

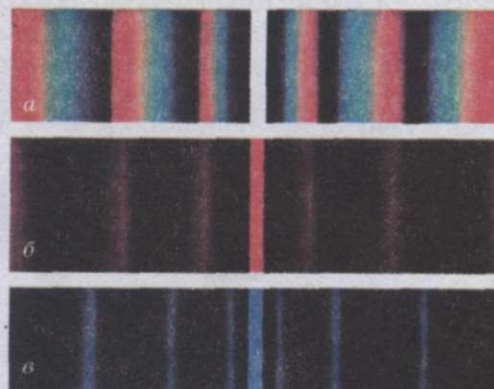
Мал. 159

завширшки 2—3 мм. Якщо позаду щілини на відстані 10—15 см поставити екран, то на ньому буде видно чітку освітлену смужку. Віддаляючи поступово екран від щілини, помічаємо, що чіткість контурів світлої смужки поступово послаблюється, її освітленість стає меншою і нерівномірною: в середині — більшою, а біля країв — меншою. На відстані 15—20 м від щілини на екрані справа і зліва від освітленої смужки, як і в попередньому досліді, з'являються слабо помітні кольорові смуги, які тим краще помітні, чим потужніше джерело світла. Якщо перед джерелом світла поставити світлофільтр, то кольорові смуги стають одноколірними.

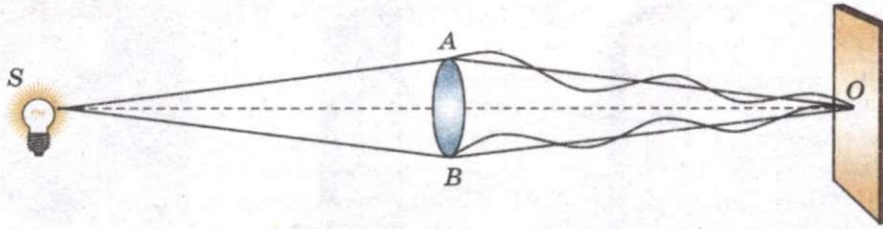
Нехай невеликий плоский диск освітлюється точковим джерелом світла (точковим називають джерело світла, у якого розміри поверхні, що світиться, значно менші за відстані від джерела до предмета і від предмета до екрану), розташованим на осі, проведеній перпендикулярно до центра диска (мал. 161). Як тільки світло від джерела дійде до країв диска, кожна точка, що знаходиться біля краю диска, за принципом Гюйгенса—Френеля стане самостійним центром коливань і випромінюватиме вторинні хвилі. Оскільки відстані від джерела світла до країв диска однакові, то всі вторинні хвилі, що поширюються від країв диска, матимуть однакові фази.

Та частина вторинних хвиль, яка поширюється симетрично падаючій хвилі (на мал. 161 вони позначені променями AO і BO), приходить в точку O на екрані в одній фазі, і, інтерферуючи, хвилі підсилюють одна одну. У центрі тіні O повинна спостерігатися світла пляма. Вперше до цього висновку прийшов французький учений С. Пуассон, що рецензував працю Френеля про дифракцію світла, подану на здобуття премії Паризької академії наук. Недостатньо ретельно поставивши дослід, Пуассон не виявив світлої плями в центрі тіні і на цій підставі зробив висновок, що теорія Френеля помилкова.

Д. Араго, будучи також членом комітету з премій, вирішив перевірити



Мал. 160



Мал. 161

результати досліду Пуассона. Поставивши дослід більш ретельно, він виявив світлу дифракційну пляму, яка отримала ім'я Пуассона.

Дуже в оригінальній постановці дослід з дифракції світла на диску здійснив професор Московського університету **В. Аркад'єв**. Він виготовив зменшену плоску модель руки, що тримає тарілку. Освітивши модель світлом від точкового джерела світла, він сфотографував тінь від тарілки на екрані. Дослід проводився в добре затемненому коридорі у підвалі старої будівлі Московського університету.

У тому випадку, коли модель знаходилася на невеликій відстані від екрану, на екрані було видно чітку тінь (мал. 162). У міру збільшення відстані від моделі до екрана тінь все гірше передавала контури руки і тарілки. Нарешті, на деякій відстані в центрі тіні від тарілки з'явилася світла пляма (на малюнку наведені різні відстані з урахуванням масштабу моделі).

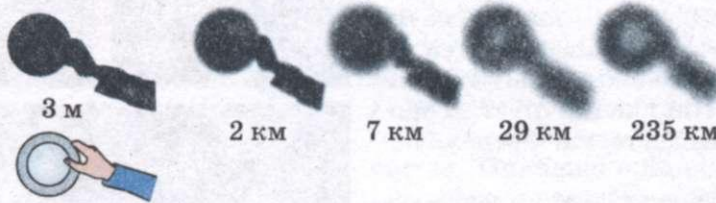
Дифракційна картина в досліді зі щілиною, описаному на початку параграфа, не має достатньої різкості. Це пов'язано з тим, що через вузьку щілину проходить мало світла. Дифракційна картина буде яскравою і добре помітною, якщо на пластинку нанести велике число паралельних однакових щілин, розташованих на рівних відстанях одна від одної. Така сукупність щілин отримала назву **дифракційної ґратки**.

Суму ширини a однієї щілини і ширини b однієї непрозорої смужки між щілинами називають сталою ґратки або її періодом (мал. 163).

Сталу ґратки зазвичай позначають літерою d : $d = a + b$.

На сьогодні для наукових цілей використовують дифракційні ґратки, в яких на 1 мм налічується 300, 1200, 1800 і навіть 2400 штрихів. Із збільшенням числа щілин на одиницю довжини ґратки покращуються чіткість і правильність дифракційних спектрів.

Надалі будемо розглядати основні питання елементарної теорії дифракційної ґратки.



Мал. 162

Нехай на ґратку падає плоска монохроматична хвиля, довжина якої λ (мал. 164).

Вторинні джерела в щілинах створюють світлові хвилі, які поширюються в усіх напрямках. Знайдемо умову, за якої хвилі, що виходять із щілин, підсилюють одна одну. З цією метою розглянемо хвилі, які поширюються в напрямі, що позначається кутом φ . Різниця ходу між хвилями від країв сусідніх щілин дорівнює довжині відрізка AC . Якщо на цьому відрізку вміщується ціле число довжин хвиль, то хвилі від усіх щілин складаються одна з одною і підсилюють одна одну. З трикутника ABC можна визначити катет AC :

$$AC = AB \sin \varphi = d \sin \varphi.$$

Максимуми спостерігатимуться під кутом φ , що визначається з такої умови:

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

де $k = 0, 1, 2, \dots$. Ці максимуми називаються **основними**.

Слід мати на увазі, що коли виконується умова $d \sin \varphi = k\lambda$, то підсилюються не тільки хвилі, що виходять із нижніх країв щілин, а й хвилі, що виходять із усіх інших точок щілин. Кожній точці в першій щілині відповідає точка в другій щілині на відстані d . Тому різниця ходу вторинних хвиль, що виходять із цих точок, дорівнює $k\lambda$ і ці хвилі взаємно підсилюються.

За ґраткою стоїть збиральна лінза L , у фокальній площині якої встановлено екран E . Лінза фокусує хвилі, що напрямлені паралельно, в одній точці M , в якій хвилі додаються, підсилюючи одна одну. Кути φ , які відповідають умові $d \sin \varphi = k\lambda$, визначають місце максимумів на екрані E .

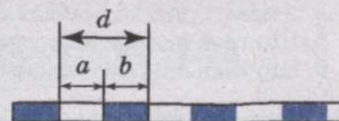
Оскільки місце максимумів (крім центрального, що відповідає $k = 0$) залежить від довжини хвилі, то ґратка розкладає біле світло на спектр (мал. 160, *a*). Чим більше значення λ , тим далі від центрального максимуму (мал. 160, *b, e*) той чи інший максимум, що відповідає певній довжині хвилі. Кожному значенню k відповідає свій спектр.

За допомогою дифракційної ґратки можна дуже точно виміряти довжину хвилі. Якщо період ґратки відомий, то визначення довжини хвилі зводиться до вимірювання кута φ , який відповідає напрямку на максимум.

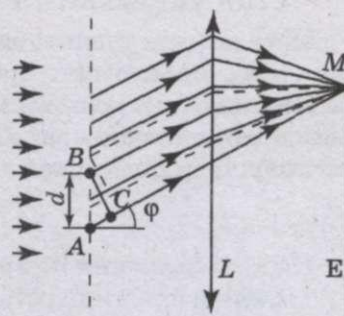
Наші вії з проміжками між ними — це приклад грубої дифракційної ґратки. Тому, якщо подивитися, примружившись, на яскраве джерело світла, можна виявити веселкові кольори. Біле світло розкладається внаслідок дифракції навколо вії.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що таке дифракція?
2. Які труднощі зустрічаються при постановці дифракційних дослідів і як можна їх подолати?
3. Як можна спостерігати дифракцію на щілині? Чому дифракційна картина в цьому досліді недостатньо чітка?



Мал. 163



Мал. 164

4. У чому полягав дослід професора В. Аркад'єва?
5. Що таке дифракційна ґратка і чим визначається її якість?
6. Що таке основні максимуми? Яка їх умова?

Лабораторна робота №5

СПОСТЕРЕЖЕННЯ ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ ТА ДИФРАКЦІЇ СВІТЛА.

Мета роботи: навчитися спостерігати інтерференційні смуги і дифракційні спектри у відбитому та прохідному світлі.

Прилади і матеріали: скляні пластинки — 2 шт., мильний розчин, дротяна рамка, компакт-диск, штангенциркуль, лампа з прямою ниткою розжарення, світлофільтри, лазерна указка, кольорові олівці.

Хід роботи

I. Спостереження інтерференції:

1. Скляні пластини ретельно протерти, скласти разом і стиснути пальцями.
2. Розглянути пластини у відбитому світлі на темному фоні (розташовувати їх потрібно так, щоб на поверхні скла не утворювались надто яскраві полоски від вікон або білих стін).
3. В окремих місцях стикання пластин спостерігати яскраві веселкові колоподібні або неправильної форми смужки. Зобразити на малюнку те, що ви побачили за допомогою кольорових олівців.
4. Змінити натиск і записати свої спостереження.
5. Спробувати побачити інтерференційну картину у прохідному світлі. Записати спостереження.
6. Опустити дротяну рамку в мильну воду, а потім, витягнувши її, утворити мильну плівку.
7. За допомогою кольорових олівців зробити у зошиті малюнок інтерференційної картини на мильній плівці.
8. Спостерігати інтерференційну картину, яку дає компакт-диск. Намалювати цю картину.

II. Спостереження дифракції:

1. Встановити між губками штангенциркуля щілину шириною 0,1 мм. Розташувати щілину вертикально, приставивши її впритул до ока. Крізь щілину дивитися на вертикально розташовану нитку лампи, що світиться, і спостерігати дифракційні спектри. Зробити малюнок.
2. Змінюючи ширину щілини від 0,1 до 0,3 мм, зазначити, як ця зміна впливає на дифракційні спектри.
3. Закрити нитку лампи світлофільтром. Який вигляд має в цьому випадку дифракційна картина?
4. Спостерігати дифракційний спектр у відбитому світлі за допомогою компакт-диска і лазерної указки, розташувавши його горизонтально на рівні очей. Зробити малюнок спектра.

УВАГА! Не напрямляйте промінь світла указки прямо в очі!

§ 35. ПОЛЯРИЗАЦІЯ СВІТЛА. ПОПЕРЕЧНІСТЬ СВІТЛОВИХ ХВИЛЬ І ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ТЕОРІЯ СВІТЛА

Явища інтерференції і дифракції світла свідчать про хвильові властивості світла. Проте ці явища в рівній мірі властиві і поперечним і поздовжнім хвилям. Для встановлення природи світлових хвиль важливо з'ясувати, якими вони є — поздовжніми чи поперечними.

Засновники хвильової оптики Юнг і Френель довго вважали, що світлові хвилі поздовжні, як і звукові. У той час світлові хвилі розглядалися як пружні хвилі в ефірі, що заповнює простір і проникає в усі тіла. Поперечні хвилі можуть поширюватися лише в твердому тілі. *Але як можуть рухатися тіла в твердому ефірі, не зазнаючи опору?* Адже ефір не повинен чинити опір руху тіл. Інакше не здійснювався б закон інерції.

Проте поступово збиралось усе більше фактів, які не можна було пояснити, вважаючи світлові хвилі поздовжніми. Під тиском цих фактів Френель зрештою змушений був визнати, що світлові хвилі поперечні, хоч з погляду теорії механічного ефіру, як носія світлових хвиль, це здавалося дуже дивним.

Встановимо дві пластини, вирізані певним чином з кристала турмаліну, одну за одною і спроектуємо їх на екран (подібно до того, як проєктують діапозитиви). Повертаючи один з кристалів навколо осі, зазначимо, що освітленість екрана в місці перетину зображень кристалів мінятиметься і при певному положенні кристала, що повертається, екран стане зовсім темним (мал. 165).

Цей результат можна пояснити так. Світло, що випускається лампою розжарювання, не поляризоване. Пройшовши крізь перший кристал турмаліну, світло стає **плоскополяризованим**. Цей кристал турмаліну є поляризатором світла. Другий кристал турмаліну слугує аналізатором: він майже повністю пропускає поляризоване світло лише при певній орієнтації кристала щодо площини поляризації (мал. 165, а). Якщо ж аналізатор повернути на 90° , то вже поляризоване світло він практично не буде пропускати (мал. 165, б).

Окрім турмаліну, такі властивості має кварцева пластинка, вирізана певним чином з кристала.

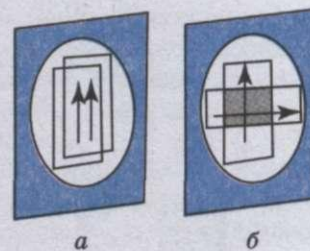
Прозорі півки, що можуть слугувати поляризаторами і аналізаторами світла, отримали назву **поляроїдів**.

На сьогодні розроблені методи виробництва простих і зручних поляроїдів.

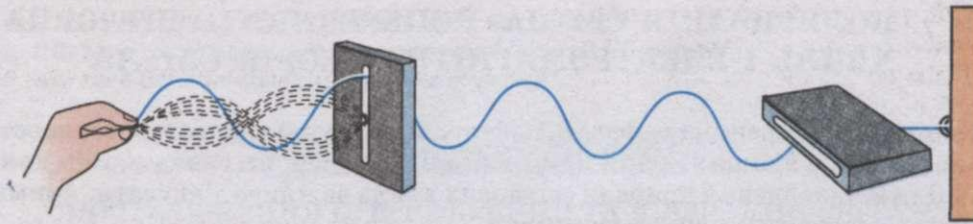
Площину, яка пропускає максимальне поляризоване світло, називають **площиною пропускання поляроїда**.

Поляризація властива тільки поперечним хвилям. Якщо хвилі поляризуються, то вони є поперечними. Поздовжні хвилі не поляризуються. **Явище поляризації світла свідчить про те, що світлові хвилі є поперечними.**

Неважко побудувати просту наочну механічну модель розглядуваного явища. Можна утворити поперечну хвилю в гумовому шнурі так, щоб коливання швидко змінювали свій напрям у просторі. Це є аналогом природної



Мал. 165



Мал. 166

світлової хвилі. Пропустимо тепер шнур крізь вузький дерев'яний ящик (мал. 166). З коливань різних напрямів ящик «виділить» коливання в одній певній площині. Тому з ящика виходить поляризована хвиля.

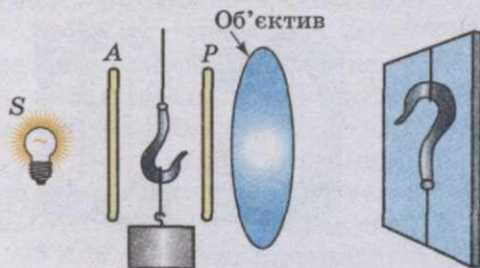
Якщо на її шляху поставити ще один такий самий ящик, але повернутий до першого на 90° , то коливання через нього не пройдуть. Хвиля повністю погаситься.

Поляризоване світло знаходить широке застосування в наукових дослідженнях і в техніці. У багатьох випадках доводиться плавно регулювати освітлення того або іншого об'єкта. Поставивши перед джерелом світла поляризатор і аналізатор, можна, поволив повертаючи аналізатор, плавно змінювати освітлення об'єкта від максимального до повної темноти.

Полярійди використовують для гасіння дзеркально відбитих відблисків, наприклад при фотографуванні картин, скляних і фарфорових виробів та ін. Світло відблисків частково поляризоване. Якщо помістити полярійд між джерелом світла і віддзеркалювальною поверхнею, то відблиски можна зовсім погасити.

У будівельній і машинобудівній техніці явище поляризації використовують для вивчення напруги, що виникає в окремих вузлах споруд і машин. Суть цього методу дослідження, названого фотопружним, полягає в наступному. З прозорого матеріалу (наприклад, з органічного скла) виготовляють точну копію тієї деталі, напругу в якій треба вивчити. Потім цю модель ставлять між аналізатором A і поляризатором P , освітлюють і проєктують на екран (мал. 167). Оскільки недеформована пластинка органічного скла оптично однорідна, то на екрані видно лише її контури. При деформації моделі оптична однорідність органічного скла порушиться і на екрані з'явиться барвиста картина напруги, що виникла в деталі.

Поляризацію використовують в декоративних цілях (наприклад, у при-



Мал. 167

строї вітрин, під час театральних постановок і тому подібне), у геології і ряді інших галузей науки і техніки.

Тепер розглянемо, яку ж природу має світло, якою теорією воно описується.

Дж. Максвелл суто теоретично показав можливість існування електромагнітних хвиль. Він довів, що швидкість поширення цих хвиль у вакуумі має дорівнювати швидкості

світла, яка на той час уже була відома. Виходячи з цього, Максвелл припустив, що **світло — це електромагнітна хвиля**.

Крім того, з теорії Максвелла безпосередньо випливає, що електромагнітні хвилі поперечні. На той час поперечність електромагнітних хвиль уже було доведено експериментально. Тому Максвелл цілком правильно вважав поперечність електромагнітних хвиль ще одним важливим доказом на користь електромагнітної теорії світла.

Після того як Герц експериментально одержав електромагнітні хвилі й виміряв їх швидкість, електромагнітна теорія світла дістала перше експериментальне підтвердження. Було доведено, що під час поширення електромагнітні хвилі виявляють такі самі властивості, що й світлові: відбивання, заломлення, інтерференцію, дифракцію, поляризацію тощо. У кінці XIX ст. було остаточно встановлено, що світлові хвилі збуджуються зарядженими частинками, які рухаються в атомах.

З визнанням електромагнітної теорії світла відпала потреба вводити гіпотетичне середовище — ефір, який доводилось вважати твердим тілом. Світлові хвилі — це не механічні хвилі в особливому всепроникному середовищі — ефірі, а електромагнітні хвилі. Електромагнітні ж процеси підлягають не законам механіки, а своїм власним законам.

В електромагнітній хвилі вектори \vec{E} і \vec{B} перпендикулярні один до одного. У природному світлі напруженість електричного поля \vec{E} і магнітної індукції \vec{B} коливається в усіх напрямках, перпендикулярних до напрямку поширення хвилі. Якщо світло поляризоване, то вектори \vec{E} і \vec{B} коливаються не в усіх напрямках, а лише в двох певних площинах.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Як можна виявити поляризацію світла?
2. Про що свідчить явище поляризації світла?
3. Назвіть основні застосування явища поляризації світла в науці і техніці.
4. Якою теорією описується світло? Чому саме нею?



Це цікаво знати

Відкриття явища поляризації світла

Встановлення закономірного зв'язку між зовнішньою формою і оптичними властивостями кристалів стало можливим після того, як французький фізик **Е. Л. Малюс** (1775—1812) відкрив у 1810 р. явище **поляризації світла**. Хоча в літературі можна знайти дані, що першовідкривачем взаємозв'язку між кристалічною формою і явищем подвійного променезаломлення є **Ш. Ф. Цистерной дю Фай** (1698—1739). Відкриття поляризації світла відбулося наступним чином: одного разу вчений розглядав крізь кристал ісландського шпату вікна Люксембурзького палацу, освітлені сонцем, що заходило. Обертаючи кристал, Малюс звернув увагу на періодичні затемнення інтенсивності відбитих променів. Спостерігаючи відбиття світла від скла і води, вчений встановив, що відбиті промені частково поляризовані.

В історії кристалооптики Малюс відомий як автор «Теорії подвійного променезаломлення у кристалічних тілах», яка відзначена в 1810 р. академічною премією. Малюс сконструював перший поляризаційний прилад, за допомогою якого підтвердив твердження **Гаяюї** про те, що кристали у формі кубів і октаєдрів не мають властивостей подвійного променезаломлення. Малюса слід вважати автором відкриття оптич-



Мал. 168

но двовісних кристалів. **Ж. Б. Біо** (1774—1862) вперше чітко показав різницю між оптично одновісними і двовісними кристалами і, крім того, поділив і ті, й інші, на оптично позитивні та оптично негативні. До першої групи він відніс кварц, а до другої — кальцит.

Пізніше Малюс за допомогою приладу, що складається зі штатива і дзеркала, зображеного на мал. 168, показав, що при звичайному заломленні, наприклад, у склі, заломлений промінь також є поляризований і притому перпендикулярно до відбитого променя. Частина променя світла *S*, що падає на скляну пластинку, частково поглинається склом, а частково відбивається від нього. Ці два промені, на які розкладається падаючий промінь, поляризовані й

перпендикулярні один до одного.

Важливі досягнення в галузі експериментальної кристалооптики, які знаменували новий етап в її розвитку, зв'язані з іменем шотландського фізика **Д. Брюстера** (1781—1868). Перше дослідження Брюстера було присвячено закономірностям співвідношення між оптичними та геометричними властивостями кристалів («Про закон поляризації та подвійне променезаломлення у правильно кристалізованих тілах» (1818)). Базуючись на своїх теоретичних поглядах, Брюстер пояснив причину подвійного променезаломлення в кристалах тим, що «на незвичайний промінь впливають сили, що виходять із однієї чи декількох осей». Брюстер вперше відкрив анізотропію поглинання світла у забарвлених кристалах. Англійському фізику **Дж. Гершелю** (1792—1871) вдалося виявити взаємозв'язок між обертанням площини поляризації та зовнішньою формою кристала (вперше здогадався про це ще Гаюї).

Описані вище відкриття в галузі кристалооптики носили в основному емпіричний характер. Докорінні зміни у розвиток кристалооптики внесли англієць **Т. Юнг** (1773—1829) та француз **О. Ж. Френель** (1788—1827). В. І. Вернадський справедливо зазначив, що «заслуги їх з точки зору розробки принципів хвильової теорії світла можуть бути порівняні, але в оптиці кристалів досягнення Френеля, без сумніву, має найбільше значення». Причину подвійного променезаломлення світла у кристалах Френель зв'язував з неоднаковою пружністю світлового ефіру в різних напрямках кристала. Вчений вважав, що швидкість поширення променя в кристалі можна записати за допомогою формули

$$v = \sqrt{\frac{Q}{r}}, \text{ де } v \text{ — швидкість променя; } Q \text{ — пружність світлового ефіру; } r \text{ — густина}$$

світлового ефіру.

Френель вважав, що величина \sqrt{Q} у кристалі змінюється від напрямку за законом еліпсоїда. Цей уявний еліпсоїд і є так званий еліпсоїд Френеля. Розрізняють три види еліпсоїдів Френеля: тривісний (еліпсоїд загального вигляду), який характеризує оптичні двовісні кристали, тобто кристали нижчих категорій; еліпсоїд обертання, який властивий оптично одновісним кристалам середніх сингоній; сфера, що притаманна оптично ізотропним кристалам вищих категорій, тобто кристалам кубічної сингонії. Еліпсоїд Френеля дає не лише поняття про оптичні властивості кристала, а й змогу побудувати відповідні поверхні світлових хвиль. Теорію Френеля продовжував розвивати німецький кристалограф і фізик **Ф. Нейман** (1798—1895).

Одночасно із дослідженнями оптичних властивостей кристалів відбувалося вдосконалення поляризаційної апаратури (Араго, Нерберг, Амічі), **У. Тальбот** (1800—1877) створює перший поляризаційний мікроскоп.

§ 36. ДИСПЕРСІЯ СВІТЛА

З ІСТОРІЇ

Явище розкладання білого світла на спектр за допомогою призми було відоме досить давно, але пояснити це явище зміг лише **І. Ньютон**. Вчених, які займалися оптикою, цікавила природа світла. Ньютон же, вивчаючи явище розкладання білого світла на спектр, приходив до висновку, що біле світло є складним, тобто складається із суми простих кольорових променів.

Ньютон працював із простою установкою. На мал. 169 показано дослід Ньютона із встановлення явища дисперсії світла (1754). У вікні затемненої кімнати було пророблено маленький отвір, через який проходив вузький пучок сонячного світла. На шляху сонячного світла ставили призму, а за призмою — екран. На екрані спостерігали спектр, тобто видовжене зображення круглого отвору, нібито складене із багатьох кольорових кружечків. При цьому найбільше відхилення мали фіолетові промені — один кінець спектра — і найменше відхилення — червоні — другий кінець спектра.

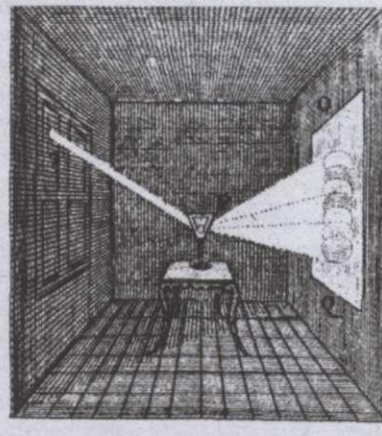
Але цей дослід ще не був переконливим доведенням складності білого світла й існування простих променів. Він був добре відомий, і давав змогу зробити висновок, що, проходячи через призму, біле світло не розкладається на прості промені, а змінюється, як вважало багато дослідників до Ньютона.

Для того щоб довести висновок про те, що біле світло складається із простих кольорових променів і розкладається на них при проходженні через призму, Ньютон провів інший дослід (мал. 170). В екрані, на якому спостерігався спектр, також робили маленький отвір, через який пропускали вже не біле світло, а світло, що мало певну окраску, говорячи сучасною мовою, монохроматичний пучок світла. На шляху цього пучка Ньютон ставив нову призму, а за нею новий екран. *Що спостерігалось на цьому новому екрані?*

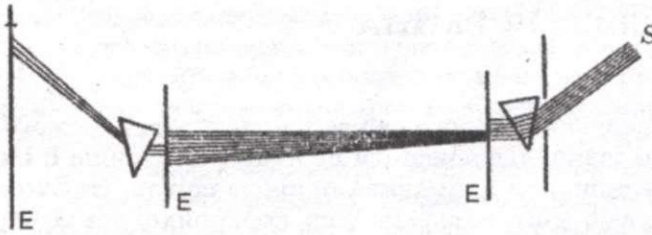
Дослід показав, що цей пучок світла відхилявся призмою як єдине ціле, під визначеним кутом. Повертаючи першу призму, Ньютон пропускав через отвір екрана кольорові промені різних ділянок спектра. У всіх випадках вони не розкладалися другою призмою, а лише відхилялися на визначений кут, різний для променів різного кольору.

Отже, Ньютон дійшов висновку, що біле світло розкладається на кольорові промені, які є простими, і не розкладаються призмою. Для кожного кольору показник заломлення має своє визначене значення.

Таким чином, прості промені є незмінними. Вони являють собою, можна сказати, атоми світла, подібно до атомів речовини. Цей висновок узгоджувався із корпускулярною теорією світла. Дійсно, незмінні атоми світла, прості промені, є потоком і однорідних частинок, які, потрапляючи у



Мал. 169



Мал. 170

наше око, викликають відчуття певного кольору. Суміш із різнорідних світлових частинок є білим світлом. При проходженні через призму біле світло розкладається. Призма сортує світлові частинки, відхиляючи їх на різний кут відповідно до їх колірності.

Із точки зору хвильової теорії на той час було складно пояснити відкриття Ньютона, тому що теорія поширення хвиль ще не була розроблена. Розуміння того, що колір визначається періодом світлової хвилі, прийшло набагато пізніше.

Якщо уважно придивитися до проходження світла через трикутну призму, то можна побачити, що розкладання білого світла починається відразу ж, як тільки світло переходить з повітря в скло (мал. 171).

Середовища, в яких спостерігається явище дисперсії, називають *диспергуючими*.

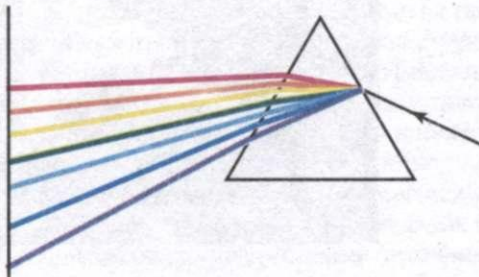
Якщо на шляху будь-якого кольорового пучка, що виходить з призми, поставити ще одну призму, то він пройде через призму без зміни, не розкладаючись (мал. 172).

Про що свідчить явище дисперсії? Перш за все, явище дисперсії свідчить про те, що біле світло є складним. Проте це не нове: про це свідчить і явище дифракції. Більш того, при вивченні явища дифракції було встановлено, що довжини хвиль і їх частоти різні для кожного кольору.

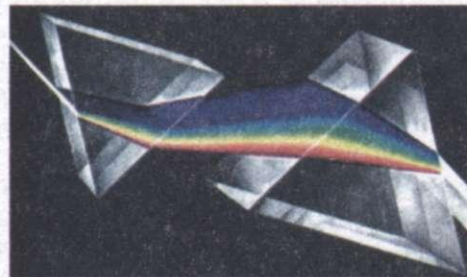
Явище дисперсії свідчить також про те, що швидкості хвиль, з яких складається біле світло, різні. Дійсно, безпосередньо з досліду випливає, що для показників заломлення справедлива наступна нерівність:

$$n_{\text{ч}} < n_{\text{о}} < n_{\text{ж}} < n_{\text{з}} < n_{\text{б}} < n_{\text{с}} < n_{\text{ф}}$$

Але показник заломлення дорівнює відношенню швидкості світла в повітрі до швидкості світла у склі. Тому показники заломлення кольорових променів можна записати через їх швидкості:



Мал. 171



Мал. 172

$$n_{\text{ч}} = \frac{c}{v_{\text{к}}}; \dots n_{\text{ф}} = \frac{c}{v_{\text{ф}}}.$$

Підставивши знайдені значення показників заломлення в попередню нерівність, отримаємо

$$v_{\text{ч}} > v_{\text{о}} > \dots > v_{\text{ф}}.$$

Таким чином, з явища дисперсії випливає, що хвилі, які входять до складу білого світла, в речовині поширюються з різними швидкостями: з найбільшою швидкістю поширюються хвилі, які ми сприймаємо як червоне світло, і з найменшою — хвилі, що сприймаються нами як фіолетове світло.

Проте наше сприйняття кольору залежить від довжини хвилі, а отже, і від частоти коливань. Таким чином, швидкість поширення світлових хвиль залежить від їх частоти.

Об'єднуючи сказане про дисперсію світла, можна дати наступне визначення:

Дисперсією хвиль називають залежність їх швидкості від частоти.

Залежність фазової швидкості хвиль від їх 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 хвилі.

А чи залежить швидкість світла у вакуумі від частоти коливань?

Уявімо собі, що у вакуумі на дуже великій від нас відстані потужне джерело світла періодично закривається непрозорою ширмою, а потім знову відкривається. Якщо всі світлові хвилі незалежно від частоти коливань поширюються у вакуумі з однаковою швидкістю, то ми повинні побачити, що світло, яке випромінюється далеким джерелом, мигтить, але його колір не змінюється. Якщо ж світлові хвилі різної частоти у вакуумі поширюються з різними швидкостями, то колір джерела повинен змінюватися.

Розглянемо це питання 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 перш за все 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 того, як ширма закриє джерело світла, до нас перш за все перестануть доходити хвилі червоного світла, а потім фіолетового. Отже, колір джерела змінюватиметься від дійсного до фіолетового, після чого джерела не буде видно.

При невеликій різниці у швидкостях поширення хвиль описаний ефект, якщо він відбувається, може бути помітний тільки при дуже великих відстанях між джерелом і спостерігачем. Тому в лабораторних умовах здійснити описаний вище дослід не можна, оскільки всі земні відстані для нього малі. Проте можна скористатися астрономічними спостереженнями за подвійними зірками. Подвійна зірка — це дві зірки, що обертаються навколо їх загального центра мас. Кожна з них періодично затуляє від спостерігача світло іншої зірки. Проте при спостереженні через телескоп зміни кольору цих зірок не спостерігають. Якби швидкість світла у вакуумі залежала від частоти, то після виходу зірки із тіні повинен був би змінюватися її колір.

Отже, у вакуумі швидкість світлових хвиль не залежить від частоти коливань.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Як можна спостерігати явище дисперсії світла?
2. Що таке дисперсія?
3. Про що свідчить дослід Ньютона з трикутною призмою?
4. Яке середовище називають диспергуючим?
5. Чи спостерігається дисперсія світла при проходженні через вакуум?

Задачі та справи

Розв'язуємо разом

Для визначення довжини світлової хвилі використовували дифракційну ґратку, період якої 0,01 мм. Перше дифракційне зображення на екрані отримали на відстані 11,8 см від центрального зображення і на відстані 2 м від ґратки. Визначте довжину світлової хвилі.

Розв'язання.

Умову максимуму дифракційної картини від ґратки записуємо так:

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

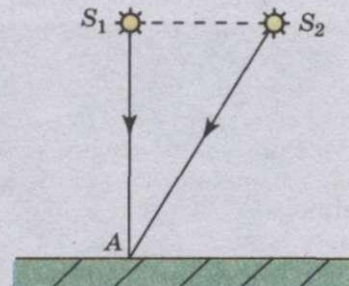
де d — стала (період) ґратки; $\sin \varphi = \frac{h}{l}$; k — порядок спектра (у нашому випадку $k = 1$).

$$\text{Тепер } d \frac{h}{l} = \lambda.$$

Підставивши значення відомих величин, отримаємо $\lambda = 5,9 \cdot 10^{-7}$ м.

Рівень А

301. Чому поверхня мильної бульбашки забарвлена кольорами веселки? Відповідь проілюструйте малюнком.
302. Поясніть причини виникнення кольорових смуг під час розглядання тонкого шару бензину на поверхні води.
303. Чому тільки досить вузький світловий пучок після проходження крізь призму дає спектр, а в широкого пучка забарвленими виявляються лише краї?
304. Два когерентних пучки світла, які мають довжину хвилі 0,4 мкм, перетинаються. Що можна спостерігати в точці їх перетину, для якої різниця ходу хвиль дорівнює 0,5 мм, максимум чи мінімум коливань?
305. Визначте кут відхилення зеленого світла з довжиною хвилі 550 нм у спектрі другого порядку, отриманому за допомогою дифракційної ґратки з періодом 20 мкм.
306. Кут відхилення променів фіолетового світла з довжиною світлової хвилі 435 нм у дифракційному спектрі першого порядку дорівнює $2^\circ 30'$. Який період дифракційної ґратки?
307. Два когерентних джерела S_1 і S_2 , що мають довжину хвилі 0,5 мкм, розташовані на відстані 2 мм одне від одного (мал. 173), а екран — на



Мал. 173

- відстані 2 м від S_1 . Що можна спостерігати в точці А екрана — світло чи темряву?
308. Білий промінь світла падає на бічну грань призми під кутом 0° . Чи матимемо на екрані спектр?
309. Щоб дістати на екрані спектр випромінювання лампи, її розжарювали поступово за допомогою реостата. Які зміни при цьому відбувалися на екрані?
310. Знаючи швидкість світла у вакуумі, обчисліть швидкість світла у воді та склі.
311. В Антарктиді кількість тепла, що його приносить сонячне проміння на одиницю поверхні, така сама, як і в Криму. Чому ж в Антарктиді так холодно (температура повітря досягає -88°C)?
312. Навіщо металізують (покривають міцним шаром фольги) спецодег сталеварів, мартенівців, вальцювальників та ін.?

Рівень В

313. Скільки довжин хвиль монохроматичного випромінювання з частотою 400 ТГц поміщається на відрізьку 1 м?
314. З якою швидкістю поширюється світло у воді, якщо при частоті 600 ТГц довжина хвилі дорівнює 0,51 мкм?
315. Яку приблизно товщину має плівка мильної бульбашки в місцях, де вона здається блакитною?
316. Екран розміщено на відстані 1 м від дифракційної ґратки. При її освітленні червоним світлом із довжиною хвилі 650 нм відстань між двома максимумами першого порядку на екрані дорівнює 26 см. Визначте період дифракційної ґратки.
317. За допомогою дифракційної ґратки з періодом 5 мкм дифракційний максимум першого порядку отримано на відстані 60 мм від центрального. Відстань від ґратки до екрана 50 см. Світло падає на ґратку паралельно. Яка довжина світлової хвилі?
318. Під час туману навколо ліхтарів можна спостерігати кольорові кільця. Чим спричинене це явище? Поясніть його.
319. Дно ставка не можна бачити через відбите світло. Як можна усунути відбите світло і побачити дно?
320. Чи можна зробити так, щоб краплі ртуті не блищали, коли на них дивитися крізь поляроїд?
321. Є призми з різних матеріалів, але з однаковими заломними кутами. Чим розрізнятимуться спектри, що їх дістали за допомогою цих призм?
322. Чи змінюється швидкість, довжина хвилі, частота коливань, коли світло переходить із повітря у скло? Як?
323. На дифракційну ґратку завдовжки 10 мм, що має 2000 штрихів, нормально падає монохроматичне світло з довжиною хвилі 450 нм. Який кут між напрямками спостереження максимумів першого і другого порядків?
324. Яку ширину має весь дифракційний спектр першого порядку, отриманий на екрані, віддаленому на 1,5 м від дифракційної ґратки з періодом 10 мкм? Довжини світлових хвиль лежать у межах від 380 до 760 нм.
325. Поясніть відмінність між дифракційним та дисперсійним спектрами.
326. Чому в ясний сонячний день небо забарвлене у блакитний колір, а вранці на сході і ввечері на заході колір неба може мати оранжево-червоні відтінки?
327. Чому ртутні лампи ультрафіолетового випромінювання виготовляють не зі скла, а з кварцу? Чому під час горіння кварцевих ламп відчувається запах озону?

§ 37. РОЗВИТОК КВАНТОВОЇ ФІЗИКИ. ГІПОТЕЗА ПЛАНКА

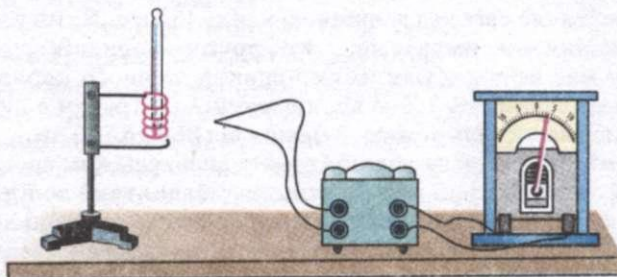
Явища, що відбуваються в макросвіті, вивчає класична фізика. У тих випадках, коли макроскопічні явища відбуваються з невеликими (порівняно зі швидкістю поширення світла) швидкостями, їх пояснює класична механіка Ньютона. Явища, що відбуваються зі швидкостями, які наближаються до швидкості світла, вивчає теорія відносності. Квантова фізика, знайомство з якою ви починаєте, вивчає явища, що відбуваються в мікросвіті, які класична фізика пояснити не може.

Виникнення квантової фізики пов'язане з ім'ям німецького фізика **М. Планка**. Він досліджував випромінювання нагрітого тіла. Найбільш важливі результати своїх дослідів Планк опублікував наприкінці 1900 р. Таким чином, виникнення квантової фізики датується XIX і XX ст.

Розглянемо дослід. Під'єднаємо металеву спіраль до джерела регульованої напруги. Для вимірювання температури спіралі вставимо в неї термометр. Встановивши низьку напругу, замкнемо коло. Спіраль трохи нагріється, але світитися не буде. Якщо недалеко від спіралі поставити термопару, приєднану до чутливого гальванометра (мал. 174), то прилад зафіксує наявність теплового випромінювання, що не сприймається нашим оком. Збільшуючи напругу, що подається на спіраль, ми помітимо, що з підвищенням температури теплове випромінювання спіралі стає значнішим. При температурі близько $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ спіраль почне випромінювати червоне («вишневе») світло. При подальшому підвищенні температури спіралі інтенсивність випромінювання буде зростати, а колір випромінюваного світла стане спочатку оранжевим, потім жовтим і нарешті звичайним білим.

Якщо в описаному досліді спостерігати за світлом, що випромінює спіраль, за допомогою спектроскопа, то спочатку побачимо лише червоний край спектра. Але потім послідовно почнуть з'являтися оранжева, жовта, зелена, блакитна, синя і нарешті фіолетова області. Таким чином, з підвищенням температури підвищується інтенсивність теплового випромінювання, а в ньому спостерігаються випромінювання все більш високих частот.

Тіло, нагріте до температури в декілька тисяч градусів, має суцільний спектр випромінювання, що займає область від невидимого інфрачервоного випромінювання до невидимого ультрафіолетового.



Мал. 174

На мал. 175 наведено експериментально одержані графіки розподілу енергії E в спектрі випромінювання вугільної спіралі при різних температурах. На осі ординат відкладені значення енергії, що відповідають даній довжині хвилі, а на осі абсцис — довжини хвиль.

Визначений експериментально розподіл енергії випромінювання в спектрі потребував теоретичного пояснення. Зрозуміло, оскільки всі тіла складаються з атомів, то теплове, видиме і ультрафіолетове випромінювання обумовлюються потоком атомів. Але як?

У класичній електродинаміці Максвелла відповідно до дослідів вважається, що заряд, який коливається, випромінює електромагнітні хвилі і втрачає енергію безперервно. Багаторазові намагання фізиків пояснити механізм випромінювання з позицій класичної фізики не мали успіху. Зазнав поразки і Планк. Аналізуючи причини своєї невдачі, він дійшов висновку, що закони випромінювання електромагнітних хвиль класичної фізики, засновані на теорії електромагнетизму Максвелла, непридатні до атомів.

Планк висловив припущення, що атоми випромінюють не безперервно, а переривчасто, порціями — квантами (з лат. *quantum* — порція), енергія яких пропорційна частоті коливань:

$$E = h\nu,$$

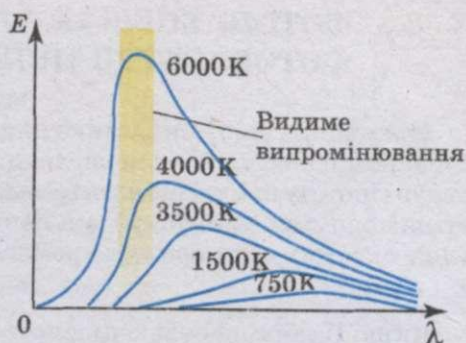
де E — енергія кванта; h — стала величина, що отримала згодом назву сталої Планка. Стала Планка в сучасній фізиці відіграє виключно важливу роль; її значення визначене з високою точністю:

$$h = 6,626\,176 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Гіпотеза Планка про переривчастий характер випромінювання нагрітого тіла блискуче пояснила експериментально знайдену залежність випромінювання від довжини хвилі (частоти). Проте вона суперечить класичній фізиці. Сучасники Планка, та спочатку і сам Планк, сприйняли гіпотезу про переривчастий характер випромінювання як цікавий прийом, що дає змогу пояснити тільки закономірності теплового випромінювання. Проте значення гіпотези Планка виявилось незрівнянно великим: воно знаменувало народження нової фізики — фізики мікросвіту.

2 ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

- Уважно вивчіть графік випромінювання нагрітого тіла (мал. 175) і дайте відповідь на такі питання:
 - як залежить спектральна густина енергії теплового випромінювання $\left(\frac{E}{\lambda}\right)$ від температури?
 - як залежить положення максимуму кривої розподілу енергії за довжинами хвиль від температури?
- У чому полягала гіпотеза Планка? Яка головна відмінність квантової теорії від класичної?
- Які явища підтверджують гіпотезу квантів?



Мал. 175

§ 38. ФОТОН. ЕНЕРГІЯ, МАСА, ІМПУЛЬС ФОТОНА. ФОТОЕЛЕКТРИЧНИЙ ЕФЕКТ

Важливість гіпотези Планка для подальшого розвитку фізики в 1900 р. не була очевидною навіть для видатних учених. Однак у 1905 р. А. Ейнштейн висунув гіпотезу про те, що електромагнітне випромінювання не тільки випускається порціями (квантами), а й поширюється і поглинається речовиною у вигляді окремих частинок електромагнітного поля — **фотонів**, які мають енергію

$$E = h\nu.$$

Якщо Планк, висуваючи гіпотезу квантів, вважав, що квант необхідний лише як допоміжне поняття, то Ейнштейн пішов далі: він побачив у кванті реально існуючу частинку електромагнітного поля — **фотон**.

Розглянемо основні властивості фотона. Фотон, як частинка електромагнітного поля, рухається зі швидкістю світла. Він існує тільки в русі. Зупинити фотон неможливо, він або рухається зі швидкістю світла, або не існує. Якщо фотон має енергію $E = h\nu$, то за законом пропорційності маси і енергії він повинен мати і масу:

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}.$$

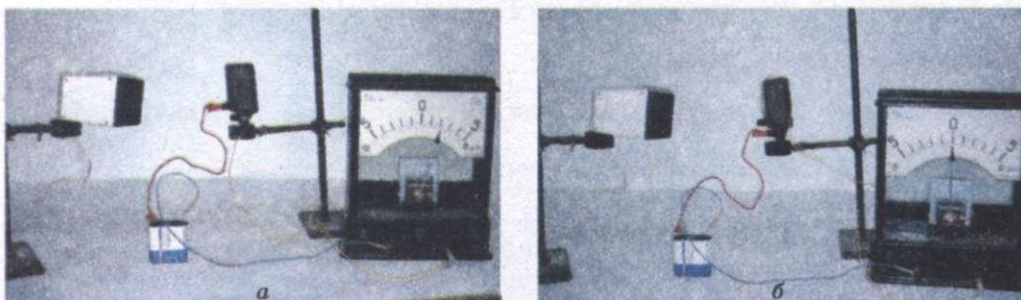
Оскільки фотон існує тільки в русі зі швидкістю світла, то у нього немає маси спокою. У цьому полягає принципова відмінність фотона від звичайних частинок речовини. Якщо фотон рухається, то він повинен мати також імпульс:

$$p = mc.$$

Наявність у фотона імпульсу підтверджується існуванням світлового тиску.

Ви вже знаєте, що під дією світла відбувається емісія електронів з речовини. Це явище отримало назву **фотоелектронної емісії** або **фотоелектричного ефекту**. Фотоелектричний ефект було відкрито у 1887 р. Г. Герцем.

Дізнавшись про відкриття Герца, професор Московського університету О. Г. Столетов у 1888 р. почав вивчати це явище. На мал. 176 зображено установку, яка демонструє, як Столетов досліджував явище фотоелектричного ефекту. Перед ретельно очищеною цинковою пластинкою розміщували металеву сітку, через яку цинкову пластинку освітлювали світлом від електричної дуги. Якщо цинкову пластинку приєднували до негативного полюса джерела,



Мал. 176