**Фотометрія.**

**Фотометрія**, це розділ оптики, в якому світло представляють як потік світлової енергії і в якому вивчають енергетичні параметри світлових потоків та методи їх вимірювання.

**§25. Про основні фотометричні величини та одиниці їх вимірювання.**

Малоприємна особливість фотометрії полягає в тому, що в ній, енергетичні параметри світла визначають за суб’єктивними зоровими відчуттями людини. А ці відчуття такі, що світло різних кольорів (різних довжин хвиль), людина сприймає суттєво по різному. По різному в тому сенсі, що однакові за енергетичною потужністю, але різні за кольором світлові потоки, людина сприймає як такі що мають різну світлову інтенсивність (різну світлову потужність). Наприклад, якщо об’єктивні прилади показують, що червона, жовта та синя лампочки випромінюють однакову кількість світлової енергії (мають однакову потужність), то людина з нормальним зором скаже, що світлова потужність жовтої лампочки приблизно в п’ять разів більша аніж в червоної і в десять разів більша аніж в синьої.

Факт того, що в фотометрії енергетичні параметри світла оцінюють за зоровими відчуттями людини, по суті означає, що відповідні фізичні величини є суб’єктивними, тобто такими, числові значення яких залежать від особливостей людських відчуттів. Зважаючи на ці обставини, фізичні величини світлової фотометрії ми будемо називати не фізичними, а фотометричними. Втім, вище сказане зовсім не означає, що в фотометрії не застосовують певних об’єктивних вимірювальних приладів. Просто ці прилади налаштовують таким чином, щоб їх показання максимально точно відповідали зоровим відчуттям людини, а точніше – відчуттям **усередненого світлоадаптованого ока людини.**

Потрібно зауважити, що в сучасній науці фактично існує два розділи фотометрії: **світлова фотометрія**та **енергетична фотометрія**. При цьому, в світловій фотометрії енергетичні параметри світла визначають за суб’єктивними зоровими відчуттями людини, а в енергетичній фотометрії – за об’єктивними показаннями загально прийнятих енерговимірювальних приладів. Та як би там не було, а в побутовій практиці, параметри світлових потоків ми оцінюємо за нашими зоровими відчуттями. Зважаючи на ці та деякі інші обставини, в межах програми загальноосвітньої школи вивчають основи тієї фотометрії яка називається світловою, і в якій енергетичні параметри світла оцінюють за зоровими відчуттями людини.

До числа основних фотометричних величин відносяться: світловий потік (Ф), сила світла (J), та освітленість (Е).

**Світловий потік** – це фотометрична величина, яка характеризує світлову потужність джерела світла і яка показує скільки світлової енергії (Q) випромінює дане джерело за одиницю часу, за умови, що величина цієї енергії визначається за зоровими відчуттями людини.

Позначається:  Ф

Визначальне рівняння:  Ф = Q/t

Одиниця вимірювання:  [Ф] = лм ,  (люмен, від лат. lumen – світло).

**Сила світла** – це фізична величина, яка характеризує той світловий потік що розповсюджується в певному напрямку і яка дорівнює відношенню того світлового потоку ΔФ, що розповсюджується в межах певного об’ємного кута ΔΩ, до величини цього кута.

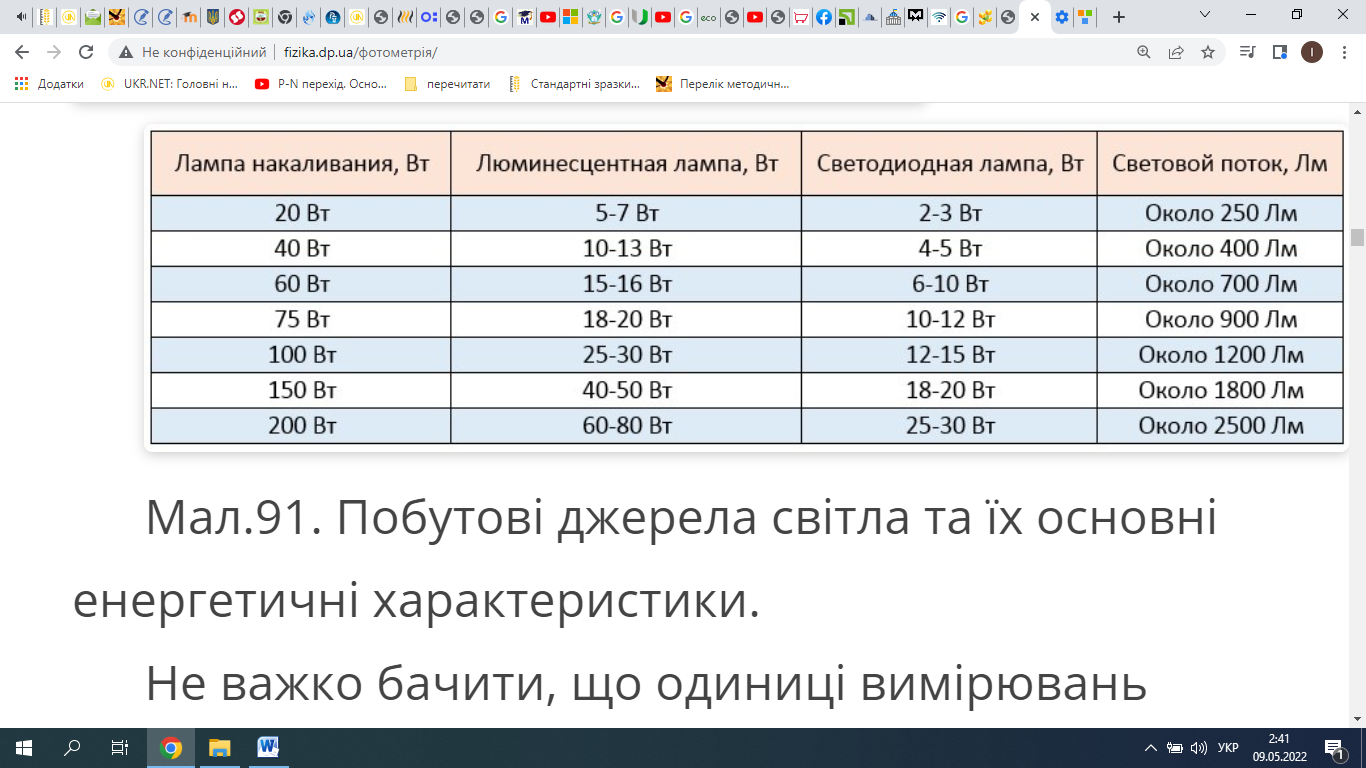
Позначається:  J

Визначальне рівняння: J = ΔФ/ΔΩ,

Одиниця вимірювання: [J] = кд,  (кандела, від лат. candela – свічка).

Зазвичай основними характеристиками побутових джерел світла є та, виміряна в джоулях, енергетична потужність яку споживає дане джерело світла, та виміряна в люменах величина того світлового потоку, що випромінюється цим джерелом. На мал.91 представлені найбільш поширені побутові джерела світла (лампа розжарювання, люмінесцентна лампа і лампа світлодіодна) та їх основні енергетичні характеристики.

.                              



Мал.91. Побутові джерела світла та їх основні енергетичні характеристики.

Не важко бачити, що одиниці вимірювань фотометричних величин (лм, кд, лм·с), які фактично характеризують енергетичні параметри світла,  практично не пов’язані з іншими, аналогічними та загально прийнятими одиницями (Дж, Вт, Вт/ср). По суті, мова йде про автономну систему одиниць, в якій основним вимірювальним приладом є **усереднене світлоадаптоване око людини**, а основною одиницею – **кандела**.

Чому кандела? А тому, що наше око фактично сприймає не ту загальну світлову енергію (Q) і не той загальний світловий потік (Ф) що випромінюється даним джерелом світла, а ту частину світлового потоку що розповсюджується в напрямку ока. Іншими словами, той вимірювальний прилад який називається усередненим світлоадаптованим оком людини, фактично реагує на ту величину яка називається силою світла (J). Зважаючи на ці обставини, в якості основної одиниці вимірювань фотометричних величин, обрано одиницю сили світла – канделу.

В різний час, кандела (стара назва “свічка”, пізніше – “міжнародна свічка”) визначалась по різному. Достатньо сказати, що в різний час, еталонами цієї одиниці були: 1) полум’я звичайної свічки (свічки яка мала певну товщину та була виготовлена з певного матеріалу); 2) полум’я світильної лампи яка мала задані характеристики (задані розміри полум’я, заданий сорт палива, заданий режим горіння, тощо); 3) світло еталонної лампочки розжарювання включеної  в електричне коло з заданими параметрами; 4) світло яке випромінює 1см2 поверхні платини нагрітої до температури 2042К; 5) світло яке випромінює 1см2 поверхні абсолютно чорного тіла при його нагріванні до температури 2042К.

Сьогодні нема потреби формулювати та аналізувати все різноманіття раніше вживаних визначень кандели. Можна лише зауважити, що всі ці визначення певним чином формалізували ті зорові відчуття які отримує людина спостерігаючи за еталонним джерелом світла: полум’ям свічки, полум’ям світильної лампи, нагрітою спіраллю лампочки розжарювання, нагрітим до температури 2042К шматком платини.

На сьогоднішній день (з 1979 року) в міжнародній системі одиниць (СІ), прийнято наступне визначення. **Кандела**, це одиниця вимірювання сили світла, яка дорівнює силі світла такого джерела, що випромінює монохроматичне світло з довжиною хвилі 555нм при силі випромінювання в даному напрямку (1/683)Вт/ср. Дане визначення має ту перевагу, що по перше певним чином поєднує основну одиницю фотометричних величин з іншими одиницями СІ, зокрема з ватом, а отже з джоулем, ньютоном, тощо. По друге, за такого визначення, фактична величина кандели є такою, що не залежить від будови та принципу дії еталонного джерела світла. Важливо лише те, щоб це джерело випромінювало світло заданих частотних та енергетичних параметрів ( λ=555нм; Je=(1/683)Вт/ср).

Однак не варто думати, що вище сформульоване визначення кандели, однозначно відображає певний кількісний зв’язок між світловими та енергетичними величинами. Зокрема не правильно вважати, що кд=(1/683)Вт/ср; лм=(1/683)Вт; лм·с=(1/683)Дж). Не правильно бодай тому, що силі світла в одну канделу відповідає сила випромінювання в (1/683)Вт/ср тільки в тому випадку, якщо мова йде про монохроматичне світло з довжиною хвилі 555нм. Для світла ж інших довжин хвиль, це співвідношення є суттєво іншим.

Втім, наші зорові відчуття дійсно певним чином залежать від енергетичних параметрів світла і тому, між світловими та енергетичними величинами дійсно існує певний кількісний зв’язок. Однак, цей зв’язок є нелінійним та досить складним. А тому, говорити про математичне вираження цього зв’язку ми не будемо.

Визначивши основну одиницю фотометричних величин, не важко визначити всі інші фотометричні одиниці. Зокрема: **люмен**, це одиниця вимірювання світлового потоку, яка дорівнює такому світловому потоку, який в об’ємному куті один стерадіан створює силу світла в одну канделу, іншими словами:  лм = кд·ср.

Зважаючи на те, що в системі фотометричних величин фігурує об’ємний кут, буде не зайвим нагадати. **Об’ємний (тілесний) кут**, це фізична величина, яка характеризує кутові параметри тієї частини простору що обмежена конічною поверхнею, вершина якої співпадає з вершиною відповідного об’ємного кута, і яка дорівнює відношенню площі (ΔS) тієї частини сфери що обмежена відповідним кутовим конусом, до квадрату радіусу цієї сфери (R2).

Позначається: Ω  (омега)

Визначальне рівняння: Ω = ΔS/R2

Одиниця вимірювання:  [Ω] = ср,   (стерадіан).

**Стерадіан** (від грец. stereos – об’єм та лат.  radius – промінь, радіус), це одиниця вимірювання об’ємних кутів, яка чисельно дорівнює такому центральному об’ємному куту, який будучи проведеним з центру сфери радіусом R обмежує на її поверхні площу величиною R2.

Оскільки площа поверхні сфери визначається за формулою S=4πR2 то ясно, що величина того повного об’ємного кута який обмежений цією сферою дорівнює 4π стерадіан: Ω = S/R2 = 4πR2/R2 = 4π(ср). При цьому потрібно мати на увазі, що об’ємний кут не можливо виразити певним числом плоских кутів. Адже стверджувати, що в одному стерадіані міститься стільки то радіан або градусів, це все рівно ніби стверджувати, що в одному метрі квадратному міститься стільки то метрів.

Важливою характеристикою побутового джерела світла є його **світлова віддача** (n), тобто величина яка дорівнює відношенню того загального світлового потоку (Ф) що випромінює дане джерело світла, до величини спожитої ним електричної потужності (Р): n=Ф/Р. Наприклад, якщо лампа розжарювання потужністю 100Вт та світлодіодна лампа потужністю 12Вт, створюють однакові світлові потоки величиною 1200лм, то світлова віддача першої дорівнює 12лм/Вт, а другої 100лм/Вт. По суті це означає, що світлодіодна лампа є більш ефективним (енергозберігаючим) джерелом світла. Адже вона, при однаковій величині спожитої електроенергії випромінює у 8,3 рази більше світла аніж відповідна лампа розжарювання.

Як уже зазначалось, базовою фотометричною величиною є сила світла (J = ΔФ/ΔΩ). Адже наш зір сприймає не той загальний світловий потік (Ф) який випромінюється джерелом світла, а ту його частину яка направлена в нашу сторону і яка характеризується силою світла (J). Зважаючи на цей факт, а також на факт того, що паспортною характеристикою джерела світла є не сила світла (J), а світловий потік (Ф), важливо вміти за заданим світловим потоком визначати йому відповідну силу світла (J = ΔФ/ΔΩ).

Визначаючи величину тієї сили світла (J = ΔФ/ΔΩ) яку в заданому напрямку створює певне джерело світла, потрібно враховувати не лише величину того загального світлового потоку який випромінює це джерело, а й ті обставини які можуть спричиняти певний перерозподіл цього потоку. Скажімо, якщо світловий потік величиною 1200лм рівномірно розповсюджується у всіх можливих напрямках (мал.92а), тобто заповнює об’ємний кут 4π(ср), то в цьому випадку J=Ф/4π=95,5кд. Якщо ж те саме джерело світла знаходиться в певному світло відбивному плафоні який змушує світловий потік 1200лм заповнювати об’ємний кут π(ср) (мал.90г), то в цьому випадку J=Ф/π=382кд.

Мал.92. Джерело світла одне і теж, а створювана ним сила світла – різна.

**Словник фізичних термінів**

**Світловий потік** – це фотометрична величина, яка характеризує світлову потужність джерела світла і яка показує скільки світлової енергії (Q) випромінює дане джерело за одиницю часу, за умови, що величина цієї енергії визначається за зоровими відчуттями людини.

Позначається:  Ф

Визначальне рівняння:  Ф = Q/t

Одиниця вимірювання:  [Ф] = лм ,  (люмен).

**Сила світла** – це фізична величина, яка характеризує той світловий потік що розповсюджується в певному напрямку і яка дорівнює відношенню того світлового потоку ΔФ, що розповсюджується в межах певного об’ємного кута ΔΩ, до величини цього кута.

Позначається:  J

Визначальне рівняння: J = ΔФ/ΔΩ,

Одиниця вимірювання: [J] = кд,  (кандела).

**Кандела**, це одиниця вимірювання сили світла, яка дорівнює силі світла такого джерела, що випромінює монохроматичне світло з довжиною хвилі 555нм при силі випромінювання в даному напрямку (1/683)Вт/ср.

**Контрольні запитання**

1.В чому особливість фотометричних величин?

2. Чому, в якості основної одиниці вимірювання фотометричних величин обрано одиницю сили світла, а не скажімо, одиницю світлового потоку?

3. Які еталонні джерела світла застосовувались при визначені одиниці сили світла? Які недоліки мали такі визначення?

4. Чи випливає з визначення кандели, що між канделою та ватом існує співвідношення кд = (1/683)Вт/ср?

5. За яких умов справедливі співвідношення: кд=(1/683)Вт/ср; лм=(1/683)Вт; лм·с = (1/683)Дж)?

6. Скільки радіан міститься в одному стерадіані?

**§26. Освітленість. Закони освітленості.**

Світлова енергія (Q), світловий потік (Ф) та сила світла (J), фактично характеризують певні параметри джерела світла. В нашому ж повсякденному житті, нас зазвичай цікавлять не параметри джерела світла, а та кількість світлового потоку що потрапляє на ту чи іншу поверхню, – поверхню тієї стіни на яку ми дивимось, поверхню того стола за яким сидимо, поверхню тієї книги яку читаємо, тощо. Іншими словами, нас цікавить освітленість поверхні.

**Освітленість** – це фотометрична величина, яка характеризує ту кількість світлового потоку що потрапляє на одиницю площі поверхні і величина якої визначається за зоровими відчуттями людини.

Позначається: Е

Визначальне рівняння:  Е = ΔФ/ΔS, де ΔФ – величина того світлового потоку що потрапляє на поверхню площею ΔS

Одиниця вимірювання:  [Е] = лм/м2 =лк  , (люкс, від лат. lux – світло).

**Люкс** – одиниця вимірювання освітленості, яка дорівнює такій однорідній освітленості поверхні площею 1м2, при якій на цю поверхню падає світловий потік в один люмен, за умови, що поверхня є перпендикулярною до напрямку розповсюдження світлових променів (кут падіння променів дорівнює нулю).



Мал.93. Освітленість є тією фотометричною величиною яка регламентується певними медичними нормами.

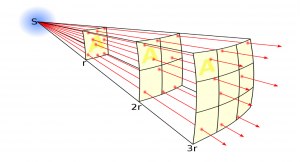
Про важливість тієї фотометричної величини яка називається освітленістю, говорить бодай той факт, що медичні норми регламентують не параметри джерела світла, а освітленість приміщень, робочих місць, тощо. Скажімо, згідно з цими нормами освітленість житлових приміщень має становити 100-200лк, а освітленість кабінетів загально освітніх шкіл – 300лк.

Освітленість вимірюють приладами які називаються **люксметрами**. В цих приладах світловий потік, потрапляючи на світлочутливий елемент (фотоелемент) призводить до певних змін того чи іншого електричного параметру цього елементу. Зазвичай, до зміни його електричного опору, або до генерації в ньому певної електричної напруги. При цьому, у відповідному електричному колі виникає певний електричний струм, величина якого пропорційна освітленості фотоелемента. Цей струм призводить до відповідного відхилення стрілки гальванометра, або до відповідних цифрових показань, які і вказують на числове значення освітленості.

Ясно, що в багатьох випадках потрібно не лише констатувати наявну освітленість, а й вміти передбачати її. Скажімо, на стадії проектування такого об’єкту як школа, потрібно вирішувати не лише будівельно-архітектурні питання, не лише питання опалення, водопостачання, електропостачання, каналізації, тощо, а й питання освітленості шкільних приміщень. Успішному вирішенню цих фотометричних питань, значною мірою сприяють знання тих законів, які називаються законами освітленості. З’ясовуючи суть цих законів звернемось до конкретної ситуації.

Припустимо, що в центрі сфери радіусом ? знаходиться точкове джерело світла, яке створює світловий потік Ф. Оскільки точкове джерело світла знаходиться в центрі сфери, то можна стверджувати: 1). Всі світлові промені є перпендикулярними до внутрішньої поверхні сфери, тобто такими, кут падіння яких дорівнює нулю (α=0°). 2). Освітленість кожної ділянки сфери є однаковою і тому величину цієї освітленості можна визначити за формулою  Е0=Ф/S, де S – загальна площа сфери  (S=4πl2); Ф – величина того загального світлового потоку, який створюється даним джерелом світла в об’ємному куті Ω=4π(ср). Зважаючи на те, що J = ΔФ/ΔΩ=Ф/4π, можна записати: Е0=Ф/S=Ф/4πl2=J/l2.

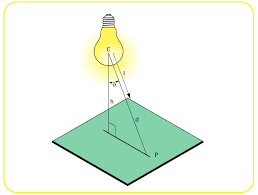
Таким чином: та освітленість яку створює точкове джерело світла на перпендикулярному до світлового потоку фрагменті поверхні, прямо пропорційна силі світла цього джерела (J) і обернено пропорційна квадрату відстані до нього (l2), тобто  Е0=J/l2. Дане твердження називають**першим законом освітленості**, або **законом обернених квадратів**.



Мал.94. Освітленість поверхні обернено пропорційна квадрату відстані до джерела світла.

Можна довести, що освітленість поверхні залежить не лише від величини падаючого світлового потоку, а й від просторової орієнтації поверхні відносно цього потоку, тобто від кута падіння світлових променів. Дійсно. Припустимо, що світловий потік Ф0 падає на поверхню площею S і що ця поверхня є перпендикулярною до потоку (кут падіння променів дорівнює нулю α0=0°). В такій ситуації, освітленість поверхні становитиме Е0=Ф0/S.

Із аналізу мал.95 ясно, що при повороті поверхні на кут α, величина потрапляючого на цю поверхню світлового потоку зменшується і стає рівною Ф=Ф0cosα.  А це означає, що відповідно змінюється і освітленість поверхні:  Е=Ф/S= Ф0cosα/S=E0cosα. А оскільки кут α фактично дорівнює куту падіння світлових променів, то можна стверджувати: освітленість даного фрагменту поверхні, пропорційна косинусу кута падіння світлових променів на цей фрагмент, тобто  Е=E0cosα. Дане твердження часто називають **другим законом освітленості**.



Мал.95 Освітленість поверхні пропорційна косинусу кута падіння світлових променів: Е=E0cosα.

Перший та другий закони освітленості можна об’єднати в єдиний **узагальнений закон освітленості**: та освітленість яку створює точкове джерело світла на будь якому малому фрагменті поверхні, визначається за формулою  E = Jcosα/l2 ,  де  J – сила світла даного точкового джерела світла; l – відстань від джерела світла до даного фрагменту поверхні; α – кут падіння променів на відповідний фрагмент поверхні.

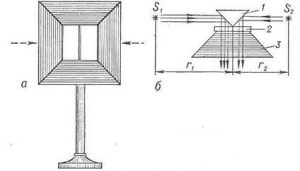
Потрібно зауважити, що вище сформульовані закони освітленості, вточності справедливі лише для точкових джерел світла. Однак, в багатьох практично важливих ситуаціях, ці закони можна застосовувати і тоді, коли джерело світла не є точковим. Загалом, прийнято вважати, що закони освітленості дають прийнятно точні результати в тих випадках, коли лінійні розміри джерела світла (d) не перевищують десятої частини відстані до освітлюваної поверхні (d≤0,1l).

Застосовуючи закони освітленості, потрібно мати на увазі  факт того, що та результуюча освітленість яка створюється системою багатьох джерел світла, дорівнює алгебраїчній сумі освітленостей створюваних кожним окремим джерелом системи: Ерез = Е1 + Е2 + …+ Еn.

Дослідження показують, що людині візуально важко кількісно визначити на скільки освітленість однієї поверхні відрізняється від освітленості іншої поверхні. Однак людина може достатньо точно визначити момент того, коли дві однакові, близько розташовані поверхні є однаково освітленими, тобто коли E1=E2. Цей факт, а також факт того, що освітленість поверхні певним чином залежить від сили світла джерела та відстані до нього (для α=0°, Е=J/l2), лежить в основі порівняльного методу вимірювання сили світла. Суть цього методу полягає в наступному.

Два джерела світла (мал.96) одне з яких є еталонним, тобто таким сила світла якого наперед відома (J1), розташовуються таким чином, що їх паралельні світлові потоки потрапляють на суміжні частини екрану, в якості якого зазвичай застосовують матове напівпрозоре скло. Переміщуючи джерела світла досягають того, щоб освітленості обох частин екрану були однаковими (Е1=Е2). Вимірявши відстані від джерел світла до екрану (l1; l2) та виходячи з того, що  J1/l12=J2/l22 , визначають невідому величину сили світла: J2=J1(l22/l12).

Прилад, який дозволяє реалізовувати вище описаний спосіб визначення сили світла заданого джерела, називають **фотометром.**



Мал.96. Схема устрою та принципу дії фотометра.

Завершуючи коротку розмову про той розділ оптики, який називається фотометрією, ще раз наголосимо на тому, що в сучасній науці існує два розділи фотометрії: світлова фотометрія та енергетична фотометрія. Вони відрізняються тим, що в світловій фотометрії параметри світла оцінюються за суб’єктивними зоровими відчуттями людини, а в енергетичній фотометрії – за об’єктивними показаннями загально прийнятих енерговимірювальних приладів. При цьому в кожній фотометрії існує своя система фізичних величин та їм відповідних одиниць вимірювань. Цю систему можна представити у вигляді наступної порівняльної таблиці.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Фотометрія світлова** | | **Фотометрія енергетична** | |
| **Фізична величина** | **Од.вим** | **Фізична величина** | **Од.вим** |
| **Світлова енергія     Q** | **лм·с** | **Енергія випромінювання    Qe** | **Дж** |
| **Світловий потік     Ф=Q/t** | **лм** | **Потік випромінювання     Фe=Qe/t** | **Вт** |
| **Сила світла            J=Ф/Ω** | **кд** | **Сили випромінювання       Je=Фe/Ω** | **Вт/ср** |
| **Освітленість          Е=Ф/S** | **лм/м2** | **Інтенсивність випр-ня       Re=Фе/S** | **Вт/м2** |

В побутовій практиці параметри світла ми оцінюємо за нашими зоровими відчуттями. І в цьому сенсі, більш близькою до вимог повсякденного життя є світлова фотометрія. Власне тому, в межах програми загальноосвітньої школи вивчається саме світлова фотометрія. Однак якщо мова йде про безумовно об’єктивне оцінювання енергетичних параметрів світла та його зв’язків з іншими проявами енергії, то в цьому сенсі більш близькою до сучасної науки (науки як цілісної системи знань) є енергетична фотометрія.

Втім, між енергетичною та світловою фотометріями існують очевидні аналогії та чітко визначені співвідношення. Тому вивчаючи світлову фотометрію, ви автоматично вивчаєте й фотометрію енергетичну. І навпаки.

**Словник фізичних термінів**

 **Освітленість** – це фотометрична величина, яка характеризує ту кількість світлового потоку що потрапляє на одиницю площі поверхні і величина якої визначається за зоровими відчуттями людини.

Позначається: Е

Визначальне рівняння:  Е = ΔФ/ΔS

Одиниця вимірювання:  [Е] = лм/м2 =лк , (люкс).

**Узагальнений закон освітленості** – це закон, в якому стверджується: та освітленість яку створює точкове джерело світла на будь якому малому фрагменті поверхні, визначається за формулою  E = Jcosα/l2 ,

де  J – сила світла даного точкового джерела світла;

l – відстань від джерела світла до даного фрагменту поверхні;

α – кут падіння променів на відповідний фрагмент поверхні.

**Контрольні запитання**

1.Чи є освітленість характеристикою певного джерела світла?

2. Що характеризує освітленість?

3. Від чого залежить освітленість поверхні?

4. Від чого залежить яскравість поверхні?

5. Поясніть загальний устрій та принцип дії люксметра.

6. Поясніть загальний устрій та принцип дії фотометра.

7. Телевізор дивляться: а) в темній кімнаті; б) в освітленій кімнаті. В якому випадку система зору буде в більшому напружені? Чому?

**Вправа 13.**

1.На висоті 1,8м над горизонтальною поверхнею стола висить лампочка, сила світла якої 150кд. Визначити освітленість столу під лампочкою. Якою стане ця освітленість після того як лампочку опустять на 30см?

2. Світло від лампочки (160кд) падає на фрагмент поверхні стола під кутом 30? та забезпечує освітленість 60лк. На якій відстані від даного фрагменту знаходиться лампочка?

3. Промені Сонця що заходить падають на землю під кутом 85°. У скільки разів освітленість повернутої до Сонця вертикальної стіни, буде більшою за освітленість горизонтальної поверхні землі?

4. Електрична лампочка що знаходиться на відстані 12м від даного фрагменту стіни, створює освітленість 2лк при куті падіння променів 45°. Яка сила світла лампочки?

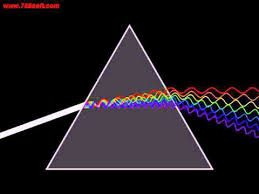
5. Над центром круглого столу радіусом 0,5м, на висоті 1,5м висить лампочка, сила світла якої 200кд. Визначте освітленість столу в його центрі та на краях.

6. На висоті 3м натягнуто канат, на якому на відстані 2м одна від одної висять три лампочки по 200кд. Визначте освітленість поверхні під кожною лампочкою.

7. Відстань від точкового джерела світла силою J, до екрану дорівнює l. Як зміниться освітленість центру екрану, якщо з другої сторони джерела, на відстані l від нього паралельно екрану поставити плоске дзеркало?

## Хвильова

**Хвильова оптика**



## Тема 5.3. Хвильова оптика.

§27. Загальні відомості про хвилі.

§28. Про відчуття кольору та про те, чому навколишній

світ різнобарвний.

§29. Інтерференція світла.

§30. Застосування інтерференції. Інтерферометри.

Просвітлення оптики.

§31. Дифракція світла. Дифракційна решітка.

§32. Поляризація світла.

§33. Дисперсія світла.

§34. Види спектрів. Спектральний аналіз.

§35. Шкала електромагнітних хвиль.

**Тема 5.3.   Хвильова оптика.**

**Хвильова оптика**, це розділ оптики, в якому світло представляють як потік світлових (електромагнітних) хвиль і в якому вивчають та пояснюють ті явища, що підтверджують цей факт.

**§27. Загальні відомості про хвилі.**

Про суть того що називають хвилями, про параметри та властивості хвиль, ми  говорили в процесі вивчення розділу “Механіка”. Тому на разі просто стисло згадаємо раніше вивчений матеріал та доповнимо його загальними відомостями про світло, як потік певних електромагнітних хвиль.

**Хвилею**називають процес розповсюдження збурення матеріального середовища (речовини або поля), який супроводжується переносом енергії, але не супроводжується переносом самого середовища (частинки середовища або параметри поля, лише здійснюють певні гармонічні коливання).

В загальному випадку, хвилі поділяються на механічні та електромагнітні. **Механічними**(або **пружними**) називають такі хвилі, які розповсюджуються в пружному середовищі і які представляють собою взаємопов’язані коливання частинок цього середовища.  До числа механічних хвиль відносяться звукові хвилі, поверхневі хвилі (хвилі на поверхні рідини), сейсмічні хвилі, ударні хвилі вибухів і взагалі будь які пружні хвилі що розповсюджуються в твердих, рідких та газоподібних середовищах.

**Електромагнітними**називають такі хвилі, які розповсюджуються в електромагнітному полі і які представляють собою взаємопов’язані  коливання параметрів цього поля. До числа електромагнітних хвиль відносяться: радіохвилі, видиме світло, інфрачервоне, ультрафіолетове, рентгенівське та гамма випромінювання.

В залежності від того, як коливання частинок середовища (або параметрів поля), орієнтовані відносно напрямку розповсюдження хвилі, хвилі поділяються на поздовжні, поперечні та поздовжньо-поперечні. Наприклад звукові хвилі є поздовжніми, тобто такими, в яких коливання частинок пружного середовища відбуваються вздовж напрямку розповсюдження звуку. Електромагнітні хвилі (в тому числі і світлові) є поперечними, тобто такими, в яких коливання векторів напруженості електричного поля (**Е**) та індуктивності магнітного поля (**В**) відбуваються в площині, що є перпендикулярною (поперечною) до напрямку розповсюдження хвилі.

Основними засобами графічного зображення хвиль є фронт хвилі та хвильовий промінь. **Фронтом хвилі** (хвилевою поверхнею) називають таку умовну лінію (поверхню), в кожній точці якої частинки (мікро фрагменти) хвилі мають однакову фазу коливань, тобто знаходяться на одній і тій же стадії коливального процесу. **Хвильовим променем** (променем) називають таку умовну лінію, яка вказує на напрям розповсюдження хвильового збурення. Хвильовий промінь є перпендикулярним до фронту відповідної хвилі.

На відміну від коливань, хвилі характеризуються подвійною періодичністю. З одного боку, кожна частинка хвилі здійснює певні гармонічні коливання, параметри яких можна охарактеризувати відповідним набором фізичних величин: період коливань (Т), частота коливань (ν), амплітуда коливань (хм), фаза коливань (φ). З іншого боку, взаємопов’язані коливання частинок середовища (параметрів поля) мають певну просторову повторюваність (періодичність). Характеризуючи цю просторову повторюваність говорять про довжину хвилі.

**Довжина хвилі**– це фізична величина, яка характеризує просторову періодичність (повторюваність) хвильового процесу і яка дорівнює тій відстані на яку розповсюджується хвильове збурення за той проміжок часу що дорівнює періоду коливань частинок даної хвилі.

Позначається: λ

Визначальне рівняння: λ = vT , де v – швидкість розповсюдження хвилі

Одиниця вимірювання: [λ] = м   (метр).

Хвилю можна не лише побачити, намалювати чи описати певним набором слів та величин, а й представити у вигляді певної математичної формули. Формула яка описує поведінку тих частинок речовини (тих параметрів поля), взаємопов’язані коливання яких утворюють відповідну хвилю, і яка дозволяє визначати параметри будь якої з цих частинок в будь який момент часу, називається **рівнянням хвилі.** Наприклад, механічну хвилю утворюють взаємопов’язані коливання частинок речовини, поведінка яких описується їх координатою (х). Тому рівнянням механічної хвилі є формула, яка  відображає залежність координати (х) довільно взятої точки хвилі, від часу (t) та тих незмінних величин, які характеризують коливальні рухи частинок хвилі: амплітуда коливань (хм), частота коливань (ν), довжина хвилі (λ). При цьому, в загальному випадку рівняння хвилі має вигляд  х=хмsin2π(νt – l/λ),  де  l – відстань від джерела хвиль до заданої точки.

При взаємодії хвиль з іншими фізичними об’єктами (в тому числі з іншими хвилями) та при їх переході з одного середовища в інше, можуть  відбуватись ті чи інші хвильові явища. До числа найбільш відомих хвильових явищ відносяться: відбивання хвиль, заломлення хвиль, інтерференція хвиль та дифракція хвиль.

**Відбивання хвиль**, це явище, суть якого полягає в тому, що на межі двох різних середовищ, хвильове збурення змінюючи напрям свого розповсюдження, повертається в попереднє середовище і продовжує розповсюджуватись в ньому. Відбивання хвиль відбувається згідно з законом який називається законом відбивання хвиль.

Дослідження показують, що хвилі відбиваються як від більш густого, так і від менш густого середовища. При цьому, відбивання хвиль від більш густого середовища відбувається з втратою напівхвилі, а від менш густого – без втрати напівхвилі. Це означає, що та хвиля яка відбивається від більш густого середовища, після відбивання розповсюджується в протифазі відносно падаючої хвилі. А хвиля відбита від менш густого середовища, розповсюджується в тій же фазі що і падаюча хвиля.

**Заломлення хвиль**, це явище, суть якого полягає в тому, що на межі двох різних середовищ хвильове збурення, проникаючи в нове середовище змінює напрям свого розповсюдження. Змінює тому, що в різних середовищах швидкість хвиль є різною. Заломлення хвиль відбувається згідно з законом який називається законом заломлення хвиль.

Дослідження показують, що в незалежності від того, в якому напрямку відбувається заломлення хвиль, воно відбувається без втрати напівхвилі. Крім цього, потрібно мати на увазі, що в процесі заломлення хвиль, період і частота їх коливань залишаються незмінними, тоді як довжина хвилі змінюється. Наприклад, при переході світлової хвилі з повітря в скло (n=1,52), її довжина в 1,52 рази зменшується, а при зворотньому переході – в 1,52 рази збільшується.

Експериментальні факти вказують на те, що хвилі розповсюджуються незалежно одна від одної. Незалежно в тому сенсі, що при взаємодії (накладанні) різних хвиль, індивідуальні властивості та параметри кожної з них зберігаються. Наприклад, коли грає оркестр, то звуки від кожного його інструменту доходять до слухача такими, ніби грає тільки цей інструмент. Або, наприклад, коли кожна радіостанція, кожна телевізійна станція та кожний мобільний телефон, постійно посилають в навколишній простір свої радіохвилі, то ці хвилі розповсюджуються так, ніби працює лише ця радіостанція, лише цей телеканал, лише цей мобільний телефон.

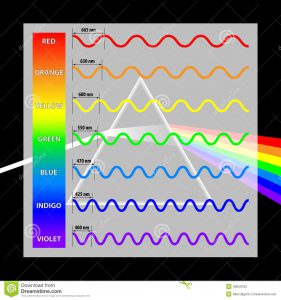
Закон, який констатує факт того, що хвилі розповсюджуються незалежно одна від одної і що їх результуюча дія визначається як сума дій кожної окремої хвилі, називається**принципом суперпозиції хвиль.**

За певних умов (за умови когерентності хвиль), результатом накладання хвиль може бути стійка хвильова картинка в якій підсилення хвиль в одних місцях, чергується з їх послабленням в інших місцях. Цю картинку називають інтерференційною, а відповідне явище – інтерференцією хвиль. **Інтерференція хвиль**, це явище, суть якого полягає в тому, що при накладанні когерентних хвиль, спостерігається стійка хвильова картинка в якій підсилення хвиль в одних місцях, певним чином чергується з їх послабленням в інших місцях. **Когерентними**(узгодженими), називають такі хвилі, які мають однакові параметри періодичності (Т, ν, λ), однакову площину коливань та незмінну різницю фаз.

Характеризуючи здатність хвиль заходити в область геометричної тіні перешкоди, а простіше кажучи – їх здатність огинати перешкоди, говорять про дифракцію хвиль. **Дифракція**, це явище, суть якого полягає в тому, що в процесі свого розповсюдження, хвилі заходять в область геометричної тіні тієї перешкоди що зустрічається на їх шляху (огинають перешкоди). Дифракція хвиль пояснюється тим, що частинки середовища (параметри поля) є взаємопов’язаними і що тому, в процесі розповсюдження хвилі, енергетичне збурення середовища неминуче розповсюджується у всіх можливих напрямках, в тому числі і тих які знаходяться в області геометричної тіні перешкоди. Крім цього, певні прояви дифракції пояснюються взаємодією хвилі з самою перешкодою.

До числа безумовно важливих хвильових явищ, відноситься і ефект Доплера. **Ефект Доплера**, це явище, суть якого полягає в тому, що частотні параметри звукових, електромагнітних та інших хвиль, певним чином залежать від швидкості та напрямку руху як джерела цих хвиль, так і того спостерігача який їх фіксує. Зокрема, при взаємному наближенні джерела хвиль та спостерігача, частота хвиль збільшується, а при їх взаємному віддаленні – зменшується.

Якщо ж говорячи про ті хвилі які є предметом вивчення хвильової оптики і які називають видимим світлом, то про них можна сказати наступне. **Видиме світло** – це потік електромагнітних хвиль, які викликають у людини зорові відчуття і довжини яких знаходяться в межах від 380нм до 760нм. При цьому кожній довжині хвилі видимого світла відповідає певний колір зорових відчуттів людини. Спектр цих кольорів умовно розділяють на сім основних кольорів: червоний, оранжевий, жовтий, зелений, голубий, синій, фіолетовий. Зазвичай, видиме світло є результатом інтенсивного теплового руху заряджених частинок, або тих процесів які відбуваються в енергетично збуджених атомах та молекулах.



Мал.97. Видиме світло – це потік електромагнітних хвиль довжини яких знаходяться в межах від 380нм до 760нм.

Потрібно зауважити, що чутливість людського зору до світлових хвиль гранично малих та гранично великих довжин є мізерно малою. Тому за нормальних умов освітлення, реально видимими є ті хвилі, які знаходяться в межах від 400нм  до 750нм.

**Контрольні запитання**

1.Чим схожі та чим відрізняються механічні і електромагнітні хвилі?

2. Які хвилі називають поздовжніми, а які поперечними?

3. Що називають фронтом хвилі? Хвилевим променем?

4. Що мають на увазі коли говорять про подвійну періодичність хвилі?

5. В чому суть інтерференції хвиль? за яких умов вона відбувається?

6. Які хвилі називаються когерентними?

7. В чому суть дифракції хвиль, та чому вона відбувається?

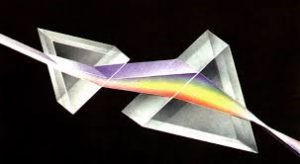
8. В чому суть ефекту Доплера?

9. Результатом яких подій є те, що називають видимим світлом?

**§28. Про наші відчуття кольору та про те, чому навколишній світ                            різнобарвний.**

Навколишній світ дивовижно різнобарвний. Звідки ж береться все розмаїття кольорів? Чому одні предмети червоні, інші – зелені, треті – малинові, а четверті – білі? Як ми бачимо загалом і як відрізняємо одні кольори від інших? Ці та їм подібні запитання хвилювали людей завжди. Однак довгий час загадка світла та його кольорів залишалась тією науковою проблемою яка не мала задовільного вирішення. Перший, а тому найважливіший крок на шляху розв’язання цієї проблеми, зробив видатний англійський фізик Ісаак Ньютон (1643-1727).

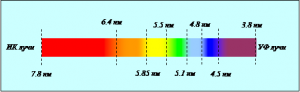
Напевно однією з основних рис геніальності вченого, є здатність помічати в загально відомих явищах їх глибинну суть. Скажімо про те, що існують веселки, що в потоці сонячного світла фактично прозорі мильні бульбашки та діамантові прикраси набувають райдужного забарвлення, знали всі. Однак лише Ньютон зрозумів, що ці та їм подібні факти, вказують на складну структуру білого світла. В 1666 році, прагнучи перевірити дане припущення, Ньютон пропускає вузький пучок сонячного (білого) світла через трикутну призму та з’ясовує, що в процесі проходження через призму, біле світло певним чином розкладається (мал.96а). Результатом цього розкладання є характерна кольорова смужка, яка складається з послідовно розташованих червоного, оранжевого, жовтого, зеленого, голубого, синього та фіолетового кольорів. Цю кольорову смужку Ньютон назвав **спектром сонячного світла**.

Мал.98. Біле світло, це суміш певних спектральних кольорів (І. Ньютон).

Прагнучи переконатись в тому, що отримані кольори дійсно є складовими частинами білого світла, Ньютон вирішує здійснити зворотнє перетворення, тобто перетворення спектральної суміші кольорів в біле світло. З цією метою, на шляху спектру сонячного світла, він ставить ще одну трикутну призму, просторова орієнтація якої є протилежною до тієї що розкладає світло. При цьому Ньютон, не без задоволення з’ясовує, що при змішуванні спектральних кольорів, знову утворюється біле світло (мал.98б).

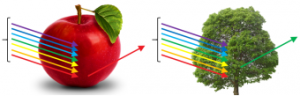
Таким чином, в 1666 році, Ньютон безумовно довів, що біле світло представляє собою певну сукупність червоного, оранжевого, жовтого, зеленого, голубого, синього та фіолетового кольорів. І сьогодні ми знаємо, що кожному з цих кольорів відповідає певний діапазон довжин хвиль. Потрібно зауважити, що поділ неперервного кольорового спектру сонячного світла на сім кольорів, є досить умовним. З не меншим успіхом цей спектр можна було б поділити на п’ять чи скажімо п’ятдесят кольорів. Однак, історично склалося так, що неперервний спектр видимого світла, поділили на сім основних кольорів: червоний, оранжевий, жовтий, зелений, голубий, синій, фіолетовий.



Мал.99. Кожному кольору спектру видимого світла відповідає певний діапазон довжин хвиль.

Зважаючи на факт того, що видиме світло, це певна суміш електромагнітних хвиль, які в залежності від їх довжини, викликають відчуття певного кольору, не важко пояснити, чому тіла бувають різними: білими, чорними, прозорими, не прозорими, зеленими, синіми та взагалі різнобарвними. Дійсно. Переважна більшість оточуючих нас тіл, є такими, що самі по собі не світяться. Ці тіла ми бачимо тільки тому, що вони в тій чи іншій мірі відбивають стороннє світло (непрозорі тіла), або пропускають його (прозорі тіла). При цьому, те що ми бачимо залежить від двох обставин. 1) Від спектрального складу того світла в потоці якого знаходяться навколишні тіла. 2) Від оптичних властивостей самих тіл, тобто від того, хвилі яких кольорів ці тіла відбивають (для непрозорих тіл) або пропускають (для прозорих тіл).

І не важко збагнути, що те тіло яке повністю пропускає всі хвилі видимого (білого) світла, є **безбарвно прозорим**. Те тіло яке повністю відбиває всі хвилі видимого (білого) світла є **білим**. Те  тіло яке повністю поглинає всі хвилі видимого світла є **чорним**. Якщо ж певну складову білого світла тіло відбиває (або пропускає), а певну – поглинає, то таке тіло є кольоровим. Скажімо, якщо тіло відбиває або пропускає червону складову білого світла, а решту складових поглинає, то таке тіло є червоним.

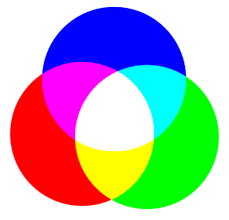
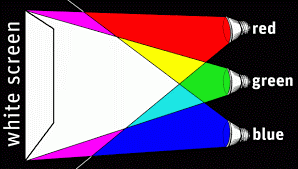


Мал.100. Предмет червоного кольору відбиває лише червону складову білого світла і тому ми бачимо цей предмет червоним.

Втім, видимий колір тіла залежить не лише від його власного кольору, а й від спектрального складу того світла в потоці якого це тіло знаходиться. Наприклад, якщо червоне тіло освітлювати світлом синього кольору, то воно буде чорним. І це закономірно. Адже червоне тіло є червоним тому, що відбиває (пропускає) хвилі червоного світла, а всі інші хвилі, в тому числі і сині, – поглинає. Тому, перебуваючи в потоці синіх хвиль, червоне тіло ці хвилі повністю поглинає, а отже виглядає як чорне.

Однак, потрібно мати на увазі, що більшість кольорових тіл відбивають (пропускають) хвилі не одного кольору, а певної сукупності сусідніх кольорів. Скажімо те тіло яке має жовтий колір, скоріш за все відбиває (а для прозорого тіла – пропускає) не лише хвилі жовтого кольору, а й хвилі сусідніх кольорів – зеленого та оранжевого. Більше того, це тіло взагалі може відбивати (пропускати) лише оранжеві та зелені кольори і виглядати при цьому бездоганно жовтим.

Вагомий внесок в справу пізнання суті того яким чином ми бачимо світ різнобарвним, зробив ще один англійський фізик Томас Юнг (1773-1829). В 1807 році, Юнг з’ясував, що все різноманіття кольорів можна отримати шляхом певних комбінацій трьох базових кольорів: червоного, зеленого та синього. В цьому не важко переконатись, якщо на білий екран направити однаково потужні світлові потоки червоного, зеленого та синього кольорів (мал.101). Провівши відповідний експеримент, ви неодмінно з’ясуєте, що в тому місці де всі три базові кольори накладаються, утворюється білий колір. Де накладаються червоний та синій кольори, утворюється малиновий. Де червоний та зелений – жовтий. А де синій та зелений – голубий. Якщо ж світлову інтенсивність базових кольорів змінювати, то можна отримати практично будь який кольоровий відтінок.

Мал.101. Все різноманіття світлових кольорів, можна отримати шляхом змішування червоного, синього та зеленого світла (Т. Юнг).

Потрібно зауважити, що ми говоримо не про змішування кольорових фарб, а про змішування відповідних світлових потоків, тобто електромагнітних хвиль різних довжин. Адже якщо ви змішаєте червону, зелену та синю фарби, то скоріш за все, отримаєте фарбу чорного кольору з “сіро-буро-малиновим” відтінком.

Тепер, коли ви знаєте, що біле світло, це певна суміш різних світлових кольорів і що все кольорове розмаїття можна отримати шляхом змішування червоного, зеленого та синього світла, не важко пояснити механізм нашої кольорово чутливості. А в загальних рисах цей механізм полягає в наступному.

Відомо, що сітківка ока складається з величезної кількості світлочетливих рецепторів, які прийнято називати паличками та колбочками. Відомо, що палички практично не розрізняють кольорів і що наше сприйняття кольору забезпечується тими рецепторами які називаються колбочками. При цьому дослідження показують, що в сітківці ока є три різновидності колбочок: червоночутливі, зеленочутливі та синьочутливі. Коли кольорове зображення предмету сфокусовано на сітківці ока, то відповідні кольорочутливі колбочки збуджуються. Це біоелектричне збудження, через клітини зорового нерву, передається до відповідних центрів кори головного мозку, де власне і формується відповідне зорове відчуття.

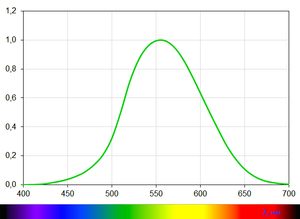
Доречно зауважити, що практично всі кольорочутливі рецептори ока (колбочки) зосереджені в районі так званої жовтої плями, тобто в тому центральному місці сітківки, куди проектується зображення того предмету на якому зосереджено наш погляд. По суті це означає, що кольоровим є лише центральний зір людини, тоді як зір переферійний є переважно чорно-білим. Крім цього, потрібно мати на увазі, що колбочки мають відносно низьку світлочутливість і тому спрацьовують лише в умовах достатньо високої освітленості. Власне тому, в сутінках наш зір стає чорно-білим.

Говорячи про наше сприйняття кольору, буде не зайвим сказати і про те, що кольорова картинка, сприйматиметься кольоровою лише в тому випадку, якщо зображення її окремих різнобарвних фрагментів потраплятимуть на різні світлочутливі рецептори сітківки ока (мал.102). Адже якщо наприклад, зображення від червоного, жовтого та синього фрагментів картинки, потраплятимуть на один і тойже світлочутливий рецептор, то він зафіксує усереднену дію відповідних кольорів, тобто світло білого кольору. Крім цього, потрібно мати на увазі, що певні кольори будуть створювати відповідні кольорові враження лише в тому випадку, якщо тривалість їх зорового сприйняття буде достатньо великою. Адже якщо наприклад, червона, зелена та синя картинки будуть змінювати одна одну достатньо швидко, то зір людини зафіксує усереднену дію відповідних кольорів, якою буде картинка білого кольору.

Мал.102. Якщо різні кольори потрапляють на різні рецептори сітківки ока, то зір людини фіксує ці кольори. А якщо ті ж кольори потрапляють на один і той же рецептор, то зір людини фіксує певний усереднений результат.

Дослідження показують, що чутливість людського зору до світла різних кольорів (різних довжин хвиль), є суттєво різною. Різною в тому сенісі, що оцінюючи яскравість однакових за енергетичною потужністю червоної, оранжевої, жовтої, зеленої, голубої, синьої та фіолетової лампочок, спостерігач з нормальним зором неодмінно скаже, що жовта та зелена лампочки є найяскравітоми, а червона та синьо-фіолетова – найтмянішими.

Зазвичай, чутливість зору до світла тих чи інших кольорів, кількісно оцінюють величиною, яка називається **коефіцієнтом спектральної чутливості ока** (позначається kλ). Ця безрозмірна величина дорівнює відношенню чутливості ока до випромінювання з даною довжиною хвилі, до його максимально можливої чутливості. А цією максимально можливою чутливістю, є чутливість до випромінювання з довжиною хвилі 555нм. Числове значення коефіцієнту спектральної чутливості ока, визначається експериментально та записується у відповідну таблицю, або представляється у вигляді відповідного графіку. Графік залежністі чутливості людського зору до світла різних кольорів називають **кривою спектральної чутливості світлоадаптованого ока**. Загальний вигляд цієї кривої представлено на мал.103.



Мал.103.  Загальний вигляд кривої спектральної чутливості світоадаптованого ока.

Застосовоючи дані кривої спектральної чутливості та табличні значення коефіцієнту спектральної чутливості, не варто забувати про те, що мова йде про певну усереднену характеристику людського зору. І що відповідні параметри зору конкретної людини, можуть суттєво відрізнятись від усередненої величини. Крім цього, потрібно мати на увазі, що спектральна чутливість ока залежить не лише від індивідуальних особливостей зору конкретної людини, а й від інтенсивності самого випромінювання.

Загалом же, варто памятати, що наші відчуття кольору, смаку, звуку, дотику, тощо, в значній мірі індивідуальні. І в цьому сенсі, надмірний педантизм тих медиків які вимірюють якість нашого сприйняття кольору, часто густо не витримує науково обгрунтованої критики.

Якщо ж говорити про дефекти наших кольоровідчуттів, то вони дійсно існують. Зазвичай, ці дефекти позначають терміном **дальтонізм.** І потрібно сказа, що дальтоніками часто та абсолютно не обгрунтовано називають всіх тих людей, індивідуальне сприйняття кольору яких, суттєво відрізняється від загально прийнятих норм. При цьому хибно вважається, що дальтоніки бачать навколишній світ чорно білим. Насправді ж в переважній більшості випадків, мова йде про людей, в яких порушена нормальна робота лише однієї (рідше двох) різновидностей рецепторів кольору. А це означає, що відповідні люди бачать навколишній світ не червоно-зелено-синім, а червоно-зеленим, або червоно-синім, або зелено-синім. До речі, дослідження показують, що майже всю палітру кольорів можна отримати за допомогою певної комбінації лише двох кольорів, зокрема червоного та синього. А це означає, що спектр тих кольорів які бачить людина з двокольоровим зором, якщо і відрізняється від загально прийнятих норм, то зовсім не настільки, щоб вважати ці відмінності суттєвими. А тим більше такими, які накладають певні обмеження на професю, скажімо на професію водія.

Зважаючи на вище сказане, доречно говорити не про дальтонізм, а про трикольоровий (нормальний), двокольоровий, однокольоровий та некольоровий зір. Це тим більш доречно, зважаючи на факт того, що дальтонізм це не хвороба, а дефект зору. Дефект малоприємний, але не більш малоприємний за далекозорість, короткозорість чи астегматизм. Проблема лише в тому, що на сьогоднішній день, той дефект зору який прийнято називати дальтонізмом, ми не вміємо виправляти.

**Контрольні запитання.**

1.Поясніть, чому тіла бувають червоними, зеленими, білими та чорними?

2. Який внесок в розвиток наших уявлень про кольри зробив Т. Юнг?

3. Якого кольру буде синя фарба в потоці червоного світла?

4. Відомо, що при змішуванні однакової кількості червоного та синього світла, утворюється біле світло. Чому ж при змішуванні аналогічних фарб, утворюється фарба чорного кольору?

5. Опишіть механізм наших кольоровідчуттів.

6. Поясніть, чому в сутінках, наш зір стає чорно-білим?

7. Відображенням яких фактів є крива спектральної чутливості ока?

8. Поясніть суть того дефекту зору, який прийнято називати дальтонізмом? Чи є цей дефект таким, при якому людина не розрізняє кольорів?

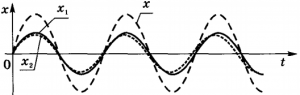
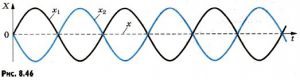
**§29. Інтерференція світла.**

Експериментальні факти вказують на те, що хвилі розповсюджуються незалежно одна від одної. Незалежно в тому сенсі, що при взаємодії (накладанні) різних хвиль, індивідуальні властивості та параметри кожної з них зберігаються. Наприклад, кинувши на гладеньку поверхню води два камінці та спостерігаючи за поведінкою ними створених хвиль, ви неодмінно з’ясуєте, що пройшовши одна крізь одну, кожна з хвиль веде себе так, ніби іншої хвилі й не існувало. Або, скажімо, коли грає оркестр, то звуки від кожного його інструменту доходять до слухача такими, ніби грає тільки цей інструмент. Або, наприклад, коли кожна радіостанція, кожна телевізійна станція та кожний мобільний телефон, постійно посилають в навколишній простір свої радіохвилі, то ці хвилі розповсюджуються так, ніби працює лише ця радіостанція, лише цей телеканал, лише цей мобільний телефон.

Звичайно, вище сказане не означає, що та поверхня води на якій розповсюджується одна хвиля, знаходиться в тому ж стані що і поверхня води на якій розповсюджуються дві, чи скажімо сто хвиль. Просто ця поведінка буде визначатися результуючою силових впливів всіх окремо взятих хвиль. При цьому, оскільки хвилі розповсюджуються незалежно одна від одної, то знаючи параметри кожної окремо взятої хвилі, можна визначити хвильову ситуацію в будь якій точці простору і в будь який момент часу. Наприклад, якщо в даній точці простору, в даний момент часу сходяться дві хвилі, одна з яких намагається підняти фрагмент поверхні на 2см, а друга – прагне опустити цей фрагмент на 2см, то результатом дії цих хвиль буде те, що відповідний фрагмент поверхні у відповідний момент часу буде знаходитись в нульовому положенні.

Закон, який констатує факт того, що хвилі розповсюджуються незалежно одна від одної і що їх результуюча дія визначається як сума дій кожної окремої хвилі, називається принципом суперпозиції хвиль. **Принцип суперпозиції хвиль**, це закон в якому стверджується: **хвилі розповсюджуються незалежно одна від одної, тобто таким чином що при їх взаємодії, індивідуальні властивості та параметри кожної хвилі зберігаються. При цьому, результуюча дія системи багатьох хвиль, визначається як сума відповідних дій кожної окремої хвилі.**

Застосовуючи принцип суперпозиції можна пояснити багато хвильових явищ, зокрема те, яке прийнято називати інтерференцією хвиль (від лат. inter – взаємно, та ferio – вдаряти). З’ясовуючи суть цього явища, розглянемо декілька простих ситуацій. Припустимо, що в даному місці простору, сходяться і накладаються дві хвилі однакової довжини і однакової амплітуди коливань. Не важко збагнути, що амплітудні параметри результуючої хвилі, будуть залежати від того наскільки співпадатимуть фази коливань тих хвиль які накладаються. Дійсно, якщо ці фази повністю співпадають (різниця фаз дорівнює нулю Δφ=0), то згідно з принципом суперпозиції, результатом накладання хвиль буде хвиля з практично вдвічі більшою амплітудою коливань (мал.104а). Якщо ж фази коливань набігаючих одна на одну хвиль є взаємно протилежними (різниця фаз є еквівалентною половині періоду коливань, тобто Δφ=π), то результатом накладання хвиль, буде хвиля з практично нулевою амплітудою коливань (мал.104б). Якщо ж різниця фаз матиме певне проміжне значення (0<Δφ<π), то і амплітуда результуючої хвилі матиме відповідну проміжну величину.

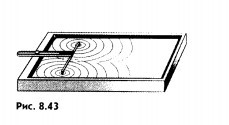
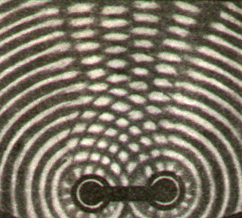
Мал.104. В процесі накладання, хвилі однакової періодичності можуть як підсилюватись так і послаблюватись.

Таким чином, в процесі накладання, хвилі однакової періодичності, можуть стійким чином як підсилюватись так і послаблюватись. При цьому, величина відповідного підсилення чи послаблення, визначальним чином залежить від тієї різниці фаз, що існує між коливаннями базових хвиль. Зауважимо, що говорити про стійке підсилення чи послаблення хвиль, можна лише в тому випадку, якщо параметри періодичності відповідних хвиль (Т, ν, λ) є однаковими, або майже однаковими. Адже якщо накладатимуться хвилі суттєво різних довжин, то результатом такого накладання буде хвиля, амплітудні параметри якої в будь якій точці будуть постійно змінюватись.

Дослідження показують, що на практиці, прогнозовано стійке підсилення хвиль в одних місцях та їх послаблення в інших, спостерігається  лише в тому випадку коли накладаються так звані **когерентні хвилі**(від лат. cohaerens – взаємопов’язані, узгоджені). **Когерентними**(узгодженими), називають такі хвилі, які мають однакові параметри періодичності (Т, ν, λ), однакову площину коливань та незмінну різницю фаз. Наприклад, якщо на поверхню води безладним чином падають камінці, то створювані ними хвилі не є когерентними. Адже параметри цих хвиль, зокрема фази їх коливань, не є такими що узгоджені між собою. Якщо ж ці камінці є елементами єдиного механізму, який періодично та одночасно занурює їх у воду, то створювані ними хвилі будуть когерентними.

Характерною особливістю когерентних хвиль є те, що при їх накладанні, можна спостерігати стійку хвильову картинку, в якій підсилення хвиль в одних місцях, певним чином чергується з їх послабленням в інших. Цю картинку називають інтерференційною. А явище, проявом якого є інтерференційна картинка називають інтерференцією хвиль. **Інтерференція хвиль**, це явище, суть якого полягає в тому, що при накладанні когерентних хвиль, спостерігається стійка хвильова картинка в якій підсилення хвиль в одних місцях, певним чином чергується з їх послабленням в інших місцях.

Наочні уявлення про інтерференцію поверхневих хвиль, можна отримати за допомогою приладу, схема якого представлена на мал.105. В цьому приладі, періодичні коливання двох жорстко з’єднаних кульок створюють когерентні хвилі, які в процесі інтерференції створюють певну інтерференційну картинку.

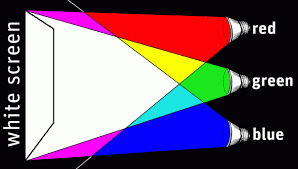
   

Мал.105. Прилад для демонстрації інтерференції поверхневих хвиль, та загальний вигляд відповідної інтерференційної картинки.

Інтерференція відноситься до числа тих базових явищ, які безумовно вказують на хвильову природу того об’єкту, який створює відповідну інтерференційну картинку. Тому, коли ми стверджуємо що світло це потік електромагнітних хвиль, то це автоматично означає, що за певних умов ці хвилі мають створювати відповідну інтерференційну картинку. А оскільки видиме світло, це суміш різних хвиль, кожній з довжин яких відповідає певний колір зорових відчуттів, то логічно передбачити, що світлова інтерференційна картинка має бути кольоровою. Кольоровою тому, що в різних точках простору мають підсилюватись хвилі різних довжин, а отже і різних кольорів.

Ви можете запитати, якщо при накладанні світлових хвиль має утворюватись певна кольорова картинка, то чому ж оточуючі нас тіла не переливаються всіма барвами веселки. Адже ці тіла зазвичай знаходяться в потоках різних світлових хвиль, які накладаються одна на одну, і які в одних місцях мали б підсилювстись, а в інших – послаблюватись. Причина такого стану речей полягає в тому, що для утворення стійкої інтерференційної картинки потрібні не просто хвилі, а хвилі когерентні, тобто певним чином узгоджені між собою. І ця узгодженість має бути достатньо тривалою. У всякому разі достатньою для того, щоб система зору людини змогла зафіксувати відповідну картинку.

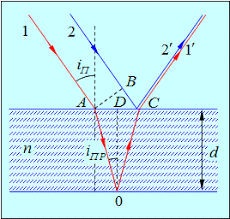
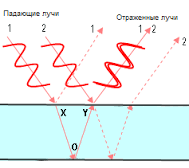
Дослідження ж показують, що звичайні джерела світла (Сонце, зірки, свічки, лампочки розжарювання, лампочки денного світла, тощо), практично ніколи не створюють когерентних хвиль. Не створюють тому, що в цих джерелах, світло є результатом або інтенсивного теплового, а отже хаотичного, руху заряджених частинок речовини, або ж тих абсолютно не узгоджених процесів, які відбуваються в енергетично збуджених атомах речомини. А це означає, що кожне з звичайних джерел світла, створює свою систему хвиль, і ці системи хвиль жодним чином не узгоджені між собою. Такі хвилі якщо й інтерферують то лише таким чином, що створювані ними кольорові картинки змінюються так швидко (мільйони разів за секунду), що система зору людини не встигає зафіксувати будь яку з них. Власне те, що ми сприймаємо як біле (безбарвне) світло, це результат інтерференції (накладання) не узгоджених (не когерентних) хвиль різних довжин.



Мал.106. Біле світло, це результат інтерференції (накладання) не крогерентних електромагнітних хвиль, довжини яких знаходяться в межах від 380нм до 760нм.

Найпростіший спосіб створення стійкої інтерференційної картинки полягає в тому, щоб змусити інтерферувати (накладатись) ті хвилі які створюються одним і тим же джерелом. Адже такі хвилі є безумовно когерентними. Проблема лише в тому, що хвилі від будь якого джерела світла поступово розходяться і тому не накладаються одна на одну, а отже і не інтерферують між собою. Втім, за певних умов таке інтерферування стає можливим. Прикладом таких умов є тонкі напівпрозорі плівки, наприклад такі, як мильні бульбашки.

Напевно всі ви бачили, як в потоці сонячного чи іншого подібного світла, мильні бульбашки переливаються всіма барвами веселки? Пояснюючи походження цього кольорового забарвлення, розглянемо наступну ситуацію. Припустимо, що на поверхню тонкої, напівпрозорої плівки падає потік паралельних променів видимого світла, складовими якого є промені 1; 2, і якому відповідає хвильовий фронт АВ (мал.107а). У відповідності з законами геометричної оптика, промінь 1 в точці А частково відбивається (промінь1‘), а частково заломлюється, тобто проникає в нове середовище. При цьому, заломлена частина променя, відбиваючись від внутрішньої поверхні плівка та повторно заломлюючись в точці С, повертається до попереднього середовища (промінь 1“). Таким чином, відбиваючись від зовнішньої та внутрішньої поверхонь тонкої плівки, заданий хвильовий промінь 1, розкладається на дві когерентні складові 1’ та 1”. Ясно, що в точці С, сусідній промінь 2, аналогічним чином також розкладеться на дві когерентні складові 2’ та 2“. При цьому точка С стає джерелом двох когерентних хвильових променів (1” та 2’), які накладаються та інтерферують між собою. А оскільки видиме світло, це потік хвиль різної довжини, то в залежності від товщини плівки, в точці С одні хвилі будуть підсилюватись (мал.107б), а інші – послаблюватись (мал.107в). По суті це означає, що точка С матиме певне світлове забарвлення.

Мал.107.  Відбиваючись від зовнішньої та внутрішньої поверхонь тонкої плівки, кожен світловий промінь розкладається на дві когерентні складові, які інтерферуючи між собою створюють відповідну кольрову картинку.

З’ясовуючи ті кількісні співвідношення які визначають параметри тих хвиль що інтерференційно підсилюються в точці С, можна сказати наступне. Факт того, що біле світло представляє собою потік електромагнітних хвиль різних довжин, по суті означає, що точка С є джерелом когерентних хвиль всіх цих довжин. При цьому, в точці С підсиляться лише ті хвилі, для яких виконується умова підсилення. А ця умова полягає в тому, що різниця фаз між відповідними когерентними хвилями має бути нульовою (Δφ=0). По суті це означає, що на тому відрізку який називається оптичною різницею ходу променів (δ=|АО+ОС|-|ВС|) має розміститись ціле число довжин хвиль. Іншими словами, умову підсилення хвиль в точці С можна записати у вигляді δ=kλ, де k – ціле число.

Визначаючи різницю ходу між інтерферуючими хвилями, потрібно враховувати декілька обставин. По перше, факт того, що довжина хвилі (λ) в будь якому відмінному від вакууму середовищі, в n раз менша за її довжину в вакуумі (λ0): λ=λ0/n, де n – абсолютний показник заломлення світла даного середовища. По друге, факт того, що відбивання хвиль від оптично більш густого середовища відбуваються з втратою напівхвилі, що еквівалентно додатковому оптичному шляху довжиною λ/2. Зважаючи на ці обставини, можна стверджувати, що для зображеної на мал.90а ситуації, оптична різниця ходу променів 1” та 2’ становить δ=(АО+ОС)n − ВС+λ/2. При цьому можна довести, що дане співвідношення можна представити у більш загальному вигляді: δ=2d(n2-sin2α)1/2+λ/2, де d – товщина плівка; n – показник її заломлення;  α – кут падіння променів; λ – довжина заданої хвилі.

Таким чином, в залежності від товщини плівки (d), показника її заломлення (n) та кута падіння променів (α), в точці С підсилюються ті хвилі, довжина яких відповідає співвідношенню kλ=2d(n2-sin2α)1/2+λ/2, або kλ-λ/2=2d(n2-sin2α)1/2, або λ=2d(n2-sin2α)/(k-1/2).

Ясно, що вище описані події будуть відбуватись в кожній точці повершневого шару плівки. При цьому, зважаючи на факт того, що в загальному випадку товщина різних фрагментів плівки та кут падіння променів на них, можуть бути суттєво різними, відповідно різними будуть і світлові забарвлення цих фрагментів. Можна довести, що в тому випадку, якщо поверхня плівки плоска, а її товщина плавно змінна, створювана плівкою інтерференційна картинка, представлятиме собою певний набір спектральних смужок (мал.108а). Якщо ж поверхня плівки сильно викривлена, а її товщина довільно змінна (як наприклад в мильній бульбашці), то відповідна інтерференційна картинка буде розмитою та довільно змінною (мал106б).

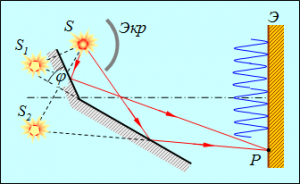
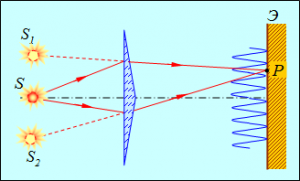
   

Мал.108.  Інтерференційна картинка яку створює а) плоска плівка змінної товщини; б) куляста плівка.

Дослідження показують, що по мірі збільшення товщини плівки, яскравість створюваних нею інтерференційних смужок, поступово згасає, а їх ширина – зменшується. При цьому, за певної товщини плівки, ці смужки стають такими тмяними, вузькими та близько розташованими, що зір людини перестає їх розрізняти. А це означає, що неозброєним оком інтерференцію світла на напівпрозорих плівках, можна спостерігати лише в певному діапазоні товщин цих плівок. Скажімо для білого світла, ці товщина не мають суттєво перевищувати 0,01мм. Якщо ж плівку освітлювати **монохроматичним** (однокольоровим) світлом, то інтерференційну картинку можна спостергати і при значно більших товщинах (до 0,5мм).

Інтерференційні картинки створюють не лише за допомогою тонких напівпрозорих плівок, а й з застосуванням спеціальних оптичних приладів. Найпоширенішими серед них є спеціальні дзеркала, біпризми (а по суті надтонкі збиральні лінзи) та дифракційні решітки (мал.109). Принцип дії дзеркал та біпризм очевидно простий. Частини того світлового потоку, який створюється точковим джерелом світла S, в процесі відбивання (для дзеркал) або заломлення (для біпризм) змінюють напрям свого розповсюдження таким чином, що накладаючись одна на обну інтершерують між собою. А оскільки ці частини є складовими одного і того ж світла, то вони є безумовно когерентними, а отже такими, що утворюють кольорову інтерференційну картинку.

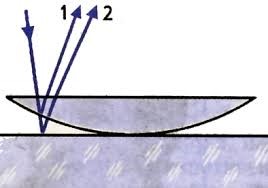
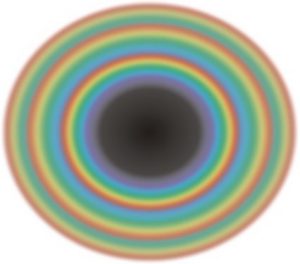
Якщо ж говорити про той прилад який називається дифракційною решіткою, то про це ми поговоримо в одному з наступних параграфів.

Мал.109. Інтерференційні картинки штучно створюють за допомогою спеціальних біпризм, дзеркал та дифракційних решіток.

Потрібно зауважити, що для здійснення вище описаних експериментів потрібні не просто дзеркала і не просто біпризми, а спеціальні дзеркала і спеціальні біпризми. Ця спеціальність полягає в тому, що у відповідних дзеркалах та біпризмах, кутове відхилення робочих поверхонь має бути надзвичайно малим (φ < 1°).

Перші наукові дослідження інтерференції світла були здійснені в 1675 році. В цьому році, Ньютон звернув увагу на те, що в місці контакту опуклої, плоско сферичної, довгофокусної лінзи, з плоскою склянною поверхнею, виникає система кольорових кілець (мал.110). Як відомо, Ньютон не безпідставно був прихильником корпускулярної теорії світла і тому не зміг правильно пояснити дане явище. Це зробив в 1801році Томас Юнг. Суть його поясненнь полягає в наступному. Світлові хвилі відбиваючись від внутрішньої сферичної поверхні лінзи та плоскої поверхні скла, розкладаються на когерентні складові, які інтерферують між собою. Результатом цієї інтерференції є певний набір кольорових кілець (кілець Ньютона), параметри яких певним чином відображають відстань між двома склянними поверхнями в тому місці де формуються відповідне кільце.

Мал.110. Відбиваючись від різних поверхонь, світлові хвилі розкладаються на когерентні складові, які в процесі інтерференції утворюють систему різнобарвних кілець (кілець Ньютона).

На завершення додамо. Коли ми стверджуємо, що звичайні джерела світла практично ніколи не створюють когерентних хвиль, то фактично натякали на те, що мають існувати певні незвичайні джерела світла, які здатні створювати когерентні хвилі. І такі джерела дійсно існують. Їх називають **оптичними квантовими генераторами** або **лазерами**. Втім, про будову та принцип дії цих незвичайних джерел світла, ми поговоримо дещо пізніше.

**Словник фізичних термінів.**

**Принцип суперпозиції хвиль**, це закон в якому стверджується: хвилі розповсюджуються незалежно одна від одної, тобто таким чином що при їх взаємодії, індивідуальні властивості та параметри кожної хвилі зберігаються. При цьому, результуюча дія системи багатьох хвиль, визначається як сума відповідних дій кожної окремої хвилі.

**Інтерференція хвиль** – це явище, суть якого полягає в тому, що при накладанні когерентних хвиль, спостерігається стійка хвильова картинка в якій підсилення хвиль в одних місцях, певним чином чергується з їх послабленням в інших місцях.

**Когерентними** (узгодженими) називають такі хвилі, які мають однакові параметри періодичності (Т, ν, λ), однакову площину коливань та незмінну різницю фаз.

**Монохроматичним** (від грец. monos – один та chroma – колір) називають таке світло, яке складається з електромагнітних хвиль певної, строго визначеної довжини хвилі (певного кольору).

**Контрольні запитання**

1.За якої умови хвилі однакової періодичності підсилюються?

2. Наведіть приклад механічної моделі джерела когерентних та некогерентних хвиль.

3. Чому ті світлові потоки які створюються двома абсолютно однаковими лампочками розжарювання при накладанні не створюють інтерференційну картинку?

4.Яким чином створюють потоки інтерферуючих когерентних хвиль?

5.Від чого залежить колір інтерференційного забарвлення певного фрагменту тонкої напівпрозорої плівки?

6.Чому біле світло створює кольорову інтерференційну картинку?

7. Чому Ньютон не зміг правильно пояснити причину появи відкритих ним інтерференційних кілець?

**Вправа 14.**

1.В дану точку простору приходять когерентні хвилі з різницею ходу 2,0мкм. Підсиляться чи послабляться ці хвилі, якщо їх довжина 760нм; 600нм; 400нм?

2. В певну точку простору приходять когерентні хвилі, довжина яких в вакуумі 600нм, а різниця ходу 1,2мкм. Що відбуватиметься в даній точці при розповсюджені хвиль в повітрі; в воді; в склі?

3. В даній точці, дві когерентні хвилі взаємно гасяться. Що відбувається з енергією цих хвиль?

4. Відстань на екрані (мал. задача 4) між двома інтерференційними максимумами становить 1,2мм. Визначити довжину хвилі того світла яке випромінюють когерентні джерела S1 i S2, якщо S1S2=1мм; СО=4м.

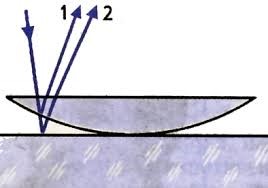
5. Як змінюватиметься інтерференційна картинка на екрані (мал. задача 4) якщо: а) не змінюючи відстань між джерелами світла, віддаляти їх від екрану; б) не змінюючи відстань до екрану, наближати джерела світла; в) джерела випромінюватимуть світло з меншою довжиною хвилі?

**§30. Застосування інтерференції. Інтерферометри. Просвітлення оптики.**

Інтерференція світла не лише забезпечує веселкове забарвлення мильних бульбашок та масляно-бензинових плям, а й корисно застосовується в приладах які називаються інтерферометрами. **Інтерферометр** це прилад, який з надзвичайно високою точністю вимірює довжину і принцип дії якого базується на кількісному аналізі тієї інтерференційної картинки яка певним чином пов’язана з предметом вимірювань.

По суті, першим штучно створеним інтерферометром була та оптична система яка створювала інтерференційну картинку під назвою кільця Ньютона. Це означає, що на основі кількісного аналізу цієї інтерференційної картинки та певних вимірювань, можна визначити низку тих величин, які так чи інакше причетні до створення цієї картинки. Зокрема визначити довжини тих електромагнітних хвиль які називаються видимим світлом; визначати відстань між тими поверхнями які приймають участь в створенні відповідної інтерференційної картинки; визначати параметри наявних на поверхнях мікродефектів, тощо.

Дійсно. Припустимо, що плоско-опукла лінза достатньо великого радіусу кривизни, в точці О контактує з плоскою, оптично рівною поверхнею (мал.111). Припустимо, що на цю оптичну систему падає вертикальний потік монахроматичного світла. Це світло частково відбивається від внутрішньої поверхні лінзи, а частково – від тієї поверхні на яку ця лінза спирається. А це означає, що в даній системі базовий промінь розкадається на дві когерентні складові 1 і 2, які інтерферуючи між собою можуть як підсилюватись так і послаблюватись. При цьому, умова інтерференційного підсилення хвиль полягає в тому, що на тій відстані яка називається різницею оптичного ходу променя (δ) має поміститись ціле число довжин хвиль. Іншими словами, підсилення хвиль довжини λ, відбуватиметься в тих точках для яких виконується умова δ=kλ, де δ – різниця оптичного ходу інтерферуючих хвиль, k – ціле число, величина якого дорівнює порядковому номеру інтерференційного кільця.

Мал.111. Інтерференційний метод визначення довжини, по суті зводиться до підрахунку кількості тих інтерференційних максимумів (кілець, смужок, ліній, тощо), які утворюються на відповідному відрізку.

З іншого боку, зважаючи на те, що кут падіння променя близький до нуля (α≈0º), можна стверджувати, що різниця оптичного ходу променів становить δ=2d+λ/2, де d – виміряна в точці підсилення хвиль відстань між заокругленою поверхнею лінзи та тією площиною на яку ця лінза спирається; доданок λ/2 вказує на те, що на межі повітря – плоска поверхня, відбивання світлових хвиль відбувається з втратою напівхвилі.

Таким чином, з одного боку δ=kλ, а з іншого δ=2d+λ/2. Звідси випливає, що 2d+λ/2=kλ, або d=λ(k-1/2)/2. А це означає, що знаючи довжину хвилі (λ) того світла яке підсилюється в тій чи іншій точці інтерференційної картинки, та визначивши порядковий номер (k) відповідного інтерференційного кільця, можна визначити відстань між даними поверхнями в будь якій точці: d=λ(k-1/2)/2. При цьому визначити з надзвичайно великою точністю. Скажімо, якщо дану інтерференційну картинку створює монохроматичне світло з довжиною хвилі λ=600нм, то це оначає, що по периметру першого інтерференційного кільця, величина зазору становить d1=150нм; по периметру другого кільця  d2=450нм, третього –  d3=750нм і т.д.

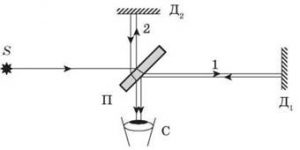
Сучасні інтерферометри характеризуються надзвичайним різноманіттям науково-технічних рішень. Однак, в незалежності від конструктивних особливостей того чи іншого інтерферометра, суть інтерференційного методу визначення довжини зводиться до підрахунку кількості тих інтерференційних максимумів (кілець, смужок, ліній, тощо), які утворюються на відповідному відрізку. Це певним чином нагадує технологію визначення віку дерев: порахувавши кількість річних кілець на поперечному зрізі відповідного дерева, ми точно визначаємо його вік.

Надважливою особливістю інтерференційних методів вимірювання довжини є надзвичайно велика точність вимірювань. Адже ці методи дозволяють вимірювати довжини об”єктів з точністю вимірювання довжини світлової хвилі. А на сьогоднішній день ця точність становить соті частини нанометра. По суті це означає, що сучасні оптичні інтерферометри дозволяють вимірювати довжину з точністю 0,01нм=0,000.000.01мм, а це в сотні тисяч разів перевищує точність найточніших механічних засобів вимірювань. Для порівняння: точність лінійки 1мм, точність штангенциркуля 0,1мм, а точність механічного мікрометра 0,01мм. І відтепер ви розумієте, чому довжину еталонного метра визначать таким, на перший погляд дивним чином: метр, це довжина рівна 1650763,73 довжин хвиль того випромінювання яке відповідає переходу між рівнями 2р10 та 5d5 атома крептону 86.

Загалом, інтерференційні картинки є носіями величезної кількості інформації про ті об’єкти, які так чи інакше причетні до їх створення. На основі аналізу цих картинок можна не лише визначати довжини електромагнітних хвиль та ті чи інші відстані, а й геометричні параметри поверхонь, їх сируктуру, наявність мікродефектів, та навіть їх хімічний склад. Аналізуючи інтерференційні картинки визначають параметри руху різноманітних об’єктів, показники заломлення світла, кутові розміри зірок, тощо. Ситуація певною мірою аналогічна тому, як за аналізом структури річних кілець дерева, визначають не лише його вік, а й загальні кліматичні параметри кожного року його життя, тенденції кліматичних змін, наявність чи відсутність певних конкретних подій як то лісових пожеж, вивержень вулканів, тощо.

В залежності від тих завдань які вирішує той чи інший прилад, та від способу отримання когерентних хвиль, існує велике різноманіття сучасних інтерферометрів. Однак, в історії науки особливе місце належить інтерферометру, який в 80-х роках дев’ятнадцятого століття створив американський фізик Альберт Майкельсон (1852-1931). Про ту важливу роль яку зіграв інтерферометр Майкельсона в історії науки, ми поговоримо дещо пізніше. Наразі ж, розгянемо будову та принцип дії цього важливого приладу.

Основними елементами інтерферометра Майкельсона (мал.112) є джерело монохроматичного світла (S), напівпрозора склянна пластина (П),  система двох взаємно перпендикулярних дзеркал (Д1; Д2) та екран (спостерігач С).



Мал.112.  Схема принципового устрою інтерферометра Майкельсона.

Принцип дії інтерферометра Майкельсона полягає в наступному. Від джерела монохроматичного випромінювання S, направлений світловий потік потрапляє на разташовану під кутом 45° напівпрозору склянну пластину П, яка ділить цей потік на дві когерентні складові 1 і 2. Відбиваючись від дзеркал Д1 та Д2, ці складові знову потрапляють на напівпрозору пластинку, а від неї на екран інтерферометра або в око спостерігача (С). Будучи когерентними, хвилі потоків 1 і 2 інтерферують між собою, створюючи на екрані певний набір інтерференційних ліній.

При поздовдньому переміщенні рухомого дзеркала (скажімо Д1) на відстань яка дорівнює половині довжини світлової хвилі (Δl=λ/2), оптична довжина ходу інтерферуючих хвиль зміниться на цілу довжину хвилі (пройдений хвилею шлях зміниться на 2Δl=λ). А це означає, що при переміщені дзеркала Д1 на відстань Δl=λ/2, створена на екрані інтерференційна картинка, зміститься на один крок, тобто від даної інтерференційної лінії до наспупної аналогічної лінії.

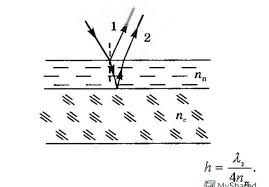
Таким чином, плавно переміщуючи дзеркало Д1 та рахуючи кількість тих інтерференційних ліній які при цьому проходять повз нерухому контрольну нитку екрану приладу, можна точно визначити величину переміщення дзеркала, а відповідно і довжину того об’єкту який з цим переміщенням пов’язаний. Наприклад, можна встановити, що довжина еталонного метра дорівнює 1650763,73 довжин тих хвиль які випромінюються енергетично збудженими атомами крептона 86 при їх переході з енергетичного рівя 2р10 на енергетичний рівень 5d5.

Потрібно зауважити, що напівпрозора пластинка (П) представляє собою прозору склянну пластинку покриту тонким шаром срібла, яке власне і розділяє світловий потік на дві частини. В такій ситуауії, те світло яке йде по шляху S→П→Д1→П→С проходить через шар скла тричі. А те світло яке іде по шляху S→П→Д2→П→С проходить через шар скла лише один раз. Зважаючи на ці обставини, на шляху того світла яке відбивається від дзеркала Д2, ставлять додаткову скляну пластину (П), товщина якої дорівнює товщині напівпрозорої пластини.

Ще одним важливим застосуванням інтерференції є так зване просвітлення оптики. Справа в тому, що навіть при нульовому куті падіння променів, скло та інші оптично прозорі матеріали відбивають від 4% до 9% світлової енергії. А оскільки сучасні оптичні системи складаються з десятків оптично прозорих деталей, то загальні втрати світлової енергії в них можуть досягати 90%. Крім цього, в результаті багаторазового відбивання світла, оптичні системи можуть наповнюватись великою кількістю розсіяного світла, що значно погіршує якість тих зображень які формують ці системи. Ясно, що в такій ситуації проблема суттєвого зменшення кількості того світла яке відбивається оптично прозорими тілами, є надзвичайно важливою. Ця проблема вирішується шляхом просвітлення оптики.

Суть того методу зменшення коефіцієнту відбивання світла який називають **просвітленням оптики** полягає в наступному. На поверхню оптично прозорого тіла, наприклад склянної лінзи, наносять тонкий шар певної, оптично прозорої речовини, показник заломлення світла якої значно менший за показник заломлення скла. За певних умов, наявність такої просвітлюючої плівки, дозволяє зменшити загальний коефіцієнт відбивання світла в десятки разів.

Не заглиблюючись в деталі тих інтерференційних процесів, що відбуваються в системі повітря-плівка-скло, констатуємо лише факт того, що за певної товщини плівки (d) та за певної величини її показника заломлення світла (nпл), коефіцієнт відбивання світла системи плівка-скло зменшується в десятки разів. А ця товщина і цей показник заломлення, визначаються із співвідношень: d=λ/4nпл ; nпл=(nсn0)1/2, де λ – довжина тих хвиль що відбиваються; nс – показник заломлення скла; n0 – показник заломлення повітря.

Мал.113. Для зменшення коефіціїнту відбивання світла, на відповідну поверхню наносять так звану просвітлювальну плівку.

Формула  d=λ/4nпл, фактично вказує на те, що для кожної довжини хвилі, має бути своя товщина просвітлюючої плівки. Тому цю товщину вибирають таким чином, щоб вона забезпечувала максимальне зменшення коефіцієнту відбивання світла для хвиль середніх довжин. При цьому для хвиль крайніх частин спектру коефіцієнт відбивання світла, якщо і зменшується, то не надто сильно. Зважаючи на ці обставини, оптично просвітлені поверхні мають червоний або бузковий відтінок.

**Словник фізичних термінів**

**Інтерферометр** це прилад, який з надзвичайно високою точністю вимірює довжину і принцип дії якого базується на кількісному аналізі тієї інтерференційної картинки яка певним чином пов’язана з предметом вимірювань.

**Контрольні запитання**

1.Чому в зображеній на мал.94 ситуації оптична різниця ходу променів відбитих від внутрішньої поверхні лінзи та повенхні пластини становить не 2d, a 2d+λ/2?

2. Чим метод вихначення відстаней за допомогою інтерферометра, схожий на метод визначення віку дерев?

3. Чому медод інтерференційного визначення довжини є такам точним?

4. Поясніть загальний устрій та принцип дії інтерферометра Майкельсона.

5. Чи впливає факт того, що промені 1 і 2 (мал.95) відбиваються від дзеркальних та напівдзеркальних поверхонь, на величину оптичного ходу цих поверхонь?

6. Відомо, що довжина еталонного метра становить 1650763,73 певних довжин хвиль. Скільки інтерференційних ліній пройшло повз контрольну нитку екрану інтерферометра Майкельсона, при вимірюванні довжини еталонного метра?

**Вправа 15.**

1.Плоско-опукла лінза, радіус кривизни якої 10м, знаходиться на склянній пластині та освітлюється нормально падаючим монохроматичним світлом з довжиною хвилі 600нм. Визначити радіуси чотирьох перших інтерференційних кілець та величини їм відповідних повітряних зазорів.

2. Попередню задачу розв’язати для випадку, коли простір між лінзою та склянною пластиною заповнено водою.

3. Радіус третього інтерференційного кільця Ньютона при освітлені монохроматичним світлом з довжиною хвилі 700нм становить 3мм. Визначити радіус кривизни плоско-сферичної лінзи.

4. Визначити оптимальну товщину та оптимальний показник заломлення просвітлюючої речовини для склянної лінзи з показником заломлення світла 1,7.

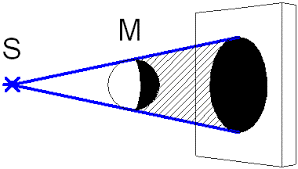
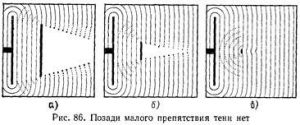
5. Скільки довжин хвиль монохроматичного світла з частотою коливань 5·1014Гц поміститься на відрізку 2,4мм в: а) вакуумі; б) воді; в)алмазі?

6. Повітряний клин утворено двома склянними пластинами, які знаходяться в потоці нормально направленого монохроматичного світла з довжиною хвилі 500нм. Визначити кут між пластинами, якщо відстань між двома сусідніми інтерференійними максимумами 0,5мм.

**§31. Дифракція світла. Дифракційна решітка.**

Уявіть собі безперервний потік дрібних частинок, які з однаковими швидкостями рухаються в одному напрямку. Якщо на шляху цього направленого потоку частинок зустрічається перешкода то за нею утворюється безкінечно довга геометрична тінь (мал.114а). І це закономірно. Адже ті частинки потоку які затримуються перешкодою не потрапляють у відповідну частину заперешкодного простору і тому цей простір залишається вільним від частинок.

Набігаючі на перешкоду хвилі, також затримуються цією перешкодою і тому логічно передбачити, що і в потоці хвиль за перешкодою має знаходитись безкінечно довга геометрична тінь. Однак, дослідження показують, що в потоці хвиль перешкода якщо і залишає певну тінь, то досить обмежену і таку параметри якої залежать як від розмірів перешкоди так і від довжини тих хвиль в потоці яких вона знаходиться (мал.114б). Іншими словами, експериментальні факти говорять про те, що в процесі розповсюдження, хвилі заходять в область геометричної тіні перешкоди. І що довжина реальної тіні цієї перешкоди (l) залежить як від лінійних розмірів самої перешкоди (d) так і від довжини тих хвиль (λ) в потоці яких вона знаходиться.

Мал.114. В направленому потоці частинок (а) за перешкодою утворюється безкінечно довга геометрична тінь. А в направленому потоці хвиль (б) ця тінь має обмежені розміри.

Характеризуючи здатність хвиль заходити в область геометричної тіні перешкоди, а простіше кажучи – їх здатність огинати перешкоди, говорять про дифракцію хвиль (від лат. diffractus – розламаний, переламаний). **Дифракція**, це явище, суть якого полягає в тому, що в процесі свого розповсюдження хвилі заходять в область геометричної тіні тієї перешкоди що зустрічається на їх шляху (огинають перешкоди).

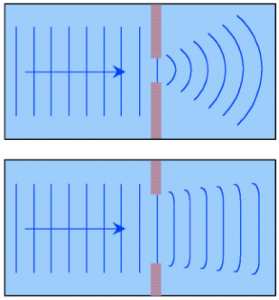
Коли, сховавшись за стовбуром дерева чи пагорбом, ви чуєте голос свого товариша, то скоріш за все, це результат того, що звукові хвилі огинають відповідні перешкоди. Ви можете запитати: “А чому ці перешкоди не огинають світлові хвилі?” відповідаючи на це слушне запитання можна сказати наступне. Світлові хвилі є надзвичайно короткими (λ~5·10-7м) і тому для них дерева, пагорби і навіть дрібні гілочки, є надзвичайно великими перешкодами. Втім, навіть такі дрібні хвилі як світлові, огинають перешкоди, в тому числі і такі великі як стовбури дерев. Просто для того щоб помітити цей факт потрібно відійти від дерева кілометрів на п’ять.

Те що хвилі в процесі свого розповсюдження поступово заходять в область геометричної тіні перешкоди, є абсолютно закономірною властивістю хвиль. Адже частинки середовища (параметри електромагнітного поля) певним чином пов’язані між собою. І тому наприклад, ті молекули води, які будучи частиною хвильового збурення здійснюють певні періодичні коливання, неминуче тягнуть за собою всі сусідні молекули, в тому числі і ті які знаходяться за умовною лінією геометричної тіні перешкоди. А це  означає, що в процесі розповсюдження хвилі, хвильове збурення неминуче заходитиме в область геометричної тіні перешкоди.

Дослідження показують, що довжина тієї тіні (l) яку залишає перешкода в потоці хвиль залежить як від довжини цих хвиль (λ) так і від лінійних розмірів перешкоди (d). В дещо спрощеному варіанті, цю залежність можна записати у вигляді l≅d2/λ. Скажімо, якщо мова йде про світлові хвилі (λ∼5·10-7м), то довжина тієї тіні яку залишає в потоці таких хвиль предмет діаметром 1см (наприклад олівець) становить λ≅(1·10-2м)2/5·10-7м=200м. По суті це означає, що даний предмет на відстані понад 200м стає практично невидимим. Звичайно за умови, що цей предмет сам по собі не є джерелом світла. Якщо ж мова йде про предмет діаметром 0,01мм (для порівняння, середній діаметр людського волосся 0,1мм), то він буде невидимим навіть на відстані найкращого зору людського ока (≈25см).

Втім, дифракція хвиль, це надзвичайно складне та багатогранне явище. Тому, пояснюючи яким чином хвилі огинають перешкоди та прогнозуючи поведінку цих хвиль, потрібно враховувати не лише взаємодію хвиль з незбуреною частиною середовища і не лише їх взаємодію з самою перешкодою, а й певні особливості самого хвильового процесу. А ці особливості такі, що їх надзвичайно важко представити у вигляді наочно простих аналогій.

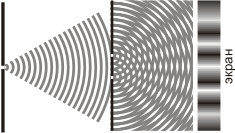
Напевно, найбільш ефектним проявом дифракції є ситуація в якій на шляху хвильового потоку зустрічається непереборно велика перешкода що має відносно вузьку щілину (d~λ). В такій ситуації (мал.115), результатом складного дифракційного процесу є те, що щілина стає джерелом слабких  кільцевих (сферичних) хвиль, тобто веде себе як точкове джерело хвиль.



Мал.115. Якщо розміри щілини співрозмірні з довжиною хвилі, то ця щілина фактично стає точковим джерелом хвиль.

Пояснюючи таку на перший погляд дивну поведінку хвиль, можна сказати наступне. Коли хвилі зустрічаються з поодинокими перешкодами, то основною причиною того, що вони заходять в область їх геометричної тіні є взаємодія збуреної та незбуреної частин середовища. Результатом такої взаємодії є відносно поступове заходження хвиль в область геометричної тіні перешкоди, інтенсивність якого залежить від довжини відповідної хвилі. Якщо ж на шляху хвилі зустрічається вузька щілина, тобто дві близько розташовані перешкоди, то в цьому випадку, визначально важливу роль починають відігравати ті взаємодії що відбуваються між хвилею і краями перешкоди, та ті складні хвильові процеси що супроводжують ці взаємодії. Результатом цих процесів та взаємодій є факт того, що прямолінійний фрагмент хвильового фронту деформується і стає кільцевим. А це означає, що щілина по суті стає точковим джерелом кільцевих хвиль, які в процесі розповсюдження збурюють великий сегмент того простору що знаходиться за перешкодою.

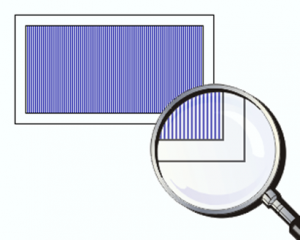
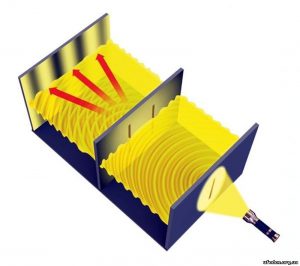
Дифракція хвиль на вузьких щілинах має надзвичайно велике практичне застосування. Адже якщо на шляху хвильового фронту зустрінеться не одна а дві, три чи багато дифракційних щілин, то кожна з них стане джерелом когерентних (узгоджених) хвиль.  А ці хвилі інтерферуючи між собою, створюють відповідну стійку інтерференційну картинку. Картинку, аналіз якої  дозволяє вирішувати велику кількість практично важливих задач.



Мал.116. В хвильовому потоці дифракційні щілини стають джерелами когерентних хвиль, які інтерферуючи між собою створюють відповідну інтерференційну картинку.

В оптиці, прилад який дозволяє отримувати потоки когерентних світлових хвиль і який представляє собою систему періодично розташованих паралельних, надзвичайно вузьких прозорих та непрозорих, або дзеркальних та дифузійних смужок, називають **дифракційною решіткою** (мал.117). Дифракційні решітки поділяються на прозорі та дзеркальні. Вони відрізняються тим, що в прозорих решітках чергуються оптично прозорі та оптично непрозорі смужки, а в дзеркальних – дзеркальні та дифузійні смужки. При цьому, в дзеркальних дифракційних решітках, роль щілин виконують тонкі дзеркальні смужки, а роль перешкод – дифузійні подряпини.

Основною характеристикою дифракційної решітки є величина, яка називається **періодом дифракційної решітки** і яка дорівнює загальній ширині пари прозора-непрозора (або дзеркальна-дифузійна) смужки (позначається d). Зазвичай, період дифракційної решітки не перевищує 0,01мм (d≤0,01мм). Це означає, що на кожному погонному міліметрі такої решітки міститься щонайменше 100 прозорих (дзеркальних) і 100 непрозорих (дифузійних) смужок, а по суті 100 перешкод та 100 щілин.

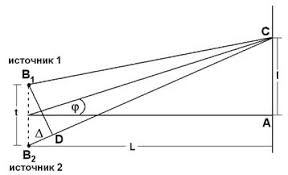
   

Мал.117.  Загальний устрій дифракційної решітки.

Принцип дії дифракційної решітки полягає в наступному. В потоці світла, кожна прозора (дзеркальна) щілина стає джерелом когерентних хвиль, які накладаючись одна на одну створюють відповідну інтерференційну картинку. Аналізуючи цю картинку та ту ситуацію яка призвела до її появи, можна отримати велику кількість корисної інформації, наприклад визначити довжину світлової хвилі.

Дійсно. Припустимо, що дифракційна решітка, період якої 0,01мм, знаходиться в потоці видимого (білого) світла. Розглянемо та проаналізуємо ту інтерференційну ситуацію, що виникає в довільно взятій точці екрану, наприклад в точці А (мал.118). Оскільки кожна щілина дифракційної решітки по суті є окремим точковим джерелом когерентних хвиль, то в точку А потрапляють хвилі практично від кожної щілини дифракційної решітки. Із всього різноманіття цих хвиль оберемо ті, хід яких описують хвильові промені МА та NА. Вибір саме цих променів пояснюється тим, що відстань між точками М і N є відомою і чисельно рівною періоду дифракційної решітки: |MN|=d=0,01мм=1·10-5м.

Оскільки в точках М і N фази коливань відповідних хвиль є однаковими (адже мова йде про одне і те ж світло), то можна стверджувати, що ті світлові хвилі які виходять з точок М і N, в точці А підсиляться тоді і тільки тоді, якщо на відрізку Δ=|NA|-|MA| поміститься ціле число довжин хвиль λ. Іншими словами, умову підсилення хвиль в точці А можна записати у вигляді Δ = nλ, де  n = 1; 2; 3; … – ціле число. А це означає, що довжину максимально підсиленої в точці А світлової хвилі, можна визначити за формулою λ = Δ/n.



мал.118. Аналізуючи інтерференційну картинку та ту ситуацію яка призвела до її появи, можна визначити довжину світлової хвилі.

Із аналізу трикутника МNК випливає, що Δ = dsinφ. З іншого боку, із аналізу взаємоповязаних трикутників МNК та АОО‘ ясно, що кути φ та φ‘ є чисельно рівними (φ=φ‘). При цьому, виходячи з того, що величина кута φ‘ є малою (а за умови b>>a, цей кут дійсно малий φ‘<10″), можна стверджувати:  sinφ=sinφ‘≅tgφ‘=a/b,  де а – відстань від точки О‘ до точки А; b – відстань від дифракційної решітки до екрану. Зважаючи на вище сказане можна записати:  λ = Δ/n = dsinφ/n = dsinφ‘/n ≅ dtgφ‘/n = da/bn.

Таким чином, довжину максимально підсиленої в точці А світлової хвилі, можна визначити за формулою  λ = da/bn  (\*). В цій формулі, d – відома паспортна характеристика дифракційної решітки (d=1·10-5м); а і b – відстані, які легко вимірюються. Що ж стосується числа n, то воно визначається на основі розуміння суті сформованої на екрані інтерференційної картинки. А ця суть посягає в наступному.

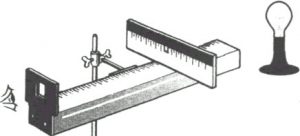
Якщо задана точка А буде знаходитись в центрі екрану (співпадатиме з точкою О‘), то оптична різниця ходу для всіх хвильових променів буде нульовою (Δ=0) і тому в цій точці інтерференційно підсилюватимуться всі хвилі видимого світла, тобто всі хвилі із діапазону довжин від 380нм до 760нм. Результатом цього інтерференційного підсилення, буде факт того, що на екрані, в околицях точки О‘ ми побачимо смугу білого світла (звичайно за умови, що дифракційна решітка знаходиться в потоці білого світла).

По мірі віддалення заданої точки від центральної осі, різниця ходу променів буде поступово збільшуватись. При цьому, якщо ця різниця буде меншою за найкоротшу з видимих хвиль (0<Δ<380нм), то у відповідних точках екрану всі хвилі будуть послаблюватись. А це означає, що відповідна ділянка екрану буде темною. Коли ж оптична різниця ходу світлових променів стане такою, що дорівнює одній (n=1) цілій довжині певної хвилі (спочатку хвилі фіолетового випромінювання, потім синього, голубого, зеленого, жовтого, оранжевого і накінець червоного), то у відповідній точці екрану будуть підсилюваться хвилі відповідної довжини, а отже і відповідного кольору. Іншими словами, на тій ділянці екрану для якої  380нм ≤ Δ ≤ 760нм  (тобто 1λф  ≤ Δ ≤ 1λч) ми побачимо певну кольорову спектральну картинку, яку називають **дифракційним спектром**.

Не важко збагнути, що на зміну дифракційному спектру першого порядку (n=1), прийде аналогічний спектр другого порядку (n=2), потім – третього (n=3) і т.д. Однак, потрібно мати на увазі що чутливість людського зору до світлових хвиль гранично малих та гранично великих довжин, є мізерно малою. Тому сусідні дифракційні спектри будуть фактично розділеними тонкими темними смугами.

Таким чинм, в результаті інтерференції тих когерентних хвиль які створює дифракційна решітка, на екрані можна побачити певну систему дифракційних спектрів, порядковий номер яких дорінює числу n в формулі (\*). Зазвичай, визначаючи довжину тієї чи іншої світлової хвилі, аналізують дифракційний спектр першого порядку (n=1). І це закономірно. Адже формула (\*) є тим більш правильною, чим менша величина кута φ‘. А для першого дифракційного спектру, ця величина є мінімально можливою. Крім цього, візуальна чіткість першої спектральної картинки є найкращою.

Вище описаній метод визначення довжини світлової хвилі є настільки простим та технічно невибагливим, що саме його застосовують в тих лабораторних роботах які проводяться в загальноосвітніх школах. Виконуючи таку роботу, застосовують простий прилад, який складається з деревяного бруска-лінійки, на якому встановлено рухомий екран-лінійка та нерухома дифракційна решітка (мал.119).



Мал.119. Загальний вигляд приладу, що дозволяє віміряти довжину світлової хвилі.

Факт того, що за допомогою гранично простого обладнання, можна визначити довжину світлової хвилі, є безумовно фантастичним. Адже мова йде про вимірювання довжини того об’єкту, швидкість руху якого майже в мільйон разів перевищує швидкість кулі. Об’єкту, який не можливо зупинити, загальмувати чи, скажімо затиснути між деталями вимірювального приладу. Об’єкту, довжина якого в сотні разів менша за граничну точність найточніших та найскладніших механічних мікрометрів.

На завершення зауважимо, що певними побутовими аналогами дифракційної решітки є ті компакт диски, які в потоці світла створюють красиві спектральні картинки. Якщо ж говорити про природні аналоги дифракційних решіток та дифракційних спектрів, то ними можна вважати ті чисельні ситуації в яких певні фрагменти тіл комах, птахів та інших істот, в потоці сонячного світла переливаються всіма барвами веселки.

Мал.120. Деякі приклади побутових та природніх аналогів дифракційних решіток та дифракційних спектрів.

**Словник фізичних термінів**

**Дифракція хвиль**, це явище, суть якого полягає в тому, що в процесі свого розповсюдження хвилі заходять в область геометричної тіні тієї перешкоди що зустрічається на їх шляху (огинають перешкоди).

**Дифракційна решітка**, це прилад, який дозволяє отримувати потоки когерентних світлових хвиль і який представляє собою систему періодично розташованих паралельних, надзвичайно вузьких прозорих та непрозорих, або дзеркальних та дифузійних смужок.

**Дифракційним спектром** називають ту кольорову картинку яка відображає спектральний склад відповідного світла і яку отримують за допомогою дифракційної решітки.

**Контрольні запитання**

1.Назвіть основні причини дихракції хвиль.

2. Чому дихракція світлових хвиль є малопомітною?

3. Які основні візуальні прояви дихракції світла?

4. Поясніть загальний устрій та принцип дії дифракційної решітки.

5. Чому, визначаючи довжину світлової хвилі, зазвичай аналізують перший дифракційний спектр?

6. Чи є зображений на мал.119 прилад, різновидністю інтерферометра?

7. Чому в потоці світла компакт диски спектрально кольорові?

**Вправа 16.**

1.Дифракційні решітки мають по 50 та 100 штрихів на 1мм. Яка з них за однакових умов дає на екрані більш широкий дифракційний спектр?

2. Як змінюється ширина дифракційного спектру в процесі віддалення екрану від решітки?

3. Визначити довжину світлової хвилі, якщо в дифракційному спектрі максимум другого порядку виникає при оптичній різниці ходу хвиль 1,15мкм.

4. Яка ширина спектрів першого та другого порядків, створених дифракційною решіткою період якої 0,01мм? Відстань від решітки до екрану 40см.

5. Дифракційна решітка період якої 2мкм знаходиться в потоці монохроматичного світла. При цьому на екрані віддаленому від решітки на 1м, відстань між спектральними лініями другого та третього порядків становить 2,5см. Визначте довжину хвилі даного світла.

**§32. Поляризація світла.**

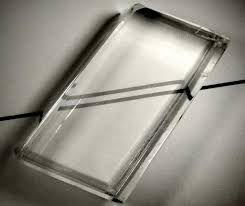
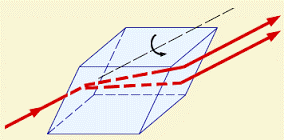
Явища інтерференції та дифракції безумовно доводять, що світло – це потік хвиль. Однак ці явища жодним чином не вказують на те, які це хвилі – поздовжні чи поперечні. Початково передбачалось, що світлові хвилі схожі на звукові, тобто такі які розповсюджуються в певному пружному середовищі (ефірі), і що тому вони є поздовжніми. Однак деякі експериментальні факти вказували на поперечність світлових хвиль. Зважаючи на ці факти, Огюстен Френель ще в 1821 році був змушений визнати: світло має властивості поперечних хвиль. Звичайно, з точки зору теорії речовинного ефіру, такий висновок був дивним. Втім, вчені наділили світловий ефір таким букетом дивних та суперечливих властивостей, для якого ще одна дивність не мала суттєвого значення.

Лише в 1865 році, ті факти які вказували на поперечність світлових хвиль отримали своє теоретичне пояснення. В цьому році Джеймс Максвел, на основі аналізу створеної ним теорії електромагнітного поля, дійшов висновку: **світло, це одна з різновидностей електромагнітних хвиль.** А це означало, що світлові хвилі є поперечними. Адже згідно з теорією Максвела, електромагнітна хвиля представляє собою хвильове збурення електромагнітного поля, яке характеризується взаємоповязаними коливаннями його основних параметрів – напруженості електричного поля **Е** та індукції магнітного поля **В**. При цьому теорія стверджувала, що коливання векторів **Е**і **В** відбуваються в площині яка перпендикулярна (поперечна) до напрямку розповсюдження хвилі.

Електромагнітні хвилі мають ту малоприємну особливість, що їх практично не можливо представити у вигляді простої наочної моделі. Намагаючись бодай якось спростити модельне представлення електромагнітної хвилі, в науковій практиці зазвичай говорять не про взаємоповязані коливання векторів **Е** і **В**, а лише про коливання вектора  **Е**. Ми не будемо порушувати цю добру традицію і в подальшому, світлові хвилі будемо представляти у вигляді поперечнх коливань вектора **Е**.

Одним з тих явищ яке безумовно вказує на поперечність світлових хвиль є так звана поляризація світла. **Поляризація світла** це явище, суть якого полягає в тому, що за певних обставин природнє неполяризоване світло стає поляризованим. Пояснюючи дане визначення можна сказати наступне. Те світло яке створюють звичайні природні та штучні джерела, по суті є результатом інтенсивного хаотичного руху величезної клькості заряджених частинок. Ця хаотичність передбачає не лише факт того, що кожний дискретний рух зарядженої частинки породжує хвилю певної індивідуальної довжини. А й факт того, що ця хвиля має свою індивідуальну площину коливань вектора **Е**. При цьому ясно, що те світло яке є результатом хаотичного руху заряджених частинок, неминуче складається з хвиль не лише хаотично різних довжин, а й хаотично різних орієнтацій вектора **Е**. Таке світло називають **неполяризованим** або **природнім**.

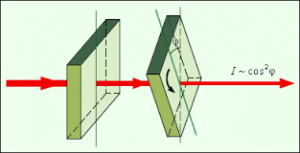
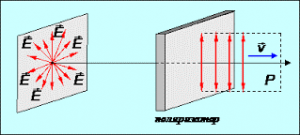
Пояснюючи суть та прояви того явища яке називається поляризацією світла, можна сказати наступне. Як відомо, однією з визначальних ознак кристалічності тіла, є його **анізотропність**. Це означає, що в різних просторових напрямках фізичні властивості одного і того ж кристалу (а точніше, монокристалу) можуть бути суттєво різними. Прояви анізотропії бувають різними. Одні кристали мають яскраво виражену анізотропію механічних властивостей, інші – теплових, треті – електричних, а четверті – оптичних. Прикладом оптично анізотропних кристалів є кристали з **подвійним променезаломленням**. В цих кристалах світлові промені, в одних напрямках залолюються як в звичайних оптично прозорих речовинах, а в інших напрямках – заломлюються таким чиним, що падаючий промінь розкладається на два заломлених промені. Результатом такого подвійного заломлення є факт того, що ті предмети які розглядаються через відповідний кристал виглядають роздвоєними (мал.121).

Мал.121. В кристалі з подвійним променезаломленням, світловий промінь розкладається на дві складові.

Кристали з подвійним променезаломленням (ісландський шпат, турмалін, тощо) дозволяють здійснити рід важливих оптичних досліджень, в тому числі і тих які пояснюють суть поляризації світла та підтверджують поперечність світлових хвиль. Опишемо одне з таких досліджень.

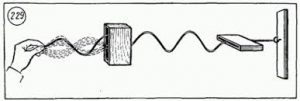
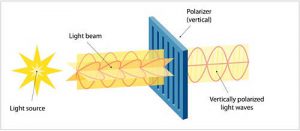
Припустимо, що в нашому розпоряджені є дві прямокутні турмалінові пластини, площина яких є паралельною оптичній осі кристалу, тобто тому напрямку в якому подвійного променезаломлення не відбувається. Припустимо, що дані пластини взаємно паралельні та мають спільну вісь обертання. (мал.120). Якщо на цю оптичну систему направити потік звичайного (неполяризованого) світла, то неодмінно з’ясується наступне. 1) Інтенсивність того світлового потоку що є вихідним з першої пластини приладу, за будь якої просторової орієнтації пластини залишається незмінною і практично вдвічі меншою за інтенсивність вхідного потоку. 2) Інтенсивність того світлового потоку що є вихідним з другої пластини приладу, визначальним чином залежить від відносної кутової орієнтації пластин системи. При цьому: а) якщо оптичні осі пластин є взаємно паралельними, то інтенсивність вихідного потоку є максимальною і практично рівною інтенсивності вхідного потоку; б) по мірі того, як кут між оптичними осями пластин збільшується інтенсивність вихідного світлового потоку зменшується; в) якщо ж оптичні осі пластин системи стають взаємно перпендикулярними, інтенсивність вихідного світлового потоку стає практично нульовою.

Мал.122. Інтенсивність того світлового потоку що є вихідним з другої турмалінової пластини, залежить від відносної кутової орієнтації пластин.

Результати вище описаних експериментів, можна пояснити лише в тому випадку, якщо виходити з того, що світлові хвилі є поперечними. А в гранично спрощеному вигляді це пояснення полягає в наступному. Будучи певним чином орієнтованим відносно світлового потоку, кристал турмаліну, пропускає лише ті світлові хвилі в яких коливання вектора **Е** відбуваються в певній площині – **площині поляризації**. При цьому хвилі з іншими площинами коливань, через даний кристал не проходять. Ясно, що коли кристал турмаліну знаходиться в потоці неполяризованого світла, то за будь якої кутової орієнтації цього кристалу, завжди знайдеться певна кількість світлових хвиль, в яких коливання вектора **Е** відбуваються в потрібній площині. Ці хвилі проходять через кристал і стають частиною того світла яке називається **поляризованим**, тобто таким, в якому коливання вектора **Е** відбуваються в строго визначеній площині – площині поляризації. Не менш очевидно і те, що коли на шляху поляризованого світла поставити ще один аналогічний кристал турмаліну, то в залежності від його кутової орієнтації, кількість того світла яке проходить через цей кристал має певним чином змінюватись від певної максимальної величини до нуля і навпаки.

Іноді, суть поляризації пояснюють на прикладі наступної механічної моделі. (Таку модель легко уявити, але надзвичайно складно реалізувати на практиці). Візьмемо довгу пружну мотузку і здійснюючи складні поперечно-обертальні коливання, створимо відповідну поперечно-обертальну хвилю (мал.123). Якщо на шляху цієї складної поперечно-обертальної хвилі зустрінеться непереборна перешкода з вузькою щілиною в ній, то на виході ми отримаємо просту поперечну хвилю, площина коливань якої співпадає з площиною щілини. Якщо ж на шляху таким чином “поляризованої” хвилі, поставити ще одну аналогічну перешкоду, то в залежності від її кутової орієнтації, “поляризована” хвиля проходитеме через щілину, або не проходитеме через неї.

Мал.123. Механічна модель, яка спрощено ілюструє суть поляризації світла.

Звичайно, поляризацію світла не припустимо зводити до механічного пропускання чи не пропускання хвиль певної направленості коливань. Поляризація світла, це надзвичайно складний квантово-хвильовий процес, в якому елементи кристалічної структури речовини, не просто сортирують світлові хвилі, а й активно трансформують їх. І це очевидно. Адже якби з потоку неполяризованого світла кристал турмаліну вибирав лише хвилі певної площини коливань, то вихідний світловий потік мав би бути мізерно малим. Насправді ж, через поляризуючий кристал проходить близько 50% попередньо неполяризованого світла.

Дослідження показують, що світло поляризується не лише в процесі проходження через оптично анізотропні кристали. В тій чи іншій мірі, поляризація світла відбувається при його відбиванні від оптично непрозорих діелектричних поверхонь, при заломлені світла оптично прозорими ізотропними діелектриками. Світло поляризується в спеціально створених анізотропних середовищах, в потужних електричних та магнітних полях, тощо. Прилади, за допомогою яких створюють поляризоване світло називаються **поляризаторами**. Найпростішими поляризаторами є спеціальні поляризаційні призми, поляроїдні плівки та діелектричні дзеркала. Зазвичай, повністю поляризованим є те світло яке випромінюють квантові генератори (лазери).

Поляризація світла широко застосовується в сучасні науці та техніці. Поляризаційними методами ідентифікують кристалічні речовини; вивчають структуру кристалів; визначають показники заломлення світла непрозорих діелектриків; вимірюють концентрації речовин в розчинах; вивчають розподіл механічних напруг в деталях складної конфігурації; забезпечують сприйняття стереозображень, тощо.

Потенційно привабливим, але до тепер не реалізованим напрямком застосування поляризованого світла, є проблема боротьби з осліплюючою дією світла фар на транспорті. На перший погляд, рішення проблеми є очевидно простим: на фари та лобове скло автомобілів потрібно нанести тонкі поляризаційні плівки. Однак, як це часто буває, практичній реалізації простого рішення заважає ціла низка “але…”. Достатньо сказати, що в процесі перетворення неполяризованого світла в поляризоване, практично 50% світлової енергії перетворюється на теплоту. А для такої потужної освітлювальної системи як фари автомобіля, ця обставина є непрйнятно негативною.

**Словник фізичних термінів**

**Поляризація світла** це явище, суть якого полягає в тому, що за певних обставин природнє неполяризоване світло стає поляризованим.

**Неполяризованим (природнім) світлом** називають таку сукупність світлових хвиль, в якій коливання векторів **Е** відбуваються у всіх можливих площинах.

**Поляризованим світлом** називають таку сукупність світлових хвиль, в якій коливання векторів **Е** відбуваються в певній, строго визначеній площині.

**Контрольні запитання**

1.Які хвилі називають поздовжніми, а які поперечними?

2. Чому електромагнітні хвилі є поперечними?

3. Чому те світло яке створюють звичайні джерела є неполяризованим?

4. В чому полягає анізотропія кристалів з подвійним променезаломленням.

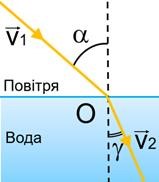
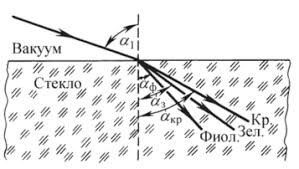
5. В чому суть поляризації світла?

6. Які факти вказують на те, що поляризація світла не зводиться до простого пропускання хвиль з певною площиною коливань вектора **Е**?

7. До яких наслідків призвів би факт того, що певне покриття на автомобільних фарах, затримує половину генерованої ними світлової енергії?

**§33. Дисперсія світла.**

Вивчаючи закони геометричної оптики, ми з’ясували, що для даної пари середовищ, відношення синусу кута падіння променя до синусу кута його заломлення, є постійною величиною: sin?/sin?=n=const. Однак, дослідження показують, що дане твердження не є безумовно правильним. Дослідження показують, що на межі двох оптично різних середовищ, світлові промені різних довжин (різних кольорів) заломлюються суттєво по різному: хвилі менших довжин заломлюються сильніше аніж хвилі більших довжин (мал.124). Іншими словами, експериментальні факти вказують на те, що показник заломлення світла залежить не лише від оптичних властивостей відповідного середовища, а й від довжини хвиль того світла що заломлюється. Цю залежність називають **дисперсією світла** (від лат. dispersio – розсіювання).

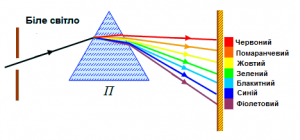
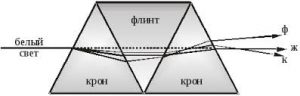
Мал.124. На межі двох оптично різних середовищ, хвилі різних довжин (різних кольорів) заломлюються суттєво по різному.

Коли ми стверджуємо, що абсолютний показник заломлення даного середовища залежить від довжини хвилі заломлюваного світла, то по суті це означає, що в одному і тому ж середовищі, хвилі різних довжин (різних кольорів) мають суттєво різні швидкості. Адже абсолютний показник заломлення світла, фактично показує у скільки разів швидкість світла в даному середовищі (v) менша за його швидкість в вакуумі (с):  sinα/sinγ=n=c/v. Про те, чому в одному і тому ж середовищі червоне світло розповсюджується швидше за зелене, а зелене – швидше за синє, ми поговоримо дещо пізніше. Наразі ж просто констатуємо факт того, що швидкість розповсюдження світла в тому чи іншому середовиші, певним чином залежить від довжини хвилі (кольору) цього світла, і що тому на межі двох оптично різних середовищ, світло різних кольорів заломлюється суттєво по різному.

Потрібно зауважити, що в науковій практиці, терміном **дисперсія світла** позначають як залежність абсолютного показника заломлення середовища від довжини хвилі заломлюваного світла (n=ƒ(λ)), так і сукупність тих оптичних явищ які обумовлені цією залежністю. Та як би там не було, а результатом дисперсії є факт того, що в процесі заломлення, біле світло певним чином розкладається на його складові кольори.

Ви можете запитати: “Якщо на межі двох оптично прозорих середовищ, біле світло розкладається на його складові кольори, то чому  ж ми не бачимо результатів цього розкладання при проходженні світла через віконні  шибки та інші оптично прозорі тіла?” Відповідаючи на це слушне запитання можна сказати наступне. По перше, різниця між показниками заломлення, а відповідно і кутами заломлення, хвиль різних кольорів є мізерно малою. Тому ширина тієї спектральної картинки яка утворюється при проходженні світла через такі тонкі предмети як віконне скло, є настільки малою, що практично не фіксуються зоровою системою  людини. По друге, ті оптично прозорі предмети з якими ми маємо справу в повсякденному житті, зазвичай освітлюються не окремими світловими променями, а суцільними світловими потоками. В такій ситуації результатом розкладання кожного променя на його кольорові складові, та накладання цих складових на продукти розкладання сусідніх променів, буде все те ж біле світло.

Картину прогнозованого дисперсійного розкладання світла, отримують за допомогою спеціальних приладів які називаються **спектроскопами**, точніше – **призмовими** або **дисперсійними спектроскопами**. Схема принципового устрою простого призмового спектроскопу (так званого двох трубного спектроскопу) представлена на мал.125а. Цей спектроскоп працює наступним чином. Через вузьку щілину вхідної трубки приладу, світло потрапляє на захищену від сторонніх світлових впливів склянну тьохгранну призму. Проходячи через цю призму, світло розкладається на його складові кольори та потрапляє у вихідну зорову трубку приладу.

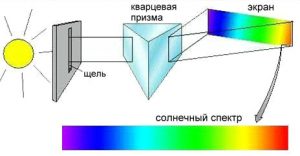
Мал.125. Схема принципового устрою: а) двох трубного спектроскопу; б) спектроскопу прямого зору.

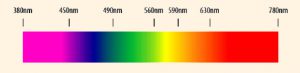
Суттєвим недоліком двох трубного спектроскопу є те, що в ньому напрямки вхідного та вихідного світлових потоків є різними, і тому відповідний прилад не може бути достатньо компактним. Крім цього, такий спектроскоп не дозуволяє створювати достатньо якісні спектральні картинки. Цих недоліків позбавлений так званий спектроскоп прямого зору. Цей спектроскоп відрізняється тим, що його дисперсійна призма складається з трьох окремих трьохгранних призм (мал.125б). Матеріал та кутові параметри цих призм підібрані таким чином, щоб по перше ефективно перетворювати вхідний світловий потік на якісну спектральну картинку, а по друге – не змінювати загальний напрям світлового потоку. Спектроскоп прямого зору характеризується достатньо високою якістю створюваних ним спектрів, компактністю та зручністю в роботі.

Ту спектральну картинку яку отримують за допомогою дисперсійного спектроскопа називають **дисперсійним спектром** (мал.126а). Дисперсійні спектри мають один суттєвий недолік. І цей педолік полягає в тому, що вони певним чином деформовані. Деформовані в тому сенсі, що синьо-фіолетова частина дисперсійного спектру є надмірно розтягнутою, натомість червоно-оранжева частина – надмірно стиснутою. Більше того, абсолютно однакові за формою але виготовлені з різних матеріалів (скажімо, з різних сортів скла) призми, можуть створювати суттєво різні дисперсійні спектри. Різні не в сенсі набору кольорів (довжин хвиль), а в сенсі масштабу розподілу цих кольорів в спектральній картинці. Такий стан речей пояснюється тим, що залежність показника заломлення світла від довжини заломлюваних хвиль, є по перше нелінійною, а по друге індивідуальною.

Ясно, що деформованість дисперсійного спектру, не є його позитивною рисою. Адже аналізуючи такий спектр, можна зробити висновок про те, що в видимому (сонячному) світлі синьо-фіолетових хвиль набагато більше аніж червоно-оранжевих. А це абсолютно не відповідає дійсності. Аналізуючи дисперсійний спектр, потрібно розуміти, що ви маєте справу з приладом, вимірювальна шкала якого є нерівномірною. І ця нерівномірність, вточності відображає нелінійність залежності показника заломлення світла даного середовища, від довжини заломлюваних хвиль.

Спектри з лінійним розподілом довжин хвиль, отримують за допомогою **дифракційних спектроскопів**. В таких спектроскопах, функцію дисперсійної призми виконує якісна дифракційна решітка. В **дифракційному спектрі** (мал.126б), розподіл хвиль за їх довжинами, а отже і кольорами, є строго лінійним. І в цьому сенсі, дифракційні спектри є більш зручними та об’єктовними. Втім, дифракційні та дисперсійні спектри по суті відрізняються не більше, аніж ті вимірювальні прилади, шкали яких є рівномірними та нерівномірними.



.              

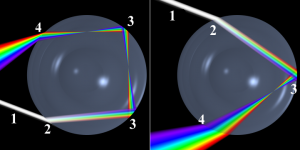
Мал.126. Дисперсійний (а) та дифракційний (б) спектри, це прилади з відповідно нерівномірною та рівномірною вимірювальною шкалою.

Загально відомим прикладом природнього дисперсійного спектру є веселка або райдуга (райська дуга). Веселка представляє собою різнобарвну дугу, в якій прийнято виділяти сім кольорів: червоний, оранжевий, жовтий, зелений, голубий, синій та фіолетовий. Не рідко над основною дугою можна побачити ще одну більш широку та менш яскраву веселкову дугу, яка відрізняється від основної тим, що її кольори мають зворотню послідовність.

Уважний спостерігач може помітити, що весела з’являється лише на фоні освітленої Сонцем завіси дощу і тільки в тому випадку коли ця завіса знаходиться перед спостерігачем, а Сонце – позаду нього. Крім цього, він може звернути увагу і на те, що веселка з’являється лише в тому випадку, коли кут нахилу Сонця над лінією горизонту не надто великий (зазвичай не більший 40°) і що чим менший цей кут, тим вищою є дуга веселки.

Пояснюючи фізичну суть того явища яке називається веселкою, звернемось до експерименту. В рамках цього експерименту, направлений пучок білого світла пропустимо через заповнену водою склянну кулю (мал.127). При цьому неодмінно з’ясується, що в процесі проходження через тіло кулі, біле світло розкладається на його складові кольори. Кількісний аналіз результатів експерименту показує. Якщо при проходженні через водяну кулю, світло зазнає одного внутрішнього відбивання (мал.127а), то вихінні кольорові промені утворюють з напрямком вхідних променів кут від 40° до 42° (відповідно для фіолетового та червоного промунів). Якщо ж в процесі проходження через кулю, світло зазнає двох внутрішніх відбивань (мал.127б), то послідовність кольорів стає протилежною і вони утворюють кути від 50,5° до 54° (відповідно для червоного та фіолетового променів).

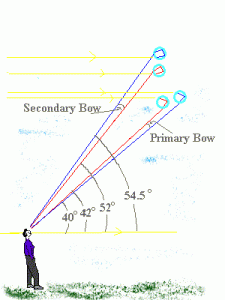
При цьому потрібно зауважити, що та спектральна картинка яка утворюється після дворазового внутрішнього відбивання світла, буде набагато тмянішою за ту, яка утворюється після одноразового внутрішнього відбивання. І це закономірно, адже при кожному внутрішньому відбиванні, велика частина світлової енергії виходить за межі водяної кулі.



Мал.127.  В процесі проходження через водяну кулю, біле світло розкладається на його складові кольори.

В потоці сонячного світла, кожна краплина дощу по суті є тією маленькою водяною кулею, проходячи через яку сонячне світло дисперсійно розкладається, та утворює відповідну дисперсійну картинку. При цьому, той спостерігач що знаходиться на поверхні землі, може бачити дві кольорові дуги, перша з яких починається з фіолетового кольору і закінчується червоним, друга – є набагато тмянішою і починається з червоного кольору а закінчується фіолетовим.

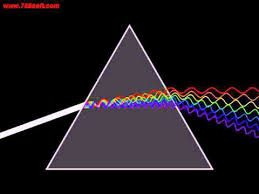
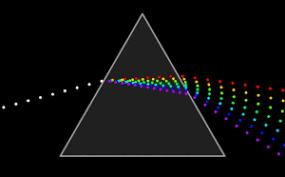
Звичайно, краплини дощу не висять у повітрі, а швидко падають. Тому певна краплина приймає участь в формуванні мізерного фрагменту веселки лише короткий проміжок часу. Однак веселку створює не одна, не дві , а мірріади крапель. Ці краплі змінюють одна одну так швидко, що око людини не помічає цих змін. При цьому спостерігач фактично бачить не ту картинку яку створює певна окрема крапля, а усереднений результат масштабного динамічного процесу, в якому приймають участь мірріади рухомих крапель.

Мал.128.  Веселка, це результат дисперсійного розкладання сонячного світла на його складові кольори, яке відбувається в процесі проходження світла через краплини дощу.

В певному сенсі, та велична картина яка називається веселкою, схожа на те що ми бачимо на теле- та кіно- екранах. Адже дивлячись телевізор, ми не помічаємо факту того, що за кожну секунду на його екрані з’являється та зникає 25 нерухомих картинок. Ми не помічаємо кожну окруму картинку, а сприймаємо лише їх усереднений результат. По суті, веселка і є тим природнім атмосферним кінофільмом, який створює сонячне світло та неперервний потік краплинок дощу.

Завершуючи розмову про дисперсію світла зауважимо, що це явище не є таким яке безумовно вказує на хвильові властивості світла. По суті, дисперсія світла є тим явищем, яке з практично онаковим успіхом можна пояснити як в рамках хвильової, так і в рамках квантової оптики.

Мал.129. Дисперсію світла можна пояснити як хвильовими так квантовими (корпускулярними) властивостями світла.

**Словник фізичних термінів**

**Дисперсією світла** називають сукупність тих оптичних явищ, які обумовлені залежністю абсолютного показника заломлення середовища від довжини хвилі заломлюваного світла.

**Спектроскоп** – це прилад, в якому світло певним визначеним чином розкладається на його складові кольори. За способом розкладання світла, спектроскопи поділяються на дисперсійні та дифракційні.

**Веселка (райдуга)** – це атмосферне оптичне явище, суть якого полягає в тому, що сонячне світло заломлюючись та відбиваючись в краплинках неперервного потоку дощу, дисперсійно розкладається на його складові кольори і утворює відповідну кольорову дугу.

**Контрольні запитання**

1.Чи є закон заломлення світла безумовно правильним? Чому?

2. Якщо на межі двох оптично прозорих середовищ, світло розкладається на його складові кольори, то чому ми не бачимо результатів цього розкладання дивлячись на те світло що проходить через віконне скло?

3. Поясніть загальний устрій та принцип дії дисперсійного спектроскопа.

4. Який основний недолік дисперсійного спектру та які причини його появи?

5. Що називають хроматичною аберацією? В чому вона проявляється? Які методи боротьби з нею?

6. За яких загальних умов спостерігається веселка?

7. Чому веселка буває подвійною і чому верхня веселкова дуга набагато тмяніша за нижню?

8. В чому схожісьть між кіно та веселкою?

**§34. Види спектрів. Спектральний аналіз.**

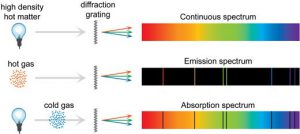
Пропускаючи вузький пучок світла через склянну трьохгранну призму, Ньютон спостерігав фантастично-дивовижну подію, перетворення чистого безбарвного світла на прекрасну райдужну картинку. Факт того, що всі ці райдужні кольори дивовижним чином виникали з звичайного безбарвного світла, став підставою для того, щоб цю райдужно-кольорову картинку назвати **спектром**, що в змістовному перекладі означає дивовижне мариво (від лат. spektrum – мариво).

В різних розділах сучасної науки та в різних контекстах, термін “спектр” може мати суттєво різні відтінки значень. Зокрема спектром називають загальну сукупність значень певної величини; загальну сукупність довжин хвиль що містяться в тому чи іншому випромінюванні; загальну сукупність тих гармонічних коливань на які можна розкласти дане складне коливання, тощо. Однак, якщо говорити про оптику, то в ній **спектром** називають ту кольорову картинку, яку отримують шляхом розкладання світла спеціальним приладом (спектроскопом, спектрографом, спектрометром, тощо), а також ту сукупність довжин (частот) електромагнітних хвиль, яка відповідає цій картинці.

За різними класифікаційними ознаками, спектри поділяються на дисперсійні та дифракційні, на спектри випромінювання та спектри поглинання, на спектри суцільні, лінійчаті та смугасті. Про дисперсійні та дифракційні спектри ми говорили в попередньому параграфі. Тому наразі поговоримо про ті різновидності спектрів які називаються суцільними, лінійчатими та смугастими, а також про спектри випромінювання та спектри поглинання.

Якщо даний спектр характеризує параметри того світла яке випромінюється тим чи іншим об’єктом, то цей спектр називають **спектром випромінювання**. Зазвичай, говорячи про спектри випромінювання мають на увазі спектр того світла, яке випромінюється первинним джерелом світла: Сонцем, полум’ям свічки, лампочкою розжарювання, лампочкою денного світла, тощо. Наприклад, ті спектри які створюють нагріта спіраль лампочки розжарювання (мал.130а) та нагрітий до високої температури газ гелій (мал.130б), є спектрами випромінювання.

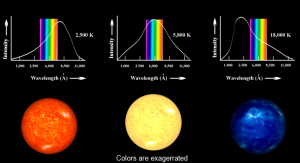
Якщо даний спектр характеризує параметри того світла яке поглинається тим чи іншим об’єктом, то такий спектр називають **спектром поглинання**. Зазвичай, говорячи про спектр поглинання, мають на увазі спектр того світла яке поглинається певним відносно холодним об’єктом при проходженні крізь нього світла повного спектрального складу. Наприклад, якщо через шар холодного гелію (мал.130в) пропустити біле світло (світло повного спектрального складу), то в достатньо якісному спектроскопі, можна побачити певний набір тонких темних ліній. Сукупність цих темних ліній і є спектром поглинання гелію.



Мал.130. Спектри паділяються на спектри випромінювання (а,б) та спектри поглинання (в).

За загальним виглядом спектральної картинки, а отже і за частотним складом тих електромагнітних хвиль які утворюють цю картинку, спектри поділяються на суцільні, лінійчаті та смугасті. **Суцільним спектром випромінювання** називають такий спектр, який представляє собою суцільну спектральну картинку яка складається з усіх спектральних кольорів видимого світла і якій відповідає повний набір електормагнітних хвиль з діапазону від 380нм до 760нм (мал.130а). Суцільний спектр є результатом інтенсивного теплового (хаотичного) руху частинок речовини.   Дослідження показують, що всі тверді та рідкі тіла, а також гази високої густини (наприклад такої як поверхня Сонця), будучи нагрітими до достатньо високих температур, випромінюють світло суцільного спектру. При цьому, спектральний склад цього світла не залежить ні від хімічного складу речовини, ні від її агрегатного стану, ні від її температури.

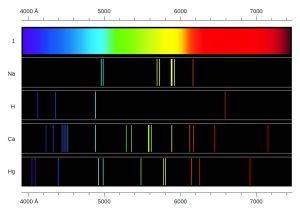
Інша справа, загальний колір того світла яке дає суцільний спектр. Адже цей колір фактично відображає не спектральний склад світла, а відносну концентрацію в ньому світлових хвиль відповідних довжин, і є таким що залежить від температури речовини. Наприклад температура поверхні Сонця близька до 5800К. При цій температурі, пік тієї кривої яка описує розподіл енергії в спектрі світла, припадає на ту зону в якій практично рівномірно представлені всі хвилі спектру видимого світла (131б). А ці хвилі у своїй сукупності і дають те біло-жовте світло яким світить Сонце. При зменшені температури поверхні (мал.131а), пік кривої розподілу енергії зміщується в сторону червоного кольору. А це означає, що в спектрі світла переважатимуть червоно-оранжеві кольори і тому поверхня набуватиме відповідного червоно-оранжевого кольору. Якщо ж температура поверхні збільшується (мал.131в), то пік кривої розподілу енергії зміщується в сторону синього кольору, що відповідно змінює і колір поверхні. А це означає, що за кольором повершні, можна достатньо точно визначити температуру цієї поверхні.



Мал.131. Загальний колір того світла що дає суцільний спектр, певним чином залежить від температури джерела світла.

Факт того, що розжарені тверді та рідкі тіла, а також гази високої густини, випромінюють повний набір електромагнітних хвиль видимого світла, є цілком закономірним. Адже мова йде про тіла з надзвичайно великою концентрацією частинок речовини. Частинок, які в процесі інтенсивного теплового, а отже хаотичного руху, випромінюють хвилі всіх можливих довжин (частот). Іншими словами, суцільний спектр випромінювання є результатом інтенсивного хаотичного (теплового) руху величезної кількості щільно упакованих заряджених частинок.

**Лінійчатим спектром випромінювання** називають такий спектр, який представляє собою певний набір тонких спектральних ліній. Лінійчаті спектри дають системи обособлених енергетично збуджених атомів, зокрема розріджені пари та гази атомарного складу. При цьому, кожна різновидність атомів, дає свій неповторний лінійчатий спектр (мал.132). Даний факт пояснюється тим, що лінійчатий спектр є відображенням тих процесів які відбуваються в енергетично збудженому атомі. В певному сенсі, лінійчатий спектр можна назвати фотографією внутрішнього устрою атома. А оскільки внутрішній устрій хімічно різних атомів є різним, то відповідно різними є і їх спектральні зображення.



Мал.132. Кожна різновидність атомів дає свій неповторний лінійчатий спектр.

Потрібно зауважити, що кількість та чіткість тих ліній, які можна побачити в спектроскопі, визначальним чином залежить від якості цього спектроскопа. Скажімо, якщо в простенькому демонстраційному спектроскопі лінійчатий спектр парів натрію виглядає як сукупність двох близько розташованих жовтих ліній, то в значно потажнішому та якіснішому лабораторному спектроскопі, можна побачити систему з десяти пар подібних ліній. Крім цього, потрібно мати на увазі, що в звичайному спектраскопі, ми бачимо лише видиму частину лінійчатиго спектру, і що певна частина цього спектру може знаходитись в області невидимого інфрачервоного та ультрафіолетового випромінювання.

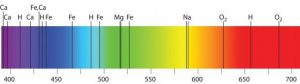
**Смугастим спектром випромінювання** називають такий спектр, який представляє собою певний набір відносно широких спектральних смужок, кожна з яких в свою чегу, складається з великої кількості тонких, близько розташованих спектральних ліній. Іншими словами, смугастий спектр – це складна різновидність лінійчатого спектру. Смугасті спектри дають системи обособлених, енергетично збуджених молекул, зокрема розріджені газа молекулярного складу. При цьому, кожна різновидність молекул дає свій неповторний смугастий (складний лінійчатий) спектр. І не важко збагнути, що той складний лінійчатий спектр, який називають смугастим, є відображенням тих складних процесів що відбуваються в енергетично збуджених молекулах.



Мал.133. Спектри випромінювання поділяються на суцільні, лінійчаті та смугасті (складні лінійчасті).

Спектри випромінюання можуть бути не лише суцільними, лінійчатими та смугастими, а й **комбінованими**. Наприклад, спектр того світла яке випромінює заповнена розрідженим воднем (Н2) газорозрядна трубка, є певною комбінацією лінійчатого спектру атомів водню, та смугастого спектру молекул водню. Або, наприклад, спектр того випромінювання яке створює лампа денного світла, є певною комбінацією лінійчатого спектру розріджених парів наявного в лампі металу, та близького до суцільного, спектру тієї люмінісцируючої речовини яка нанесена на внутрішню поверхню склянного корпусу лампи.

В 1859 році, німецький фізик Густав Кірхгоф (1824-1887) з’ясував, що лінійчаті спектри випромінювання та поглинання будь якої речовини є взаємно оберненими. Це означає, що коли нагріта речовина випромінює певний набір електромагнітних хвиль, то в холодному стані, вона поглинає точно такий же набір хвиль. Зважаючи на цей факт, не важко пояснити походження тих тонких темних ліній які можна побачити в спектрі сонячного світла (мал.134). Ці лінії були відкриті та описані в 1814 році німецьким фізиком Йозефом Фраунгофером (1787-1826) і тому називаються **фраунгоферовими лініями**.



Мал.134. В спектрі сонячного світла міститься велика кількість тонких темних спектральних ліній, які прийнято називати фраунгоферовими лініями.

Пояснюючи походження фраунгоферових ліній, можна сказати наступне. Густа та гаряча поверхня Сонця (фотосфера) постійно випромінює надпотужний світловий потік суцільного спектру. Проходячи через відносно прохолодну та відносно розріджену сонячну атмосферу (сонячну корону), а також через атмосферу Землі, сонячне світло частково поглинається атомами та молекулами цих атмосфер. При цьому, в початково суцільному спектрі, з’являється величезна кількість тонких темних ліній. Ліній, які відображають хімічний склад сонячної та земної атмосфер. Потрібно зауважити, що в спектроскопах малої потужності можна побачити незначну кількість, найбільш “яскравих” фраунгоферових ліній. Загалом же, цих ліній понад 20 тисяч.

Факт того, що кожна речовина має свій неповторний спектральний відбиток, лежить в основі так званого спектрального аналізу. **Спектральний аналіз**, це метод визначення хімічного складу речовини та інших її параметрів, на основі аналізу лінійчатого спектру цієї речовини. (Відразу ж зауважимо: оскільки смугастий спектр є складною різновидністю лінійчатого спектру, то в подальшому ці спектри ми будемо називати лінійчатими). Суть спектрального аналізу полягає в наступному. Від об’єкту досліджень, отримують лінійчатий спектр випромінювання або поглинання. Аналізують склад, яскравість та особливості даного спектру і на основі цього аналізу роблять відповідні висновки. Зокрема, за набором характерних спектральних ліній, визначають якісний склад речовини, тобто загальну сукупність наявних в ній атомів та молекул. За яскравістю цих ліній, визначають кількісний склад речовини. За зсувом спектральних ліній, визначають швидкість та напрям руху відповідного об’єкту, наприклад тієї чи іншої зірки або галактики.

Спектральний аналіз вигідно відрізняється від традиційних методів хімічного аналізу. До числа його безумовних переваг відносяться:

1.Надзвичайно висока чутливість та точність. Чутливість сучасного спектрального аналізу така, що дозволяє виявити речовину навіть в тому випадку коли її концентрація не перевищує 10-11г/см3.

2. Спектральний аналіз дозволяє точно визначати хімічний склад тих об’єктів які знаходяться на недосяжно великих відстанях, наприклад таких як Сонце, зірки, галактики, космічні туманності, тощо.

3. Спектральний аналіз є гранично універсальним методом досліджень, який дозволяє визначати хімічний склад практично будь якої речовини, починаючи від простих неорганічних речовин і закінчуючи надскладними біологічними структурами.

4, Спектральний аналіз дозволяє розрізняти навіть такі атоми, які методами хімічного аналізу розрізнити практично неможливо. Ці різновидності хімічно однакових атомів називають **ізотопами**.

5. Спектральний аналіз дозволяє визначати не лише хімічний склад того чи іншого об’єкту, а й його температуру, параметри руху, параметри кристалічної структури, внутрішній устрій атомі, тощо.

6. Спектральний аналіз характеризується високою технологічністю, сумісністю з електронними системами обчислень, аналізу та управління, високою швидкістю проведення аналізу, відносно низькою собівартістю, надійністю та іншими чеснотами.

Класичною ілюстрацією можливостей спектрального аналізу є історія відкриття гелію – речовини, атом якої в таблиці хімічних елементів займає позицію №2. Ця історія показова тим, що гелій відкрили не на Землі, а на Сонці. Як відомо, гелій відноситься до числа так званих інертних газів. При цьому серед інертних, він найінертніший. Це означає, що гелій практично не проявляє себе в жодній хімічній реакції. Хімічний же аналіз базується на аналізі результатів тих реакцій які відбуваються з тими чи іншими атомами (молекулами). І якщо такі реакції не відбуваються, то для хіміків відповідні атоми просто не існують.

В 1868 році, аналізуючи отриманий в момент повного сонячного затемнення, лінійчатий спектр сонячної атмосфери (сонячної корони), вчені звернули увагу на те, що в цьому спектрі є декілька яскравих ліній, які не відповідали жодному з відомих на той час атомів. Це означало, що до складу сонячної атмосфери, а отже і до складу Сонця, входить якийсь невідомий хімічний елемент. Цей відкритий на Сонці елемент, назвали **гелієм**, тобто – сонячним (від грец. Helios – Сонце). Лише в 1895 році, тобто через 27 років після відкриття на Сонці, вченим вдалося відшукати гелій і на Землі. При цьому з’ясувалося, що гелій має багато виняткових властивостей, які сприяли його широкому застосуванню в сучасній науці і техніці.

Загалом же, методами спектрального аналізу було відкрито близько 30 хімічних елементів, зокрема всі інертні гази, цезій, іридій, рубідій, талій та інші.

На завершення додамо. Якщо мова йде про хімічно складні речовини, то їх склад зазвичай визначають на основі аналізу спектрів поглинання відповідної речовини. І це закономірно. Адже для того щоб отримати спектр випромінювання, досліджувану речовину потрібно нагріти до таких температур, при яких її структурний та молекулярний склад може кардинально змінюватись. Процедура сучасного спектрального аналізу достатньо проста. Від стандартного джерела суцільного спектру, направлений  світловий потік стандартних параметрів, проходить через шар досліджуваної речовини, та потрапляє на екран аналізуючого приладу. Цей, зазвичай комп’ютеризований прилад, практично миттєво аналізує отриману інформацію та формулює відповідні результати вимірювань.

**Словник фізичних термінів**

**Спектром** називають ту кольорову картинку, яку отримують шляхом розкладання світла спеціальним приладом (спектроскопом, спектрографом, спектрометром, тощо), а також ту сукупність довжин (частот) електромагнітних хвиль, яка відповідає цій картинці. За різними класифікаційними ознаками, спектри поділяються на дисперсійні та дифракційні, на спектри випромінювання та спектри поглинання, на спектри суцільні, лінійчаті та смугасті (складні лінійчасті).

**Спектральний аналіз**, це метод визначення хімічного складу речовини та інших її параметрів, на основі аналізу лінійчатого спектру цієї речовини.

**Контрольні запитання**

1.Чому суцільні спектри різних речовин є однаковими?

2. Чому лінійчаті спектри різних речовин є різними?

3. Чому спектр випромінювання газу високої густини є суцільним, а газу низької густини – лінійчатим?

4. Який спектр створює лампа денного світла? Чому?

5. Яке походження тих тонких темних ліній, що містяться в спектрі сонячного світла? Про що говорять ці лінії?

6. Який метод спектрального аналізу (аналіз спектрів випромінювання чи спектрів поглинання) є більш поширеним? Чому?

7. Опишіть процедуру сучасного спектрального аналізу.

8. Чому до 1868 року, хіміки не знали про існування гелію?

**§35. Шкала електромагнітних хвиль.**

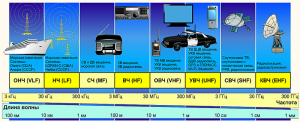
Не буде перебільшенням сказати, що увесь навколишній простір заповнений електромагнітними хвилями. Сонце і зірки, мобільні телефони і батареї опалення, полум’я свічки і дроти ліній електропередач, наша Земля і ми з вами, – все це, джерела електромагнітних хвиль, тобто певних коливань електромагнітного поля. Все різноманіття цих хвиль умовно розділяють на сім груп: 1 – низькочастотні електромагнітні хвилі; 2 – радіохвилі; 3 – інфрачервоне випромінювання; 4 – видиме світло; 5 – ультрафіолетове випромінювання; 6 – рентгенівське випромінювання; 7 – гама випромінювання. Гранично стисло характеризуючи кожну групу електромагнітних хвиль, можна сказати наступне.



Мал.135. Умовний поділ неперервного спектру електромагнітних хвиль на певні класифікаційні групи, прийнято називати шкалою електромагнітних хвиль.

**Низькочастотними електромагнітними хвилями** називають ту частину загального спектру електромагнітних хвиль, довжини яких більші за 105м.  Дана різновидність хвиль є невід’ємним побічним продуктом тих змінних струмів які використовуються на виробництві, в побуті, на транспорті та інших сферах нашого цивілізованого життя. Скажімо, в дротах ліній електропередач протікає змінний струм, частота  якого 50Гц. А це означає, що даний струм неминуче породжує електромагнітні хвилі з довжиною λ=с/ν =6·106м. Такі хвилі мають надзвичайно низьку питому енергоємність, не викликають у нас жодних відчуттів, є абсолютно безпечними для організму людини і не мають жодного практичного застосування. Іншими словами, низькочастотні електромагнітні хвилі не є а ні шкідливими, а ні корисними.

**Радіохвилями**називають ту частину загального спектру електромагнітних хвиль, довжини яких знаходяться в межах від 105м до 10-4м і які застосовуються для передачі інформації в різноманітних системах радіозв’язку, радіолокації, радіонавігації, тощо. Про те як генеруються та як модулюються радіохвилі, як передаються та як фіксуються, ми говорили в процесі вивчення теми «Системи радіозв’язку». Тому на разі просто додамо, що діапазон застосувань радіохвиль надзвичайно широкий. При цьому хвилі різних довжин мають певні сфери переважного застосування. Загальні уявлення про ці сфери дає мал.136.



Мал.136. Сфери застосування різних діапазонів радіохвиль.

Зауважимо також, що радіохвилі, не викликають у людини певних відчуттів і не є шкідливими для її організму. Звичайно за умови, що концентрація цих хвиль не є надмірно високою. Адже якщо, наприклад, ви залізете на радіопередавальну антену потужного телецентру, то скоріш за все отримаєте серйозні опіки. Однак це зовсім не означає, що відповідні радіохвилі є смертельно небезпечними. Не станете ж ви, на підставі того що обпеклися нагрітою поверхнею праски, стверджувати, що ті електромагнітні хвилі які випромінює ця поверхня, є шкідливими. А між іншим, ці хвилі набагато енерго ємніші і якщо хочете, набагато шкідливіші за найшкідливіші з радіохвиль. Я вже не говорю про видиме світло, яке за такою логікою мало б бути просто смертельним.

**Інфрачервоним випромінюванням** називають ту частину загального спектру електромагнітних хвиль, довжини яких знаходяться в межах від 2·10-3м до 7,6·10-7м. Зазвичай, основним джерелом інфрачервоного випромінювання є хаотичний (тепловий) рух атомів і молекул речовини. Однак, таке випромінювання створюється і в результаті тих процесів що відбуваються в енергетично збуджених атомах і молекулах. При цьому, результатом теплового (хаотичного) руху частинок речовини є суцільний спектр інфрачервоного випромінювання, а результатом тих процесів що відбуваються в енергетично збуджених атомах і молекулах – відповідний лінійчатий спектр.

Хвилі інфрачервоного випромінювання не лише створюються тепловим рухом частинок речовини, а й при взаємодії з речовиною, перетворюються на її тепловий рух. Іншими словами, при взаємодії з речовиною, інфрачервоне випромінювання змушує атоми та молекули речовини рухатись інтенсивніше. По суті це означає, що інфрачервоне випромінювання здатне викликати теплові відчуття.

Інфрачервоні електромагнітні хвилі випромінюють всі нагріті тіла, навіть ті, які прийнято вважати холодними. (Не будемо забувати, що тіло з температурою 0°С є фактично нагрітим до 273К). Надзвичайно потужним джерелом інфрачервоного випромінювання є Сонце. Адже майже 50% тієї енергії яку випромінює Сонце, є енергією інфрачервоних електромагнітних хвиль.

Інфрачервоне випромінювання має достатньо широке практичне застосування. Скажімо в побуті, інфрачервоне випромінювання є одним з основних джерел теплоти для наших помешкань. В науці, методами інфрачервоної спектроскопії визначають хімічний склад речовин та досліджують їх внутрішній устрій. В військовій справі, широко застосовують прилади нічного бачення, системи теплового самонаведення. В системах радіозв’язку, хвилі інфрачервоного спектру використовують в якості радіохвиль.

**Видимим світлом** називають ту частину загального спектру електромагнітних хвиль, довжини яких знаходяться в межах від 7,6·10-7м до 3,8·10-7м і які викликають у людини зорові відчуття. Джерелом видимого світла є інтенсивний тепловий рух атомів, молекул та іонів речовини, а також ті внутрішні процеси які відбуваються в цих енергетично збуджених частинках. При цьому, результатом інтенсивного теплового руху частинок, є відповідний суцільний спектр видимого світла. А результатом тих внутрішніх процесів які відбуваються в цих частинках – відповідний лінійчатий спектр.

Видиме світло має ряд характерних властивостей, зокрема: викликає зорові відчуття; викликає теплові відчуття; є хімічно активним, тобто таким, що приймає активну участь в так званих фотохімічних реакціях.

Видиме світло займає мізерну частину загального спектру електромагнітних хвиль. Однак важливість цієї частини важко переоцінити. Бо видиме світло, це не просто та вузька щілина через яку ми дивимось на навколишній світ. Не просто невід’ємна та незбагненно важлива складова нашого повсякденного життя. Видиме світло, це енергетична основа самого життя. Адже основою того що ми називаємо життям, є складна фотохімічна реакція яка називається **фотосинтезом** і яка не можлива без фотонів видимого світла. Додайте до цього факт того, що добра половина тієї енергії яку отримує Земля від Сонця, є енергією видимого світла, і ви зрозумієте чому, вивченню такого простого об’єкту як видиме світло, присвячено такий величезний розділ фізики як “оптика”.

Після всього вище сказаного, навіть не зручно додавати, що видиме світло застосовується у всіх приладах геометричної оптики, хвильової оптики, квантової оптики та фотометрії. Що видиме світло, це основний інструмент наукового пізнання Природи. Що видиме світло, це основне джерело наших емоцій та творчих натхнень.

**Ультрафіолетовим випромінюванням** називають ту частину загального спектру електромагнітних хвиль, довжини яких знаходяться в межах від  3,8·10-7м до 10-9м. Джерелом ультрафіолетового випромінювання є особливо інтенсивний (t > 2000°С) тепловий рух атомів та іонів речовини, а також ті внутрішні процеси, що відбуваються в цих частинках при їх енергетичному збуджені. І як ви розумієте, результатом теплового руху частинок є суцільний спектр випромінювання, а результатом внутріатомних процесів – відповідний лінійчатий спектр.

Однією з характерних особливостей ультрафіолетового випромінювання, є його біологічна активність, тобто здатність активно впливати на певні біологічні процеси. І цей вплив може бути як корисним так і шкідливим. Скажімо, помірні дози довгохвильового ультрафіолетового випромінювання (λ > 250нм) позитивно впливають на організм людини, сприяють утворенню вітаміну D, підвищують загальний імунітет організму, тощо. В той же час, надмірні дози такого ж випромінювання, можуть мати негативні наслідки. Якщо ж мова йде про короткохвильову частину ультрафіолетового випромінювання (λ < 200нм), то воно майже безумовно шкідливе. Адже це випромінювання вбиває бактерії, а отже є таким що здатне руйнувати клітини більш складних організмів.

На щастя, атмосфера Землі практично не пропускає короткохвильовий ультрафіолет. Не пропускає головним чином тому, що в ній є достатньо велика кількість вільного кисню (О2) та похідного від нього озону (О3). До речі, факту наявності атмосферного кисню та озону, ми маємо завдячувати все тому ж видимому світлу та фотосинтезу.

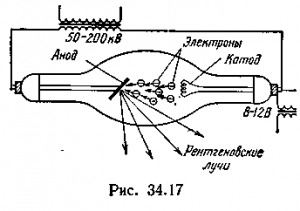
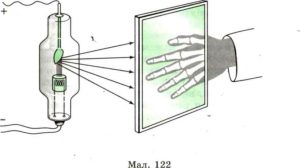
Штучними джерелами ультрафіолетового випромінювання, є спеціальні газорозрядні трубки, які зазвичай називають кварцовими лампами. (Корпусом цих ламп є спеціальне кварцове скло, яке є прозорим не лише для видимого світла а й для світла ультрафіолетового. До речі, звичайне віконне скло ультрафіолет практично не пропускає). Ультрафіолетові лампи широко застосовують в медичних закладах для дезінфекції приміщень. Подібні лампи використовують і в сучасній косметології.

В науці, методами ультрафіолетової спектроскопії досліджують внутрішній устрій речовин. В хімічному виробництві, за допомогою ультрафіолетового випромінювання здійснюють ряд важливих фотохімічних реакцій. Здатність ультрафіолету активізовувати люмінесцентні речовини, застосовується в лампах денного світла, в різноманітних світлових фарбах, в люмінесцентній дефектоскопії, тощо.

**Рентгенівським випромінюванням** називають ту частину загального спектру електромагнітних хвиль, довжини яких знаходяться в межах від 10-8м до 10-12м. (Названо на честь німецького фізика Вільгельма Рентгена (1845-1923), який відкрив та дослідив це випромінювання). Джерелом рентгенівського випромінювання може бути над інтенсивний тепловий рух заряджених частинок речовини (t > 10000°С), а також ті процеси що відбуваються у внутрішніх шарах енергетично збуджених атомів. При цьому, те випромінювання яке утворюється в результаті над інтенсивного теплового руху частинок, створює суцільний спектр рентгенівського випромінювання. А те, яке утворюється в результаті певним чином упорядкованих внутріатомних процесів, створює відповідний лінійчатий спектр.

Потрібно зауважити, коли ми стверджували: “інфрачервоне, видиме та ультрафіолетове випромінювання, виникають в результаті тих процесів які відбуваються в енергетично збуджених атомах” – то мали на увазі енергетичне збудження валентних електронів, тобто електронів зовнішнього енергетичного шару атома. Рентгенівське ж випромінювання, виникає при енергетичному збуджені (перескакуванні на більш високі енергетичні рівні та поверненні з них) електронів внутрішніх шарів атома.

На практиці, рентгенівське випромінювання отримують за допомогою спеціальних приладів, які називаються рентгенівськими трубками (мал.137). Рентгенівська трубка представляє собою потужну вакуумну лампу з двома електродами (анод та катод) між якими створюється потужне електричне поле. Принцип дії цієї системи полягає в наступному. Електрони випромінюються розжареною спіраллю катода і під дією потужного електричного поля летять в напрямку анода, набуваючи при цьому надзвичайно великої швидкості. В момент удару об тіло катода, електрони різко гальмуються і випромінюють відповідні фотони рентгенівського світла.

мал.137.  Схема принципового устрою рентгенівської трубки.

Однією з характерних особливостей рентгенівського випромінювання є здатність проникати крізь оптично непрозорі тіла. Ця здатність широко застосовується в багатьох галузях сучасної науки, промисловості та медицини. Наприклад в медицині, методами рентгенодіагностики виявляють та досліджують механічні ушкодження кісток, наявність сторонніх предметів, пухлин, кровотеч, тощо. Методами рентгенотерапії борються з злоякісними пухлинами. Однак, потрібно мати на увазі, що рентгенівське випромінювання не є безпечним. А це означає, що його медичне застосування має бути обгрунтованим та поміркованим.

**Гама випромінюванням** називають ту частину загального спектру електромагнітних хвиль, довжини яких є меншими за 10-10м. Джерелом гама випромінювання може бути як неймовірно інтенсивний тепловий рух заряджених частинок речовини (t > 50000°С) так і ті процеси які відбуваються в енергетично збуджених атомних ядрах (збуджених в результаті ядерних реакцій, радіоактивного розпаду, тощо). І як ви вже здогадуєтесь, те гама випромінювання яке утворюється в результаті теплового руху частинок речовини, дає суцільний спектр. А те, яке утворюється в результаті певних внутріядерних процесів – відповідний лінійчатий спектр.

Гама випромінювання має надзвичайно велику проникливу здатність і є шкідливим для організму людини. Втім, як і практично завжди, ступінь цієї шкідливості чи не шкідливості залежить від інтенсивності потоку відповідного випромінювання. Скажімо, наше життя нерозривно пов’язане з наявністю певного природнього рівня радіації. І нема жодних свідчень того, що цей природній радіаційний фон є небезпечним для життя. До речі, рентгенівське та гама випромінювання відносять до числа так званих **іонізуючих випромінювань**, які в побутовій практиці називають страшним словом – **радіація**.

Гама випромінювання застосовується в ядерній спектроскопії, гама-дефектоскопії, променевій терапії, тощо. Гама випромінювання є одним поражаючих факторів зброї масового ураження.

Говорячи про різноманіття існуючих в природі електромагнітних хвиль, потрібно наголосити на тому, що ці хвилі утворюють неперервний, суцільний спектр, в якому електромагнітні хвилі якщо і відрізняються одна від одної, то лишу своєю довжиною (частотою коливань). І якщо цей неперервний спектр, ми ділимо на певні класифікаційні групи, то робимо це досить умовно. Ця умовність посилюється ще й фактом того, що одним з головних критеріїв класифікаційного поділу електромагнітних хвиль, є сфера їх практичного застосування. Тому коли, наприклад, електромагнітну хвилю випромінює ваш мобільний телефон, то її називають радіохвилею. Якщо ж точно така хвиля випромінюється батареєю системи опалення, то її називають інфрачервоним випромінюванням. Або якщо, скажімо, хвиля випромінюється рентгенівською трубкою, то її називають рентгенівським випромінюванням. А якщо аналогічна хвиля є результатом ядерної реакції, то її називають гама випромінюванням. Напевно єдиною групою електромагнітних хвиль, межі якої чітко визначені, є видиме світло. Втім, навіть ці межі є досить умовними.

З іншого боку, в неперервному спектрі електромагнітних хвиль, з усією очевидністю проявляється дія **закону переходу кількісних змін в якісні**. В цьому законі стверджується. **Поступові кількісні зміни будь якого параметру об’єкту, рано чи пізно, плавно чи стрімко, призводять до появи значних, якісних змін властивостей цього об’єкту**. В нашому випадку об’єктом досліджень та змін є електромагнітна хвиля. А параметром який кількісно характеризує цей об’єкт – довжина хвилі. Аналізуючи реальні властивості електромагнітних хвиль, не важко помітити, що поступові і на перший погляд несуттєві кількісні зміни їх довжини, рано чи пізно призводять до таких якісних змін властивостей хвиль які дозволяють називати їх то радіохвилями, то інфрачервоним випромінюванням, то видимим світлом, то світлом червоним, то жовтим, а то фіолетовим.

Одним з проявів дії закону переходу кількісних змін в якісні, є факт того, що за певних довжин, електромагнітні хвилі набувають якісно нових властивостей – вони починають вести себе як певні неподільні частинки (корпускули, фотони, кванти). Скажімо, низькочастотні електромагнітні хвилі та радіохвилі квантових властивостей практично не проявляють. І це закономірно. Адже ці хвилі створюються по суті неперервними коливаннями величезної кількості заряджених частинок, джерелом яких є індукційні генератори, лампові чи напівпровідникові ГВЧ та інші їм подібні прилади. Якщо ж мова йде інфрачервоне, видиме, ультрафіолетове, рентгенівське та гама випромінювання, то вони є результатом певних дискретних подій, будь то різкі зміни швидкості при хаотичному русі частинок речовини, чи ті дискретні процеси які відбуваються в енергетично збуджених молекулах, атомах та атомних ядрах.

Експериментальні дослідження показують, що квантові властивості електромагнітних хвиль дійсно починають проявлятись на рівні інфрачервоного випромінювання. При цьому, по мірі зменшення довжини хвиль, їх квантові властивості стають все більш і більш відчутними, а хвильові, навпаки – все менш і менш помітними. Втім, про квантові властивості електромагнітних хвиль, зокрема світлових, ми поговоримо в наступній темі даного розділу.

**Контрольні запитання**

1.Як впливають на організм людини та які відчуття викликають: радіохвилі, інфрачервоне, видиме, ультрафіолетове, рентгенівське та гама випромінювання?

2. Які процеси призводять до створення інфрачервоного випромінювання? Які спектри утворюються в результаті цих процесів?

3. Які процеси призводять до створення ультрафіолетового випромінювання? Які спектри утворюються в результаті цих процесів?

4. Поясніть будову та принцип дії рентгенівської трубки.

5. Які процеси призводять до створення гама випромінювання? Які спектри утворюються в результаті цих процесів?

6. Що стверджується в законі переходу кількісних змін в якісні?

7. Як змінюються хвильові та квантові властивості електромагнітних хвиль, в процесі зменшення довжини цих хвиль?

## Тема5.4. Квантова оптика.

§36. Від теорії теплового випромінювання до квантової оптики.

§37. Фотон та його властивості.

§38. Фотоелектричні ефекти.

§39. Фотохімічні реакції.

§40. Люмінесценція.

§41. Оптичний квантовий генератор (лазер).

§42. Тиск світла. Корпускулярно-хвильовий дуалізм світла.

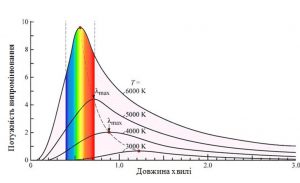
**Тема 5.4    Квантова оптика.**

**Квантова оптика**, це розділ оптики, в якому світло представляють як потік світлових частинок (**фотонів**), та вивчають ті явища які підтверджують цей факт.

**§36. Від теорії теплового випромінювання до квантової оптики.**

Будь яке нагріте тіло, випромінює широкий спектр електромагнітних хвиль. При цьому, велике науково практичне значення має питання про те, як енергія випромінювання нагрітого до певної температури тіла, розподілена між довжинами цих хвиль. Ґрунтовні експериментальні дослідження цього питання були проведені в кінці 19-го століття. Суть цих досліджень полягала в наступному. Потік тих електромагнітних хвиль які випромінювались певним тепловим джерелом, розкладали на відповідний спектр випромінювання. В різні частини цього спектру послідовно вносили зачернену платинову дротину. Поглинаючи електромагнітну енергію дротина нагрівалась, а її температура змінювалась на величину ΔТ. А оскільки дана зміна температури була спричинена поглинанням певної кількості електромагнітної енергії ΔЕ, то величину цієї енергії, можна визначити за формулою ΔЕ=(3/2)kΔТ, де k=1,38·10-23Дж/К – стала Больцмана.

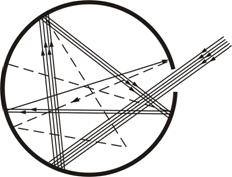
Експериментальні дослідження показали, що кількість тієї електромагнітної енергії яка випромінюється нагрітим до певної температури тілом, в різних спектральних інтервалах є різною. І що залежність інтенсивності випромінювання від довжини їй відповідних хвиль, описується певною характерною кривою. При цьому, кожна температура характеризується своєю кривою. Загальний вигляд деяких, експериментально отриманих кривих розподілу енергії в спектрі нагрітого тіла представлено на мал.138.



Мал.138.  Загальний вигляд кривих розподілу енергії в спектрі нагрітого до різних температур тіла.

Однією з вад вище описаних експериментальних досліджень було те, що в природі не існує абсолютно чорних тіл, тобто таких тіл які б повністю поглинали всю потрапляючу на них електромагнітну енергію. Скажімо, зачорнена платина поглинає близько 98% цієї енергії. А це означає, що результати експериментів, приблизно на 2% відрізняються від реального стану справ. При теоретичних же розрахунках, вчені мають виходити з того, що енергочутливий елемент вимірювального приладу є абсолютно чорним. Тому в науковій практиці існує таке поняття як абсолютно чорне тіло.

**Абсолютно чорне тіло**, це таке умовне тіло, яке повністю поглинає всю потрапляючу на нього електромагнітну енергію та перетворює її на енергію теплового руху частинок тіла. Певним аналогом абсолютно чорного тіла, можна вважати пустотілу посудину, яка має невеликий вхідний отвір і внутрішня поверхня якого покрита енергопоглинаючим матеріалом, наприклад тією ж зачерненою платиною (мал.139). Принцип дії такої системи очевидно простий. Те електромагнітне випромінювання, яке через вхідний отвір, потрапляє в посудину, при кожній взаємодії з її поверхнею на 98% поглинається нею. При цьому ясно, що після ряду таких взаємодій, енергія випромінювання практично повністю поглинеться тілом.



мал.139.  Модель абсолютно чорного тіла.

Важливою особливістю абсолютно чорного тіла є те, що його можна вважати не лише ідеальним поглиначем електромагнітної енергії, а й не менш ідеальним її випромінювачем. Дійсно, перебуваючи в стані термодинамічної рівноваги (Еотр=Евтр), абсолютно чорне тіло не лише поглинає надану йому електромагнітну енергію, а й випромінює точно таку ж кількість цієї енергії. При цьому, спектр випромінювання абсолютно чорного тіла завжди суцільний і так би мовити ідеальний. Зважаючи на ці обставини, в науці ідеальним джерелом світла (електромагнітного випромінювання) прийнято вважати не ідеальну свічку, не ідеальну лампочку розжарювання, а нагріте до певної температури абсолютно чорне тіло. Тому, коли говорять про спектр випромінювання абсолютно чорного тіла, то мають на увазі той ідеальний суцільний спектр, який створюється ідеальним тепловим джерелом світла і параметри якого залежать лише від температури поверхні цього джерела.

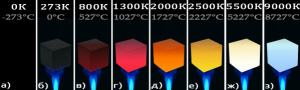
Не буде зайвим ще раз наголосити: абсолютно чорне тіло – це певна модель ідеального теплового приладу, який в залежності від ситуації, може розглядатись і як ідеальний поглинач електромагнітної енергії, і як ідеальний випромінювач цієї енергії. При цьому, абсолютно чорному тілу, зовсім не обов’язково бути чорним. Адже якщо, наприклад, таке тіло нагріти до 2500°С, то воно буде таким же яскравим як спіраль лампочки розжарювання. Загалом же, практично будь яке теплове джерело світла, можна вважати нагрітим до відповідної температури абсолютно чорним тілом. Скажімо, таким тілом можна вважати Сонце та інші подібні зірки.

Аналізуючи криві розподілу енергії в спектрі нагрітого тіла (мал.138), вчені зробили декілька важливих висновків. Перший полягав в тому, що загальна інтенсивність теплового випромінювання нагрітого тіла, певним чином залежить від його температури. Ця залежність була досліджена австрійськими фізиками Йозефом Стефаном (1835-1893) та Людвігом Больцманом (1844-1906). Результати цих досліджень можна сформулювати у вигляді **закону Стефана-Больцмана**: інтенсивність випромінювання абсолютно чорного тіла (R), пропорційна четвертій степені його абсолютної температури (T), тобто  R = σT4 ,  де  σ = 5,67·10-7(Вт/м2К4) – постійна величина, яка називається **сталою Стефана-Больцмана**.

Потрібно зауважити, що в науковій практиці кількість тієї електромагнітної енергії (ΔЕ), що випромінюється одиницею площі поверхні за одиницю часу, називають **інтенсивністю випромінювання**: R=ΔE/SΔt (Вт/м2). При цьому, величину тієї інтенсивності випромінювання яка припадає на певний інтервал довжин хвиль (Δλ) називають **спектральною інтенсивністю випромінювання**: r = ΔR/Δλ  (Вт/м3).

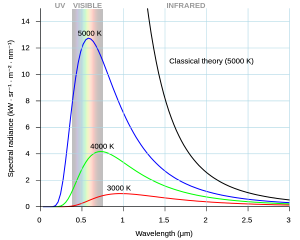
Ще один важливий висновок був сформульований німецьким фізиком Вільгельмом Віном (1864-1928). В цьому висновку (**законі Віна**) стверджується: максимальне значення спектральної інтенсивності випромінювання (rм) абсолютно чорного тіла, припадає на ті хвилі, довжина яких (λм) визначається за формулою λм = b/T, де Т – абсолютна температура тіла;  b = 2,90·10-3м·К – постійна величина яка називається **сталою Віна**.

Закони Стефана-Больцмана та Віна мають достатньо широке науково-практичне застосування. Скажімо, на основі  законів Віна і Стефана-Больцмана та кількісного аналізу спектру випромінювання далекої зірки (а простіше кажучи за кольором зірки), можна точно визначити температуру поверхні цієї зірки та багато інших її енергетичних параметрів (мал.140).  Наприклад, досліджуючи спектр сонячного випромінювання можна експериментально встановити, що максимальне значення його інтенсивності припадає на хвилі з довжиною 5,0·10-7м. А це означає, що згідно з законом Віна, температура поверхні Сонця становить 5800К: Т=b/λм=2,9·10-3м·К/5,0·10-7м = 5800К.  З іншого боку, згідно з законом Стефана-Больцмана R=σT4=6,42·107Вт/м2. А це означає, що кожен квадратний метр поверхні Сонця, щосекундно випромінює 6,42·107Дж енергії. А оскільки загальна площа поверхні Сонця становить S=4πR2=6·1018м2, то можна стверджувати, що Сонце щосекундно випромінює приблизно 3,9·1026Дж електромагнітної енергії.



Мал.140.  На основі аналізу спектру випромінювання будь якого тіла (наприклад далекої зірки) можна точно визначити його температуру.

Аналіз кривих розподілу енергії в спектри абсолютно чорного тіла, не лише сприяв відкриттю низки важливих законів, а й поставив перед вченими надзвичайно складну проблему. Суть проблеми полягала в тому, що експериментальні факти, уособленням яких була крива розподілу енергії в спектрі абсолютно чорного тіла, явно суперечила передбаченням теорії. А теорія стверджувала, що крива розподілу енергії абсолютно чорного тіла, в області ультрафіолетового випромінювання має прямувати в безкінечність (мал.141б). Реальна ж крива, у відповідній області, прямувала не до безкінечності а до нуля (мал.141а).



Мал.141.  Загальний вигляд кривої розподілу енергії в спектрі абсолютно чорного тіла: а) експериментальна крива; б) теоретична крива.

Вихід із цієї кризової ситуації знайшов німецький фізик Макс Планк (1859-1947). Аналізуючи параметри кривої розподілу енергії в спектрі абсолютно чорного тіла, Планк дійшов висновку, що цю криву можна представити у вигляді певної математичної формули, лише в тому випадку, якщо виходити з того, що електромагнітна енергія випромінюється певними порціями. Ці порції були названі **квантами** (віл лат. quantum – певна кількість). Згідно з Планком, енергія кванта електромагнітного випромінювання, зв’язана з його довжиною хвилі (частотою) співвідношенням Е = hc/λ   або  E = hν, де   h – постійна величина, яку згодом назвали сталою Планка. **Стала Планка** – це фундаментальна фізична стала, що є визначальною для широкого кола тих явищ в яких проявляються квантові властивості матерії. За сучасними даними h=6,626176·10-34Дж·с .

Ідея Планка що до квантового характеру випромінювання та поглинання електромагнітних хвиль, не випливала з жодної відомої на той час теорії. По суті, ця ідея була фізичною аксіомою (постулатом), тобто твердженням, яке приймається за істинне без певних теоретичних обгрунтувань. Правильність такого твердження можна підтвердити або спростувати лише експериментально. А експериментальні факти безумовно вказували на те, що ідея Планка є правильною. Перше з таких підтверджень полягало в тому, що Планк, спираючись на ідею енергетичних квантів, зумів отримати таку математичну формулу, яка вточності описувала параметри експериментально встановленої кривої розподілу енергії в спектрі абсолютно чорного тіла. Формула Планка досить складна і тому не є предметом вивчення шкільного курсу фізики. Втім, якщо вам цікаво, то ось ця формула: r = (2π/λ5)·hc2/(ehe/kλT-1),

де r – спектральна інтенсивність випромінювання абсолютно чорного тіла, нагрітого до температури Т та визначена для електромагнітних хвиль з довжиною λ;

h, k, c – фундаментальні фізичні константи, відповідно: стала Планка, стала Больцмана та стала швидкості світла;

е, π – фундаментальні математичні сталі (е = 2,71…; π= 3,14…).

Дивовижним в цій історії було те, що формула Планка не була математичним наслідком певної відомої теорії. Ця формула була результатом глибокого фізико-математичного аналізу відомих експериментальних фактів та того, що прийнято називати інтуїцією вченого.

Та як би там не було, а в 1900 році німецький фізик Макс Планк, висунув науково обгрунтовану гіпотезу про те, що обмін енергією між речовиною та електромагнітним випромінюванням, відбувається певними неподільними порціями – **квантами**. По суті, це означало, що при взаємодії з речовиною, світло веде себе як потік неподільних частинок.

Гіпотеза Планка явно не узгоджувалась з фактом того, що світло має безумовні хвильові властивості. Тому більшість вчених сприйняли цю гіпотезу як певний математичний трюк, який дозволив пояснити особливості розподілу енергії в спектрі абсолютно чорного тіла. Втім, знайшовся сміливець, який не лише сприйняв планківську ідею світлових квантів, а й перетворив її на цілісну наукову теорію. Цим сміливцем був молодий німецький фізик Альберт Ейнштейн (1879-1955).

В 1905 році, аналізуючи прояви зовнішнього фотоефекту Ейнштейн прийшов до твердого переконання: світло не просто випромінюється та поглинається певними енергетичними порціями, а дійсно складається з окремих неподільних частинок, які мають певну енергію, певну масу, певний імпульс та інші ознаки цілісних, неподільних частинок. Ці світлові частинки були названі **фотонами** (від грец. photos – світло). Спираючись на квантову (фотонну) теорію світла, Ейнштейн кількісно пояснив такі явища як фотоефект, фотохімічні реакції, фотолюмінесценцію та фотоіонізацію. Більше того, в 1907 році, ідеї квантової теорії, Ейнштейн розповсюдив на фізичні процеси безпосередньо не пов’язані з світлом. Зокрема кількісно пояснив факт того, що в процесі охолодження, питома теплоємність твердих тіл зменшується.

Подальший розвиток квантових ідей Планка-Ейнштейна, призвів до створення цілісної системи знань, яка є одним з стовпів сучасної фізики і яка пояснила все різноманіття тих подій що відбуваються в світі молекул, атомів, атомних ядер та елементарних частинок.

**Словник фізичних термінів**

**Абсолютно чорне тіло** – це таке умовне, ідеалізоване тіло, яке в залежності від ситуації, можна вважати як таким, що поглинає увесь спектр електромагнітних хвиль, так і таким, що випромінює аналогічний спектр.

**Закон Стефана-Больцмана** – це закон, в якому стверджується: інтенсивність випромінювання абсолютно чорного тіла (R), пропорційна четвертій степені його абсолютної температури (T), тобто  R = σT4 ,  де  σ = 5,67·10-7(Вт/м2К4) – постійна величина, яка називається **сталою Стефана-Больцмана**.

**Закон Віна** – це закон, в якому стверджується: максимальне значення спектральної інтенсивності випромінювання (rм) абсолютно чорного тіла, припадає на ті хвилі, довжина яких (λм) визначається за формулою λм = b/T , де Т – абсолютна температура тіла;  b = 2,90·10-3м·К – постійна величина яка називається **сталою Віна**.

**Інтенсивність випромінювання** – це фізична величина, яка характеризує питому потужність джерела електромагнітного випромінювання і яка показує скільки електромагнітної енергії випромінюється одиницею площі поверхні даного джерела за одиницю часу.

Позначається:  R

Визначальне рівняння:   R = ΔE/SΔt

Одиниця вимірювання:  [R] = Вт/м2 .

**Спектральна інтенсивність випромінювання** – це фізична величина, яка характеризує величину тієї інтенсивності випромінювання, що припадає на певний інтервал довжин хвиль (Δλ)

Позначається:  r

Визначальне рівняння:  r = ΔR/Δλ

Одиниця вимірювання:  [r] = Вт/м3.

**Контрольні запитання**

1.Поясніть суть тих експериментів які дозволили з’ясувати розподіл інтенсивності випромінювання в спектра нагрітого тіла.

2. Матеріальна точка, ідеальний газ, абсолютно чорне тіло – що спільного між цими термінами?

3. Що мають на увазі вчені, коли стверджують: Сонце – це абсолютно чорне тіло?

4. Чи може абсолютно чорне тіло бути: червоним, зеленим, білим, синім? Від чого це залежить?

5. Як вчені вимірюють температуру далеких зірок?

6. Поясніть суть тієї проблеми що виникла в процесі дослідження кривої розподілу енергії в спектрі абсолютно чорного тіла.

7. Як вирішив цю проблему Макс Планк?

**Вправа 17.**

1.У скільки разів інтенсивність випромінювання абсолютно чорного тіла при температурі 100°С більша аніж при 0°С?

2. В топці системи опалення підтримується температура 800°С. скільки енергії щосекунди надходить в кімнату через відчинені дверцята топки, якщо їх розміри (22×15)см2?

3. Температура нитки розжарювання електричної лампочки 2500°С. Хвилі якої довжини створюють максимальну інтенсивність випромінювання ?

4. В спектрі зірки максимум спектральної інтенсивності припадає на хвилі довжиною 400нм. Визначте температуру поверхні цієї зірки. Скільки енергії щосекундно випромінює така зірка якщо її радіус 7·108м?

5. Шматок платини загальною площею поверхні 10см2 має температуру 1773°С. Яка потужність потрібна для того щоб підтримувати цю температуру? Якого кольору за даних умов буде платина?

**§37. Фотон та його властивості.**

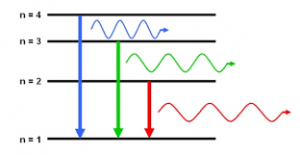
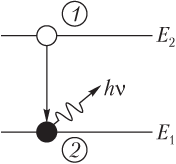
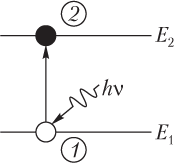
В квантовій оптиці, світло представляють як потік особливих світлових частинок, які прийнято називати фотонами. **Фотон**, це неподільний квант електромагнітного випромінювання (світла), який по суті представляє собою певну елементарну частинку з певним набором фізичних властивостей: певною енергією, масою, імпульсом, зарядом, спіном, тощо. **Елементарною частинкою** називають таку неподільну матеріальну частинку, яка не має певного внутрішнього устрою, тобто не складається з більш простих матеріальних частинок. Пояснюючи загальні властивості фотонів, можна сказати наступне.

1.За будь яких обставин і в будь якому середовищі фотони рухаються з швидкістю с=3,0·108м/с=const. При цьому, ця швидкість є абсолютно незмінною, тобто такою, яку не можливо ані збільшити, ані зменшити і яка не залежить ані від швидкості руху джерела фотонів, ані від швидкості руху спостерігача. З цією швидкістю фотон народжується (випромінюється) і на цій же швидкості помирає (поглинається).

На перший погляд, твердження про те, що в будь якому середовищі швидкість світлових фотонів є незмінною і чисельно рівною 3,0·108м/с, явно суперечить факту того, що в різних середовищах швидкість світла є різною. Дійсно. Вивчаючи геометричну та хвильову оптику ми з’ясували, що заломлення світла відбувається тому, що його швидкість в різних середовищах є різною. Наприклад в склі (n=1,5) світло розповсюджується в 1,5 рази повільніше аніж у вакуумі, тобто з швидкістю 2,0·108м/с. З іншого боку, ми стверджуємо, що в будь якому середовищі, в тому числі і склі, ті частинки з яких складається світло, рухаються з швидкістю 3,0·108м/с.

Пояснення даного парадоксального факту, полягає в розумінні механізму розповсюдження світла в будь якому речовинному середовищі. А цей механізм полягає в наступному. Експериментальні та теоретичні дослідження показують, що в будь якому атомі, електрони можуть знаходитись лише на певних, енергетично дозволених рівнях. При цьому, в процесі поглинання певного світлового фотона, електрон перескакує на відповідний більш високий енергетичний рівень (мал.142а). А при падінні з цього рівня, електрон випромінює аналогічний фотон (мал.142б).

Зважаючи на вище сказане, процес розповсюдження світла в будь якому речовинному середовищі виглядає наступним чином. Світловий фотон, з швидкістю 3·108м/с рухається в міжатомному середовищі. Час від часу цей фотон зустрічається з тим чи іншим атомом і поглинається ним. При цьому певний електрон перескакує на відповідний (відповідний енергії фотона) більш високий енергетичний рівень. Коли ж цей енергетично збуджений електрон повертається на попередній рівень, то випромінюється новий, але абсолютно такий же, фотон. Цей новий фотон з швидкістю 3·108м/с летить до нової зустрічі з атомом. Знову поглинається … випромінюється і т.д.



Мал.142 В процесі розповсюдження світла, атоми середовища постійно поглинають та випромінюють світлові фотони.

Тепер, коли ви знаєте що в процесі розповсюдження світла, атоми середовища постійно поглинають та випромінюють світлові фотони, не важко збагнути, чому та результуюча швидкість яку ми називаємо швидкістю світла в даному середовищі, завжди менша за швидкість руху світлових фотонів. Правильно: процес поглинання-випромінювання має певну тривалість і тому та результуюча швидкість, яку ми називаємо швидкістю світла в даному середовищі і яка враховує не лише тривалість польоту фотонів від атома до атома, а й тривалість процесів поглинання-випромінювання фотонів, завжди менша за швидкість руху самих фотонів. При цьому, в тих оптично прозорих середовищах де взаємодії фотонів з атомами відбуваються рідко, наприклад у повітрі та інших газах, різниця між швидкістю світла в середовищі та швидкістю фотонів є незначною. В тих же середовищах де такі взаємодії відбуваються часто, ця різниця буде відповідно великою.

Більше того, стає очевидно зрозумілим, чому в одному і тому ж середовищі синє світло розповсюджується повільніше за зелене, а зелене – повільніше за червоне. Адже ясно, що перехід електрона на більш високий (синій) енергетичний рівень, потребує більших часових затрат. Тому для синіх фотонів тривалість циклу поглинання-випромінювання, буде найбільшою, а для червоних – найменшою. При цьому, результуюча швидкість синього світла буде найменшою, а червоного – найбільшою. Що власне і підтверджує те явище, яке називається дисперсією світла.

2.Фотон має енергію, величина якої визначається за формулою  Е = hc/λ,  де  h=6,63·10-34Дж·с – стала Планка;  с=3·108м/с – швидкість фотона;  λ – довжина хвилі фотона.

Не важко бачити, що фотони різної довжини хвилі (різного кольору) мають різну енергію. Наприклад, енергія фотона з довжиною хвилі 750нм (червоне випромінювання) становить 2,65·10-19Дж, а енергія фотона з довжиною хвилі 400нм (фіолетове випромінювання) дорівнює 4,97·10-19Дж. Зауважимо, що на практиці енергію атомів, молекул та елементарних частинок (в тому числі і фотонів) часто вимірюють не в джоулях, а в значно дрібніших одиницях, які називаються **електрон-вольтами** (еВ): 1еВ=1,6·10-19Дж.

3. Фотон має масу, величина якої визначається за формулою m=E/c2=h/cλ.

Говорячи про масу фотона, мають на увазі так звану масу руху, тобто ту масу яка є еквівалентом кінетичної енергії частинки. Якщо ж говорити про масу спокою фотона (m0), то вона дорівнює нулю (m0=0). І це закономірно. Адже в стані спокою фотон просто не існує. В момент випромінювання, фотон “народжується”, отримуючи при цьому певну швидкість, енергію та масу. А в момент поглинання – фотон “помирає”, втрачаючи при цьому свою швидкість, енергію та масу.

Із аналізу формули  m=h/cλ  ясно, що різні фотони мають різну масу і що величина цієї маси залежить від довжини хвилі (кольору) фотона. При цьому не важко визначити, що для λ=750нм, m=2,95·10-34кг, а для λ=400нм, m=5,53·10-34кг. Для порівняння: маса найлегшого атома (атома водню) становить 1,66·10-27кг, а маса електрона – 9,1·10-31кг. Зауважимо, що в науковіq практиці маси атомів, молекул та елементарних частинок часто вимірюють не в кілограмах, а в значно дрібніших одиницях, які називаються **атомними одиницями маси** (а.о.м.): 1а.о.м.=1,66·10-27кг.

4. Фотон має імпульс, величина якого визначається за формулою р=mc=h/λ.

5. Фотон – частинка незаряджена, тобто така, електричний заряд якої дорівнює нулю: q=0.

6. Фотон має й інші властивості, зокрема ту, яка описується величиною під назвою **спін**. Про суть цієї величини, ми поговоримо дещо пізніше. Тому на разі просто зауважимо, що спін фотона дорівнює одиниці.

Аналізуючи властивості фотона, не важко бачити, що вони кардинально відрізняються від властивостей звичних для нас частинок будь то камінь, піщинка чи атом. Дійсно. Звичайна частинка має певну масу спокою (m0 > 0), тоді як маса спокою фотона дорівнює нулю (m0 = 0). Звичайна частинка може знаходитись як в стані спокою, так і в стані руху, тоді як фотон – лише в стані руху. Звичайна частинка може рухатись з будь якою швидкістю що не перевищує швидкість фотона (0 ≤ v < c), а фотон – лише з швидкістю с=3·108м/с. Основною характеристикою звичайної частинки є її маса (m), а основною характеристикою фотона – його довжина хвилі (λ). Кінетичну енергію та імпульс звичайної частинки визначають за формулами Е=mv2/2; p=mv, а відповідні параметри фотона – за формулами E=hc/λ; p=h/λ. Для звичайної частинки тією величиною яка вимірюється і через яку визначають всі інші величини є маса, а для фотона – довжина хвилі.

|  |  |
| --- | --- |
| **Звичайна частинка** | **Фотон** |
| **.                                                                               швидкість** | |
| **0 ≤ v < c** | **v = c = 3·108м/с** |
| **.                                                                             маса  спокою** | |
| **m0 > 0** | **m0 = 0** |
| **.                                                              основна характеристика** | |
| **маса:  m   (кг)** | **довжина хвилі:   λ  (м)** |
| **.                                                                                енергія** | |
| **Е = mv2/2** | **E = hc/λ** |
| **.                                                                            імпульс** | |
| **p = mv** | **p = h/λ** |
| **.                                                                                  маса** | |
| **вимірюється** | **m = h/cλ** |

По суті, фотон є одночасно як частинкою так і хвилею. Власне факт того, що основні параметри фотона (енергія, маса, імпульс) визначаються через певне поєднання сталої Планка (h) та довжини хвилі (λ) є математичним відображенням його корпускулярно-хвильового дуалізму. Адже стала Планка по суті є ознакою дискретності відповідного об’єкту. Натомість довжина хвилі – це очевидна ознака хвильового процесу. Корпускулярно-хвильовий дуалізм фотона проявляється і в тому, що для нього, такі звичні поняття як розміри, форма, траєкторія руху, тощо, втрачають сенс.

Таким чином, з точки зору нашого повсякденного досвіду, фотони, це надзвичайно дивні частинки-хвилі, які не схожі на жоден з тих об’єктів з якими ми маємо справу в повсякденному життя. Однак, якщо на фотон подивитись з точки зору того мікросвіту який вивчає та пояснює квантова фізика, то неодмінно з’ясується, що фотон мало чим відрізняється від тих елементарних частинок які називаються протонами, електронами, нейтронами, мезонами, тощо. Втім, про ці частинки та їх корпускулярно-хвильові властивості ми поговоримо в розділі “Фізика атома та атомного ядра”. На разі ж зауважимо, що в рамках квантової оптики ті дивні частинки-хвилі які називаються фотонами, ми будемо представляти як певні неподільні частинки матерії. І якщо вам зручно вважати ці частинки дрібненькими кульками, то можете вважати саме так.

На завершення додамо, що параметри фотона часто виражають не через довжину хвилі (λ=vT=v/ν), а через частоту її коливань (ν):

E = hc/λ = hν ;

m = h/cλ = hν/c2 ;

p = h/λ = hν/c .

Однак, зважаючи на те, що в хвильовій оптиці, параметри світлової хвилі ми звикли виражати через її довжину, то й параметри фотона будемо виражати через цю довжину.

**Словник фізичних термінів**.

**Фотон**, це елементарна частинка, яка представляє собою неподільний квант електромагнітного випромінювання, з наступним набором властивостей

1.Фотон – частинка не заряджена (q=0) з нулевою масою спокою (m0=0).

2. За будь яких обставин і в будь якому середовищі, фотони рухаються з швидкістю с=3,0·108м/с=const.

3. Фотон має енергію, величина якої визначається за формулою Е = hc/λ,  де  h=6,63·10-34Дж·с – стала Планка;  с=3·108м/с – швидкість фотона;  λ – довжина хвилі фотона.

4. Фотон має масу, величина якої визначається за формулою m=E/c2=h/cλ.

5. Фотон має імпульс, величина якого визначається за формулою р=mc=h/λ.

**Контрольні запитання**

1.Посніть, чому в вакуумі швидкість світла і швидкість фотонів є однаковою, а в речовинному середовищі швидкість світла завжди менша за швидкість фотонів?

2. Відомо, що атоми водню випромінюють фотони червоного, голубого та фіолетового світла. Які з цих фотонів мають найбільшу енергію? Чому?

3. Чому в склі швидкість синього світла менша аніж зеленого, а зеленого – менша аніж червоного?

4. Чи однакову масу мають червоний, зелений та синій фотони? Чому?

5. Порівняйте властивості фотонів та звичайних частинок.

6.Про що говорить факт того, що основні параметри фотона (енергія, маса, імпульс) виражаються через певне поєднання сталої Планка та довжини хвилі?

**Вправа 18.**

1.Доведіть що формули E=hc/λ та  E=hν є тотожними.

2. Визначте енергію та масу фотона з довжиною хвилі 550нм. Виразіть ці величини відповідно в електрон-вольтах та а.о.м. Порівняйте масу фотона з масою електрона та масою найлегшого атома.

3. Фотон якої довжини хвилі має енергію 3,0еВ? Яка маса та імпульс цього фотона?

4. Порівняйте енергію усередненого світлового фотона (λ=550нм) з середньою кінетичною енергією молекул речовини при температурі 27°С.

5. При якій температурі, середня кінетична енергія молекул речовини дорівнюватиме енергії усередненого світлового фотона (λ=550нм)?

**§38. Фотоелектричні ефекти.**

**Фотоелектричними ефектами** називають ті явища, які підтверджують квантові властивості світла і при яких, поглинання світлових фотонів речовиною, супроводжується тими чи іншими дискретними електричними ефектами (подіями, змінами): вильотом електрона за межі речовини, відривом електрона від атома речовини, іонізацією обособлених атомів та молекул, тощо.

Як відомо, Генріх Герц був першим, хто експериментально підтвердив справедливість теорії електромагнітного поля, а разом з тим, остаточно довів що світло, це потік електромагнітних хвиль. І потрібно ж такому статися, щоб саме Герц відкрив явище, яке безумовно вказувало на те, що світло це не потік неперервних хвиль, а потік особливих світлових частинок (фотонів). В 1887 році, працюючи над створенням приладу для генерації та реєстрації електромагнітних хвиль, Герц звернув увагу на те, що в потоці ультрафіолетового випромінювання, негативно заряджений електрод (катод) надмірно швидко розряджається, тобто інтенсивно втрачає електрони. Згодом, дане явище назвали**фотоефектом** а точніше – **зовнішнім фотоефектом**. Герц описав явище фотоефекту, але не пояснив його. І це закономірно. Адже в ті часи вчені не знали а ні про існування світлових фотонів, а ні про існування електронів.

Сам по собі факт того, що в світловому потоці металева пластина втрачає (емітує, випромінює, випаровує) електрони, ще не означав що світло це потік певних частинок. Адже потрібну для “випаровування” енергію, електрони могли отримувати і від світлових хвиль. Однак, дослідження показали, що для кожного матеріалу існує певна межа, яка розділяє світло на те, в потоці якого електрони вилітають і те в потоці якого вони не вилітають. Наприклад для калію, цією межею є довжина хвилі 560нм (жовто-зелене випромінювання). При цьому, в потоці хвиль більшої довжини (інфрачервоне, червоне, оранжеве та жовте випромінювання) фотоефект не відбувається. Не відбувається навіть в надпотужних світлових потоках. В потоці ж хвиль меншої довжини (зелене, голубе, синє, фіолетове та ультрафіолетове випромінювання) – фотоефект відбувається. Відбувається навіть тоді, коли відповідний потік є гранично слабким.

Пояснити даний експериментальний факт з точки зору хвильової теорії світла не можливо. Навіть якщо виходити з того, що питома енергоємність фіолетової хвилі в два рази більша за питому енергоємність хвилі червоної, залишається незбагненним: чому тисячі червоних хвиль не можуть зробити те, що робить одна фіолетова хвиля.

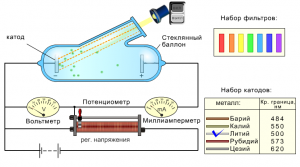
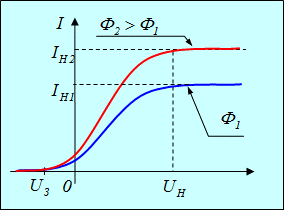
Факт того, що зовнішній фотоефект починає відбуватися лише з певної, чітко визначеної межі, можна пояснити лише в тому випадку, якщо виходити з того, що світло поглинається певними енергетичними порціями. Дійсно. Метал представляє собою таку кристалічну структуру, атоми якої постійно обмінюються валентними електронами. Ці електрони можуть вільно переміщуватись від атома до атома. Але вони не можуть безперешкодно залишити межі самого шматка металу. Для того щоб це сталося, електрон повинен отримати певну кількість енергії. І цієї енергії має бути не менше аніж так звана робота виходу електрона (Е ≥ Ав). При цьому, дану кількість енергії електрон повинен отримати цілісною порцією. Адже якщо ця кількість буде меншою за роботу виходу (Е < Ав), то електрон, умовно кажучи “підстрибне” і повернеться назад в метал. І скільки б таких порцій електрон не отримував, скільки б не підстрибував, він все рівно не зможе вилетіти за межі металу.

Нагадаємо, **роботою виходу електрона** (позн. Ав) називають ту мінімальну кількість енергії, яку потрібно надати електрону, щоб він безповоротно вилетів за межі даного тіла. Робота виходу електрона визначається експериментально і записується у відповідну таблицю.

Характеризуючи явище зовнішнього фотоефекту, часто говорять не про роботу виходу електрона, а про величину яка пов’язана з цією роботою і яка називається червоною межею фотоефекту. **Червоною межею фотоефекту** (позн λгр) називають ту гранично велику довжину хвилі, при якій ще відбувається зовнішній фотоефект і при якій виконується співвідношення hc/λгр=Ав. Іншими словами, червона межа фотоефекту розділяє неперервний спектр випромінювання на те випромінювання при якому фотоефект відбувається (λ ≤ λгр), та те – при якому фотоефект не відбувається (λ > λгр).

Як і робота виходу електрона, червона межа фотоефекту визначається експериментально і записується у відповідну таблицю. Наприклад, для оксиду барію λгр=1242нм, для цезію λгр=686нм; для рубідію λгр=575нм; для калію λгр=560нм; для літію λгр=522нм; для барію λгр=500нм; для алюмінію λгр=292нм; для міді λгр=282нм, і т.д. Власне червона межа фотоефекту та робота електрона з речовини, це дві взаємо пов’язані величини. Тому знаючи одну, не важко визначити іншу і навпаки: λгр=hc/Ав; Aв=hc/λгр.

Загальний устрій приладу для дослідження зовнішнього фотоефекту представлено на мал.143. Центральним елементом цього приладу є спеціальна вакуумна лампа, катодом якої є досліджуваний матеріал. Принцип дії приладу полягає в наступному. Від джерела світла, світловий потік проходячи світофільтр, у вигляді монохроматичного світла потрапляє на катод вакуумної лампи. За наявності фотоефекту, ті електрони що вилітають з катода направляються до анода лампи. При цьому в електричному колі виникає відповідний електричний струм. Змінюючи напругу між електродами та параметри світлового потоку (інтенсивність та колір світла) досліджують закономірності фотоефекту. А результати цих досліджень представляють у вигляді відповідних воль-амперних характеристик та відповідних висновків.

Мал.143. Загальний устрій приладу для дослідження фотоефекту. Вольт-амперна характеристика зовнішнього фотоефекту.

На мал.143б представлені дві воль-амперні характеристики, які відображають закономірності зовнішнього фотоефекту за тієї умови, що частотні параметри (колір) досліджуваного світла залишаються незмінними. Аналізуючи ці вольт-амперні характеристики можна зробити наступні висновки.

1.Факт того, що навіть за відсутності між електродної напруги (U=0), в електричному колі протікає певний струм, вказує на те, що вилітаючі з речовини фотоелектрони, маючи певний запас кінетичної енергії. Максимальну величину цієї енергії (Ек=mevм2/2), можна визначити із наступних міркувань. Оскільки та затримуюча напруга (Uз=Аз/q=ΔЕз/е) при якій припиняється фотострум, фактично йде на те щоб зменшити кінетичну енергію найбільш енергійних фотоелектронів до нуля (Аз=ΔЕз=Ек-0=Ек), то можна стверджувати, що максимальна величина цієї енергії має визначатись за формулою Ек=Uзe, де е=1,6·10-19Кл – заряд електрона.

2. Оскільки при різних інтенсивностях світлового потоку (Ф1≠ Ф2) величина затримуючої напруги залишається незмінною, то це означає, що величина максимальної кінетичної енергії фотоелектронів, не залежить від інтенсивності світлового потоку. Ця величина залежить від довжини хвилі (кольору) того світла що спричиняє фотоефект (на даній вольт-амперній характеристиці, ця залежність не відображена).

3. Факт того, що при певній напрузі (Uн) фотострум досягає певної граничної величини (Ін), і що при більших світлових потоках (Ф2>Ф1) ця гранична величина стає більшою (Ін2>Ін1), вказує на те, що величина фотоструму залежить від інтенсивності світлового потоку, і що вона обмежена кількістю фотонів у цьому потоці.

В 1905 році Ейнштейн, виходячи з того, що світло це потік світлових фотонів, енергія яких визначається за формулою Е=hc/λ, кількісно пояснив суть та прояви зовнішнього фотоефекту. А ця суть полягає в наступному. В процесі взаємодії з речовиною, енергія фотона передається електронам речовини. При цьому: якщо енергія фотона більша за роботу виходу електрона або дорівнює їй (Е ≥ Ав), то фотоефект відбувається, а якщо менша (Е < Ав) – не відбувається.

Ейнштейн не лише пояснив фізичну суть зовнішнього фотоефекту, а й сформулював основний закон цього явища. Цей закон прийнято називати рівнянням Ейнштейна для фотоефекту. **Рівнянням Ейнштейна для фотоефекту**, це закон в якому стверджується: при зовнішньому фотоефекті, енергія фотона частково йде на виконання роботи виходу електрона, а частково – на надання цьому електрону певної кінетичної енергії, при цьому виконується співвідношення    hc/λ = Aв + mevм2/2 , де  mevм2/2 – максимальна кінетична енергія емітованих фотоелектронів.

Не важка збагнути, що рівняння Ейнштейна для фотоефекту по суті є певним формулюванням закону збереження енергії. Адже в цьому рівнянні (законі) фактично стверджується, що при зовнішньому фотоефекті енергія фотона нікуди не зникає, а йде на виконання роботи виходу електрона та на надання йому відповідної кінетичної енергії.

Аналізуючи рівняння Ейнштейна, ви можете запитати: “А чому в цьому рівнянні мова йде про максимальну кінетичну енергію емітованих при фотоефекті електронів?”. Відповідаючи на це запитання можна сказати наступне. Дослідження показують, що в потоці монохроматичних (однакових за енергією) фотонів, кількість емітованих електронів (фотоелектронів) значно менша за кількість поглинутих тілом фотонів. При цьому кінетична енергія різних фотоелектронів є різною і такою що знаходиться в межах від нуля до певної максимальної величини (0 ≤ Ек ≤ mevм2/2). Даний факт пояснюється тим, що зовнішній фотоефект є результатом трьох послідовних процесів: 1) поглинання світлового фотона (в процесі цього поглинання, енергія фотона передається електрону речовини); 2) руху електрона до поверхні тіла (в процесі цього руху, частина наданої електрону енергії, безповоротно втрачається); 3) виходом електрона за межі тіла (в процесі цього виходу енергія електрона зменшується на величину його роботи виходу).

Враховуючи вище сказане, не важко збагнути, що ті електрони які знаходяться в поверхневому шарі речовини, при поглинанні фотона вилітають з максимально великою кінетичною енергією (Ек=mevм2/2). Електрони ж внутрішніх шарів речовини, в процесі свого руху до поверхні тіла, частину наданої їм енергії втрачають і тому вилітають з відповідно меншою енергією. Якщо ж енергія втрат є надто великою, то такий електрон за межі тіла взагалі не вилітає.

Говорячи про зовнішній фотоефект, доречно згадати, що з проявами та застосуваннями цього явища ми зустрічались в процесі вивчення теми “Електричний струм в вакуумі” (розділ “Електродинаміка”). Просто тоді зовнішній фотоефект ми називали **фотоелектронною емісією**.

Зовнішній фотоефект є характерним для металів. І це закономірно. Адже в металах валентні електрони є колективізованими, тобто такими які постійно знаходяться в міжатомному просторі (в зоні провідності). В такій ситуації емісія електронів забезпечується відносно невеликою кількістю енергії, величина якої співрозмірна з енергією фотонів видимого та ультрафіолетового випромінювання. Якщо ж говорити про ті матеріали які називаються діелектриками (непровідниками), то в них валентні електрони міцно прив’язані до своїх атомів. А це означає, що такий електрон спочатку потрібно відірвати від свого атома (виконати роботу іонізації Аі), а потім – відірвати від речовини (виконати роботу виходу Ав). При цьому в діелектриках робота іонізації значно перевищує енергію фотонів помірковано жорсткого ультрафіолетового випромінювання (Аі>7еВ). В такій ситуації фотони видимого та ультрафіолетового випромінювання не можуть не те що б вибити електрон за межі речовини, а навіть відірвати його від свого атома.

Втім, існує група матеріалів, для яких робота іонізації є відносно малою (Аі < 3еВ). Ці матеріали називаються напівпровідниками. В потоці світла в напівпровідниках відбувається так званий внутрішній фотоефект. **Внутрішній фотоефект**, це явище, суть якого полягає в тому що при взаємодії світла з речовиною (зазвичай з напівпровідниками), енергія фотонів дискретним чином передається електронам речовини. При цьому відповідні електрони відриваються від своїх атомів, але не вилітають за межі речовини. Прямим наслідком внутрішнього фотоефекту є факт того, що в світловому потоці відповідний матеріал (напівпровідник) із непровідника перетворюється на провідник.

При внутрішньому фотоефекті, квантовий характер світла проявляється в тому, що для кожної речовини існує своя червона межа внутрішнього фотоефекту (λгр), тобто та гранична довжина хвилі, яка розділяє неперервний спектр електромагнітного випромінювання на те, при якому внутрішній фотоефект відбувається (λ ≤ λгр) та те, при якому цей ефект не відбувається (λ>λгр).

Внутрішній фотоефект (фотоефект в напівпровідниках) корисно застосовують в різноманітних напівпровідникових фотоприладах. Про призначення будову та принцип дії цих приладів ми говорили вивчаючи тему “Напівпровідникові прилади” (розділ “Електродинаміка”).

До числа фотоелектричних явищ (ефектів) можна віднести і те, яке називають фотоіонізацією газу або фотоефектом в газах. **Фотоіонізація газу**, це явище, суть якого полягає в тому, що при взаємодії світла з обособленими молекулами (атомами) газу, енергія фотонів дискретним чином передається електронам цих молекул. При цьому молекули газу іонізуються. Дослідження показують, що енергія іонізації обособлених молекул більшості газів є дуже великою (Аі>12еВ). А це означає що фотони видимого та ультрафіолетового випромінювання іонізувати молекули газу (зокрема повітря) не можуть. Фотоіонізація газу відбувається під дією фотонів рентгенівського та гама випромінювань. І потрібно сказати, що для кожної різновидності обособлених молекул (атомів) існує своя червона межа фотоіонізації. Зазвичай, фотоіонізація є тим допоміжним видом іонізації газу, який в тій чи іншій мірі сприяє газовим розрядам.

Завершуючи розмову про фотоелектричні ефекти, ще раз наголосимо на тому, що в цих явищах, квантовий характер світла проявляється в тому, що енергія фотона дискретним чином передається електрону речовини. При цьому, в залежності від ситуації цей електрон може: а) вилетіти за межі речовини (зовнішній фотоефект); б) відірватись від свого атома і стати електроном провідності (внутрішній фотоефект); в) відірватись від обособленої молекули газу, спричиняючи тим самим її іонізацію (фотоіонізація газу).

**Словник фізичних термінів**

**Зовнішній фотоефект (фотоефект)** – це явище, суть якого полягає в тому, що при взаємодії світла з речовиною (зазвичай з металами), енергія фотонів дискретним чином передається електронам речовини. При цьому відповідні електрони вилітають за межі речовини.

**Рівнянням Ейнштейна для фотоефекту**, це закон в якому стверджується: при зовнішньому фотоефекті, енергія фотона частково йде на виконання роботи виходу електрона, а частково – на надання цьому електрону певної кінетичної енергії, при цьому виконується співвідношення

hc/λ = Aв + mevм2/2.

**Червоною межею фотоефекту** (позн λгр) називають ту гранично велику довжину хвилі, при якій ще відбувається зовнішній фотоефект і при якій виконується співвідношення hc/λгр=Ав.

**Внутрішній фотоефект**, це явище, суть якого полягає в тому що при взаємодії світла з речовиною (зазвичай з напівпровідниками), енергія фотонів дискретним чином передається електронам речовини. При цьому відповідні електрони відриваються від своїх атомів, але не вилітають за межі речовини.

**Фотоіонізація газу**, це явище, суть якого полягає в тому, що при взаємодії світла з обособленими молекулами (атомами) газу, енергія фотонів дискретним чином передається електронам цих молекул. При цьому молекули газу іонізуються.

**Контрольні запитання**

1.Яка особливість зовнішнього фотоефекту вказує на те, що світло поглинається певними порціями?

2. Чи вказує червона межа фотоефекту на те, що мова йде про червоне світло? На що вказує ця межа?

3. Чому зовнішній фотоефект є характерним для металів а не для діелектриків?

4. Поясніть, чому при зовнішньому фотоефекті, кінетична енергія фотоелектронів є різною (навіть за умови, що енергія фотонів однакова)?

5. Поясніть фізичну суть внутрішнього фотоефекту і чому цей фотоефект є характерним для напівпровідників?

5. В чому проявляється квантовий характер світла при внутрішньому фотоефекті?

7. Поясніть, чому фотоіонізація газу не відбувається в потоці видимого світла?

**Вправа 19.**

1.Червона межа фотоефекту для натрію 530нм. Визначте роботу виходу електронів з натрію (в джоулях та електрон-вольтах).

2. Робота виходу електронів для золота становить 4,59еВ. Визначте червону мажу фотоефекту для золота. Чи виникатиме фотоефект при опроміненні золота видимим світлом?

3. Яку максимальну кінетичну енергію та максимальну швидкість матимуть ті фотоелектрони які вилітають з кадмію (Ав=2,26еВ) при його опроміненні світлом з частотою 6·1016Гц?

4. Визначити довжину хвилі того світла яким опромінюють поверхню металу, якщо максимальна швидкість фотоелектронів 2·107м/с, а робота виходу електронів із металу 4,3еВ.

5. Усамітнену срібну кульку опромінюють світлом з довжиною хвилі 200нм. До якого потенціалу зарядиться кулька, якщо для срібла Ав=4,3еВ?

6. До вакуумного фотоелементу, катод якого виготовлено із оксиду барію (Ав=1,0еВ) прикладено запираючу напругу 2,0В. При якій довжині падаючого на катод світла, виникне фотоефект?

**§39. Фотохімічні реакції.**

**Фотохімічними реакціями** називають такі хімічні реакції, які відбуваються за активної участі видимого або ультрафіолетового світла. Зазвичай фотохімічні реакції відбуваються в два етапи. На першому (первинному) етапі, в процесі поглинання світлового фотона, відповідна молекула (атом) активізується, тобто переходить до такого енергетично збудженого стану, який характеризується підвищеною хімічною активністю. На другому (вторинному) етапі, активізована молекула (атом), хімічно взаємодіє з іншими активізованими або не активізованими молекулами.

Дослідження показують, фотоактивізація молекул (атомів) може відбуватися трьома шляхами:

1)  шляхом дисоціації молекули, тобто шляхом її розпаду на дві більш прості та хімічно більш активні частини:  М + hс/λ → А + В;

2) шляхом іонізації молекули, тобто шляхом втрати нею валентного електрона:  М + hс/λ → М+ + е– ;

3) шляхом переходу молекули в енергетично збуджений стан, тобто шляхом переходу її валентного електрона на більш високий енергетичний рівень М + hс/λ → М\*.

По суті, певний фото процес відбувається на першому (первинному) етапі фотохімічної реакції. Вторинний же етап цієї реакції відбувається без прямої участі світлових фотонів. Потрібно зауважити, що продуктами вторинної фотохімічної реакції, можуть бути хімічно активні частинки. В подібних випадках, ініційована світловим фотоном реакція може набувати ланцюгового характеру. Наприклад, за відсутності світла, молекули хлору Сl2 та водню Н2 хімічно не взаємодіють. За наявності ж світла, суміш цих молекул, в результаті певного ланцюгового процесу швидко перетворюються на молекули хлориду водню (НСl):

Сl2 + hc/λ → Cl + Cl;

Cl + H2 → HCl + H;

H + Cl → HCl + Cl;

Cl + H2 → HCl + H;

H + Cl → HCl + Cl і т.д.

Коментуючи хід даних реакцій можна сказати наступне. Під дією світлового фотона, молекула хлору дисоціює (розпадається) на два хімічно активних атоми хлору. Кожен з цих атомів вступає в хімічну взаємодію з молекулою водню. При цьому, утворюється молекула хлориду водню (НСl) та хімічно активний атом водню. Цей атом реагує з молекулою хлору, в результаті чого утворюється нова молекула НСl та хімічно активний атом хлору і т.д.

В 1912 році А.Ейнштейн сформулював основний закон фотохімічних реакцій (**закон фотохімічної еквівалентності**). В цьому законі стверджується: поглинання одного світлового фотона спричиняє один акт первинної фотохімічної реакції. Застосовуючи даний закон потрібно мати на увазі, що в стані енергетичного збудження, молекула перебуває певний обмежений проміжок часу. І якщо за цей час фотоактивізована молекула не встигає хімічно провзаємодіяти з іншою молекулою, то відповідна вторинна реакція не відбувається. А це означає, що вторинних фотохімічних реакцій може виявитись набагато менше аніж первинних. З іншого боку, в ланцюгових фотохімічних реакціях, вторинних реакцій може бути в сотні тисяч раз більше аніж первинних. Однак, якщо говорити про первинні фотохімічні реакції, то їх число в точності дорівнює числу прореагувавших фотонів.

При фотохімічних реакціях, квантові властивості світла проявляються не лише в тому, що поглинання одного світлового фотона спричиняє один акт реакції, а й в тому, що для кожної з таких реакцій існує певна гранична довжина хвилі (λ0) яка розділяє світло на те при якому фотохімічна реакція відбувається (λ ≤ λ0) і те при якому вона не відбувається (λ > λ0). Іншими словами, для фотохімічних реакцій існує певний аналог червоної межі фотоефекту.

Безумовно найважливішою фотохімічною реакцією, а точніше сукупністю складних фотохімічних процесів, є фотосинтез. **Фотосинтез**, це сукупність складних фотохімічних процесів які відбуваються в клітинах рослин та фотосинтезуючих бактерій. Суть цього процесу полягає в тому, що у відповідних клітинах, під дією енергії світлових фотонів із води та вуглекислого газу, синтезуються енергоємні молекули органічних речовин, зокрема вуглеводнів (глюкоза, цукор, крохмаль, тощо).

Фотосинтез, це надзвичайно складний, багатоступеневий фотохімічний процес. Процес, в якому активно задіяні не лише світлові фотони та прості органічні молекули (Н2О та СО2), а й складні органічні структури клітин. Однак, якщо говорити про формалізований результат цього процесу, то його можна записати у вигляді наступної формули:

6Н2О + 6СО2 + n(hc/λ) → C6H12O6 + 6O2,

де  C6H12O6 – хімічна формула типового вуглеводню, в даному випадку – глюкози;  n – кількість світлових фотонів, необхідних для здійснення повного циклу реакцій (в залежності від умов фотосинтезу, ця кількість може становити від 48 до 72 фотонів).

Ще більш простою є енергетична суть фотосинтезу. І ця суть полягає в тому, що в процесі фотосинтезу, енергія світлових фотонів, а фактично енергія сонячного випромінювання, трансформується в енергію хімічних зв’язків складних органічних молекул:  Еф → Ехім .



Мал.143\*  Фотосинтез – основа життя на Землі.

Фотосинтез є основою тієї надскладної піраміди яка називається життям. Адже в процесі фотосинтезу створюються ті енергоємні органічні речовини які є харчовою базою для всіх живих структур, починаючи від самих фотосинтезуючих рослин та бактерій і закінчуючи всім різноманіттям тваринного світу.

Ілюструючи загальну потужність фотосинтезу, достатньо сказати, що в результаті цього процесу на Землі щорічно синтезується понад 100 мільярдів тон органічних речовин, засвоюється близько 200 мільярдів тон вуглекислого газу та виділяється близько 150 мільярдів тон молекулярного кисню. При цьому понад 3·1021Дж сонячної енергії перетворюється на потенціальну енергію хімічних зв’язків. Крім цього, в минулі геологічні епохи, величезну кількість фотосинтезованих  органічних речовин та акумульованої в них енергії, Природа у вигляді вугілля, нафти, торфу, сланців та горючих газів, законсервувала в надрах землі.

Доречно зауважити, що в процесі фотохімічних реакцій, створюються не лише базові елементи кругообігу живої матерії (енергоємні молекули вуглеводнів та молекули вільного кисню), а й елементи захисту цієї матерії від руйнівного впливу жорсткого ультрафіолетового випромінювання. Ці захисні елементи формуються в верхніх шарах атмосфери, де вільний кисень (О2), в результаті певної фотохімічної реакції перетворюється на озон (О3), тобто саме той матеріал який, який активно поглинає енергію жорсткого ультрафіолету. Це перетворення можна описати наступною послідовністю подій:

О2 + hc/λ → O2\* ;

O2\* + O2 → O3 + O;

O + O2 → O3.

Фотохімічні реакції визначальною мірою відповідальні і за наші зорові відчуття. А загальна схема цих відчуттів полягає в наступному. В зорових рецепторах сітківки ока (паличках та колбочках), міститься велика кількість складних світлочутливих білкових молекул загальна назва яких родопсин. При поглинанні світлового фотона молекула родопсину певним чином трансформується (а по суті, розділяється на дві частини). Результатом цієї трансформації є певний електричний імпульс, який через клітини зорового нерву передається у відповідну частину кори головного мозку, де і формується відповідний зоровий образ.

Фотохімічні реакції відбуваються не лише в природних, а й в спеціально створених умовах. Наприклад штучні фотохімічні реакції лежать в основі технології фотографування. Суть цієї технології полягає в наступному. В момент короткотривалого відкриття отвору фотооб’єктиву, на світлочутливий шар фотоплівки (або фотопаперу) потрапляє певна дозована кількість світла. Світла, яке несе інформацію про об’єкт фотографування. Під дією цього інформаційного світлового потоку, в світлочутливій речовині відбуваються певні фотохімічні реакції, які певним чином змінюють структуру речовини. При цьому світлова інформація трансформується у відповідні зміни структури речовини. В подальшому, під дією спеціальних хімічних реагентів (проявника), ці структурні зміни перетворюються на відповідне візуальне зображення. Яке в свою чергу, під дією ще одного хімічного реагенту (закріплювача) фіксується і ми отримуємо відповідну фотографію (точніше, спочатку негатив фотографії, а потім власне саму фотографію).

Звичайно, сучасні методи фотографування швидко розвиваються. Закономірним результатом цього розвитку стало те, що на зміну традиційним фотохімічним технологіям, прийшли методи електронно цифрового фотографування. Ці методи базуються на широкому застосуванні цифрової електроніки і того що називається внутрішнім фотоефектом. Втім, це жодним чином не зменшує значимість фотохімічних реакцій.

**Словник фізичних термінів**

**Фотохімічними реакціями** називають такі хімічні реакції, які відбуваються за активної участі видимого або ультрафіолетового світла.

**Закон фотохімічної еквівалентності**, це закон, в якому стверджується: поглинання одного світлового фотона спричиняє один акт первинної фотохімічної реакції.

**Фотосинтез**, це сукупність складних фотохімічних процесів які відбуваються в клітинах рослин та фотосинтезуючих бактерій. Узагальнюючий результат цих процесів, можна представити у вигляді наступної формули:    6Н2О + 6СО2 + n(hc/λ) → C6H12O6 + 6O2.

**Контрольні запитання**

1.В чому суть первинного та вторинного етапів фотохімічних реакцій?

2. Якими шляхами фотоактивізуються молекули?

3. Чому вторинних фотохімічних реакцій може бути як більше так і менше за число первинних реакцій?

4. В чому проявляються квантовий характер світла при фотохімічних реакціях?

5. Яка хімічна суть фотосинтезу?

6. Яка енергетична суть фотосинтезу?

7. Поясніть суть технології фотохімічного фотографування.

**§40. Люмінесценція.**

Теплове випромінювання є найбільш універсальним видом електромагнітного випромінювання. Воно виникає в результаті хаотичного (теплового) руху частинок речовини, характеризується неперервним спектром довжин хвиль та таким розподілом енергії в цьому спектрі, який близький до кривої розподілу енергії в спектрі абсолютно чорного тіла. Однак, електромагнітне випромінювання (світло) може виникати не лише в результаті теплового руху частинок речовини, а й завдяки іншим процесам. Наприклад, в результаті проходження струму через розріджені гази; в результаті певних хімічних та біологічних процесів; в результаті опромінення речовини швидкими електронами, тощо. Подібні нетеплові види випромінювання називають люмінесценцією (від лат. luminescent – слабке світло).

**Люмінесценція**, це таке випромінювання, яке відбувається за рахунок будь якого виду енергії окрім теплової і яке не є результатом відбивання, заломлення чи розсіювання іншого світла. Люмінесцентне випромінювання характеризується трьома визначальними ознаками. По перше, це випромінювання не є тепловим. По друге, для люмінесценції характерне **післясвітіння**. Це означає, що люмінесцируюче тіло певний час світиться навіть після того, коли припиняється потік тієї енергії що спричиняє появу люмінесцентного світла. Тривалість люмінесцентного післясвітіння може бути різною: від 10-8с до декількох діб. По третє, спектр люмінесцентного випромінювання не є суцільним, як при тепловому випромінюванні, а складним лінійчатим (смугастим). Цей лінійчатий спектр певним чином відображає індивідуальні особливості відповідної люмінесцируючої речовини та ті внутрішні процеси які відбуваються в ній. Зазвичай, ті тверді та рідкі речовини які мають яскраво виражені люмінесцентні властивості називають **люмінофорами**.

В загальних рисах механізм люмінесценції полягає в наступному. При енергетичному збуджені (при поглинанні енергії), наявні в атомі електрони перестрибують на відповідні більш високі енергетичні рівні (мал.142а). Коли ж електрони стрімко повертаються на свої енергетично доцільні, стаціонарні рівні, то випромінюються відповідні кванти світла (фотони) (мал.142б). Зазвичай тривалість перебування електрона на енергетично збудженому рівні не перевищує 10-9с. Однак в деяких речовинах ця тривалість є набагато більшою. Власне ці речовини і називають люмінесцентними.

Вище описаний механізм люмінесценції є гранично спрощеним. Адже терміном «люмінесценція» позначають надзвичайно широке коло найрізноманітніших явищ, які відрізняються як джерелами енергетичного збудження електронів, так і механізмами їх повернення до енергетично стабільного стану. Скажімо, якщо мова йде про ті речовини тривалість люмінесцентного післясвітіння яких вимірюється годинами (мал.145а) і які прийнято називати **кристалофосфорами**, то механізм їх люмінесцентного світіння полягає в наступному.

Кристалофосфори представляють собою діелектричні або напівпровідникові матеріали з певною кількістю домішкових атомів які називаються активаторами. При енергетичному збудженні, електрон активатора переходить в так звану зону провідності, а по суті стає вільним електроном (електроном провідності). Він буде вільним до тих пір, поки не зустрінеться з позитивним іоном активатора та не рекомбінує (об’єднається) з ним. В процесі ж цієї рекомбінації випромінюється відповідний світловий фотон. А оскільки іонізовані атоми активатора зустрічаються досить рідко, то і час перебування електрона в зоні провідності може бути досить великим. Для збільшення цього часу, в кристалофосфори додають ще одну різновидність домішкових атомів, які виконують функції так званих центрів захвату електронів (ловушок) та суттєво збільшують час перебування електронів в зоні провідності.

Потрібно зауважити, назва «кристалофосфори» не означає, що основною складовою відповідних матеріалів є фосфор. Ця назва вказує на те, що ці матеріали є кристалічними і такими що світяться (від грец. phoros – той що несе світло). А що стосується тієї хімічної речовини яка називається фосфором, то вона дійсно є люмінесцируючою речовиною, але люмінесцируючою за рахунок певних хімічних реакції.



Мал.144. Кристалофосфори – один з прикладів люмінесцируючих речовин.

Терміном “люмінесценція” фактично позначають сукупність великої кількості споріднених явищ, які за різними класифікаційними ознаками поділяються:

1) за тривалістю післясвітіння, на:

– флуоресценцію,

– фосфоресценцію;

2) за способом енергетичного збудження люмінесцируючої речовини, на:

– фотолюмінесценцію,

– радіолюмінесценцію,

– хемілюмінесценцію,

– біолюмінесценцію,

– триболюмінесценцію;

3) за механізмом випромінювання люмінесцентного світла, на:

– резонансну люмінесценцію,

– спонтанну люмінесценцію,

– вимушену люмінесценцію,

– рекомбінаційну люмінесценцію.

Стисло характеризуючи вище згадані різновидності люмінесценції, можна сказати наступне. **Флуоресценцією** називають те люмінесцентне випромінювання, післясвітіння якого не фіксується зоровими відчуттями людини. Це означає, що тривалість післясвітіння флуоресцентного випромінювання не перевищує 0,01с. Назва “флуоресценція” походить від назви мінералу, який має відповідні властивості і який називається флюоритом (хімічна формула СаF2). **Фосфоресценцією** називають те люмінесцентне випромінювання, післясвітіння якого фіксується зоровими відчуттями людини. Це означає, що тривалість післясвітіння фосфоресцентного випромінювання перевищує 0,01с. Назва “фосфоресценція” походить від назви того хімічного елементу, який за певних умов має яскраво виражені люмінесцентні властивості і який називається **фосфором**, що в буквальному перекладі означає “світлоносний”.

Терміни флуоресценція та фосфоресція певним чином вказують на тривалість люмінесцентного післясвітіння. Але вони жодним чином не вказують на енергетичні прочини люмінесценції. А про ці причини говорять наступні визначення.

**Фотолюмінесценцією** називають таке люмінесцентне випромінювання яке обумовлено дією стороннього (первинного) джерела електромагнітного випромінювання (інфрачервоне, видиме, ультрафіолетове та рентгенівське випромінювання). Це означає, що в процесі фотолюмінесценції енергія первинного електромагнітного випромінювання перетворюється на енергію люмінесцентного світла. Наприклад, фотолюмінісцентними є ті тверді речовини якими покриті внутрішні поверхні ламп денного світла, світло відбивні фарби, тканини, тощо. Фотолюмінісцентними є вище згадані кристалофосфори.  Фотолюмінісцентними є розчини хлорофілу, хініну, флуоресцирину та багатьох інших речовин.

В 1852 році, англійський фізик Джордж Стокс (1819-1903) експериментально встановив: при фотолюмінесценції, довжина хвилі люмінесцентного випромінювання, більша за довжину хвилі того випромінювання яке призвело до люмінесценції (**правило Стокса**). Іншими словами, при фотолюмінесценції, ультрафіолетове світло може перетворюватись на синє, синє – на зелене, зелене – на червоне. Натомість червоне світло стати зеленим не може; зелене – не може стати синім і т.д. Даний експериментальний факт пояснюється тим, що в процесі фотолюмінесценції, енергія первинного світлового фотона (hc/λ0) частково перетворюється в інші види енергії, зокрема в теплову. При цьому енергія вихідного фотона  (hc/λ), стає відповідно меншою, а його довжина хвилі – більшою (λ > λ0).

**Радіолюмінесценцію** називають таке люмінесцентне випромінювання яке обумовлено дією тих чи інших швидких частинок, зокрема електронів (**катодолюмінісценція**), α-частинок (**α-люмінесценція**), тощо. Наприклад в кінескопах телевізорів потік швидких електронів трансформується у відповідне зображення. В синтарископах, потік α-частинок перетворюється на світлові спалахи екрану. Яскравим прикладом радіолюмінісценції є полярне сяйво.

**Електролюмінесценцією** називають те люмінесцентне випромінювання яке обумовлено дією зовнішнього електричного поля. Наприклад те випромінювання яке створюють розріджені гази при тліючому розряді, є електролюмінісцентним. Електролюмінісцентним є і те випромінювання яке створюють сучасні світлодіоди, сучасні напівпровідникові екрани, індикатори, тощо.

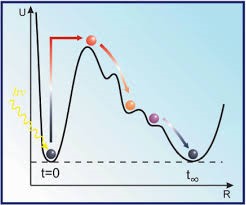
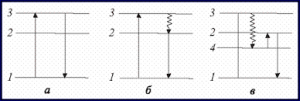
**Хемілюмінесценцією** називають те люмінесцентне випромінювання яке обумовлено тими чи іншими хімічними реакціями. Наприклад фосфор, а точніше та його різновидність яка називається білим фосфором, хімічно взаємодіє з киснем повітря: 4Р + 5О2 → 2Р2О5. При цьому, одним з продуктів такої взаємодії є випромінювання світлових фотонів.

**Біолюмінесценцією** називають те люмінесцентне випромінювання яке обумовлено тими процесами що відбуваються в біологічних структурах. Прояви біолюмінесценції є надзвичайно різноманітними. Скажімо, відомо понад дві тисячі видів люмінісцируючих комах, величезна кількість люмінісцируючих бактерій, молюсків, риб, водоростей, грибів, тощо.

**Триболюмінесценцією** називають таке люмінесцентне випромінювання яке обумовлено перетворенням частини механічної енергії в енергію світла. Наприклад, певні прояви триболюмінесценції можна спостерігати при механічній руйнації кристалів цукру. Однією з різновидностей триболюмінесценції є сонолюмінесценція, тобто те люмінесцентне випромінювання яке виникає під дією потужних потоків ультразвуку.

Фото-, радіо-, електро-, хемі-, біо- та трибо- люмінесценції, вказують на джерела тієї енергії, яка так чи інакше перетворюється на енергію люмінесцентного випромінювання. Якщо ж говорити про механізм такого перетворення, то за цим механізмом люмінесцентні випромінювання поділяються на**резонансні,** **спонтанні, вимушені,**та **рекомбінаційні**.

Звичайно, люмінесценція – це складне та багатогранне явище, яке поєднує в собі велику кількість найрізноманітніших процесів. Однак, якщо говорити про фізичну суть люмінесценції, то вона гранично проста: поглинання кванту енергії спричиняє таке енергетичне збудження частинок речовини, яке у підсумку призводить до випромінювання світлового фотона. При цьому, практична реалізація цієї загальної суті може бути різною. Скажімо, та люмінесценція яку називають **резонансною** відбувається в два етапи (мал.145а). На першому, поглинання кванту енергії ΔЕ спричиняє перехід електрона з основного рівня 1 на енергетично збуджений рівень 3, та характеризується певною часовою затримкою на цьому енергетично збудженому рівні. На другому етані відбувається випромінювальний перехід електрона з енергетично збудженого рівня 3 на основний рівень 1. В процесі цього переходу випромінюється відповідний фотон люмінесцентного світла. Резонансна люмінесценція характерна для хімічно простих газоподібних речовин.



Мал.145.  Загальна картина тих подій які відбуваються при резонансній (а); спонтанній (б) та вимушеній (в) люмінесценції. Механічна модель люмінесценції.

На відміну від резонансної люмінесценції, **спонтанна** люмінесценція відбувається в три етапи (мал.145б): 1) поглинання кванту енергії ?Е та перехід електрона з основного рівня 1 на енергетично збуджений рівень 3; 2) безвипромінювальний перехід енергетично збудженого електрона з рівня 3 на проміжний рівень 2 (в процесі цього переходу, частина енергії перетворюється на теплоту); 3) випромінювальний перехід електрона з проміжного рівня 2 на основний рівень 1. Спонтанна люмінесценція характерна для хімічно складних парів та рідин.

Ще більш складний ланцюг подій відбувається при **вимушеній** люмінесценції (мал.145в). При такій люмінесценції, перехід на проміжний випромінювальний рівень 2, відбувається в два етапи 3→4→2. При цьому, перехід 4→2 відбувається з певними енергетичними затратами, тобто є вимушеним. Вимушена люмінесценція характерна для складних органічних молекул.

Якщо ж говорити про **рекомбінаційну** люмінесценцію, то вона відрізняється від попередніх тим, що відбувається в процесі рекомбінації частинок, тобто в процесі відновлювального об’єднання раніше роз’єднаних частинок. Наприклад, в процесі об’єднання вільних електронів та позитивних іонів; в процесі об’єднання вільних електронів та дірок, тощо. Рекомбінаційна люмінесценція характерна для кристалічних речовин з наявними дефектами структури.

Загалом же, люмінесценцію можна представити у вигляді зображеної на мал.145г механічної моделі. В цій моделі, під дією того чи іншого енергетичного чинника, кулька піднімається на певну висоту. При цьому процес повернення кульки до енергетично доцільного рівня, по перше відбувається з певними часовими затримками, а по друге – з певними порційними перетвореннями енергії.

Люмінесценція має широке науково практичне застосування. Наприклад, факт того що кожна різновидність люмінесцентного випромінювання має свій неповторний лінійчатий спектр, лежить в основі **люмінесцентного спектрального аналізу**. Аналізу який дозволяє визначати хімічний склад відповідної речовини, параметри її внутрішнього устрою та тих процесів що відбуваються в ній. Люмінесценцію застосовують для створення ефективних та енергоощадних джерел світла. Для перетворення модульованих електричних сигналів у відповідне зображення. Для дослідження радіоактивних випромінювань. Люмінесцентні фарби застосовують при виготовлені дорожніх знаків, дорожніх розміток, тощо. Люмінесцентні тканини застосовують для виготовлення спеціального одягу та певних фрагментів звичайного одягу. Люмінесценція лежить в основі **лазерної техніки**. Люмінесценцію застосовують в дефектоскопії, медицині, геології та інших галузях науки і техніки. І навіть в тому папері з якого виготовлені ваші зошити є певна кількість люмінесцируючої речовини, яка перетворює частину ультрафіолетового світла в світло видиме, покращуючи тим самим яскравість білого паперу.

**Словник фізичних термінів**

**Люмінесценція**, це таке випромінювання, яке відбувається за рахунок будь якого виду енергії окрім теплової і яке не є результатом відбивання, заломлення чи розсіювання іншого світла. Люмінесцентне випромінювання характеризується трьома визначальними ознаками: 1)це випромінювання не є тепловим; 2) це випромінювання має певне післясвітіння; 3) це випромінювання має лінійчатий спектр.

**Контрольні запитання**

1.Назвіть визначальні ознаки люмінесцентного випромінювання.

2. Поясніть суть фотолюмінесценції

3. В чому суть та пояснення правила Стокса?

4. Які енергетичні перетворення відбуваються при фото-, радіо-, електро-, хемі-, біо- та трибо- люмінесценції.

5. Чим спонтанна люмінесценція відрізняється від резонансної?

6. В чому суть люмінесцентного аналізу?

7. Наведіть приклади застосування люмінесценції в побутовій практиці.

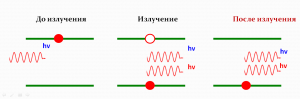
**§41. Оптичний квантовий генератор (лазер).**

**Оптичний квантовий генератор (лазер)**, це прилад, який представляє собою джерело монохроматичного, когерентного, поляризованого, вузько направленого електромагнітного випромінювання (світла) з високою концентрацією енергії в ньому. (Слово “лазер” утворено з перших букв певного англійського словосполучення, яке в буквальному перекладі означає “підсилення світла шляхом примусового випромінювання”).

Пояснюючи внутрішній устрій та принцип дії оптичного квантового генератора, можна сказати наступне. Відомо, що при поглинанні квантів електромагнітного випромінювання, електрони атомів речовини перескакують на більш високі, енергетично не стійкі рівні. А повертаючись з цих рівнів, вони випромінюють відповідні світлові фотони. Власне, явище фотолюмінесценції в тому і полягає, що атоми речовини поглинають фотони зовнішнього світла, а через певний час випромінюють фотони світла люмінесцентного.

Зазвичай, кожен атом речовини поглинає та випромінює світловий фотон спонтанно, тобто без будь якого узгодження з поведінкою інших атомів. Результатом такої неузгодженості є факт того, що фотолюмінісцентне світло є некогерентним, тобто таким яке складається з величезної кількості по суті хаотично генерованих фотонів.

В 1916 році Альберт Ейнштейн теоретично передбачив, що люмінесцентне випромінювання може бути не лише спонтанним, а й індукційно зініційованим. Це означає, що випромінювальний перехід електрона з енергетично збудженого рівня 2 на основний рівень 1, може відбуватись не лише спонтанно, а й під впливом певних зовнішніх чинників. Наприклад, під впливом зовнішнього фотона. При цьому, розрахунки показували, що ймовірність вимушеного випромінювання фотона різко збільшується в умовах електромагнітного резонансу, тобто в ситуації, коли параметри зовнішнього та індукованого фотонів є однаковими. По суті це означає, що при взаємодії енергетично збудженого атома з відповідним зовнішнім фотоном, випромінюється ще один фотон-близнюк.

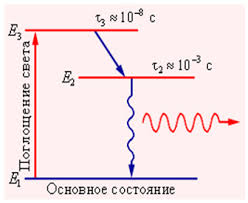


Мал.146.  Якщо енергетичні параметри фотона та збудженого електрона однакові, то фотон спричиняє випромінювання фотона-близнюка.

Тепер уявіть, що під дією певного стороннього джерела енергії, величезна кількість електронів, практично одночасно переходить на однакові енергетично збуджені рівні. В такій ситуації, перший же спонтанно виниклий фотон, спричинить появу лавини когерентних фотонів-близнюків. Власне за такою схемою і працюють оптичні квантові генератори. Іншими словами, принцип дії оптичного квантового генератора (лазера) полягає в наступному. Стороннє джерело енергії, імпульсним чином активізує величезну кількість атомів речовини, тобто переводить електрони цих атомів в енергетично збуджений стан. В момент максимальної концентрації активованих атомів, ініціюється поява лавини когерентних фотонів-близнюків.

Втім, простота принципового устрою приладу, зовсім не означає, що відповідно простим буде і його інженерно-технічний устрій. Скажімо, створенню перших лазерів передувало вирішення ряду важливих науково технічних проблем. Зокрема, розробки теорії тих процесів які забезпечують генерацію направленого потоку фотонів-близнюків. Створення такого імпульсного джерела світла яке б забезпечувало практично миттєву активізацію величезної кількості атомів речовини. Створення такого оптично прозорого середовища, атоми якого можуть достатньо довго знаходитись в енергетично збудженому стані. Створення таких умов випромінювання, які забезпечують високу концентрацію та направленість потоку фотонів-близнюків.

Лише в 1960 році, комплекс вище згаданих та інших проблем було вирішено і створено перший практично діючий лазер. В цьому лазері, в якості оптично активного середовища застосували синтетичний рубіновий монокристал. Рубін (Аl2О3+0,05%Сr) відноситься до числа фотолюмінофорів з спонтанним випромінюванням люмінесцентного світла. Це означає що в рубіні, процес поглинання – випромінювання фотонів відбуваються в три етапи (мал.147а): 1) поглинання первинного фотона, яке супроводжується переходом на гранично високий енергетичний рівень Е3; 2) безвипромінювальний перехід електрона на більш низький проміжний рівень Е2; 3) випромінювальний перехід електрона на початковий енергетично стабільний рівень Е1 в процесі якого випромінюється вторинний фотон.

Мал.147. Схема квантових переходів в кристалі рубіну (а) та схема загального устрою рубінового лазера.

Важливою особливістю тих квантових процесів які відбуваються в рубіні є те, що час перебування його енергетично збуджених електронів на рівні Е2 (t2≈10-3с) приблизно в 100.000 разів більший за час їх перебування на рівні Е3 (t3≈10-8с). Цього часу цілком достатньо для того, щоб активізувати необхідно велику кількість атомів та створити умови для випромінювання лавини фотонів-близнюків.

Базовим конструктивним елементом рубінового лазера (мал.148б) є рубіновий монокристалічний стержень, один з торців якого є дзеркальним, а інший – напівдзеркальним (напівпрозорим). Цей стержень знаходиться в середині так званої системи накачування, яка складається з потужної газорозрядної лампи та дзеркальної відбивної поверхні.

Принцип дії даної системи полягає в наступному. Газорозрядна лампа створює потужні короткотривалі (t≈10-3с) світлові імпульси. Ці імпульси швидко активізують необхідно велику кількість атомів рубінового стержня. При цьому, відповідно велика кількість електронів опиняються на енергетично збудженому та відносно стабільному (метастабільному) рівні Е2. В момент спонтанного переходу електронів з рівня Е2 на рівень Е1 випромінюються відповідні монохроматичні фотони. При цьому, ті з них які рухаються вздовж стержня, ініціюють появу лавини їм подібних фотонів-близнюків. Більша частина цих фотонів виходить через напівпрозорий торець рубінового стержня та створює відповідний лазерний промінь. Інша ж частина фотонів-близнюків, відбиваючись від внутрішньої торцевої поверхні рубінового стержня ініціюватиме появу все нових і нових порцій фотонів-близнюків.

На тепер створено велике різноманіття оптичних квантових генераторів. Вони відрізняються параметрами активного середовища, способами його енергетичного збудження, режимами роботи, потужністю, тривалістю імпульсів, тощо. Однак, принципова основа будь якого лазера залишається незмінною: фотоіндуцироване випромінювання фотонів-близнюків.

Лазерні джерела світла мають ряд безумовно важливих якостей, зокрема:

1.Лазери здатні створювати надзвичайно тонкі світлові потоки (промені) які в процесі розповсюдження майже не розширюються.

2. Лазери здатні створювати направлені світлові потоки надзвичайно великої потужності. Ця потужність досягає 1013Вт/см2. Для порівняння, випромінювальна потужність Сонця 7·103Вт/см2.

3. Світло лазера є гранично монохроматичним, гранично когерентним та гранично поляризованим.

Сучасні лазери мають надзвичайно широке практичне застосування. Зокрема, лазерний промінь є тим надтонким інструментом який дозволяє досліджувати структуру атомів, молекул, клітин, кристалічних структур тощо. Величезна питома потужність лазерного променя дозволяє плавити та зварювати найбільш тугоплавкі матеріали. За допомогою лазерного променя обробляють найтвердіші об’єкти, виготовляють інтегральні мікросхеми, записують звукову та візуальну інформацію. За допомогою лазерного променя здійснюють складні хірургічні операції, прокладають маршрути транспортних засобів, досліджують космічні об’єкти, тощо. Перспективним напрямком застосування лазерної техніки є робота направлена на здійснення керованих термоядерних реакції. Реакцій, які можуть стати практично невичерпним джерелом екологічно чистої та дешевої енергії.

**Словник фізичних термінів**

**Оптичний квантовий генератор (лазер)**, це прилад, який представляє собою джерело монохроматичного, когерентного, поляризованого, вузько направленого електромагнітного випромінювання (світла) з високою концентрацією енергії в ньому.

**Контрольні запитання**

1.В чому суть явища люмінесценції?

2. Чому те світло яке випромінюється в процесі природної фотолюмінесценції є некогерентним?

3. В чому особливість тих квантових процесів які відбуваються в енергетично збуджених атомах рубіну?

4. Поясніть загальний принцип дії оптичного квантового генератора?

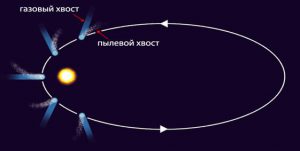
5. Чому ті світлові фотони які випромінює лазер є когерентними?

6. Поясніть загальний устрій рубінового лазера.

7. Які переваги лазерних джерел світла над звичайними джерелами?

**§42. Тиск світла. Корпускулярно-хвильовий дуалізм світла.**

Пояснюючи факт того, що хвіст комети в процесі руху навколо Сонця певним чином відхиляється (мал.148), німецький астроном Іоганн Кеплер (1571-1630), ще в 1619 році висловив гіпотезу про те, що причиною цього відхилення є тиск сонячного світла. Подальший розвиток науки повністю підтвердив дане передбачення.



Мал.148.  Під дією тиску сонячного світла, хвіст комети певним чином відхиляється.

**Тиск світла** – це явище, суть якого полягає в тому, що світловий потік створює певний механічний тиск на ті об’єкти які зустрічаються на його шляху. Тиск світла відноситься до числа тих явищ, які з практично однаковим успіхом можна пояснити як в рамках хвильової, так і в рамках квантової оптики. І це закономірно. Адже тиск характеризує **усереднену**силову дію що припадає на одиницю площі поверхні. А величина цієї усередненої дії фактично не залежить від того, яким чином ця дія створюється: шляхом взаємодії даної поверхні з неперервним світловим потоком, чи шляхом її взаємодії з потоком дискретних частинок.

Одним з теоретичних передбачень теорії Максвела є твердження про те, що електромагнітні хвилі, певним чином тиснуть на перешкоду.  Про обгрунтованість такого передбачення ми говорили в розділі “Електродинаміка” §. До сказаного в цьому параграфі, можна додати лише те, що в 1873 році, Максвел виходячи з того що світло це потік електромагнітних хвиль, теоретично довів: величина світлового тиску визначається за формулою р=(R/c)(1+k), де R=Q/SΔt – інтенсивність випромінювання;  с – швидкість світла в вакуумі;  k – коефіцієнт відбивання світла (для абсолютно чорного тіла k=0, для абсолютно дзеркального тіла k=1, для реальних тіл 0<k<1).

Математична складова максвелівського доведення формули р=(R/c)(1+k) є досить складною і такою що виходить за межі програми загальноосвітньої школи. Втім, дану формулу можна довести не лише на основі хвильової теорії світла, а й виходячи з того, що світло це потік окремих частинок (фотонів). Дійсно. Якщо світло, це потік частинок, то світловий тиск є усередненим результатом ударів цих частинок по відповідній поверхні. Величину цього тиску можна визначити із наступних міркувань.

В процесі взаємодії частинок світла з поверхнею тіла, імпульс цієї частинки (р=h/λ) змінюється. При цьому змінюються на величину, яка залежить від відбивних властивостей поверхні:

1) якщо поверхня абсолютно дзеркальна (абсолютно пружний удар частинок), то  Δ**р**= **р**к – **р**п = h/λ – (−h/λ) = 2h/λ;

2)  якщо поверхня абсолютно чорна (абсолютно непружний удар частинок),   то   Δ**р**= **р**к – **р**п = h/λ – 0 = h/λ .

По суті це означає, що в процесі взаємодії з поверхнею тіла, імпульс фотона змінюється на величину Δ**р**=(h/λ)(1+k), де k – коефіцієнт відбивання світла.

Зважаючи на вище сказане, а також на те що:

1) та загальна сила F з якою світловий потік діє на задану поверхню, є результуючою тих елементарних сил F0 з якою кожен окремий фотон діє на цю поверхню: F=NF0;

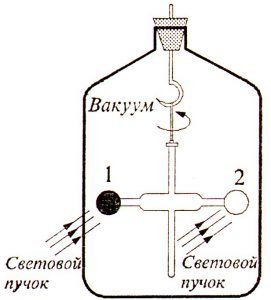
2) величину тієї елементарної сили F0з якою фотон тисне на поверхню, можна визначити за другим законом Ньютона: F0=Δ**p**/Δt=(h/λ)(1+k)/Δt;

3) кількість тих фотонів, які взаємодіють з даною поверхнею, можна визначити за формулою: N=Q/Eф, де Q – загальна кількість тієї світлової енергії що потрапляє на дану поверхню;  Еф=hс/λ – енергія одного фотона;

можна записати: p = F/S = NF0/S = (N/S)(h/λ)(1+k)/Δt = (Qλ/Shc)(h/λ)(1+k)/Δt = (Q/SΔt)(1+k)/c= (R/c)(1+k), де  R=Q/SΔt. Що і потрібно було довести.

Факт того, що один і той же теоретичний висновок (р = (R/c)(1+k), де  R=Q/SΔt) можна отримати виходячи з різних уявлень про внутрішній устрій світла, безумовно вказує на те, що світловий тиск є тим явищем, яке можна кількісно пояснити як в межах хвильової так і в межах квантової оптики. При цьому, якщо говорити про математичну та емоційну складову цих пояснень, то безумовно більш простим та зрозумілим є те пояснення, яке дає квантова оптика. Тому зазвичай, тиск світла вивчають та пояснюють саме в квантовій оптиці.

В 1900 році, російський фізик Петро Миколайович Лебедєв (1866-1912) здійснив перші успішні експерименти, які безумовно доводили, що світловий тиск дійсно існує і що його величина співрозмірна з теоретично передбаченою. Принципова схема дослідів Лебедєва досить проста (мал.149). Дві геометрично рівні та гранично легкі пластинки, одна з яких є світло відбивною, а інша – світло поглинаючою, в сукупності з легкою з’єднувальною віссю та пружною ниткою, утворюють певну обертальну систему. Принцип дії цієї системи полягає в наступному. В одному й тому ж світловому потоці, тиск світла на світло відбивну поверхню (k=1) вдвічі більший за його тиск на поверхню світло поглинаючу (k=0). А це означає, що під дією даної різниці тисків, система повертається на певний кут. Кут, величина якого залежить від величини світлового тиску.



Мал.149.  Схема дослідів Лебедєва.

Не дивлячись на очевидну простоту принципового устрою та простоту принципу дії приладу, виміряти фактичну величину світлового тиску надзвичайно складно. Складно бодай тому, що мова йде про мізерно малу силову дію. Наприклад в ясний літній день, тиск сонячного світла на світло поглинаючу поверхню становить лише 4·10-6Н/м2. Ясно, що для вимірювання такого мізерного тиску потрібний надзвичайно чутливий сило вимірювальний елемент. В приладі Лебедєва таким елементом є пружна скляна нитка, за кутом закручення якої фактично й визначали величину світлового тиску.

Крім цього, в ситуації коли величина вимірюваного тиску є мізерно малою, навіть незначні зовнішні силові фактори суттєво впливають на результати експерименту. Одним з таких факторів є навколишнє повітря. Дійсно. Відомо, що в потоці світла чорні поверхні нагріваються значно сильніше аніж світло відбивні. А це означає, що в світловому потоці, тиск молекул навколишнього повітря на світло поглинаючу поверхню буде значно більшим аніж на поверхню світло відбивну. І можна довести, що  величина цієї молекулярної різниці тисків (Δp=(1/3)n0m0Δv2=(2/3)n0Eк=n0kΔT) в сотні разів більша за величину світлового тиску. Ясно, що за наявності впливу навколишнього повітря, виміряти реальну величину світлового тиску практично не можливо.  Не менш очевидно і те, що позбутися негативного впливу вище описаного ефекту, можна лише в тому випадку, якщо вимірювальну систему розмістити в глибокому вакуумі.

В нашому повсякденному житті, світловий тиск не має суттєвого значення. Однак в тих процесах які відбуваються у Всесвіті, роль цього тиску є надзвичайно важливим. Достатньо сказати, що той світловий (фотонний) тиск що існує в надрах зірок є тим визначальним силовим фактором який протидіє гравітаційному стисненню зірки та сприяє стабільному протіканню термоядерних реакцій в ній.

Вивчення оптики ми почали з парадоксального твердження: Природа влаштована таким дивним чином, що її найпростіші об’єкти є найскладнішими. Найскладнішими в тому сенсі, що надзвичайно важко, а то і неможливо пояснити як влаштовані і на що схожі ці об’єкти. До числа таких елементарно простих і в той же час незбагненно складних об’єктів відноситься світло.

Прояви світла такі різноманітні, що чим більше ви дізнаєтесь про ці прояви, тим нав’язливіше постає питання: так що ж таке світло? Скажімо, відбивання світла, його заломлення, дисперсію та здатність створювати механічний тиск на перешкоди, з практично однаковим успіхом можна пояснити в незалежності від того як представляти світло – у вигляді потоку частинок чи у вигляді потоку хвиль. При цьому, явища інтерференції, дифракції та поляризації, безумовно доводять, що світло – це потік певних частинок. Натомість, фотоефект, фотолюмінесценція та фотохімічні реакції, з не меншою очевидністю доводять, що світло – це потік певних частинок.

Уявити об’єкт який одночасно є і частинкою і хвилею, практично не можливо. Адже частинка, це щось дискретне і зосереджене в певній, чітко визначеній точці простору. Натомість хвиля, це щось неперервне, просторово не визначене і так чи інакше присутнє у всіх точках енергетично збудженого матеріального середовища. І тим не менше, світло саме той матеріальний об’єкт який одночасно є і частинкою і хвилею. Одночасно в тому сенсі, що в залежності від ситуації, світло може проявляти як хвильові так і корпускулярні властивості. Цю взаємопов’язану подвійність властивостей світла, прийнято називати **корпускулярно-хвильовим дуалізмом**.

Прагнучи зрозуміти, що ж таке світло та його корпускулярно-хвильовий дуалізм, ви маєте усвідомити, що світло абсолютно не схоже на жоден з тих макрооб’єктів які вам траплялось бачити, і що тому його не можливо представити у вигляді певної наочної моделі. Це звичайно не означає, що про світло неможна сказати чогось певного. Зовсім навпаки. На сьогоднішній день про світло ми знаємо практично все. Ми абсолютно точно можемо передбачити поведінку світла в будь якій конкретній ситуації. Єдине чого ми не можемо, так це пояснити, на що ж схоже світло. Бо воно не схоже ні на що нам знайоме.

**Словник фізичних термінів**

**Тиск світла** – це явище, суть якого полягає в тому, що світловий потік створює певний механічний тиск на ті об’єкти які зустрічаються на його шляху.

**Контрольні запитання**

1.Чи доводить факт наявності світлового тиску те, що світло це потік частинок?

2. Як пояснюється тиск світла з точки зору квантової теорії?

3. Тиск світла на чорну поверхню вдвічі більший аніж на білу. Чому?

4. Поясніть загальний устрій та принцип дії приладу Лебедєва.

5. Поясніть в якому напрямку повертатиметься вимірювальна система приладу Лебедєва в світловому потоці: а) за відсутності повітря; б) за наявності повітря.

6. В чому суть корпускулярно-хвильового дуалізму світла?

**Вправа 20.**

1.На дзеркальну поверхню площею 2см2 щосекунди потрапляє 10Дж світлової енергії. Визначити величину відповідного світлового тиску.

2. На абсолютно чорну поверхню площею 5см2 падає світловий потік потужністю 15Вт. Визначити величину відповідного світлового тиску.

3. Відомо, що максимальна потужність того світлового випромінювання яке потрапляє на одиницю площі Землі становить 1,4·103Вт/м2. Визначити тиск цього випромінювання на абсолютно чорне тіло. Визначити величину тієї загальної сили що створює цей тиск на Землю, якщо радіус Землі 6400км.

4. На кожний см2 абсолютно чорного тіла щосекунди падає 3,5·1017 фотонів з довжиною хвилі 500нм. Який тиск створюють ці фотони?

5. Визначити величину того тиску який створює видиме світло на скляну поверхню лампочки розжарювання, якщо її потужність 100Вт, а к.к.д. 4%. Радіус колби лампочки 3см. Вважати, що скло відбиває 10% падаючого на нього світла.

6. У світловому потоці потужністю 1,4·103Вт/м2 чорна поверхня нагрілась на 1°С. При цьому тиск атмосферного повітря на цю поверхню збільшився на певну величину. Порівняйте це збільшення з величиною світлового тиску.

## Призначення кфк-2

КФК використовується в біології та медицині для визначення законів поглинання світла розчинами. В клінічній практиці його застосовують для вимірювання насичення крові киснем. Це має значення для функціональної діагностики роботи органів і тканин організму.

КФК призначений для вимірювання в окремих ділянках діапазонну довжини хвиль 315 - 980 мм., які виділяються фільтрами , коефіцієнтів пропускання та оптичної густини розчинів, а також визначення концентрації речовин в розчині методом градуйованих графіків.

Колориметр дозволяє також робити вимірювання коефіцієнтів пропускання розсіюючих суспензій, емульсій та колоїдних розчинів в пропущеному світлі.

## І.2. Будова концентраційного фотоелектроколориметра кфк-2.

Колориметр складається з 2-х блоків, з’єднаних в одне - механічно: оптичний блок і блок живлення. Зовнішній вигляд прибору приведено на мал.1., де:

1. Мікроамперметр із шкалою від 0 - 100 поділок. який відповідає шкалі коефіцієнта пропускання t і оптичної густини Д;

2. Устрій що освітлює.

3. Ручка для перемикання світлофільтрів.

4. Ручка перемикача положення кювет.

5. Ручка включення фотоприймальників.

6. Ручка регулювання чутливості "Грубо".

7. Кришка кюветного відділення.

8. Ручка регулювання чутливості "Точно".

Оптичний блок (Мал.2.)

В оптичний блок входять: освітлювач, оправа з оптикою, набір світлофільтрів, кюветне відділення, держач кювет. фотометрична будова з підсилювачем постійного струму і елементами регулювання, прилад що реєструє.

Нитка лампи 1 з конденсором 2 зображена в площині діафрагми 3 ø 2мм. Це зображення об’єктивом 4,5 переноситься в площину, яка стоїть від об’єктива на відстані 300мм., із збільшенням 10х. Кювета 10 з досліджуваним розчином вводиться в світовий пучок між захисними склами 9,11. Для виділення вузьких ділянок спектра із суцільного спектра випромінювання лампи в колориметрі є набір кольорових фільтрів світла 8.

Теплозахісний світофільтр 6 введений в пучок світла при роботі в видимій частині спектра (400 - 490)нм. Для послаблення потоку світла при роботі в спектральному діапазоні 400 - 450 нм. встановлені нейтральні фільтри світла 7.

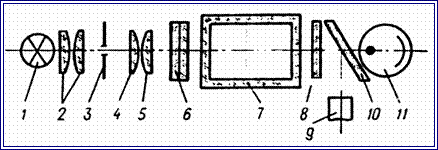
Фотоприймачі працюють в різних ділянках спектра:

* фотоелемент Ф-26 17 - в ділянках спектра 315 - 540 нм.
* фотодіод ФД - 24К 12 - в ділянці спектра 590 - 980 нм.

Пластина 15 поділяє потік світла на два: 10% світлового потоку направляється на фотодіод ФД - 24К і 90% - на фотоелемент Ф-26. Для зрівняння фототоків, які знімаються з фотоприймача ФД-24К при роботі з різними кольоровими фільтрами світла, перед ним встановлений світлофільтр 14 із кольорового скла – 16.

+При роботі з кюветами 19 малої місткості в кюветне відділення встановлюється приставка 21 для мікроаналізу. Лінзи 20 зменшують пучок світла у місті, де встановлені мікрокювети або пробірки. Лінзи 18 відновляють пучок світла до початкового діаметра.

Оптична схема фотоелектроколориметрів КФК-2 и КФК-2МП:  
*1* — джерело світла; *2* — конденсор; *3* — діафрагма; *4*, *5 —лінзи* обʼєктива;  
*6* — світлофільтр; *7* — кювета; *8* — захистне скло; *9* — фотодіод (590–980 нм);  
*10* — пластина, що ділить світловий потік на два;  
*11* — фотоелемент (315–540 нм)



Рфе

Рпадаюче

Лінза що формує паралельний пучок променів

Фокусуюча лінза

Лінза що формує паралельний пучок променів

Фокусуюча лінза

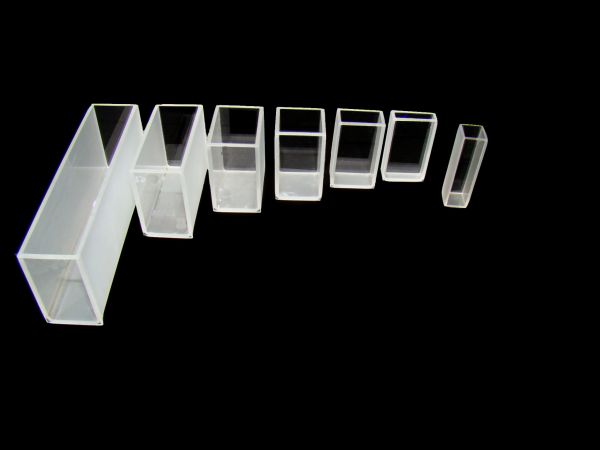
Рвідб



Світлофільтри



Набір Кювет



Кювети з різними розмірами для проведення досліджень

# Принцип роботи кфк-2

Принцип вимірювання коефіцієнта пропускання світла полягає в тому, що на фотоприймач по черзі направляються світлові потоки: повний Fохі той, який пройшов через досліджуване середовище Fх, і визначає співвідношення цих потоків.

Відношення потоків є коефіцієнт пропускання розчину, що досліджується

https://studfile.net/html/2706/1050/html_HgYX9Hg7wa.NK3F/img-vsg31n.png. [1]

На колориметрі це відношення визначається таким чином. Спочатку у потоці світла розташовують кювету з розчинником або контрольним розчином. Зміною чутливості колориметра досягають того, щоб відлік за шкалою коефіцієнтів пропускання колориметра дорівнював n1= 100% поділок. Таким чином, повний світловий потік https://studfile.net/html/2706/1050/html_HgYX9Hg7wa.NK3F/img-MwhL6p.png умовно дорівнює 100%. Потім в світловому потоці розмішують кювету з досліджуваним розчином. Одержаний відлік https://studfile.net/html/2706/1050/html_HgYX9Hg7wa.NK3F/img-iJYFNs.png за шкалою коефіцієнтів пропускання досліджуваного розчину в % буде дорівнювати https://studfile.net/html/2706/1050/html_HgYX9Hg7wa.NK3F/img-H7DRd8.png, тобто:

https://studfile.net/html/2706/1050/html_HgYX9Hg7wa.NK3F/img-r8MYv0.png.

Оптична густота Д визначається за формулою:

https://studfile.net/html/2706/1050/html_HgYX9Hg7wa.NK3F/img-dyQKiW.png[2]

## І.4. Фізичні основи методу фотоелектроколориметрії.

В основі методу фотоелектроколориметрії лежить явище поглинання світла кольоровими розчинами. Якщо два розчина однієї речовини, які мають концентрації https://studfile.net/html/2706/1050/html_HgYX9Hg7wa.NK3F/img-4CKXCp.png і товщину шару https://studfile.net/html/2706/1050/html_HgYX9Hg7wa.NK3F/img-mVieKe.png поглинають світло однаково, то їх оптичні густини https://studfile.net/html/2706/1050/html_HgYX9Hg7wa.NK3F/img-jjqXVU.png теж однакові https://studfile.net/html/2706/1050/html_HgYX9Hg7wa.NK3F/img-RNKz0r.png .

Або:https://studfile.net/html/2706/1050/html_HgYX9Hg7wa.NK3F/img-ohFPE4.png , тоді https://studfile.net/html/2706/1050/html_HgYX9Hg7wa.NK3F/img-PfDNC8.png,

де Х - коефіцієнт поглинання світла розчином товщиною l=2,72 і концентрацією

https://studfile.net/html/2706/1050/html_HgYX9Hg7wa.NK3F/img-I86SXE.png= 1%;

Д - оптична густина розчину:

https://studfile.net/html/2706/1050/html_HgYX9Hg7wa.NK3F/img-sir9Hw.png,

де τ - коефіцієнт пропускання світла (прозорість розчину);

Iо- початкова інтенсивність світла, який падає на даний розчин;

Iе - інтенсивність світла, який пройшов через даний розчин товщиною l.

Таким чином, коефіцієнт пропускання світла τ - це відношення інтенсивності світла, який пройшов через розчин до інтенсивності світла, який падає на даний розчин.

Оптична густина Д - це десятичний логарифм величини, яка обернена коефіцієнту пропускання світла, що падає на даний розчин.

По величинам τ і Д можна судити про поглинальну здатність даної речовини і визначити її концентрацію в розчині.

## Іі. Техніка безпеки при роботі з кфк – 2.

При роботі з КФК-2 треба дотримуватися таких правил:

1. Працювати з колориметром треба в чистому приміщені, вільному від пилу, парів кислот.
2. Біля колориметра не повинні розташовуватись великі речі, які утворюють незручність в роботі.
3. Всі роботи, які пов’язані з проникненням за постійні огорожі до частин колориметра, по яким іде струм, заміна ламп, деталей повинні проводитись при відключенні колориметра від мережі.
4. При роботі колориметр повинен бути надійно заземлений.

## 3.1. Підготовка кфк-2 до роботи.

+

1. Ввімкнути колориметр в мережу за 15 хвилин до початку вимірювання. Під час підігріву кюветне відділення повинно бути відкритим ( при цьому завіска перед фотоприймачами перекриває пучок світла).
2. Ввести необхідний за різновидом вимірювання кольоровий фільтр світла.
3. Встановити мінімальну чутливість колориметра. Для цього ручку "чутливість" встановити в положення "1", ручку "установка 10 грубо" - в крайнє ліве положення.
4. Перед вимірюванням і при перемиканні фотоприймачів перевірити, щоб стрілка була встановлена на "С" за шкалою пропущення τ у відкритому кюветному відділенні. При зміщенні стрілки від нульового положення ії підводять до нуля за допомогою потенціометра "нуль", який виведений під шліц.

# 3.2. Вимірювання коефіцієнта пропущення.

1. В пучок світла помістити кювету з розчином або контрольним розчином, по відношенню до якого буде відбуватися вимір.
2. Закрити кришку кюветного відділення.
3. Ручками "Чутливість" та "Установка 10 грубо" точно встановити відлік 100 за шкалою колориметра. Ручка "Чутливість" може знаходитись в одному з трьох положень: "1", "2", "3". Встановити “100”, починаючи з чутливості “1”.
4. Повертаючи ручку "4" (мал.1) кювету з розчинником або з контрольним розчином, замінити кюветою з досліджуваним розчином.
5. Зняти відлік за шкалою колориметра, який відповідає коефіцієнту пропущення світла дослідженим розчином в процентах або за шкалою Д в одиницях оптичної густини.
6. Вимірювання проведіть 3 - 5 разів та кінцеве значення вимірюваної величини визначте як середнє арифметичне з одержаних значень.

## 3.3. Визначення концентрації речовини в розчині.

При визначенні концентрації речовини в розчині треба виконувати наступну послідовність в роботі:

* Вибір фільтра світла.
* Вибір кювети.
* Будова градуйованої кривої для даної речовини.
* Вимірювання оптичної густини досліджуваного розчину і визначення концентрації речовини в розчині.

## 1. Вибір фільтра світла.

Наявність в колориметрі вузла фільтрів світла та набору кювет дозволяє підібрати таке їх сполучення, при якому помилка в визначенні концентрації буде мінімальною.

Вибір фільтрів світла проводять так:

Налити розчин в кювету (як вибрати кювету дивись далі) і визначити оптичну густину для всіх фільтрів світла.

За отриманими даними побудувати криву, відкладаючи по горизонтальній вісі довжину хвиль, які відповідають максимуму коефіцієнта пропускання фільтрів світла, які вказані в опису колориметра, а по вертикальній вісі - відповідні значення оптичної густини розчину. Відмітити ту ділянку кривої, для якої виконуються наступні умови:

* оптична густина має максимальне значення;
* крива паралельна горизонтальній вісі, тобто оптична густина мало залежить від довжини хвилі.

Фільтр світла для роботи треба вибрати так, щоб довжина хвилі відповідала максимуму коефіцієнта пропускання і знаходилась на відміченій вище ділянці спектральної кривої досліджуваного розчину.

Якщо ці умови виконуються для декількох фільтрів світла, виберіть той з них, для якого чутливість колориметра вище.

## 2. Вибір кювети.

Абсолютна похибка вимірювання коефіцієнта пропускання не перевищує 1%. Відносна похибка визначення концентрації розчину буде різною при роботі на різних ділянках шкали колориметра і сягає максимуму при значеннях оптичної густини 0,7. Тому при роботі на колориметрі рекомендується працювати поблизу вказаного значення оптичної густини. Якщо оптична густина більше 0,5 – 0,6, беруть кювету меншої робочої довжини, якщо величина оптичної густини менше 0,3 – 0,2, то треба вибирати кювету з більшою робочою довжиною.

## 3. Побудова градуйованої кривої для даної речовини.

Будова градуйованої кривої проводиться таким чином. Приготувати ряд розчинів даної речовини з відомими концентраціями, які займають ділянку можливих змін концентрацій цієї речовини в досліджуваному розчині.

Заміряти оптичні густини всіх розчинів і побудувати градуйовану криву, відкладаючи по горизонталі відомі концентрації, а по вертикалі - відповідні їм значення оптичної густини.

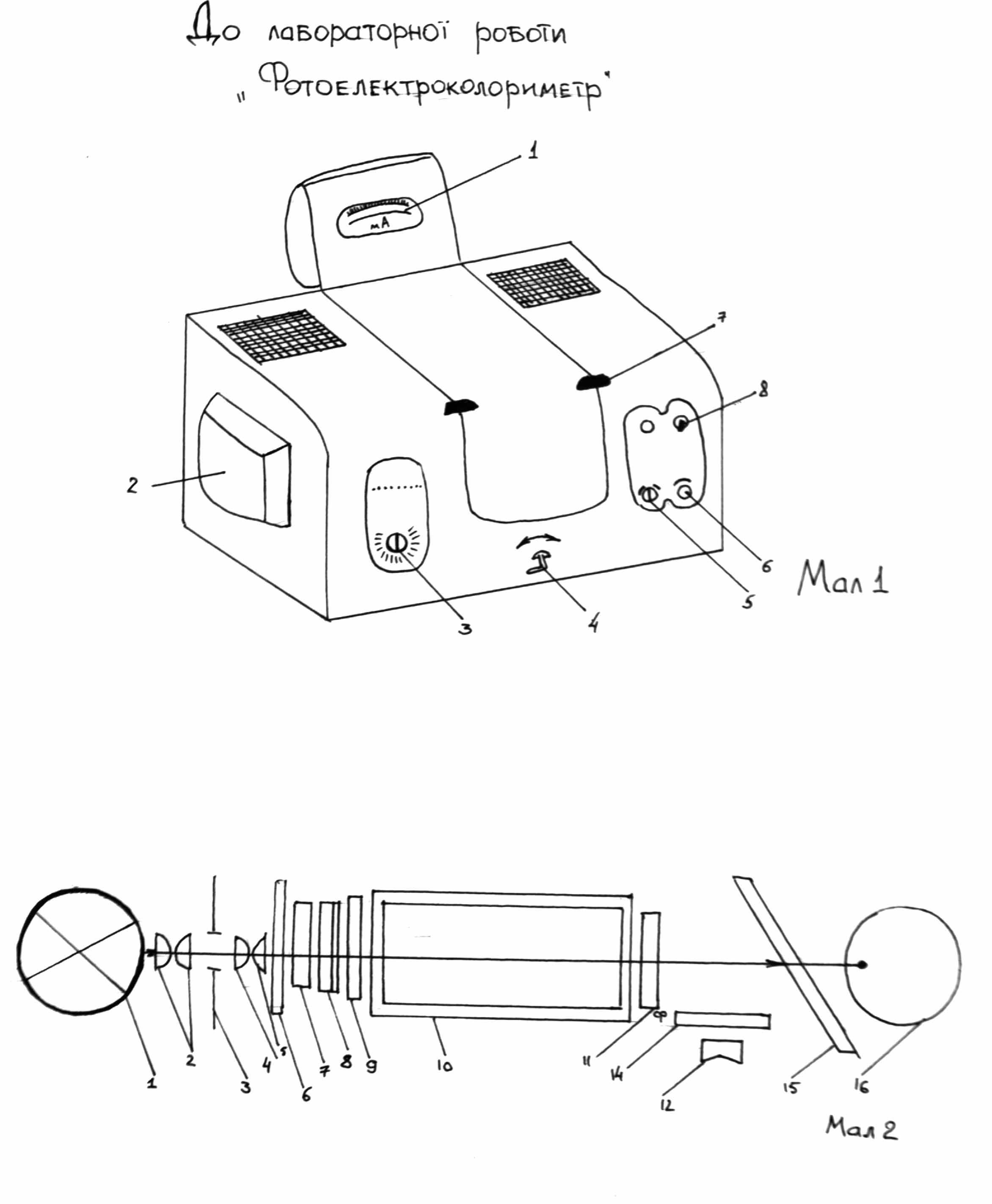
# 4. Визначення концентрації речовини в розчині.

По градуйованій кривій подальше визначається невідома концентрація речовини в досліджуваних розчинах. Для цього розчин налити в ту ж саму кювету, для якої побудована градуйована крива, і ввімкнувши той самий фільтр світла, визначити оптичну густину розчину. Далі за градуйованою кривою знайти концентрацію, відносно обмірюваному значенню оптичної густини.

Примітка:

1. Часто в роботі буває зручніше користуватися градуйованими таблицями, які складаються за даними градуйованої кривої.
2. Градуйовану криву треба час від часу перевіряти.

## IV. Завдання для самопідготовки та самоконтролю.

1. Явище поглинання світла, його суть.
2. Вивід закону Бугера. Поняття натурального показника поглинання світла.
3. Закон Бера. Поняття питомого коефіцієнта поглинання. Зв’язок натурального показника поглинання з концентрацією речовини.
4. Об’єднаний закон Бугера - Бера. Поняття коефіцієнта пропускання та оптичної густини речовини.
5. Залежність оптичної густини речовини від її концентрації в розчині.
6. Методи концентраційної колориметрії. Фотоелектроколориметрія.
7. Призначення, будова та принцип роботи КФК-2. Оптична схема. Органи керування на зовнішній панелі приладу.
8. Правила підготовки приладу до роботи.
9. Методика вимірювання коефіцієнта пропускання.
10. Методика визначення концентрації речовини в розчині.

**Задачі.**

1. При проходженні світла з довжиною хвилі λ1 через шар речовини, його інтенсивність зменшується внаслідок поглинання в 4 рази. Інтенсивність світла з довжиною хвилі λ2 зменшується в тричі. Знайти товщину шару речовини і показник поглинання для світла з довжиною хвилі λ2, якщо для світла з довжиною хвилі λ1 він дорівнює Х1 =0,02 см - 1.

## Завдання для перевірки знань за темою.

1.У чому полягає фізична суть явища поглинання світла?

1. У тому, що при проходженні світла через речовину відбувається змінення швидкості світла.

2. При проходженні світла через речовину відбувається послаблення його інтенсивності, внаслідок перетворення енергії у другі її види.

3. У тому, що при проходженні світла через будь-яку речовину відбувається зміна світлової енергії.

4. При поглинанні відбувається зміна довжини світлової хвилі.

5. При поглинанні спостерігається зміна світлового потоку.

2.Поглинання світла стає особливо інтенсивним при:

1. Відсутності вільних електронів.

2. Великій концентрації речовини.

3. Резонантній частоті.

4. Наявності вільних електронів.

5. Малій концентрації речовини.

3.Закон Бугера-Ламберта-Бера має вигляд:

1. I=I0℮-εcx;

2. I=I0℮--cx;

3. I=I0℮--ǽx;

4. I=I0℮+cx ;

5. I=lgI0 .

4. Коефіцієнт пропускання дорівнює:

1.https://studfile.net/html/2706/1050/html_HgYX9Hg7wa.NK3F/img-4hO7SS.png;

2.https://studfile.net/html/2706/1050/html_HgYX9Hg7wa.NK3F/img-RfrZZQ.png;

3.https://studfile.net/html/2706/1050/html_HgYX9Hg7wa.NK3F/img-nIOhhf.png;

4.https://studfile.net/html/2706/1050/html_HgYX9Hg7wa.NK3F/img-fiqMj1.png;

5.https://studfile.net/html/2706/1050/html_HgYX9Hg7wa.NK3F/img-5PY5B0.png.

5.Оптична щільність розчину це:

1.https://studfile.net/html/2706/1050/html_HgYX9Hg7wa.NK3F/img-t2ryq2.png;

2.https://studfile.net/html/2706/1050/html_HgYX9Hg7wa.NK3F/img-4bn86z.png;

3.https://studfile.net/html/2706/1050/html_HgYX9Hg7wa.NK3F/img-Opvp0D.png;

4.https://studfile.net/html/2706/1050/html_HgYX9Hg7wa.NK3F/img-arMDB9.png;

5. https://studfile.net/html/2706/1050/html_HgYX9Hg7wa.NK3F/img-Mk3Qth.png.

6. Формула закону Бугера:

1.https://studfile.net/html/2706/1050/html_HgYX9Hg7wa.NK3F/img-k2OxJA.png;

2.https://studfile.net/html/2706/1050/html_HgYX9Hg7wa.NK3F/img-58fRA_.png;

3.https://studfile.net/html/2706/1050/html_HgYX9Hg7wa.NK3F/img-ioXUzU.png;

4.https://studfile.net/html/2706/1050/html_HgYX9Hg7wa.NK3F/img-P6W7tF.png;

5.https://studfile.net/html/2706/1050/html_HgYX9Hg7wa.NK3F/img-ZJb6R7.png.

7.Закон Бера має вигляд:

1. k=εc;
2. k=cx;
3. k=ld;
4. k=cl2;
5. k=c2x.

8.Явище, яке використовується в принципі роботи ФЕК це:

1. Рефракція на межі повітря-розчин.

2. Інтерференція монохроматичного світла.

3. Поглинання світла кольоровими розчинами.

4. Поляризація світла в кольоровому розчині.

5. Дифракція світла, коли світло проходить кольоровий розчин.

9.ФЕК використовується для:

1. Визначення концентрації речовин у розчині та показника поглинання світла.

2. Вимірювання коефіцієнта світлопропускання та оптичної щільності речовин.

3. Визначення коефіцієнта пропускання світла та коефіцієнта заломлення.

4. Вимірювання природного показника поглинання світла.

5. Вимірювання концентрації розчину.

10.Для чого ставлять кольорові світлофільтри у фотоколориметрі?

1. Для того, щоб виділити окремі ділянки діапазонів хвиль315-980Нм.

2. Для того, щоб виділити вузькі ділянки спектра з усього спектра.

3. Теплозахисту.

4. Для того, щоб послабити світловий потік, який випромінює лампа.

5. Для посилення сили світла, яке падає на кювету з розчином.

+Еталони відповіді: 1-2; 2-3,4; 3-1; 4-1; 5-1; 6-2; 7-1; 8-3; 9-2; 10-1.

**Пульсоксиметр** — медично-діагностичний прилад для вимірювання рівня [сатурації](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B0%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F) [кисню](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B8%D1%81%D0%B5%D0%BD%D1%8C) в капілярній крові (оксигенації).

Існує чимало патологій, що супроводжуються [гіпоксією](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D1%96%D0%BF%D0%BE%D0%BA%D1%81%D1%96%D1%8F) (нестачею кисню в організмі, наприклад у [крові](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%80%D0%BE%D0%B2) — [гіпоксемією](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D1%96%D0%BF%D0%BE%D0%BA%D1%81%D0%B5%D0%BC%D1%96%D1%8F" \o "Гіпоксемія)). У таких випадках [моніторинг](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%BE%D0%BD%D1%96%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B8%D0%BD%D0%B3_(%D0%BC%D0%B5%D0%B4%D0%B8%D1%86%D0%B8%D0%BD%D0%B0)) сатурації необхідний постійно.

## Пульсоксиметрія[[ред.](https://uk.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%9F%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%81%D0%BE%D0%BA%D1%81%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80&veaction=edit&section=3) | [ред. код](https://uk.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%9F%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%81%D0%BE%D0%BA%D1%81%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80&action=edit&section=3)]

Процес визначення сатурації кисню крові та частоти пульсу за допомогою пульсоксиметра називають *пульсоксиметрією*.[[12]](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%81%D0%BE%D0%BA%D1%81%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80#cite_note-12)

Види пульсоксиметрії: *неінвазивна* (непряма) та *[інвазивна](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%86%D0%BD%D0%B2%D0%B0%D0%B7%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%B0_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%86%D0%B5%D0%B4%D1%83%D1%80%D0%B0" \o "Інвазивна процедура)* (пряма).

*Неінвазивна* набула широкого розповсюдження в медицині за рахунок простоти, швидкості, зручності.

При виконанні пульсоксиметрії потрібно суворо дотримуватись, як технічних вимог, так і медичних. Зокрема, дотримуватись правил [асептики](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%81%D0%B5%D0%BF%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0) та [антисептики](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BD%D1%82%D0%B8%D1%81%D0%B5%D0%BF%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0) (датчики один, а пацієнти чи постраждалі різні).

За принципом дії пульсоксиметри є:

* фотометричні ("пропускаючі", "трансмісивні")
* "відбиваючі"

*Непряма відбиваюча пульсоксиметрія* не набула широкого розповсюдження, так є технічно більш складнішою, отже, і вартіснішою. Також цей метод має обмеження (наприклад, при венозному застої, реєструватиметься як артеріальна так і венозна пульсація, що приведе до зміни показників сатурації артеріальної крові)[[13]](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%81%D0%BE%D0%BA%D1%81%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80#cite_note-13).

При *Інвазивній пульсоксиметрії* (інвазивний моніторинг пацієнта) аналізується безпосередній [газовий склад крові](https://uk.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%93%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9_%D1%81%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4_%D0%BA%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%96&action=edit&redlink=1) у місці введення датчика у судинне русло, також реєструються інші показники (наприклад [АТ](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%80%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D1%82%D0%B8%D1%81%D0%BA), системний судинний опір, серцевий викид, серцевий індекс, ударний об'єм)[[14]](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%81%D0%BE%D0%BA%D1%81%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80#cite_note-14)

При *непрямій фотометричній пульсоксиметрії* аналізується не безпосередній [газовий склад крові](https://uk.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%93%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9_%D1%81%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4_%D0%BA%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%96&action=edit&redlink=1), а її фізичні властивості щодо здатності пропускати певну кількість світла в залежності від насичення [гемоглобіну](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B5%D0%BC%D0%BE%D0%B3%D0%BB%D0%BE%D0%B1%D1%96%D0%BD) [еритроцитів](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D1%80%D0%B8%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%86%D0%B8%D1%82) киснем[[15]](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%81%D0%BE%D0%BA%D1%81%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80#cite_note-15), на основі яких пристрій видає ймовірні дані.

Прилад має периферійний датчик, у якому знаходиться джерело світла. Світло, що проходить крізь капіляри тканин до фотодетектора, частково поглинається тканинами та кров'ю. Ступінь поглинання залежить від насиченості гемоглобіну киснем. Фотодетектор реєструє зміну кольору крові у залежності від цього показника.

Сам датчик фіксується на пальці (найчастіше вказівному), з двох сторін (обтискає), або на [зовнішнє вухо](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D1%96%D1%88%D0%BD%D1%94_%D0%B2%D1%83%D1%85%D0%BE) (потрібен інший датчик), теж з двох сторін.

Якщо пристрій портативний, датчик і пристрій знаходяться в одному корпусі, на його невеличкому екрані будуть відображатись показники (доки дозволить режим автономної роботи).

У стаціонарному пристрої, датчик, після фіксації на [пацієнтові](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%94%D0%BD%D1%82), необхідно під'єднати з допомогою спеціального дротового з'єднання, та налаштувати режим роботи.

Мобільні, та особливо побутові мобільні, пульсоксиметри мають діапазон похибок[[10]](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%81%D0%BE%D0%BA%D1%81%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80#cite_note-ppt2020-10), залежно насамперед від [ЧСС](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A7%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%B0_%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%86%D0%B5%D0%B2%D0%B8%D1%85_%D1%81%D0%BA%D0%BE%D1%80%D0%BE%D1%87%D0%B5%D0%BD%D1%8C) та рівня заряду елементів, що живлять пристрій.

Вушний датчики швидше виявляє зміни у порівнянні із датчиком на пальці.

**Пульсоксиметрія**

Простий неінвазивний метод моніторингу насичення (сатурації) гемоглобіну артеріальної крові киснем **SaO2**; якщо вимірюється за допомогою газометрії, то використовують символ SpO2) і пульсу.

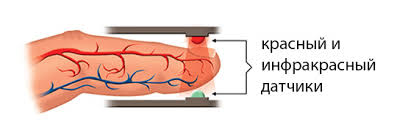
Опис методу

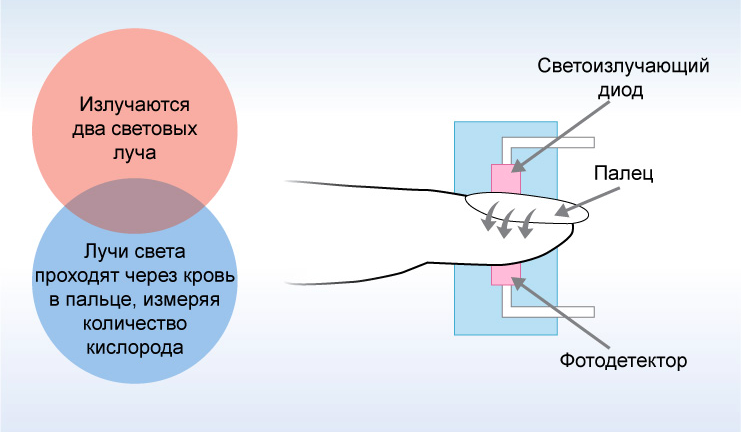
Трансмісійна спектрофотометрія, що базується на використанні різних оптичних властивостей окисленого і відновленого гемоглобіну. З метою вимірювання використовують периферичні датчики, які кріпляться на різні частини тіла, зокрема: палець, вушна раковина, чоло, крило носа.

Інтерпретація результатів

В нормі SpO2 становить 95–98 % (у людей, старших за 70 років – 94–98 %), а при кисневій терапії може досягати 99–100 %. У випадку пониженого рівня SpO2 <90 %, відповідно PaO2 становить <60 мм рт. ст.

Основні обмеження вимірювань: рухові артефакти і знижена периферична перфузія крові; завищення результату (SpO2) за рахунок карбоксигемоглобіну, а при реальному рівні <85 % також за рахунок метгемоглобіну, який занижує результат при рівні >85 %; заниження результату, спричинене змінами нігтьових пластинок (темний лак необхідно змити перед вимірюванням, грибок нігтів).







ПЛЕТИЗМОГРАМА

`