

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника

Фізико-технічний факультет

Кафедра фізики і методики викладання

## ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття другого (магістерського) рівня вищої освіти на  
тему:

**«Хвильова оптика в шкільному курсі фізики»**

**Виконала:** студентка II курсу,  
групи Ф(со)м-21  
спеціальності  
014.08 Середня освіта (Фізика)  
Блискун Марія Іванівна

**Науковий керівник:**  
Доктор фізико-математичних наук,  
професор, професор кафедри  
матеріалознавства і новітніх технологій  
Гасюк Іван Михайлович

**Рецензент:** доктор фізико-математичних  
наук, професор, професор кафедри  
матеріалознавства і новітніх технологій  
Яремій Іван Петрович

Івано-Франківськ

2022

## Анотація

У пропонованій дипломній роботі сформовано цілісний методичний підхід для створення коректних розумінь, основних положень та законів вчення про світло при вивченні розділу «Хвильова оптика». Дипломна робота викладена на 56 сторінок, вона містить 2 розділи, 34 ілюстрації, 20 джерел в переліку посилань. Метою роботи є вироблення найбільш адекватного дидактичного підходу до засвоєння учнями школи основних понять хвильової оптики, та їх значення для формування фізичної картини світу.

У першому розділі проаналізовані особливості викладання розділу у пропонованих до використання підручниках української школи, проведено дослідження напрацювань закордонних та українських авторів, для покращення результатів навчання з даної тематики. У другому розділі роботи акцент зроблений на розробленні розширеного контексту викладення розділу «Хвильова оптика» з урахуванням доцільності використання та послідовності виконання демонстраційного експерименту і модельного пояснення навчального матеріалу.

За результатами роботи зроблено висновки та пропозиції до викладання теми «Хвильова оптика в шкільному курсі фізики».

## Зміст

Вступ.....	4
РОЗДІЛ I. АНАЛІЗ СПОСОБІВ ВИКЛАДАННЯ МАТЕРІАЛУ РОЗДІЛУ «ХВИЛЬОВА ОПТИКА В ШКІЛЬНОМУ КУРСІ ФІЗИКИ».....	8
1.1. Дидактичні підходи до викладу понять про світло у актуальних підручниках для загальноосвітньої школи України.....	8
1.2. Огляд дидактичних прийомів удосконалення подачі навчального матеріалу з хвильової оптики.....	16
РОЗДІЛ II. УДОСКОНАЛЕННЯ ПОРЯДКУ ВИКЛАДУ ТА СПОСОБІВ ПОДАЧІ ОСНОВНИХ ПОНЯТЬ ХВИЛЬОВОЇ ОПТИКИ ДЛЯ УЧНІВ СТАРШИХ КЛАСІВ ЗАГАЛЬНООСВІТНЬОЇ ШКОЛИ.....	23
2.1. Основні ввідні поняття та означення хвильової оптики.....	23
2.2. Формування основних компетентностей учнів при вивченні інтерференційних явищ.....	25
2.3. Демонстраційний експеримент, як визначальний фактор формування уявлень про дифракцію світла її прояви та застосування.....	41
2.3.1. Принцип Гюйгенса-Френеля. Метод зон Френеля.....	41
2.3.2. Дифракція на щілині, прямокутному та круглому отворах.....	44
2.3.3. Дифракція на двох щілинах.....	49
2.3.4. Дифракційна решітка. Похиле падіння променів на решітку. Дифракційна решітка, як спектральний прилад.....	49
2.3.5. Вплив дифракційних, інтерференційних явищ на якість зображення у оптичних приладах.....	51
Висновки.....	52
Список використаної літератури.....	54

## Вступ

Новаторські ідеї таких відомих фізиків, як Планк і Ейнштейн, були реалізовані на початку ХХ століття. Широкого поширення набула фізика фотон або квантова оптика, що пояснює багато явищ, які важко пояснити в контексті електромагнітної теорії світла.

Звісно виникає питання про співвідношення між двома теоріями світла. Абсурдність протиставлення електромагнітної теорії світла і фотонної фізики швидко стала очевидною. Виявляється, що опис хвильових характеристик світла (інтерференції, дифракції та пов'язаних з ними явищ) все ще відноситься до електромагнітної теорії, тоді як деякі енергетичні характеристики випромінювання повністю описуються фотонною фізикою. Крім питань, які розглядаються тут, цей метод є комбінацією квантово-механічних досліджень навколишнього середовища (властивостей атомів і молекул) і використання класичних електродинамічних законів (рівнянь Максвелла) щодо електромагнітних полів. Цей метод дозволяє успішно вирішити більшість оптичних проблем. Тільки коли необхідно враховувати шум (хвилі, спонтанне лазерне випромінювання тощо), слід враховувати не лише дискретну природу атомного поглинання та випромінювання світла, а й квантування електромагнітних полів (тобто використання квантової електродинаміки). Цікаво, що фотоефект, який вперше ввів в інтерпретацію поняття фотонів, можна повністю описати напівкласичними методами.

Відродження на новій основі корпускулярної теорії світла і те, що вона не протистоїть хвильовій теорії, а доповнює її, є цілком природним. У ХХ ст. суперечка, яку свого часу вели великі фізики Ньютон і Гюйгенс, виглядав би абсолютно безглуздим. Добре відомо, що наявність цих двох зовні суперечливих теорій відображає складну дуальну природу світла, характерну для всієї навколишньої матерії.

Так, наприклад, прийняті уявлення про вільний електрон як частинку. Справді, існування електрона можна зафіксувати відповідними приладами, пристосованими для реєстрації заряджених частинок. Але водночас можна експериментально виявити хвильові властивості вільного електрона, які

описуються хвилями де Бройля і використовують у техніці під час розрахунку електронного мікроскопа.

Тому не можна віддати перевагу якомусь одному способу опису явища, оскільки не можна поставити дослід, який дозволив би зробити однозначний вибір між описом термінів хвиль і термінах корпускул.

Розвиток сучасної оптики відображає основні ідеї квантової механіки, у якій ймовірність знаходження частки будь-якої області простору характеризується функцією, хвильові властивості якої очевидні. Перехід від хвильової оптики до корпускулярної теорії світла відбувається так, як це вимагає квантова механіка, і використання принципу доповнюваності Бора в цьому випадку буде цілком доречним.

Слід враховувати, що розвиток сучасної оптики - це як електромагнітної теорії світла, і фізики фотонів. На це твердження потрібно звернути увагу, оскільки іноді висловлюється думка, що зводиться до уявлення про електромагнітну теорію світла як про науку, яка завершена працями її творця Максвелла та інших знаменитих фізиків, які працювали межі XIX і XX ст. Усі подальші успіхи оптики часто пов'язують лише з розвитком фізики фотонів. Така думка неправильна і несучасна, тому що при цьому фактично протиставляються дві сторони одного і того ж складного процесу, що вимагає дуального опису.

Зауважимо також, що при створенні методів та приладів сучасної оптики фізики завжди поєднують у своєму мисленні хвильову теорію світла та фотонну оптику. Оптика – це не є розділ фізики у конкретному і прямому розумінні. Якщо ми розглядаємо механіку, термодинаміку, електрику, атомну і ядерну фізику, то там є всі ознаки науки, наукової теорії. Тобто, всі ці розділи базуються на аксіоматичному принципі. Коли говориться про оптику, то аксіоми не згадуються. Оптика – це, можна сказати, технічний розділ загальної фізики, застосування відомих законів, наслідків електродинаміки для конкретного випадку взаємодії електромагнітних хвиль.

Вивчення розділу «Хвильова оптика» у шкільному курсі фізики, передбачено навчальною програмою, рекомендованою МОН, у завершальному семестрі випускного класу. Це зумовлює певні складнощі як з точки зору мотивації дітей до вивчення предмету, так і через суто методично-організаційні фактори, пов'язані з передумовами викладання теми і формування відповідних компетентностей. Зокрема, у існуючих підходах майже не враховується той факт, що компетентності отримані у процесі вивчення теми, впливають на формування світоглядних понять, таких як розуміння корпускулярно-хвильового дуалізму, уявленні про будову світу, основних теорій влаштування мікро- та макросвіту, розвитку інструментальної бази для дослідження природи. До того ж, у діючих підручниках поняття хвильової оптики подаються як розрізнені, окремі поняття, не акцентується увага на тому, що всі хвильові явища у спостереженні світла є проявами хвильової природи. І якщо деяка увага приділяється роз'ясненню переходу від хвильової до квантової оптики, то практично не пояснюються закони геометричної оптики із позиції інтерференції хвиль. Отже, питання вдосконалення методики викладання розділу «Хвильова оптика» у рамках шкільного курсу є **актуальною** задачею сучасної дидактичної науки.

**Мета дослідження** – виробити найбільш адекватний дидактичний підхід до засвоєння учнями школи основних понять хвильової оптики та їх значення для формування фізичної картини світу.

**Предметом** нашого дослідження стали основні дидактичні прийоми при викладанні понять хвильової оптики у шкільному курсі фізики.

**Об'єктом** дослідження стали процеси набуття учнями основних компетентностей, пов'язаних з розумінням хвильової природи світла та її зв'язку з іншими ключовими поняттями фізики.

**Завдання дослідження:**

- Проаналізувати наявні у шкільній програмі підходи до вивчення «Хвильової оптики» та виокремити основні проблемні дидактичні моменти.

- Зробити аналіз наявних сучасних вітчизняних та зарубіжних публікацій, щодо способів вдосконалення викладання заданої теми.
- Розробити оптимальний з позиції дидактики порядок викладання питань інтерференції та дифракції світла, для досягнення якнайкращого дидактичного ефекту і удосконалення формування загальної фізичної картини світу, для учнів школи.

У пропонованій дипломній роботі зроблено спробу сформуванати цілісний методичний підхід для створення коректних розумінь, основних положень та законів вчення про світло при вивченні розділу «Хвильова оптика». Проаналізовані особливості викладання розділу у пропонованих до використання підручниках української школи, проведено дослідження напрацювань закордонних та українських авторів дидактичних прийомів для покращення результатів навчання з даної тематики. В оригінальній частині роботи акцент зроблений на розробленні розширеного контексту викладання розділу «Хвильова оптика» з урахуванням доцільності використання та послідовності виконання демонстраційного експерименту і модельного пояснення навчального матеріалу.

## РОЗДІЛ I. АНАЛІЗ СПОСОБІВ ВИКЛАДАННЯ МАТЕРІАЛІВ РОЗДІЛУ «ХВИЛЬОВА ОПТИКА В ШКІЛЬНОМУ КУРСІ ФІЗИКИ».

### 1.1. Дидактичні підходи до викладу понять про світло у актуальних підручниках для загальноосвітньої школи України.

Набуття учнями основних компетентностей з теми «Хвильова оптика» визначається формуванням розумінь низки фундаментальних понять, які означаються у попередньо вивчених розділах «Електрика і магнетизм», «Коливання і хвилі». Така логіка викладу матеріалу є цілком прийнятною, особливо якщо зважати на те, що у ній передбачається апріорне формування основних базових означень, таких як «хвиля», «фронт хвилі», «параметри хвилі (довжина, частота, амплітуда, фаза, швидкість поширення)», а також уявлення про поперечність електромагнітної хвилі. Ці поняття, поряд із попередньо вивченими означеннями і законами геометричної оптики, повинні стати понятійною основою розуміння явищ хвильової оптики. Основні підручники для школи, рекомендовані МОН України, в основному притримуються такого підходу. Проведемо частковий аналіз викладу матеріалу у сучасних вітчизняних підручниках.

У підручниках[1,2] авторів Т.Засєкіна та Д.Засєкін вивчення хвильових властивостей світла розпочинається з означення явища інтерференції.

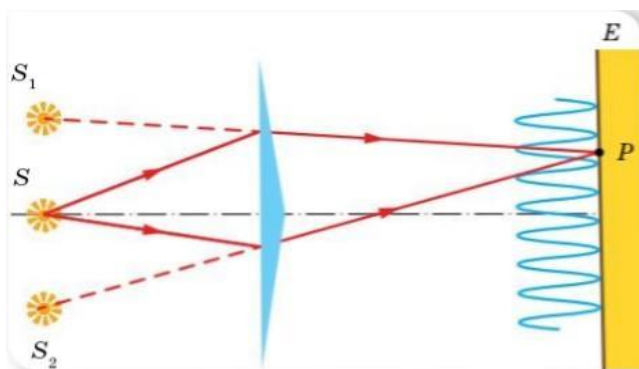


Рис. 1. Схема досліду Френеля.

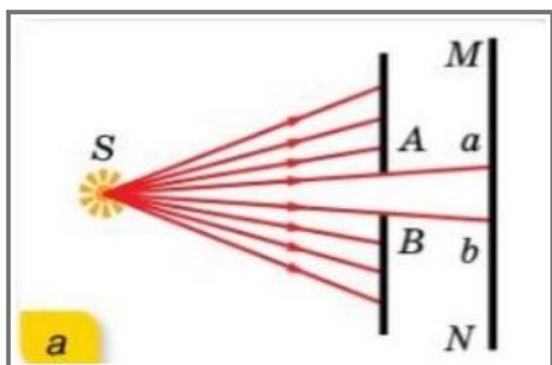
Інтерференцією традиційно називають додавання в просторі двох і більше хвиль, за якого відбувається постійний у часі розподіл амплітуд результуючих коливань. Для її отримання необхідне виконання деяких умов: зазначається, що



для того, щоб інтерференційна картина була стійкою, потрібні узгоджені хвилі, тобто такі, що мають однакові довжини й сталу різницю фаз у будь-якій точці простору. Хвилі, які відповідають цим умовам, називають когерентними, відповідно, когерентними називають і джерела, які їх випромінюють. Для одержання когерентних джерел світла вдаються до штучного прийому: пучок світла від одного джерела розділяють на два або кілька пучків, які йдуть різними шляхами, і в подальшому зводяться й накладаються один на один. Якщо ці пучки пройдуть різну відстань, то між ними виникне різниця фаз. У разі накладання таких пучків і виникає стійка інтерференційна картина. На рис. 1. наведено схему досліду Френеля для одержання когерентних джерел світла за допомогою так званої біпризми Френеля. При цьому звертається увага на більш просту для розуміння ілюстрацію за допомогою методу Юнга, щоправда, такий підхід використано авторами у підручнику [2] для профільного рівня. До недоліків підходу також слід віднести відсутність класифікації методів отримання когерентних джерел (поділ фронту хвилі та поділ амплітуди хвилі). Не акцентується також особлива увага на відмінності інтерференційних явищ у механіці та оптиці.

Традиційно дифракція світла у [1, 2] означається як явище огинання хвилями перешкод, що є у шкільній програмі чомусь усталеною, але методично помилковою практикою. Зазначається, що спостерігати дифракцію світла не так легко. Річ у тім, що хвилі відхиляються від прямолінійного поширення на помітні кути лише на перешкодах, розміри яких порівняно з довжиною світлової хвилі. Тому для перешкод великих, порівняно з довжиною хвилі, дифракцію можна спостерігати на значній відстані від перешкоди. Якщо від джерела  $S$  пропустити пучок світла крізь отвір  $AB$  (рис. 2), то на екрані дістанемо світлу пляму. Діаметр цієї плями відповідає ширині світлового пучка, що падає на екран. Зменшуючи отвір  $AB$ , ми спостерігатимемо, що зменшується і пляма, тобто звужується пучок світла. Проте, починаючи з деякого розміру отвору, подальше його зменшення спричинює збільшення плями. Водночас пляма втрачає чіткість, вона розширена й нерівномірно освітлена. У підході

підручника [1] практично відсутнє з'ясування фізичної суті дифракційних явищ, а поняття про дифракційну решітку подається як суто візуальний ефект.



*Рис.2. Дослід з виявлення залежності вигляду світної плями від розмірів отвору.*

Дещо складним, на нашу думку, є означення авторами дисперсії світла. Термін «дисперсія хвиль» означає залежність фазової швидкості гармонічної хвилі від частоти (довжини) хвилі та, як наслідок, зміну форми довільних (негармонічних) збурень у процесі їх поширення. Під дисперсією світла, за версією авторів [1,2] розуміють сукупність оптичних явищ, зумовлених залежністю діелектричної проникності речовини (а відповідно, і показника заломлення) від частоти (довжини) світлової хвилі. Оскільки колір світла визначається частотою світлової хвилі, то вживають і таке визначення: дисперсія світла - це залежність показника заломлення світла (а отже, і швидкості) від його кольору. Тобто тут, поряд із великою кількістю недоозначених складних наукових термінів, вживається «нефізичне» поняття кольору, без врахування більш широкого оптичного діапазону довжин хвиль, крім видимих.

У підручнику [3] авторів В.Сиротюк, Ю. Мирошніченко вивчення хвильових явищ у оптиці розпочинається з дисперсії, дисперсією хвиль називають залежність їхньої швидкості від частоти. Залежність фазової швидкості хвиль від їхньої частоти виявляється в тому, що показник заломлення хвиль також залежить від частоти. А це, у свою чергу, свідчить про те, що на межі з диспергуючим середовищем біле світло розкладається на його

складові. А чи залежить швидкість світла у вакуумі від частоти коливань? Уявімо, що у вакуумі на значній відстані від нас розміщено потужне джерело світла, яке періодично закривається непрозорою ширмою, і відкривається. Якщо всі світлові хвилі незалежно від частоти коливань поширюються у вакуумі з однаковою швидкістю, то ми маємо побачити, що світло, яке випромінюється далеким джерелом, миготить, але його колір не змінюється. Якщо світлові хвилі різної частоти у вакуумі поширюються з різними швидкостями, то колір джерела має змінюватися. Розглянемо це докладніше. Припустимо, що у вакуумі з найбільшою швидкістю поширюються хвилі червоного світла, а з найменшою - хвилі фіолетового світла. У такому разі після того, як ширма відкриє джерело світла, до нас першими дійдуть хвилі червоного світла і ми побачимо джерело червоним. Потім, у міру того як наших очей досягатимуть хвилі інших частот, забарвлення джерела змінюватиметься, і нарешті, стане таким, яким воно є насправді. Після, як ширма закриє джерело світла, до нас першими перестануть доходити хвилі червоного світла, а потім фіолетового. Отже, колір джерела змінюватиметься від дійсного до фіолетового, після чого джерела не буде видно. За невеликої різниці у швидкостях поширення хвиль описаний ефект може бути помітним тільки тоді, коли відстань між джерелом і спостерігачем дуже велика. Тому в лабораторних умовах здійснити описаний вище дослід не можливо, оскільки всі земні відстані для цього малі. Проте велика увага приділяється ілюстрації прояву явища дисперсії у природі та техніці.

Інтерференція світла означається через додавання у просторі двох ( або кількох) хвиль, коли відбувається постійний у часі розподіл амплітуд результуючих коливань у різних точках простору. Не акцентується увага на залежність інтенсивності світла, або спостережуваної освітленості точки простору від амплітуди. Цей момент характерний і для інших підручників, що вносить збентеження при формуванні розуміння суті явища.

До традиційного означення дифракції (від лат . diffractus - розламаний) як «огинання хвилями перешкод» автори [3] додають ще ознаку «відхилення від

прямолінійного поширення хвиль», що також не є однозначним, адже, хоча відхиленню від прямолінійності завжди можна приписати дифракційну природу, пояснення цього для школярів матиме занадто складний характер, особливо коли ми говоримо про оптично неоднорідне середовище. Вказується, що дифракційні явища легко спостерігати, коли розміри перешкоди порівнянні з довжиною хвилі. Проте довжина світлової хвилі дуже мала, тому огинання перешкод дуже незначне і спостерігати його можна лише у спеціальних умовах. Для спостереження дифракції світла потрібно 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, у якому відбуваються досліди зі спостереження дифракції світла, має бути добре затемнене, оскільки дифракційні картини мають незначну освітленість.

У підручнику «Фізика» авторів Є. Коршак., О. Ляшенко., В. Савченко[4] поняття «інтерференція світла» декларується як явище перерозподілу інтенсивності падаючого світла називається інтерференцією (від лат.— накладання). Воно є результатом взаємного підсилення чи ослаблення амплітуди двох чи більше електромагнітних хвиль, що поширюються в просторі від одного джерела. Інтерференційну картину, одержану внаслідок накладання світлових хвиль, можна спостерігати лише за певних умов: електромагнітні хвилі повинні бути когерентними, тобто мати однакову частоту і різницю фаз. На практиці це забезпечується розщепленням світлового пучка від одного джерела світла на два і більше. Згідно з принципом Гюйгенса-Френеля, кожен світловий пучок від щілини є окремою електромагнітною хвилею, яка потрапляючи на екран, взаємодіє з іншою, когерентною їй хвилею. Якщо в певну точку екрана надходять дві хвилі в одній фазі, то їхня дія підсилюється й освітленість екрана в цій точці збільшується (максимуми інтерференційної картини). Якщо вони надходять у певну точку в протифазах, то їхні інтенсивності взаємно компенсуються (мінімуми інтерференційної картини). Явище потрапляння світла в зону геометричної тіні, ніби світло

огинає перешкоду, згідно представлення [4], називається дифракцією. Таке означення є обмеженим у порівнянні з наступним поясненням явища на основі принципу Гюйгенса-Френеля. Уперше дифракцію світла спостерігав Т.Юнг. Пояснив це явище на основі хвильової теорії світла Ж.О. Френель. Нехай на щілину падає сферична хвиля від точкового джерела світла. Відповідно до принципу Гюйгенса-Френеля її краї стануть джерелами нових хвиль, які поширюватимуться, потрапляючи в зону геометричної тіні. Ці хвилі є когерентними, і тому внаслідок накладання утворюють інтерференційну картину з максимумами і мінімумами освітленості. Оскільки це є відображенням явища дифракції світла, спостережувану картинку називають дифракційною картиною. Дифракція властива всім хвильовим процесам, тому вона має місце для різних видів електромагнітних випромінень у всьому діапазоні електромагнітних хвиль. Крім того, це явище спостерігається для електронів при розсіюванні їх під час проходження крізь кристалічні тіла. Цим фактично підтверджується, що вони мають також хвильові властивості, тобто для мікрочастинок, як і для світла, притаманний корпускулярно-хвильовий дуалізм, що для мікрочастинок відображається так званою хвилею де Бройля. Пояснення дисперсії світла автори наводять з історичного ракурсу: Ньютон, спостерігаючи в 1672 р. проходження сонячного світла крізь призму, встановив, що воно розкладається на кольори. Це явище було названо дисперсією світла. Сутність його полягає в тому, що швидкість поширення світлових хвиль різної частоти в прозорому оптичному середовищі, за винятком вакууму, неоднакова: в оптичному середовищі вона тим більша, чим менша частота світлової хвилі (більша довжина хвилі). Тобто в одному й тому самому середовищі червоне світло має більшу швидкість, ніж фіолетове.

Цікавим, але не зовсім послідовним, є підхід до пояснення явища інтерференції світла у підручнику «Фізика» Л. Є. Генденштейн, Ю.І. Дік [5], Розгадку спостережуваних ще Ньютоном кілець здійснив Т. Юнг на початку 19-го століття. Він пояснив їх як результат інтерференції світлових хвиль, відбитих від нижньої поверхні лінзи і скла, що лежить під нею. Заслуга Юнга

якраз і полягає в тому, що він здогадався: світло від одного джерела можна розділити на дві частини, які, інтерферуючи один з одним, породжують стійку інтерференційну картину. Отримати два окремі когерентні джерела світла досить важко. Справа в тому, що атоми випромінюють хвилі незалежно один від одного, тому їх фази не узгоджені один з одним. Через це стійкої інтерференційної картини при складанні світлових хвиль від різних джерел отримати не вдається. При цьому дифракцію у підручнику називають відхилення хвиль від прямолінійного поширення, наприклад дифракція звукових хвиль виявляється в тому, що ми можемо чути звук, що видається джерелом звуку, навіть тоді, коли це джерело для нас невидиме. Це може бути, скажімо, голос людини в сусідній кімнаті, або звук транспорту на вулиці. Якщо розмір отвору порівняний з довжиною хвилі, то хвилі, що пройшли крізь нього, поширюються так, ніби цей отвір є джерелом хвиль. Цей факт надзвичайно важливий для розуміння хвильових процесів: він є основою хвильової теорії. Залежність показника заломлення світла від довжини хвилі називають дисперсією світла. У води та скла показник заломлення для фіолетового світла більше, ніж для червоного, тому фіолетові промені і відхиляються призмою сильніше, ніж червоні.

Підручник Фізика Бар'яхтар В.П., Довгий С.О., Божинова Ф.Я. [6] є найбільш повним і детальним з точки зору послідовності викладу розділу і означення основних понять. Згідно з хвильовою теорією світла, колір світла визначається частотою електромагнітної хвилі, якою є світло. Найменшу частоту має червоне світло, найбільшу фіолетове (характерно, що у практично всіх підручниках автори при поясненні хвильових явищ не використовують довжини хвиль, відмінні від видимого діапазону). Аналізуючи досліди Ньютона та спираючись на хвильову теорію світла, доходимо висновку: показник заломлення світла залежить від частоти світлової хвилі. Для більшості середовищ абсолютний показник заломлення зростає зі збільшенням частоти світла. Явище розкладання світла у спектр, зумовлене залежністю абсолютного показника заломлення середовища від частоти світлової хвилі, називають

дисперсією світла, а інтерференція світла – це електромагнітна хвиля, і для будь-яких хвиль виконується принцип суперпозиції: якщо в певну точку простору надходять хвилі від кількох джерел, то ці хвилі накладаються одна на одну. Унаслідок такого накладання в деяких точках простору може відбуватися посилення коливань, а в деяких послаблення, тобто спостерігається явище інтерференції. Інтерференція – явище накладання хвиль унаслідок якого в деяких точках простору спостерігається стійке в часі посилення ( або послаблення ) результуючих коливань. З'ясуємо, що означає це явище для світла. При поширенні світлової хвилі в кожній точці простору, де поширюється хвиля, відбувається періодична зміна напруженості та магнітної індукції електромагнітного поля. Якщо через деяку точку простору поширюються дві світлові хвилі, то напруженості полів векторно додаються (так само додаються і вектори магнітної індукції). Результуюча напруженість характеризуватиме світлову енергію, що надходить у дану точку: чим більша напруженість, тим більшою стає енергія, що надходить. У випадку коли напрямки напруженостей полів двох світлових хвиль, що приходять у дану точку, збігаються, результуюча напруженість збільшується і в точці спостерігається максимальне збільшення освітленості. І навпаки, коли напруженості полів напрямлені протилежно, результуюча напруженість зменшується (світло гаситиметься світлом).

Явище обгинання хвилями перешкод або будь-яке інше відхилення поширення хвилі від законів геометричної оптики називають дифракцією (від латин. *diffRACTUS* – розломлений). Дифракція властива будь-яким хвилям незалежно від їхньої природи і спостерігається у двох випадках:

- 1) коли лінійні розміри перешкод, на які падає хвиля (або розміри отворів, через які хвиля поширюється), порівняні з довжиною хвилі;
- 2) коли відстань від перешкоди до місця спостереження набагато більша за розмір перешкоди. Хвилі, що обгинають перешкоду, когерентні, тому дифракція завжди супроводжується інтерференцією. Інтерференційну картину, отриману внаслідок дифракції, називають дифракційною

картиною. Оскільки світло є хвилею, в разі використання зазначених вище умов можна спостерігати і дифракцію світла. Але світло - це дуже коротка хвиля (400-760нм), тому дифракцію на предметі розміром, наприклад, 10 см можна помітити лише на відстанях у декілька кілометрів. Якщо ж розміри перешкоди менші за 1 мм. дифракцію можна спостерігати й на відстанях у кілька метрів.

### **Чи зазначається зв'язок між геометричною та квантовою оптикою?**

Важливо зазначити, що геометрична оптика вивчається у 8 класі, а виклад матеріалу хвильових оптичних явищ базується на поняттях і законах геометричної оптики. Для викладу важливо зробити урок повторення матеріалу геометричної оптики.

Зв'язок хвильової та квантової теорії світла полягає у розумінні прояву тих чи інших властивостей в залежності від експерименту. Так, явище інтерференції, дифракції, розсіювання притаманні світловим хвилям, але певні експерименти (наприклад, дифракція електронів, нейтронів) свідчать про прояв хвильових властивостей і для певних об'єктів, які апріорі вважалися частинками. З іншого боку, спостереження явищ фотоефекту, теплового випромінювання, явища Комптона свідчать про те, що світло проявляє квантові властивості і розпадається як потік частинок – квантів. Тому методично важливим є формування у школяра єдиного розуміння природи світла на принципі корпускулярно-хвильового дуалізму. Також не менш важливою метою встановлення зв'язку між хвильовою та квантовою теоріями та визначення просторово-часових меж і їх застосування є формування розуміння неповторності природи та частковості опису її за допомогою існуючих теорій, а також неперервності та нескінченності процесу наукового пізнання.

### **1.2. Огляд дидактичних прийомів удосконалення подачі навчального матеріалу.**

Хвильова оптика одна з найважливіших концепцій сучасної фізики. В результаті важливість вивчення хвильової оптики визначають не тільки викладачі шкіл та університетських курсів в Україні, проблему констатують і



викладачі коледжів та університетів закордоном. Для вивчення хвильової оптики в школах чи університетах, потрібно підібрати правильні методи навчання. [7] Один з таких методів є «комп'ютерний метод». Так в автори [7] пропонують для корекції поняттєвих непорозумінь у вивченні основних понять хвильової оптики використовувати спеціальні комп'ютерні симуляції, різноманітні презентації, електронні засоби навчального призначення, тести, створенні за допомогою програм, відео та інше. Комп'ютерний метод навчання може допомогти студентам пізнати сутність сучасної фізики краще, ніж звичайний аналітичний метод, а також допомагає студентам легко підійти до розуміння ширших явищ, це може спростити вивчення змісту складних фізичних понять.

Творчий підхід до підготовки сучасного уроку полягає не тільки в пошуку нових, більш ефективних прийомів та методів навчання, застосування технік інтерактивного навчання. Наявність комп'ютеризованих засобів навчання, дає можливість учителю більш повною мірою виявити свою творчість. Проте у пропонованій роботі не достатня увага приділяється реальному фізичному експерименту, який у поєднанні із пропонованими авторами статті, методиками давав би значно вагоміші результати у формуванні відповідних компетенцій.

Реалізація лабораторного чи демонстраційного експерименту у шкільному кабінеті фізики часто ускладнюються через відсутність стандартних наборів для такої мети, оскільки пристрої, застосовувані у цьому розділі лабораторні, точні та дороговартісні. Часткове вирішення ситуації пропонують автори [8], які з огляду на те, що останнім часом ми спостерігаємо зростаючий прогрес технічних застосувань, заснованих на фундаментальній науці, включаючи хвильову оптику. Щоб задовільнити вимоги студента чи учня, начальна програма, знання та навички повинні викладатися одночасно. Для досягнення цієї мети запропоновано модельну програму [8] CDIO (conceive-Design-implement-Operate), на основі якої використовуються засоби активного навчання, такі як групові проекти, для кращого засвоєння проблемного

навчання, технічними прийомами, а також оволоділи комунікативними та професійними навичками.

На основі роботи CDIO дана стаття пропонує комплексний набір, що об'єднує кілька експериментів: інтерференція Юнга з двома щілинами, інтерферометри Цендера, дифракція світла, та закон поляризації Малюса. В даний час не завжди є можливість провести той чи інший дослід в лабораторії фізики. Але дана стаття описує гнучкий і недорогий експериментальний набір для навчання хвильової оптики, на основі стандартних оптико-механічних елементів, і невеликої стільникової макетної плати. Цей набір можна використовувати для вище перерахованих експериментів, в класах та лабораторіях. Окрім низької вартості набір має декілька переваг, таких як компактний розмір, але дуже чіткі смуги, висока точність, просте розташування та гнучкість для розробки різноманітних експериментів із хвильової оптики. Крім того, можна підвищити точність набору, використовуючи більше дзеркал для подовження оптичних частин. З дидактичної точки зору можна використовувати для трьох типів експериментів із хвильової оптики, а саме інтерференції (три експерименти), дифракції і поляризації. Таким чином студенти можуть розробити набір для створення більш складних інтерферометрів і програм, набір буде зручно використовувати в інтегрованому курсі, який узгоджується за стандартом CDIO для навчання.

Застосування позаурочних способів набуття компетентностей при вивченні даного розділу пропонується авторами [8]. Мотивуючи свої пропозиції тим, що потреба сучасної науки у кваліфікованому персоналі, вимагає освітніх пріоритетів і розробки нової парадигми професійної підготовки студентів, що навчаються у ВНЗ. Наука і технологія нав'язує застосування нових стратегій підготовки фахівців в університетах, тому необхідно врахувати процес оновлення змісту, та методів досягнення тісного зв'язку між змістом і темами спеціальності, вивчення оптичних методів вимірювання, а також найновіші відкриття педагогічної теорії, що становлять процес навчання, та особливості застосування. Тому мета цієї статті полягає у

пошуку науково обґрунтованих, ефективних, методів для покращення фізичних знань.

Нещодавно лабораторія у вищому технологічному інституті [9] Jose Antonio Echeverria (Ispiae) розробила та застосувала набір оптичних методів, які включені в навчальну діяльність. На фізичному факультеті Ispiae була розроблена та продемонстрована педагогічна виставка з голографії, яка використовувалася для викладання змісту оптики на різних інженерних спеціальностях. Ця альтернатива полягає у зв'язку тем інженерного профілю зі змістом фізики, з метою підвищення когнітивних можливостей мотивацій, та навичок студента, дозволяє формувати, та навчати кваліфікованих випускників, відповідно до вимог сучасного світу, та існуючих соціальних умов. Усі ці аспекти сприяють досягненню відмінного результату студента.

Традиційне навчання у наш час зазнає істотних змін на всіх стадіях навчального процесу. У значній мірі зміни у підходах до навчання та викладання спричинені новітніми інформаційними технологіями, новими джерелами інформації. Одним із таких технологій віртуальної лабораторії є [10] PhET Interactive Simulations. Користуючись засобами мультимедіа ми маємо можливість розглянути уявний експеримент, який займає важливе місце при вивченні фізики, і служить для розуміння реальних об'єктів пізнання природи.

PhET Interactive Simulations включає практику на основі досліджень щодо ефективного викладання матеріалу для підвищення вивчення фізичних понять. Моделі призначені, для використання в якості лекційних демонстрацій, на лабораторній, або у домашній роботі. Використовується інтуїтивне, ігрове середовище, де учні можуть вчитися, як дослідники в галузі освіти у спрощеному середовищі, де можливо зробити невидиме видимим, і де наукові ідеї пов'язані з реальними явищами.

Симуляції допомагають учням зосередити свою увагу на сутності явищ і процесів, краще уявити їх та розуміти. Причому розуміння учнями фізичних процесів, значно підвищується, якщо перед демонстраційним експериментом і після нього (реального і комп'ютерного моделювання) учням надаються

конкретні завдання для перегляду на моделі і можливість обговорити їх виконання та результати з однолітками. Таким чином, для успішного використання віртуальної лабораторії під час навчання фізики необхідно, щоб домашні експериментальні завдання були органічним продовженням та доповненням аудиторних, практичних і лабораторних занять, враховуючи диференційований підхід до навчання, передбачали використання знань на практиці, та в умовах, наближених до життєвих, та з використанням новітніх інформаційно-комунікативних технологій.

В статті [11] проводиться аналіз можливостей демонстраційного експерименту з хвильової оптики в навчанні фізики. Навчальний експеримент не лише важливе джерело нових знань для учнів, а й метод навчання та засіб унаочнення. Демонстрування дослідів сприяє ефективному засвоєнню навчального матеріалу. Вивчення фізичних явищ на основі демонстрації сприяє формуванню наукового світогляду учнів, глибокому засвоєнню фізичних законів.

За висновками авторів постановка демонстрацій має бути максимально чіткою, а пояснення вчителя – продуманим і відображати не лише фізичну суть експерименту, а й його місце в системі фізичної науки. Важливо відзначити, врахувати питання місця експерименту у вивченні кожного поняття зокрема. Досягнути основної мети навчання, визначеної теми чи розділу, можна і застосовуючи різні новітні педагогічні прийоми.

У сучасній освіті навчання набуває різноманітних форм викладання матеріалу, і одним з них є «мікронавчання» чи «мікроурок» [12]. Автори розкривають застосування мікроуроку, як додаткового способу в курсі викладання оптики. Ця форма є своєрідним поєднанням шкільної освіти та інформаційних технологій, що забезпечує новий шлях розвитку сучасної освіти. Мікроурок розроблено в коледжі [12] Сан-Хуан у Фармінгтоні, Нью-Мексико, потім опубліковано у багатьох інших коледжах та університетах. У вищій освіті Китаю мікроурок використовується в практиці викладання і він дає позитивний результат в багатьох областях.

Мікроурок – це коротка записана аудіо чи відеопрезентація на одну чітко визначену тему тривалістю до 10 хвилин. Він зазвичай використовується як компонент онлайнного, або очного навчання.

Викладачі інших коледжів, наприклад Йоркського університету в Торонто, експериментували з лекціями, які тривали близько 20 хвилин. Вони виявили, що учням стає нудно і дійшли висновку скоротити час, що призвело до мікроуроку. Ця стратегія створює унікальні умови для персоналізації навчання. Учні самі визначають час, темп і послідовність вивчення теми, а простий та зрозумілий зміст матеріалу не викликає інформаційного перевантаження. Також є можливість повернутися і повторити необхідну тему у будь який час, що сприяє кращому засвоєнню знань.

Поняття про світло, як зазначалося у вступі, має своє концептуальне значення. Уся історія розвитку поглядів на природу світла свідчить про їх виняткове значення для науки, положення матеріалістичної діалектики, про єдність протилежностей. Питання про природу світла виникло давно, ще 580 рр. до н.е., хоча погляди стародавніх мислителів ґрунтуються не на дослідах, а на найпростіших спостереженнях, явищах природи, і їх можна вважати лише здогадками, інколи геніальними, проте вони мали досить великий вплив на вчених більш пізніх часів.

Уявлення студентів сьогодення про світло формуються сенсорним досвідом, соціальною та культурною практикою, а також неформальним навчанням, та різними значеннями термінів у повсякденній та науковій мові [13].

Постановка експерименту полягає у вивченні світла, формуванні потреб що це таке, « що нам потрібно, щоб бачити предмет навколо нас», і «те, що потрібно рослинам для росту». Діти вчать називати різні джерела світла, та розвивають перші уявлення про створення тіні: У старших класах середньої школи учні більшості країн вивчають, що світло є електромагнітною хвилею, і їх навчають про спектр електромагнітних хвиль.

Важливим є аспект моніторингу рівня знань з визначеної теми. Так, робота [14] розкриває сутність моделі Rascha, процес розробки банку завдань для вимірювання розуміння хвильової оптики в типових вступних курсах фізики в університетах. Також використано підхід моделювання Rascha, що розгортає розробку питань, які керуються результатами багатьох опитувань експертів і студентів, а також групових інтерв'ю «Думай вголос»

Постановку експерименту було перевірено на практиці за допомогою паперу та олівця, в якому взяли участь 188 учасників з п'яти університетів Боснії та Герцеговини, Хорватії та Словенії. Польовий тест показав, що 32 із 35 завдань мають хороші психологічні характеристики і можуть бути дуже корисними для виявлення хибних уявлень студентів у хвильовій оптиці. Таким чином, предметна область включала весь зміст, який зазвичай розглядається у вступних курсах фізики на університетському рівні.

Таке опитування дозволяє студенту висловити свою думку, викласти свої знання, написати інтереси та пропозиції, а також охарактеризувати рівень задоволення даної теми.

## РОЗДІЛ II УДОСКОНАЛЕННЯ ПОРЯДКУ ВИКЛАДУ ТА СПОСОБІВ ПОДАЧІ ОСНОВНИХ ПОНЯТЬ ХВИЛЬОВОЇ ОПТИКИ ДЛЯ УЧНІВ СТАРШИХ КЛАСІВ ЗАГАЛЬНООСВІТНЬОЇ ШКОЛИ.

### 2.1. Основні ввідні поняття та означення хвильової оптики.

Більшість фактичних відомостей про природу і навколишні явища людина отримала за допомогою зорового сприйняття, створеного світлом. Розділ фізики, в якому вивчають світлові явища, називається оптика. Історія розвитку оптики підтверджує одне з основних положень діалектики – закон єдності та боротьби протилежностей.

Світло за своєю природою – явище електромагнітне, але воно одночасно проявляє хвильові (в явищах інтерференції, дифракції, поляризації, дисперсії) і квантові властивості (в явищах фотоефекту, люмінесценції і т.д.). Із зменшенням довжини хвилі (збільшенням частоти) дедалі чіткіше проявляються квантові властивості світла. Світло поширюється в вакуумі зі швидкістю:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}, \quad (2.1)$$

в середовищі:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \mu \epsilon}} = \frac{c}{\sqrt{\mu \epsilon}}. \quad (2.2)$$

З точки зору сучасних теорій неправильно було б протиставляти хвильові та квантові властивості світла. Навпаки, їх можна порівнювати і поєднувати на основі теорії відносності та сучасних положень квантової фізики. З позицій сучасної фізики немає розбіжностей між квантовими і хвильовими уявленнями про світло – це різні властивості одного явища, і в цьому полягає діалектична єдність матерії.

Явища, в яких світло найбільше виявляє свої хвильові властивості, розглядає хвильова оптика.

Щоб зрозуміти ряд питань хвильової оптики, треба розглянути таке поняття, як хвильовий фронт. Хвильовий фронт—це поверхня, на всіх точках якої хвиля має в даний момент часу однакову фазу. Поширення хвилі відбувається у напрямку нормалі до хвильового фронту і може розглядатися як рух хвильового фронту в середовищі.

В однорідному ізотропному середовищі випромінювання точкового джерела має сферичний хвильовий фронт. Паралельному пучку променів відповідає фронт хвилі у вигляді площини, яка перпендикулярна до напрямку поширення хвилі. Отже, форма фронту хвилі визначає тип хвилі.

Окрім того, потрібно згадати про рівняння Максвелла:

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial x} = -\mu_0 \mu \frac{\partial H}{\partial t}, \\ \frac{\partial H}{\partial x} = -\varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t}. \end{cases} \quad (2.3)$$

Рівняння (2.3) описують процес поширення електромагнітних хвиль, вони встановлюють зв'язок між зміною в часі і просторі векторів електричного  $\vec{E}$  і магнітного полів  $\vec{H}$ . Якщо перше рівняння системи (2.3) продиференціювати по  $x$ , а друге по  $t$ , і навпаки, перше рівняння продиференціювати по  $t$ , а друге по  $x$ , то після нескладних перетворень отримаємо систему рівнянь, які називають хвильовими рівняннями Максвелла:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon \mu_0 \mu} \frac{\partial^2 E}{\partial x^2}, \\ \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = \frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon \mu_0 \mu} \frac{\partial^2 H}{\partial x^2}. \end{cases} \quad (2.4)$$

Також, хвиля називається монохроматичною, якщо період, амплітуда і фаза є величини, які не залежать від часу.

Основні прояви хвильової природи світла спостерігаються у певних фізичних явищах, а саме: інтерференції, дифракції, частково дисперсії та розсіюванні. При засвоєнні основних компетенцій, що стосуються природи світла як хвилі, особлива увага приділяється саме поняттям інтерференції та дифракції, як явищам, що можуть бути пояснені, тільки виходячи із принципів



поширення хвилі, висловлених у означенні фронту хвилі, та умов його розповсюдження.

Хвильові властивості світла можна привести в аналогію, із властивостями звуку на радіохвилі. Звук також інтерферує, дифрагує, але звук, наприклад, у газах не можна поляризувати, хоча, в принципі, поляризація звукової поперечної хвилі в твердих тілах може спостерігатися.

Найраціональніше розпочинати вивчення хвильової природи світла із дослідження явища інтерференції. При цьому, як показує досвід, демонстраційний експеримент доцільно проводити вже після розгляду теоретичних принципів і виведення законів, що ілюструють явище.

## 2.2. Формування основних компетентностей учнів при вивченні інтерференційних явищ.

Розглянемо електромагнітну хвилю, яка поширюється в якомусь певному напрямку, визначатися взаємним розміщенням трьох векторів (рис.2.1).

Перший вектор – вектор швидкості (його буде визначати вектор Умова-Пойнтінга, за допомогою якого інтерпретується

напрямок поширення електромагнітної хвилі і напрямку передачі енергії, яка поширюється цією хвилею); другий – електрична складова хвилі, яка поширюватиметься в якомусь напрямку  $x$ ; третій – магнітна складова, яка буде також поширюватися в такому самому напрямку. При чому, останні два вектори є ортогональними, взаємно перпендикулярними і поширюються в однаковій фазі. Електромагнітна хвиля переносить свою енергію за рахунок енергії електричного і магнітного поля. З рівняння Максвела відоме співвідношення,

$$\mu_0 H = \varepsilon \varepsilon_0 E, \quad (2.5)$$

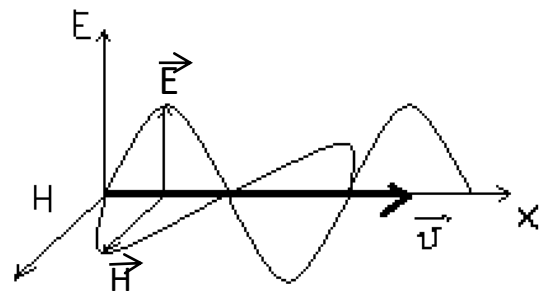


Рис.2.1. Поширення електромагнітної хвилі.

яке говорить про те, що можна використовувати рівняння для однієї з цих хвиль, для одного із компонентів. Наприклад, електричної компоненти і не використовувати рівняння для магнітної компоненти, бо магнітне рівняння буде прямо залежати від цієї електричної компоненти, матиме те саме поточне значення в просторі і в часі напруженості, буде мати ту саму фазу коливань в просторі та в часі. Ці дві хвилі будуть поширюватись синхронно. Отже, нам досить записати рівняння для напруженості електричного поля, яка змінюється в просторі і в часі:

$$E = E_0 \cos(\omega t - kx), \quad (2.6)$$

де  $k$  – хвильове число. Хвильове число ( $k$ ) – це модуль хвильового вектора; параметр хвилі, який визначає кількість довжин хвилі, що поміщаються в  $2\pi$  одиниць довжини. Цю хвилю можна записати за допомогою електричного вектора. Яка тут є особливість в порівнянні з, припустимо, поширеннями механічних коливань? Світло спостерігається у вигляді якоїсь певної освітленості, певної інтенсивності і, навіть, зміни інтенсивності в просторі. Розподіл енергії призводить до зміни інтенсивності в просторі.

Фіксуємо певну точку простору і бачимо, що в ній коливання напруженості вектора електричного поля будуть здійснюватися із циклічною частотою  $\omega$ , яка буде відповідати лінійній частоті для видимого світла порядку  $10^{14}$  Гц.

$$E = E_0 \cos \omega t, \quad (x = 0) \quad (2.7)$$

Око, зовнішній прилад, давач, реєструючий прилад з такою частотою працювати не може і це коливання інтенсивності в просторі, рівне такому великому значенню, буде усереднюватися при реєстрації будь-яким із приладів, у тому числі і нашим оком. Якщо повернутися до рівняння (2.7) і усереднити значення напруженості електричного поля за якийсь достатньо великий час, більший за період коливань, то це приводить до того, що спостерігається енергія (енергія або інтенсивність буде пропорційна добутку напруженості

електричного поля на напруженість магнітного поля, яка стане пропорційною квадрату амплітуди електричного поля:

$$I \sim E \cdot H \sim E_0^2. \quad (2.8)$$

За достатньо великий проміжок часу інтенсивність буде пропорційна амплітуді електричного та магнітного полів. Оскільки ці дві амплітуди зв'язані між собою, бо зв'язані між собою і поточні значення напруженості, то виходить, що інтенсивність – це величина, яка пропорційна амплітуді напруженості електричного поля в квадраті.

Отже, коли буде розглядатися результат дії світла в будь-якій точці простору, то спочатку потрібно знайти квадрат амплітуди напруженості електричного поля. Амплітуда теж є результатом певних процесів, в тому числі і процесів, пов'язаних із накладанням коливань.

Розглянемо якусь точку простору  $P$ , в якій здійснюються два коливання, «принесені» хвилею і вони в цій точці простору спричиняють певні значення інтенсивності. Якщо в точку  $P$  попадатиметься тільки перша (1) хвиля, тоді там буде значення інтенсивності  $I_1$ , якщо тільки друга (2) хвиля – значення інтенсивності  $I_2$  (рис.2.2).

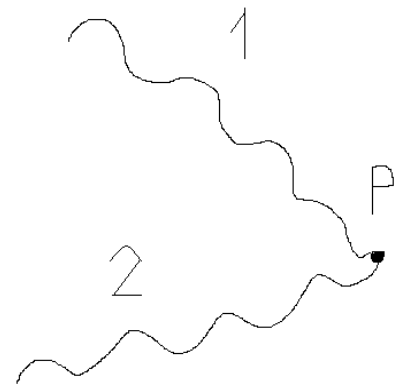


Рис.2.2. Попадання в одну точку двох хвиль.

Що буде відбуватися якщо в точці  $P$  будуть накладатися коливання спричинені попаданням в цю точку простору двох хвиль одночасно? Розглянемо хвилі з однаковою частотою ( $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ ), початкова фаза першого коливання ( $\varphi_{01}$ ) в момент часу  $t = 0$ , початкова фаза другого коливання ( $\varphi_{02}$ ), амплітуди цих двох коливань окремо ( $E_{01}, E_{02}$ ). Існує коливання в точці  $P$ , спричинене електричним вектором  $E_1$ :

$$E_1 = E_{01} \cos(\omega t + \varphi_{01}) \quad (2.9)$$

і вектором  $E_2$

$$E_2 = E_{02} \cos(\omega t + \varphi_{02}). \quad (2.10)$$

Результатом цього коливання має стати гармонічне коливання  $E$ :

$$E = E_0 \cos(\omega t + \varphi_0). \quad (2.11)$$

Знаходимо інтенсивність в точці  $P$ . Перед цим можна поставити перед учнями такі питання: «Чому  $I$  не може дорівнювати сумі  $I_1$  та  $I_2$ ?», «Коли буде можливий такий варіант?». Поки повернемося до гармонічного коливання. Два гармонічні коливання однієї частоти, які здійснюються в одному напрямку, дають гармонічні коливання тої самої частоти, але іншої амплітуди і іншої початкової фази. Яким чином можна розв'язати рівняння (2.11), знайти результуюче значення  $E$  ( $E_0$ ), а також  $\varphi_0$ ? Можна це зробити алгебраїчно. Для цього потрібно зробити багато тригонометричних перетворень, додавання рівнянь, зведення коефіцієнтів і т.д.. Це досить складно.

З іншого боку, у розділі «коливання і хвилі» було показано, що гармонічні коливання можна представити у вигляді так званої векторної діаграми для отримання результуючого гармонічного коливання.

Якщо зосередити в якомусь напрямку полярну вісь і зобразити вектор, довжина якого чисельно дорівнює амплітуді напруженості (в даному випадку, поля або в загальному амплітуді будь-якого коливання) і який розміщений під кутом  $\varphi_{01}$ , то цим

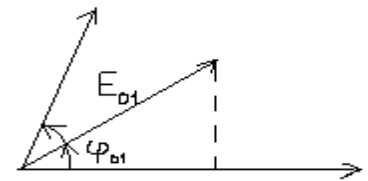


Рис.2.3. Графічне задання гармонічного коливання.

самим малюнком графічно повністю буде задаватися гармонічне коливання, яке здійснюється вектором  $E_1$  з амплітудою  $E_{01}$  і початковою фазою  $\varphi_{01}$  (рис. 2.3). Якщо поставити у формулі (2.9)  $t = 0$ , то значення вектора  $E_1$  буде проекцією вектора  $E_{01}$  на полярну вісь. За час  $\Delta t$  цей вектор буде обертатися з кутовою швидкістю, чисельно рівною циклічній частоті коливань відносно полярного центру, і повернеться на кутове переміщення, яке рівне  $\omega \Delta t$ . І таким чином поточна фаза коливань стане  $\omega \Delta t + \varphi_{01}$  і значення вектора  $E$  дорівнюватиме:

$$E = E_{01} \cos(\omega \Delta t + \varphi_{01}). \quad (2.12)$$

Тобто, шукаючи значення проекції цього вектора на полярну вісь, завжди можна знайти поточне значення напруженості електричного поля в даний момент часу. Фактично, коливання ілюструється графічно. Якщо розглядати малюнок, в якому задана частота, напруженість  $E_{01}$  першого вектора і кут, який

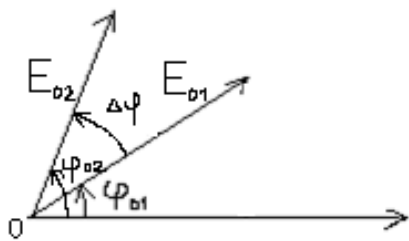


Рис.2.4. Векторна діаграма, яка показує коливання, яке здійснюється другою складовою електричного поля  $E_{02}$  під певним кутом  $\varphi_{02}$ .

відповідає початковій фазі коливань цього вектора  $\varphi_{01}$ , то буде задаватися гармонічне коливання, яке здійснюватиме напруженість електричного поля, зумовлена першою хвилею у точці спостереження  $P$ .

На цій же векторній діаграмі можна показати і друге коливання, яке буде здійснюватися другим вектором (складовою електричного поля другої хвилі)  $E_{02}$  під кутом  $\varphi_{02}$  (рис.2.4). У процесі коливання ці вектори мали

б обертатися навколо полярного центру (точки  $O$ ) з однаковою кутовою частотою. Оскільки вони обертаються з однаковою коловою частотою і з однаковою кутовою швидкістю, рівною цій частоті, то виходить, що між ними знаходиться кут  $\Delta\varphi$ , який буде дорівнювати різниці фаз цих двох коливань і залишиться незмінним:

$$\Delta\varphi = \varphi_{02} - \varphi_{01}. \quad (2.13)$$

Метод векторних діаграм можна застосовувати тільки для додавання коливань однієї частоти. Якщо частоти різні, то змісту в цьому вже немає.

Тепер можна використати геометричні співвідношення для отримання результуючої амплітуди (рис.2.5). Потрібно знайти проекцію одного вектора на полярну вісь, проекцію другого вектора на полярну вісь, проекцію на вісь, перпендикулярну до полярної і, таким чином, від точки  $O$  до перетину цих проекцій буде напрямлена

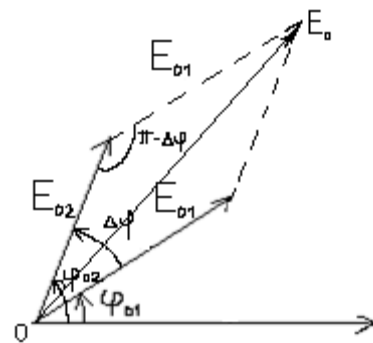


Рис.2.5. Допоміжний малюнок.

амплітуда напруженості результуючого коливання  $E_0$ . Її можна знайти як векторну суму векторів, що відображають ці дві напруженості. Тобто маємо зараз задачу: «Знайти сторону трикутника, якщо відомі дві інші сторони ( $E_{01}$ ,  $E_{02}$ ) і кут між цими двома векторами( $\pi - \Delta\varphi$ )». Застосовуємо теорему косинусів і маємо:

$$E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 - 2E_{01}E_{02} \cos(\pi - \Delta\varphi). \quad (2.14)$$

За формулами зведення:

$$E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos \Delta\varphi. \quad (2.15)$$

Отримана формула (2.15), яка часто зветься інтерференційною. Квадрати амплітуд можна замінити на відповідні інтенсивності  $I$ , в плані розмірності, нічого не порушиться:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\varphi. \quad (2.16)$$

Зважаючи на те, що значення напруженості змінюється з великою частотою, (час, за який змінюється значення напруження, є дуже малим), досягти того, щоб різниця фаз  $\Delta\varphi$  була сталою є дуже важливим моментом. В іншому випадку (якщо  $\Delta\varphi$  буде хаотично змінюватися з часом), середнє значення цього косинуса буде рівне нулю і буде отримуватися, замість формули (2.16), проста сума інтенсивностей  $I = I_1 + I_2$ .

Якщо два коливання одної частоти накладатимуться з певною різницею фаз, то можуть виникати випадки, в яких ці коливання підсилять одне одного. Це максимальне підсилення називається умовою максимумів. Умова максимумів виконається тоді, коли  $\cos \Delta\varphi$  буде максимальний, тобто, коли він буде дорівнювати 1. Це відбуватиметься тоді, коли  $\Delta\varphi$  буде дорівнювати парному числу  $\pi$ :

$$\max: \Delta\varphi = 2\pi n. \quad (2.17)$$

Тоді матимемо:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}. \quad (2.18)$$

Припустимо, що ці два коливання здійснюються з амплітудами, рівними початковим амплітудам, тобто  $I_1 = I_2 = I_0$ . Тоді:

$$I = 4I_0. \quad (2.19)$$

Шукаємо умову мінімуму, яка буде відповідати непарному числу  $n$ , тобто:

$$\min: \Delta\varphi = (2n + 1)\pi. \quad (2.20)$$

Маємо:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}. \quad (2.21)$$

І за умови  $I_1 = I_2 = I_0$ :

$$I = 0. \quad (2.22)$$

Можливий варіант, що світло поширюється не тільки в одному якомусь певному напрямку.

Візьмемо дві точки 1 і 2, (рис.2.6). точку спостереження Р. З точки зору геометричної оптики, можна організувати вузько спрямовані хвилі, які будуть давати просвітлення точки Р, але насправді хвиля має певну форму хвильового фронту. Отже, крім точки Р, існує ще якась певна точка Р', в яку з точок 1 і 2 хвиля також прийде, тому що вона поширюється з двох боків у вигляді сферичної хвилі, (якщо джерело світла точкове). Якщо в одній точці таке поширення приведе до того, що фаза відповідатиме умові максимуму, наприклад, в точці Р ( $P_{\max}$ ), то в точці Р' фаза буде відповідати умові мінімуму ( $P_{\min}$ ). Відбувається перерозподіл інтенсивності світла у просторі.



Рис.2.6. Зображення перерозподілу світла в просторі.

точка перейшла з умовою максимуму, то за законом збереження енергії повинна існувати точка, в якій інтенсивність світла стане мінімальною.

Для того, щоб спостерігати умову максимуму або мінімуму, потрібно, щоб в точках накладалися коливання

одної частоти сталої різниці фаз. Щоб це забезпечити, потрібно з точок 1 і 2 в точки P і P' попадала хвиля, яка зумовлює з одного боку коливання однієї частоти, а з іншого, щоб різниця фаз  $\Delta\phi$  була обов'язково сталою, стабільною в часі, константою ( $\Delta\phi = \text{const}$ ). Якщо вона такою не стане, то ця різниця змінюватиметься з дуже великою частотою, усереднення буде рівне нулю і інтерференційного явища не спостерігатиметься.

Таким чином, формуємо поняття, що когерентні хвилі – це хвилі, які в певну точку простору приходять із сталою різницею фаз і мають однакову частоту. Джерела, які створюють ці когерентні хвилі, називаються когерентними джерелами світла.

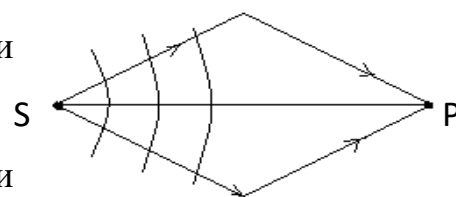


Рис.2.7. Когерентне випромінювання.

Демонструючи явище інтерференції чи дифракції для механічних хвиль чи для радіохвиль, беруться два джерела електромагнітних хвиль (два механічні вібратори, два електромагнітні передавачі), налаштовуються на одну частоту. Ці джерела даватимуть цуг (частина послідовності коливань, на протязі яких, зберігається «безперервна синусоїда» хвиль тривалого часу, щоб ці хвилі накладалися. У випадку світла (особливо видимого діапазону) матимемо справу з дуже короткими імпульсами, бо світло випромінюється за рахунок процесів, що відбуваються в атомах, молекулах речовини. Отже, ці процеси є короткочасними. Якщо взяти джерело і розділити фронт його хвилі (рис.2.7), спрямувати частинки фронту різними геометричними шляхами, а потім звести їх в одну точку, то кожне коливання стане синхронним, кожна

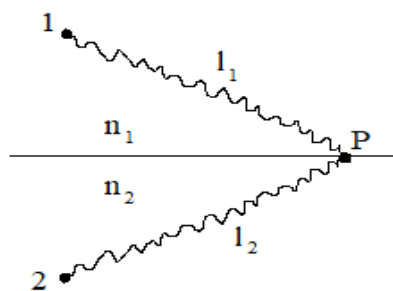


Рис.2.8. Інтерференція в точці, в якій перетинаються когерентні хвилі.

частинка цього цугу синхронно розділиться на дві окремі хвилі, які будуть поширюватися різними геометричними шляхами, а потім зійдуться в одну точку і в ній інтерферуватимуть. Винятком є тільки когерентне лазерне випромінювання (з двох лазерів можна також отримати когерентні джерела світла).



Розглядаємо інтерференцію в певній точці Р, в яку хвилі з певних когерентних джерел з різним геометричним шляхом (рис.2.8). Різниця фаз  $\Delta\varphi$  буде пропорційна оптичній різниці ходу  $\Delta$  ( $\Delta\varphi \sim \Delta$ ). Нехай перша хвиля проходить геометричний шлях  $l_1$ , а друга – шлях  $l_2$ , початкові фази  $\varphi_0$  кожної хвилі рівні і дорівнюють нулю, перша хвиля поширюється в середовищі з показником заломлення  $n_1$ , а друга – з  $n_2$ . Величина  $L$ , яка рівна добутку геометричного шляху, який проходить хвиля, на показник заломлення середовища, називається оптичним шляхом:

$$L = l_1 n_1. \quad (2.23)$$

$$\Delta = L_2 - L_1 = l_2 n_2 - l_1 n_1. \quad (2.24)$$

$$\Delta\varphi = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \Delta. \quad (2.25)$$

Останнє співвідношення (2.25) приводить до визначення умов максимуму і мінімуму інтерференції за оптичною різницею ходу променів. Якщо  $\Delta$  підставити для умови максимуму і мінімуму, то:

$$\Delta = (2k + 1) \left(\frac{\lambda}{2}\right), \quad (2.26)$$

$$\Delta = k\lambda. \quad (2.27)$$

Виходить, що формула (2.26) є умовою мінімуму, а (2.27) – умовою максимуму.

Можна сказати, що інтерференція з одного боку є перерозподілом інтенсивності світла у просторі під дією однієї електромагнітної хвилі на іншу. З іншого боку, коли йдеться про величину  $L$ , то мається на увазі, що це відстань, яку світло пройде у вакуумі за той самий час, за який воно у даній речовині, даному середовищі пройде геометричний шлях  $l$ . Тобто, якщо різниця ходу  $\Delta$  дорівнює нулю ( $\Delta = 0$ ), то це відповідає умові максимуму.

Приклад 1. Якщо два промені (тут йдеться про дуже вузький тілесний кут, в якому

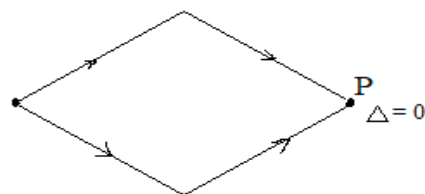
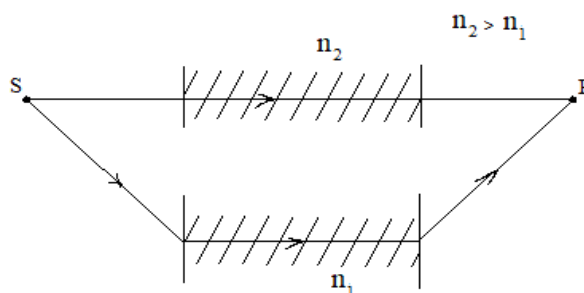


Рис.2.9. Інтерференція за умовою максимумів .

поширюється фронт хвилі) йдуть від одного джерела, проходять різний геометричний шлях і сходяться в якійсь певній точці P, в якій оптична різниця ходу  $\Delta$  дорівнює 0, то ці дві хвилі в цій точці будуть інтерферувати з умовою максимумів (рис 2.9).

Приклад 2. Якщо маємо джерело світла S і воно освітлює якусь певну точку P, тобто безпосередньо в точку P іде один промінь, на шляху якого ставиться якесь середовище з показником заломлення  $n_2$ , а другий промінь так само проходить певний геометричний шлях, на якому також ставиться якесь певне середовище, яке має певний

показник заломлення  $n_1$  ( $n_2 > n_1$ ), то можна добитися того, що, проходячи різні геометричні шляхи, вони будуть мати однакові оптичні шляхи (рис. 2.10).



Час поширення променя з точки S в точку P одного і другого шляху буде однаковий. Такі хвилі називаються

Рис.2.10. Інтерференція таутохронних хвиль.

таутохронними хвилями. Тобто вони можуть інтерферувати в точці P з умовою максимуму. Під час формування поняття таутохронізму доречно пояснити механізми утворення зображень у оптичних приладах, зокрема у лінзах. Це дасть змогу підвести фізичну природу світла до розуміння поняття світлового променя та попередньо введених законів геометричної оптики. Як працює лінза (візьмемо збиральну)? Розглянемо джерело S зліва від лінзи і будемо мати зображення цього джерела S' справа (рис. 2.11). Точка зображення – це перетин всіх променів, які виходять з точки S через лінзу і перетинаються у якійсь певній точці простору.

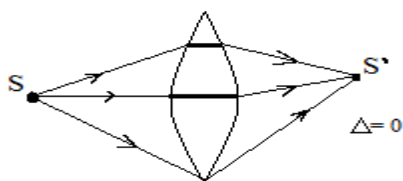


Рис.2.11. Результат таутохронізму.

Получається, що апертура лінзи, її переріз є достатньо великим і існують промені, які будуть проходити різні геометричні шляхи і перетинатися в точці S'. Коли вони створять зображення? Коли оптична різниця ходу  $\Delta$  цих променів дорівнює 0,

завдяки кривизні лінзи. Вертикально посередині лінза товстіша, значить проходить довший оптичний шлях. Потрібний більший час, щоб пройти цю частинку лінзи. В іншому випадку (коли вектор проведений від джерела до одного з країв лінзи) буде більший геометричний шлях і виходить, що ці два випадки будуть скомпенсовуватися. Будь-яке зображення – це інтерференційна картина, при чому інтерференційний максимум накладання когерентних хвиль. Побудова зображення – це знаходження інтерференційного максимуму, можна навіть сказати, першого інтерференційного максимуму, для якого оптична різниця ходу дорівнює 0.

Навіть те зображення, що створюється на сітківці нашого ока є результатом інтерференції хвиль, які виходять із однієї точки, потім промені проходять різні геометричні шляхи, заломлюються і накладаються так, що їхня оптична різниця ходу дорівнює 0. Тобто є результатом інтерференції таутохронних променів, таутохронізму.

Фактично, можна сказати, що всі зображення навколо нас, зображення, створені будь-яким способом, є інтерференційними картинами або максимумами інтерференційної картини. А сама інтерференція є перерозподілом інтенсивності світла, внаслідок того, що в різні точки простору світло проходить із різними значеннями оптичної різниці ходу.

Щоб це продемонструвати, потрібно отримати когерентне світло. Є два способи його отримання.

Перший спосіб: метод поділу фронту хвилі. Розглянемо досліди, що ілюструють цей метод.

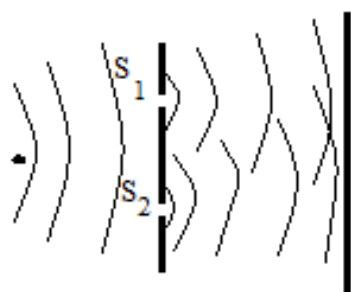


Рис.2.12. Інтерференційна картина, яка утворюється за допомогою лазера, екрана з отворами та простого великого екрана.

**1. Дослід Юнга.** Береться джерело світла (можна взяти лазер, але трохи розфокусувати його лінзою), непрозорий кусок темного паперу, в якому проколюються два отвори (бажано дуже малі, щоб мали діаметр приблизно 0,1-0,2 мм), відстань між якими повинна складати приблизно 0,5-1 мм, і поставити після цього екран (рис.2.12). Якщо лазер

достатньо інтенсивний, то отвори  $S_1$  та  $S_2$  будуть точковими джерелами світла, отриманими із одного і того ж джерела, тобто ці джерела будуть когерентними (з фронту хвилі в отвори пройшла тільки частина енергії, частина цього фронту). Отже, ці отвори в папері будуть вторинними джерелами когерентних хвиль, оскільки вони отримані з однієї і тієї ж хвильової поверхні і на екрані буде інтерференційна картина (світлі і темні смуги на екрані, який розміщений на якійсь певній відстані від паперу). Цей експеримент показує, що закон збереження енергії буде зберігатися і виконуватися, тому що будуть існувати точки, які засвітлені сильніше, і такі, що не засвітлені зовсім за рахунок того, що відбувається максимум чи мінімум інтерференції.

## 2. Бідзеркала Френеля.

Експеримент можна відтворити навіть в домашніх умовах: взяти тонке дзеркало, наклеїти на картон і легким ударом розбити це дзеркало (якщо

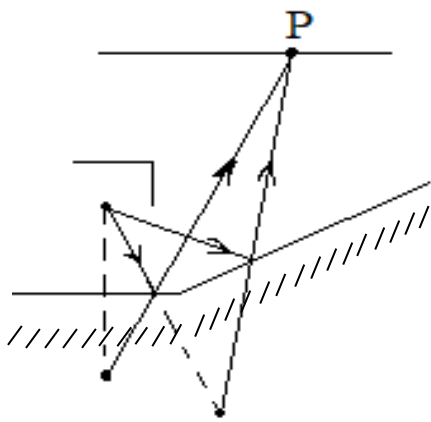


Рис.2.13. Експеримент з бідзеркалом Френеля.

розбити це дзеркало, то межа поділу буде створювати дві площини, які між собою складатимуть достатньо малий кут) (рис. 2.13). Те, що дзеркала приклеєні до картону, дають картону після розбивання зміститися буквально на долі кутової мінути. Якщо тепер помістити якесь джерело світла близько до границі розділу цих двох дзеркал, то отримається зображення цього джерела світла в одній частині дзеркалі. Оскільки кут між дзеркалами малий, то між зображеннями джерела буде також мала відстань. Якщо

поставити паралельно цьому дзеркалу екран, але джерело світла затінити, щоб з нього на екран не попадало світло, то будь-яка точка цього екрану буде засвітлена вторинними відбитими променями (відбитими від першого і другого джерел) і в цій точці матиметься якесь певне значення інтенсивності або ж на всьому екрані буде якась певна інтерференційна картина.

### 3. Білінза Бій'є.

Можна створити ще один пристрій, на основі якого можна з'ясувати суть роботи лінзи, суть того, як формується зображення в ній. Якщо зафіксувати оптичну вісь лінзи і взяти будь-яку частинку цієї лінзи, все інше заклеїти, то від цього ні величина зображення, ні його положення і характер не зміниться (рис.2.14). Зміниться тільки інтенсивність, бо вона створюється як результат інтерференції світла і чим більшою буде площа (апертура) лінзи, тим більше променів буде інтерферувати в точці максимуму (тобто інтенсивність буде зростати).

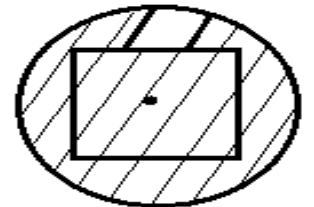


Рис.2.14. Частина лінзи, через яку буде проходити світло.

Беремо лінзу, її розрізаємо на дві половини (рис.2.15а, б). Розрізаючи її, втрачається певна частина лінза і, якщо не змінювати положення двох інших її частин, то їхня оптична вісь не зміниться і зображення, яке було побудоване в цих двох половинах буде залишатися в тій самій точці простору. Але, якщо звести ці дві половини лінзи разом, то оптична вісь нижньої частини підніметься, а верхньої – опуститься і тоді зображення будь-якого джерела світла буде окремо формуватися в верхній і нижній частині лінзи із збереженням всіх законів геометричної оптики. Тепер, якщо ми поставимо екран, то на ньому буде інтерференційна картина, яка зумовлена тим, що будуть накладатися хвилі, які йдуть від дійсних зображень. Цей дослід називається білінзою Бій'є (рис. 2.16).

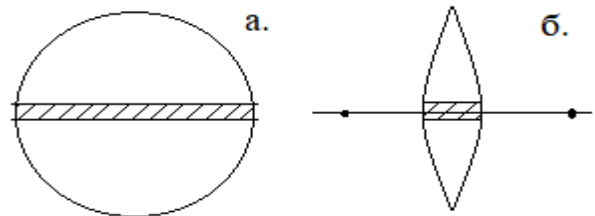


Рис. 2.15. Розрізана лінза (її половини розведені): а. - вид зверху; б. –вигляд в перерізі.

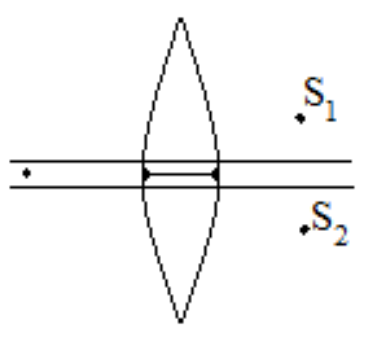


Рис. 2.16. Дослід з білінзою Бій'є.

Другий спосіб: метод поділу амплітуди хвилі.

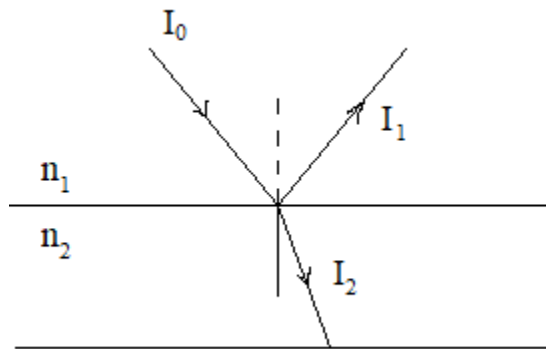


Рис. 2.17. Границя розподілу двох середовищ.

Пригадаємо: квадрат амплітуди – це величина, яка пропорційна інтенсивності світла. Якщо розглянути границю розділу двох середовищ з показниками заломлення  $n_1$  і  $n_2$  (рис. 2.17), то частина світла, яке попадає на цю границю інтенсивністю  $I_0$ , може відбитися від неї і становитиме інтенсивність  $I_1$ , а інша частина – заломиться через неї, пройти в інше середовище, яке є, в даному випадку, обмеженим і отримати інтенсивність  $I_2$ . Можна сказати, що інтенсивність  $I_0$  розіб'ється на  $I_1$  і  $I_2$ :

$$I_0 = I_1 + I_2. \quad (2.29)$$

Поділимо ліву і праву частину цієї формули на  $I_0$ , то будемо мати:

$$\frac{I_1}{I_0} + \frac{I_2}{I_0} = 1. \quad (2.30)$$

$$R + T = 1, \quad (2.31)$$

де  $I_1 / I_0 = R$  – коефіцієнт відбивання, в даному випадку, границі розділу двох середовищ, який відповідно електромагнітної теорії взаємодії хвилі із границею розділу середовища буде залежати від багатьох факторів: від довжини хвилі, показників заломлення середовища, кута падіння;  $T$  – коефіцієнт проходження границі розділу середовища. Сума цих двох величин дорівнює одиниці, а це означає, що, якщо збільшується одна з цих величин, наприклад, збільшується проходження, то зменшується відбивання і навпаки. Виходить, що ці величини взаємопов'язані. Пригадуємо, що друге середовище обмежене і від нижньої границі з показником заломлення  $n_1$  знову за законами геометричної оптики світло частково відбивається і частково проходить в наступне середовище (падаючий перший промінь паралельний цьому). Далі на границі розділу середовищ світло знову частково проходить, відбивається і продовжує проходити (рис. 2.18).

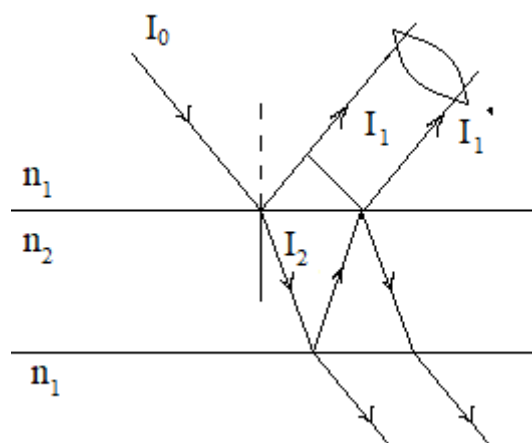


Рис. 2.18.Більш розширений ряд оптичних явищ, що відбуваються на границі розподілу середовищ.

Звичайно, на кожному етапі інтенсивність буде втрачатися, але будуть розглядатися промені  $I_1$  та  $I_1'$ , які отримані із одного (початкового) джерела світла. Ці промені пройшли різні геометричні шляхи. Якщо пропустити перпендикуляр з початку руху променя з інтенсивністю  $I_1'$  до променя з інтенсивністю  $I_1$ , то далі ці два промені будуть іти синхронно, паралельно між собою. Додаткової різниці ходу не буде виникати, а буде тільки виникати за рахунок того, що цей промінь в іншому середовищі пройшов шлях заломленого і відбитого променів в іншому середовищі, а в першому середовищі шлях

відбитого і втратив півхвилі на відбивання. Тобто промені  $I_1$  та  $I_1'$  є когерентними. Вони отрималися через поділ фронту хвилі, інтенсивності на границі розділу середовищ. Для інтерферування цих променів потрібно звести їх в одну точку. Для цього ставиться збиральна лінза (будь-який фокусуєчий пристрій). Промені зводяться в одну точку, в якій вони інтерферують. В результаті отримується інтерференційна картина за методом поділу амплітуди хвилі, а, якщо спостерігається таке явище, то можна його назвати інтерференцією у тонких плівках або в тонких пластинках.

#### 4. Кільця Ньютона.

Пояснювалась фізична суть побудови зображення на інтерференційному принципі.

XVIII- початок XX ст. – період, коли відбувалась значна конкуренція поглядів на природу світла. Були прихильники хвильової природи світла (Томас Юнг, Огюстен Жан Френель, Йозеф фон Фраунгофер) і корпускулярної теорії світла (Ісаак Ньютон). Ньютон фактично відкрив явище дисперсії світла, яке зараз є одним із підтверджень хвильової природи світла. Він його доводив на основі суто механістичних понять про те, наприклад, м'яч буде котитись по поверхні, де швидкість його одна і перейде на іншу поверхню, де швидкість буде іншою, то відбудеться певне заломлення. Якщо говорити про світло, то відповідно існують залежності швидкості від середовища, в якому певна частинка світла поширюється. Ньютон пробував за допомогою корпускулярної теорії пояснити інший аспект прояву інтерференції світла – кільця Ньютона.

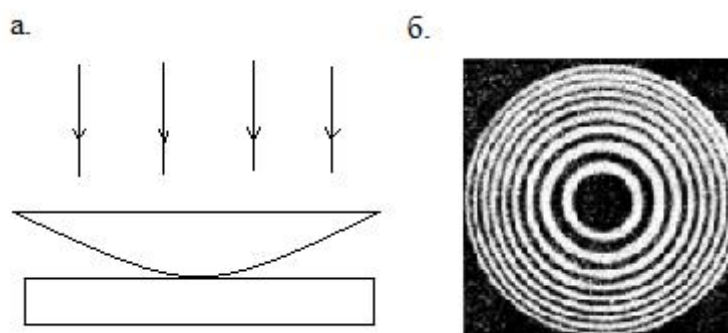


Рис. 2.19. Кільця Ньютона: а. - постановка досліду; б. - результат.



Якщо поставити лінзу на плоску скляну поверхню і освітити плоским фронтом хвилі (рис. 2.19, а.), то отримається інтерференційна картина в вигляді концентричних кіл і те, як будуть забарвлені ці кола, який їхній радіус буде залежати від геометричних і оптичних характеристик лінзи (рис. 2.19, б.). Це і будуть кільця Ньютона, які відображають хвильову природу світла, інтерференційні явища, хоча автор був прихильником корпускулярної теорії.

## **5. Просвітлення оптики.**

Повертаємось до формул (2.30) і (2.31). На основі інтерференції є можливість просвітлювати оптику, робити оптичні прилади більш якісними. Наприклад, зменшуючи відбивання світла за рахунок інтерференції, можна збільшувати проходження світла. Щоб зменшити відбивання потрібно нанести тонку плівку, на якій певні довжини хвиль інтерферували з умовою мінімуму. Такий спосіб називається *просвітленням оптики*. Навіть, якщо взяти простий мобільний телефон і розглянути камеру, а особливо звернути увагу на колір її лінзи. Можна побачити, що колір зовсім не прозорий, а сама вона має певний відтінок (фіолетовий, жовто-зелений...). Це пов'язано з нанесенням просвітлюючих шарів діелектрика.

Зображення предмета є зображенням певних світних точок, з яких складається цей предмет. Тобто, якщо говорити про матеріальну точку в механіці і будь-яке тіло складається з певного набору системи матеріальних точок, то в плані оптики йдеться про те, що будь-яке джерело світла складається з точкових джерел світла або світних точок. Побудувати зображення в будь-якій системі певного предмету означає побудувати зображення всіх світних точок, з яких складається цей предмет.

Коли говориться про те, що зображення є максимумом інтерференційної картини, найголовнішим максимумом, то в даному випадку виходиться з абстрактних понять.

## **2.3. Демонстраційний експеримент, як визначальний фактор формування уявлень про дифракцію світла, її прояви та застосування.**

### **2.3.1. Принцип Гюйгенса-Френеля. Метод зон Френеля.**

Питання дифракції світла було запроваджене у зв'язку із парадоксом, який у свій час сформулював Пуассон. Він керував одним науковим товариством, яке розглядало різноманітні новітні теорії, які на той час виникали в світі. На одному із зібрань він підняв питання про те, що Френель почав пояснювати явища, які пов'язані з дифракцією світла на основі своєї теорії (теорії зон Френеля).

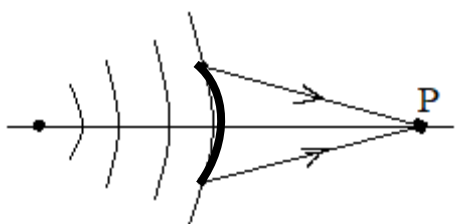


Рис. 2.20. Світло, яке поширюється фронтом і освітлює точку Р.

Якщо світло, згідно Френеля, є електромагнітною хвилею і вона поширюється певним фронтом, і якщо взяти точкове джерело світла, то від нього буде йти фронт хвилі, йтиме хвиля, яка поширюється як сферична поверхня (рис.2.20). Розглядаємо якусь точку спостереження Р. Вона відкритим фронтом хвилі без всяких перешкод освітлюється за рахунок того, що, розглянувши відповідно принципу Гюйгенса-Френеля будь-яку точку простору як вторинне джерело світла, з неї буде проходити певна хвиля і аналогічно, буде якась симетрична точка простору, яку ця хвиля також буде проходити. Їхня різниця ходу буде дорівнювати нулю, отже вони будуть в точці Р інтерферувати з певною умовою максимуму.

Якщо на шляху поширення цієї хвилі поставити малий круглий екран і розглянути ще один екран, на якому мало б бути зображення, то відповідно до законів геометричної оптики цей малий екран має на великому екрані дати

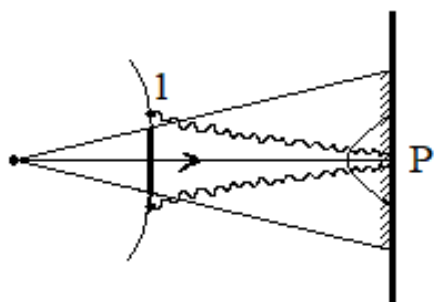


Рис. 2.21. Інтерференційна картина, на якій має спостерігатися геометрична тінь.

абсолютну геометричну тінь, темну пляму (рис.2.21). Насправді, якщо вірити Френелю, то частина фронту хвилі чорним екраном не перекривається. З одного боку екрану ця точка є вторинним джерелом світла, яке буде посилати хвилю в точку Р. Відповідно з другої сторони екрану також буде відповідна точка, яка є симетричною і також посилатиме в точку Р хвилю.

Різниця ходу між цими хвилями буде дорівнювати 0. Отже в точці Р існувала б якась певна інтенсивність світла, тобто вона мала бути освітленою. В центрі геометричної тіні відповідно до міркувань Пуассона, які він робить на основі теорії електромагнітних хвиль Френеля, має бути світла пляма. Оскільки це не можливо тому, що це все явище заперечується звичайними міркуваннями, життєвим досвідом. Світло можна прикрити екраном. Такого не може існувати. Оскільки такого не може статися, то вся теорія електромагнітних хвиль зводиться нанівець і не має права на існування.

Але в цей момент в залі був присутній молодий аспірант Франсуа Араго, який потім повторив цей експеримент. Він взяв свинцеву дробинку, яку використовують для полювання, наколів її на голку, поставив це на підставку із одного боку засвітив свічку, а з іншого поставив екран (рис. 2.22). Через те, що свічка буде достатньо протяжним джерелом світла, а потрібно точкове, Франсуа перед джерелом світла поставив екран, в якому вирізав тонкий отвір, який дав би змогу свічці бути точковим джерелом світла і провів дослід. З'явилась геометрична тінь від цієї кульки (відстань від кульки до екрану була великою), в центрі тіні була світла пляма і краї розмиті, не чіткими геометричними тінями, що складаються з певного числа максимумів і мінімумів інтенсивності. Таким чином сам Пуассон спровокував те, що була експериментально підтверджена пропозиція Френеля до інтерпретації поширення хвиль у просторі за методом Гюйгенса-Френеля, згідно якого кожна точка світлового фронту є вторинним точковим джерелом електромагнітних хвиль, всі ці хвилі (джерела) є між собою когерентними, оскільки вони отримуються з одного фронту хвиль, через це вони всі між собою інтерферують. При чому, якщо світло поширюється в одному напрямку, то результатом цієї інтерференції є певна усереднена інтенсивність, результатом поширення світла в зворотному напрямку є послаблення інтенсивності. Таким чином світло поширюється тільки в одному напрямку. Поширення світла в просторі є результатом інтерференції електромагнітних хвиль, які поширюються з однієї і тієї ж хвильової поверхні.

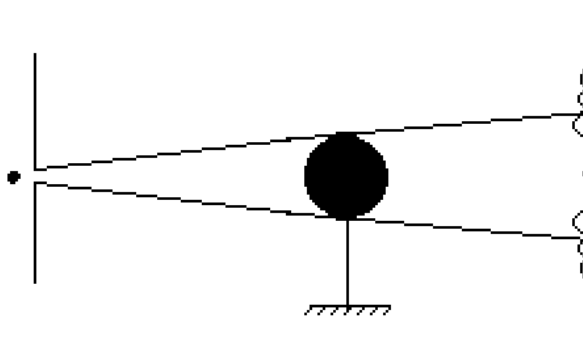


Рис.2.22. Дослід Араго.

Світло має електромагнітну природу, є хвилею і явище дифракції, в принципі, нічим не відрізняється від явища інтерференції. Це є фактично інтерференція багатьох хвиль на якихось перешкодах або неоднорідностях середовища, в якій ця електромагнітна хвиля поширюється.

### 2.3.2. Дифракція на щілині, прямокутному та круглому отворах.

На шляху поширення світла ставлять екран з отвором і потім ще один екран. Маємо отвір і замість того, щоб від отвору бачити чітку геометричну тінь, в центрі цього отвору може бути інтенсивність вища, а далі від центру нижча, тобто зображення тіні буде розмазане (частково засвітлене, частково затемнене) (рис.2.23, а.). Якщо пересуватиметься екран або отвір, робитиметься інший за діаметром отвір, то буде інша картинка. Якщо навпаки, в центрі буде темна пляма, а розподіл інтенсивності буде такий як на зображенні (рис.2.23, б.), то не буде чіткої геометричної тіні.

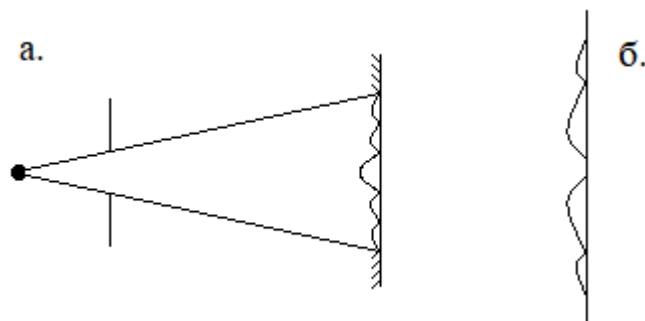


Рис. 2.23. Зображення інтенсивностей на інтерференційній картині.

Є світловий фронт і, якщо світло поширюється в певну точку простору, з цього світлового фронту, в цій точці простору інтерферують всі промені. Якщо частина з них закривається, то результат інтерференції буде іншим. В залежності від умов цього експерименту з отвором (ближче чи даліше закривається частинка світлового фронту для даної точки простору), отримується як умова максимуму, так і умова мінімуму інтерференції. На отворі знаходяться зони Френеля і, якщо вони за різницею ходу відрізняються на  $\lambda / 2$ , то вони можуть інтерферувати або з умовою максимуму, або з умовою мінімуму. І, якщо є непарна кількість зон, то буде умова максимуму, тому що ці зони не компенсуються, різниця ходу яких рівна  $\lambda / 2$ . Якщо їх число парне, значить вони компенсуються, і, відповідно, є умова мінімуму.



Рис. 2.24. Дифракція світла в каламутному середовищі.

Розсіювання світла також у повній мірі пов'язане з хвильовою дифракційною природою світла. Існує середовище (рис.2.24). Якщо воно однорідне, тобто показник заломлення є сталий, не змінюється ( $n=\text{const}$ ), то світловий промінь згідно геометричної оптики поширюється прямолінійно, згідно хвильової оптики в просторі буде поширюватися світловий фронт і кожна точка цього простору буде результатом інтерференції всіх частинок світлового фронту, які беруть участь у поширенні енергії. Якщо вводиться в просторі будь-яка неоднорідність, тобто вводиться будь-який елемент, який має показник заломлення  $n_1$  (також може бути константою,  $n_1=\text{const}$ ), але інший, ніж показник заломлення середовища, то вже відбувається взаємодія світла із цим елементом простору. Світло там може відбиватися, заломлюватися... Від цього процесу змінюються значення напрямку поширення когерентного світла. Джерело те саме, але напрямок поширення змінюється. В результаті відбувається дифракція світла в певному напрямку. Воно поширюється не в одному напрямку, як було в однорідному середовищі, а існують ще максимуми інтерференції в інших напрямках, отже світло перерозподіляє свою інтенсивність на неоднорідностях середовища. Таке середовище називається

*каламутним*. В середовищі є малі неоднорідності, на яких світло дифрагує, але робить це по-різному, бо результат дифракції залежить від довжини хвилі, отже залежить і від розміру частинок, матимуться різні прояви дифракції світла, які проявляються в нашому розумінні, як розсіювання світла.

Дифракція світла – це результат інтерференції, а розсіювання світла – це результат дифракції. Тобто всі ці три явища є однієї природи, просто вони проявляються по-різному в результаті властивостей середовища, в якому поширюється світло.

Світло розсіюється в майже чистій атмосфері, коли є блакитне небо, схід, червоний захід Сонця, особливо, якщо в атмосфері є велика кількість пилу. Вітряна погода зумовлює те, що в ній пил. Пилкові частинки є достатньо великими і через них проходить більше довгохвильова частина діапазону світла, ніж короткохвильова. Таким чином на заході і на сході Сонце є червоним.

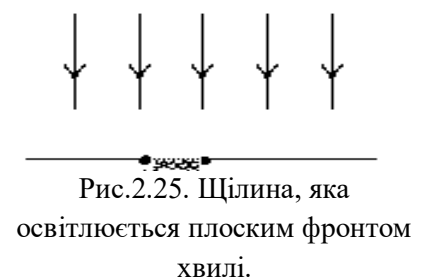


Рис.2.25. Щілина, яка освітлюється плоским фронтом хвилі.

Інший аспект прояву дифракції світла ілюструється взаємодією плоского фронту хвилі і взаємодією паралельних променів.

Щілина, яка освітлюється плоским фронтом хвилі і кожна точка якої є вторинним джерелом електромагнітних хвиль, які будуть мати сферичну поверхню (рис.2.25). Якщо поширюється не перекритий плоский фронт, то кожна точка буде інтерферувати з сусідньою. В результаті отримується максимум інтенсивності тільки для того фронту, який поширюється прямо.

Проводимо ще один експеримент. Людина бере аркуш паперу, напрямляє його до вікна (будемо вважати, що з нього падає плоский фронт хвилі), закриває одне око і на фоні вікна дивиться на край паперу (тобто називаємо його прямолінійним неперервним краєм непрозорого екрану, а знизу знаходиться

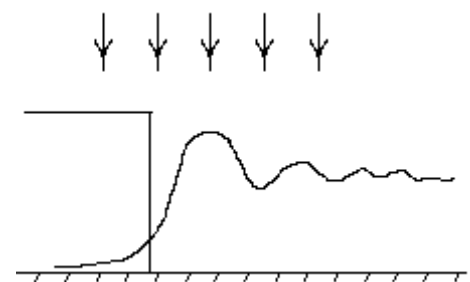


Рис. 2.26. Експеримент з аркушем паперу.

око, можна назвати його екраном). Розглядаємо геометричну тінь від листка паперу і креслимо залежність інтенсивності від положення (рис.2.26). Неозброєним оком можна побачити, що існує певний розподіл інтенсивності, зумовлений зонами Шустера, на які поділяється фронт хвилі, який проходить з екрану. Це означає, що і в цьому випадку проявляються інтерференційні явища, в яких прямолінійність поширення світла нівелюється тим, що частину зон Шустера компенсують екраном, фронт хвилі не проходить. Світло відхиляється від прямолінійності, перерозподіляється інтенсивність світла.

Що буде, якщо до екрану долучити ще один екран? Закріплюємо листок паперу або якусь металічну смужку, яку ставимо на штатив, освітлюємо і ставимо внизу екран, щоб було видно тінь (вона буде негеометричною). Поряд ставимо інший екран і бачимо з цього боку аналогічну картину (рис.2.27). Там освітлення також буде зменшуватися поступово, тобто буде накладатися.

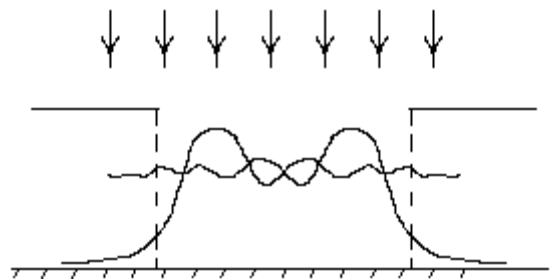


Рис. 2.27. Експеримент з двома аркушами паперу.

А що буде, якщо поставити ці екрани далеко одне від одного? Або зблизити?

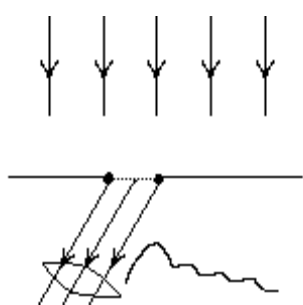


Рис. 2.28. Дифракція у паралельних променях.

Оптична щілина – це довгий і вузький отвір (2-3мм, товщиною кілька сотих міліметра). Є дифракція у паралельних променях. Коли розглядався край паперу, то справа була з інтерференцією променів, які є паралельними між собою. Ця інтенсивність буде створюватися паралельними променями. Щоб її спостерігати треба взяти фокусуючу систему (рис.2.28).

Якщо глянути оком, то буде спостерігатися інтерференційна картина, тому що на сітківку ока фокусуються паралельні промені, які будуть іти в певному напрямку. За рахунок цього спостерігається якась зміна інтенсивності. Якщо це має бути спроектовано на екран, то

використовуватиметься збиральна лінза, в фокальній площині ставиться екран і створюється дифракційна картина. Два металічні екрани починають наближатись один до одного, таким чином дифракційні картини накладаються одна на одну. Змінюються не тільки інтенсивності (які створені когерентним джерелом і які між собою інтерферують), а також і характер інтерференційної картини, вона вся.

Демонстрація дифракції у паралельних променях, яка виконується з використанням фокусуєчої лінзи.

Є пластинка, на якій вирізані клиноподібні отвори (рис.2.29, б.), також фокусуєча лінза та екран. В результаті буде інтерференційна картина в певному напрямку. Максимум інтенсивності буде відповідати центру цієї щілини і буде існувати мінімум інтенсивності. Потрібен паралельний плоский фронт хвилі. Щоб це зробити спочатку треба розфокусувати промені, для прикладу, поставити розсіювальну лінзу, а потім підібрати збиральну лінзу і отримати даний фронт хвилі (рис. 2.29, а.). Цей дослід вдається за допомогою будь-якої лампи.

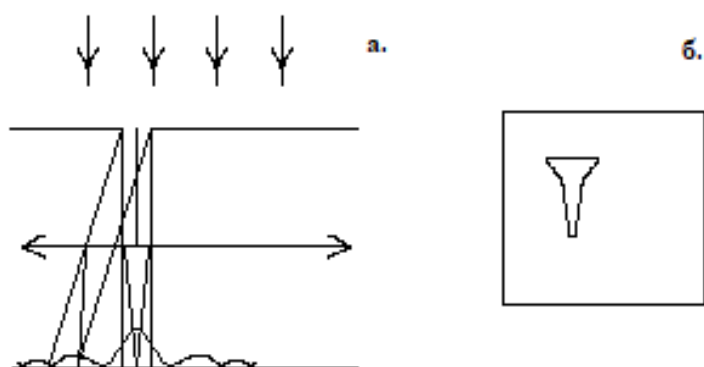


Рис 2.29. Дифракція у паралельних променях, яка виконується з використанням збиральної лінзи: а. - демонстрація досліду, б. - вигляд отвору.



### 2.3.3. Дифракція на двох щілинах

В одному із розглянутих дослідів бралися два плоскі екрани і краї зближувались. В даному випадку утворювалась щілина і отримувалась дифракційна картина, яку вона дає.

Що відбудеться, якщо будуть існувати дві щілини? Є плоский фронт хвилі, фокусуюча лінза, певний напрямок, в якому будуть фокусуватися певні хвилі, що йдуть з однієї щілини, на яку буде накладатися результат дифракції на другій щілині. Паралельні промені, попадаючи на фокусуючу лінзу, будуть фокусуватися в одному напрямку (рис. 2.30).

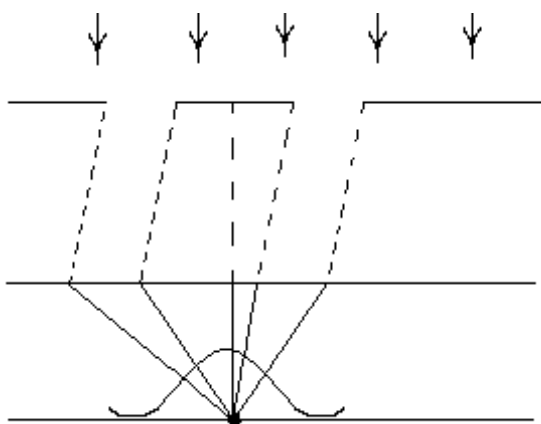


Рис. 2.30. Дифракція на двох щілинах

Дифракція на одній і другій щілині дає два джерела, які мають дві інтенсивності інтерферують разом (дають свій результат інтерференції). Додатково змінюється інтерференційна картина. Так і формується дифракційна картина у дифракційній решітці. Накладаються два явища інтерференції від двох щілин за рахунок того, що на кожній щілині відбулася дифракція. Є дві функції: функція дифракційна і інтерференційна. Вони між собою перемножуються.

**2.3.4. Дифракційна решітка. Похиле падіння променів на решітку. Дифракційна решітка, як спектральний прилад.**

Якщо додається ще одна щілина, то в певній точці буде результат інтерференції,

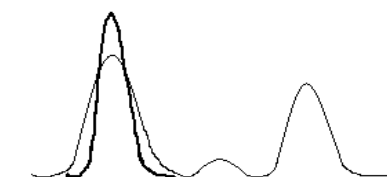


Рис.2.31. Зміна максимумів і мінімумів при додаванні щілин.

посилення світла. Тобто додаткові максимуми, які будуть отримані від однієї щілини на основі первинних максимумів і додаткових мінімумів (рис.2.31). Якщо переходити до великої кількості таких щілин, які розміщені на однаковій, але дуже малій відстані одна від одної, то цим самим збільшується інтенсивність. Такий пристрій буде мати свій результат в залежності від умов експерименту, а однією із основних умов такого експерименту є довжина хвилі. Різні кольори світла, фільтри, лазери дадуть різне положення цих ліній. Можна розкласти біле світло в спектр за допомогою такого приладу, який називається *дифракційною решіткою*. Вона працює не тільки в тому ракурсі, коли світло проходить через неї (коли є щілини). Можна використовувати цей ефект накладання хвиль, інтерференції цих хвиль тоді, коли є певна різниця ходу до даної точки простору від різних ділянок світлового фронту (рис. 2.32). Якщо нанести відбиваючі смужки на якусь поверхню, то також можна отримати цей ефект. Важливо, щоб це не був суцільний фронт хвилі. Потрібно, щоб він мав місця, від яких хвиля відбивається. В цьому випадку буде дифрагувати світло, яке відбивається від різних частинок, але буде деяка різниця ходу за рахунок того, що вони зміщені одна відносно одної.

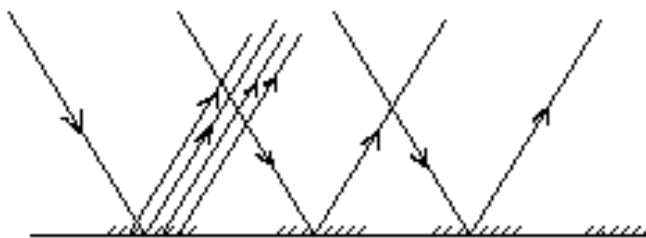


Рис. 2.32. Зображення різниці ходу, створена відбиваючими смужками.

Інтерференція буде відбуватися між різними відбиваючими ділянками за рахунок того, що вони створюють дифракційне джерело за рахунок дифракції в межах самої ділянки. Ці ділянки, через які світло або проходить, або від яких світло відбивається, є вторинними когерентними джерелами світла. Точковими вони робляться тоді, коли промені зводяться в одну точку збиральною лінзою.

Це стосувалось дифракції Фраунгофера. Можемо повернутися до дифракції Френеля. Вона може працювати як фокусуюча система.

Дифракційна решітка – це результат взаємодії світла із неоднорідностями середовища, створеними штучно.

### **2.3.5. Вплив дифракційних, інтерференційних явищ на якість зображення у оптичних приладах.**

Вже говорилось, що дві щілини, зсунуті разом, створюють певне зображення, яке трохи буде спотворювати геометричну тінь. Коли використовуються різноманітні оптичні прилади, дефекти, особливо в мініатюрному використанні, то ця дифракція обмежується мініатюризацією цих приладів, тому що ті хвильові явища на границі розділу накладаються між собою і можуть спотворювати зображення. Накладаються обмеження на розміри діафрагми, апертури лінзи, що приводить до того, що виникають дифракційні ефекти, які будуть дуже сильно спотворювати зображення. Тобто це є дифракційні обмеження на використання оптичних приладів.

Візьмемо експеримент «Дифракція на круглому отворі». Навіть, якщо в отвір вставити лінзу, то вона все одно не буде запобігати спотворенню зображення, бо хвилі дифрагують й розподіляється інтенсивність світла.

Існує спосіб інтерпретації дисперсії світла також на основі цих явищ. Коли є перехід з одного середовища в інше, зустрічається зміна швидкості поширення світла. Якщо зустрічається зміна швидкості поширення світла, то змінюється різниця ходу променів, які, інтерферуючи, сприяють тому, що світло поширюється. Виникає залежність швидкості світла в середовищі від довжини хвилі, але це суто пов'язано з явищами взаємодії електромагнітної хвилі із оболонками атомів, молекулярними спектрами і т. д.. Оптика в даному випадку говорить, що дисперсія світла проявляється як розкладання світла в спектр. Дисперсія – це залежність швидкості в даному середовищі, а отже і показника заломлення від довжини хвилі. Розкладання світла в спектр йде як наслідок. Це проявляється завдяки тому, що світловий фронт переходячи з одного середовища в інше змінює напрямок свого поширення за рахунок того, що змінюється інтерференційна картина через створення додаткової різниці ходу.

## Висновки

У результаті аналізу чинних шкільних підручників, що використовуються для вивчення розділу «Хвильова оптика» у шкільному курсі фізики, опрацюванні запропонованих методичних підходів до вирішення питання оптимізації дидактичного процесу засвоєння основних компетенцій, що стосуються хвильових явищ у природі світла, а також на базі досвіду викладання розділу «Оптика» у загальноосвітніх закладах. У дипломній роботі запропоновано оригінальний підхід до викладення курсу, особливість якого полягає у визначенні порядку використання теоретичних прийомів та демонстраційного експерименту при поясненні різних понять. При цьому з'ясовано, що:

1. Основою формування основних понять та висновків інтерференції світла служить аналогія між розумінням накладанням коливань однієї частоти у випадку механічних та електромагнітних хвиль. При цьому важливим є формування розуміння категорії «інтенсивність світла» як інтегральної величини, що сприймається приймачем і є пропорційною квадрату амплітуди коливання. Експериментальну демонстрацію інтерференційних явищ раціонально проводити після отримання висновків із теоретичних міркувань.
2. Важливим елементом розуміння переходу від хвильових понять до геометричної інтерпретації роботи оптичних приладів є висновок про інтерференційну природу формування зображення у оптичних приладах та системах.
3. Демонстраційний експеримент є визначальним стартовим фактором при означенні та поясненні дифракційних явищ. При цьому раціонально акцентувати увагу на єдності проявів хвильової природи світла у явищах інтерференції та дифракції, а дифракційні прояви розглядати з точки зору інтерференційних взаємодій.

4. Основні уявлення дифракції світла та спостережувані межі їх прояву є дієвим інструментом для формування розуміння ідеї корпускулярно-хвильового дуалізму у поясненні поведінки матерії в цілому.

## Список використаної літератури

1. Засєкіна Т. М. Фізика і астрономія (рівень стандарту, за навчальною програмою авторського колективу під керівництвом Ляшенка О. І.): підруч. для 11кл. закладів загальної середньої освіти / Т. М. Засєкіна, Д. О. Засєкін. – К.:УОВЦ «Оріон», 2019. – 272с.
2. Засєкіна Т. М. Фізика і астрономія (профільний рівень, за навчальною програмою авторського колективу під керівництвом Ляшенка О. І.): підруч. для 11кл. закладів загальної середньої освіти / Т. М. Засєкіна, Д. О. Засєкін. – К.:УОВЦ «Оріон», 2019. – 304с.
3. Сиротюк В. Д. Фізика і астрономія (рівень стандарту, за навч. Програмою авт. кол. під керівництвом Ляшенка О. І.): підруч. Для 11-го кл. закл. заг. серед. освіти / Володимир Сиротюк, Юрій Мирошніченко. – Київ: Генеза, 2019. – 368с.
4. Коршак Є. В. Фізика: 11 кл.: підруч. для загальноосвіт. навч. закл.: рівень стандарту / Є. В. Коршак, О. І. Ляшенко, В. Ф. Савченко. – К.: Генеза, 2011. – 256с.
5. Генденштейн Л.Е. Дік Ю. І. Фізика 11 клас: підруч. для загальноосвіт. навч. закладів: рівень стандарту / Л. Е. Генденштейн: Гімназія 2012 – 272с.
6. Фізика ( рівень стандарту, за навчальною програмою авторського колективу під керівництвом Локтєва В. М.): підруч. для 11 кл. закл. загал. серед. освіти / [Бар'яхтар В. Г., Довгий С. О., Божинова Ф. Я., Кірюхіна О. О]; за ред. Бар'яхтара В. Г., Довгого С. О. – Харків: Вид-во «Ранок», 2019. – 272с.
7. -Fresnel Diffraction Theory See F.A. Jenkins & H.E. White, 'Fundamentals of Optics', pp. 378-402. Donggyu Vim. Sungmuk Lee / Learning Wave Optics through the Computer Simulation. <https://s-space.snu.ac.kr/bitstream/10371/72449/1/06>.
8. Dinh Xuan Khoa and Nguyen Huy Bang. A Low-Cost Experimental Kit for Teaching Wave Optics Based on the CDIO Approach. The Physics Teacher 57, 169 (2019); <https://doi.org/10.1119/1.5092477>
9. J. Javier Sánchez-Mondrag On, Editor, SPIE Vol. 3831 (2000) • 0277-786X/00, 365. Aifredo Moreno Yeras, Rolando Gonzalez Pena.

Physics Department, Higher Institute of Technology "José Antonio Echeverría".

CO 19390, Havana, CUBA <https://www.researchgate.net/publication/252935416>

10. E. Puspitaningtyas, E. Fandira Nasera Putri, Umrotul and Sutopo

Universitas Negeri Malang (State University of Malang, Indonesia) Analysis of high school students' mastery in light wave theory

using structured inquiry learning assisted by a virtual laboratory

e-mail: puspitaellen@gmail.com; emiliafandira@gmail.com;

<https://www.researchgate.net/publication/348259267>

11. Hao, Lv, Aimei Liu, S. Zhang, and Y. Xiao, "Demonstration of wave optic in physics education," in *ETOP 2017 Proceedings*, X. Liu and X. Zhang, eds., (Optica Publishing Group, 2017), 104524H.

<https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=ETOP-2017-104524H>

12. edited by Xu Liu, Xi-Cheng Zhang, Proc. of SPIE Vol. 10452, 1045211 · © 2017 ICO, IEEE, OSA, SPIE The Application of Micro-lesson in Optics Teaching Suzhen Yuan\*, Xuefeng Mao, Yongle Lu, Yan Wang , Yuan Luo College of Opto Electronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

<https://opg.optica.org/DirectPDFAccess>

13. Vanes Mesic, Knut Neumann, Ivica Aviani, Elvedin Hasovic, William J. Boone . Measuring students conceptual understanding of wave optics. A. Using the wave optics item pool for constructing a measurement scale 010115-11.

<https://www.researchgate.net/publication/331340553>

14. Natasa Erceg, Vladimir Grubelnik, Ana Susac, Dzana Salibasic Glamocic, A Rasch model approach to item bank building / 010115-3/

<https://www.researchgate.net/publication/331340553>

15. Остафійчук Б. К., Рувінський М. А., Яцура М. М., Будзуляк І. М. Курс загальної фізики. Оптика: хвилі, промені, кванти, - Івано-Франківськ: В-цтво Прикарпатського у-ту, 2011.

16. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976.

17. Остафійчук Б. К., Рувінський М. А., Яцура М. М. Практикум розв'язування задач з курсу загальної фізики. Оптика. – Івано-Франківськ: Плай, 2001.
18. Яцура М. М., Гасюк І. М., Кайкан Л. С. Фізичний лабораторний практикум. Оптика. – Івано-Франківськ: Плай, 2012.
19. Білий М. І., Скубенко А. Ф. Загальна фізика. Оптика. – К.: Рад. Школа, 1987.
20. Яворський Б. М., Детлаф А. А. Курс фізики т. III. Хвильові процеси. Оптика. Атомна і ядерна фізика. – К.: Вища школа, 1973.