, отримуємо $l = 4,2$ см.



Мал. 148

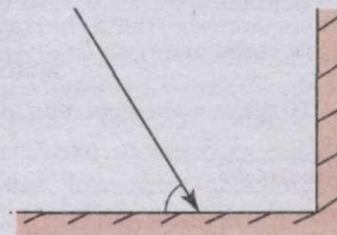
Рівень А

277. Наведіть приклади, які підтверджують прямолінійне поширення світла.
278. Кутова висота Сонця над горизонтом 20° . Як треба розташувати плоске дзеркало, щоб відбиті промені напрямити вертикально вгору?

279. Кут падіння пучка світла на плоске дзеркало дорівнює 20° . На скільки зміниться кут між падаючим і відбитим пучками, якщо кут падіння пучка збільшити до 35° ?
280. Промінь світла переходить із повітря у скло. Кут заломлення дорівнює 27° . Який кут падіння променя? Показник заломлення скла становить 1,7.
281. Кут падіння променя з повітря на поверхню води становить 60° , а кут заломлення — 40° . Який показник заломлення води? Який кут падіння променя, якщо кут заломлення дорівнює 45° ?
282. Промінь переходить із води у скло. Кут заломлення дорівнює 45° . Визначте кут падіння. Показник заломлення скла становить 1,5, а води — 1,33.
283. Людина стоїть на відстані 5 м від плоского дзеркала. На якій відстані від себе вона побачить своє відображення? Як зміниться відстань, якщо дзеркало відсунути від людини на 2 м?
284. Яке зображення прибережних дерев можна бачити в озері — пряме чи обернене?
285. Перед вертикально поставленим дзеркалом стоїть олівець. Побудуйте його зображення.
286. Визначте граничний кут повного відбивання для алмазу та плексигласу.
287. Граничний кут повного відбивання для спирту 47° . Визначте показник заломлення спирту.

Рівень В

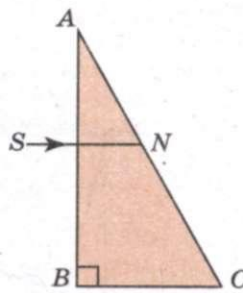
288. Людина дивиться в дзеркало, що висить вертикально. Чи змінюватимуться лінійні розміри тієї частини тіла людини, яку видно в дзеркалі, у міру віддалення її від дзеркала? Відповідь проілюструйте побудовою.
289. За якої умови кут заломлення більший від кута падіння? Яких номінальних значень можуть досягти кут падіння і кут заломлення у цьому випадку?
290. У кімнаті висить вертикальне дзеркало, верхній край якого розміщено на рівні тімені людини, зріст якої 182 см. Якою повинна бути мінімальна довжина дзеркала, щоб людина бачила себе в ньому на повний зріст?
291. Вузкий пучок світла падає на двогранний дзеркальний прямий кут у площині, перпендикулярній до ребра кута (мал. 149). Кут падіння пучка 60° , а точка падіння віддалена від ребра на 10 см. Яка відстань між падаючим і відбитим пучками?
292. У тарілку налито шар води завтовшки 3,8 см. На дні тарілки лежить плоске дзеркало. На поверхню води падає вузький пучок світла так, що кут падіння дорівнює 30° . На якій відстані від місця входу пучка світла у воду він, відбившись від дзеркала, знову вийде на її поверхню? Показник заломлення води становить 1,33.
293. Хлопчик намагається влучити палицею в камінь, який лежить на дні струмка глибиною 40 см. Хлопчик прицілюється палицею вздовж напрямку зору, який утворює з поверхнею води кут 60° . На якій відстані від каменя палиця увіткнеться в дно? Показник заломлення води дорівнює $4/3$.
294. Промінь падає під кутом 30° до поверхні скляної пластини завтовшки 2 см. Визначте бічне зміщення променя після проходження пластини. Показник заломлення скла дорівнює 1,5.
295. Яку фокусну відстань має плоске дзеркало?
296. Знайдіть побудовою зображення світної точки, що утворюється в двох плоских дзеркалах, розміщених одне відносно одного під кутом 120° .
297. Перед вертикально поставленим дзеркалом стоїть олівець. Побудуйте його зображення при умо-



Мал. 149

ві, що дзеркало, нахилене до площини, розмісти-
ли під кутом 45° .

298. Де треба розташувати лампочку в автомобільній фарі, щоб можна було напрямити світловий потік якомога далі? Близько вниз? Близько вгору?
299. Під яким кутом до горизонту аквалангіст, перебуваючи у воді, бачить Сонце, що сідає за горизонт?
300. Промінь SN падає на прямокутну скляну призму BAC (мал. 150) перпендикулярно до грані AB . Заломиться промінь на грані AC в точці його падіння N чи зазнає повного відбивання, якщо кут A дорівнює 30° ?



Мал. 150

§ 33. ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ СВІТЛА

Перед тим, як розпочати розгляд явища інтерференції світла, з'ясуємо спочатку, що це за явище.

Попередньо ми мали справу з однією хвилею, що поширюється від джерела. Але дуже часто в середовищі одночасно поширюється кілька різних хвиль. *Що ж відбувається в місцях, де хвилі накладаються одна на одну?*

Якщо дві хвилі зустрічаються в одному місці гребенями, то в цьому місці збурення води посилюється. Якщо ж, навпаки, гребінь однієї хвилі зустрічається із западиною іншої, то поверхня води не збурюватиметься.

У кожній точці середовища коливання, спричинені двома хвилями, додаються. Результуюче зміщення будь-якої частинки середовища — це сума зміщень, які б створювала кожна з хвиль, поширюючись без іншої.

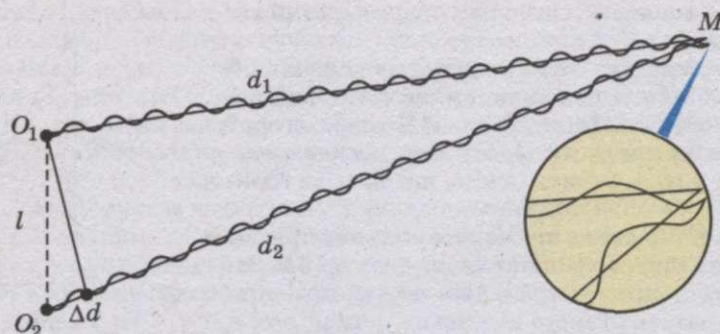
Додавання у просторі двох (або кількох) хвиль, коли відбувається постійний у часі розподіл амплітуд результуючих коливань у різних точках простору, називається інтерференцією.

З'ясуємо, за яких умов можлива інтерференція хвиль. Для цього розглянемо детальніше накладання хвиль на поверхні води. Наприклад, можна одночасно збудити дві колові хвилі у ванні за допомогою двох кульок, прикріплених до стержня, який гармонічно коливається (мал. 151). Тоді у будь-якій точці M на поверхні води (мал. 152) додаватимуться коливання, спричинені двома хвилями (від джерел O_1 і O_2). Амплітуди ж коливань, які збудили у точці M обидві ці хвилі, будуть розрізнятися, тому що хвилі проходять різні шляхи d_1 і d_2 . Проте, якщо відстань l між джерелами значно менша від цих шляхів ($l \ll d_1$ і $l \ll d_2$), то обидві амплітуди можна вважати практично однаковими.

Результат додавання хвиль, які приходять у точку M , залежатиме від різниці фаз між ними. Якщо хвилі проходять різні відстані d_1 і d_2 , то вони мають різницю ходу $\Delta d = d_2 - d_1$. Коли різниця ходу дорівнює довжині хвилі λ , це озна-



Мал. 151



Мал. 152

чає, що друга хвиля запізнюється порівняно з першою на один період (якраз за період хвиля проходить шлях, що дорівнює довжині хвилі). Отже, в цьому випадку гребені (або западини) обох хвиль збігатимуться.

На мал. 153 зображено залежність від часу зміщень x_1 і x_2 , спричинених двома хвилями, коли $\Delta d = \lambda$. Різниця фаз коливань дорівнює нулю (або 2π , оскільки період синуса дорівнює 2π). Внаслідок додавання цих коливань виникає результуюче коливання x із подвоєною амплітудою.

Амплітуда коливань середовища в даній точці буде максимальною, якщо різниця ходу двох хвиль, що збуджують коливання в цій точці, дорівнює цілому числу довжин хвиль:

$$\Delta d = k\lambda,$$

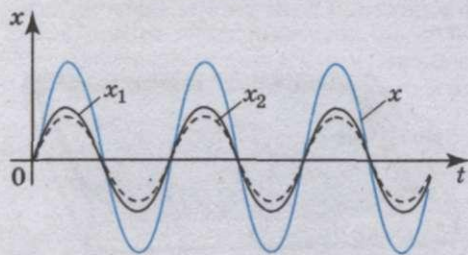
де $k = 0, 1, 2, \dots$

Ця умова називається умовою максимумів.

А що буде, коли на відрізку Δd вміщується половина довжини хвилі? Очевидно, що друга хвиля відставатиме від першої на половину періоду. Різниця фаз дорівнюватиме π , тобто коливання відбуватимуться в протифазі. Внаслідок додавання цих коливань амплітуда результуючого коливання дорівнює нулю і у розглядуваній точці коливання відсутні (мал. 154). Те саме спостерігається, якщо на відрізку вміщується будь-яке непарне число півхвиль.

Амплітуда коливань середовища в даній точці буде мінімальною, якщо різниця ходу двох хвиль, що збуджують коливання в цій точці, дорівнює непарному числу півхвиль:

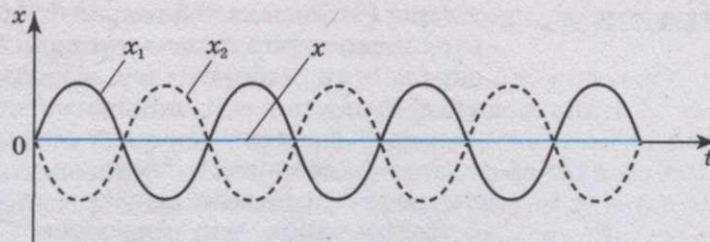
$$\Delta d = (2k+1)\frac{\lambda}{2}.$$



Мал. 153

Якщо різниця ходу $\Delta d = d_2 - d_1$ має проміжне значення між λ і $\frac{\lambda}{2}$, то й

амплітуда результуючого коливання набуває деякого проміжного значення між подвоєною амплітудою і нулем. Але найважливішим є те, що амплітуда коливань у будь-якій точці не змінюється з



Мал. 154

часом. На поверхні води виникає певний розподіл амплітуд коливань, який називають **інтерференційною картиною** (мал. 155).

Щоб отримати стійку інтерференційну картину, джерела хвиль повинні мати однакову частоту, і фази їх коливань повинні збігатися або розрізнятися на деяку сталу (незалежну від часу) величину. Різниця фаз коливань обох джерел має лишатися незмінною. Джерела, які відповідають цим умовам, називаються **когерентними**. Когерентними називають і утворені ними хвилі.

Тільки після додавання когерентних хвиль спостерігається стійка інтерференційна картина.

Якщо ж різниця фаз коливань джерел непостійна, то різниця фаз коливань, збуджуваних двома хвилями в будь-якій точці середовища, змінюватиметься. Тому й амплітуда результуючих коливань змінюється з часом. Внаслідок цього максимуми і мінімуми переміщуються в просторі, інтерференційна картина стає розмитою.

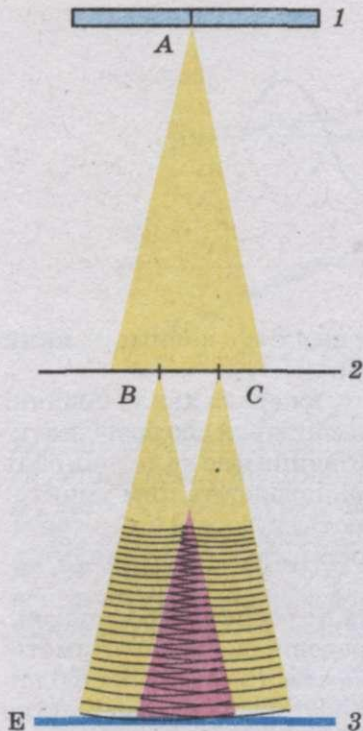
Інтерференція властива хвильовим процесам будь-якої природи. Можна, зокрема, спостерігати інтерференцію звуку. Велике значення інтерференції полягає в тому, що коли в процесі вивчення якогось явища буде виявлено **інтерференцію**, це означатиме, що маємо справу з хвильовим рухом.

Поширюючись у просторі, хвилі переносять енергію. *Що ж відбувається з цією енергією тоді, коли хвилі гасять одна одну?* Може вона перетворюється в інші форми і в мінімумах інтерференційної картини виділяється теплота? Нічого подібного. Мінімум у даній точці інтерференційної картини означає, що енергія сюди не надходить зовсім. **Внаслідок інтерференції енергія перерозподіляється у просторі.** Вона розподіляється нерівномірно на усіх ділянках середовища, а концентрується в максимумах і тому зовсім не надходить у мінімуми.

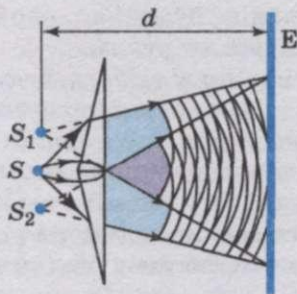
У 1802 р. англійський фізик **Т. Юнг** поставив дослід, в якому спостерігав інтерференцію світла. Дослід проходив в добре затемненій кімнаті. Схему дослідів наведено на мал. 156. Світло від Сонця падало на ширму 1, в якій було зроблено отвір *A* у вигляді щілини. Світло від освітленої щілини падало на ширму 2, в якій зробили дві вузькі щілини *B* і *C*. Оскільки щілини *B* і *C* були розташовані симетрично щілині *A*, то світло від щілини *A* до них доходило одночасно, отже, і щілини *B* і *C* були когерентними джерелами світла,



Мал. 155



Мал. 156



Мал. 157

від них світло падало на екран 3. При цьому на екрані спостерігалася наступна картина: краї екрану були слабо освітлені, а в середині екрану, де пучки світла від щілин накладалися один на одного, спостерігалася чергування декількох світлих (веселкових) і темних смуг, що свідчило про інтерференцію світла.

Таким чином, завдяки досліді Юнга можна говорити про те, що світло має хвильові властивості.

Проте, якщо у досліді Юнга замість двох щілин, що освітлюються одним і тим же джерелом світла, взяти два незалежні джерела світла (наприклад, дві лампи розжарення), то явище інтерференції не спостерігатиметься. Чому?

Ви вже знаєте, що інтерферують тільки когерентні хвилі. При інтерференції двох когерентних хвиль з однаковими амплітудами x_{\max} амплітуда результуючих коливань буде максимальною і дорівнюватиме $2x_{\max}$ у точках, різниця фаз в яких становить нуль або різниця ходу до яких — парне число півхвиль. У тих точках, в яких різниця фаз або різниця ходу дорівнює непарному числу півхвиль, хвилі гасять одна одну і амплітуда результуючої хвилі дорівнює нулю.

Хвилі, що випромінюються звичайними джерелами, не є когерентні: у них різні початкові фази. Тому в кожній точці простору амплітуда результуючої хвилі хаотично і швидко змінюється. Оскільки нашому оку властива інерційність і воно реєструє лише середні значення амплітуд, то інтерференційна картина в цьому випадку не спостерігається.

Французький фізик **О. Френель** запропонував дотепний спосіб отримання двох когерентних систем світлових хвиль від одного джерела світла. Суть запропонованого Френелем способу полягає у розділенні однієї світлової хвилі на дві когерентні. При накладенні цих хвиль

Френель спостерігав їх інтерференцію.

В одному зі своїх дослідів Френель розділяв світлову хвилю від джерела S (мал. 157) за допомогою двох тонких скляних призм, склеєних основами. Таку призму називають **біпризмою Френеля**. Основу біпризми розташовують паралельно яскраво освітленій щілині. Як і в досліді Юнга, інтерференційна картина спостерігалася на екрані E .

Якщо щілину освітлювати монохроматичним (одноколірним) світлом, то всі світлі смуги інтерференційної картини будуть мати такий же колір. Якщо ж щілину освітлювати білим світлом, то інтерференційна картина буде різно-

колірною. А саме, у кожній світлій смузі спостерігатиметься плавний перехід кольорів від червоного до фіолетового.

Якщо ми отримаємо на дротяному каркасі плівку мильного розчину і направимо на нього світловий пучок від проекційного апарата, то побачимо на плівці кольорове забарвлення. Коли на шляху світлового пучка поставити червоний світлофільтр, то замість кольорових смуг ми побачимо одноколірні червоні смуги, розділені темними смугами. Картина нагадує інтерференційні смуги, отримані за допомогою дзеркал Френеля. Якщо червоний світлофільтр замінити зеленим, то світлі смуги будуть зеленими. Це наводить на думку, що спостережуване явище є результатом інтерференції світла.

Які ж два світлові пучки інтерферують в цьому випадку? Очевидно, що при падінні світла на плівку воно відбивається від передньої і задньої поверхонь цієї плівки. При цьому між пучками, відбитими від передньої і задньої поверхонь, виникає різниця ходу, яка залежить від товщини плівки і матеріалу, з яким плівка стикається.

Якщо різниця ходу дорівнює цілому числу довжин хвиль, то відбудеться підсилення відбитої хвилі, а якщо різниця ходу дорівнює половині хвилі або непарному числу півхвиль, то відбудеться послаблення відбитої хвилі.

Явище інтерференції світла знаходить широке застосування в сучасній техніці. Одним із таких застосувань є створення «просвітленої» оптики. Відполірована поверхня скла відбиває приблизно 4% світла, що падає на неї. Сучасні оптичні прилади складаються з великого числа деталей, виготовлених із скла. Проходячи через кожну з цих деталей, світло ослабляється на 4%. Загальні втрати світла в об'єктиві фотоапарата становлять приблизно 25%, в призматичному біноклі і мікроскопі — 50%.

Для зменшення світлових втрат в оптичних приладах всі скляні деталі, через які проходить світло, покривають плівкою товщиною в чверть світлової хвилі, показник заломлення якої менший за показник заломлення скла.

Явище інтерференції використовують для контролю якості оброблюваної поверхні.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що таке інтерференція?
2. Сформулюйте умови максимумів і мінімумів інтерференційної картини.
3. Які хвилі називаються когерентними?
4. Намалюйте схему досліду Юнга і поясніть його результати.
5. Намалюйте схему досліду Френеля і поясніть його хід і результати.
6. На дротяному каркасі отримана мильна плівка товщиною $\frac{\lambda}{4}$. Поясніть, як і яка інтерференційна картина утворюється в цьому випадку.
7. З якою метою лінзи оптичних приладів покривають спеціальною плівкою?
8. Використовуючи літературні джерела або Інтернет-ресурси, з'ясуйте, як контролюють якість поверхонь деталей за допомогою інтерферометрів.

§ 34. ДИФРАКЦІЯ СВІТЛА

Ви ознайомилися з хвилями, які поширюються в однорідному середовищі. Тепер подивимося, що відбувається з хвилями, коли їх напрямляють на перешкоду, наприклад на тверду стінку.

Загальний принцип, який описує хвильові явища, вперше сформулював сучасник Ньютона голландський учений К. Гюйгенс. За принципом Гюйгенса кожна точка середовища, до якої дійшло збурення, сама стає джерелом вторинних хвиль. Для того щоб, знаючи положення хвильової поверхні в момент часу t , знайти її положення в наступний момент часу $t + \Delta t$, треба кожному точці хвильової поверхні розглядати як джерело вторинних хвиль.

Поверхня, дотична до всіх вторинних хвиль, є хвильовою поверхнею в наступний момент часу (мал. 158). Цей принцип однаково придатний для опису поширення будь-яких хвиль.

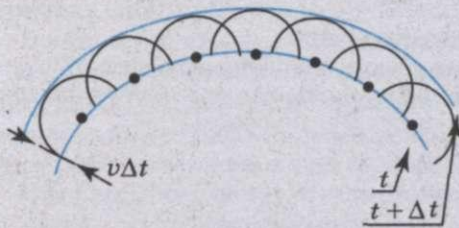
Огинати перешкоди можуть будь-які хвилі.

Відхилення від прямолінійного поширення хвиль, огинання хвилями перешкод називається дифракцією (з лат. *diffractus* — розламаний).

Дифракційні явища легко спостерігати тоді, коли розміри перешкоди порівнянні з довжиною хвилі. Проте довжина світлової хвилі дуже мала, тому огинання перешкод дуже незначне і спостерігати його можна лише за спеціальних умов.

Для спостереження дифракції світла необхідно брати або дуже маленькі перешкоди, або проводити спостереження на дуже великих відстанях, щоб були помітні невеликі відхилення світлових хвиль від прямолінійного поширення біля країв перешкод. Крім того, приміщення, в якому відбуваються досліди зі спостереження дифракції світла, повинне бути добре затемнене, оскільки дифракційні картини мають незначну освітленість.

У добре затемненому приміщенні перед яскравим точковим джерелом світла, розміщеним у пристрої з отвором 10—12 мм, поставимо непрозору ширму з прямокутною щілиною, ширину якої можна змінювати (мал. 159, *a—e*). При ширині щілини 1—2 мм на екрані видно яскраву світлу смужку з чітко окресленими краями (мал. 159, *a*). Поступово зменшуючи ширину щілини, помічаємо, що чіткість країв яскравої смужки на екрані поступово порушується: смужка стає ширшою, її освітленість зменшується і зникає до країв. При подальшому зменшенні ширини щілини справа і зліва від освітленої смужки з'являються слабо помітні кольорові смуги (на мал. 159, *e* вони показані чорно-білими, а на мал. 160, *a* — кольоровими).



Мал. 158

Якщо перед джерелом світла поставити світлофільтр, то кольорові смуги стають одноколірними (мал. 160, *b, e*).

Дослід з дифракції світла на щілині можна продемонструвати інакше. У добре затемненому довгому приміщенні встановимо точкове джерело світла. Приблизно на відстані 15 м від джерела поставимо непрозору для світла ширму, в якій зробимо щілину