

ОПТИКА

1. Розвиток уявлень про природу світла.
2. Основні поняття геометричної оптики. Джерела і приймачі світла. Поширення світла в різних середовищах. Поглинання і розсіювання світла.
3. Відбивання і заломлення світла. Закони заломлення світла.
4. Лінзи. Оптична сила лінзи. Побудова зображень, що дає тонка лінза
5. Дисперсія світла. Спектральний склад світла. Кольори.
6. Світло як електромагнітна хвиля. Інтерференція та дифракція світла.

1. Розвиток уявлень про природу світла.

Ідеї давніх філософів

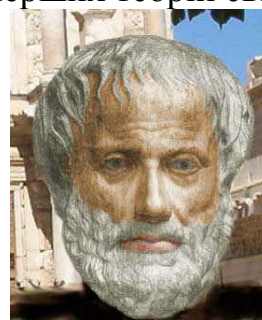
Перші уявлення про природу світла були закладені ще з давніх-давен. Грецький філософ Платон (427–327 рр до н.е.) створив одну з перших теорій світла.



Платон



Евклід



Арістотель

Евклід і Арістотель (300–250 рр до н.е.) дослідним шляхом установили такі основні закони оптичних явищ, як прямолінійне поширення світла й незалежність світлових пучків, відбиття й заломлення. Арістотель уперше пояснив сутність зору.

Незважаючи на те, що теоретичні положення древніх філософів, а пізніше й учених середніх століть були недостатніми й суперечливими, вони сприяли формуванню правильних поглядів на сутність світлових явищ і заклали підвалини для подальшого розвитку теорії світла й створення різноманітних оптичних приладів.

У міру накопичення нових відомостей про властивості світлових явищ змінилася точка зору на природу світла. Учені вважають, що історію вивчення природи світла варто починати з XVII століття.

Корпускулярна теорія світла Ньютона



Ремер



Гримальді



Ньютон



Бартолін

У XVII столітті данський астроном Ремер (1644–1710) виміряв швидкість поширення світла; італійський фізик Гримальді (1618–1663) відкрив явище

дифракції; геніальний англійський учений І. Ньютон (1642–1727) розвинув корпускулярну теорію світла, відкрив явища дисперсії й інтерференції, а Е. Бартолін (1625–1698) виявив подвійну променезаломлюваність в ісландському шпаті, заклавши тим самим основи кристалооптики.

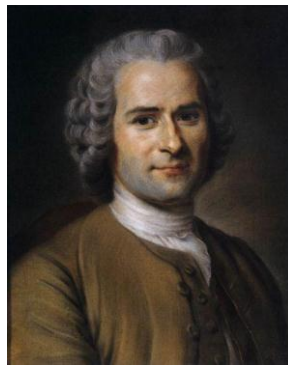
На XVII століття припадають і перші спроби теоретичного обґрунтування спостережуваних світлових явищ. Корпускулярна теорія світла, розвинена Ньютоном, полягає в тому, що світлове випромінювання розглядається як безперервний потік дрібних частинок — корпускул, які, випущені джерелом світла, з великою швидкістю летять в однорідному середовищі прямолінійно й рівномірно.

На основі корпускулярних уявлень Ньютон пояснив більшість відомих тоді оптичних явищ: прямолінійне поширення світла в однорідному середовищі, відбиття й заломлення світла.

Хвильова теорія світла Гюйгенса



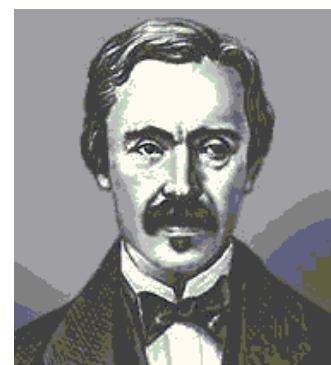
Гюйгенс



Юнг



Френель



Фуко

З погляду хвильової теорії світла, основоположником якої є Х. Гюйгенс, світлове випромінювання являє собою хвильовий рух. Світлові хвилі Гюйгенс розглядав як пружні хвилі високої частоти, що поширюються в особливому пружному й густому середовищі — ефірі, який заповнює всі матеріальні тіла, проміжки між ними й міжпланетні простори.

Він строго математично описав явище відбиття й заломлення хвиль, причому з його міркувань випливало, що швидкість світла в густішому середовищі повинна бути менше, ніж у повітрі.

1801 р. Юнг на основі хвильових подань доволі просто й наочно роз'яснив інтерференцію світла й розвинув у такий спосіб хвильову теорію світла.

1818 р. Френель незалежно від Юнга докладно розвинув теорію дифракції й інтерференції світла, показавши при цьому, що інтерференція є прямим наслідком хвильової природи світла. Остаточний удар по корпускулярній теорії було завдано дослідями Фуко, що виміряв швидкість світла у воді, значення якої відповідало результатам, отриманим на основі хвильової теорії.

Хвильова теорія з єдиної точки зору пояснила всі відомі тоді явища й передбачила ряд нових.

Протягом понад сто років корпускулярна й хвильова гіпотези про природу світла існували паралельно. Жодна з них не могла здобути вирішальної перемоги. Лише авторитет Ньютона змушував більшість учених віддавати перевагу корпускулярній теорії.

2. Основні поняття геометричної оптики

Джерелом світла називають тіла, здатні випромінювати світло.

Досліди показує, що всі сильно нагріті тіла випромінюють світло.

Нагріті тіла, що випромінюють світло, називають *тепловими джерелами світла*.

Холодні джерела світла — це тіла, які світяться за температури, наближеної до кімнатної.

Сонце, блискавка або світляки випромінюють світло без участі людини. Такі джерела світла, створені власне природою, називають *природними*.

Сьогодні людина вже створила багато джерел світла — їх називають *штучними*.

Приймачами світла називають тіла й пристрої, у яких під дією світла, що падає на них, відбуваються помітні зміни.

Найважливішим для людини приймачем світла є око. Коли світло потрапляє на сітківку, що встеляє очне дно, воно спричиняє складні реакції, у результаті чого ми бачимо навколишній світ.

Оскільки світло — електромагнітне випромінювання і йому притаманні всі властивості електромагнітних хвиль, то всі завдання оптики можна розв'язати на основі хвильових уявлень. Але під час розв'язання задач на побудову зображень у дзеркалах і лінзах і проектування оптичних приладів учені користуються геометричними методами. Ці методи становлять зміст геометричної оптики, яку інакше називають променевою оптикою.

Основними поняттями геометричної оптики є *пучок і промінь*.

Промінь — це лінія, що вказує напрямок перенесення світлової енергії.

У побуті ми часто називаємо світловим променем тонкий пучок світла. Не існує нескінченно вузьких світлових пучків; пучок світла завжди має кінцеву ширину. Промінь — це ніби вісь пучка, а не сам пучок.

На практиці всі джерела світла мають розміри. Світна ж точка є найпростішим джерелом світла, яке може уявити собі людина. Промені світла, що виходять з неї, ніде не перетинаються і являють собою цілком упорядковану світлову картину.

Джерело світла, розмірами якого в даних умовах можна знехтувати, називають точковим джерелом світла.

Точкове джерело світла є фізичною моделлю джерела світла, відстань до якого в багато разів більше від розмірів джерела.

Закон прямолінійного поширення світла

Ще в Давній Месопотамії за 5000 років до нашої ери люди знали про прямолінійне поширення світла. Про це писав ще засновник геометрії Евклід (300 років до н.е.).

У Давньому Єгипті цю властивість світла використовували під час будівництва пірамід.

Якщо між оком і яким-небудь джерелом світла помістити непрозорий предмет, то джерело світла ми не побачимо. Пояснюється це тим, що

світло в порожнечі або однорідному середовищі поширюється прямолінійно.

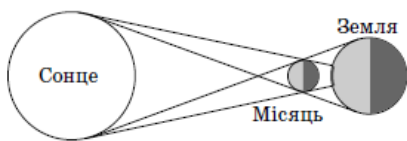
Це один із законів геометричної оптики, що називається законом прямолінійного поширення світла.

Прямолінійність поширення світла підтверджується утворенням тіні. Якщо взяти точкове джерело світла, екран і між ними помістити непрозорий предмет, то на екрані з'явиться темне зображення його обрисів — тінь.

Тінь — ділянка простору, у яку не потрапляє світлова енергія від джерела світла (або інакше: ділянка простору, з якої не можна побачити джерело світла).

Якщо ж ми візьмемо протяжне джерело світла, то на екрані навколо тіні утворюється ще й півтінь.

Півтінь — ділянка простору, у яку світлова енергія від джерела світла потрапляє частково (або інакше: ділянка простору, з якої джерело світла можна побачити лише частково).



Утворенням тіні й півтіні пояснюють сонячні й місячні затемнення. Під час *сонячного затемнення* повна тінь від Місяця падає на

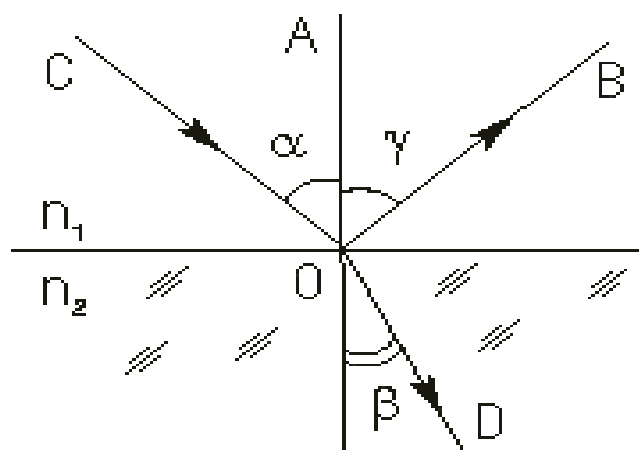
Землю. Із цього місця Землі Сонця не видно. Коли Місяць, обертаючись навколо Землі, потрапляє в її тінь, то спостерігаємо місячне затемнення.

У тих місцях Землі, куди впала тінь, буде спостерігатися повне затемнення Сонця. У місцях півтіні тільки частина Сонця буде закрита Місяцем, тобто відбудеться часткове затемнення Сонця.



3. Відбивання і заломлення світла. Закони заломлення світла.

Якщо направити вузький світловий пучок на поверхню води у великій посудині, то частина світла відіб'ється від поверхні води, інша частина пройде з повітря у воду.



Зобразимо розглянутий дослід графічно (див. *рисунок*). Лінія AO — перпендикуляр до межі розділу двох середовищ. Промінь CO — падаючий промінь; промінь OB — відбитий промінь; промінь OD — заломлений промінь; α — кут падіння; γ — кут відбиття; β — кут заломлення.

Для дзеркального відбиття світла виконуються закони відбиття світла, установлені ще в III ст. до н. е.

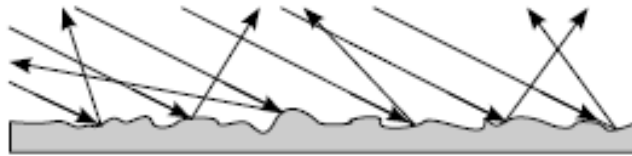
1. Промінь падаючий, промінь відбитий і перпендикуляр до поверхні в точці падіння лежать в одній площині.

2. Кут відбиття дорівнює куту падіння.

Хід променів під час відбиття світла має властивість оборотності: якщо точковий об'єкт і його зображення поміняти місцями, то променева картина відбиття не зміниться; зміниться при цьому лише напрямок променів.

Дзеркальне й розсіяне відбиття

Світло, відбите від шорсткуватої поверхні, взагалі не утворює якогось пучка й не має певного напрямку: воно розсіюється й поширюється у всіх напрямках. Таке відбиття називається *розсіяним (дифузійним)*.

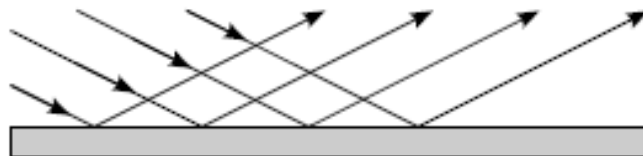


Саме так відбивається світло від більшості тіл, завдяки чому ми можемо бачити тіла навколо нас. Якщо ж поверхня гладка, то відбиття буде дзеркальним, тобто відбите світло утворить вузький пучок.

Наочною моделлю дзеркального й розсіяного відбиттів є відбиття Місяця у воді. Поверхня тихого озера відбиває світло дзеркально, тому ми бачимо в озері чітке зображення Місяця. А на поверхні моря завжди є хвилі, завдяки чому відбиття Місяця «розбивається» й перетворюється в «місячну доріжку».

Відбивну поверхню називають *плоским дзеркалом*, якщо пучок паралельних променів, що падають на неї, після відбиття залишається паралельним.

Відповідно до закону відбиття світла, кожний промінь пучка відбивається від плоского дзеркала під тим самим кутом, під яким падає.



В. Снеллиус

Заломлення світла

Історики науки приписують експериментальне відкриття закону заломлення світла в його сучасному вигляді голландському вченому В. Снеллиусу (1621 р.), однак теоретичне обґрунтування цього закону було зроблено французьким фізиком

і математиком Рене Декартом (1630 р.).

Використовуючи демонстраційний експеримент і креслення, формулюємо закони заломлення світла:

1) заломлений промінь лежить в одній площині з падаючим променем і перпендикуляром до межі розділу двох середовищ, поставленим у точці падіння променя;

2) відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення є величиною постійною для двох цих середовищ:

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

Величина n називається *відносним показником заломлення* двох даних середовищ.

Якщо промінь падає в дане середовище з вакууму, величина n називається *абсолютним показником заломлення* (або просто показником заломлення) цього середовища.

Показник заломлення повітря дуже мало відрізняється від одиниці, а показник заломлення води дорівнює приблизно 1,33.

Те із двох середовищ, у якого показник заломлення більше, називають *оптично гущішим*.



Приклади задач

Задача 1. Коли кут падіння променя з повітря на поверхню пластинки дорівнює 80° , кут заломлення дорівнює 41° . Визначте швидкість світла в пластинці.

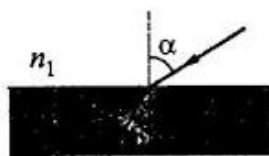
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_{21}}{n}; \quad n_{21} = \frac{\sin(80^\circ)}{\sin(41^\circ)} = 1,5;$$

$$v = \frac{c}{n_{21}} = 200000 \text{ км/с};$$

Задача 2.

При куті падіння 60° кут заломлення дорівнює 40° . Визначте кут заломлення в цьому середовищі, якщо кут падіння становить 30° .

$$\begin{array}{l} \alpha_1 = 60^\circ \\ \gamma_1 = 40^\circ \\ \alpha_2 = 30^\circ \\ \beta_2 = ? \end{array}$$



Задача 3.2

Закон заломлення світла

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \gamma_1} = \frac{n_2}{n_1}; \quad \frac{\sin \alpha_2}{\sin \gamma_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

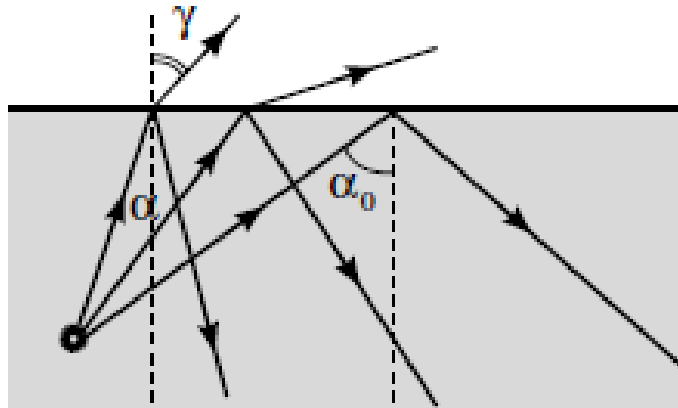
Тоді $\frac{\sin \alpha_1}{\sin \gamma_1} = \frac{\sin \alpha_2}{\sin \gamma_2}$. Звідси $\sin \gamma_2 = \frac{\sin \gamma_1 \cdot \sin \alpha_2}{\sin \alpha_1}$.

Отже, $\sin \gamma_2 = \frac{\sin 40^\circ \cdot \sin 30^\circ}{\sin 60^\circ} \approx 0,37$; $\gamma_2 = \arcsin 0,37 \approx 22^\circ$

Відповідь: 22° .

Повне відбиття

Якщо падаючий промінь спрямований з оптично густішого середовища в оптично менш густе (наприклад, з води в повітря), то $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} < 1$. Це означає, що в цьому випадку кут заломлення γ більше від кута падіння α . У разі збільшення кута падіння інтенсивність відбитого променя збільшується, а інтенсивність заломленого променя зменшується. І за такого кута падіння α_0 , коли заломлений промінь повинен був би йти уздовж поверхні розділу двох середовищ, тобто за $\gamma = 90^\circ$, заломлений промінь повністю зникає.



Цей кут падіння α_0 називається *граничним кутом повного відбиття*, адже якщо кут падіння дорівнює цьому куту або є більшим за нього, промінь світла повністю відбивається від межі розділу двох середовищ.

Це явище називається повним відбиттям:

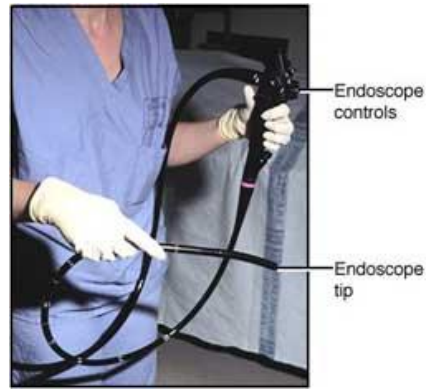
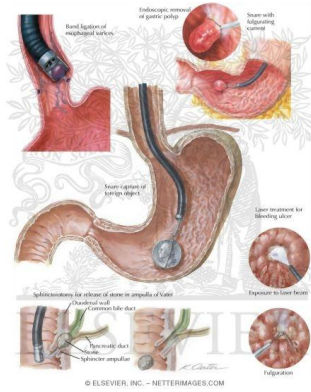
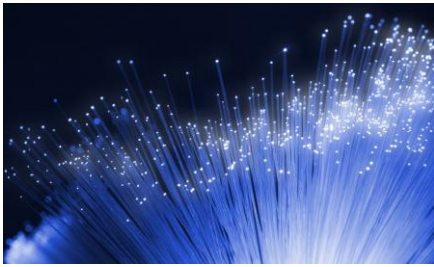
явище відбиття світла від оптично менш густого середовища, за якого заломлення відсутнє, а інтенсивність відбитого світла практично дорівнює інтенсивності падаючого.

Явище повного відбиття використовують, наприклад, у світловодах під час передання світлових сигналів по тонких скляних нитках (**«волоконна оптика»**). За рахунок багаторазового повного відбиття світло може бути напрямлене будь-яким (прямим або вигнутим) шляхом.

Волоконно-оптичні пристрої використовують у медицині *ендоскопи* — зонди, що вводять у внутрішні органи для безпосереднього візуального спостереження.

У цей час волоконна оптика витісняє металеві провідники в системах передання інформації.

Повне відбиття використовують у призматичних біноклях, перископах, дзеркальних фотоапаратах, а також у світлообертачах (катафотах), що забезпечують безпечну стоянку й рух автомобілів.



4. Лінзи. Оптична сила лінзи. Побудова зображень, що дає тонка лінза

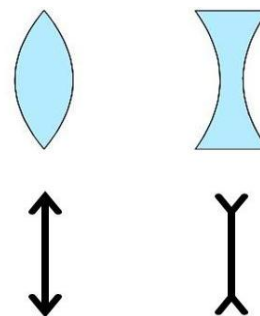
Лінза – прозоре тіло, обмежене, найчастіше сферичними поверхнями. (сферичною має бути принаймні одна з поверхонь).

Лінза є тонкою, якщо її товщина $\ll R$.

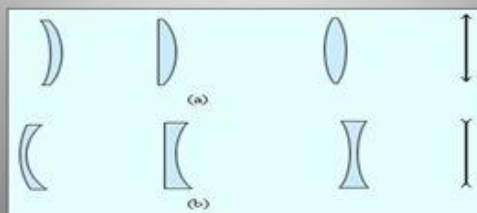
Лінзи бувають опуклими та увігнутими (збиральними та розсіючими)

Лінзи бувають наступних видів:

1. двоввігнута лінза
2. плоско-випукла лінза
3. збірний меніск
4. плоско-ввігнута лінза
5. двовипукла лінза
6. розсіювальний меніск

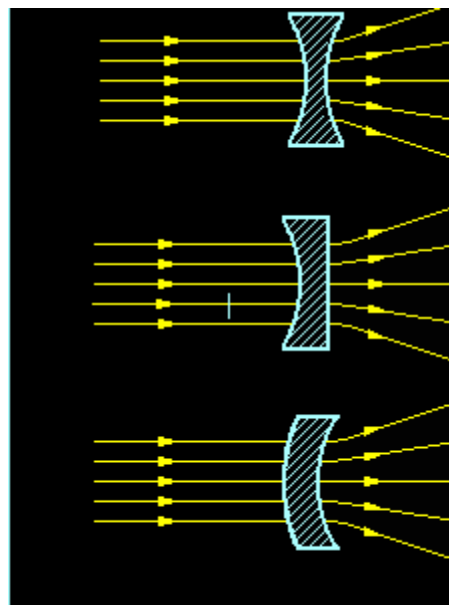
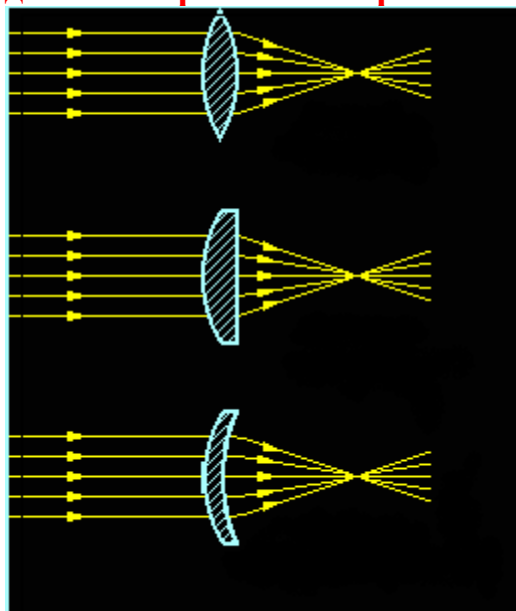


Одна з поверхонь може бути і плоскою (її можна вважати сферою з дуже великим радіусом).



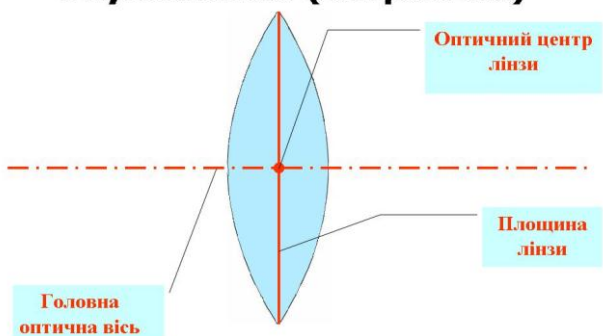
Збиральною називається лінза, в якій паралельний пучок променів після проходження через неї збирається у одній точці – фокусі.

Розсіювальною називається лінза, в якій паралельний пучок променів після проходження через неї стає розбіжним.

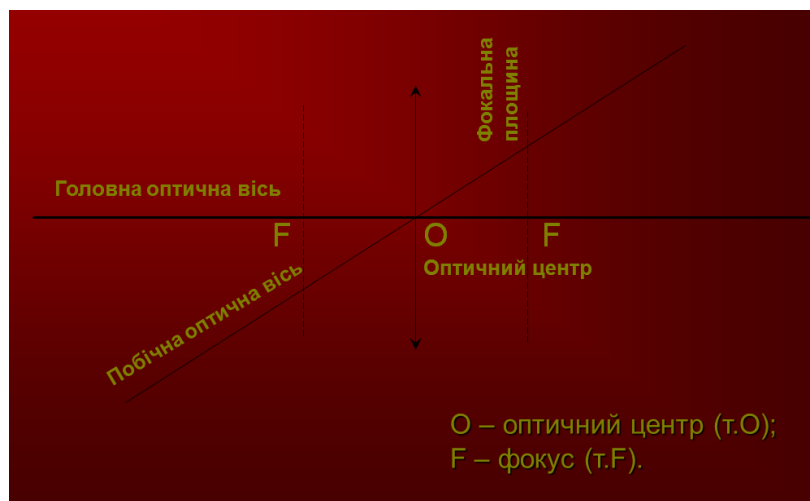
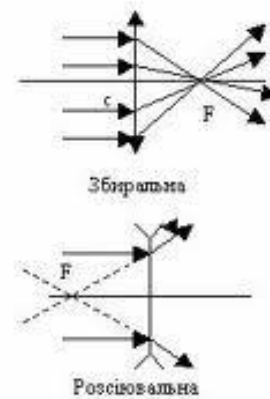
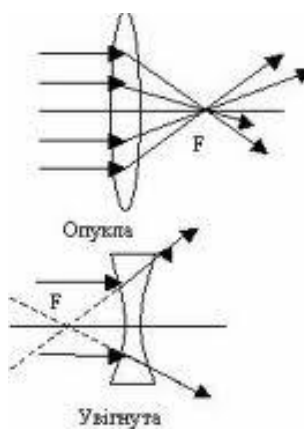
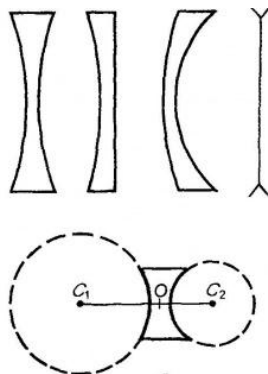
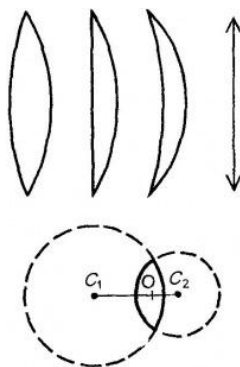
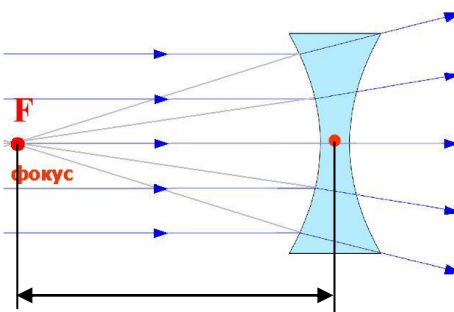
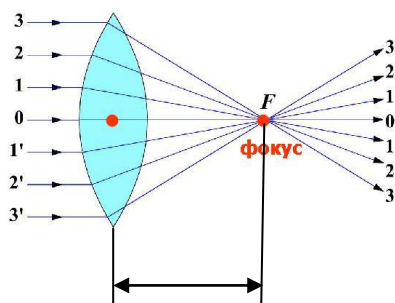
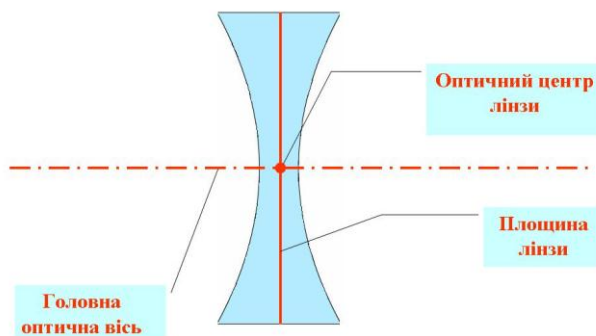


Основні лінії та точки лінзи.

Опукла лінза (збиральна)



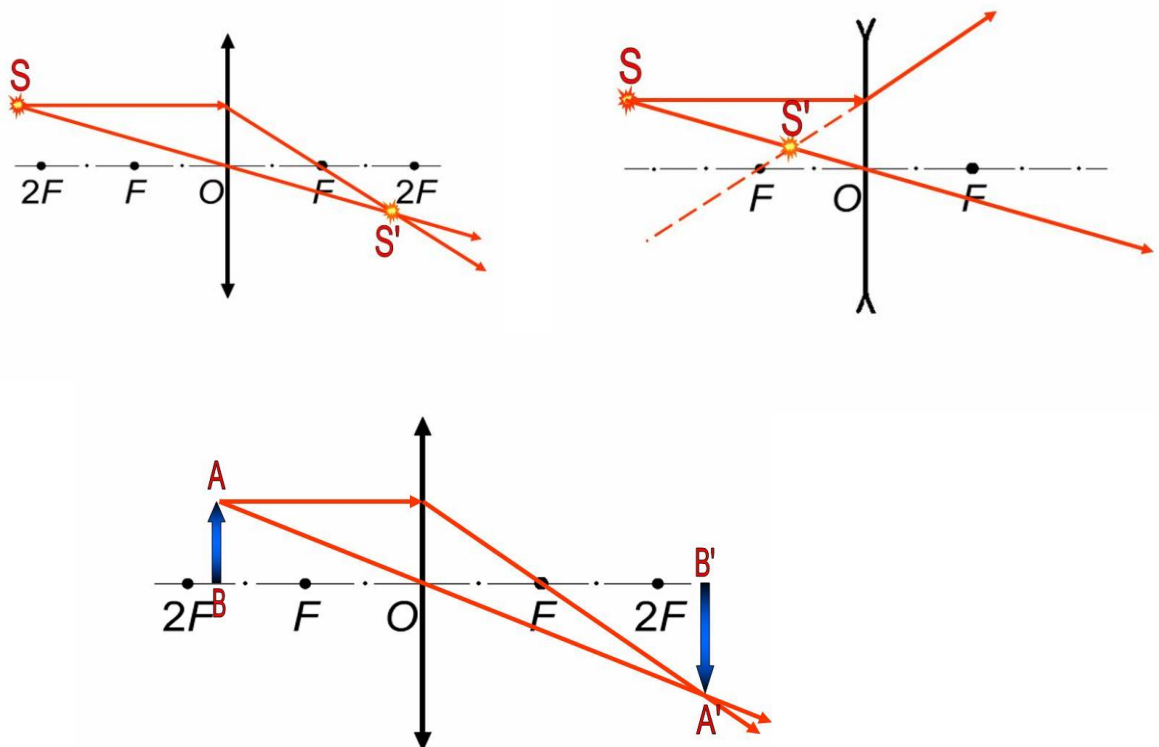
Увігнута лінза (розсіювальна)



- **Фокус лінзи** – точка, в якій перетинаються всі промені, що проходять через лінзу.
- **Головна оптична вісь** – пряма, що проходить через центри сферичних поверхонь лінзи.
- **Оптичний центр** – перетин головної оптичної осі з лінзою.
- **Побічна оптична вісь** – будь – яка пряма, що проходить через оптичний центр.
- **Фокусна відстань** – відстань від лінзи до її фокуса.

Рух основних променів

- 1) Промінь, що проходить через оптичний центр, після проходження через лінзу не змінює напрям.
- 2) Промінь, паралельний до головної оптичної осі, після проходження через лінзу йде:
 - а) для збиральної лінзи – через фокус, розташований по інший бік лінзи
 - б) для розсіювальної лінзи – так, що продовження променя йде через фокус, розташований по той бік лінзи, звідки падає промінь
- 3) Промінь, що йде через “ближній” фокус (для збиральної лінзи) або напрямлений так, що його продовження проходить через “дальній” фокус (для розсіювальної лінзи), після проходження через лінзу йде паралельно до головної оптичної осі.



Корисно подивитися відео

<http://www.youtube.com/watch?v=hXKBuBPggVE#t=16>

Оптична сила лінзи. Формула тонкої лінзи.

Фокусна відстань позначається літерою F . Для збиральної лінзи $F > 0$, для розсіювальної - $F < 0$.

Оптична сила лінзи – це величина D , обернена до фокусної відстані.

$$D = \frac{1}{F} \quad [F] = 1\text{м} \\ [D] = 1\text{дптр}$$

Формула тонкої лінзи:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$$

d – відстань від лінзи до предмету;

f – відстань від лінзи до зображення.

Збиральна лінза	Розсіювальна лінза	Дійсне зображення	Уявне зображення
$F > 0$	$F < 0$	$d > 0$	$d > 0$
$D > 0$	$D < 0$	$f > 0$	$f < 0$

Приклад задачі

Задача 1. Знайти фокусну відстань і оптичну силу збиральної лінзи. Якщо зображення предмета розташованого на відстані 30 см від лінзи одержаної по другу сторону лінзи на такій самій відстані.

Формула тонкої лінзи:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$$

або

$$D = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$$

1. Знайдемо оптичну силу лінзи:

$$d = f = 30 \text{ см або } 0,3 \text{ м,}$$

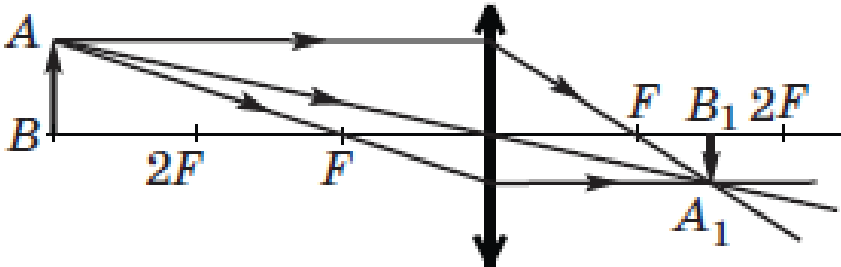
$$D = \frac{1}{0,3} + \frac{1}{0,3} = 6,67 \text{ дптр}$$

2. Тоді:

$$F = \frac{1}{D} = \frac{1}{7} = 0,15 \text{ м або } 15 \text{ см}$$

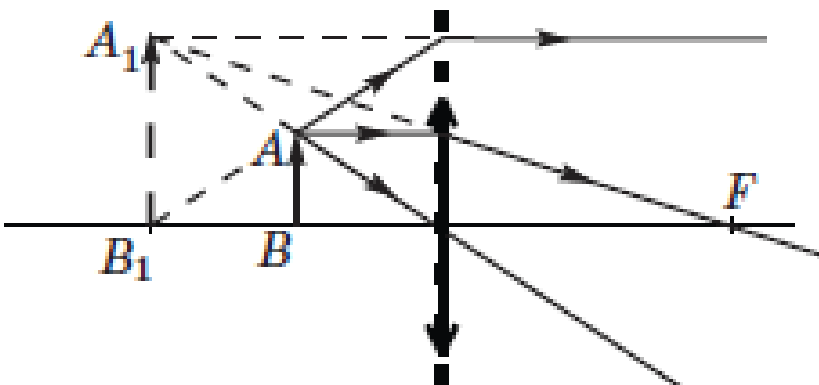
Задача 2. Побудувати зображення предмету, що міститься перед збиральною лінзою на відстані, яка втричі перевищує фокусну відстань.

Проводимо з точки A названі вище промені та переконуємося: всі вони перетинаються в точці A_1 . Ця точка є дійсним зображенням точки A . Отже, ми могли б обійтися будь-якими двома променями з показаних трьох. Що ж до зображення A_1B_1 предмета AB , то воно є дійсним, оберненим і зменшеним удвічі.



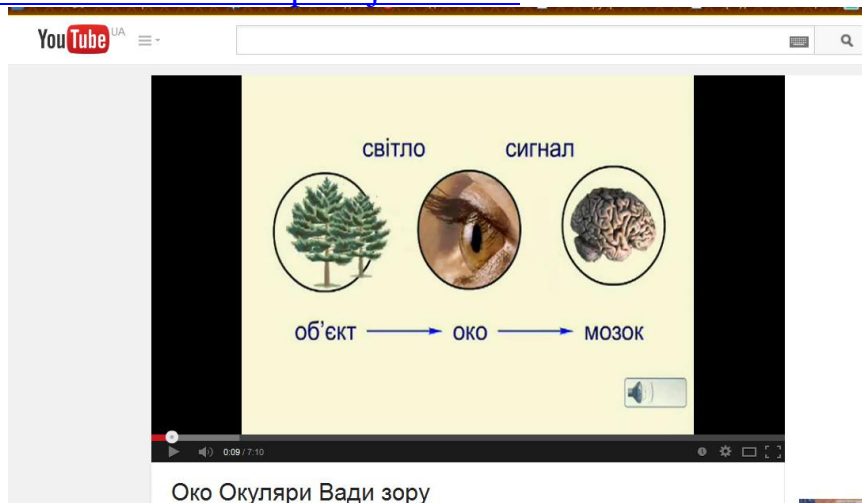
Задача 3. Побудувати зображення предмету за умови що його розміщено перед збиральною лінзою на відстані, яка вдвічі менша від фокусної відстані.

Проводимо з точки A названі вище промені та переконуємося: вони розходяться! Їх продовження перетинаються в точці A_1 . Ця точка є уявним зображенням точки A . Зображення A_1B_1 предмета AB є уявним, прямим і збільшеним удвічі (точка B_1 збігається з фокусом лінзи).



Корисно подивитися відео про ОКО ТА ВАДИ ЗОРУ

<http://www.youtube.com/watch?v=pKsbjW3B40E>



5. Дисперсія світла. Спектральний склад світла. Кольори



Світло - це **видиме випромінювання**, тобто електромагнітні хвилі в інтервалі частот, що сприймаються людським оком ($7,5 \cdot 10^{-10}$ м... $4,3 \cdot 10^{-10}$ м).

Кольори - одне із властивостей матеріального світу, яке сприймається як усвідомлене зорове відчуття. Той або інший кольори «привласнюється» об'єкту людиною у процесі їхнього зорового сприйняття. У переважній більшості випадків колірне відчуття виникає в результаті впливу на око потоків електромагнітного випромінювання з діапазону довжин хвиль, у якому по випромінюванню сприймається оком (видимий діапазон - довжини хвиль від 380 до 760 нм).

Оптична область спектра електромагнітних випромінювань складається із трьох ділянок: невидимих ультрафіолетових випромінювань (довжина хвиль 10-400 нм), видимих світлових випромінювань (довжина хвиль 400-750 нм), сприйманих оком як світло й невидимі інфрачервоні випромінювання (довжина хвиль 740 нм - 1-2 мм).

Світлові випромінювання, що впливають на око й викликають відчуття кольору, розділяють на прості (монохроматичні) і складні.

Випромінювання з певною довжиною хвилі називають **монохроматичним**.



Дисперсія світла

Дисперсія – залежність показника переломлення речовини від довжини хвилі світла.

В 1666 році юний випускник Кембриджського університету, на той час ще не всесвітньо відомий англійський вчений **Ісак Ньютон** провів такий дослід:



Він зробив маленький отвір у віконниці і пропустив утворений промінь крізь скляну трикутну призму. На протилежній стіні він отримав кольорову смугу із семи кольорів: червона, оранжева, жовта, зелена, голуба, синя, фіолетова. Він назвав цю смугу **спектром**.

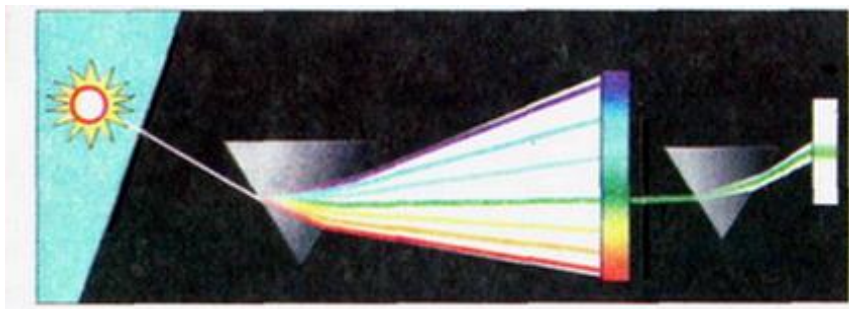
Завдяки дисперсії біле світло розкладається в спектр при проходженні через скляну призму. Тому такий спектр називають дисперсійним.



Прості випромінювання не можуть бути розкладені ні на які інші кольори. Як це відбувається, можна побачити на [відео](#):

Корисно подивитися відео

<http://www.youtube.com/watch?v=Ep-npDb7Stk#t=31>



Корисно подивитися відео

<http://www.youtube.com/watch?v=FAkIhVAot8>

<http://www.youtube.com/watch?v=-318UvBZ5p0>

Спектр — послідовність монохроматичних випромінювань, кожному з яких відповідає певна довжина хвилі електромагнітного коливання.

Спектральна сполука випромінювання різних речовин досить різноманітна. Проте, всі спектри можна розділити на три типа:

• Безперервні спектри.



Це означає, що в спектрі представлені хвилі всіх довжин. У спектрі немає розривів, і на екрані спектрографа можна бачити суцільну різнобарвну смугу.

Безперервні (або суцільні) спектри дають тіла, що перебувають у твердому або рідкому стані, а також сильно стиснені гази. Для одержання безперервного спектра потрібно нагріти тіло до високої температури.

Характер безперервного спектра й сам факт його існування визначаються не тільки властивостями окремих випромінюючих атомів, але й у сильному ступені залежать від взаємодії атомів один з одним.

Безперервний спектр дає також високотемпературна плазма. Електромагнітні хвилі випромінюються плазмою в основному при зіткненні електронів з іонами.

• Лінійчаті спектри.



Лінійчаті спектри являють собою набір кольорових ліній різної яскравості, розділених широкими темними смугами.

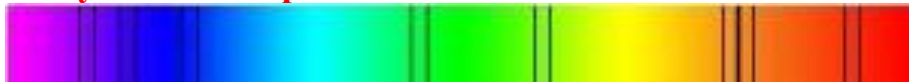
Наявність лінійчатого спектра означає, що речовина випромінює світло тільки цілком певних довжин хвиль (точніше, у певних дуже вузьких спектральних інтервалах). Кожна з ліній має кінцеву ширину.

Лінійчаті спектри дають всі речовини в газоподібному атомарному (але не молекулярному) стані. Ізольовані атоми хімічного елемента випромінюють строго певні довжини хвиль.

Звичайно для спостереження лінійчатих спектрів використовують світіння пар речовини в полум'ї або світіння газового розряду в трубці, наповненої досліджуванним газом.

При збільшенні щільності атомарного газу окремі спектральні лінії розширюються й, при дуже великій щільності газу, коли взаємодія атомів стає істотним, ці лінії перекривають один одного, образуя безперервний спектр.

• Смогасті спектри.



Смогастий спектр складається з окремих смуг, розділених темними проміжками.

За допомогою дуже гарного спектрального апарата можна виявити, що кожна смуга являє собою сукупність великого числа дуже тісно розташованих ліній. На відміну від лінійчатих спектрів смогасті спектри створюються не атомами, а молекулами, не зв'язаними або слабко зв'язаними один з одним.

При розкладанні білого світла призмою в безперервний спектр кольорів у ньому поступово переходять один в іншій. Прийнято вважати, що в деяких границях довжин хвиль (нм) випромінювання мають наступні кольори:

390—440 – фіолетовий

440—480 - синій

480—510 – блакитний

510—550 – зелений

550—575 - жовто-зелений

575—585 - жовтий

585—620 – жовтогарячий

630—770 – червоний

Корисно подивитися відео

Утворення спектру можна побачити на відео:

<http://www.youtube.com/watch?v=H-JuMk-SzCY>

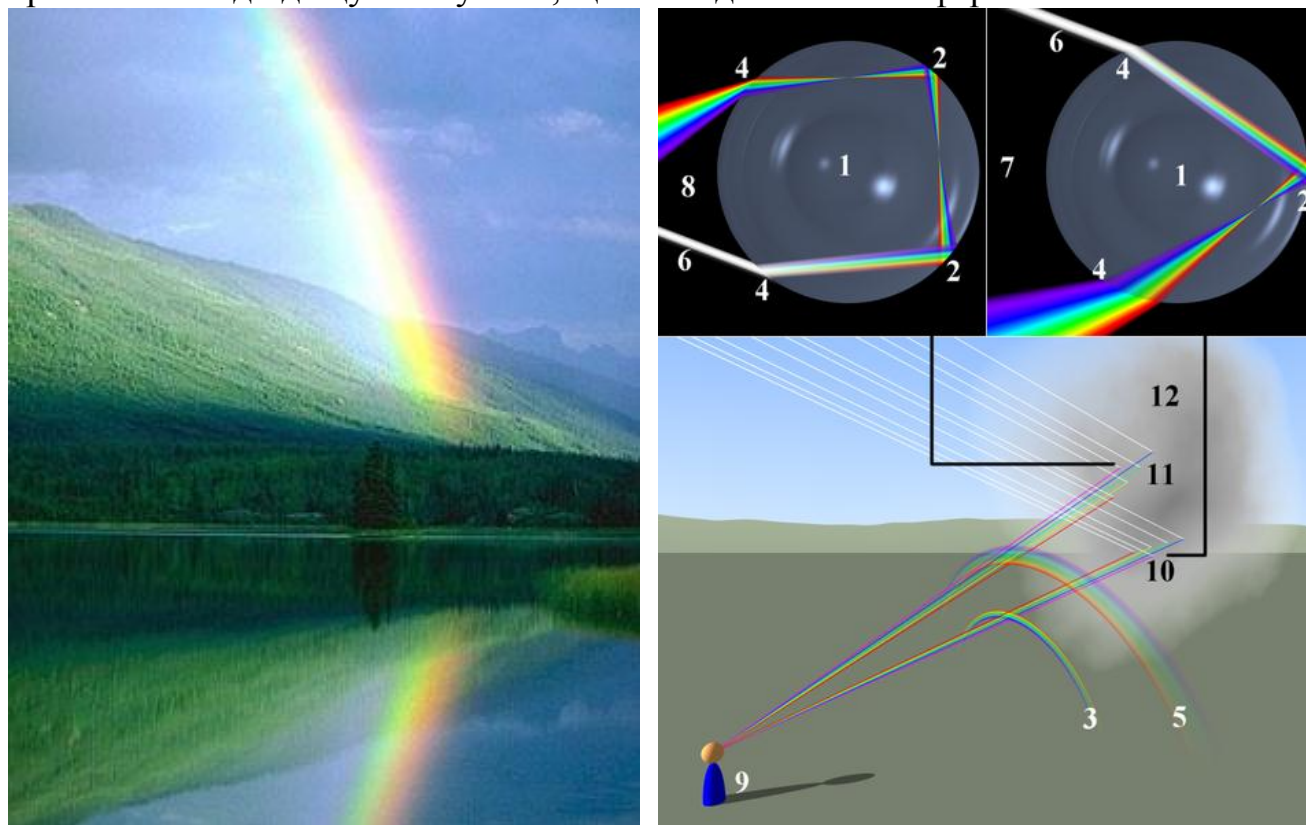
Очі людини має найбільшу чутливість до жовто-зеленого випромінювання з довжиною хвилі близько 555 нм.

Розрізняють три зони випромінювання: синьо-фіолетова (довжина хвиль 400-490 нм), зелена (довжина 490-570 нм) і червона (довжина 580-720 нм). Ці зони спектра є також зонами переважної спектральної чутливості приймачів ока й трьох шарів кольорової фотоплівки. Світло, випромінюваний звичайними джерелами, а також світло, відбитий від несуттєвих тіл, завжди має складна спектральна сполука, тобто - складається із суми різних монохроматичних випромінювань. Спектральна сполука світла - найважливіша характеристика висвітлення. Він безпосередньо впливає на світопередачу при зйомці на кольорові фотографічні матеріали.

Прикладом дисперсії світла є веселка.

Веселка — атмосферне оптичне і метеорологічне явище, спостерігається звичайно після дощу або (істотно рідше) перед ним. Воно виглядає як різнобарвна дуга або коло, складена із кольорів спектра.

Веселка виникає через те, що сонячне світло випробовує переломлення в крапельках води дощу або тумана, що знаходяться в атмосфері.

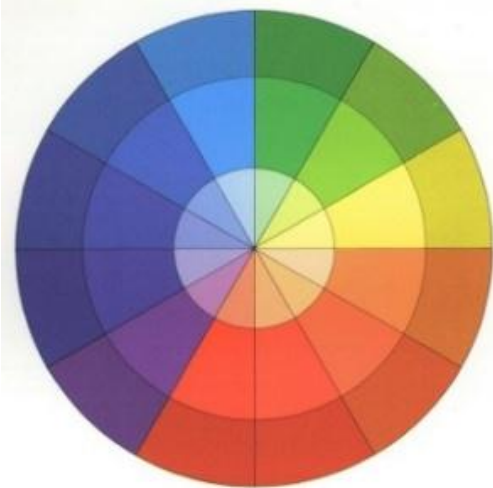


Крім цього важливо розуміти кольори і їхні суміші. Колірне колесо розділене на 12 секторів. Серцевину колеса становлять первинні, вторинні й третинні кольори, описані в тексті. У зовнішнім кільці представлені більше темні, а в проміжному - більше світлі тони цих квітів.

Чим же визначається кольори навколишніх нас предметів? Який фізичний зміст відповідає нашим поданням про те, що трава зелена, колір маку червоний, а небо

блакитне й т.п.? Кольори предметів, що оточують нас, залежить, по-перше, від їхньої здатності відбивати або пропускати падаючий на них світловий потік й, по-друге, від розподілу світлового потоку в спектрі їхнього джерела, що висвітлює, світла. Коли ми говоримо, що поверхня має зелені кольори (при висвітленні білим світлом), це означає, що із всієї сукупності променів, що становлять біле світло, дана поверхня відбиває переважно зелені промені. Прозоре середовище (стекло, рідина), що представляється нам пофарбованою в зелені кольори (при висвітленні білим світлом), пропускає із всієї сукупності променів переважно зелені промені. Відповідно, відбиті або пропущені промені впливають на наші очі й у нас створюється відчуття зелених кольорів. Всім відомо, що фарбування кімнати й предметів, що перебувають у ній, сприймається нами по-різному при денному (природному) і вечірньому (штучному) висвітленні, здійснюваному лампами накаливання. Причини цього - різний розподіл світлового потоку в спектрах денного світла й лампи накаливання, наявність у спектрі денного світла всіх видимих випромінювань майже в рівній кількості й майже повна відсутність синіх і фіолетових променів у спектрі лампи накаливання. При висвітленні лампами накаливання червоні кольори стають більше соковитими, а жовтогарячі червоніють. При цьому й червоні, і жовтогарячі кольори стають більше світлими. Блакитні кольори зеленіють, а син і фіолетові трохи червоніють, здобуваючи при цьому пурпурний відтінок, а значить - темніють.

Зіставити різні колірні сполучення й намітити декоративні ефекти вам допоможе спеціальна схема - так назване **колірне колесо**. Всі кольори можна одержати, змішуючи в різних співвідношеннях три первинних кольори: червоний, жовтий і блакитний. Змішуючи їх попарно, ви одержите три нові, вторинні кольори. Червоний з жовтим дадуть помаранчевий, жовтий із блакитним - зелений, а блакитний із червоним - фіолетовий. Зображення цих шести кольорів утворять сектори кола в такому порядку: червоний, помаранчевий, жовтий, зелений, блакитний та фіолетовий. Знову змішуючи попарно суміжні кольори, ви одержите шість третинних кольорів: червоно-помаранчевий, помаранчево-жовтий, жовто-зелений, зелено-блакитний, синьо-фіолетовий і фіолетово-червоний. Помістивши їх у коло, ви одержите колесо основних кольорів із дванадцятьма секторами.



6. Світло як електромагнітна хвиля. Інтерференція та дифракція світла.

Світло - це електромагнітні хвилі високої частоти, що випромінюються атомами речовини, а також частинками, які мають електричний заряд і рухаються з величезним прискоренням.

Основні положення хвильової теорії світла Гюйгенса.

1) Світло - це поширення пружних аперіодичних імпульсів в ефірі. Ці імпульси поздовжні й подібні на імпульси звуку в повітрі.

2) Ефір - гіпотетичне середовище, що заповнює небесний простір і проміжки між частинками тіл. Воно невагоме, не підкоряється закону всесвітнього тяжіння, має велику пружність.

3) Принцип поширення коливань ефіру такий, що кожна його точка, до якої доходить збурення, є центром вторинних хвиль. Ці хвилі слабкі, і ефект спостерігається тільки там, де проходить їхня поверхня, що огинає, - фронт хвилі (принцип Гюйгенса).

Чим далі хвильовий фронт від джерела, тим більше плоским він стає.

Світлові хвилі, що приходять безпосередньо від джерела, викликають зорові відчуття.

Дуже важливим пунктом теорії Гюйгенса з'явилося припущення максимально можливої швидкості поширення світла. Використовуючи свій принцип, ученому вдалося пояснити багато явищ геометричної оптики:

- явище відбивання світла і його закони;
- явище заломлення світла і його закони;
- явище повного внутрішнього відбивання;
- явище подвійного променезаломлення;
- принцип незалежності світлових променів.

Теорія Гюйгенса давала такий вираз для показника заломлення середовища:

$$n_{12} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{V_2}{V_1}$$

З формули видно, що швидкість світла повинна залежати обернено пропорційно від абсолютного показника середовища. Цей висновок був протилежний висновку, що випливає з теорії Ньютона. Невисокий рівень експериментальної техніки XVII століття виключав можливість установити, яка з теорій правильна.

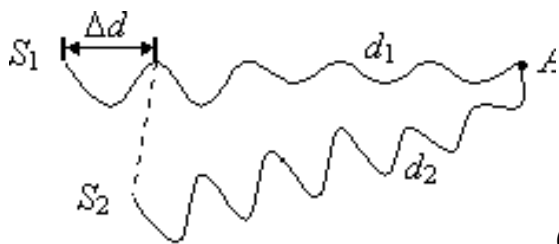
Багато хто сумнівалися у хвильовій теорії Гюйгенса, але серед нечисленних прихильників хвильових поглядів на природу світла були М. Ломоносов і Л. Ейлер. З досліджень цих учених теорія Гюйгенса спочатку оформлялася як теорія хвиль, а не просто аперіодичних коливань, що поширюються в ефірі.

Інтерференція - додавання двох світлових хвиль у просторі, внаслідок чого спостерігається стійка в часі картина підсилення або послаблення результуючих світлових коливань у різних точках простору. Зони підсилення називають зонами максимумів, зони послаблення - мінімумів.

Щоб положення цих зон було незмінним і картина інтерференції залишалась стійкою в часі, хвилі мають зберігати свої властивості, не змінюючи їх в часі. Якщо ця умова виконана (різниця фаз хвиль в часі і їх частота є сталою), то хвилі називають когерентними.

Оскільки світло - це електромагнітна хвиля, тому, якщо в просторі одночасно поширюються дві чи більше хвиль, то в кожній точці (зокрема і в точці A) хвилі будуть накладатись одна на одну, утворюючи інтерференційну картину. Вона складається із повторюваних мінімумів (min) і максимумів (max) освітленості.

Нехай від джерел S_1 і S_2 поширюються дві хвилі, які збігаються в точці A (рис. 1). d_1 і d_2 - довжина ходу першої і другої хвиль; $\Delta d = d_1 - d_2$ - різниця ходу.



(рис. 1)

Якщо в різницю ходу Δd вкладається парна кількість півхвиль, то обидві хвилі надійдуть в точку A в однакових фазах і підсилять одна одну - в точці A буде максимум. Якщо в різницю ходу Δd вкладається непарне число півхвиль, то хвилі прийдуть в точку A в протифазах і погасять одна одну - в точці A буде мінімум інтенсивності світла.

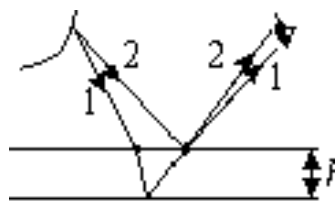
Математично умови максимуму і мінімуму можна виразити так:

$$\Delta d = 2k \frac{\lambda}{2} \quad - \text{умова максимуму};$$

$$\Delta d = (2k+1) \frac{\lambda}{2} \quad - \text{умова мінімуму}.$$

де $k = 1, 2, 3, \dots, n$ (ціле число); λ - довжина хвилі.

Цікавий випадок інтерференції спостерігав Юнг на початку XIX століття, розглядаючи у відбитому світлі **тонкі плівки** (рис. 2).



(рис. 2)

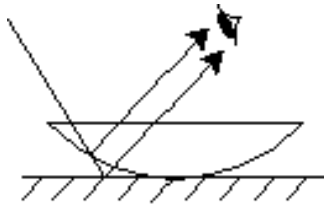
Одна частина світлового потоку відбивається від верхньої поверхні плівки, а друга - після заломлення від нижньої. Після цього обидва промені збігаються в оці спостерігача. При цьому виникає різниця ходу, що дорівнює подвоєній товщині плівки $\Delta d = 2h$. У результаті цього і виникає інтерференційна картина. Якщо

освітлюється плівка одним кольором, спостерігається чергування чорних і білих смуг, а якщо білим, то зазвичай спостерігаються кольори веселки.

Інтерференцією світла в тонких плівках пояснюється забарвлення мильних бульбашок і тонких плям з олії на воді, хоча розчин мила й олія не мають такої гама кольорів.



Ще один випадок явища інтерференції світла спостерігав Ньютон, коли на плоскопаралельну пластину накладали лінзу, що мала великий радіус кривизни ($R \approx 13$ м). У результаті між пластинкою і лінзою утворився повітряний клин, на якому і спостерігається інтерференційна картина, яка має форму кільця - **кільця Ньютона** (рис. 3). Якщо відомий радіус кілець r , радіус кривизни лінзи R і швидкість світла, то можна визначити довжину хвилі. Виявилось, що $\lambda_{\text{ч}} \approx 8 \cdot 10^{-7}$ м; $\lambda_{\text{ф}} \approx 4 \cdot 10^{-7}$ м, інші кольори мають значення у цих межах.



(рис. 3)

Кільця Ньютона - це інтерференція білого світла в тонкому шарі повітря між скляними пластинками – плоскою та опуклою сферичною. Спостерігаємо інтерференційні смуги, забарвлені всіма кольорами веселки, у вигляді концентричних кілець (кільця Ньютонія).



Інтерференція білого світла в плівках на воді, мильних бульбашках тощо дає хаотичне забарвлення, оскільки нахил і товщина плівки хаотично змінюються.

Застосування інтерференції дуже важливі й широкі. Інтерференцію світла застосовують для визначення довжини хвилі світла, показників заломлення прозорих речовин, вимірювання товщини пластинок, перевірки якості шліфування поверхні, вимірювання малих кутів тощо.



На інтерференції в тонких плівках ґрунтується просвітлення оптики. Це відкриття зробив український вчений **Олександр Смакула (1900-1983)** 1935 року, будучи директором дослідної лабораторії в німецькій оптичній фірмі "Цайсс" (місто Єна).

У сучасних фотооб'єктивах відбивних поверхонь понад 10, а в перископах підводних човнів - до 40. Якщо світло падає перпендикулярно до поверхні, то від кожної поверхні відбивається 5-9 % усієї енергії. Тому через прилад часто проходить тільки 10 - 20 % світла, що надходить до нього. Це спричиняє погіршення якості зображення. Неприємні наслідки відбиття світла від поверхонь оптичних стекол можна усунути, якщо зменшити ту частину енергії, яка відбивається. Тоді зображення, що його забезпечує прилад, буде яскравішим, "просвітленим". Від цього і походить термін "просвітлення" оптики.

Погасити відбиті хвилі всіх частот падаючого на об'єктив білого світла неможливо. Тому товщину плівки добирають так, щоб за нормального падіння цілком гасилися хвилі середньої частоти спектра. Товщина має дорівнювати чверті довжини хвилі у плівці.

Відбиття світла крайніх ділянок спектра - червоного і фіолетового - послаблюється мало. Тому об'єктив (наприклад, фотоапаратів) у відбитому світлі має бузковий відтінок.

Гасіння світла світлом не означає перетворення світлової енергії в інші види, так само, як під час інтерференції механічних хвиль. Гасіння хвиль одна одною в довільній ділянці простору означає, що світлова енергія сюди просто не доходить. Отже, гасіння відбитих хвиль означає, що все світло проходить через об'єктив.

Інтерференція білого світла за Френелем

За допомогою різних пристроїв (Дзеркала Френзеля, біпризми Френзеля, дзеркала Ллойда) світло розкладається на два когерентних світлових пучки, які накладаються й інтерферують. Два уявних зображення джерела світла в бідзеркалах або біпризми еквівалентні двом сим фразним джерелам світла.

У дзеркалі Ллойда, джерело світла і його уявне зображення в дзеркалі еквівалентні двом анти фазним джерелам, оскільки біля поверхні дзеркала відбувається зміна фази хвилі на протилежну.

Дифракція світла – це явище відхилення прямолінійного поширення світла в однорідному середовищі при його проходженні повз перешкоди чи крізь отвори, проникнення світла в область геометричної тіні.

Оскільки довжина світлової хвилі дуже мала (долі міліметрів), то навіть за людською волосиною утворюється хвильова тінь довжиною кілька метрів; за столовою тарілкою кілька кілометрів.

За хвильовою тінню світло, яке обігнуло перешкоду, інтерферує. Поблизу перешкоди спостерігаємо розмитість країв геометричної тіні на екрані.

Дифракційна решітка

Дифракційна решітка – це скляна тонка пластинка, на яку нанесені паралельні штрихи з проміжками між ними. Ширина щілини і штриха позначається d і називається **сталою решітки або періодом решітки**.

При падінні на решітку пучка паралельних променів перпендикулярно площині решітки (плоскої хвилі), завдяки дифракції, світло від кожної щілини піде пучком, розсіяним на всі напрямки. Оскільки відстань до екрана порівняно з сталою решітки надзвичайно велика, то всі промені з різни щілин, які відхилені від початкового напрямку на кут θ і падають в одну точку екрана, можна вважати паралельними.

Якщо процес поширення світла є хвильовим процесом, то, окрім інтерференції, має бути і дифракція світла.

Адже дифракція - це огинання хвилями країв перешкод - властива будь-якому хвильовому руху. Але спостерігати дифракцію світла важко, оскільки хвилі відхиляються від перешкод на помітні кути лише за умови, що розміри перешкод приблизно дорівнюють довжині хвилі, а вона дуже мала.

Уперше, відкривши інтерференцію, Юнг виконав дослід з дифракції світла, за допомогою якого були вивчені довжини хвиль, що відповідають світловим променям різного кольору. Вивчення дифракції отримало своє завершення в працях О. Френеля, який і побудував **теорію дифракції**, яка в принципі дозволяє розраховувати дифракційну картину, яка виникає внаслідок огинання світлом будь-яких перешкод. Таких успіхів Френель досягнув, об'єднавши принцип Гюйгенса ідеєю інтерференції вторинних хвиль.

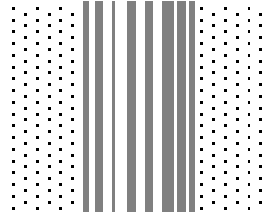
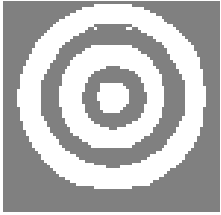
Принцип Гюйгенса-Френеля формулюється так: дифракція виникає внаслідок інтерференції вторинних хвиль.

На основі цього принципу Френель пояснив закони геометричної оптики, а саме: характер прямолінійного поширення світла в однорідному середовищі. Він створив приблизний спосіб розрахунку дифракційної картини, в основу якого поклав поділ хвильової поверхні на зони.

Явище відхилення світла від прямолінійного поширення називається дифракцією світла.

Оскільки довжина світлової хвилі є дуже малою, то і розміри перешкод чи щілини мають бути малими. Наприклад, під час проходження монохроматичного світла через круглий отвір, розмір якого сумірний з довжиною падаючих світлових хвиль, на екрані навколо центральної світлової плями спостерігаються темні і світлі кільця, що чергуються .

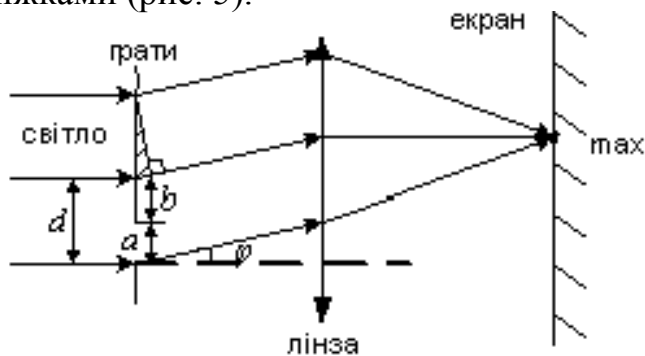




Якщо таке саме світло проходить через вузьку щілину, то матимемо маку картину, зображену на рис. 6.40. Поява світлих і темних кілець, що чергуються, в ділянці геометричної тіні французький фізик Френель пояснив інтерференцією світлових хвиль, які

надходять у результаті дифракції із різних точок отвору в одну точку на екрані.

Особливо чітку дифракційну картину утворюють дифракційні ґратки. Дифракційні ґратки - це сукупність дуже вузьких щілин, розділених непрозорими проміжками (рис. 5).



(рис. 5)

Якщо a - ширина прозорої частини, а b - непрозорої, то:

$$d = a + b = \frac{l}{N}$$

де l - ширина ґрат; N - кількість щілин.

Спрямуємо на ґрати паралельний пучок променів. Кожна точка щілини буде відхиляти промені у всіх напрямках, зокрема, і під кутом φ від початкового напрямку. Якщо ці промені зібрати на екрані, наприклад, за допомогою збиральної лінзи, то можна отримати підсилення чи послаблення світла - дифракційний максимум чи мінімум освітленості.

Із заштрихованого трикутника отримуємо різницю ходу:

$$\Delta d = d \cdot \sin \varphi.$$

Якщо в цю різницю ходу вкладеться ціла кількість довжин хвиль, то на екрані спостерігатиметься дифракційний максимум, а якщо непарна кількість півхвиль, - мінімум.

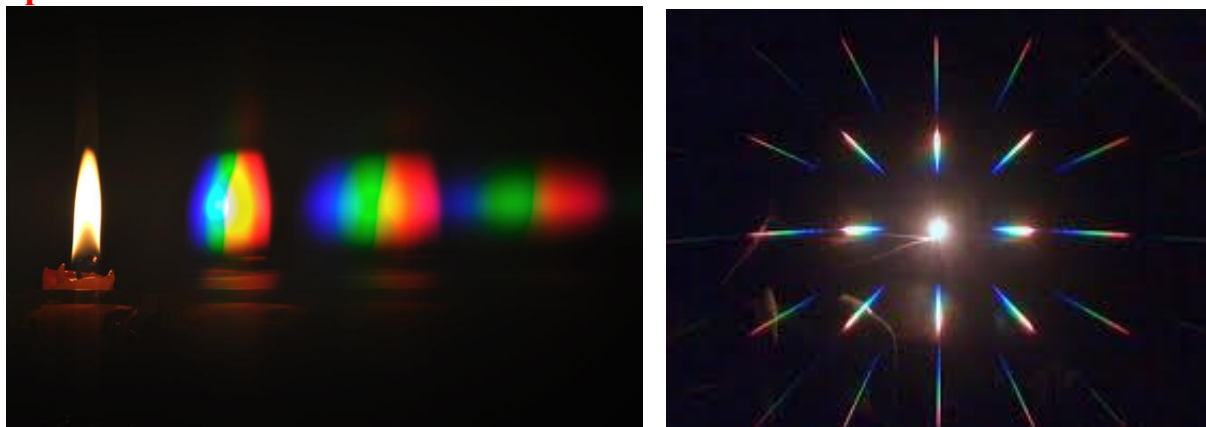
Таким чином, $\Delta d = k\lambda$, а також $\Delta d = d \cdot \sin \varphi$, то для умови максимуму дифракційної ґратки, отримаємо:

$$d \cdot \sin \varphi = k\lambda$$

де $k = 1, 2, 3, \dots, n$ (ціле число), λ - довжина падаючої світлової хвилі.

Внаслідок дифракції на дифракційних ґратках білого світла всі головні максимуми, крім центрального нульового максимуму, будуть забарвленими. Зі збільшенням довжини хвилі головні максимуми всередині розміщуються під великим кутами від центрального.

Райдужна полоса, що містить сім кольорів - від фіолетового до червоного (підрахунок ведеться від центрального максимуму), називають **дифракційним спектром**.



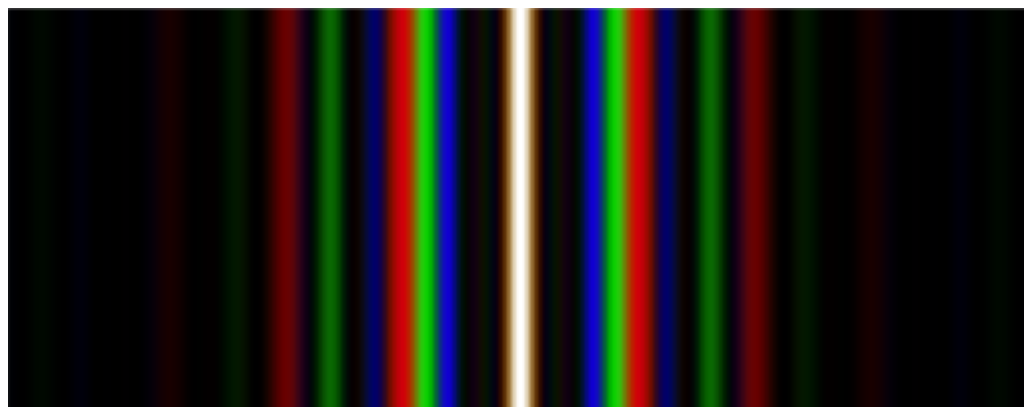
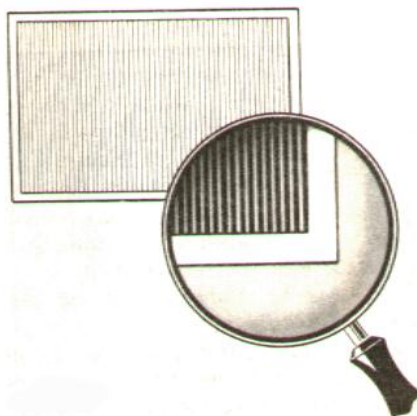
Якщо відомо період ґрат d , і виміряно кут φ , під яким спостерігається максимум і порядок спектра k , тоді можна визначити довжину світлової хвилі:

$$\lambda = \frac{d}{k} \sin \varphi$$

Вона дорівнює: $\lambda_{\text{ч}} \approx 8 \cdot 10^{-7}$ м; $\lambda_{\text{ф}} \approx 4 \cdot 10^{-7}$ м.

Інші кольори мають проміжні значення.

Промисловість виготовляє дифракційні ґратки, які містять 50 штрихів/мм, 100 штрихів/мм, 600 штрихів/мм, 1200 штрихів/мм і дзеркальні ґрати з 6000 штрихів/мм.



Приклади розв'язування задач

Задача 1. Вода освітлена зеленим світлом, для якого довжина хвилі в повітрі 0,5 мкм. Якою буде довжина хвилі у воді? Який колір бачить людина, що розплющила очі під водою?

Розв'язання. Довжина хвилі у воді $\lambda = v/v$, де v – швидкість електромагнітної хвилі у воді, ν – частота хвилі. Частота хвилі однакова в будь-якому середовищі. У повітрі $\nu = \frac{c}{\lambda_0}$, у воді $\lambda = \frac{v}{c} \lambda_0$. Оскільки $n = c/v$, то $\lambda = \frac{\lambda_0}{n} = 0,38 \text{ мкм}$. Людина під водою бачить зелений колір, оскільки колір визначається частотою, а не довжиною хвилі.

Відповідь: $\lambda = 0,38 \text{ мкм}$; зелений.

Задача 2. У деяку точку простору попадають когерентні хвилі з різницею ходу 1,2 мкм (довжина хвилі у вакуумі $\lambda_0 = 600 \text{ нм}$). Визначите, що буде в цій же точці унаслідок інтерференції: 1) в повітрі ($n_1 = 1$); 2) у воді ($n_2 = 1,33$); 3) у склі ($n_3 = 1,5$)?

Розв'язання. Оптична різниця ходу $\Delta = \Delta L n$, де ΔL – геометрична різниця ходу, n – показник заломлення середовища. Умова інтерференційного максимуму $\Delta = \pm m \lambda$ ($m = 0, 1, 2, 3, \dots$). Довжина хвилі в середовищі $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$.

1) $n_1 = 1$, $\Delta L n = m \lambda_0$, $m = \frac{\Delta L n_1}{\lambda_0} = 2$. Оскільки m – ціле, то буде посилення хвиль.

2) $n_2 = 1,33$, $m = \frac{\Delta L n_2}{\lambda} = \frac{\Delta L n_2^2}{\lambda_0} = 3,54$, m – не ціле – послаблення хвиль.

3) $n_3 = 1,5$, $m = \frac{\Delta L n_3}{\lambda} = \frac{\Delta L n_3^2}{\lambda_0} = 4,5$, m – не ціле – послаблення хвиль.

Відповідь: 1) посиляться; 2) послабляться, 3) послабляться.

Задача 3. Два когерентні джерела S_1 і S_2 випромінюють монохроматичне світло з довжиною хвилі 560 нм. Визначите відстань між двома сусідніми інтерференційними максимумами на екрані, якщо відстань між джерелами $S_1 S_2 = d = 10^{-4} \text{ м}$, а відстань до екрану $l = 1 \text{ м}$.

Розв'язання. У довільній точці екрану спостерігатиметься інтерференційний

$$L_1^2 = l^2 + \left(y - \frac{d}{2}\right)^2,$$

$$L_2^2 = l^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2,$$

максимум при виконанні умови $L_2 - L_1 = m\lambda$. З рис. 1 видно, що

$$\text{тоді } L_2^2 - L_1^2 = 2yd; (L_2 - L_1)(L_2 + L_1) = 2yd.$$

У випадку, коли $d \ll l$ можна вважати приблизно

$L_2 + L_1 \approx 2l$, тоді $L_2 - L_1 \approx \frac{yd}{l}$. Використовуючи умову максимуму інтерференції, отримуємо

$$\frac{yd}{l} = m\lambda, y_m = \frac{ml\lambda}{d} - \text{положення } m\text{-го максимуму.}$$

Відстань між сусідніми максимумами

$$\Delta y = y_{m+1} - y_m = \frac{\lambda l}{d} = 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 5,6 \text{ мм.}$$

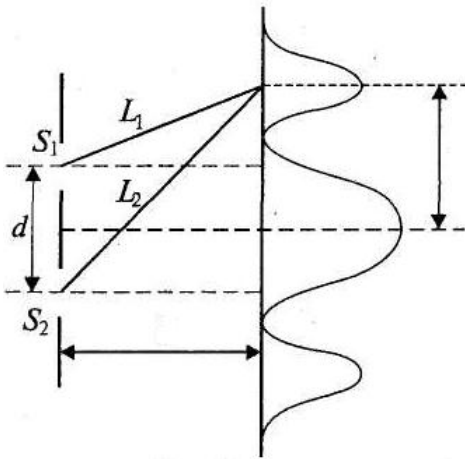


Рис. 1

Відповідь: $\Delta y = 5,6 \text{ мм.}$

Задача 4. На шляху одного з променів, що інтерферують, розміщена тонка скляна пластинка, унаслідок чого центральна світла смуга зміщується в положення, спочатку займане шостою світлою смугою (не враховуючи центральної). Промінь падає на пластинку перпендикулярно. Показник заломлення пластинки $n = 1,6$, довжина хвилі $\lambda = 6,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$. Яка товщина пластинки?

Розв'язання. У результаті внесення скляної пластинки різниця ходу між променями, що інтерферують, зміниться на величину $\Delta = nd - d = d(n-1)$, де d – товщина пластинки, n – показник заломлення матеріалу пластинки. З іншого боку відбувся зсув на m смуг. Отже, додаткова різниця ходу, введена пластинкою,

дорівнює $m\lambda$. Таким чином, $d(n-1) = m\lambda$, звідки $d = \frac{m\lambda}{n-1} = 6,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

Відповідь: $d = 6,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

Задача 5. На плівку під кутом $\theta = 52^\circ$ ($n = 1,4$) падає біле світло. При якій товщині плівка в прохідному світлі здаватиметься червоною? Довжина хвилі червоного світла $\lambda = 6,7 \cdot 10^{-7} \text{ м}$.

Розв'язання. Умова максимуму інтерференції в прохідному світлі
 $\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} = m\lambda$ ($m = 0, 1, 2, \dots$), θ – кут падіння. При $m = 1$ маємо
 $d = \frac{\lambda}{2\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} = 2,89 \cdot 10^{-5}$ см.

Відповідь: $d = 2,89 \cdot 10^{-5}$ см.

Задача 6. У плівках якої товщини зникають інтерференційні лінії при освітленні світлом з довжиною хвилі $6 \cdot 10^{-7}$ м? Показник заломлення $n = 1,5$.

Розв'язання. Умова мінімуму інтерференційної картини в прохідному світлі

$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$. Інтерференційні смуги відсутні при $m = 0, \sin \theta = 0$,
 $d = \frac{\lambda}{2 \cdot 2n} = \frac{\lambda}{4n} = 10^{-7}$ м.

Відповідь: $d = 10^{-7}$ м.

Список використаних джерел

1. Генденштейн Л.Е. Фізика, 7 кл. : Підручник для середніх загальноосвітніх шкіл. - Х.: Гімназія, 2007. – 208с.
2. Гончаренко С.У. Фізика: Основні закони і формули., 2006, Либідь.
3. Вакуленко М. О. Російсько-український словник фізичної термінології / За ред. проф. О. В. Вакуленка (додаток: "Російсько-український фізичний словник":. - К., 2006.
4. Коршак Є. В., Ляшенко О. І., Савченко В.Ф. Фізика: Підруч. для для загальноосвітніх навч. закл. - Ірпінь: Перун, 2002.
5. Янчук В. Довідник школяра: 5-11 кл., 2002, Київ