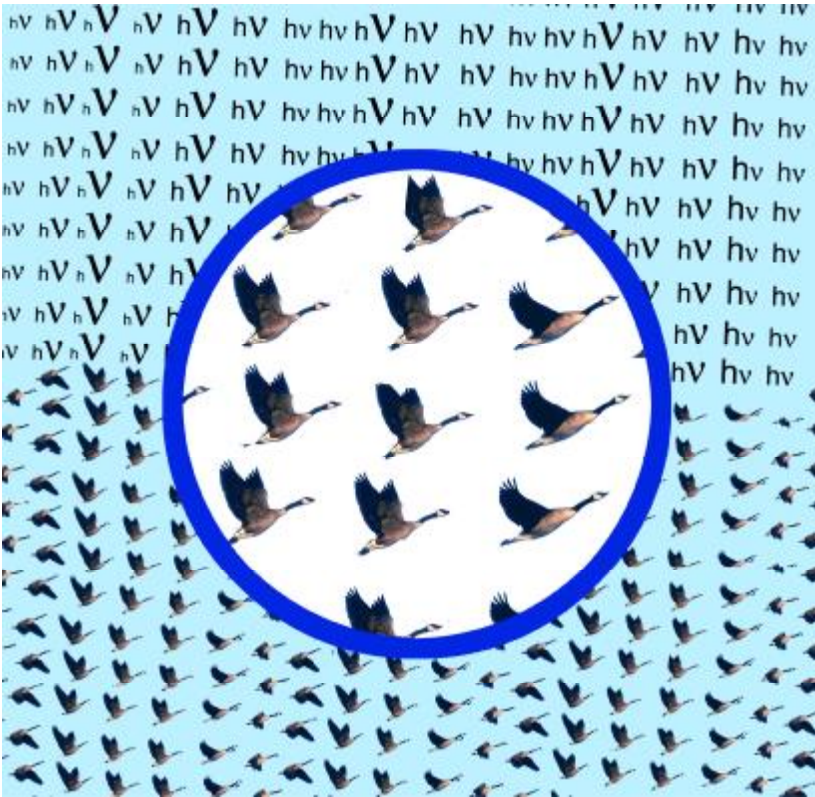


**Б.А. Сусь**  
**Б.Б.Сусь**

**НЕЗВИЧНЕ БАЧЕННЯ  
ТРАДИЦІЙНИХ ПРОБЛЕМНИХ  
ПИТАНЬ ФІЗИКИ**



Київ – 2010

**Сусь Б.А.  
Сусь Б.Б.**

**НЕЗВИЧНЕ БАЧЕННЯ  
ТРАДИЦІЙНИХ  
ПРОБЛЕМНИХ  
ПИТАНЬ ФІЗИКИ**

Науково-методичне видання

Київ - 2010

**УДК 53.001**

**Б.Б.К ч.48**

**С.905**

**Сусь Б.А., Сусь Б.Б. Незвичне бачення традиційних проблемних питань фізики.** Науково-методичне видання. – К.: Просвіта, 2010. – 124 с.

В навчально-методичному посібнику дається нетрадиційний розгляд традиційних проблемних питань фізики, які вивчаються у вищій і загальноосвітній школі. Зокрема питання існування матерії у вигляді речовини і поля і її переходу з одного виду в інший як форми руху, питання релятивістської маси, двоїстості природи світла як форми руху, що являє собою коливання типу маса–енергія–маса–енергія–..., хвильовий характер хвиль де Бройля і природу співвідношення невизначеностей, несуперечливе квантове тлумачення явища дифракції та інші проблемні питання.

Посібник може бути використаний викладачами вищої школи і вчителями для організації самостійної роботи студентів і учнів над проблемними питаннями фізики, організації диспутів тощо.

Рецензенти:

**В.П. Сергієнко** – професор кафедри загальної та прикладної фізики Національного педагогічного університету імені Михайла Драгоманова, доктор педагогічних наук, професор;

**А.В. Франів** – професор кафедри експериментальної фізики Національного університету "Львівська політехніка", доктор фізико-математичних наук, професор.

## Зміст

<b>Вступ...</b>	<b>5</b>
<b>1. Проблеми релятивістського руху частинок.....</b>	<b>9</b>
1.1. Означення проблеми.....	9
1.2. Питання коректності запису формули для релятивістської маси.....	11
1.3. Рух як властивість матерії .....	15
1.4. Робота по переміщенню тіла .....	17
1.5. Зв'язок між масою і енергією .....	19
1.6. Швидкість світла.....	21
<b>2. Що таке світло ? .....</b>	<b>24</b>
2.1. Світло як потік частинок, що коливаються .....	26
2.2. Світло – електромагнітні хвилі.....	29
2.3. Рівняння Максвелла в диференціальній формі.....	30
2.4. Основні властивості електромагнітних хвиль.....	33
2.5. Які коливання відбуваються з фотоном ? .....	38
<b>3. Що таке фотон як частинка .....</b>	<b>42</b>
3.1. Чому швидкість світла є сталою величиною ? .....	44
3.2. Збереження імпульсу при поширенні електромагнітних хвиль. ....	45
<b>4. Середовище для поширення світла. ....</b>	<b>47</b>
4.1. Проблемність традиційної інтерпретації досліду Фізо стосовно захоплення ефіру рухомим тілом .....	48
4.2. Дослід Майкельсона стосовно захоплення ефіру рухомим тілом .....	49
4.3. Розбіжність між результатами досліду Фізо і Майкельсона.....	53
<b>5. Незалежність швидкості світла від руху системи координат, в якій воно поширюється ...</b>	<b>56</b>
5.1. Відмінність між швидкістю руху тіла і швидкістю поширення світла.....	57
5.2. Ефект Доплера з точки зору квантово- коливної теорії світла..	62
.....	
<b>6. Явище дифракції з точки зору коливної природи фотонів .....</b>	<b>67</b>
6.1. Дифракція як один із видів інтерференції	68

.....		
6.2. Особливості розрахунку дифракційної картини на основі хвильового підходу		70
.....		
6.3. Дифракція світла з точки зору квантових уявлень.....		71
6.4. Дифракція на одній щілині з точки зору квантових уявлень.....		75
6.5. Розрахунок інтерференційної картини дифракційної ґратки на основі квантових уявлень про світло.....		77
<b>7. Описування дифракційних ефектів на основі квантової теорії світла.....</b>		<b>82</b>
7.1. Метод графічного додавання амплітуд при дифракції світла з точки зору квантової теорії світла.....		82
7.2. Зонні пластинки з точки зору квантової теорії світла.....		85
7.3. Експериментальне підтвердження квантового трактування явища дифракції.....		88
7.4. Чи світиться зона Френеля ?.....		90
.....		
7.5. Дифракція на прямолінійному краю площини з точки зору квантового підходу.....		91
7.6. Проблемність задач на тему дифракції.....		92
7.7. Експериментальна перевірка дії зон Френеля.....		98
<b>8. Хвилі де Бройля з точки зору коливного руху матерії.....</b>		<b>99</b>
8.1. Електрон в атомі водню як хвиля де Бройля .....		102

<b>9. Квантово-механічні явища з точки зору уявлень коливного руху матерії.....</b>	<b>106</b>
.....	
9.1. Рівняння Шредінгера з точки зору коливного руху матерії	108
.....	
9.2. Співвідношення невизначеностей Гейзенберга як наслідок коливного руху матерії.....	109
<b>10. Обґрунтування механізму гравітації.....</b>	<b>114</b>
10.1. Взаємодія тіл через середовище.....	116
10.2. Взаємодія тіл через обмін частинками .....	116
10.3. Експериментальна перевірка існування гравітонів	120
<b>Література.....</b>	<b>123</b>
<b>Авторські публікації.....</b>	<b>125</b>
<b>Рецензії.....</b>	<b>129</b>

## Вступ

Фізика як наука про природу – найдревніша з наук. Вона стала основою багатьох інших наук, дала базу для розвитку техніки, що разом з фізикою спричинило інтенсивний розвиток нашої цивілізації. Електротехніка, радіотехніка, матеріалознавство, приладобудування, електроніка – це ті області науки і техніки, де фізика є невід'ємною складовою. Енергетика, фізична хімія, біофізика, медицина – області науки, які мають безпосереднє відношення до існування самого життя і зокрема життя людини. Фізика дає основу для філософії – науки про начала нашого буття.

З точки зору філософії у нескінченному просторі Всесвіту існує субстанція, яка дістала назву "матерія". За сучасними уявленнями матерія перебуває в неперервному русі у просторі й часі і вона має два види – речовини і

поля. Звичною у життєвому досвіді ознакою речовинності матерії є наявність маси. Маса характеризує інертність тіл, тобто здатність зберігати стан руху. Таку масу у фізиці називають інертною масою. При безпосередній взаємодії з іншими тілами маса змінює форму руху – прискорюється. Однак маса має ще й іншу властивість – брати участь у гравітаційній взаємодії тіл. Цю масу називають гравітаційною. Вважається, що інертна і гравітаційна маси еквівалентні.

Інша форма матерії – поле. Поле також досить добре вивчене у фізиці. Ми знаємо про електричне, магнітне, електромагнітне поля, про гравітаційне поле, про поля ядерної взаємодії. Завдяки такому електромагнітному полю як світло ми бачимо. Електромагнітне поле також є основою радіо, телебачення. Електромагнітне поле відоме ще як електромагнітні хвилі, що поширюються в просторі з великою швидкістю.

Фізика безпосередньо вивчає і речовину, і поле, їх рух і взаємодію. Але не тільки рух і взаємодію. Якщо матерія має різні види, то цілком логічно допустити, що повинні бути й переходи з одного виду в інший. І напевно однією з найфундаментальніших проблем фізики є саме розуміння процесів взаємного перетворення обох видів матерії – речовини і поля. І у фізиці такі перетворення одного виду матерії в інший добре відомі. Наприклад, при поділі ядра урану маса осколків є меншою від маси ядра, що розпадається – це так званий дефект мас. Частина маси ядра зникає. Однак в природі не може бути абсолютного зникнення чи то речовини, чи поля. І при поділі ядра урану маса не зникає безслідно, бо при цьому з'являється електромагнітне випромінювання – гамма-кванти. Тобто, має місце перехід маси (речовини) в поле. Оскільки електромагнітне поле має енергію, то можна говорити про

перехід маси в енергію. Внаслідок поділу ядер урану в ядерній бомбі виділяється величезна енергія. Перехід маси в енергію відбувається у відповідності з формулою Ейнштейна  $\Delta W = c^2 \cdot \Delta m$ . Відомий також зворотний процес – перехід поля в речовину. Так, при взаємодії двох гамма-квантів (поле) з'являються дві частинки – електрон і позитрон (речовина). Однак слід зазначити, що ці взаємні переходи речовини (маси) в поле (випромінювання) і поля в речовину відомі у фізиці як якісь окремі прояви, як щось частинне, а не як природна властивість матерії, як форма її руху. Нам добре відомі такі форми руху тіл (речовини) як поступальний, обертальний, коливальний. І при зміні форми руху відбувається перехід одного виду енергії в інший. Наприклад, при коливальному русі кінетична енергія періодично переходить в потенціальну і навпаки. Тому було б дивно, якби не існувала ще одна форма руху – форма руху матерії – перехід матерії з одного її виду в інший як неперервний коливний процес, тобто перехід з речовини в поле і поля – в речовину. Ідея пульсації маси як форма існування матерії висловлювалася А. Ейнштейном при створенні загальної теорії відносності: "матерія флукує, генеруючи гравітаційні хвилі, які поширюються зі швидкістю світла" (Меллер Х. Теория относительности. – М.: Наука, 1966. – 462 с.). Є всі підстави вважати таку форму руху обґрунтованою, що й обговорюється в даному посібнику.

Природа – за нашими теперішніми уявленнями – має двоїстий характер. Двоїстість природи матерії проявляється у багатьох фізичних явищах, особливо в області мікросвіту. Але від самого початку усвідомлення поняття двоїстості – від початку минулого століття і до нинішнього часу – є довготривалою нерозв'язаною проблемою. Особливо це стосується поля у вигляді електромагнітних хвиль. Електромагнітні хвилі, зокрема світло, дуже виразно



проявляють як хвильові властивості (тобто польові), так і корпускулярні (речовинні). Суть цієї проблеми в тому, що за традиційними уявленнями хвиля не може бути в один і той же час частинкою або навпаки – частинка не може бути одночасно хвилею. Бо хвиля – явище просторове, а частинка локалізована. Разом з тим, висновок про те, що мікрочастинка, яка рухається з великою швидкістю, одночасно є хвилею – так званою хвилею де Бройля – є цілком обґрунтованим. На основі уявлень про хвилі де Бройля створені і успішно використовуються в науці, техніці і господарській діяльності добре відомі електронні мікроскопи. Хвилі де Бройля стали фундаментальним поняттям у квантовій механіці, яка з величезним успіхом пояснює фізичні процеси і явища в області мікросвіту.

Однак проблема залишається нерозв'язаною протягом сотні років. Як і 100 років тому нам неможливо уявити як частинка, яка локалізована в малому об'ємі, одночасно може бути хвилею (тобто є явищем просторовим). Фізики звикли з цією суперечністю і все пояснюється як і сто років тому – ну такий він той мікросвіт !

Логічне і зрозуміле пояснення повинно бути. Якщо цього нема – значить щось не так з нашими уявленнями про фізичні явища і процеси, щось не так з формуванням понять і з термінологією, що виражає поняття. Над цим треба працювати.

Проблема суперечності існує. У посібнику подається обґрунтоване несуперечливе тлумачення проблеми дуалізму, переходу матерії з одного її виду в інший, проблема двоїстості природи світла зокрема і електромагнітних хвиль взагалі.

Посібник може послужитися викладачам для створення проблемних ситуацій і альтернативних підходів, а також студентам для самостійної роботи при вивченні фізики.



# 1. ПРОБЛЕМИ РЕЛЯТИВІСТСЬКОГО РУХУ ЧАСТИНОК

## 1.1. Означення проблеми

Під релятивістським рухом тіл розуміють рух з великими швидкостями, коли проявляється залежність маси від швидкості. У науковій і особливо в навчальній літературі немає однозначного розуміння процесів, пов'язаних з релятивістським рухом. Проблемними є як формулювання наукових понять, так і термінологія, що їх виражає. У зв'язку з цим виникає необхідність послідовного розгляду цих питань з належним обґрунтуванням.

У шкільних підручниках, у посібниках для вищої школи, в енциклопедичній і науковій літературі стверджується, що маса тіла (частинки) залежить від швидкості за відомою з теорії відносності формулою

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (1)$$

де  $m_0$  – так звана **маса спокою**, тобто маса, визначена в нерухомій системі координат, а  $m$  – **релятивістська маса**, визначена в системі відліку, що рівномірно рухається зі швидкістю  $v$  по відношенню до нерухомої системи [1-6].

Формула (1) пов'язується із дослідженням руху електронів у магнітному полі і вона має експериментальне підтвердження. Цей ефект використовується при побудові прискорювачів заряджених частинок і широко відображений в навчальній літературі. Вперше залежність маси від швидкості руху була виявлена і вивчена в дослідях німецького фізика В. Кауфмана в 1899–1906 р. і потім підтверджена багатьма фізиками. Кауфман вимірював відхилення  $\beta$ -променів радіо (швидких електронів) у магнітному і електричному полях і виявив, що величина питомого

заряду електрона, тобто відношення його заряду до маси, при збільшенні швидкості електронів зменшується. Оскільки заряд електрона не змінюється, то це означало, що маса електрона при збільшенні швидкості зростає.

Питання залежності маси від швидкості для фізиків, які працюють з прискорювачами заряджених частинок, не вважається проблемним. Однак ставлення до питання залежності маси від швидкості серед науковців у наш час не є однозначним і формула (1), яка визначає цю залежність, заперечується. Такі альтернативні думки висловлені в працях [7, 8].

Немає також однозначності в розумінні залежності між енергією і масою тіла:

$$W = c^2 \cdot m, \quad (2)$$

яка є фундаментальним висновком теорії відносності. В теорії відносності традиційно під релятивістською масою  $m$  розуміють загальну масу, яка включає в себе масу спокою  $m_0$  і набуту масу внаслідок зростання швидкості. Інші науковці вважають, що у формулах (1) і (2) маса  $m$  – це тільки маса спокою (тобто  $m_0$ ), а енергія  $W$  – енергія спокою ( $W = W_0$ ). Автор [7, 8] цілеспрямовано досліджує це питання і приходять до висновку, що поняття "релятивістська маса" є архаїчним, а термін "маса спокою" взагалі зайвий, тому замість виразу "маса спокою" ( $m_0$ ) слід говорити просто про масу тіла  $m$ , яка не залежить від руху системи відліку. Автор [7, 8] пояснює, що "поняття маси, залежної від швидкості, виникло на початку ХХ століття в результаті "незаконного" поширення ньютонівського співвідношення між імпульсом і швидкістю на область швидкостей, порівняних зі швидкістю світла, в якій воно несправедливе", і що "на кінець ХХ століття з поняттям маси, залежної від швидкості, пора цілковито розпрощатись".

Слід зазначити, що ці думки викладені у двох статтях великого обсягу і вони ґрунтуються головним чином на аналізі проблеми в історичному аспекті з посиланням на авторитети. Однак в цих статтях, на жаль, не вистачає послідовного авторського аналізу і фізичної аргументації проблеми, відсутнє співставлення висновків з існуючими даними досліджень стосовно залежності питомого заряду частинки від швидкості руху. Відсутні також пояснення роботи прискорювачів заряджених частинок в дусі висловлених у статтях ідей.

Таким чином, існує необхідність обґрунтування залежності чи незалежності маси тіла від швидкості.

## **1.2. Питання коректності запису формули для релятивістської маси**

Покажемо, що в представленні (1) закладений елемент некоректності, тому потрібне дещо інше прочитання цієї формули.

Уявімо, що за тілом ведеться спостереження із декількох інерціальних систем координат, що рухаються відносно тіла з різними швидкостями. Наприклад, тіло знаходиться в літаку, що рухається зі швидкістю  $v_1$  по відношенню до Землі. Нехай для спостерігача, що також знаходиться в цьому ж літаку, швидкість тіла  $v_0 = 0$ . Для іншого спостерігача, що знаходиться на Землі, швидкість тіла буде  $v_1$ . Ще один спостерігач їде в поїзді і бачить рух тіла зі швидкістю  $v_2$ . З точки зору спостерігачів виходить, що тіло одночасно рухається з різними швидкостями, отже його маса, у відповідності з формулою (1), має різні значення. Однак маса тіла є мірою його речовинності і вона не може залежати від того, хто за тілом спостерігає. Тому можна погодитися з твердженням [7, 8], що маса тіла

не залежить від системи координат, в якій вона знаходиться.

Таким чином, є підстави стверджувати, що проблема неоднозначності тлумачень залежності чи незалежності маси від швидкості має значною мірою методичний характер. Тобто, щось тут не так названо, тому нема однозначного розуміння явища. Для того, щоб усунути проблему, необхідно скоректувати прочитання формули. Справа в тому, що **коли ми хочемо розглядати рух тіла в різних системах координат, то тіло треба перевести в ту чи іншу систему, а це означає, що необхідно реально змінити його швидкість**. Для цього на тіло потрібно подіяти силою, бо **зміна швидкості** від 0 до  $v$  відбувається внаслідок прискорення. Отже у формулі (1) символ  $v$  насправді означає не швидкість, а зміну швидкості:  $\Delta v = v - v_0 = v - 0 = v$  і відповідну зміну  $(\Delta v)^2 = v^2$ . Формула (1) формально є правильною, але коректний її запис має вигляд:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{(\Delta v)^2}{c^2}}} . \quad (3)$$

При такому представленні залежності маси від швидкості суперечність відсутня, бо йдеться про **зміну швидкості** при переході тіла із системи, де його швидкість рівна нулеві, в іншу систему зі швидкістю  $v$ . Якщо для кожного із спостерігачів швидкість тіла різна, то зміна швидкості, якщо вона відбувається, для всіх спостерігачів буде однаковою.

Для зміни швидкості необхідно над тілом виконати роботу, а це означає, що **необхідно змінити його енергію**. І не тільки енергію.

Коли ми хочемо  
розглядати рух тіла  
в різних системах  
координат,  
то тіло треба перевести  
в ту чи іншу систему,  
а це означає,  
що необхідно реально  
змінити його швидкість

Характеристикою руху  
є **кількість руху  $K$** .

Це те що переміщується

– маса  $m$ ,

– і як воно переміщується –  
швидкість  $v$  :

$$**$K = mv.$**$$



### 1.3. Рух як властивість матерії

Розглянемо детальніше рух тіла у просторі і в часі, виходячи із загальних наших уявлень про природу.

Рух тіла (частинки) – це переміщення речовини в просторі і в часі. Характеристикою речовини (тіла, частинки) є маса  $m$ . Характеристикою переміщення є швидкість  $v$ . Таким чином, характеристикою руху є те, що переміщується – маса  $m$ , і як воно переміщується – швидкість  $v$ . Такою характеристикою є **кількість руху**:

$$K = m \times v.$$

Зауважимо, що за прийнятою термінологією кількість руху часто називають імпульсом. Цей термін навряд чи можна вважати вдалим, бо імпульс означає поштовх, удар, в результаті чого змінюється характер руху. Якщо тіло рухається вільно, то ніякого поштовху нема і тіло має певну кількість руху. Поштовх (імпульс) виникає при взаємодії тіла з іншим тілом. Якщо два тіла рухаються з різними швидкостями, то при зіткненні відбувається поштовх і **зміна кількості руху**  $dK$  в часі. Чим більший час триває поштовх, тим більша зміна кількості руху. Тому можна записати:

$$dK = F dt. \quad (4)$$

Зміна кількості руху за одиницю часу називається силою, що діє на тіло:

$$F = \frac{dK}{dt}.$$

В механіці Ньютона вважається, що маса в процесі руху не змінюється ( $m = const$ ). Тоді

$$F = \frac{d(mv)}{dt} = m \frac{dv}{dt}.$$

Однак в результаті дії сили виконується робота і змінюється енергія тіла, а за теорією відносності між енергією і масою існує зв'язок:

$$W = c^2 m.$$

Це означає, що при зміні енергії змінюється маса. Тому сила

$$F = \frac{dK}{dt} = \frac{d(mv)}{dt} = m \frac{dv}{dt} + v \frac{dm}{dt}.$$

Отже, при дії на тіло сили може змінюватися його швидкість і маса. Таким чином, діючи на тіло, сила виконує роботу:

$$\begin{aligned} dA &= F dx = \\ &= \left( m \frac{dv}{dt} + v \frac{dm}{dt} \right) \cdot dx \end{aligned} \quad (5)$$

де  $dx$  – переміщення тіла під дією сили.

Як бачимо, робота сили йде **на зміну швидкості** і надання тілу кінетичної енергії, а також **на зміну маси тіла**.

Зазначимо, що традиційно в навчальній літературі необґрунтовано стверджується, що робота сили, яка прискорює тіло, йде тільки на надання йому кінетичної енергії і не береться до уваги, що робота також іде на створення динамічної маси тіла [9. – С. 30].

#### 1.4. Робота по переміщенню тіла

Використовуючи (5), знайдемо роботу при переміщенні тіла на деяку відстань  $x$  :

$$\begin{aligned} A &= \int dA = \int_{x_0}^x \left( m \frac{dv}{dt} + v \frac{dm}{dt} \right) dx = \\ &= \int_{x_0}^x m \frac{dv}{dt} dx + \int_{x_0}^x v \frac{dm}{dt} dx . \end{aligned}$$

Врахуємо, що  $dx = v dt$  і зробимо заміну змінних:

$$\begin{aligned} A &= \int_{v_0}^v m \frac{dv}{dt} (v \cdot dt) + \int_{m_0}^m v \frac{dm}{dt} (v \cdot dt) = \\ &= \int_{v_0}^v m v \cdot dv + \int_{m_0}^m v^2 dm = m \frac{v^2}{2} \Big|_{v_0}^v + v^2 m \Big|_{m_0}^m = \\ &= \left( m \frac{v^2}{2} - \frac{m v_0^2}{2} \right) + v^2 (m - m_0) = \\ &= m \left( \frac{v^2}{2} - \frac{v_0^2}{2} \right) + v^2 (m - m_0) . \end{aligned} \tag{6}$$

Отже, робота по переміщенню тіла

$$A = m \frac{\Delta(v^2)}{2} + v^2 (\Delta m) . \tag{7}$$

Як бачимо, зв'язок між масою і енергією має універсальний характер.

В результаті дії сили відбувається зміна кінетичної енергії і зміна маси тіла  $\Delta m$ . Це значить, що робота сили йде не тільки на надання кінетичної енергії, але також на створення динамічної маси.

**Релятивістська маса**, таким чином, **в традиційному представленні є не чим іншим як сумарною масою, яка дорівнює сумі маси спокою і динамічної маси (тобто набутої маси внаслідок прискорення).**

Робота сили  
по переміщенню тіла  
йде на надання  
кінетичної енергії  
і на зміну маси тіла

## 1.5. Зв'язок між масою і енергією

Звернемо увагу також на прочитання формули

$$W = c^2 \cdot m. \quad (2')$$

(див. ф–лу (2)). Є різні її тлумачення. Так, існує твердження [7, 8], що у формулі (2') маса  $m$  є масою спокою ( $m = m_0$ ), а енергія  $W$  – енергією спокою ( $W = W_0$ ). Відоме також традиційне трактування, що ця формула виражає еквівалентність маси і енергії. Очевидно, що тут має місце певна некоректність, так би мовити методичного характеру, тому необхідно прийти до однакового розуміння. У фізиці відоме поняття **дефекту маси**, яке дає можливість унаочнити прочитання формули (2'). При поділі важкого ядра урану маса ядра не дорівнює масі осколків, на які розпадається ядро. Зате з'являється  $\gamma$ -випромінювання, яке має енергію. Таким чином, "зникає" маса, але "виникає" енергія у відповідності з формулою (2'). Отже, йдеться про **зміну маси і енергії**, що повинно бути відображено у формулі. Тому цілком логічно формулу (2) записувати у вигляді:

$$\Delta W = c^2 \cdot \Delta m. \quad (7)$$

Це означає, що при зміні маси тіла відбувається відповідна зміна енергії. І навпаки – при зміні енергії відбувається зміна маси тіла. Таким чином, ми приходимо до висновку про існування ще однієї форми руху матерії. Ця форма руху не є новою, вона добре відома у фізиці у вигляді частинних випадків. Однак вона не розглядається як **фундаментальне фізичне явище**, яке відображає властивість матерії не тільки існувати у двох видах – речовини і поля, але також переходити з одного виду в інший. Причому, такі взаємні переходи повинні б існувати як неперервний процес.

При зміні енергії  
відбувається зміна маси тіла.

І навпаки.

Ми приходимо до висновку  
про існування  
такої форми руху матерії  
як неперервного процесу.

## 1.6. Швидкість світла

Релятивістський рух тіл пов'язаний зі швидкістю світла. Швидкість світла є константою і входить у формули (1) і (2) для маси і енергії:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad W = c^2 \cdot m.$$

Оскільки світло має двоїсту природу – це хвилі і частинки (фотони) водночас, то у зв'язку з цим виникає питання: якою є швидкість світла? Це швидкість переміщення речовини (маси), чи швидкість поширення фази електромагнітних хвиль? Якщо  $c$  – фазова швидкість, то яке вона має відношення до швидкості тіла, яке являє собою речовину? Якщо ж  $c$  – швидкість переміщення частинки (фотона), то яке відношення має фаза до переміщення фотона як частинки?

Ці питання є проблемними і на них треба дати відповідь. Потрібно знайти доступне пояснення двоїстості природи світла.

Якою є швидкість світла ?  
Це фазова швидкість ?  
Чи швидкість  
переміщення маси ?

Швидкість світла  
є двоєдиною  
характеристикою  
– це швидкість  
переміщення маси  
і швидкість поширення  
сталогої фази частинки, що  
коливається



Усе життя я буду  
думати про те,  
що таке світло

*Альберт Ейнштейн*

## 2. ЩО Ж ТАКЕ СВІТЛО ?

Питання природи світла стало актуальним 100 років тому, але залишається нерозв'язаним і донині. Відомо, що світло має двоїсту природу – це хвилі і частинки водночас. Те, що світло – хвилі, незаперечно доводиться характерними для хвиль явищами інтерференції, дифракції. А явища фотоефекту, тиску світла, одностороннього поширення фотонів (дослід Боте) підтверджують корпускулярні властивості світла.

Корпускулярність світла дуже наочно підтверджено дослідом Боте [10. – С. 38]. Під дією  $X$ -променів невеликої інтенсивності частотою  $\nu_1$  атоми фольги  $\Phi$  в результаті флуоресценції перевипромінюють фотони з енергією  $h\nu_2$  (рис. 2.1) .

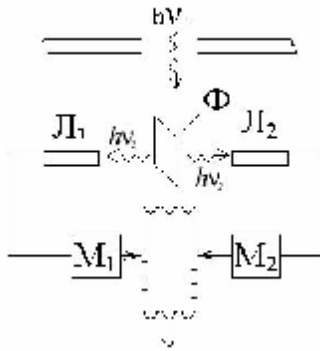


Рис. 2.1.

Ці кванти вторинного  $X$ -випромінювання фіксуються лічильниками  $L_1$  і  $L_2$  з протилежних сторін металевій фольги  $\Phi$  за допомогою запируючих механізмів  $M_1$  і  $M_2$  . Спрацьовування механізмів  $M_1$  і  $M_2$  відбувається не одночасно, як це повинно було б бути, якби від атома поширювалась в усі сторони хвиля, а незалежно і безладно.

Це означає, що атом випромінює фотон як частинку, що має імпульс  $\vec{p}$  і рухається в одному напрямку.

Таким чином, поодинокий акт випромінювання атома не можна трактувати як хвилю, що поширюється в усі сторони. Проте традиційно при розгляді явища дифракції світла поняття точкового джерела випромінювання і сферичної хвильової поверхні використовується в усіх загальновідомих навчальних посібниках без яких-небудь застережень [11,12,13].

Однак проблема в тому, що властивості фотона бути хвилею і частинкою водночас – є суперечливими, оскільки частинка локалізована, а хвиля – явище просторове. Тому одночасно бути локалізованим в малому об'ємі і бути у просторі – взаємно непомістимі поняття. Крім того, **ознакою речовинності матерії, її корпускулярності є наявність маси**, а в науковій літературі уявлення про масу фотона, як уже зазначалося, неоднозначні і суперечливі, бо одні автори вважають, що фотон маси не має взагалі, а інші – що він не має маси спокою, але має релятивістську масу.

Традиційно вважається, що **фотон має масу і тому він є частинкою**. Правда, це так звана релятивістська маса, пов'язана з рухом, тоді як маса спокою фотона дорівнює нулеві [10. – С. 40; 14. – С. 373]. Іншими авторами наявність будь-якої маси у фотона взагалі заперечується [7, 8]. Тоді з такої точки зору **фотон навіть не можна вважати частинкою**. Очевидно, є проблеми з термінологією і це вже питання методичного характеру. Необхідно визначитись, що ми називаємо частинкою (тілом).

З іншого боку, світло – це хвилі, які поширюються з максимально можливою швидкістю  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с. Однак будь-які хвилі поширюються в середовищі, а для світла такого середовища (ефіру), як показано на основі дослідів Майкельсона, не існує. Незрозумілим є саме поняття фотона-частинки як хвилі. Так, вживається вислів "фотон

такої-то частоти", тобто, вважається, що фотон – це частинка, для якої властиві коливання певної частоти. Однак нема ніяких пояснень стосовно природи і механізму коливань фотона. Хоч думка про "дрижальний" характер частинок висловлювалась.

Проблемним є також розуміння перенесення енергії світлом. Відомо, що при поширенні хвиль переноситься енергія, тоді як маса не переноситься. Але якщо фотон – частинка, яка переміщується в просторі, то він повинен переносити масу.

У зв'язку з двоїстістю природи світла існує також проблема, на яку у фізиці не звертається увага і не має однозначної відповіді – а яка саме швидкість світла? Якщо світло – хвилі, то це фазова швидкість. Для фотона ж як частинки швидкість характеризує переміщення маси.

Таким чином, при вивченні питання світла зокрема чи електромагнітних хвиль взагалі існує цілий комплекс проблем, які необхідно пояснити. Це питання як наукового, так і методичного характеру.

## **2.1. Світло як потік частинок, що коливаються**

Очевидно, що світло – це особливий випадок коливань, коли швидкість поширення частинок (фотонів) і фазова швидкість (швидкість поширення фази) – однакові. Традиційно в науковій і навчальній літературі такий вид коливань не розглядається, незважаючи на те, що в природі, навіть виходячи із загальних міркувань, повинен існувати. І він існує. Це потік не просто частинок, а частинок, що коливаються. Прикладом можуть бути коливання крил зграї пташок, що летять в одному напрямку. Тут швидкість переміщення самої пташки (маси) і переміщення фази коливань – збігаються. З поміж зграї можна

виділити поверхню, на якій знаходяться пташки, що махають крилами в одній фазі, наприклад, їх одночасно піднімають і опускають. Це і буде хвильова поверхня у відповідності з принципом Гюйгенса. І таких хвильових поверхонь можна виділити багато (рис. 2.2).

Світло – це потік  
частинок,  
що коливаються

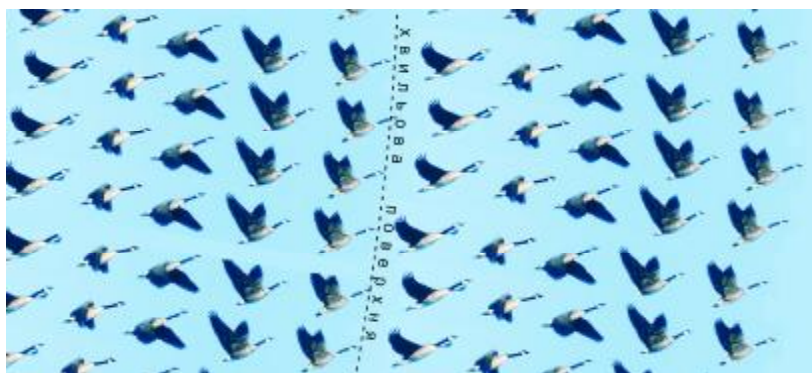


Рис. 2.2

Отже, світло слід розглядати як потік частинок, які називаються фотонами. Фотони – особливі частинки, кожна з яких перебуває у коливальному стані.

На рис. 2.3 схематично показано точкове джерело світла, яке випромінює фотони в усі сторони. Фотони коливаються з різними фазами, але з поміж них можна вибрати такі, що коливаються в одній фазі.

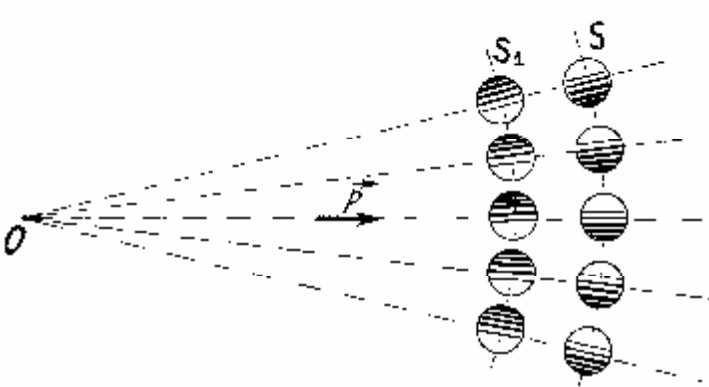


Рис. 2.3

Фотони, коливання яких відбувається в однаковій фазі, утворюють хвильову поверхню  $S$ , що відповідає принципу Гюйгенса. У випадку точкового джерела хвильова поверхня сферична.

Таким чином світло – це потік особливих частинок. Однак світло – це ще й електромагнітні хвилі.

## 2.2. Світло – електромагнітні хвилі

Висновок про те, що світло – це електромагнітні хвилі, зробив Максвелл на основі створеної ним теорії електромагнітних хвиль. Оскільки такий висновок має надзвичайно важливе значення і стосується розв'язуваної нами проблеми, доцільно розглянути елементи теорії Максвелла.

Основу системи рівнянь Максвелла становлять теорема про циркуляцію магнітного поля (закон повного струму) і закон електромагнітної індукції:

$$\oint_1^{\mathbf{r}} \mathbf{H} d\mathbf{l} = \int_s \frac{d\mathbf{D}}{dt} d\mathbf{s} + \int_s \mathbf{j} d\mathbf{s}, \quad (17)$$

$$\oint_1^{\mathbf{r}} \mathbf{E} d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \left( \int_s \mathbf{B} d\mathbf{s} \right),$$

де  $\mathbf{D} = \epsilon \epsilon_0 \mathbf{E}$  – вектор електричного зміщення,

а  $\mathbf{B} = \mu \mu_0 \mathbf{H}$  – вектор магнітної індукції.

Ці рівняння зв'язують значення напруженості електричного поля  $\mathbf{E}$  і напруженості магнітного поля  $\mathbf{H}$  вздовж деякого контура  $l$  зі значеннями  $\frac{dB}{dt}$  і  $\frac{dD}{dt}$  в точках поверхні, охопленої контуром (рис. 2.4). Наприклад, зміна у часі вектора  $\mathbf{B}$ , що пронизує поверхню  $S$ , охоплену провідним контуром, супроводжується появою електрорушійної сили індукції. І навпаки, зміна в часі електричного поля відбувається разом з появою магнітного поля.

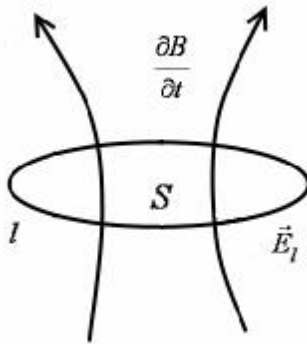


Рис. 2.5

### 2.3. Рівняння Максвелла в диференціальній формі

Рівняння Максвелла (17) записуються через компоненти векторів і в диференціальній формі вони мають вигляд [11. – С. 295]:

$\frac{dH_z}{dy} - \frac{dH_y}{dz} = \frac{dD_x}{dt} + j_x,$	$\frac{dE_z}{dy} - \frac{dE_y}{dz} = -\frac{dB_x}{dt},$
$\frac{dH_x}{dz} - \frac{dH_z}{dx} = \frac{dD_y}{dt} + j_y,$	$\frac{dE_x}{dz} - \frac{dE_z}{dx} = -\frac{dB_y}{dt},$
$\frac{dH_y}{dx} - \frac{dH_x}{dy} = \frac{dD_z}{dt} + j_z,$	$\frac{dE_y}{dx} - \frac{dE_x}{dy} = -\frac{dB_z}{dt},$
$\frac{dD_x}{dx} + \frac{dD_y}{dy} + \frac{dD_z}{dz} = \rho,$	$\frac{dB_x}{dx} + \frac{dB_y}{dy} + \frac{dB_z}{dz} = 0.$



Якщо середовище непровідне ( $j_x = j_y = j_z = 0$ ), густина заряду  $\rho = 0$ , і якщо вважати, що  $\vec{E}$  і  $\vec{H}$  залежать тільки від однієї координати  $x$  і від часу  $t$ , то рівняння Максвелла приймуть вигляд:

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{dD_x}{dt}, & 0 &= -\frac{dB_x}{dt}, \\ -\frac{dH_z}{dx} &= \frac{dD_y}{dt}, & -\frac{dE_z}{dx} &= -\frac{dB_y}{dt}, \\ \frac{dH_y}{dx} &= \frac{dD_z}{dt}, & \frac{dE_y}{dx} &= -\frac{dB_z}{dt}, \\ \frac{dD_x}{dx} &= 0, & \frac{dB_x}{dx} &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Виділимо в системах (1) рівняння з однією складовою, наприклад  $E_y$ :

$$-\frac{dH_z}{dx} = \frac{dD_y}{dt}, \quad \frac{dE_y}{dx} = -\frac{dB_z}{dt}. \quad (2)$$

Враховуючи, що  $D_y = \epsilon \epsilon_0 E_y$ , а  $B_z = \mu \mu_0 H_z$  рівняння (2) запишемо:

$$-\frac{dH_z}{dx} = \epsilon \epsilon_0 \frac{dE_y}{dt}, \quad \frac{dE_y}{dx} = -\mu \mu_0 \frac{dH_z}{dt}. \quad (3)$$

Виключимо магнітне поле із системи рівнянь (3), для чого продиференціюємо перше рівняння по  $t$ , а друге – по  $x$ :

$$\frac{d^2 H_z}{dx dt} = -\epsilon \epsilon_0 \frac{d^2 E_y}{dt^2}, \quad \frac{d^2 E_y}{dx^2} = -\mu \mu_0 \frac{d^2 H_z}{dx dt}. \quad (4)$$

Перемноживши ліві і праві сторони (4), одержуємо:

$$\frac{d^2 E_y}{dx^2} = \epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0 \frac{d^2 E_y}{dt^2}. \quad (5)$$

Якщо подібним чином із (3) виключити  $E_y$ , матимемо:

$$\frac{d^2 H_z}{dx^2} = \epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0 \frac{d^2 H_z}{dt^2}. \quad (6)$$

Рівняння (5) і (6) – це рівняння хвилі в диференціальній формі, або так зване **хвильове рівняння**, загальний вигляд якого:

$$\frac{d^2 S}{dx^2} = \frac{1}{u^2} \frac{d^2 S}{dt^2}. \quad (7)$$

Порівнюючи (7) з рівняннями (5) і (6), бачимо, що

$$\epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0 = \frac{1}{v^2},$$

звідки швидкість хвилі

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \sqrt{\epsilon \mu}}. \quad (8)$$

Для вакууму  $v \cong 3 \cdot 10^8 \frac{M}{c} = c$ .

Розв'язками хвильових рівнянь (5) і (6) є гармонічні функції

$$E_y = E_{oy} \cos(\omega t - kx + \psi_1), \quad (9)$$

$$H_z = H_{oz} \cos(\omega t - kx + \psi_2). \quad (10)$$

Ці функції являють собою плоску хвилю, що поширюється в напрямку  $x$ .

Таким чином, виходячи з рівнянь Максвелла, при-

ходимо до висновку, що одночасно і взаємно пов'язано повинні існувати електричні і магнітні хвилі – електромагнітні хвилі.

Дослідимо характер і властивості цих хвиль.

## 2.4. Основні властивості електромагнітних хвиль

Запишемо ще раз рівняння Максвелла (3), з яких одержали рівняння хвиль (9) і (10):

$$\begin{aligned} -\frac{dH_z}{dx} &= \epsilon\epsilon_0 \frac{dE_y}{dt}, \\ \frac{dE_y}{dx} &= -\mu\mu_0 \frac{dH_z}{dt}. \end{aligned}$$

Як бачимо, в цю систему рівнянь входять компоненти  $H_z$  і  $E_y$ , тобто взаємно перпендикулярні складові електричного і магнітного полів. Складова електричного поля  $E_y$ , змінюючись у часі, пов'язана зі зміною магнітного поля  $H_z$ , а змінне в часі магнітне поле  $H_z$  пов'язане зі зміною поля  $E_y$ . Аналогічно можна показати, що таке ж справедливо і для інших компонентів ( $E_x$ ,  $E_z$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ ).

Таким чином, ми приходимо до важливого висновку: **взаємно обумовлені електричне і магнітне поля, змінюючись в часі, є взаємно перпендикулярними:**

$$\dot{\vec{H}} \perp \dot{\vec{E}} \quad (11)$$

Знайдемо фази коливань  $E$  і  $H$ .

Для цього вирази для  $H_z$  і  $E_y$  ( див. (9) і (10) ) :

$$E_y = E_{0y} \cos(\omega t - kx + \psi_1),$$

$$H_z = H_{0z} \cos(\omega t - kx + \psi_2),$$

підставимо у рівняння (3):

$$-\frac{dH_z}{dx} = \epsilon \epsilon_0 \frac{dE_y}{dt},$$

$$\frac{dE_y}{dx} = -\mu \mu_0 \frac{dH_z}{dt}.$$

Відповідно продиференціювавши, отримаємо:

$$-H_{0z} \cdot k \cdot \sin(\omega t - kx + \psi_2) =$$

$$= -\epsilon \epsilon_0 E_{0y} \omega \sin(\omega t - kx + \psi_1),$$

$$E_{0y} \cdot k \cdot \sin(\omega t - kx + \psi_1) =$$

$$= \mu \mu_0 H_{0z} \omega \sin(\omega t - kx + \psi_2). \quad (12)$$

Ліві і праві сторони рівнянь можуть бути рівні тоді, коли аргументи у функціях синусів будуть однакові, що можливо тільки за умови рівності фаз:

$$\psi_1 = \psi_2 \quad (13)$$

**Таким чином, коливання векторів  $\dot{E}$  і  $\dot{H}$  мають однакові фази.**

Коефіцієнти лівої і правої сторін рівнянь (12) також повинні бути рівними:

$$-H_{0z} \cdot k = -\epsilon \epsilon_0 E_{0y} \omega, \quad (14)$$

$$E_{0y} \cdot k = \mu \mu_0 H_{0z} \omega. \quad (15)$$

Електричне і магнітне поля  
в електромагнітній хвилі  
змінюються в одній фазі

Розділимо рівняння (14) і (15) одне на одне:

$$\frac{H_{0z}}{E_{0y}} = \frac{\epsilon \epsilon_0}{\mu \mu_0} \cdot \frac{E_{0y}}{H_{0z}}. \quad (16)$$

Звідси одержуємо співвідношення для амплітуд  $E_{0y}$  і  $H_{0z}$ :

$$\mu \mu_0 H_{0z}^2 = \epsilon \epsilon_0 E_{0y}^2,$$

$$\boxed{\sqrt{\mu \mu_0} H_{0z} = \sqrt{\epsilon \epsilon_0} E_{0y}}. \quad (17)$$

Таким чином, в електромагнітній хвилі вектори  $\vec{E}$  і  $\vec{H}$  взаємно пов'язані і являють собою єдину електромагнітну хвилю. Ми можемо сконструювати зображення цієї хвилі для певного моменту часу (рис. 2.5).

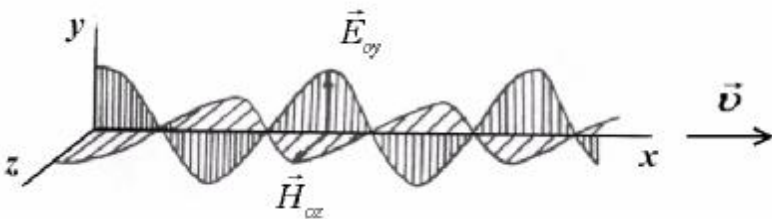


Рис. 2.5

Для подальшого важливо звернути увагу на те, що коливання векторів  $\vec{E}$  і  $\vec{H}$  відбуваються з однаковою фазою.

Електричне і магнітне поля мають енергію. Так як в електромагнітній хвилі  $\vec{E}$  і  $\vec{H}$  змінюються і в просторі і в часі, то очевидно, що змінюється й енергія хвилі. Однак, якщо змінюється енергія, то вона повинна в щось перетворюватись.

Коливання напруженостей  
електричного і магнітного  
полів означає  
коливання енергії  
електромагнітної хвилі

Якщо змінюється енергія  
електромагнітної хвилі,  
то у що вона перетворюється ?

## 2.5. Які коливання відбуваються з фотоном ?

З точки зору корпускулярного підходу, як показано в (2.1), електромагнітна хвиля – це потік фотонів – частинок, що коливаються, а з розв'язку рівнянь Максвелла випливає, що відбуваються коливання електричного ( $\dot{E}$ ) і магнітного ( $\dot{B}$ ) полів. Але наявність таких коливань не має фізичного обґрунтування, бо електричне і магнітне поля мають енергію, яка теж коливається. Проблема в тому, що, як уже зазначалось, **коливання векторів  $\dot{E}$  і  $\dot{B}$  відбувається в однаковій фазі**, тому енергія електричного поля не може переходити в енергію магнітного поля чи навпаки, як це має місце в коливальному контурі. Бо в коливальному контурі різниця фаз між  $\dot{E}$  і  $\dot{B}$  дорівнює  $\pi/2$ . У зв'язку з цим виникає питання – у що перетворюються енергії електричного і магнітного полів електромагнітної хвилі при зміні  $\dot{E}$  і  $\dot{B}$  ? Пояснення може бути одне: в електромагнітній хвилі відбувається коливання енергії у відповідності з рівнянням (2):

$$W = c^2 \cdot m.$$

Це означає, що зміна енергії в електромагнітній хвилі супроводжується зміною маси фотона:

$$\Delta W = c^2 \cdot \Delta m.$$

**Зауважимо, що маса фотона  $m$  тут тільки динамічна, оскільки маса спокою фотона дорівнює нулеві.**



Зміна енергії  
в електромагнітній хвилі  
супроводжується  
зміною маси фотона:

$$\Delta W = c^2 \cdot \Delta m$$

Таким чином, електромагнітна хвиля, зокрема й світло, являє собою потік частинок-фотонів, у яких відбувається коливання типу:

$$\Delta W \rightarrow \Delta m \rightarrow \Delta W \rightarrow \Delta m \rightarrow \dots \quad (17)$$

При такому розгляді стає зрозумілим, що при поширенні світла фотони як частинки переносять масу і тому швидкість світла є швидкістю переміщення маси. З іншого погляду маса, яка переноситься, перебуває у коливальному стані, отже швидкість переміщення сталої фази також є швидкістю поширення фотонів. Отже, **швидкість світла одночасно є швидкістю переміщення фотонів як частинок, так і швидкістю поширення сталої фази в коливальному процесі.** За своєю природою це швидкості різні, а за величиною однакові.

Розглядаючи світло (а також інші електромагнітні хвилі) як потік частинок (фотонів), що перебувають у коливальному стані типу  $\Delta W \rightarrow \Delta m \rightarrow \Delta W \rightarrow \Delta m \rightarrow \dots$ , виникає необхідність розглянути з такої ж точки зору всі відомі явища і ефекти – досліди Фізо і Майкельсона по виявленню ефіру як середовища для поширення світла, ефект Доплера, явища інтерференції і дифракції, а також пояснити, чому швидкість світла є сталою величиною і не залежить від руху системи координат, в якій вона визначається.

Світло являє собою  
потік частинок – фотонів,  
у яких відбуваються  
коливання типу

$$\Delta W \rightarrow \Delta m \rightarrow \Delta W \rightarrow \Delta m \rightarrow \dots$$

### 3. ЩО ТАКЕ ФОТОН ЯК ЧАСТИНКА ?

Ми розглянули рух "звичайного" тіла, "звичайної" частинки, які рухаються у просторі. На тіло можна подіяти силою і змінити його швидкість. При дії сили тіло прискорюється і при цьому зростає його маса від маси спокою  $m_0$  до релятивістської маси  $m$ :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{\Delta v^2}{c^2}}} . \quad (1)$$

Релятивістська маса – це сумарна маса тіла – маса спокою  $m_0$  і динамічна маса  $\Delta m$ , набута в процесі прискорення:

$$m = m_0 + \Delta m .$$

Цілком логічно допустити, що тіла можуть мати різну масу спокою і в граничному випадку рівну за величиною нулеві:  $m_0 = 0$ . Для таких тіл маса може бути тільки динамічною, тобто змінною:

$$m = m_0 + \Delta m = 0 + \Delta m = \Delta m .$$

Саме такою частинкою, яка має тільки динамічну масу, є фотон. Для фотона формула (1) означає, що він рухається зі швидкістю  $v = \Delta v = c$ . Але тоді вираз знаменника прямує до нуля і маса  $m$  повинна б стати нескінченно великою, що означає втрату фізичного змісту. Однак формула не втрачає сенсу, якщо маса спокою фотона  $m_0 = 0$ , оскільки за таких умов з'являється невизначеність, при якій маса фотона має певне значення:

$$m = \Delta m = \frac{0}{0} .$$

Таким чином, для фотона  $m_0 = 0$  і він має тільки динамічну масу  $\Delta m$ , яка є змінною і завдяки цьому має місце

коливний процес типу :

$$\Delta W \rightarrow \Delta m \rightarrow \Delta W \rightarrow \Delta m \rightarrow \dots$$

Отже фотон – це особлива частинка, яка перебуває в коливальному стані і рухається з великою швидкістю, що є сталою величиною.

**Фотон –  
це особлива частинка,  
яка перебуває  
в коливальному стані  
і рухається  
зі сталою швидкістю**

### 3.1. Чому швидкість світла є сталою величиною ?

Фотон з'являється при зміні енергії, зокрема при переході електрона в атомі з вищого енергетичного рівня на нижчий:  $\Delta W = h\nu$ .

Повпливати на рух фотона, прискорити його – неможливо, оскільки інертна маса фотона – маса спокою – дорівнює нулеві. Фотон рухається з великою швидкістю  $c$ , яка є сталою величиною. Сталість швидкості має принципове значення, бо це є характеристикою особливості фотона. Для того, щоб змінити швидкість фотона як частинки, необхідно подіяти на нього силою. Так, наприклад, прискорюються електрони в електронно-променевої трубі чи в циклотроні. Однак для електрона таке можливе, бо він має заряд і тому його можна прискорювати в електричному полі. Фотон же – частинка електро-нейтральна і нема способу подіяти на нього силою, щоб прискорити. Тому визначення швидкості фотона в будь-якій рухомій системі дає однаковий результат – швидкість фотона є величиною сталою.

Маючи динамічну масу  $\Delta m$  і рухаючись зі швидкістю  $\overset{\cdot}{c}$ , фотон має певну кількість руху, яку традиційно називають імпульсом  $\overset{\cdot}{p}$ . Оскільки маса фотона є змінною величиною, то й кількість руху  $\overset{\cdot}{p}$  (імпульс) є змінною величиною:  $\Delta p = \Delta m \cdot \overset{\cdot}{c}$ .

### 3.2. Збереження імпульсу при поширенні електромагнітних хвиль

Світло має двоїсту природу – хвильову і квантову [12]. З точки зору квантової теорії світло являє собою потік частинок – фотонів, які мають масу і рухаються зі швидкістю  $c @ 300000 \text{ км/с}$ , отже, мають імпульс (кількість руху)  $\dot{p} = m \dot{c}$ . Завдяки наявності імпульсу фотонів, світло чинить тиск на речовину, на яку воно падає, що є одним з підтверджень корпускулярних властивостей світла.

Однак світло має також хвильові властивості, є електромагнітною хвилею і являє собою коливання векторів напруженостей електричного  $\dot{E}$  і магнітного  $\dot{H}$  полів, які відбуваються з однаковою фазою і поширюються зі швидкістю світла  $\dot{c}$ :

$$E = E_m \cos (wt - kx + y),$$

$$H = H_m \cos (wt - kx + y).$$

У фотоні, який являє собою особливу частинку, у відповідності з формулою  $\Delta W = \Delta m c^2$  відбуваються коливання з перетворенням маси в енергію поля і навпаки:

$$\Delta W \rightarrow \Delta m \rightarrow \Delta W \rightarrow \Delta m \rightarrow \dots$$

Маючи динамічну масу  $\Delta m$  і рухаючись зі швидкістю  $\dot{c}$ , фотон має певну кількість руху, яку традиційно називають імпульсом  $\dot{p}$ . Оскільки маса фотона є змінною величиною, то й імпульс-кількість руху є змінною величиною:  $\Delta p = \Delta m \cdot \dot{c}$ . Тому необхідно говорити про збереження кількості руху-імпульсу. Очевидно, виконання закону збереження імпульсу за таких

умов забезпечується завдяки тому, що механічний імпульс фотона  $m\dot{c}$  при зміні маси перетворюється в електромагнітний імпульс (і навпаки).

Про те, що крім механічного імпульсу (кількості руху), існує електромагнітний імпульс, відомо ще з досліджень Томсона, який наділяв імпульсом саме електромагнітне поле. Він вважав, що електромагнітний імпульс настільки ж реальний, як і механічний імпульс, що обумовлений наявністю маси: *“Важливо пам’ятати, що ця кількість руху ні в якому відношенні не відрізняється від звичайної механічної кількості руху і може бути додана чи віднята від кількості руху тіл, що рухаються”* (Дж. Томсон. Электричество и материя. - М.: ГИЗ, 1928. - С. 21).

Електромагнітний імпульс проявляється при взаємодії світла з речовиною, що також є причиною виникнення тиску світла. Під дією вектора напруженості електричної складової  $\dot{E}$  хвилі (фотона) електрони речовини зміщуються у напрямку, перпендикулярному до променя. Це обумовлює появу швидкості електрона, яка напрямлена перпендикулярно до магнітної складової  $\dot{H}$  хвилі (фотона), і виникнення сили Лоренца, що діє в напрямку променя, яка й спричинює тиск світла.

Тому цілком логічним буде вважати, що при поширенні електромагнітної хвилі відбуваються взаємні перетворення кількості руху, пов’язаного з масою, і електромагнітного імпульсу, що й обумовлює збереження загального імпульсу.

Говорячи про поширення світла в просторі, важливо визначити механізм цього поширення.



#### 4. СЕРЕДОВИЩЕ ДЛЯ ПОШИРЕННЯ СВІТЛА

У наш час про світло говорять як про поширення електромагнітних хвиль. Проблема з'ясування механізму поширення світла була актуальною більш ніж сто років тому. У той час важливим було експериментальне підтвердження (або заперечення) існування ефіру як середовища для розповсюдження світлових хвиль. Вважалося, що якщо світло поширюється в межах Землі, то навколо неї як середовище для поширення хвиль повинен бути ефір. Таке було можливе у двох випадках: або Земля рухається крізь нерухомий ефір, або ефір захоплюється Землею і рухається разом з нею. Тому були поставлені досліди по виявленню ефірного вітру, зокрема досліди Фізо і Майкельсона. З досліду Фізо випливало часткове захоплення ефіру Землею, тоді як з досліду Майкельсона зроблено висновок про відсутність ефірного вітру, що означало або повне захоплення ефіру Землею, або відсутність ефіру взагалі. З врахуванням інших експериментальних даних, зокрема аберації світла, був зроблений висновок про відсутність ефіру. Ці дослідження стали експериментальною основою для створення А. Ейнштейном спеціальної теорії відносності, основний висновок якої в тому, що простір і час взаємно пов'язані і утворюють єдину форму існування матерії. Традиційно досліди Фізо і Майкельсона розглядаються в літературі з теорії відносності, зокрема практично в усіх посібниках для вищої школи. Оскільки механізм поширення електромагнітних хвиль у рамках традиційних уявлень невідомий, являє інтерес розглянути досліди Фізо і Майкельсона з точки зору уявлень про світло як про особливі частинки, для яких властиві власні внутрішні коливання (див. 2.1. – С. 26).

#### 4.1. Проблемність традиційної інтерпретації досліді Фізо стосовно захоплення ефіру рухомим тілом

У 1851 р. Фізо поставив дослід, в основу якого була покладена ідея, що ефір, в якому поширюється світло, захоплюється рухомими тілами [16. – С. 395-399].

В досліді Фізо паралельний пучок світла від джерела  $S$  поділявся напівпрозорим дзеркалом  $P$  на два пучки  $1$  і  $2$  (рис. 4.1). Дзеркалами  $M_1, M_2, M_3$  досягалося те, що пучки проходили однакові шляхи, потрапляли в зорову трубу  $T$  і інтерферували. На шляху поширення променів  $1$  і  $2$  була розміщена система із двох труб, якими циркулювала вода із швидкістю  $u$ . Промінь  $1$  поширювався за течією, а промінь  $2$  – проти течії.

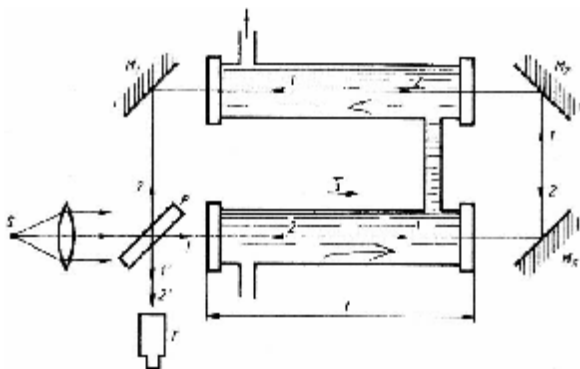


Рис. 4.1

Дослід показав, що рух води в системі приводить до зміщення інтерференційних смуг в зоровій трубі  $T$ , тобто було виявлено вплив руху середовища на швидкість поширення світла в ньому. Це **ніби означало**, що дослід Фізо підтверджує наявність середовища (ефіру), в якому поширюються світлові хвилі.

#### 4.2. Дослід Майкельсона стосовно захоплення ефіру рухомим тілом

Ідея експерименту, який давав би принципову можливість безпосереднього виявлення руху Землі відносно ефіру, була висловлена Максвеллом у 1878 р. У 1881 р. Майкельсоном був поставлений експеримент [13], точність проведення якого забезпечувалась чутливим інтерферометром (рис. 4.2).

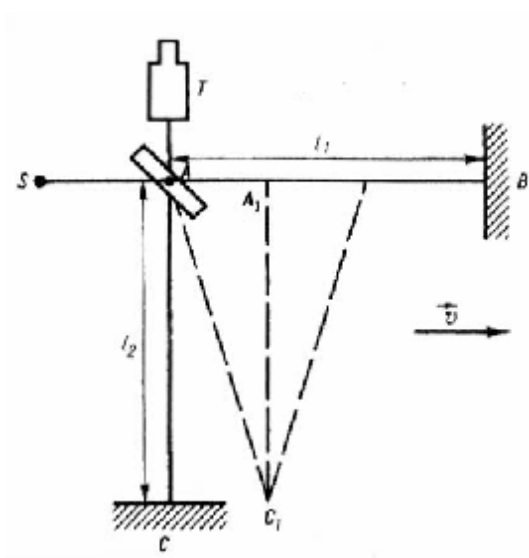


Рис. 4.2

Промінь світла від джерела  $S$  напівпрозорим дзеркалом  $A$  поділяється на два промені. Один з них поширюється у напрямі  $AB$ , відбивається від дзеркала  $B$  і потрапляє в зорову трубу  $T$ . Оскільки обидва промені когерентні, то в трубі  $T$  спостерігатиметься інтерферен-

ційна картина. Якби Земля відносно ефіру не рухалась, а плечі були рівними, то в центрі інтерференційної картини спостерігався б максимум.

Інтерферометр орієнтований так, що одне з плечей, наприклад  $AB$ , орієнтоване в напрямку руху Землі по орбіті, а друге ( $AC$ ) – перпендикулярно до нього. Тоді проміжки часу  $t_1$  і  $t_2$ , які затрачає світло для проходження туди й назад однакових відстаней  $AB$  і  $AC$ , виходять різними. Дійсно, якщо вважати, що ефір нерухомий і інтерферометр рухається разом із Землею крізь ефір, то світло вздовж плеча  $AB$  поширюється довше, оскільки точка  $B$  весь час віддаляється. Це значить, що час проходження відстані  $l$  буде більший:  $\tau_1 = \frac{l}{c-v}$ . І навпаки, при зворотному поширенні світла від точки  $B$  до точки  $A$ , яка рухається назустріч світлу, час проходження відстані  $BA = l$  буде меншим:  $\tau_2 = \frac{l}{c+v}$ . Загальний час проходження відстані від  $A$  до  $B$  і від  $B$  до  $A$

$$t_1 = \tau_1 + \tau_2 = \frac{l}{c-v} + \frac{l}{c+v} = \frac{2l}{c} \frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}}.$$

За таких умов промені у перпендикулярних плечах інтерферометра при його повороті на  $90^\circ$  повинні дати різницю ходу і зміщення інтерференційної картини. Однак **зміщення інтерференційної картини не відбувалось**, хоча чутливість приладу гарантувала можливість його виявлення. Це означало, що швидкість світла не залежить від системи координат, яка рухається і в якій вимірюється швидкість світла.

Відсутність зміни інтерференційної картини могло бути пояснене повним захопленням ефіру. Тоді поширення

світла в ефірі не залежало від руху Землі. Подібне могло б спостерігатися, якби, наприклад, розглядали поширення звуку у повітрі в закритому вагоні, що рухається, коли і за рухом і в перпендикулярному напрямку швидкість звуку однакова. Однак з ідеєю повного захоплення ефіру можна було б погодитися, якби це не суперечило іншим дослідом, зокрема явищу аберації світла, яке полягає в тому, що для спостереження променя від зірки зорову трубу треба дещо нахилити в напрямку руху Землі. Це означає, що світло поширюється в ефірі, який не рухається разом з нею, не захоплюється Землею. Таким чином, один дослід підтверджував повне захоплення ефіру Землею, інший – відсутність будь-якого захоплення. Узгодження між цими експериментами могло бути лише за умови відсутності самого ефіру як такого. Тобто, якщо ефіру нема, то однаково можна вважати, що він повністю захоплюється і в той же час зовсім не захоплюється. Правда, в цю схему не вкладався дослід Фізо, який підтверджував часткове захоплення ефіру. Виходило, що ефіру нема, але він частково захоплюється ! Нісенітниця ! Все це вимагало пояснення.

Таке завдання виконала теорія відносності Ейнштейна, згідно з якою в системі координат, що рухається, відбувається скорочення розмірів тіл. Відповідно в досліді Майкельсона довжина плеча інтерферометра в напрямку руху стає коротшою, чим і пояснюється відсутність зміщення інтерференційної картини при поворотах інтерферометра.

Правда, теорія відносності не розкривала механізму поширення світлових хвиль без будь-якого середовища. Це й не входило до її функцій. Також не пояснювала дослід Фізо про часткове захоплення ефіру речовиною (водою), що рухається.

Фізичні явища відбуваються незалежно від того, як ми їх описуємо. Можуть бути різні способи описування, але їх висновки не повинні суперечити один одному.

Наприклад, ми слухаємо по радіо виставу в театрі. Інші дивляться її по телевізору, в якого відсутній звук. Уявлення про те, що насправді відбувається в театрі і в слухачів і в глядачів не повинні бути в суперечності. Для пояснення досліду Майкельсона, а також інших дослідів, довелось відмовитись від ефіру як середовища для поширення електромагнітних хвиль. Х. Лоренц і Дж. Фіцджеральд висунули гіпотезу про те, що рухомі тіла (в даному випадку прилади) відносно нерухомого ефіру зазнають у напрямку руху скорочення лінійних розмірів. Ця ідея лягла в основу спеціальної теорії відносності, розвинутої Ейнштейном. Рівняння для зміни довжини і часу такі, що компенсує різницю ходу, яка повинна б утворюватись в досліді Майкельсона. Таким чином, дослід Майкельсона заперечував захоплення ефіру, що з врахуванням інших експериментів дало можливість зробити висновок про його відсутність. Оскільки за розглянутою нами квантово-коливною теорією світло являє собою потік частинок-фотонів (див. 2.1, с. 21), то для їх поширення не потрібне певне середовище, але незалежний рух фотонів відповідає моделі нерухомого ефіру щодо досліду Майкельсона. Тим більше, запропонована нами квантово-коливна теорія світла цілком узгоджується з висновками досліду Майкельсона про відсутність ефіру як середовища для поширення світлових хвиль, а сам дослід пояснюється висновками теорії відносності.

Однак дослід Майкельсона знаходився у суперечності з дослідом Фізо [16], яким встановлено часткове захоплення ефіру середовищем, що рухається. Тому важливо знайти пояснення такої розбіжності.

### 4.3. Розбіжність між результатами дослідів Фізо і Майкельсона

Розбіжність між результатами дослідів Фізо і Майкельсона пояснюється за допомогою квантово-коливної теорії світла (2. – С. 24), за якою світло являє собою не коливання середовища (ефіру, вакууму), а потік фотонів – особливих частинок, для яких властиві власні (внутрішні) коливання. Тобто, фотони – це частинки, які, з одного боку, мають масу, імпульс, а з іншого – частинки, для яких характерна фаза, що характеризує їх коливний стан. Причому, з фотоном відбуваються внутрішні коливання із взаємним перетворення енергії в масу і навпаки у відповідності з законом  $\Delta W = \Delta m c^2$ .

Таке представлення світла як частинок, що коливаються, стосовно дослідів Майкельсона не дає розбіжності у поясненні відсутності зміни різниці фаз порівняно з випадком поширення хвиль у середовищі, що рухається. Дійсно, внутрішні коливання фотона при його русі зі швидкістю  $c$  цілком аналогічні коливанням при поширенні світлової хвилі в гіпотетичному ефірі, захопленому Землею. Однак в досліді Майкельсона очікуване зміщення інтерференційної картини внаслідок виникнення різниці фаз променів не відбулося, що свідчило про незалежність швидкості світла від руху Землі. Як уже згадувалось, пояснюється такий факт скороченням відстаней у рухомій системі координат, що впливає з теорії відносності.

В той же час у досліді Фізо при проходженні променів у зустрічних потоках води виявилась різниця фаз, незважаючи на те, що швидкість переміщення води була набагато меншою, ніж швидкість руху Землі.

Суперечність дослідів Майкельсона і дослідів Фізо, з якого впливає часткове захоплення ефіру рухомим

середовищем, у рамках теорії масо-коливного характеру світла пояснюється таким чином.

Світло у вакуумі поширюється як частинки зі швидкістю  $c$ . У середовищі, як відомо, швидкість поширення менша, ніж у вакуумі. Для пояснення цього необхідно розглянути механізм поширення світла у речовині. Очевидно, що він дещо відмінний від вільного поширення фотонів у вакуумі, оскільки пов'язаний із взаємодією фотонів з речовиною, поглинанням фотонів атомом і наступним випромінюванням. Тому швидкість світла у середовищі можна розглядати як процес естафетного перевипромінювання фотонів речовиною, коли атом поглинає квант енергії, переміщується на певну відстань і через деякий час перевипромінює. Це випромінювання поглинає інший атом і знову перевипромінює. Такий естафетний процес і спричиняє поширення хвилі в середовищі. Таким чином, затримка випромінювання внаслідок естафетного поширення світла в середовищі є причиною того, що швидкість світла в середовищі менша, ніж у вакуумі.

Естафетний характер процесу випромінювання по різному виявляється при поширенні хвилі за рухом і проти руху води у досліді Фізо. За час від поглинання до перевипромінювання в одному випадку атом переміщується на деяку відстань у напрямку поширення світла, тоді як в іншому випадку він рухається проти поширення світла. Ця відмінність у поширенні світла і спричиняє різницю фаз в досліді Фізо, що трактувалося як ефект часткового захоплення ефіру водою, яка рухається.

Таким чином, трактування дослідів Фізо слід пов'язувати не з ефіром як деяким ідеальним середовищем, завдяки коливанням якого поширюється світло, а з особливістю природи світла і характеру його поширення в речовині. Естафетний характер поглинання і перевипро-



мінювання призводить до появи різниці фаз між променями, які поширюються за рухом і проти руху води, що й призводить до зміщення інтерференційної картини порівняно з випадком, коли вода нерухома. Тому навряд чи є необхідність відносити результати досліду Фізо до аргументів, на основі яких була побудована теорія відносності.

Трактування досліду Фізо  
слід пов'язувати  
з особливістю природи світла  
і характером його поширення  
в речовині

## 5. НЕЗАЛЕЖНІСТЬ ШВИДКОСТІ СВІТЛА ВІД РУХУ СИСТЕМИ КООРДИНАТ, В ЯКІЙ ВОНО ПОШИРЮЄТЬСЯ

Сталість швидкості світла у вакуумі підтверджена багатьма дослідями з великою точністю. Вона є одним із постулатів теорії відносності: у будь-якій системі координат, що рівномірно рухаються одна відносно одної, швидкість світла є сталою величиною і не залежить від швидкості руху системи. Це значить, що в різних інерціальних системах координат рух фотонів, як частинок, принципово відмінний від руху класичних тіл, для яких крім “динамічної” маси  $m$  властива маса спокою  $m_0$ . Саме відсутність маси спокою не дає можливості прискорювати фотон і змінювати його швидкість. Тому немає такої системи координат, у якій би швидкість світла дорівнювала нулеві. Покажемо це на прикладах визначення швидкості руху класичного тіла і швидкості поширення світла (фотона).

Відомо, що швидкість тіла є відносною величиною і вона залежить від руху системи координат у якій тіло знаходиться. Тому та обставина, що швидкість світла (фотона) є константою, дає підстави стверджувати, що існує принципова відмінність між швидкістю переміщення тіла і швидкістю поширення світла (фотона) в інерціальних системах координат. Для виявлення такої відмінності розглянемо досліди по визначенню швидкості **тіла** і швидкості **світла** в системах координат, що рівномірно рухаються одна відносно одної. Такими системами можуть бути, наприклад, Земля і Сонце.

### 5.1. Відмінність між швидкістю руху тіла і швидкістю поширення світла

Визначимо швидкість тіла у двох випадках – в напрямку руху Землі навколо Сонця, а також у перпендикулярному напрямку.

Нехай це буде куля, що вилітає з рушниці. Вимірювання будемо проводити, наприклад, за допомогою приладу  $\Pi_1$  із двох дисків, що обертаються на одній осі зі сталою кутовою швидкістю (рис. 5.1). Очевидно, що швидкість кулі буде пропорційна куту  $\phi$  між отворами, пробитими кулею в дисках.

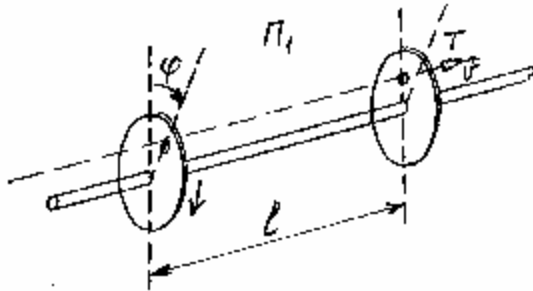


Рис. 5.1

Якщо прилад  $\Pi_1$  для вимірювання швидкості кулі знаходиться в системі координат, пов'язаній із Землею, то він є нерухомим відносно неї. В такому випадку до пострілу швидкість кулі відносно Землі дорівнює нулеві, а виміряна приладом  $\Pi_1$  після пострілу, незалежно від напрямку –  $\vec{u}_T$ .

Коли ж прилад  $\Pi_1$  для вимірювання швидкості знаходиться в системі координат, пов'язаній із Сонцем (С), то вже до пострілу виміряна швидкість кулі дорівнюватиме

швидкості руху Землі відносно Сонця  $\vec{u}_0$ , а після пострілу вона буде  $\vec{u}_1 = \vec{u}_T + \vec{u}_0$  (рис. 5.2). У перпендикулярному напрямку до руху Землі швидкість кулі після пострілу дорівнюватиме геометричній сумі швидкості  $\vec{u}_T$  відносно рушниці і швидкості Землі  $\vec{u}_0$  по орбіті:  $\vec{u}_1 = \vec{u}_T + \vec{u}_0$ .

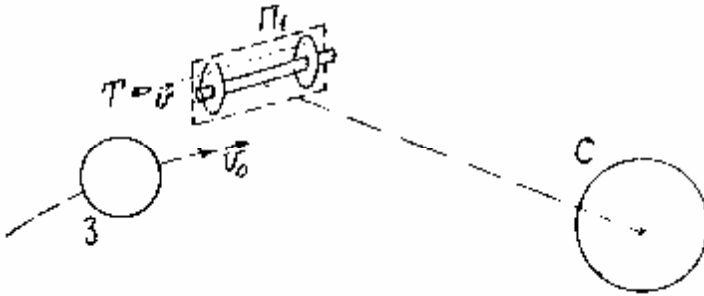


Рис. 5.2.

Отже, швидкість тіла залежить від того, в якій системі координат розглядається цей рух і визначається як результат геометричного додавання швидкостей. Очевидно, що в даному випадку ми маємо справу з інертною масою тіла, тобто масою, яка змінює свою швидкість при дії зовнішньої сили (або іншого тіла).

Тепер проведемо вимірювання швидкості світла, наприклад, методом Майкельсона, за допомогою приладу із дзеркальною призмою (рис. 5.3).

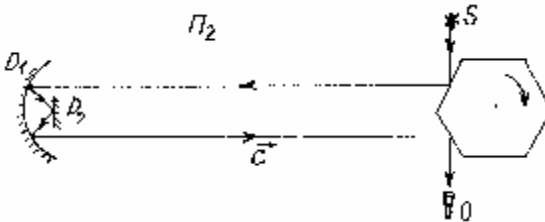


Рис. 5.3

Промінь від джерела  $S$  відбивається від призми, проходить відстань до дзеркала  $D_1$ , відбивається і знову потрапляє на призму. При певному положенні призми можна спостерігати відбитий промінь за допомогою зорової труби  $O$ . При обертанні призми промінь зникає, але при певній частоті, коли за час його проходження призма повернеться так, що промінь відіб'ється, його знову можна побачити. Знаючи кутову швидкість обертання призми, можна визначити швидкість світла. Результат ми знаємо: швидкість світла однакова, незалежно від того, як буде орієнтований прилад відносно Землі – паралельно чи перпендикулярно до її руху по орбіті. А також незалежно від того, в якій системі координат буде знаходитись прилад для вимірювання швидкості світла. Наприклад, незважаючи на те, що Земля рухається зі швидкістю  $\vec{u}_0$  відносно приладу  $\Pi_2$ , який пов'язаний із Сонцем, виміряне значення швидкості світла буде сталим (рис.5. 4).

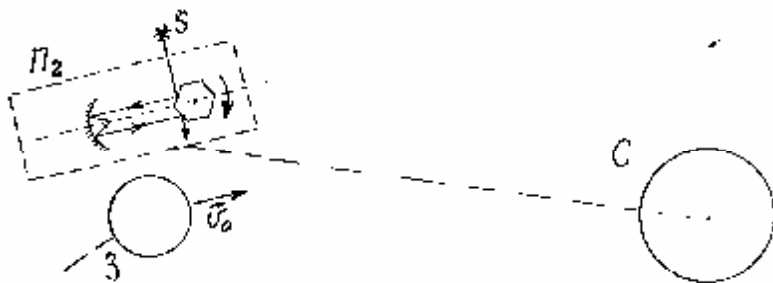


Рис. 5.4

Таким чином, результати вимірювання швидкості світла (електромагнітне поле) принципово відмінні від випадку з кулею (тіло, речовина), що необхідно пояснити. Зауважимо, що ні класична хвильова, ані квантова теорія

однозначно не розкривають **механізму** поширення світла як електромагнітних хвиль. Спочатку вважалося, що світло поширюється як коливання ефіру – світлоносного середовища. Однак дослід Майкельсона по виявленню “ефірного вітру” показав незалежність швидкості світла від напрямку його поширення при русі Землі по орбіті. Для пояснення результатів цього дослідження Ейнштейном була створена теорія відносності, яка заперечує існування ефіру.

Ми будемо дотримуватись цього висновку і розглядатимемо світло з точки зору корпускулярного підходу, тобто як потік фотонів – частинок світла. Причому, згідно з модельними уявленнями квантово-коливної теорії, фотони розглядатимемо як частинки специфічні, такі, для яких властивий внутрішній коливний процес (2.1. – С. 26).

Отже, у відповідності з теорією відносності випромінений фотон рухається зі сталою швидкістю незалежно від того, в якій системі координат цей рух розглядається. І якщо визначимо швидкість фотона, то вона виявиться (на відміну від дослідів з кулею) **однаковою для будь-якої системи координат**, що рухаються з різними швидкостями одна відносно одної – чи то відносно Землі чи відносно Сонця. Особливість такої поведінки фотона визначається його природою.

Якщо куля є тією формою матерії, яку ми називаємо речовиною, то фотон – об’єкт іншого виду матерії, який називаємо полем. Принципова відмінність між кулею і фотоном у тому, що куля у системі координат, пов’язаній із Землею, має **масу спокою**. Ця маса спокою є вираженням інерційних властивостей тіла. А оскільки в системі координат, пов’язаній із Сонцем, навіть до пострілу куля має швидкість, обумовлену рухом відносно Сонця разом з Землею, то вона має кінетичну енергію. Для фотона ж все інакше. Швидкість руху фотона в межах Землі не залежить від її руху. **Земля не передає фотону**

**якої-небудь енергії, пов'язаної з її рухом**, оскільки маса спокою фотона дорівнює нулеві і на самому початку це зробити неможливо, бо нема способу подіяти на фотон. Фотон має масу, але це так звана релятивістська, точніше “динамічна” маса (З. – С. 42). Рух Землі може передатися тілу, що має інертну масу, яку можна ототожнити з масою спокою. Інертну масу можна прискорювати чи сповільнювати. Прискорити ж чи сповільнити динамічну масу нема можливості. Ця маса знаходиться в коливному стані у відповідності зі співвідношенням  $DW = c^2 \Delta m$ . Можна зробити висновок, що ця формула відображає зв'язок між двома станами матерії – речовини і поля – і відповідними для них різними формами руху.

Слід відзначити ще одну особливість порівняння прямолінійних рухів речовинних частинок і фотонів як частинок поля. При спостереженні за рухом частинки-речовини ми маємо справу з масою і визначаємо швидкість її переміщення в просторі. При поширенні ж хвиль взагалі і світлових хвиль зокрема йдеться не про переміщення маси (маси спокою) в напрямку поширення хвилі (при поширенні хвиль маса не переноситься), а про переміщення певної фази коливного процесу. Тому формальні прямі порівняння, формальна аналогія, тут не можуть вважатись обгрунтованими.

## 5.2. Ефект Доплера з точки зору квантово-коливної теорії світла

Відсутність середовища для поширення електромагнітних хвиль і своєрідний механізм їх поширення як потік частинок, що перебувають у коливальному стані, потребує пояснення з цієї точки зору традиційно відомих понять, ефектів і явищ, зокрема таких як ефект Доплера, явище дифракції, хвилі де Бройля, ідеї квантової механіки.

Відомо, що при поширенні хвиль у середовищі існує ефект Доплера, який полягає у зміні частоти коливань при русі джерела або приймача коливань відносно середовища. Ефект Доплера спостерігається також при поширенні електромагнітних хвиль, зокрема світла, частота коливань якого залежить від відносної швидкості джерела і приймача світлових коливань [11. – С. 468]. Оскільки світло має двоїсту природу – хвильову і корпускулярну, а механізм поширення електромагнітних коливань невідомий, існує специфіка пояснення в цьому випадку природи ефекту Доплера.

У класичному випадку поширення хвиль (наприклад, акустичних) відбувається у середовищі, тому зміна частоти коливань залежить від руху джерела чи приймача відносно середовища. Дійсно, уявімо, що два нерухомих джерела  $D_1$  і  $D_2$  одночасно випромінюють сигнали з однаковою частотою, які поширюються в середовищі у напрямку нерухомих приймачів  $P_1$  і  $P_2$ . Нехай на час випромінення другого сигналу перші сигнали від обох джерел дійшли до положення  $I$  (рис. 5.5). Другий сигнал випромінюється теж одночасно двома джерелами, однак джерело  $D_2$  рухається зі швидкістю  $v$ , тому його сигнал буде випромінений з положення  $2'$ , яке ближче до першого сигналу, ніж для джерела  $D_1$ , що не рухається. Відповідно відстань  $l_1$  між



двома сусідніми сигналами від джерела  $D_1$  буде більша від відстані  $l_2$ , коли джерело рухається. Отже, сигнали від джерела  $D_2$  будуть сприйматися приймачем з більшою частотою, ніж сигнали від джерела  $D_1$ , хоч випромінюються вони через однаковий час.

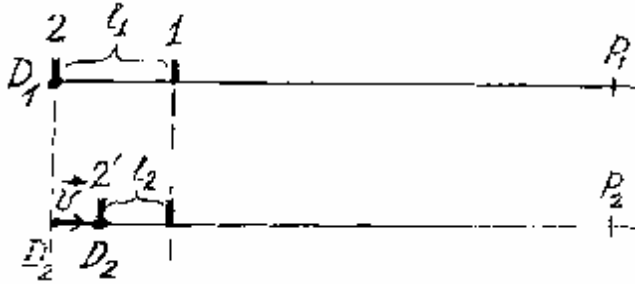


Рис. 5.5

При віддаленні джерела навпаки, – порівняно з нерухомим станом сигнал посилатиметься джерелом увесь час з більшої відстані і доходить до приймача пізніше, що сприйматиметься як зменшення частоти.

Цілком подібна ситуація виникає при русі приймача відносно середовища. В цьому випадку сигнал доходить до приймача швидше, якщо приймач рухається назустріч джерелу (що сприймається як збільшення частоти), і з затримкою – коли приймач віддаляється (зменшення частоти).

Згідно з сучасними уявленнями світло не розглядається як коливання якогось середовища (ефіру, вакууму). Відсутність ефіру доведена дослідями Майкельсона. Тому для світла потрібне інше тлумачення ефекту Доплера, яке визначається тільки відносним рухом джерела і приймача

без участі середовища в перенесенні хвиль (тут ми не розглядаємо поширення світла в речовині – воді, склі тощо, оскільки там механізм поширення дещо інший).

Пояснення ефекту Доплера для світла будемо розглядати на основі квантово-коливної теорії світла (2. – С. 23). Згідно з цією теорією світло розглядається як потік фотонів – специфічних частинок, що перебувають у коливному стані. З фотоном відбуваються внутрішні коливання, обумовлені еквівалентними перетвореннями типу енергія – маса – енергія – маса... Таким чином, фотони поширюються в просторі зі швидкістю світла, коливаючись. Тобто, для них властива фаза, що характеризує коливальний процес. Отже, поширення світлової хвилі слід розглядати як потік фотонів і можна охарактеризувати за рухом однієї частинки, тобто окремого фотона.

Розглянемо два однакових джерела  $D_1$  і  $D_2$ , які одночасно випромінюють фотони. Джерело  $D_1$  і приймач  $P$  одне відносно одного не рухаються, тоді як джерело  $D_2$  відносно приймача рухається зі швидкістю  $u$ . Джерело (атом) випромінює фотон як частинку, що коливається. Процес випромінювання фотона триває певний час. Поширюючись у просторі, фотон коливається. Процес поглинання фотона приймачем (атомом) теж триває певний час і приймач сприймає зміни стану фотона з певною частотою.

На рис. 5.6 схематично показано формування двох фотонів при одночасному їх випромінненні нерухомим джерелом  $D_1$  (рис. 5.6 а) і джерелом  $D_2$  (рис. 5.6 б), що рухається в напрямку приймача. Нехай в момент, коли закінчується процес випроміннення фотона 1, він досягає положення 1. Оскільки джерело  $D_2$  рухається зі швидкістю  $u$ , то закінчення випроміннення фотона 2 буде

відповідати положенню атома 2. Тобто початок і кінець шляху, на якому відбувається одне коливання (“довжина хвилі”), тут буде меншим, ніж у випадку, коли джерело не рухається. Приймачем це буде сприйнято як збільшення частоти.

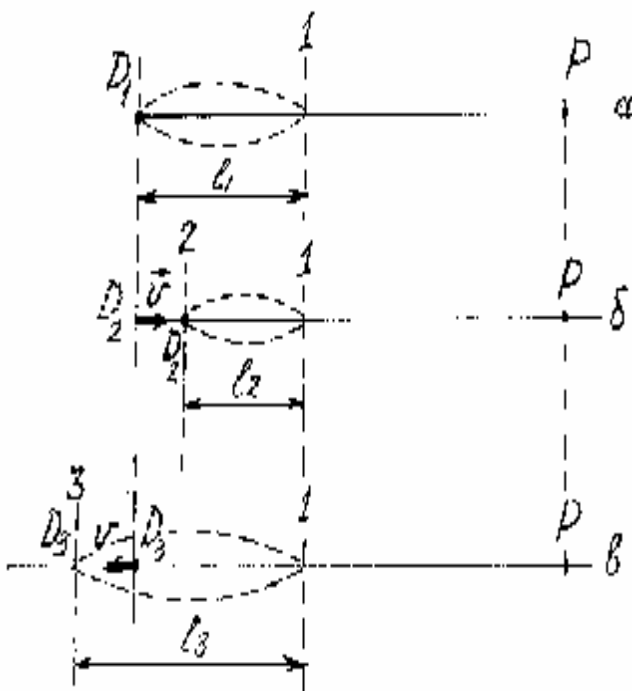


Рис.5.6

Якщо ж джерело  $D$  віддаляється від приймача, то закінчення формування фотона відповідає положенню 3, тобто, відбуватиметься на більшому проміжку шляху. Приймач це сприйме як меншу частоту коливань (рис. 5,6 в).

Подібно відбувається процес зміни частоти у випадку, коли приймач рухається відносно джерела. Якщо приймач рухається назустріч фотону, то відстань, яку він проходить в процесі поглинання фотона, буде меншою, що сприймається як збільшення частоти. І навпаки, при віддаленні приймача цей процес подовжується, що еквівалентно зменшенню частоти.

Таким чином, ефект Доплера для світла має специфічне пояснення порівняно з поширенням хвиль у середовищі. Він є виявом взаємодії приймача або джерела світла, що рухаються одне відносно одного, з носієм світла фотоном як частинкою, що являє собою коливальну систему.

«До цього часу нікому не вдалось  
задовільно означити різницю між  
дифракцією і інтерференцією.  
справа тут лише в звичці,  
а істотної фізичної відмінності  
між цими явищами немає»

Р.Фейнман

Дифракція – це різновид  
інтерференції,  
коли когерентними  
джерелами  
є різкі краї перепони

## 6. ЯВИЩЕ ДИФРАКЦІЇ З ТОЧКИ ЗОРУ КОЛИВНОЇ ПРИРОДИ ФОТОНІВ

При вивченні явища дифракції електромагнітних хвиль у загальноосвітній, а також у вищій школі виникає певна невизначеність у розумінні фізичної суті цього явища. Так, досвід показує, що студенти, виходячи із шкільних уявлень, переважно формулюють явище дифракції як *"заходження променів в область геометричної тіні внаслідок огинання гострих неоднорідностей"*. Таке визначення лише частково і поверхово відображає фізичну суть явища дифракції. Бо дифракційна картина як результат дифракції виникає не тільки в області тіні (точка  $P_1$  на рис. 6.1), але також в освітленій прямими променями області (точка  $K$ ) і навіть у зворотному напрямку щодо поширення променів (точка  $P_2$ ). В цьому легко переконатися, якщо направити світло на щілину і спостерігати картину із дифракційних максимумів на екранах  $E_1$  і  $E_2$  в точках  $P_1$  і  $P_2$  (рис. 6.1).

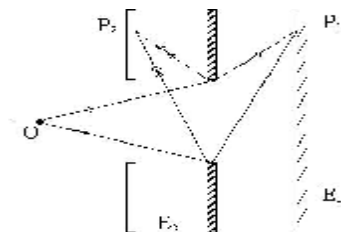


Рис. 6.1

Якщо спостереження на екрані  $E_1$  певною мірою відповідає наведеному визначенню дифракції, то виникнення дифракційної картини на екрані  $E_2$  потребує додаткових роз'яснень. Отже, пояснення дифракції вимагає з'ясування фізичної суті цього явища і використання відповідної термінології.

## 6. 1. Дифракція як один із видів інтерференції

Явище інтерференції полягає у виникненні інтерференційної картини – системи максимумів і мінімумів – в результаті складання когерентних променів. Дифракція – це теж інтерференція. Зокрема, така думка висловлена в [24. – С. 61], однак опис явища абстрактний і особливостей дифракції не розкриває. Особливість же дифракції як інтерференції полягає лише у способі отримання когерентних джерел світла. **При дифракції когерентними джерелами стають різкі краї перепони**, на яких відбувається перевипромінення світлових променів, точніше – перевипромінення фотонів (рис. 6.1). При попаданні світла на перепону, електрони приходять у коливний рух і перевипромінюють світло, яке від гострих частин перепони може потрапляти в область тіні, створюючи інтерференційну картину.

На рис. 6.2 показано дифракцію на диску. Кванти, які випромінюються деяким точковим джерелом  $O$  і поширюються як частинки (фотони), що коливаються, потрапляють на краї диска  $D$ . Збуджені електрони на краях диска коливаються з однаковою фазою, однак перевипромінені фотони приходять в точки  $K, M$  екрана з різними фазами, в результаті чого спостерігається дифракційна картина з максимумами і мінімумами.

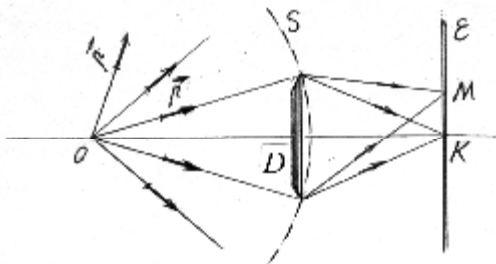


Рис. 6.2

У випадку дифракційної ґратки випромінюючими елементами (осциляторами) є різкі краї царапин (штрихів) на прозорій пластинці.

Слід акцентувати, що саме **гострі краї перепон є перевипромінювачами світла, а не прозорі проміжки (щілини) між ними**, як це традиційно вважається [11. – С. 372].

## 6.2. Особливості розрахунку дифракційної картини на основі хвильового підходу

З точки зору хвильової теорії світла, у відповідності з принципом Гюйгенса, кожен елемент хвильової поверхні є джерелом нових хвиль. Таким чином, джерело світла ніби замінюється хвильовою поверхнею, що світиться. При цьому хвильова поверхня розбивається на зони Френеля, які враховують різницю фаз променів завдяки різній довжині їх ходу у точку спостереження  $K$  (рис. 6.3).

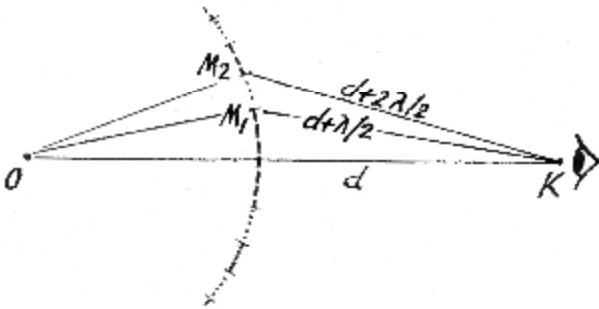


Рис. 6.3

В результаті у точці  $K$  має місце інтерференція променів від усіх елементів хвильової поверхні. Відпо-



відно проводиться розрахунок дифракційної картини: кожна зона Френеля розбивається на нескінченно малі елементи і знаходиться результат дії всіх елементів для всіх зон у точці спостереження.

Отже, особливістю принципу Гюйгенса-Френеля є те, що **джерело світла замінюється хвильовою поверхнею, що світиться**. Треба зауважити, що розглянутий спосіб розрахунку дифракційної картини є формальним, оскільки світло розглядається як деякий абстрактний хвильовий процес, при якому не враховуються квантові властивості світла.

Такий підхід допустимий для хвиль, які поширюються в середовищі, але в принципі неприйнятний для світла, природа якого двоїста – світло є хвилі і частинки одночасно, а середовище для розповсюдження хвиль відсутнє.

### **6.3. Дифракція світла з точки зору квантових уявлень**

Розгляд дифракції на основі квантового підходу повинен лише доповнити описання явища дифракції. Однак врахування квантових властивостей світла призводить до принципових неузгоджень з хвильовою теорією світла і навіть з традиційним трактуванням дифракції. З точки зору квантових уявлень світло – це потік фотонів – особливих частинок, що перебувають у коливному стані, мають частоту і фазу (див. 2.1. – С.26). Фотон як частинка має імпульс і оскільки існує закон збереження імпульсу, то це необхідно враховувати при розгляді явища дифракції. Бо наявність імпульсу у фотона суперечить принципу Гюйгенса стосовно поширення хвиль. За принципом Гюйгенса кожен елемент хвильової поверхні є джерелом нових хвиль.

Однак фотон, дійшовши до елемента хвильової поверхні  $dS$  (рис. 6.4), за законом збереження імпульсу не може змінити напрямку свого руху і не може потрапити в точку спостереження  $K$ . А це суперечить принципу Гюйгенса.

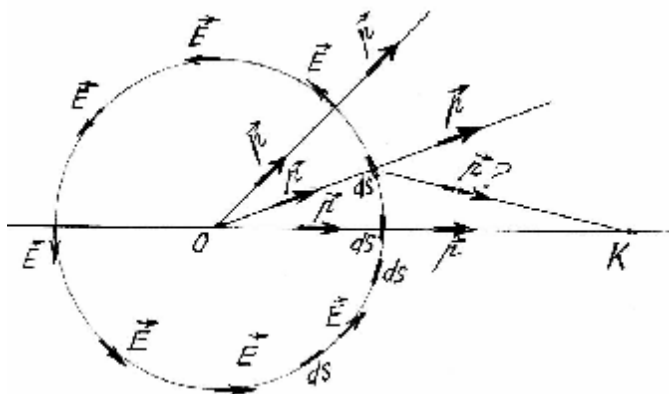


Рис. 6.4

Виходить, що з точки зору квантового підходу для світла принцип Гюйгенса не має реального фізичного змісту, а значить розрахунки і пояснення дифракційних ефектів мають абстрактний характер. В результаті хвильовий і квантовий підходи щодо описування одного й того ж явища дають суперечливі результати. Однак висновки стосовно фізичного явища не залежать від способу описування. Тому необхідно шукати пояснення, яке б не призводило до суперечливих результатів. У зв'язку з цим, звернемо увагу на ту обставину, що дифракційна картина спостерігається при дотриманні важливих умов – **краї перепони повинні бути різкими !** Це має принципове значення, бо саме різкі краї перепони визначають наявність дифракції як явища.

Наприклад, якщо прикрити хвильову поверхню зонними пластинками (на рис. 6.5 жирні частини хвильової поверхні), то фотон пройде крізь відкриту зону  $M-L$ , не змінивши напрямку руху. Такий фотон не потрапить в точку спостереження  $K$ . Однак, якщо фотон потрапить на край зонної пластинки (в точки  $M$  чи  $L$ ), то відбудеться взаємодія фотона з перепоною і перевипромінення в якомусь напрямку, зокрема й у напрямку  $K$ .

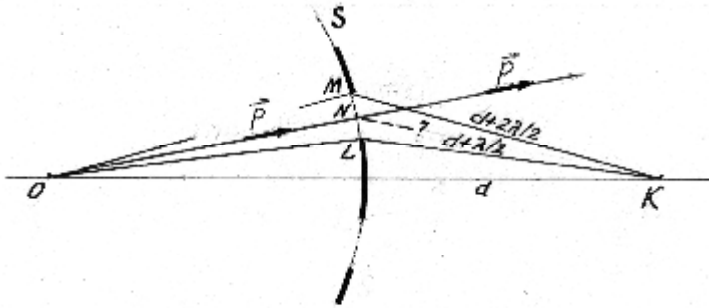


Рис. 6.5

Таким чином, **краї перепони в точках  $M$  і  $L$  стають когерентними джерелами, які створюють інтерференційну картину і в точці  $K$  дають певне значення інтенсивності (максимум чи мінімум). Різкість країв перепони має принципове значення, оскільки лише за таких умов забезпечується "точковість" джерел і виразність інтерференційної (дифракційної) картини.**

Зауважимо, що випромінюючими елементами, тобто когерентними джерелами при дифракції є не відкриті частини хвильової поверхні  $M-L$ , а краї зонної пластинки (точки  $M$  і  $L$ ), де відбувається перевипромінення світла.

Випромінюючими  
елементами  
(когерентними джерелами)  
при дифракції  
є не відкриті ділянки  
хвильової поверхні,  
а краї перепони

#### 6.4. Дифракція на щілині з точки зору квантового підходу

Для підтвердження тотожності понять інтерференції і дифракції нами проведений експеримент по спостереженню дифракції на щілині. Промінь гелій-неонового лазера направлявся на вузьку щілину і на екрані виникала чітка інтерференційна картина з багатьох максимумів і мінімумів (рис. 6.6).

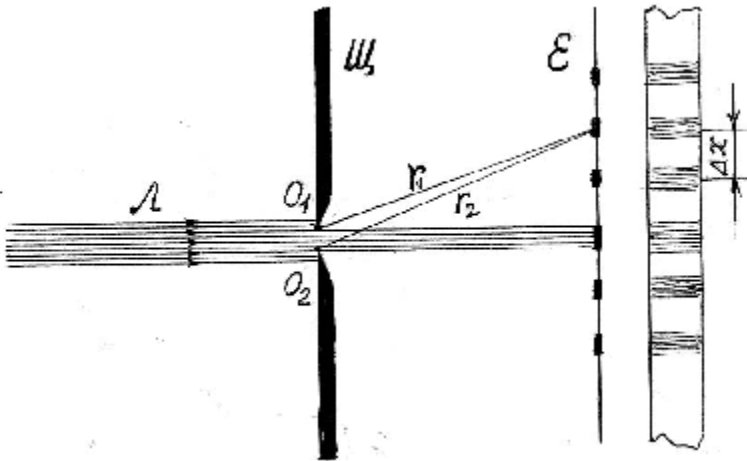


Рис. 6.6

На рис. 6.7 представлена фотографія реальної дифракційної картини, на якій видно яскраву центральну частину в результаті прямого освітлення променем, а з боків – періодичну структуру максимумів і мінімумів дифракційної (інтерференційної) картини.

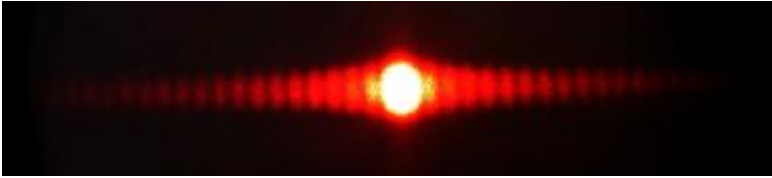


Рис. 6.7

Вимірювання ширини інтерференційної смуги  $\Delta x$  (відстані між двома максимумами), відстані між щілиною і екраном  $l$ , а також ширини щілини  $d$  дало можливість за формулою для інтерференції від двох когерентних джерел розрахувати довжину хвилі променя світла:

$$\lambda = \frac{d}{l} \cdot \Delta x. \quad (1)$$

Зауважимо, що в даному випадку когерентними джерелами ми вважаємо краї щілини, тому ширина щілини  $d$  є відстанню між когерентними джерелами.

В експерименті при ширині щілини  $d = 0,28$  мм, відстані від щілини до екрана  $l = 100$  см на проміжку  $h = 10,0$  см спостерігалось 36 максимумів (тобто, відстань між двома сусідніми максимумами  $\Delta x = 2,8$  мм). Розрахована за формулою (1) довжина хвилі  $\lambda = 0,66$  мкм, що в межах похибки вимірюванн  $\Delta\lambda = 0,04$  мкм збігається з довжиною хвилі гелій-неонового лазера ( $\lambda = 0,63$  мкм).

Розглядаючи світло з позиції квантово-коливної теорії як потік особливих частинок – фотонів, що знаходяться в коливному стані, отримуємо несуперечливі з точок зору класичних і квантових підходів уявлення про явища інтерференції і дифракції світла. Приходимо до висновку, що дифракція – це лише різновид інтерференції, коли когерентними джерелами є гострі неоднорідності перепони на шляху променів. У дифракційній ґратці когерентними джерелами є краї "штрихів" дифракційної ґратки, а не прозорі проміжки між ними.

## 6.5. Розрахунок інтерференційної картини дифракційної ґратки на основі квантових уявлень про світло

З'ясуємо характер дифракційної картини, що створюється дифракційною ґраткою – періодичною структурою багатьох вузьких щілин. **Традиційні розрахунки**, як і у випадку з однією щілиною, **ґрунтуються на принципі Гюйгенса-Френеля**, тобто на уявленнях, що випромінення йде від відкритих ділянок хвильової поверхні дифракційної ґратки [11. – С. 392; 16. – С. 269]. Оскільки така модель суперечить квантовій теорії світла (див. 2. – С. 24), дифракцію на дифракційній ґратці (ДГ), як і у випадку з однією щілиною, будемо розглядати як **інтерференцію від великої кількості ( $N$ ) когерентних джерел**, якими є **гострі краї непрозорих проміжків** у періодичній структурі ґратки (рис. 6.8).

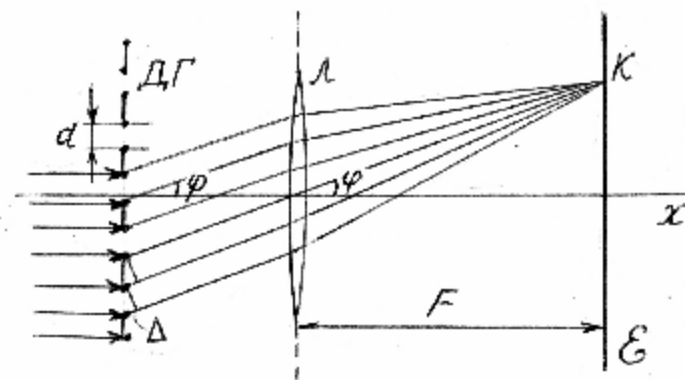


Рис. 6.8

Отже, нехай паралельний пучок променів падає на дифракційну ґратку ( ДГ ) і її краї стають когерентними джерелами, які коливаються з однаковою

фазою і випромінюють електромагнітні хвилі під різними кутами (рис. 6.8).

Паралельні промені в деякому напрямі  $\varphi$  лінзою  $L$  фокусуються на екрані і в точці  $K$  амплітуда коливань буде визначатися сумою

$$E = E^* \cos(\omega t) + E^* \cos(\omega t + \varphi) + E^* \cos(\omega t + 2\varphi) + \dots + E^* \cos(\omega t + N\varphi), \quad (1)$$

де  $E^*$  – амплітуда коливань від одного окремого джерела. Важливо, що між коливаннями, що прийшли від сусідніх джерел у точку  $K$ , існує різниця фаз  $\psi$ , обумовлена різницею ходу променів  $\Delta$ :

$$\psi = \kappa \Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta. \quad (2)$$

де  $\kappa = \frac{2\pi}{\lambda}$  – хвильове число.

Для визначення суми  $E$  скористаємося геометричним способом додавання коливань [11. – С. 378; 12. – С. 158; 17. – С. 61]. Для цього коливання кожного з

джерел представимо векторами  $\vec{OK}, \vec{KL}, \dots$ , орієнтація яких визначає фазу коливань в точці  $K$  (рис. 6.9).

Складені вектори утворюють багатокутник з  $N$  сторонами, вершини якого лежать на колі з радіусом  $r$  і центром в точці  $Q$ . З побудови видно, що кут  $OQK$  дорівнює  $\psi$ , тобто різниці фаз коливань двох сусідніх джерел.



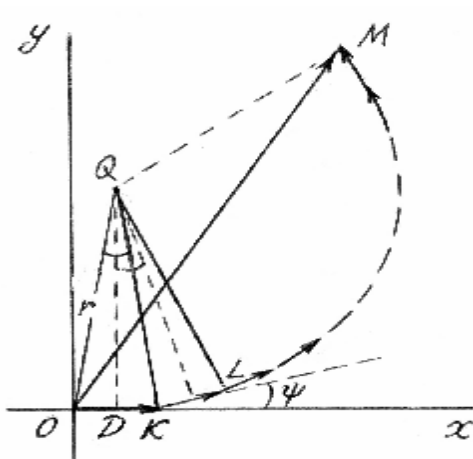


Рис. 6.9

Оскільки

$$DK = OK / 2 = r \cdot \sin(\psi/2), \quad (3)$$

то

$$OK = 2r \cdot \sin(\psi/2). \quad (4)$$

Для великого кута  $OQM$  сумарний вектор  $\vec{OM}$  має довжину:

$$OM = 2r \cdot \sin(N \times \psi/2). \quad (5)$$

Розділивши рівняння (5) на рівняння (4), отримуємо вираз для довжини сумарного вектора  $\vec{OM}$ , яка дорівнює амплітуді коливань:

$$OM = OK \frac{\sin\left(\frac{N\psi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)}. \quad (6)$$

Інтенсивність пропорційна квадрату амплітуди

$$I = (OM)^2 = (OK)^2 \frac{\sin^2(\frac{N\Psi}{2})}{\sin^2(\frac{\Psi}{2})}. \quad (7)$$

Позначимо  $(OM)^2 = I$ ,  $(OK)^2 = I^*$ .

Тоді

$$I = I^* \frac{\sin^2(\frac{N\Psi}{2})}{\sin^2(\frac{\Psi}{2})}, \quad (8)$$

Згідно з (8), при  $N=1$   $I = I^*$  є інтенсивністю коливань в точці  $K$  від одного осцилятора (рис. 8.8). Різниця фаз  $\Psi$  обумовлена різницею ходу  $\Delta$  між сусідніми променями (2):

$$\Psi = \kappa \Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta. \quad (9)$$

За рис. 6.8  $\Delta = d \sin\phi$ , де  $d$  – відстань між сусідніми осциляторами. Тому (9) запишемо :

$$\Psi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin\phi. \quad (10)$$

Тоді вираз (8) для інтенсивності матиме вигляд:

$$\begin{aligned} I &= I^* \frac{\sin^2(\frac{N \cdot \Psi}{2})}{\sin^2(\frac{\Psi}{2})} = \\ &= I^* \frac{\sin^2(\frac{N}{2} \frac{2\pi}{\lambda} d \sin\phi)}{\sin^2(\frac{1}{2} \frac{2\pi}{\lambda} d \sin\phi)} = \end{aligned}$$

$$= I^* \frac{\sin^2(N \frac{\pi}{\lambda} d \sin \varphi)}{\sin^2(\frac{\pi}{\lambda} d \sin \varphi)}. \quad (11)$$

Як бачимо, інтенсивність дифрагованих променів залежить від кількості осциляторів  $N$  і від напрямку  $\varphi$  спостереження дифракційної картини.

Відмітимо, що формула (11) отримана для інтенсивності світла, випромінюваного періодичною структурою точкових джерел, і вона цілком співпадає з формулою для дифракційної ґратки, розрахованою на основі принципу Гюйгенса-Френеля, коли вважається, що випромінення вторинних хвиль іде від кожного елемента відкритої частини хвильової поверхні між краями перепони [11. – С. 392; 16. – С. 269]. Однак слід звернути увагу на некоректність міркувань і розрахунків, проведених на основі принципу Гюйгенса-Френеля, оскільки для світла абстрактний елемент хвильової поверхні не може бути джерелом фотонів, що випромінюються в різні сторони, бо фотон має імпульс і він не може змінити напрямку свого руху, щоб потрапити в точку  $K$  (рис. 8.4). А це значить, що елемент хвильової поверхні не може стати джерелом вторинних хвиль, звідки йде перевипромінювання в точку спостереження  $K$ .

Таким чином, дифракція – це різновид інтерференції, особливість якого в тому, що когерентними джерелами є гострі краї перешкоди. Явище дифракції цілком пояснюється з точки зору інтерференції, тому його традиційний розгляд на основі принципу Гюйгенса з точки зору методики не можна вважати коректним, оскільки це суперечить квантовій теорії світла.

## 7. ОПИСУВАННЯ ДИФРАКЦІЙНИХ ЕФЕКТІВ НА ОСНОВІ КВАНТОВОЇ ТЕОРІЇ СВІТЛА

### 7.1. Метод графічного додавання амплітуд при дифракції світла з точки зору квантової теорії світла

Для пояснення дифракційних явищ використовується метод зон Френеля, який полягає у заміні джерела світла хвильовою поверхнею і розбиттям її на зони таким чином, що світло від кожної сусідньої зони приходить у точку спостереження у протифазі (рис. 7.1). Для розрахунку амплітуди коливань у точці спостереження  $K$  використовується зручний і наочний спосіб представлення коливань за допомогою векторів, довжина яких характеризує амплітуду коливань, а орієнтація – фазу коливань [12. – с. 158]. Поверхня однієї зони Френеля (на рисунку зона  $M_0M_1$ ) розбивається на елементи  $1, 2, 3 \dots$ , кожен з яких представляється у точці спостереження  $K$  елементарним вектором  $1\zeta, 2\zeta, 3\zeta$ .

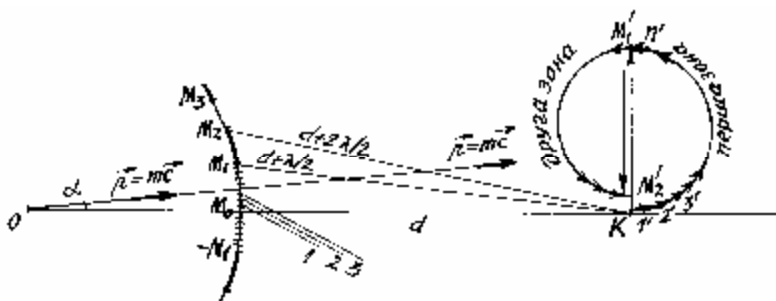


Рис. 7.1.

Останній елемент зони  $M_0M_1$  характеризується вектором  $n\zeta$ , який у відповідності з умовами розбиття на зони, орієнтований протилежно до першого вектора  $I\zeta$ . Уся зона, таким чином, характеризується вектором  $\overset{\bullet}{KM}_1$ .

Однак, як показано в 6.3 (с. 72, рис. 6.3), виходячи з квантових уявлень, для світла хвильова поверхня є абстрактною і реально вона не може замінити точкового джерела, оскільки фотони, які поширюються під деяким кутом до напрямку  $OK$ , зберігають свій імпульс  $\overset{\bullet}{P}$  і від різних точок хвильової поверхні не можуть потрапити в точку спостереження  $K$  (рис. 6.4). Тому додавання векторів  $I\zeta$   $2\zeta$   $3\zeta..$  і т.д. позбавлене якого-небудь змісту. Фізичний зміст мають лише перший вектор ( $I\zeta$ ), бо він напрямлений на точку  $K$ , а також останній вектор  $n\zeta$ , який характеризує перевипромінювання від краю  $M_1$  зонного кільця  $M_1M_2$ , що прикриває другу зону (на рис. 7.1 виділено жирним) і на краю якого в точці  $M_1$  і відбувається дифракція. Тільки ці два вектори характеризують в даному випадку першу зону  $M_0M_1$  і створюють дифракційну картину в точці  $K$ . При цьому слід мати на увазі, що промінь  $O-M_0-K$  є прямим променем від джерела  $O$ , тоді як промінь  $O-M_1-K$  є променем дифрагованим, тобто перевипроміненим на краю  $M_1$  зонного кільця (рис. 7.1). Тому амплітуда коливань, що йдуть від точки  $M_0$ , повинна представляти значно довшим вектором  $I\zeta$  ніж амплітуда коливань дифрагованого світла від точки  $M_1$  (вектор  $n\zeta$ ). На рис. 7.2 якісно представлені ці два вектори.

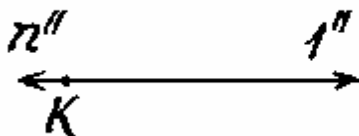


Рис. 7. 2.

Вектори  $1''$  і  $2''$  в даному випадку напрямлені протилежно і віднімаються, тому результуюча амплітуда їх дії в точці  $K$  буде дещо меншою, ніж би це було при прямому освітленні (зауважимо, що вектор  $1''$  характеризує амплітуду прямого променя від джерела.

Якщо зонною пластинкою прикрити ще й інші парні зони, наприклад,  $M_2M_3$  і т.д., то є сенс врахувати дифракцію від їх країв, що буде дещо збільшувати або зменшувати амплітуду коливань в точці  $K$ , яка буде визначатися головним чином вектором  $1''$  (рис. 7.2), що характеризує світло, яке йде безпосередньо від джерела з точки  $O$ .

Таким чином, метод графічного додавання амплітуд, який ґрунтується на методі зон Френеля і використовується при описуванні дифракції світла, не узгоджується з розглядом дифракції з точки зору квантової теорії світла, оскільки в створенні дифракційної картини беруть участь не будь-які точки хвильової поверхні, а лише краї перепон, які можуть перевипромінювати світло. Цей метод не дає можливості розрахувати дифракційну картину, так щоб хвильовий і квантовий підходи при описуванні явища дифракції давали однаковий результат.

Неспроможність методу графічного додавання амплітуд є відображенням неспроможності ідеї зонних пластинок.

## 7.2. Зонні пластинки з точки зору квантової теорії світла

Традиційно пояснення дифракції хвиль ґрунтується на принципі Гюйгенса стосовно поширення хвиль, згідно з яким кожна точка хвильової поверхні є центром нових хвиль. Однак при такому розгляді виникають принципові неузгодженості і суперечливі висновки. Це можна бачити при розгляді явища дифракції на зонних пластинках.

Ідея зонних пластинок ґрунтується на принципі Гюйгенса-Френеля, за яким точкове джерело світла  $O$  замінюється хвильовою поверхнею  $S$  [14. – 205], від кожного елемента якої світло поширюється в усіх напрямках і в деяку точку простору  $K$  приходять з відповідними фазами коливань, що визначає інтенсивність світла в точці  $K$  (рис. 6.4).

Якщо розбити хвильову поверхню на зони за методом Френеля і виготовити пластинку із системи сегментних кілець, які відповідають парним або непарним зонам, то можна прикрити зони, від яких світло йде у протифазі, що повинно б дати значно більшу інтенсивність, ніж при відкритому фронті хвилі. На рис. 7.3 жирними лініями позначені кільця зонної пластинки, що прикривають непарні зони Френеля.

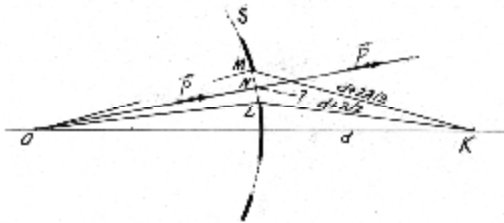


Рис. 7.3

В такому випадку зонна пластинка (так звана амплітудна зонна пластинка) повинна діяти як лінза [12. – 156]. У навчальній літературі стверджується, що зонні пластинки дають можливість у декілька разів підсилювати інтенсивність світла, що йде від точкового джерела [11. – С. 380; 16. – С. 274].

Однак такі висновки, на наш погляд, не можна вважати переконливими, оскільки вони, як і сам метод зон Френеля, ґрунтуються виключно на хвильовій природі світла і є абстрактними. Дійсно, оскільки принцип Гюйгенса-Френеля передбачає, що кожна точка хвильової поверхні є центром нових хвиль, то це означає, що світло від кожної такої точки, наприклад  $N$  (рис.7.3), приходиться у точку  $K$ . Однак з квантових позицій таке неможливе, тому що фотон – це квант світла, для якого існує закон збереження імпульсу  $\vec{p}$ . Оскільки фотон від джерела світла  $O$  в напрямку  $N$  поширюється прямолінійно, то в точці  $N$  він напрям свого імпульсу зберігає і в точку  $K$  потрапити не може. Таким чином, ні парні, ані непарні зони Френеля не можуть бути тими елементами хвильової поверхні, що випромінюють світло в точку  $K$ . Однак на краях зонної пластинки (точки  $L, M$  на рис. 7.3) фотон може змінити напрям імпульсу. І саме в цих місцях відбувається “перевипромінювання” світла і тоді воно вже може потрапити у точку  $K$ .

Звернемо увагу на те, що за такими міркуваннями світло не випромінюється відкритими зонами, а “перевипромінюється” лише краями зонних кілець. Але оскільки це дифраговані промені, то їх інтенсивність мала порівняно з інтенсивністю прямих променів, що йдуть від джерела світла  $O$ . Тому вже з цих міркувань не можна говорити про якесь збільшення інтенсивності світла за допомогою зонних пластинок порівняно з дією



відкритого фронту хвилі, тобто порівняно з прямим освітленням точки  $K$ . Більше того, говорити про підсилення світла не можна ще й тому, що світло від сусідніх країв кожних двох сусідніх сегментних зонних кілець (точки  $L$  і  $M$ ) приходять у точку  $K$  у протифазі.

Усе сказане також стосується фазової зонної пластинки, призначення якої не тільки в тому, щоб виключити дію зон, світло від яких іде у протифазі, але змінити їх фазу на протилежну і таким чином домогтись ще більшого підсилення світла.

Оптичний прилад, який має назву “зонна пластинка”, може бути зреалізований як дифракційна ґратка. На відміну від “гіпотетичної” зонної пластинки, у якій випромінювання відбувається від непокритих частин хвильової поверхні, в дійсності випромінювання йде лише від країв кожної зони пластинки. Тому розрахунок зон необхідно робити таким чином, щоб світло від країв пластинки у точку спостереження  $K$  приходило у фазі.

На рис. 7.4 жирними лініями зображені кільця зон Френеля, від країв яких світло приходять у точку  $K$  у фазі.

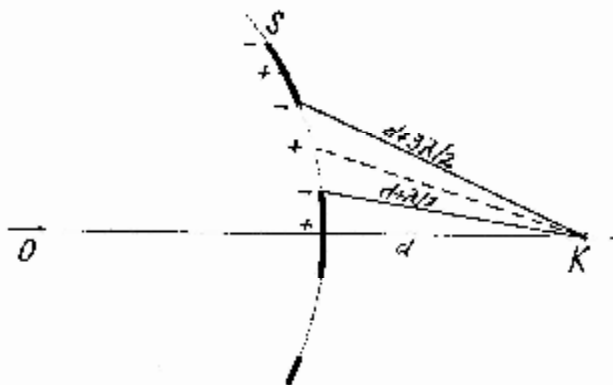


Рис. 7.4

Отже, властивість зонних пластинок підсилювати світло з точки зору квантової природи світла, на нашу думку, є необгрунтованою. Сучасні технології дають можливість виготовлення досконалих зонних пластинок, однак нам невідомі хоча б лабораторні зразки таких оптичних приладів, які б давали підсилення інтенсивності в декілька разів. Існуючі ж зразки зонних пластинок, на наш погляд, є не чим іншим, як варіантами більш чи менш вдалих дифракційних ґраток.

### 7.3. Експериментальне підтвердження квантового трактування явища дифракції

Для того, щоб підтвердити справедливність висловлених міркувань, досить поставити дослід, коли центральна (непарна) зона  $M_0M_1$  прикрита зонним кільцем і прямий промінь в точку  $K$  не потрапляє, а відкриті парні зони (наприклад, друга зона  $M_1M_2$  на рис. 7.5).

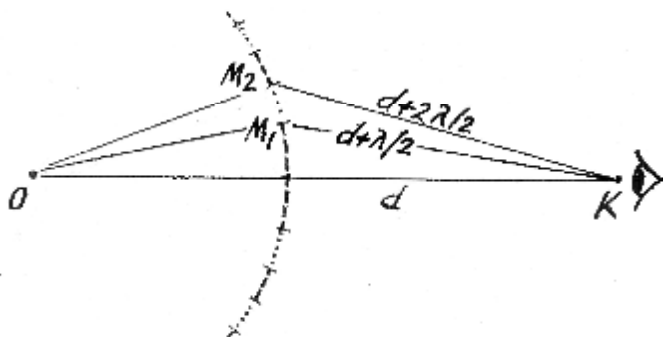


Рис. 7.5

Тоді згідно з принципом Гюйгенса всі точки цієї відкритої зони  $M_1M_2$  повинні б бути джерелами "нових хвиль" і з точки  $K$  повинно б спостерігатися свічення цієї зони. На спіралі рис. 7.1 дія зони  $M_1M_2$  в точці  $K$  характеризується вектором  $M_1M_2'$ , який за величиною порівняний з вектором  $KM_1'$ . Це значить, що з точки  $K$  (рис. 7.5) ми повинні б спостерігати яскраве свічення відкритої другої зони, за інтенсивністю порівняне з прямим променем.

Однак, виходячи з квантових уявлень, свічення відкритої другої зони (як і інших) неможливе, оскільки фотони, відповідно до закону збереження імпульсу  $\vec{p} = m\vec{c}$ , з поверхні відкритої зони потрапити в точку  $K$  не можуть (рис. 7.3). Спостерігати можна лише промені, дифраговані від країв  $M_1$  і  $M_2$  зонних кілець. Але, перше, ці промені є дифрагованими (тобто перевипроміненими на краях), тому інтенсивність їх невелика. І по-друге, вони, у відповідності з розбиттям хвильової поверхні на зони у точці  $K$ , дають коливання у протифазі. Тобто, повинні взаємно погашатися.

Отже, виходячи з хвильової теорії дифракції, відкрита зона повинна світитися, тоді як з точки зору квантової теорії, коли світло представляється як потік фотонів – частинок, що перебувають у коливальному стані – свічення відкритої зони спостерігатися не повинне. Тому можна зробити висновок, що побудова спіралі із векторів, які представляють елементи зони Френеля, втрачає сенс.

Для розв'язання означеної суперечності нами був поставлений експеримент по виявленню світності окремо виділеної зони Френеля.

#### 7. 4. Чи світиться зона Френеля ?

Промінь лазера  $L$  направлявся на вузьку щілину  $\mathcal{C}_1$ , яка виконувала роль точкового джерела світла (рис. 7.6).

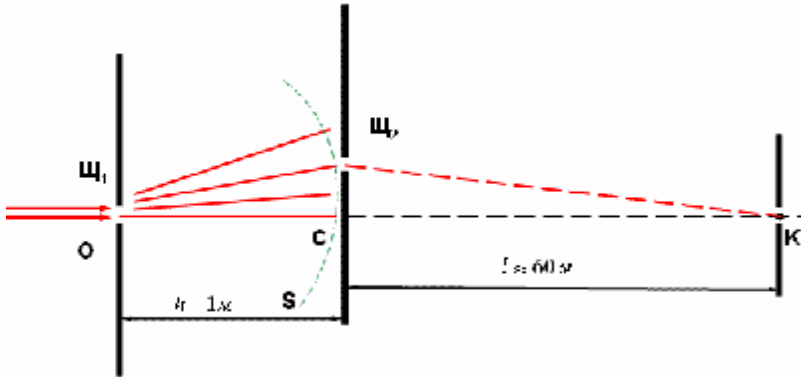


Рис. 7.6

Хвильова поверхня  $S$  умовно розбивалась на зони Френеля. У відповідності з параметрами установки ширина зони Френеля була  $\approx 1$  мм. Переміщення вузької щілини  $\mathcal{C}_2$  (вужчої за ширину зони Френеля) разом з перепоною  $\Pi$ , яка прикривала прямий промінь  $OK$ , у різні точки хвильової поверхні не виявляло свічення цих точок як джерел нових хвиль. Лише розміщення щілини  $\mathcal{C}_2$  в точці  $C$  давало можливість спостерігати прямий промінь від щілини  $\mathcal{C}_1$ .

Таким чином, проведені **експериментальні результати узгоджуються не з хвильовим, а з квантовим підходом при розгляді дифракції світла.**

## 7.5. Дифракція на прямолінійному краю площини з точки зору квантового підходу

Цілком подібна ситуація виникає при поясненні дифракції на прямолінійному краю площини  $\Pi$  (рис. 7.7).

В деяку точку  $K\zeta$  екрана приходить як пряме світло від джерела  $O$ , так і дифрагзоване (перевипромінене) від краю площини з точки  $L$ . В залежності від різниці ходу прямого  $OK\zeta$  і дифрагзованого  $LK\zeta$  променів у точці  $K\zeta$  буде спостерігатися результат інтерференції.

Зліва від точки  $K$  можна спостерігати лише дифрагзоване світло в точці  $L$  (хід фотона  $O-M_2-K$ , наприклад, виходячи із закону збереження імпульсу, неможливий). Тому воно даватиме невелику інтенсивність  $I_1$ . Зміщення точки  $K\zeta$  вправо дасть періодичну зміну інтенсивності навколо значення  $I_0$ , яке спостерігається при відкритій хвильовій поверхні.

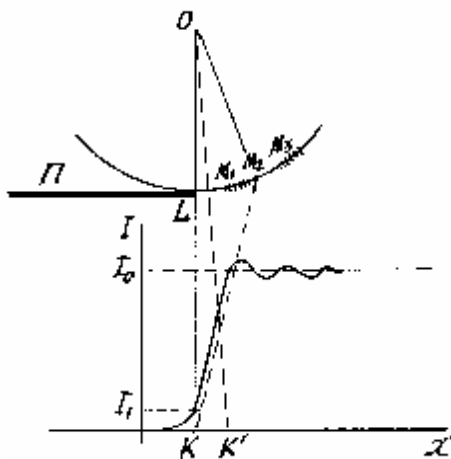


Рис. 7.7

Таким чином, векторне представлення амплітуди коливань (спіралі Корню), від елементів парних і непарних зон, як і у випадку зон Френеля на сферичних хвильових поверхнях, є абстракцією і не має фізичного змісту.

## 7.6. Проблемність задач на тему дифракції

При розгляді явища дифракції проявляється двоїстість природи світла. Традиційно дифракція пояснюється на основі принципу Гюйгенса-Френеля, який є вираженням хвильового підходу. Тому виникає необхідність всі висновки узгоджувати з корпускулярним підходом, оскільки фізичне явище не залежить від того, як ми його описуємо. Однак співставлення хвильових і корпускулярних уявлень призводить до принципових суперечностей, що потребує аналізу і пояснення. Такі проблеми виникають при вивченні явища дифракції у вищій школі, зокрема при розв'язуванні задач.

Розглянемо характерні задачі із найбільш відомих збірників задач для вищої школи.

**16.28.** Світло від монохроматичного джерела ( $\lambda = 600$  нм) падає нормально на діафрагму з круглим отвором. Діаметр отвору 6 мм. За діафрагмою на відстані 3 м від неї знаходиться екран.

- 1) Скільки зон Френеля вкладається в отворі діафрагми ?
- 2) Яким буде центр дифракційної картини на екрані : темним чи світлим ? [18].

**24-1.** Між точковим джерелом світла ( $\lambda = 0,50$  мкм) і екраном помістили діафрагму з круглим отвором з радіусом  $r_0 = 1,0$  мм. Відстані від діафрагми до джерела і екрану дорівнюють відповідно  $R = 1,00$  і  $r_0 = 2,00$  м.

Як зміниться освітленість в центрі екрана, якщо діафрагму прибрати ? [19].

**Приклад 8** (- С. 293) [20]. На круглий отвір з радіусом 1,0 мм в непрозорому екрані падає нормально паралельний пучок світла з

довжиною хвилі 0,5 мкм. На шляху променів, які пройшли через отвір, розміщений екран. Визначити максимальну відстань від отвору до екрана, при якому в центрі дифракційної картини ще буде спостерігатись темна пляма ?

**31-3.** На круглий отвір діаметром  $d = 4$  мм падає нормально паралельний пучок світла ( $\lambda = 0,5$  мкм). Точка спостереження знаходиться на відстані  $R_0 = 1$  м від отвору.

Скільки зон Френеля вкладається в отворі ? Темна чи світла пляма буде спостерігатись, якщо в місце спостереження помістити екран ? [20].

**5.100.** Плоска монохроматична хвиля з інтенсивністю  $I_0$  падає нормально на екран з круглим отвором. Яка інтенсивність світла  $I$  за екраном в точці, для якої отвір рівний першій зоні Френеля; внутрішній половині першої зони ? [21].

Представлені тут та інші задачі побудовані на основі хвильових уявлень про світло і не враховують квантових властивостей світла. Тому вже у сам зміст задач закладена некоректність, що унеможливує їх правильний розв'язок. Некоректність має принциповий характер, бо згідно з принципом Гюйгенса-Френеля кожна точка хвильової поверхні є джерелом нових хвиль, що для світла неможливо реалізувати, оскільки рух фотона як частинки підлягає закону збереження імпульсу. Фотон, маючи імпульс  $\vec{p}$ , не може змінити напрямку руху і потрапити, наприклад, від елемента хвильової поверхні  $dS$  в точку  $K$  (рис.7.8).

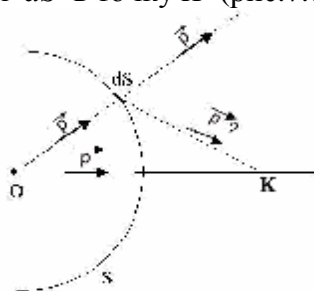


Рис. 7.8

Однак в усіх представлених тут задачах вважається, що від кожного елемента зон Френеля світло може поширюватись у різних напрямках і, зокрема, в точку спостереження  $K$ , з чим погодитись неможливо, оскільки це суперечить закону збереження імпульсу. Саме через закон збереження імпульсу фотон із деякої абстрактної точки  $N$  хвильової поверхні  $S$  не може рухатись в напрямку  $K$  (рис.7.9).

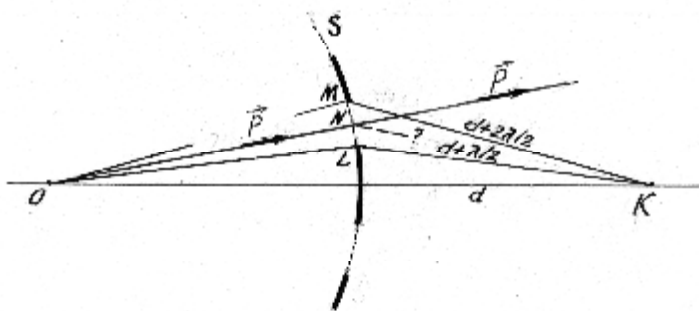


Рис. 7.9

При розв'язуванні задач на дифракцію треба враховувати ще одну суттєву обставину – необхідно розрізняти прямі і дифраговані промені. Якщо вважати, що непарні зони прикриті непрозорими кільцями (на рис. 7.9 виділені жирним), то **пряме світло** в точку  $K$  не потрапляє. І тоді промені, **дифраговані на різких краях**  $M$  і  $L$  кілець, вже можуть поширюватись в точку  $K$  чи в іншому напрямку і створювати на екрані  $E$  інтерференційну картину.

Якщо ж відкрита центральна зона, то тлумачення дифракції повинно бути дещо іншим (рис. 7.10).



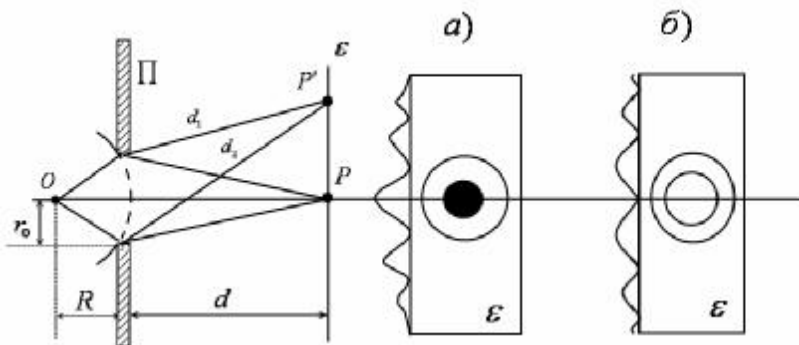


Рис. 7.10

В цьому випадку має місце як **пряме освітлення** екрана – промінь  $OP$  – так і **освітлення дифрагованим променем** від краю перепони. Звичайно, у цьому випадку також виникне дифракційна картина і в центрі екрана у точці  $P$  буде максимум (а) чи мінімум (б) інтерференції, що залежить від різниці ходу прямих і дифрагованих променів. Однак **різниця в освітленості між максимумом і мінімумом буде незначною** через те, що інтенсивність дифрагованого променя дуже мала у порівнянні з прямим променем і помітити цю різницю на фоні сильного прямого освітлення навряд чи можливо. Тому запитання в задачі 16.28 [18] яким буде центр дифракційної картини на екрані – темним чи світлим – не можна вважати коректним, бо центр дифракційної картини завжди буде світлим, правда дещо більше чи менше.

Аналогічні зауваження стосуються й інших задач.

Проаналізуємо наведений у збірнику [19] розв'язок задачі 24.1 на дифракцію світла на круглому отворі. В поясненні говориться, що в результаті дифракції на краях отвору на екрані виникає дифракційна картина – світлі і темні кільця. А в центрі буде світла чи темна

пляма в залежності від числа зон Френеля, що вкладаються на поверхні хвильового фронту в межах отвору. Такий висновок не можна вважати коректним, тому що, по-перше, екран в центрі буде освітлений прямими променями, а дифраговані промені від країв отвору лише дещо змінять його освітленість. По-друге, не враховано, що світло – це потік частинок (фотонів). В даному випадку за проведеними розрахунками в отворі вкладається 3 зони Френеля. Фотони від другої і третьої зони потрапити в центр екрана не можуть за законом збереження імпульсу (див. рис. 7.11). Це значить, що в центр екрана потраплять тільки фотони центральної зони і від країв отвору.

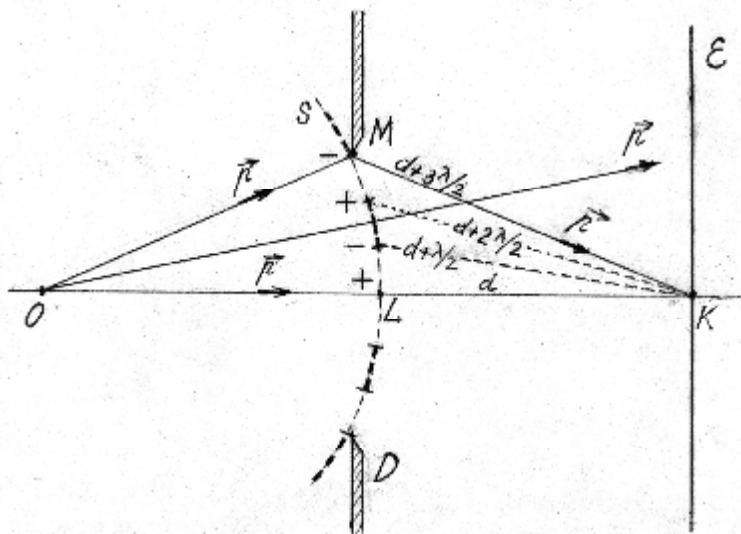


Рис. 7.11

Але коливання цих фотонів, згідно з побудовою зон, відбуваються у протифазі. Отже, це повинно дати послаблення освітленості екрана. У розв'язку ж робиться висновок, що оскільки за принципом Гюйгенса дві зони компенсують одна одну, то третя зона в центрі дасть світлу пляму. Як бачимо, хвильовий і квантовий підходи дають зовсім протилежні результати.

Проаналізуємо наведений у збірнику [20] приклад 8 розв'язку задачі на дифракцію паралельних променів. В задачі питається, коли в центрі екрана буде спостерігатися темна пляма. По-перше, центр екрана завжди буде освітлений прямими променями і темної плями не буде, а лише трохи більша чи менша освітленість внаслідок накладання сильного прямого променя і слабкого дифрагованого від краю отвору (рис. 7.10). По-друге, згідно з хвильовим підходом темна пляма повинна спостерігатися, коли в отворі вклядеться 2 зони Френеля. Однак за квантовим підходом в центр екрана можуть потрапити тільки фотони першої (центральної) зони і фотони, дифраговані від краю отвору. За умовою край отвору співпадає з краєм другої зони, а це означає, що центральний і дифрагований від краю отвору промені знаходяться у фазі і повинні дати підсилення освітленості екрану. Таким чином, результати розв'язків задачі при хвильовому і квантовому підходах зовсім протилежні.

Із приведених задач у відповідності з хвильовим підходом випливає, що при віддалені екрану від отвору діафрагми кількість зон Френеля зростає і відповідно повинна чергуватися його світла і темна освітленість. Згідно з квантовим підходом екран в центрі повинен бути освітленим прямими променями і зміна дифракційної картини на фоні цього освітлення не може бути помітною. З метою експериментальної перевірки таких суперечливих висновків був поставлений дослід.

### 7.7. Експериментальна перевірка дії зон Френеля

Від точкового джерела  $O$  світло направлялось на вузьку щілину (шириною  $1\text{ мм}$ ) в перепоні  $D$ , яка знаходилась на відстані  $1\text{ м}$  від джерела (рис. 7.12).

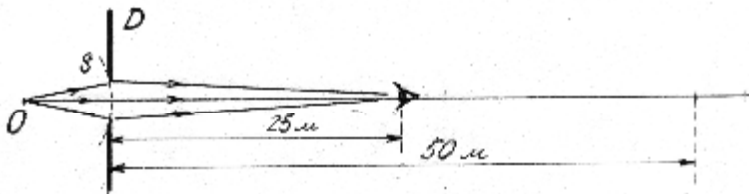


Рис. 7.12

За щілиною спостерігалась дифракція променів, яка за хвильовими уявленнями, повинна давати на різних відстанях від щілини мінімуми і максимуми освітленості. Так, згідно з розрахунками, на відстанні  $25\text{ м}$ , коли з точки спостереження видно  $2$  зони Френеля, повинна спостерігатися темна пляма, а з відстані  $50\text{ м}$  – світла. Однак при віддаленні від щілини інтенсивність зменшується дуже повільно і періодичної зміни інтенсивності експериментально не виявлено, що підтверджує некоректність застосування принципу Гюйгенса-Френеля при поясненні дифракції і необхідність врахування корпускулярної природи світла.

«Прочитайте її. Хоч і здається,  
що її писав божевільний,  
написана вона поважно».

*Альберт Ейнштейн*  
(про дисертацію де Бройля)

Хвиля де Бройля - це частинка,  
яка рухається поступально  
і ще перебуває  
у коливному русі типу  
*енергія – маса – енергія – маса...*

«Рух електрона і будь-якої іншої частинки  
зі спіном  $\frac{1}{2}$  і відмінною від нуля масою  
спокою має дуже складний характер.  
Цей рух не можна описати шляхом  
звичних уявлень класичної механіки.  
Якщо ж, однак, відмовитися від наукової  
строгості і спробувати дати вельми  
приблизну наочну модель, то можна  
сказати, що, перебуваючи в русі,  
частинка поряд з регулярним переміщенням  
здійснює складне безладне «тремтіння».  
О.С. Давидов. Атоми. Ядра. Частинки.  
– К. :»НАУКОВА ДУМКА». 1973. – С. 18.

## 8. ХВИЛІ ДЕ БРОЙЛЯ З ТОЧКИ ЗОРУ КОЛИВНОГО РУХУ МАТЕРІЇ

У фотоні – елементарній частинці світла, закладена двоїстість природи матерії. Дійсно, квант світла має енергію

$$W = h\nu . \quad (1)$$

З іншого боку, енергія

$$W = mc^2 . \quad (2)$$

Прирівнявши (1) і (2), одержуємо:

$$h\nu = mc^2 . \quad (3)$$

Оскільки частота  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ , то (3) запишемо:

$$h \cdot \frac{c}{\lambda} = mc^2 ,$$

звідки

$$\lambda = \frac{h}{mc} . \quad (4)$$

Як бачимо, у формулу (4) входить довжина хвилі  $\lambda$  як характеристика хвильових властивостей, так і маса  $m$ , яка виражає корпускулярні властивості світла.

У свій час за аналогією до світла де Бройль висунув гіпотезу про хвильові властивості не тільки світла, але також будь-якої частинки, що рухається зі швидкістю  $u$ . Довжина хвилі де Бройля

$$\lambda_D = \frac{h}{mv} . \quad (5)$$

Гіпотеза де Бройля здавалась неймовірною, але вона, як відомо, дуже скоро знайшла повне підтвердження. Вона дала можливість пояснити дискретність електронних орбіт атома: електрон в атомі поводить себе як хвиля і на орбіті повинно вкладатися ціле число хвиль де Бройля. На основі ідеї хвиль де Бройля працюють електронні мікроскопи. Однак з точки зору класичних уявлень двоїстість природи мікрочастинок породжує суперечність, яку традиційна фізика пояснити не змогла. Виникало питання: чому частинку, яка рухається, можна розглядати як хвильовий процес? Оскільки хвильовий процес описується гармонічними функціями і визначається фазою ( $\omega t$ ), то незрозуміло, як фаза може характеризувати частинку, що рівномірно рухається з деякою швидкістю  $u$ ? Як в частинці, що рухається рівномірно зі швидкістю  $u$ , проявляється коливний процес?

На ці питання несуперечливо дає можливість відповіді теорія коливного руху матерії (див. 2.5. – С. 38).

Якщо частинка прискорюється, на неї діє сила, внаслідок чого виконується робота, яка, у відповідності з (1.4. – С. 19), йде на збільшення кінетичної енергії і на зростання динамічної маси. **При зростанні динамічної маси** запускається механізм коливного процесу типу:

$$\Delta W \rightarrow \Delta m \rightarrow \Delta W \rightarrow \Delta m \rightarrow \dots$$

Таким чином, прискорена мікрочастинка переходить в коливний стан, при якому відбувається пульсація маси, так що вже рухається не просто частинка, а частинка специфічна, яка, переміщуючись поступально, перебуває ще й у коливному русі. Така частинка з пульсуючою масою і є хвилею де Бройля.

Появу хвиль де Бройля можна продемонструвати на прикладі руху електрона в атомі водню.

## 8.1. Електрон в атомі водню як хвиля де Бройля

Розглянемо рух електрона в найпростішому атомі – атомі водню. У незбудженому стані електрон знаходиться на першій коловій орбіті з радіусом  $r_1 = 0,526 \cdot 10^{-10} \text{ м}$  і за теорією Бора має повну енергію  $W_1 = -13,53 \text{ eV}$  (рис. 8.1). Для відриву електрона від атома, тобто для іонізації атома, необхідна енергія

$$\Delta W = W_\infty - W_1 = 13,53 \text{ eV} .$$

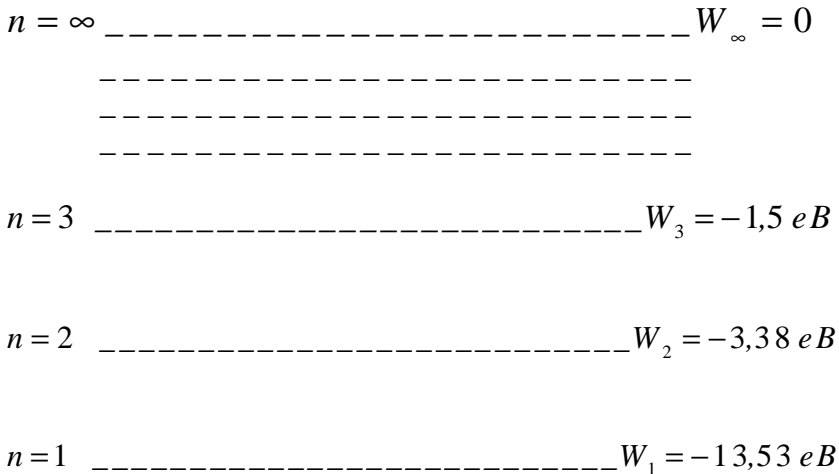


Рис. 8.1

Розглянемо зворотній процес – процес утворення атома водню.

Нехай електрон знаходиться на досить великій відстані, так, що його можна вважати вільним (рис. 8.2).



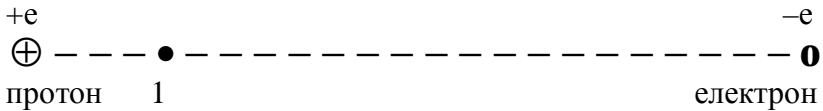


Рис. 8.2

Завдяки кулонівській взаємодії електрон рухається прискорено в напрямку протона до точки 1 на відстані  $r_1$  – першої орбіти електрона в атомі. Потенціал, створений протоном в точці 1,

$$\varphi_1 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r_1} = \frac{1,60 \cdot 10^{-19}}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,53 \cdot 10^{-10}} = 27,36 \text{ В}$$

Рухаючись під дією електричного поля, електрон набуває кінетичної енергії, яка дорівнює роботі поля:

$$W_k = e \cdot \Delta\varphi = e\varphi_1 = 1,60 \cdot 10^{-19} \cdot 27,36 \text{ Дж} = 27,36 \text{ eВ}.$$

Електрон в атомі водню повинен бути на орбіті в точці 1, тобто він має дійти до відстані  $r_1$  (до першої орбіти електрона в атомі) і повинен мати кінетичну енергію  $W_k = 27,36 \text{ eВ}$ .

За теорією Бора електрон на першій орбіті має швидкість

$$v_1 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar} = 2,193 \cdot 10^6 \text{ м/с}$$

і відповідну кінетичну енергію

$$W_{k1} \frac{mv_1 r}{r} = 13,69 \text{ eV}.$$

Як бачимо, розраховане за традиційними уявленнями значення кінетичної енергія у два рази більше, ніж це є в атомі водню. Така розбіжність пояснюється тим, що електрон, прискорюючись у полі протона, доходить до відстані радіуса орбіти і випромінює фотон. На енергетичній діаграмі це відповідає переходу електрона з рівня  $W_\infty$  на рівень  $W_1$ :

$$h\nu = \Delta W = W_\infty - W_1 = 13.53 \text{ eV}.$$

Таким чином, баланс енергії ніби зберігається, проте у наведених оцінках не врахована суттєва обставина. Справа в тому, що за теорією відносності при збільшенні енергії електрона, який прискорюється, відповідно зростає маса:

$$m_1 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{9,11 \cdot 10^{-31}}{\sqrt{1 - \frac{(2,193 \cdot 10^6)^2}{(3 \cdot 10^8)^2}}} = 9,109776 \cdot 10^{-31} \text{ кг}.$$

Цей приріст маси (динамічна маса)

$$\begin{aligned} \Delta m &= m_1 - m_0 = \\ &= (9,109776 - 9,109534) \cdot 10^{-31} = \\ &= 0,00024 \cdot 10^{-31} \text{ кг}. \end{aligned}$$

Можна висунути гіпотезу, що саме зростання динамічної маси спричиняє хвильовий процес при русі електро-

на на орбіті, коли зміна маси, обумовлює відповідні зміни енергії і навпаки:

$$\Delta m \rightarrow \Delta W \rightarrow \Delta m \rightarrow \Delta W \rightarrow \dots$$

Цікаво, що еквівалентна зміна енергії при зміні динамічної маси в процесі прискорення електрона

$$\begin{aligned}\Delta W &= c^2 \Delta m = \\ &= (3 \cdot 10^8)^2 \cdot 0,00024 \cdot 10^{-31} \text{ Дж} = \\ &= 13,5 \text{ eV}.\end{aligned}$$

За таких умов електрон, рухаючись по орбіті, знаходиться в коливному стані і реалізується така орбіта, під час руху на якій відбувається ціле число коливань. При такій інтерпретації хвилі де-Бройля замість віртуального представлення набувають цілком реального фізичного змісту.

Таким чином, можемо зробити висновок: **при русі електрона на орбіті в атомі реалізується форма руху матерії типу**

$$\text{енергія} - \text{маса} - \text{енергія} - \text{маса} \dots,$$

що можна трактувати як хвилі де-Бройля.

## 9. КВАНТОВО-МЕХАНІЧНІ ЯВИЩА З ТОЧКИ ЗОРУ УЯВЛЕНЬ КОЛИВНОГО РУХУ МАТЕРІЇ

Ми розглянули хвилі де Бройля як поступальний рух мікрочастинок і як хвильовий процес. Формула для довжини хвилі де Бройля крім довжини хвилі  $\lambda_D$ , як хвильового параметра, включає в себе також корпускулярний параметр – масу мікрочастинки:

$$\lambda_D = \frac{h}{mv}. \quad (9.1)$$

Проте питання двоїстості природи мікрочастинок – що це і частинки і хвилі одночасно – важко дається для розуміння, оскільки таке трактування містить у собі суперечність – частинка локалізована, а хвиля – явище просторове, що неможливо узгодити. Крім того, хвильовий процес характеризується фазою, а що є фазою у хвилях де Бройля – незрозуміло. Однак слід зауважити, що гіпотеза де Бройля стала переконливою реальністю. На основі цієї гіпотези розвинута така наука як квантова механіка, яка з великою точністю описує рух електронів в атомах.

Суперечність двоїстості природи мікрочастинок усувається, якщо рух мікрочастинки розглядати з точки зору квантово-коливної природи матерії (2,5. – С. 38). Прообразом хвилі де Бройля є фотон як частинка, в якій відбувається неперервний коливний процес еквівалентного переходу енергії електричного і магнітного полів у масу і навпаки – маси в енергію фотона. Причому, вся маса фотона тут динамічна (релятивістська), оскільки маси спокою фотон не має.

На рис. 9.1 показані зміни напруженостей електричного  $E$  і магнітного  $H$  полів електромагнітної хвилі

(графік *a*) і відповідні їм зміни (в якісному представленні) маси  $m$  (графік *б*).

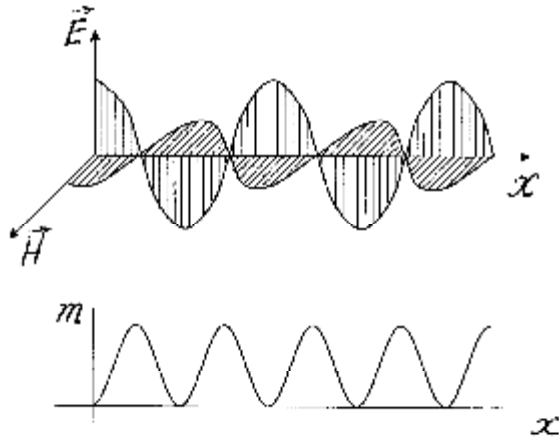


Рис. 9.1

Електричне і магнітне поля мають енергію, тому при зменшенні  $E$  і  $H$  зменшується енергія цих полів і для виконання закону збереження енергії зменшення енергії повинно супроводжуватись еквівалентним зростанням маси. Аналогічні зміни відбуваються при зростанні  $E$  і  $H$ .

За аналогією до світла “хвилю де Бройля” також можна розглядати як рух частинки, що перебуває у коливному стані, і цей процес являє собою періодичний перехід маси частинки в енергію і навпаки. Однак важливо зазначити, що коли у випадку з фотоном змінюється вся його маса, тут перетворення відбуваються лише з динамічною складовою маси (рис. 9.2), тобто тією еквівалентною масою  $\Delta m = m - m_0$ , яка з’являється при зростанні швидкості:

$$m = \frac{m_o}{\sqrt{1 - \frac{\Delta v^2}{c^2}}}$$

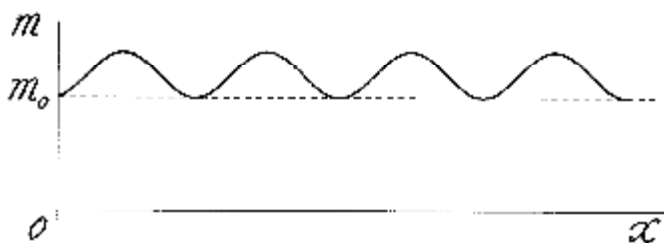


Рис. 9.2

### 9.1. Рівняння Шредінгера з точки зору коливного руху матерії

Коливний процес починається при прискоренні мікрочастинки, коли зростає її швидкість і, відповідно, маса. Оскільки в подальшому зміна маси має коливний характер, то цей коливний процес при русі частинки описується хвильовим рівнянням. Таким є рівняння Шредінгера. Розв'язок рівняння Шредінгера дає можливість знайти деяку хвильову функцію  $\psi$ , квадрат модуля якої визначає імовірність знайти частинку в тому чи іншому місці або стані. Логічно, що імовірність знайти частинку має бути більшою там, де маса частинки в процесі коливання є більшою.

З точки зору «хвильових властивостей» мікрочастинок можна тлумачити також співвідношення невизначеностей Гейзенберга, яке є важливим принципом квантової механіки.

## 9.2. Співвідношення невизначеностей Гейзенберга як наслідок коливного руху матерії

Співвідношення невизначеностей означає неможливість одночасного точного знання координати частинки і її імпульсу, тобто означає існування невизначеності  $\Delta x$  і  $\Delta p_x$  :

$$\Delta p_x \Delta x \geq \hbar.$$

Така невизначеність впливає із самого стану мікрочастинки.

Оскільки мікрочастинка перебуває в коливному стані, при якому неперервно змінюється її маса, то відповідно змінюється також імпульс частинки. Імпульс частинки виражається як масою спокою  $m_0$ , так і динамічною складовою  $\Delta m$ . Якщо вважати, що зміна імпульсу відбувається за гармонічним законом, то якісно залежність  $p(t)$  має вигляд, представлений на рис. 9.3.

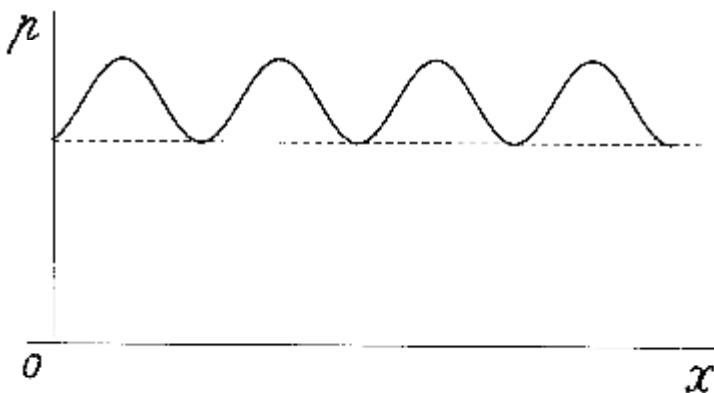


Рис. 9.3

В даному випадку ми розглядаємо невизначеність складової імпульсу  $p_x$ . Однак імпульс частинки орієнтований довільно і ми не знаємо його орієнтації, тому змушені невизначеність  $\Delta p_x$  прийняти рівною величині імпульсу  $p$ :

$$\Delta p_x = p. \tag{2}$$

Невизначеність **положення** частинки також має цілком виразний фізичний характер. Дійсно, оскільки при русі частинки відбувається коливання маси (а саме масою визначається наявність самої частинки, тобто її речовинність), то ця змінна маса розсосереджена на довжині "хвилі". Тобто, невизначеність координати, де знаходиться маса, дорівнює довжині хвилі де Бройля (рис. 9.4).

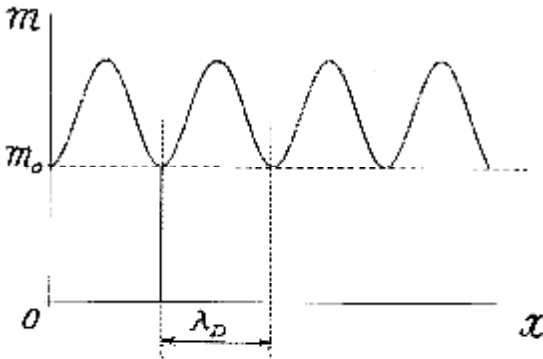


Рис. 9.4

Тому можемо прийняти, що

$$\Delta x = \lambda_D. \tag{3}$$



Перемноживши відповідно ліві і праві частини (2) і (3), отримуємо:

$$\Delta p \cdot \Delta x = p \cdot \lambda_D. \quad (4)$$

Оскільки довжина хвилі де Бройля

$$\lambda_D = \frac{h}{p},$$

то (4) матиме вигляд:

$$\Delta p \cdot \Delta x = h. \quad (5)$$

Отже, виходячи із звичайних фізичних уявлень, в рамках квантово-коливної теорії матерії приходимо до висновку, що одночасне точне знання координати і імпульсу мікрочастинки обмежується співвідношенням (5).

Співвідношення невизначеностей стали темою філософських дискусій і мали різне тлумачення. Одним із таких тлумачень є те, що мікрочастинки ніби мають в кожний даний момент певні координати і імпульси, але ми не маємо способу їх узнати. Співвідношення невизначеностей ніби “забороняють” нам їх узнати, тобто встановлюють межу пізнання.

Згідно з іншим тлумаченням, зміст співвідношення невизначеностей не в тому, що вони обмежують можливість узнати точно координати і імпульси (чи інші величини), а в тому, що у мікрочастинок цих точних одночасних значень просто немає.

Сам Гейзенберг у 1927 р. дійшов висновку, що квантова механіка робить неспроможним закон причинності, який вимагає, щоб на основі точного знання стану системи в даний момент часу, можна було б передбачити стан для

будь-якого майбутнього моменту. Таке цілком можливе в класичній механіці і неможливе в квантовій механіці, оскільки точне знання початкових значень  $p_x$  і  $x$  для мікрочастинок неможливе.

Розгляд цієї проблеми з точки зору квантово-коливної теорії матерії дає можливість наблизитись до розуміння фізичних процесів, що відбуваються з частинкою в області мікросвіту, де проявляються інші форми руху матерії і які неявно описує квантова механіка.

Таким чином, квантова механіка описує рух мікрочастинок, розглядаючи його як хвильовий процес, у зв'язку з чим виникають суперечності і труднощі в розумінні фізичного змісту такого важливого принципу як співвідношення невизначеностей Гейзенберга. З точки зору квантово-коливної природи матерії співвідношення невизначеностей Гейзенберга набуває конкретного фізичного змісту: точне визначення координати мікрочастинки з точки зору квантової механіки неможливе тому, що воно пов'язане з динамічною (релятивістською) складовою маси частинки, яка перебуває в коливальному стані і ця маса розсосереджена в часі і просторі. Тобто, за таких умов точної координати частинки просто не може бути.

"Що таке тяжіння ?  
Ньютон про це здогадок  
не будував.  
Але ніхто ніякого механізму  
з тих часів не відкрив"

Р. Фейнман

"Що таке тяжіння ?  
Ньютон про це здогадок  
не будував.  
Але ніхто ніякого механізму  
з тих часів не відкрив"

Р. Фейнман

## 10. ОБГРУНТУВАННЯ МЕХАНІЗМУ ГРАВІТАЦІЇ

Коливальний стан матерії дає можливість пояснити й інші види взаємодії, зокрема гравітаційну взаємодію між тілами.

Між фізичними тілами існує взаємодія двох видів – притягування і відштовхування. Взаємне притягування має назву гравітації. Формально гравітація описується законом всесвітнього тяжіння Ньютона, з якого випливає поняття ваги тіла, якщо його маса мала порівняно з тілом, в полі гравітації якого воно знаходиться. Однак ми нічого не знаємо про механізм гравітаційної взаємодії тіл, хоча теоретичних спроб описати природу гравітації є багато, включаючи загальну теорію відносності. Причому ці пояснення ґрунтуються на абстрактних поняттях "викривлення простору", гравітаційного поля, гравітаційних хвиль, гравітонів тощо. При створенні загальної теорії відносності А. Ейнштейном висловлювалась ідея пульсації маси як форми існування матерії: *"матерія флукує, генеруючи гравітаційні хвилі, які поширюються зі швидкістю світла"* [23]. Є всі підстави вважати таку форму руху обґрунтованою. Однак, незважаючи на численні дорогі експерименти, виявити експериментально носіїв гравітаційної взаємодії поки що не вдалося [24]. Тому зробимо спробу визначити механізм взаємодії, який спричиняє гравітацію, виходячи із загальних фізичних понять.

Гравітація відноситься до слабкого типу взаємодії, однак її ми дуже суттєво відчуваємо. Гравітація впливає на речовину в будь-якому вигляді і проявляється там, де є маса. Навіть фотони, пролітаючи біля великих мас, підлягають впливу гравітації і викривляють траєкторію руху.

У фізиці відомо два типи взаємодії між тілами – **через середовище і внаслідок обміну тіл частинками**. Інших способів взаємодії не встановлено. Тому розглянемо детальніше механізми і результати таких взаємодій.

У фізиці відомо два типи  
взаємодії між тілами –  
**через середовище**  
**і внаслідок обміну тіл**  
**частинками**

## 10.1. Взаємодія тіл через середовище

Нехай на воді знаходяться два човни. Якщо один з них почати розхитувати, то цей рух передається через воду (середовище) до другого човна і він також буде коливатися. А як взаємодіють Земля і Сонце? Звичайно, можна допустити існування "ефіру" чи "вакууму", через який здійснюється притягування тіл в космосі. Однак ми не маємо підтвердження існування будь-якого середовища (ефіру) для пояснення гравітації, тому будувати гіпотези на припущеннях, які не мають експериментального підтвердження, і придумувати варіанти взаємодії через гіпотетичне середовище – не будемо. Тому рзглянемо детальніше інший варіант взаємодії – через обмін частинками – гравітонами.

## 10.2. Взаємодія тіл через обмін частинками

Обмін тіл звичайними частинками, що мають масу і імпульс, може призвести тільки до їх відштовхування. Наприклад, нехай на воді стоїть човен із ядром (рис.10.1).

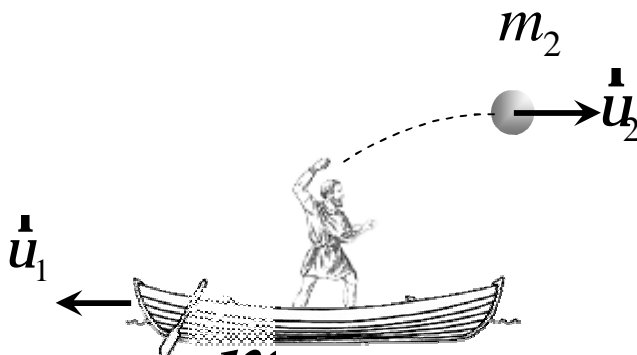


Рис. 10.1

Маса човна  $m_1$ , його швидкість  $v = 0$ , маса ядра  $m_2$ .  
 Кількість руху (імпульс) човна з ядром

$$K = (m_1 + m_2) \cdot v = (m_1 + m_2) \cdot 0 = 0.$$

Якщо викинути ядро з човна праворуч зі швидкістю  $v_2$ , то човен почне рухатись у протилежний бік, тобто ліворуч. Швидкість човна знайдемо із закону збереження кількості руху:  $m_1 v_x + m_2 v_2 = K = 0$ , звідки  $v_x = -(m_2/m_1)v_2$ . Отже, швидкість човна напрямлена протилежно до руху ядра.

Якщо одночасно викидати два ядра в протилежні сторони, човен буде стояти на місці (рис. 10.2).

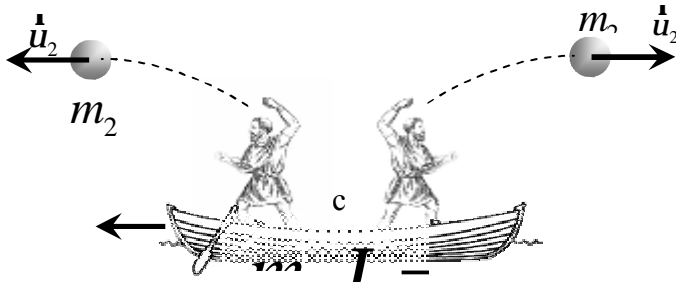


Рис. 10.2

Розглянемо випадок, коли ядро падає на човен іззовні (рис. 10.3).

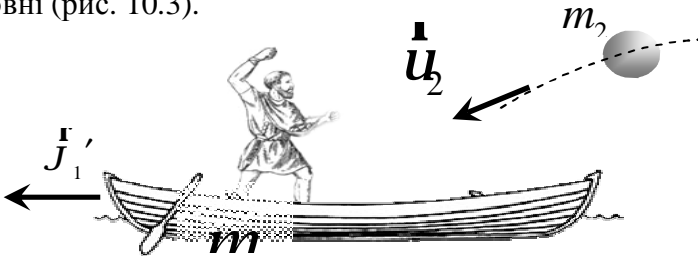


Рис. 10.3



Швидкість човна до взаємодії  $v_1 = 0$ , швидкість ядра  $v_2$ . Кількість руху до взаємодії  $K = m_1 \cdot 0 + m_2 \cdot v_2 = m_2 \cdot v_2$ , після взаємодії  $K' = (m_1 + m_2) \cdot v'_x$ . Сумарна кількість руху до і після взаємодії не змінюється:  $K = K'$ . Тому  $m_2 \cdot v_2 = (m_1 + m_2) \cdot v'_x$ , звідки швидкість човна після взаємодії

$$v'_x = \frac{m_2}{m_1 + m_2} v_2.$$

Тобто човен після взаємодії з ядром, що впало на нього, буде рухатись в напрямку руху ядра – ліворуч.

Тепер розглянемо одночасний обмін частинками між двома тілами. Наприклад, два човни обмінюються ядрами. Попадання ядра з іншого човна, як ми вже розглянули, спричинить переміщення в напрямку руху ядра, що віддаляє човни. Викидання ядра на інший човен також призводить до розходження човнів (рис.

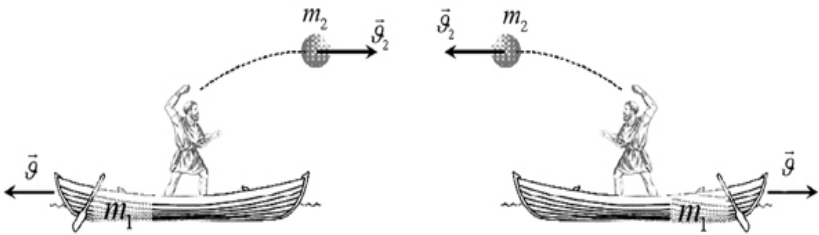


Рис. 10.4

Отже, **звичайний обмін частинками** між двома тілами призводить **тільки до відштовхування** тіл. Тому, якщо розглядати, наприклад, взаємодію двох космічних тіл  $M_1$  і  $M_2$ , які мають масу, то вони, випромінюючи і поглинаючи частинки, здавалось би, повинні відштовхуватися одне від одного (рис. 10.5). Ми ж спостерігаємо притягування.



Рис. 10.5

При розгляді механізмів взаємодії тіл ми враховували маси випромінюваних частинок, їх швидкості, імпульси, закон збереження імпульсу. Однак при цьому поза увагою залишалась одна суттєва обставина, а саме – за рахунок чого частинки, які вилучаються тілами, дістають імпульси? Випромінювання частинок (гравітонів), які спричиняють ефект притягування, логічно пов'язати із переходом одного стану матерії в інший – із стану речовини в поле і навпаки, у відповідності з відомим співвідношенням:  $\Delta W = c^2 \Delta m$ . В такому випадку ситуація кардинально змінюється. Випромінюючи гравітони, тіло втрачає частину маси, що йде на утворення гравітона і надання йому імпульсу. Однак, у просторі між тілами (рис. 10.5) відбувається не тільки випромінювання і поглинання гравітонів (що повинно б призвести до розходження тіл), але ще також відбувається відновлення маси тіла від поглинутих гравітонів ( $\Delta W = c^2 \Delta m$ ) і, внаслідок цього, виникнення імпульсу в зворотному (тобто в сторону другого тіла) напрямку. З протилежних боків взаємодіючих тіл такого відновлення не відбувається. Таким чином, ефект розходження тіл компенсується і випромінювання гравітонів у зовнішніх протилежних напрямках спричиняє зближення тіл.

### 10.3. Експериментальна перевірка існування гравітонів

Якщо гравітони взаємодіють з тілом, на яке вони потрапляють і при цьому маса тіла відновлюється у відповідності з формулою  $\Delta W = c^2 \Delta m$ , то існує можливість становити наявність гравітонів через екранування їх масою. Для цього може бути використаний дослід з визначення гравітаційної сталої з доповненням, що дає можливість виявити поглинання гравітонів масою [23]. Адже, якщо є взаємодія, то повинне бути також і поглинання частинок, які є носіями взаємодії.

В досліді Кавендіша дві кулі масами  $M_1$  і  $M_2$  притягуються між собою (рис. 10.6).

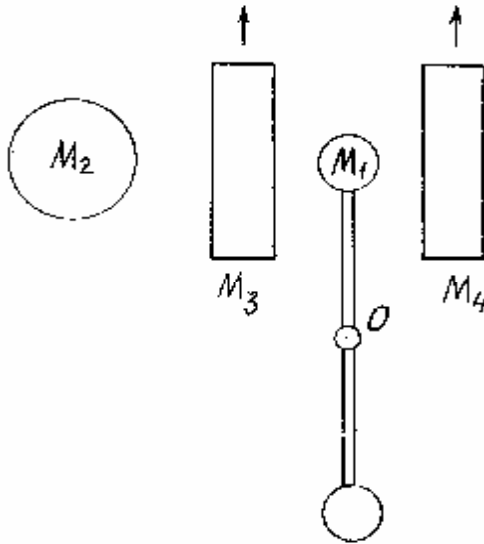


Рис. 10.6

Куля  $M_1$  закріплена на коромислі і підвішена на пружній нитці в точці  $O$ , тому силу взаємодії можна визначити по закручуванню нитки, що й було у 1798 році зроблено Кавендішем і визначено гравітаційну сталу у відповідності із законом всесвітнього тяжіння

$$F = G \frac{M_1 M_2}{r^2}.$$

У нашому випадку експеримент має ту відмінність, що маса  $M_1$  екранована від маси  $M_2$  іншою масою  $M_3$ . Для виключення додаткового притягування між масами  $M_1$  і  $M_3$  з протилежного боку від  $M_1$  встановлена маса  $M_4$ , яка за розмірами і формою є цілком такою ж, як і маса  $M_3$  (у вигляді плити). В даному випадку взаємодія між масами  $M_1$  і  $M_2$  відбуватиметься через масу  $M_3$ , яка може поглинати частину гравітонів і, таким чином, зменшувати взаємодію. Отже, якщо спочатку кулю  $M_1$  встановити посередині між плитами  $M_3$  і  $M_4$ , а потім наблизити кулю  $M_2$ , то, за наявності поглинання гравітонів, притягування між кулями  $M_1$  і  $M_2$  буде меншим, ніж у випадку, коли екранування масою  $M_3$  відсутнє.

Таким чином, поставивши експеримент на основі дослідів Кавендіша, можна отримати інформацію про механізм гравітації – притягування тіл через обмін гравітонами як носіями гравітаційної взаємодії.

Поставивши експеримент по виявленню поглинання гравітонів, можна отримати інформацію про механізм гравітації – притягування тіл через обмін гравітонами як носіями гравітаційної взаємодії.

## Література

1. Г.Я. Мякишев, А.З. Сияков. Физика. Оптика, квантовая физика. 11 класс. – М.: Дрофа. 2002. – С. 152, 222.
2. Physics second edition, expandet. Hans C. Ohanian. Rensselaer politedinic institute. W.w.Norton & company. New York. London. 1988. P. 971-972.
3. И.В. Савельев. Курс общей физики, т. 1. – М.: Наука. 1977. – 416 с.
4. Физический энциклопедический словарь. – М.: Сов. энциклопедия. 1983. – С. 507.
5. Л.И. Китайгородский. Введение в физику. – М.: Гос. издат. физ.-мат. лит. 1959. – С. 411- 412.
6. Э.В. Шпольский. Атомная физика, т. 1. – М.: Наука. 1974. – С. 35-38.
7. Л.Б. Окунь. Понятие массы // Успехи физических наук. – 1989. Том 158, вып. 3. – С. 511-530.
8. Л.Б. Окунь. Формула Эйнштейна:  $E_0 = mc^2$ . Не смеется ли Господь Бог" ? // Успехи физических наук. – 2008. Том 178, № 5. – С. 541-555.
9. Р. Спроул. Современная физика. – М. : Гос. Издат. Физ.-мат. литературы. 1981. – С. 30.
10. Савельев И.В. Курс общей физики, т. 3. – М. : Наука.1979. – 304 с.
11. Савельев И.В. Курс общей физики, т. 2. – М. : Наука.1978. – 480 с.
12. Г.С. Ландсберг. Оптика. – М.: Наука. 1976. – 926 с.
13. Д.В. Сивухин Курс общей физики. Оптика. – М.: Наука, 1985. – 751 с.
14. Калитиевский Н.И. Волновая оптика. – Москва: Высшая школа, 1978. – С. 205; 373.
15. Фейнмановские лекции по физике, т. 1. – М.: Мир. 1965. – С. 139.

16. Е.И. Бутиков Оптика. – М. : Высшая школа. 1986. – 512 с.
17. Фейнмановские лекции по физике, т. 2. – М.: Мир. 1965. – С. 34.
18. В.С. Волькенштейн. Сборник задач по общему курсу физики. – М.: Наука, 1976. – 464 с.
19. Е.В. Фирганг. Руководство к решению задач по курсу общей физики. – М.: Высшая школа, 1978. – С. 274.
20. А.Н. Волохов, А.А. Воробьев, М.Ф. Федоров, А.Г. Чертов. Задачник по физике. – М.: Высшая школа, 1968. – С. 293, 297.
21. И.Е. Иродов. Задачи по общей физике. – М.: Наука, 1979. – С. 207.
22. Хокинг Стивен. Краткая история времени. – Санкт-Петербург : Амфора, 2004. – С. 102.
23. Меллер Х. Теория относительности. – М.: Наука, 1966. – 462 с.
24. Фейнмановские лекции по физике, т. 3. – М.:Мир.1965. – С. 61 ,

## Авторські публікації

1. Коломоєць В.В., Сусь Б.А., Сусь Б.Б., Шут М.І. Масо-енергетичні коливання як вираження двоїстості природи світла / Збірн. наук. праць військов. інст. телекомунік. і інформатиз. Національн. техн. універс. “КПІ”. – К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”. 2003. – Вип.1. – С.55.
2. Сусь Б.А., Коломоєць В.В., Шут М. І., Сусь Б.Б. Збереження імпульсу фотона при масо-енергетичних перетвореннях / Збірн. наук. праць Військ. інст. телекомунік. і інформатиз. Націон. техн. універс. “КПІ”. – К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”. 2003. – Вип.3. – С.150
3. Сусь Б.А., Коломоєць В.В., Шут М. І., Сусь Б.Б. Особливості застосування методу графічного додав. амплітуд при дифракції світла / Збірн. наук. праць Військ. інст. телекомунік. і інформатиз. Національн. техн. універс. “КПІ”. – К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”. 2003. – Вип. 4. – С.118.
4. Коломоєць В.В., Сусь Б.А., Сусь Б.Б., Шут М.І. Проблемний погляд на двоїстість природи світла / Матеріали Всеукр. наук. конф. “Фундаментальна та професійна підготовка фахівців з фізики”. – Миколаїв: МДУ, 2003. – С.3.
5. Сусь Б.А., Сусь Б.Б. Хвильовий характер хвиль де Бройля / Збірник наук. праць військового інстит. телекомунік. і інформатиз. НТУУ “КПІ”. – К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”. 2003. – Вип. 5. – С.155-158
6. Сусь Б.А. Нетрадиційне представлення світлових електромагнітних хвиль як носія інформації. Радіоелектронні і комп’ютерні системи (наук.-техн. журнал). – Харків: “ХАІ”. – 2003. – № 4(4). – С.164-168.
7. Коломоєць В.В., Сусь Б.А., Сусь Б.Б., Шут М.І. Проблемний підхід при розгляді питання двоїстості природи світла / Збірник наукових праць Уманського державного пед. університету. – К.: Науковий Світ. 2003. – С. 294-300.
8. Сусь Б.А. Дослід Фізо з точки зору квантово-коливної теорії світла. Збірн. наук. праць військового інституту



телекомунікацій і інформатизації НТУУ “КПІ”. -К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”. – 2003. – Вип.6. – С.125-129.

**9.** Коломоєць В.В., Сусь Б.А., Сусь Б.Б., Шут М.І. Фотон як особлива частинка двоїстої природи. Теорія та методика навчання математики, фізики, інформатики / Збірник наукових праць. - Кривий Ріг: Видавн. відділ НМетАУ, 2004. – Вип.4, т. 2. – С.394-399.

**10.** Сусь Б.А. Ефект Доплера з точки зору квантово-коливної теорії світла / Зб. наук. праць Військового інст. телекомунікацій і інформатизації Національного технічного університету “КПІ”. – К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”. – 2004. – Вип. 4. – С.196-200.

**11.** Сусь Б.А. Сучасний погляд на проблему двоїстості природи світла / Проблеми інжен.-педагог. освіти: збірн. наук. праць Української інженерно-педагогіч. академії. - Харків: УПА, 2004, №7. – С.133-136.

**12.** Сусь Б.А. Проблемний погляд на причини і зміст двоїстої природи світла. “Фізика та астрономія в школі”. – 2004, № 4, – С. 41-43.

**13.** Сусь Б.А., Шут М.І., Мисліцька Н.А., Заболотний В.Ф. Світло як виявлення двоїстості природи матерії / Зб. наук. праць Військового інст. телекомунікацій і інформатизації НТУУ “КПІ”. – К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”. 2005. – Вип.1. – С.160-164

**14.** Сусь Б.А., Кошіль А.М. Ефект транспортування електромагнітних хвиль / Матеріали 2-ї наук.-практ. конф. “Практичні напрямки розвитку телекомунікаційних систем спеціального призначення: – К. ВІТІ НТУУ “КПІ”. 2005. – С.129.

**15.** Сусь Б.А., Шут М.І. Особливості руху матерії в інерціальних системах координат / Зб. наук. праць Військового інст. телекомунікацій і інформатизації НТУУ “КПІ”. – К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”. 2005. Вип.2. – С. 26.

**16.** Сусь Б.А., Шут М.І. До питання поглинання гравітонів масою / Збірник наукових праць Кам’янець-Подільського

держ. університету: дидактика фізики в контексті орієнтирів Болонського процесу. – Кам'янець-Подільський: КПДУ, 2005. – С. 263-264.

**17.** Сусь Б.А., Шут М.І., Січкач Т.Г. Проблеми дифракції в рамках уявлень двоїстої природи світла / Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського держ. університету: – Кам'янець-Подільський: КПДУ, 2006. – С.232-234.

**18.** Сусь Б.А., Шут М.І. До питання про різновиди руху матерії / Вісник Чернігівського держ. пед. університету. – Чернігів: ЧДПУ, 2006. Випуск 36(2). – С.126-130.

**19.** Сусь Б.А., Заболотний В.Ф., Мисліцька Н.А. Проблемний підхід при вивченні будови атома / Вісник Чернігівського державного педагогічного університету. Серія: Педагогічні науки. – Чернігів: ЧДПУ, 2007. – С.117-119.

**20.** Заболотний В.Ф., Мисліцька Н.А., Сусь Б.А., Сусь Б.Б. Хвилі де Бройля з точки зору квантово-коливної природи матерії / Зб. наук. праць Військового інст. телекомунікацій і інформатизації НТУУ “КПІ”. – К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”. 2007. – Вип.1. – С. 127-129.

**21.** Сусь Б.А., Шут М.І., Коломеев В.В., Сусь Б.Б. Непротиворечивое трактование двойственной природы света / Материалы международной научно-практической конф. «Формирование научной картины мира человека XX века». – гг. Бийск, Горно-Алтайск: ПАНИ, 2007. – С.100-105.

**22.** Сусь Б.А. Метод графічного додавання амплітуд при дифракції світла з точки зору квантово-коливної теорії світла / Збірник наукових праць за матеріалами конференції «Проблеми фізико-математичної і технічної освіти і науки в контексті євроінтеграції («Вища освіта 2006»)). – К.: НПУ ім. М.П.Драгоманова, 2007. – С. 299-304.

**23.** Заболотний В.Ф., Мисліцька Н.А., Сусь Б.А., Сусь Б.Б. Співвідношення невизначеності Гейзенберга з точки зору теорії коливного руху матерії / Зб. наук. праць Військового інст. телекомунікацій і інформатизації НТУУ “КПІ”. –К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”. 2007. – Вип. №3. – С. 136-139.

- 25.** Сусь Б.А., Шут М.І. Квантово-механічні явища з точки зору теорії коливного руху матерії. / Збірник наукових праць. – Кривий Ріг: Видавничий відділ НМетАУ, 2008. – Вип. VII. т. 2. – С. 229–233.
- 26.** Сусь Б. А., Шут М.І. Світло як специфічна форма руху матерії / Збірн. наукових праць Уманського державного пед. університету. – Умань: УДПУ, 2008. – С. 282-288.
- 27.** Заболотний В.Ф., Мисліцька Н.А., Сусь Б.А., Проблемний підхід при вивченні явища дифракції електромагнітних хвиль / Наукові записки. – Випуск 77. – Кіровоград: РВВ КДПУ ім. В. Винниченка. – 2008. – Ч.1. – С.129-132.
- 28.** Кузьминський О.В., Мисліцька Н.А., Сусь Б.А., Сусь Б.Б. Обґрунтування механізму гравітації / Вісник Чернігівського державного педагогічного університету. Серія: Педагогічні науки. – Чернігів: ЧДПУ, 2009. – С. 283-286.
- 29.** Сусь Б.А., Сусь Б.Б. Методичні проблеми трактування закону збереження імпульсу при поширенні електромагнітних хвиль / Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського держ. університету. – Кам'янець-Подільський: КПДУ, 2009. Випуск 15. – С. 51–52.
- 30.** Сусь Б. А., Шут М.І. Методичні підходи до пояснення явища дифракції / Матеріали III міжнародної науково-практичної конференції "Актуальні проблеми викладання та навчання фізики у вищих освітніх закладах: проблеми, пошуки, перспективи". – Львів, 2009. – С. 53-59.
- 31.** Сусь Б.А., Сусь Б.Б. Методичні підходи до питань релятивістського руху частинок / Збірник наукових праць. – Кривий Ріг: Видавничий відділ НМетАУ, 2010. – Вип. VIII, т. 2. – С. 337–342.

## Рецензія 1

В посібнику розглядається цілий ряд важливих питань фізики, які не мають простого пояснення, тому справді є проблемними. Зокрема це питання релятивістського руху частинок і двоїстості їх природи, квантові ефекти, питання природи електромагнітних хвиль і зокрема світла, питання дифракції, гравітації та інші. Усі ці питання розглядаються з єдиної точки зору – двоїстості природи матерії, що й дає можливість узгодити суперечливі поняття і дати їм пояснення. В роботі звертається увага на проблемність розглядуваних питань і дискусійність висновків. У класичній науковій літературі при релятивістському русі частинок вважається, що маса залежить від швидкості, в той же час відомі публікації, де така залежність заперечується. В посібнику дається обґрунтування, що насправді при розгляді руху в різних системах координат, які рухаються з різними швидкостями маса залежить від зміни швидкості.

Оригінальним, проблемним, але логічно обґрунтованим є висновок стосовно природи електромагнітних хвиль, зокрема світла – що це потік особливих частинок, які перебувають в коливному русі. Причому, пропонується досить смілива ідея стосовно природи коливань фотонів, що це коливання на основі взаємного перетворення енергії в масу і навпаки у відповідності з відомою з теорії відносності залежністю  $W = c^2 m$ . Таким же чином пояснюються хвильові властивості мікрочастинок – хвилі де Бройля. Такий підхід спонукає до дискусій, що важливо для активізації навчального процесу.

Заслугове уваги, що в посібнику на основі квантового підходу дається пояснення явища дифракції і аргументовано показується, що дифракція – це інтерференція, яка вирізняється лише способом отримання когерентних джерел, якими є різкі краї перешкоди.

Слід відзначити також підхід щодо пояснення механізму гравітації як взаємодію через обмін частинками – гравітонами, які за своєю природою також є хвилями де Бройля. Більш того – пропонується зрозумілий і доступний експеримент по виявленню гравітонів.

Звичайно, питання, які розглядаються в посібнику, мають дискусійний характер, але саме в цьому вбачається сенс посібника – спонукати читача до роздумів. В посібнику підкреслюється, що незвичне бачення – це не заперечення традиційних поглядів на проблемні питання, а лише інший підхід до описування того чи іншого фізичного явища чи ефекту.

Вважаю, що науково-методичний посібник "Незвичне бачення традиційних проблемних питань фізики" буде цінним для студентів, викладачів, науковців, тому він заслуговує на опублікування.

Доктор педагогічних наук, професор  
кафедри загальної і прикладної  
фізики Національного педагогічного  
університету ім. Михайла Драгоманова  
В.П. Сергієнко

## Рецензія 2

В посібнику викладена власна авторська точка зору щодо питань фізики, пов'язаних з проявом двоїстої природи світла у різних фізичних експериментах як фотонів чи електромагнітних хвиль та процесів дифракції світла на перешкодах. Однак у посібнику відсутній строгий квантово-механічний аналіз відповідних процесів, особливо пов'язаних з їх принципово новим, незвичним для усталених поглядів баченням процесу самовільного перетворення маси елементарної частинки в енергію, яке в посібнику трактується як особливий вид коливної форми існування матерії. При цьому треба зауважити, що така точка зору протирічить викладеній у фізичній енциклопедії ("Физический энциклопедический словарь", – М.: Советская энциклопедия, 1962. – С. 558), де стверджується, що *"Следует считать неверным проникшее в литературу представление о возможности превращения массы в энергию и наоборот. Согласно формуле  $W = mc^2$  всякое уменьшение массы влечет за собой уменьшение энергии и наоборот. Возможно только частичное превращение в ходе реакции массы покоя в кинетическую массу и энергии покоя в кинетическую энергию или наоборот"*.

Стосовно висунутої авторами посібника коливної моделі перетворення маси в енергію і навпаки треба також відзначити, що як ще наголошувалось у підручнику В.В. Мултановського (Курс теоретической физики. – М.: Просвещение, 1968), необхідно розрізняти передачу взаємодії в макросвіті і мікросвіті. В макросвіті використовується польова або квазірелятивістська модель матерії і взаємодії: в систему входять тіла і неперервне поле, що передає взаємодію між тілами. В мікросвіті використовується квантово-релятивістська модель: в систему входять мікро-частинки, в тому числі кванти поля, і поле як спосіб існування матерії, з яким ці кванти взаємодіють. Причому,

в квазірелятивістському наближенні число матеріальних точок в системі та їх маса зберігаються, тоді як в квантово-релятивістському – число частинок і їх маса можуть змінюватись внаслідок взаємодії.

Тим не менше, думка авторів має право на життя. Її лише треба піддати більш строгому квантово-механічному аналізу із застосуванням сучасних досягнень теорії і експерименту з фізики елементарних часток. Шкода, що автори заздалегідь, до написання посібника, не вступили в наукову полеміку через періодичну фізичну літературу з іншими вченими щодо поглядів на суть дифракції електромагнітних хвиль на перешкодах. Доцільно б суттєво доповнити перелік використаної в посібнику літератури.

Все ж таки запропоновані підходи спонукають до дискусій, що є корисним з точки зору методики навчання і важливим з точки зору активізації навчального процесу. Ще раз наголошую, що питання, які розглядаються в посібнику, мають дискусійний характер, але саме в цьому вбачається сенс посібника – спонукати читача до роздумів. Більш того, в посібнику підкреслюється, що незвичне бачення – це не заперечення традиційних поглядів на проблемні питання, а лише інший підхід до описування того чи іншого фізичного явища чи ефекту. Можливо свого часу так сприймали погляди стосовно теорії відносності та фотонної моделі світла у фотоелектрі чи хвильової моделі прояву властивостей електрона.

Вважаю, що посібник "Незвичне бачення традиційних проблемних питань фізики", попри його незвичність, може бути корисним для молодих педагогів і науковців, тому може бути опублікований.

Доктор фізико-математичних наук,  
професор кафедри експериментальної  
фізики Національного університету  
"Львівська політехніка" А.В. Франів

Науково-методичне видання

**НЕЗВИЧНЕ БАЧЕННЯ  
ТРАДИЦІЙНИХ  
ПРОБЛЕМНИХ  
ПИТАНЬ ФІЗИКИ**

Б.А. Сусь, Б.Б. Сусь

Відповідальний редактор Б.А. Сусь

Технічна редакція Михайла Сопівника

Видавничий центр "Просвіта",  
03150, Київ -150, вул. Анрі Барбюса, 51/2  
тел. 529-25-41

Свідоцтво № 1800, серія ДК  
від 24.05.2004 р.

---

Підписано до друку 24.03.10  
Формат 60 × 84/16  
Умовн. друк. арк. 16,0  
Наклад 300 примірників

Зауваження і побажання просимо надсилати  
за адресою: [\*\*bogdansus@gmail.com\*\*](mailto:bogdansus@gmail.com)



Світло – це коливання  
електричного і магнітного  
полів, що змінюються  
в одій фазі

У що перетворюється  
енергія фотона  
в процесі його  
коливання ?

Швидкість світла – це  
фазова швидкість ?  
Чи швидкість переміщення  
маси ?

Зміна енергії  
в електромагнітній  
хвилі супроводжується  
зміню маси фотона:  
 $\Delta W = c^2 \cdot \Delta m$

Світло являє собою  
потік частинок – фотонів,  
у яких відбуваються  
коливання типу  
 $\Delta W \rightarrow \Delta m \rightarrow \Delta W \rightarrow \Delta m \rightarrow \dots$