

## ГІПОТЕЗИ. ПОЛЕМІКА

УДК 535.1

### ПРО КОГЕРЕНТНІСТЬ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ, ЗОКРЕМА, СВІТЛОВИХ Частина перша

*Дем'яненко П.О., Зіньковський Ю.Ф.*

#### Переднє слово

Поняття “когерентність” (з латини *cohaerens* – такий, що перебуває у зв’язку) було введено в фізику хвиль для пояснення явища інтерференції світла. Нагадаємо, що під інтерференцією розуміють накладання хвиль, результатом якого є утворення *стійкого* просторового *перерозподілу енергії* цих хвиль – збільшення її в одних областях і зменшення в сусідніх. Для того, щоб утворений перерозподіл енергії зберігався *незмінним* впродовж тривалого часу, очевидно, що незмінними впродовж цього часу мають бути і параметри хвиль, які накладаються і інтерферують. В першу чергу ця вимога стосується незмінності фаз хвиль, або іншими словами: різниця фаз хвиль впродовж часу їх інтерференції має залишатися *незмінною*. Суть останньої фрази часто використовують як дефініцію поняття “когерентність”. Когерентними вважають також і хвилі, різниця фаз яких може змінюватися в часі, але передбачуваним чином, наприклад, за певним законом.

Означені щойно дефініції когерентності є вельми жорсткими, бо виконати на практиці задекларовані в них вимоги щодо безумовного дотримання заданої різниці фаз хвиль, які при цьому можуть випромінюватися різними джерелами, буває вельми непросто, а часто й взагалі неможливо. Жорсткість цих вимог пом’якшують іноді тим, що допускають певну зміну різниці фаз хвиль впродовж часу спостереження за їх інтерференцією; зазвичай приймається, що ця зміна не повинна перевищувати  $\pi$  (в радіанному, звісно ж, вимірі).

Як приклад впливу на результат інтерференції змін параметрів хвиль, що накладаються, можна навести періодичні “завмирання” чи “сплески” гучності прийому радіостанцій в середньо- або короткохвильових діапазонах. Ці явища обумовлюються змінами умов інтерференції при накладанні “прямих” (що розповсюджуються вздовж поверхні Землі) та “відбитих” (наприклад, від іоносфери) радіохвиль.

Зауважимо, що визначаючи когерентність лише як вимогу до хвиль зберігати постійною в часі різницю фаз своїх коливань, ми тим самим мимоволі підштовхуємо студентів до їх певного самообмеження в розумінні принципів реалізації інтерференції хвиль. Адже незмінна впродовж тривалого часу різниця фаз реально може бути лише у випадку накладання *монокроматичних* хвиль. Цей, найпростіший приклад інтерференції, є вельми

наочним і до нього часто і звертаються, створюючи йому тим самим імідж найвичерпнішої ілюстрації інтерференції, як фізичного явища.

Повторимо, одначе, свої застереження, аби щойно розглянутий найпростіший випадок інтерференції монохроматичних хвиль не став тим *одним*, який закрий собою всі інші варіанти реалізації явища інтерференції. Нагадаємо, що інтерференцію світлових хвиль вперше (1801 р.) спостерігав Т.Юнг в сонячному світлі, яке не те що не є монохроматичним (одночастотним), а навпаки, є *складним, поліхроматичним* світлом, з притаманним йому широким *суцільним* спектром. При цьому зауважимо, що спостерігаючи картину інтерференції сонячних променів, яка переливається всіма кольорами райдуги, навряд чи взагалі це може прийти в голову, бо навряд чи буде воно тут коректним – ставити вимогу незмінності різниці фаз між світловими хвилями, що інтерферують. В принципі, це робити можна, але тільки після багатьох додаткових уточнень і конкретизацій умов висування *однієї з таких вимог* серед незліченої кількості можливих інших аналогічних вимог.

Отже, як витікає із щойно сказаного, поняття “когерентність” слід розуміти в його найширшому, найзагальнішому сенсі – як “здатність до інтерференції”. Таким чином, когерентними є такі хвилі, які при накладанні здатні інтерферувати. І лише в найпростішому випадку накладання монохроматичних хвиль наочною і вичерпною характеристикою їх когерентності може слугувати незмінність різниці фаз їх коливань впродовж їх інтерференції.

Глумачення когерентності, як здатності до інтерференції, є вельми прогресивним, бо дозволяє застосовувати це поняття і до світлових потоків. Логічним буде і зворотне твердження: потоки, що здатні інтерферувати є когерентними. Поняття “когерентність” застосовують також і до окремих хвиль (генерованих, наприклад, одним точковим джерелом), розуміючи при цьому їх “самокогерентність” як узгодженість в часі коливального стану різних областей середовища, в якому розповсюджуються ці хвилі.

Наголосимо, що накладання хвиль називається *інтерференцією* лише тоді, коли результат цього накладання – просторовий перерозподіл енергії хвиль – є *стійким*, тобто *незмінним*, впродовж часу, достатнього для його впевненої фіксації (спостереження, реєстрації). Ця вимога, очевидно, обумовлена тим, що реальні реєстратори інтерференції мають певну *інерційність*. Наприклад, інерційність людського ока складає  $\sim 0,1$  с. Це означає, що спостерігаючи за джерелом, яке випромінює послідовні в часі імпульси світла, ми будемо сприймати їх, як окремі, допоки частота надходження їх до ока не буде перевищувати 10 Гц. Якщо ж ця частота стане більшою, то наші очі уже не в змозі будуть ідентифікувати світлові імпульси як окремі і “почнуть бачити”, що джерело світла “перестало пульсувати” і “світиться рівномірно” (а реально наші очі є ще інерційніші – в аматорському фотоплівковому кіно мінімальна частота зміни кадрів складала всього 8 Гц). З одного боку, таку низьку швидкодію людського зору можна розглядати як

недолік. Але саме завдяки такій нашій зоровій ваді, ми можемо дивитися кіно і телевизор, сприймати динамічну інформацію з екранів моніторів, дисплеїв, тощо.

Інерційність технічних (зазвичай, електронних) засобів реєстрації світлових сигналів є суттєво меншою і в результаті їх вдосконалення дедалі зменшувалася. Саме з появою досконалих реєстраторів оптичних сигналів було скасовано таку собі “історичну казуїстику” в оптиці, як паралельне існування явищ *фосфоресценції* і *флуоресценції* – двох дуже близьких за своїми проявами оптичних ефектів “післясвітіння” і “самосвітіння” речовини під час та після припинення її опромінювання. Як з’ясувалося, різниця між цими явищами не була “якісною”, а була чисто “кількісною” – полягала лише у кількісній відмінності швидкостей спаду інтенсивностей післясвітіння, що вдалося надійно оцінити лише з появою відповідних малоінерційних, або швидкодіючих, реєстраторів. Це дало змогу об’єднати обидва ці явища в одному, спростивши тим самим загальну класифікацію оптичних явищ.

Швидкодія сучасних електронних реєстраторів сягає  $\sim 10^{-13}$  с. Однак ця цифра ще суттєво перевищує період світлових коливань. Реально це означає, що жоден із існуючих фотоприймачів не в змозі відслідковувати миттєві часові зміни інтенсивності світлових хвиль. Саме інерційністю реєстраторів інтерференції і пояснюється вимога до когерентності хвиль, що інтерферують. Завдяки саме когерентності хвиль перерозподіл їх енергії утримується незмінним впродовж часу, необхідного для надійної реєстрації цього перерозподілу приладами, що мають скінчену швидкодію.

Зауважимо, що на відміну від оптики, в радіотехніці ніколи не виникало потреби в понятті «когерентність», хоча, здавалося б, і там, і там мають справу з електромагнітними (ЕМ) хвилями. А причина в тому, що генератори радіохвиль будують, зазвичай, на основі автономних резонансних коливальних систем (наприклад, *LC*-контурів). Електричні коливання в таких системах відбуваються на частотах їх власних коливань, які дією активних елементів генераторів підтримуються *незатухаючими* і тим самим визначають (“задають”) і частоти коливань самих генераторів, і частоти випромінюваних ними радіохвиль. Очевидно, ЕМ поле, яке виникає в просторі при розповсюдженні таких хвиль, *a priori* є когерентним – різниця фаз коливань, визначена для будь-яких фіксованих інтервалів часу в будь-яких фіксованих точках ізотропного середовища, де є поле, завжди буде постійною.

Допоки такий принцип побудови генераторів вдається реалізувати, проблем з когерентністю генерованих ними ЕМ хвиль не виникає. Однак, при просуванні в область все вищих частот, геометричні параметри елементів, що задають частоту генерації, самі вже починають визначатися довжиною хвилі генерованого ними випромінювання. Це приводить до того, що генерація когерентних ЕМ хвиль субміліметрового і ще більш високочастотних

(«короткохвильових») діапазонів (з частотами  $\sim 10^{10}$  Гц і вище) «класичним» способом стає утрудненою. З одного боку, такі частоти є вже «замежними» з точки зору швидкодії існуючих активних елементів (транзисторів), а з другого – неможливість утримування великих густин енергії в об'ємах мініатюрних резонансних коливальних систем не дозволяє отримувати великих вихідних потужностей таких генераторів. З цих причин для генерації короткохвильового ЕМ випромінювання використовуються пристрої, що реалізують інші фізичні принципи. Генерація ЕМ випромінювання в них є, як правило, результатом стохастичних енергетичних переходів множин не пов'язаних між собою електронів. Прикладами таких генераторів можуть слугувати лавинно-пролітні діоди, діоди Гана, джерела оптичного, рентгєнівського випромінювань і т.п. Оскільки механізми генерації випромінювання в щойно перерахованих типах генераторів не передбачають використання автоколивальних частотозадавальних елементів, то і генероване ними випромінювання є *a priori* некогерентним. Певним винятком з цього ряду є лазери, які здатні генерувати частково когерентне випромінювання завдяки реалізації в них механізму індукованої генерації випромінювання та використанню високодобротних ( $Q \sim 10^9$ ) оптичних резонаторів.

Природа когерентності світлових хвиль актуальна і досі [1]. Вона, вочевидь, пов'язана з природою самого світла. Проглянемо коротко еволюцію поглядів на природу світла.

#### Перші гіпотези про природу світла

Перші наукові гіпотези про природу світла були сформульовані в XVII ст. Ньютон, як автор *корпускулярної* гіпотези, вважав, що світло є потоком певних *світлових частинок* (*корпускул*). Його сучасник Гюйгенс, автор *хвильової* гіпотези, вважав, що світло розповсюджується у вигляді певних *світлових хвиль*. При цьому обидва вони спиралися на переконливі докази:

– прямолінійність розповсюдження світлових променів та можливість поширення їх у порожнечі (вакуумі) – так поводити себе можуть *тільки світлові корпускули*;

– дифракція світла, інтерференція світлових променів – так поводити себе можуть *тільки світлові хвилі*.

Очевидний антагонізм цих гіпотез обумовлювався неоднозначністю розуміння природи світла їх авторами. Зрозуміло, що світло, як багатогранний природний феномен, є цілісним явищем, і кожна з цих гіпотез є до певної міри «однобокою» – здатною пояснити лише, «свою», сукупність граней і безсилою пояснити решту, «протилежних» їй, граней. Тривалий час ці гіпотези не вдавалося об'єднати рамками єдиної теорії і їх розвиток впродовж цього часу відбувався відірвано одна від одної. Внаслідок цього, в оптиці сформувалася своєрідна ситуація, що наявна і досі: розгляд явищ дифракції чи інтерференції світла проводять виключно на основі хвильових уявлень про світло, а при розгляді явищ фотоефекту, фотохімічної дії

світла, чи при розробці схем оптичних приладів, користуються уявленнями про світло, як про потік його корпускул (квантів світла, фотонів). При цьому і відповідні математичні моделі також є самодостатніми, тобто такими, що не виказують потреби у взаємозв'язку.

Принагідно зауважимо, що створювані дослідниками моделі реальних фізичних явищ та відповідні математичні забезпечення цих моделей, завжди є більшою, чи меншою мірою *ідеалізованими* (тобто, *спрощеними*) порівняно з самими цими явищами. І це зрозуміло: із всієї сукупності властивостей, притаманних досліджуваному і, як правило, багатогранному явищу, такі моделі висвітлюють лише окремі з цих граней, які з точки зору авторів моделей є найсуттєвішими для даного етапу і напрямку їх досліджень. Загалом такий підхід є вірним, бо інакше моделі були б такими громіздкими і незручними, що ними було б складно користуватися. Разом з тим, зручні в користуванні прості моделі, вочевидь, мусять мати обмеження, щодо їх можливих застосувань в реальних умовах. З огляду на це, необхідно зробити серйозні застереження можливим користувачам таких моделей: слід вельми обережно поводитися з математичними моделями фізичних явищ, особливо в граничних для цих моделей умовах. Інакше беззастережна довіра до математики без належного розуміння фізичної сутності досліджуваного об'єкта може замість бажаного прояснювання фізичної картини привести до ще більшого її затьмарювання.

Спочатку авторитетом Ньютона підтримувалася корпускулярна гіпотеза світла. Однак, вже в XIX ст. ґрунтовні праці Юнга, Френеля, Фраунгофера, присвячені дослідженню проявів хвильових властивостей світла та геніальна здогадка Максвелла про те, що *світло є ЕМ хвилею*, звели в ранг панівної істини хвильову теорію світла. Очевидно, ця теорія, чудово пояснювала явища дифракції та інтерференції світла. Прояви ж його корпускулярних властивостей пояснювались хвильовою теорією вже не так блискуче. Слабким місцем хвильової теорії світла була також і необхідність введення такого специфічного для фізики хвиль поняття як “когерентність”, природі якого необхідно було надати прозорого фізичного тлумачення.

Зауважимо, що всі відомі способи отримання когерентних світлових потоків ґрунтуються на просторовому розділенні тим чи іншим чином первинного світлового потоку на кілька (зазвичай, два) вторинних (Юнг – за допомогою близько розташованих малих отворів; Френель – бідзеркал, чи біпризм; Майкельсон – напівпрозорих дзеркал). Когерентність отриманих таким чином вторинних потоків хвильова оптика пояснювала тим, що під час поділу первинного світлового променя відбувався поділ навпіл і кожного із *цугів світлових хвиль*, які склали первинний світловий промінь. Це означає, що при наступному накладанні вторинних променів (за умови рівності їх оптичних шляхів) знову зустрічаються разом “свої половинки” від розділених раніше цугів. Ці “половинки”, вочевидь, є взаємокогерентними,

а отже і отримані таким чином вторинні світлові потоки також є когерентними, тобто, здатними інтерферувати. Питання, яким саме чином відбувався поділ кожного із цугів хвиль, не дискутувалось. Одначе, і досі пояснювати природу когерентності світла шляхом приписування актові випромінювання окремим атомом “цугу” світлових хвиль завдовжки в кілька метрів є, щонайменше, непереконливим сьогодні, коли з’явилися технічні можливості отримувати “фемтосекундні” світлові імпульси ( $1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$ ).

### Кванти електромагнітної енергії. Фотони

Уявлення про природу ЕМ випромінювання і, зокрема, світла, радикально змінилися після робіт М.Планка по вивченню закономірностей випромінювання енергії нагрітими тілами. При виведенні (1900 р.) формули для опису спектрального розподілу енергії теплового випромінювання абсолютно чорного тіла (АЧТ), він змушений був припустити, що випромінювання ЕМ хвиль нагрітими тілами здійснюється насправді *не безперервно*, як того вимагали класичні уявлення, а окремими *порціями*, “квантами”, ЕМ енергії. При цьому енергія ЕМ квантів є прямо пропорційною (з коефіцієнтом  $h$ , названим невдовзі “сталюю Планка”) частоті утворюваних цими квантами ЕМ хвиль.

Розвиваючи ідею ЕМ квантів, А.Ейнштейн ввів (1905 р.) гіпотезу світлових квантів, згідно з якою світлове випромінювання не тільки генерується у вигляді квантів світла, але в подальшому і саме існує як потік цих квантів, і з речовиною взаємодіє також як потік *окремих* квантів. Виходячи з таких уявлень йому вдалося пояснити закономірності фотоефекту, люмінесценції, фотохімічних реакцій, тощо. Побудова ж Ейнштейном спеціальної теорії відносності (СТО) створила передумови для того, щоб вважати ЕМ поле вже не просто *специфічним станом*, а *однією з форм* матерії, а ЕМ кванти, які утворюють це поле – реальними елементарними частинками. Термін “фотон” (від грецького *φωτοζ* – світло) був введений трохи пізніше (1926 р.), для виокремлення з усього безмежного діапазону величин енергій квантів ЕМ випромінювання саме *світлових* квантів. Вже сам цей термін підкреслює корпускулярність світла. Сьогодні терміном “фотон” позначають загалом всі ЕМ кванти з яскраво вираженими корпускулярними властивостями, наприклад, рентгенівські кванти.

Виходячи зі скінченої величини швидкості розповсюдження ЕМ хвиль, можна стверджувати, що кванти ЕМ енергії є *просторово обмеженими* (локалізованими в просторі) утвореннями. Саме наявність просторової локалізації квантів і дає змогу *наділяти* їх властивостями частинок (вважати їх частинками). І, як з’ясувалося, це не є простим формалізмом. Пряме експериментальне підтвердження *корпускулярних* властивостей квантів було отримане при вивченні розсіювання рентгенівських променів (квантів рентгенівського випромінювання) на вільних електронах (ефект Комптона, 1922 р.). Було встановлено, що поведінка квантів описується тими ж кіне-

матичними законами, що і поведінка "звичайних" частинок речовини (таких, що мають масу спокою, тих же, наприклад, електронів). Зокрема, було з'ясовано, що квантові ЕМ випромінювання, як і звичайній рухомій матеріальній частинці, притаманний імпульс.

Подальшого розвитку уявлення про природу світла набули в працях Е.Резерфорда, Н.Бора та їх послідовників при дослідженні будови атома. Було з'ясовано, що кванти ЕМ енергії можуть генеруватися безпосередньо в атомах при переходах попередньо збуджених електронів з енергетично вищих "дозволених" рівнів на нижчі. Покинувши верхній енергетичний рівень (просторово віддаленіший від ядра, яке є силовим центром атома), електрон рухається прискорено в напрямку ядра, набуваючи кінетичної енергії в його потенціальному полі. Гальмуючись, при «зависанні» на нижчому (ближчому до ядра) "дозволеному" рівні, електрон «скидає» в навколишній простір набрану ним під час розгону енергію у вигляді кванта ЕМ енергії. Очевидно, величина енергії цього кванта визначається різницею енергій рівнів, між якими відбувся перехід електрона. Цією енергією визначається частота осциляцій ЕМ поля кванта, а отже і довжина світлової хвилі, сформованої цими квантами і, врешті, така візуальна характеристика світла, як його колір. (Чи не дивно перекликання з поглядами на природу світла Р.Декарта, який ще на початку XVII ст. писав: "світло – то є деяке стиснення, що розповсюджується в ідеально пружному середовищі (ефірі), який заповнює собою весь простір, а різні кольори світла пояснюються обертальним рухом кулеподібних вихорів, утворених частинками цього середовища, з різними швидкостями" читай, частотами?)

Додамо, що «робочі тіла» різних джерел світла (ДС) можуть мати свою специфіку розташування "дозволених" енергетичних рівнів, якою і будуть визначатися частотні (спектральні) характеристики світла, випромінюваного такими джерелами. (Наприкінці цього абзацу автори зауважують, що вони свідомі того, що вільне використання уявлень і термінів класичної механіки для опису поведінки електронів всередині атомів є не зовсім коректним і просять читачів сприймати цей абзац виключно в сенсі ілюстрації).

Таким чином, поступальний розвиток поглядів на природу світла знову наводить нас до корпускулярної гіпотези: світло є потоком фотонів – осцилюючих квантів ЕМ енергії. Як ми вже щойно говорили, скінченність величини швидкості руху світла означає, що фотони є просторово і в часі обмеженими ("локалізованими") утвореннями. Визнання факту просторово-часової дискретності квантів ЕМ поля дає нам принципову можливість *наділяти* такі утворення властивостями частинок (*приписувати* їм властивості частинок), тобто, вважати фотони частинками. Спробуємо скласти уявлення про просторові розміри фотонів, як частинок.

### ***Оцінка розмірів фотонів***

Уявлення про розміри просторової області, яку займає окремий фотон, складемо, спираючись на відомі експериментальні факти. Так, тривалість найкоротших, отриманих експериментально, світлових імпульсів складає всього кілька фемтосекунд і отримати їх ще коротшими вже неможливо. За 1 фс світло долає шлях (в порожнечі)  $\sim 300$  нм. Отже, просторова протяжність таких імпульсів в напрямку їх розповсюдження є співвимірною з довжинами їх же світлових хвиль. Приймаючи до уваги просторову і часову циклічність хвильових процесів (які характеризуються, відповідно, довжиною хвилі  $\lambda$  і періодом коливань  $T$ ), можна вважати, що «структурно» ці імпульси в напрямку їх розповсюдження є *однофотонними*. З цього витікає, що «розмір фотона», вимірний в напрямку його розповсюдження, є співвимірним з довжиною хвилі світла, яке і є потоком таких фотонів.

Уявлення про “поперечні” розміри фотона можна отримати, аналізуючи результати дифракції світла на вузькій щілині (так звана “дифракція Фраунгофера”). Як витікає з виразу, що описує розподіл інтенсивності світлового потоку за щілиною, кутовий розмір центрального дифракційного максимуму, в якому сконцентрована практично вся енергія світла, при зменшенні ширини щілини  $b$  збільшується і при  $b = \lambda$  він розкидається на весь півпростір за щілиною. При подальшому зменшенні  $b$  інтенсивність світла за щілиною різко зменшується. Виходячи з цього, можна припустити, що і в напрямку, поперечному напрямкові руху фотона, його розмір, знову ж таки, є співвимірним з довжиною хвилі світла, яке є потоком цих же фотонів.

Підсумуємо сказане. Фотон є рухомим, осцилюючим ЕМ збуренням. Факт просторової локалізації цього збурення дає підстави *наділяти його* корпускулярними властивостями, тобто, *вважати його “частинкою”, приписувати йому* властивості частинок. Хоча, зрозуміло, що в звичайному розумінні цього слова, частинкою він не є. Слід ясно розуміти, що у фотона, як у осцилюючого енергетичного утворення, *немає* чітко визначених просторових розмірів, як ми до цього звикли, маючи справу зі звичайними макрочастинками, що оточують нас у мікросвіті. Такі частинки обмежуються замкнутими *поверхнями-границями*, всередині яких речовина, що утворює ці частинки, *є*, а зовні – цієї речовини *немає*. За браком аналогій у звичному для нас макросвіті, неможливо навести скільки-небудь чіткого наочного прикладу відповідного об’єкта-явища. У випадку фотона коректно можна говорити лише про розміри просторової області, в якій локалізується *переважна* доля його енергії (наприклад, 90 чи 99%, але ніколи не всі 100%, бо тоді розміри цієї області будуть безмежно великими).

Корпускулярні властивості світлових потоків добре виявляють себе, наприклад, в фотохімічних, фотографічних процесах та явищах фотоефекту; ними користуються при розробках оптичних схем та конструюванні оптичних приладів – в усіх цих випадках добре працює уявлення, що *світло є потоком фотонів*. Разом з тим, світлові потоки здатні так само чітко



виявляти і свої *хвильові* властивості: світло *дифрагує* на перешкодах, співвимірних з довжиною світлової хвилі; когерентні світлові потоки здатні *інтерферувати*. Це переконливо свідчить, що *світло є, водночас, і хвильовим потоком*. Тривалий час видавалося неможливим поєднати в одній сутності властивості, що заперечують одна одну: *корпускулярність* – є ознакою фізичного *об'єкту*, тоді як *хвиля* є ознакою *процесу*. Разом з тим було зрозуміло, що світло, як природний феномен, є *цілісним явищем*, в якому органічно поєднуються і хвильові, і корпускулярні властивості. А конкретні прояви тих чи інших властивостей світлового потоку визначаються виключно *умовами проведення експерименту*. Нероздільна єдність в одній природній сутності антагоністичних корпускулярних і хвильових властивостей притаманна, як з'ясувалося, взагалі *всім мікрочастинкам матерії* (гіпотеза Луї де Бройля, 1924 р.), отримала в фізиці назву “*корпускулярно-хвильового дуалізму*”.

### Фотони

Таким чином, фотон, як квант ЕМ енергії, формально можна розглядати як елементарну частинку матерії в одній шерензі з іншими. Логічним буде припустити, що і для нього поняття довжини хвилі має такий же сенс, як де-Бройлівська довжина хвилі для інших мікрочастинок матерії. Скористаємося в нашому розгляді рівнянням Шрьодінгера, яке для вільної частинки має вигляд [2]:

$$i\hbar \frac{d\Psi}{dt} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta\Psi \quad ; \quad (1)$$

тут  $i$  – уявна одиниця;  $\Delta$  – диференціальний оператор Лапласа (для одновимірного руху частинки, наприклад, вздовж осі  $x$ :  $\Delta = d^2/dx^2$ ); решта позначень загальноприйняті.

Хоча б елементарною підстановкою і з урахуванням того, що для вільної частинки енергія  $E$  є енергією її руху ( $E=p^2/2m$ ), можна переконатися, що розв'язком (1) є  $\Psi$ -функція:

$$\Psi(x,t) = A \cdot \exp\left[-\frac{i}{\hbar}(Et - px)\right]. \quad (2)$$

Якщо використати відомі з квантової фізики співвідношення між параметрами частинки і хвилі ( $E = \hbar\omega$  – формула Планка та  $p = \hbar k$  – співвідношення де-Бройля), то із (2) отримаємо:

$$\Psi(x,t) = A \cdot \exp[-i(\omega t - kx)] = A \cdot \exp\left[-2\pi i\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right] \quad (3)$$

Цей результат є вельми значимим, адже вираз (3) для  $\Psi(x,t)$  є розв'язком рівнянь Максвела для електричної та магнітної складових напруженостей полів в плоскій біжучій ЕМ хвилі, що поширюється вздовж осі  $x$  (тут  $A$  – амплітудне значення цих напруженостей). В цій відповідності вбачається і глибокий фізичний сенс: рівняння (1), початково записане для

фотона, як для частинки матерії, виявилось вірним і для його іпостасі як ЕМ (світлової) хвилі.

Відразу ж зауважимо і на очевидну невідповідність фізичних сенсів, закладених в останні два рівняння. Якщо в (2) енергія фотона визначається його частотою ( $E = \hbar\omega$ ) і входить до складу аргументу експоненти, то в (3) – енергія хвилі визначається квадратом її амплітуди, тобто множителем  $A$ , що стоїть перед експонентою. Частотою ж в (3) визначається лише період часових осциляцій хвилі ( $T=2\pi/\omega$ ), який в класичному тлумаченні (3) жодним чином не пов'язується з її енергією. Схожим чином можна прокоментувати і ситуацію з другим доданком в аргументах експонент: якщо в (2) – довжина хвилі фотона визначає його імпульс ( $p=\hbar/\lambda$ ), то в (3) –  $\lambda$  визначає лише період просторових осциляцій ЕМ хвилі ( $k = 2\pi/\lambda$ ) і не є кількісною мірою руху матерії.

Відомо, що сама  $\Psi$ -функція фізичного сенсу не має – його набуває квадрат її модуля. Саме ним визначається густина ймовірності виявити (“віднайти”) частинку в даній точці простору в даний момент часу або, іншими словами – густина ймовірності існування частинки в даній точці простору в даний момент часу.

Відразу зауважимо, що коли мовиться про “точку простору”, то під цим слід розуміти не “математичну точку”, яка за визначенням не має просторових розмірів, а “фізичну точку”, яка має певний об'єм. В цьому об'ємі може розміщуватись, наприклад, молекула бромистого срібла ( $AgBr$ ), яка здатна, поглинувши енергію фотона, виділити атом срібла і “зарєєструвати” таким чином факт поглинання нею фотона, або “слід” фотона. Подібним же чином слід розуміти і термін “момент часу” – це не є позбавлена часової протяжності мить, а є інтервал часу, достатній для здійснення енергетичної взаємодії фотона з атомом (молекулою) речовини.

З точки зору класичної фізики, з її чіткими уявленнями про детермінізм в явищах природи, фізичний сенс  $\Psi$ -функції може видатися дещо примарним – адже вона не в змозі дати конкретної відповіді про координати частинки в даний момент часу. Однак, не варто вважати, що квантова механіка, порівняно з класичною, дає “менш точний” опис руху частинки. Квантова механіка не визначає лише того, чого в мікросвіті справді немає, наприклад, тих же точних координат частинки. Це означає, що автоматично втрачається сенс говорити і про радіус-вектор переміщення мікрочастинки, і про траєкторію її руху, і про всі величини, що визначаються, як похідні часових змін її координат (швидкість, прискорення, сили взаємодії, тощо). Але саме завдяки ймовірнісному сенсу  $\Psi$ -функції, вдається уникнути фундаментального протиріччя між квантово-дискретними принципами будови і поведінки мікрочастинок матерії і способом опису цих принципів за допомогою диференціальних рівнянь, взятих із арсеналу засобів опису макрооб'єктів, будова і поведінка яких *a priori* вважалися континуальними в просторі і в часі.

Таким чином, експериментальний факт реєстрації фотона (за посередництвом, наприклад, тієї ж молекули *AgBr*) реально означає одну із можливих практичних реалізацій ймовірності його перебування в даній точці простору в даний момент часу. В результаті такої “реалізації” фотон, як такий, припиняє своє існування. Ситуація, отже, є такою: допоки ми фотона не виявили, то він *десь є* – існує в просторі і в часі, переносить енергію. Втім, про те *де і як* він *є* говорити можна лише у *ймовірнісному сенсі*. Лише виявивши фотона можна отримати конкретну інформацію про нього, але синонімом до слова “виявити” тут завжди буде слово “знищити” (що, до речі, є логічним результатом спроби “зупинити хвилю”, котра, як процес, немислима без руху). Отримати ж конкретні дані про фотона якимось іншим чином (так, щоб не зашкодити його існуванню) є неможливим *принципово*. Адже отримання *інформаційного сигналу* від об’єкту дослідження завжди означає тільки одне: тим, чи іншим чином відібрати від нього *енергію*. У випадку з макрооб’єктом це легко зробити, щонайменше, двома шляхами: або відібрати від нього певну долю його *власної* енергії, або ж примусити його до *енергетичної взаємодії* з якимось енергетично ємним сенсором-досліджувачем. Очевидно, що в обох випадках ця доля енергії запевне має бути достатньо великою для того, щоб мати змогу отримати однозначну інформацію про характеристики об’єкта, що цікавлять нас, наприклад, про параметри його руху. Водночас, ця ж доля енергії має бути запевне достатньо малою, щоб не припуститися суттєвих спотворень параметрів існування досліджуваного об’єкта (наприклад, тих же параметрів його руху). В макросвіті ми без жодних проблем для себе і для досліджуваного об’єкту можемо визначати параметри його існування, наприклад, спостерігаючи очима або реєструючи відеокамерою політ освітленого сонцем літака. Щоб зробити це ж вночі, ми змушені будемо якимось чином “візуалізувати” його, наприклад, освітити його прожектором, або визначити параметри його руху за допомогою радіолокатора. Очевидно, що в обох випадках відібрана від літака енергія для реєстрації параметрів його руху не спричинить відчутних спотворень самих цих параметрів.

Однаке, жоден з цих способів отримання інформації не може бути застосованим до фотона. Енергія фотона є настільки малою, що навіть коли її відібрати всю і відразу (знищивши таким чином фотона), то і тоді її вистачить, хіба що, на ініціювання фотохімічної реакції в одній-єдиній молекулі, або ж на “вибивання” одного-єдиного фотоелектрона. Зрозуміло, що така “реєстрація” моменту взаємодії фотона з молекулою дозволить лише наближено визначити його часові і просторові координати. Інформація ж про хвильові параметри фотона при такому детектуванні не виявляється. Водночас, світловий потік, чітко виявляє хвильові властивості, які, вочевидь, притаманні і кожному окремому фотону з цього потоку. Яким саме чином окремий фотон, як світлова корпускула, реалізує притаманні йому

хвильові властивості, розглянемо на відомому прикладі проходження світла через дифракційну ґратку (ДГ).

#### Література

1. Мандель, Леонард. Оптическая когерентность и квантовая оптика /Леонард Мандель и Эмиль Вольф; Пер. с англ. С.Н.Андрианов и др.; Ред. В.В.Самарцев – М.; Физматлит, 2000. – 895 с.

М.Франсон, С.Сланский. Когерентность в оптике // Пер. с франц. - Изд. "Наука", Главн. ред. физ.-мат. лит. М., 1967, 80с.

2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Уч. пособие для вузов. Т.III. Квантовая механика (нерелятивистская теория). – М.: Наука. 1989. – С.72.

*Дем'яненко П.О., Зінковський Ю.Ф. Про когерентність електромагнітних хвиль, зокрема, світлових (частина I). Запропонована квантово-пакетна модель будови світлового потоку органічним чином узгоджує його хвильові та корпускулярні властивості, а також пояснює природу його когерентності та фізичний зміст параметрів, що її характеризують.*

**Ключові слова:** квантові пакети, когерентність, параметри когерентності.

*Демьяненко П.А., Зинковский Ю.Ф. О когерентности электромагнитных волн, в частности, световых (часть I). Предложенная квантово-пакетная модель строения светового потока органичным образом согласовывает проявления его волновых и корпускулярных свойств, а также объясняет природу его когерентности и физический смысл характеризующих ее параметров.*

**Ключевые слова:** квантовые пакеты, когерентность, параметры когерентности.

*Demianenko P., Zinkowskij Y. Concerning to coherency of electromagnetic waves, light in particular (part I). Quantum-packet model of light beam was proposed. This model organically reconciles wave-corpuscule properties of light beam and explains nature of it coherency and physics sense of it parameters.*

**Key words:** quantum packets, coherency, coherency parameters.

Далі буде

УДК 621.396

## РАДИОКОНТАКТ С ВНЕЗЕМНЫМИ ЦИВИЛИЗАЦИЯМИ<sup>1</sup>

Мазор Ю.Л.

### 3.8.3.4. Возобновляемые источники энергии (продолжение)

#### Энергия биомассы

Использование биомассы для производства органического топлива может стать одним из существенных компонентов будущей энергетической системы. Этот самый древний способ производства энергии человек использует многие сотни тысяч лет, сжигая дрова на костре, а затем в печи. Прогресс в этом направлении ожидается от биоинженерии, которая должна вывести высокопродуктивные зеленые растения и разработать эффективные способы их переработки в топливо. Получение энергии из биомассы не нарушает углеродного баланса: при росте зеленое растение потребляет углекислый газ из атмосферы, а при сжигании он возвращается обратно в том же количестве [1]. Учитывая, что все наземные растения связывают

<sup>1</sup> Продолжение. Начало см. "Вісник НТУУ "КПІ". Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування". №№ 35 - 39