

## КОГЕРЕНТНІСТЬ СВІТЛОВИХ ХВИЛЬ І ФОТОНИ

У роботі, виходячи з уявлень про квантові пакети, розглянуто коло проявів хвильових властивостей світла, які пов'язуються з інтерференцією світла, зокрема з тим її різновидом, коли інтерферують зведені разом вторинні промені, попередньо утворені з одного первинного променя. Не менш важливим з точки зору узгодження таких пояснень з уявленнями статті про будову світлового потоку є аналіз ще й таких проявів хвильових властивостей світла, як, наприклад, його інтерференція на тонких плівках, "кільця Ньютона" тощо. Для пояснення цього різновиду інтерференції не виникає потреби у понятті когерентність – інтерференція спостерігається завжди і для світла від будь-яких джерел.

The article deals with the sphere of manifestations of light-waves' properties, connected with the light interference, especially with that variety of it, at which the jointly superimposed secondary beams, initially formed from one primary beam, interfere. The problem is considered taking into account the idea of quantum packs. The analysis of such manifestations of wave properties of light as, e.g., its interference on thin films, "Newton rings", etc. is extremely important as well as the concordance between the above mentioned explanations and the idea of the structure of light beam, expressed in this article. To explain this variety of interference, the concept of "coherence" is not necessary, as the interference is always observed for the light from any source.

### Переднє слово

Історично в оптиці склалася своєрідна ситуація, яка збереглася й до сьогодні: при розгляді явищ дифракції й інтерференції світла прийнято застосовувати виключно уявлення про світло як про хвилю, зовсім випускаючи при цьому з поля зору його корпускулярні властивості. І навпаки, при розгляді явищ фотоелектричного ефекту, фотохімічної дії світла, використовують лише корпускулярні уявлення про світло. Застосовувані в обох підходах фізичні (і відповідні їм математичні) моделі цілком самодостатні і не виказують жодних потреб у взаємозв'язку. При всьому цьому, однак, всім зрозуміло, що світло, як природне явище, є цілісним явищем, в якому органічно і нерозривно поєднуються і хвильові, і корпускулярні його властивості, а можливі прояви їх визначаються тільки умовами експерименту.

Для пояснення такого оптичного явища, як інтерференція у фізику хвиль було введено поняття "когерентність" (з латини *cohaerens* – такий, що перебуває у зв'язку). Інтерференція є чисто хвильовим явищем і виявляє себе у створенні стійкого просторового перерозподілу енергії хвиль (періодичного збільшення її в одних областях і зменшення у сусідніх) при накладанні двох або більше монохроматичних хвиль, тобто

хвиль з однаковими частотами (або хвиль з однаковими довжинами). Є різні визначення когерентності хвиль, кожне з яких підкреслює ту чи іншу грань цього поняття. Так, згідно з одним із них, когерентними вважаються хвилі, різниця фаз яких в часі і в просторі зберігається постійною. Така дефініція когерентності здається нам занадто жорсткою, бо виконати цю умову на практиці майже завжди неможливо. Більш прийнятне є таке розуміння когерентності: хвилі вважаються когерентними, якщо за час експериментального спостереження за результатом інтерференції різниця фаз хвиль, що інтерферують, змінюється не більше ніж на  $\pi$  (зустрічаються визначення, в яких цю величину різниці фаз беруть такою, що дорівнює  $2\pi$ ). У найбільш же загальному сенсі під когерентністю хвиль, власне, й розуміють їх здатність до інтерференції. Логічне й зворотне твердження: хвилі, здатні інтерферувати, є когерентними. Таке тлумачення когерентності дозволяє застосовувати це поняття і до світлових потоків – потоки вважаються когерентними, якщо при їх накладанні утворюється стійкий просторовий перерозподіл інтенсивності світла. При цьому, підкреслимо, безумовно розуміють, що час існування стійкого просторового перерозподілу інтенсивності світла має бути достатнім для

того, щоб його можна було впевнено спостерегти (зафіксувати, виміряти), тобто явище накладання хвиль називають інтерференцією тільки тоді, коли результат такого накладання може бути дійсно зареєстрованим. Реальні прилади, що можуть бути використаними для реєстрації інтерференції світлових хвиль, мають певну інерційність і, наприклад, для ока людини ця величина складає  $\sim 0,1$  с. Це означає, що ми не в змозі розрізнити у часі окремі світлові імпульси (не кажучи вже про можливість відслідковування особливостей миттєвих змін їх інтенсивності у межах часової протяжності окремих імпульсів), якщо частота надходження їх до ока буде більшою ніж 10 Гц (реально ця частота може бути ще меншою – в аматорському кіно найменша частота зміни кадрів складає всього 8 Гц). Інерційність сучасних фотоелектронних реєстраторів на багато порядків меншою і на сьогодні її величина може сягати до  $10^{-12}$  с. Однак і такі величини інерційності є ще занадто великими порівняно з тривалістю періоду світлових коливань ( $\sim 10^{-15}$  с). Отже, жоден сучасний фотоприймач не в змозі безпосередньо відслідковувати миттєві часові зміни інтенсивності світла окремих світлових хвиль, а отже, й результату їх просторового накладання. Із викладеного випливає, що час існування стійкого просторового перерозподілу інтенсивності світла, як результату накладання світлових хвиль, має бути значно більшим за їх період. Підкреслимо, що проблема когерентності притаманна саме онтичним явищам: у радіотехніці, наприклад, її просто не існує, хоча в обох випадках мова йде про електромагнітні хвилі. Очевидно, для розуміння суті цієї проблеми, необхідно мати чіткі уявлення, про природу світла, тобто ясно розуміти, що таке світло, де і як воно генерується і як розповсюджується.

Проблема когерентності й сьогодні цікавить дослідників [1]. Принагідно зауважимо, що створені ними моделі природних явищ завжди більшою чи меншою мірою спрощені та ідеалізовані у тому сенсі, зі всієї сукупності властивостей, притаманних досліджуваному, як правило, багатогранному явищу, такі моделі висвітлюють лише окремі з них – найсуттєвіші з погляду їх авторів для даного етапу і напрямку досліджень. І тут необхідно зробити серйозну пересторогу можливим користувачам таких моделей: слід вельми обережно поводитися з відповідними математичними моделями досліджуваних явищ, особливо у граничних для цих моделей умовах! Бо інакше беззастережна довіра до математичних моделей

явищ без належного ясного розуміння їх фізичної сутності замість бажаного прояснювання фізичної картини може привести лише до її затьмарювання.

Поява даної роботи зумовлена ще й тим, що вміщені у навчальних посібниках пояснення явищ інтерференції і дифракції світлових хвиль не відповідають сучасним уявленням про природу світла. Ця робота є спробою узгодити сучасні погляди на природу світла з напрацьованими матеріалами по опису експериментальних результатів інтерференції і дифракції світлових хвиль. Допоки автори не проводили жодних експериментів, бо всі експерименти, необхідні для розуміння викладу цієї роботи, на сьогодні вже поставлені. Мета даної роботи лише дати їм належне узгоджене тлумачення з єдиних позицій, спираючись на сучасні уявлення про природу електромагнітного випромінювання і, зокрема, світла.

### Короткий огляд розвитку поглядів на природу світла

Тісне співіснування і взаємна боротьба двох діаметрально протилежних поглядів на природу світла тягнеться ще з XVII-го сторіччя. Нероздільна експериментальна єдність взаємопротилежних, таких, що заперечують одна одну, корпускулярної (І. Ньютон) і хвильової (Г.Х. Гюйгенс) гіпотез про природу світла, тривалий час не вкладалися у рамки єдиної теорії (зауважимо, що жоден із цих великих вчених ніколи не ставив під сумнів свої переконання щодо поглядів на природу світла).

Грунтовні праці О.Ж. Френеля і Н. Фраунгофера, присвячені явищам дифракції світлових хвиль, і геніальна здогадка Дж.К. Максвелла про те, що світло є електромагнітною хвилею, звели у XIX ст. хвильову гіпотезу у ранг панівної істини, відтиснувши на тривалий час корпускулярну гіпотезу. Блискуче пояснення хвильовою теорією таких проявів хвильових явищ світла як дифракція й інтерференція, стало водночас і її тріумфом, і її експериментальним підґрунтям. Прояви ж суто корпускулярних властивостей світла, таких як прямолінійне розповсюдження світлових променів у порожнечі, локальна дія світла при фотоефекті і фотохімічних реакціях тощо, пояснювались хвильовою теорією вже не так блискуче і, вочевидь, "натужно". Слабким місцем хвильової теорії була також і необхідність введення в обіг такого специфічного для хвильових явищ поняття, як когерентність – природі якого конче необхідно було надати ясного фізичного тлумачення і відсутність якого вже була серйозною пересторогою. Адже

покладені в основу пояснення природи когерентності світла уявлення про "цуги" електромагнітних хвиль завдовжки у кілька метрів, приписувані актам випромінювання окремими атомами, є, щонайменше, нелінійними сьогодні, коли з'явилися технічні можливості отримувати світлові імпульси тривалістю  $\sim 10^{-15}$  с. Звернемо увагу також і на те, що всі способи отримання когерентних світлових потоків ґрунтуються на просторовому розділенні в той чи інший спосіб (наприклад, бізеркалом чи біпризмою Френеля, напівпрозорими дзеркалами в інтерферометрах і т.п.) первинного світлового потоку на два вторинних. Взаємна когерентність вторинних потоків пояснювалася при цьому тим, що при розділенні первинного променя відбувається поперечний поділ навпіл кожного з цугів світлових хвиль, що склали первинний світловий промінь. При подальшому об'єднанні вторинних світлових потоків в один, в ньому (за умови рівності їх оптичних шляхів) знову зустрічаються "свої половинки" від раніше розділених цугів, які, очевидно, є взаємокогерентними, а тому й отримані таким чином вторинні світлові потоки також когерентні. Питання, яким же саме чином відбувається поділ хвильових цугів навпіл, не дискутувалося.

Наступний крок до глибшого розуміння природи світла зроблений М. Планком у 1900 році: при виведенні формули, що описує спектральний розподіл рушини енергії теплового випромінювання абсолютно чорного тіла (АЧТ) М. Планк змушений був припустити, що випромінювання нагрітими тілами електромагнітних хвиль здійснюється не безперервно, а окремими порціями або, за Планком, "квантами" енергії. Величини енергій цих квантів прямо пропорційні (з коефіцієнтом  $h$ , названим невдовзі "сталою Планка") частоті електромагнітних хвиль, що утворюються цими квантами. Розвиваючи ідею квантів, А. Ейнштейн в 1905 р. висловив гіпотезу світлових квантів, згідно з якою світлове електромагнітне випромінювання не тільки генерується у вигляді квантів, але й з речовиною взаємодіє також як потік окремих квантів. Дослідами Комптона (1922 р.) і В. Боте (1924 р.) переконливо доведено, що й при своєму розповсюдженні електромагнітне випромінювання також існує у вигляді потоку тих самих квантів. Це означає, що і світлова хвиля, і світлове електромагнітне поле не є якимось необмеженим у часі і в просторі континуумом, а є набраними із скінченного числа окремих світлових квантів. Виходячи з таких уявлень, Ейнштейну

вдалося пояснити закономірності процесів фото-ефекту, люмінесценції, фотохімічних реакцій тощо. А побудова ним спеціальної теорії відносності створила передумови для того, щоб вважати електромагнітне поле вже не просто *специфічним станом*, а однією з *форм матерії*, а кванти, що складають електромагнітне поле – реальними елементарними частинками.

Подальшого розвитку уявлення про природу світла набули у працях Е. Резерфорда і Н. Бора і їх послідовників. При дослідженні будови атома було встановлено, що кванти електромагнітної енергії генеруються безпосередньо в атомах при переходах попередньо збуджених електронів з енергетично вищих рівнів (просторово більш віддалених від ядра, яке є силовим центром атома) на нижчі (ближчі до ядра). При таких переходах, електрони, полишивши верхній дозволений енергетичний рівень, рухаються в напрямку ядра спочатку прискорено, збільшуючи при цьому свою кінетичну енергію у потенціальному полі ядра, а потім, гальмуючись, при "зависанні" на нижчому дозволеному рівні, вони "скидають" з себе набрану під час розгону енергію у навколишній простір у вигляді квантів електромагнітної енергії. Очевидно, величини енергій таких квантів якраз і визначається енергетичною різницею дозволених рівнів, між якими відбуваються переходи електронів. Цією ж енергією визначаються й відповідні частоти квантів або довжини їх хвиль. Додамо лише, що "робоче тіло" у джерелах світла різної природи може мати свою "специфіку" розташування дозволених енергетичних рівнів, якою й будуть визначатися спектральні характеристики світла, випромінюваного цими джерелами.

Таким, загалом, бачиться на сьогодні механізм генерації квантів електромагнітної енергії. Певне, автори свідомі того, що вільне використання термінів класичної механіки для опису руху електронів всередині атома не зовсім коректним, і попередній абзац слід сприймати лише в сенсі ілюстрації.

Оскільки квант електромагнітної енергії є складовою частинкою електромагнітної хвилі, то він, як і будь-яка хвиля, може існувати тільки у русі. Зауважимо, що швидкість розповсюдження квантів електромагнітної енергії у вакуумі (яку часто називають просто швидкістю світла у вакуумі) є особливою величиною у фізиці, пов'язаною з глибинними властивостями будови матерії:

- у порожнечі (у вакуумі) електромагнітні хвилі, в тому числі й світлові, розповсюджуються зі сталою швидкістю  $c \cong 2,998 \cdot 10^8$  м/с;

- ця швидкість є найбільшою, яка тільки може існувати у природі; з даною швидкістю можуть розповсюджуватися тільки електромагнітні кванти, тобто безматеріальні (з нульовою масою спокою) утворення – жодну матеріальну частинку не можна розігнати до такої швидкості;
- вимірювана величина цієї швидкості не залежить від взаємного руху джерела електромагнітних хвиль і їх приймача;
- величина цієї швидкості є фундаментальною світовою константою і у фізиці вона отримала назву "електродинамічна стала".

Внаслідок скінченної величини швидкості розповсюдження електромагнітних хвиль, кванти електромагнітної енергії є просторово обмеженими утвореннями. Саме наявність цієї ознаки у квантів – просторової локалізації – і дає змогу наділяти їх властивостями частинок (вважати їх частинками). І це не простий формалізм. Пряме експериментальне підтвердження корпускулярних властивостей квантів було отримане при вивченні розсіювання рентгенівських променів на вільних електронах (ефект Комптона, 1922 р.). Було встановлено, що поведінка квантів електромагнітного випромінювання описується тими самими кінематичними законами, що й поведінка частинок речовини. Зокрема, з'ясували, що квантові випромінювання, як і звичайній рухомій матеріальній частинці, притаманний імпульс.

Отже, поступальний розвиток поглядів на природу світла знову повертає нас до корпускулярної гіпотези про природу світла. Стало зрозумілим, що світло дійсно органічно поєднує в собі як властивості хвиль, так і властивості частинок. І тільки залежно від умов експерименту превалюють прояви тих або інших властивостей. Нероздільна єдність протилежностей – корпускулярних і хвильових властивостей (притаманна, як з'ясувалося невдовзі, взагалі всім мікрочастинкам – гіпотеза Луї де Бройля, 1924 р.) – отримала у фізиці назву "корпускулярно-хвильового дуалізму".

### Фотони

Отже, у будь-яких джерелах світла (штучних чи природних) світлові кванти генеруються електрично зарядженими частинками при стрибкоподібних зменшеннях їх енергії або ж просто під час прискорених рухів цих частинок (як, наприклад, у ефекті Вавілова-Черенкова). Енергія від таких частинок переходить у навколишній простір, де збурюється електромагнітне рухоме осцилююче (хвильове) утворення – квант електромагнітної енергії.

Для виокремлення світлових квантів з усього безмежного діапазону величин квантів електромагнітного випромінювання, американський фізик-хімік Г.Н. Льюїс ввів у 1929 р. термін "фотон" (від грецького  $\phi\omega\tau\omicron\varsigma$  – світло); вже самим цим терміном підкреслюється корпускулярність світлового випромінювання. Отже, фотонами ми називаємо кванти електромагнітної енергії, якщо частота їх осциляцій лежить у межах  $(3,7 \dots 7,6) \times 10^{14}$  Гц і які, потрапляючи до наших очей, викликають у нас зорові відчуття.

Отже, фотон є просторово локалізованим хвильовим утворенням і йому дійсно притаманні як властивості частинки, так і властивості хвилі. За браком аналогій у звичному нам макросвіті, неможливо навести скільки-небудь близького наочного прикладу відповідного об'єкта-явища. Повторимо, що фотон, як і будь-яке хвильове утворення, може існувати тільки у русі. При поширенні у просторі цього утворення в його межах відбуваються певні осциляції пружного стану середовища з частотою, що визначається як частка від ділення швидкості світла на довжину електромагнітної хвилі, пов'язану з лінійними розмірами області збурення. Саме цією частотою й визначається така візуальна характеристика світла, як колір (чи не дивно перекликання з поглядами на природу світла Р. Декарта, який ще на початку XVII ст. вважав, що "світло – то є деяке стиснення, яке розповсюджується в ідеально пружному середовищі (ефірі), що заповнює весь простір, а різні кольори світла пояснюються обертальним рухом кулеподібних вихорів, утворених частинками цього середовища, з різними швидкостями", читай, частотами?).

Спробуємо дати оцінку просторових розмірів фотона. Як згадувалося вище, світловий імпульс у часі може мати тривалість  $\tau$  всього кілька фемтосекунд. Тоді просторова протяжність імпульсу світла в напрямку його руху визначиться як  $l_{\phi} = c \cdot \tau$ , звідки отримуємо величину  $l_{\phi} \sim 1$  мкм. Виходячи з цього, можна сказати, що розмір фотона вздовж напрямку його розповсюдження не може бути більшим за цю величину, а отже, є співмірний з його довжиною хвилі. Уявлення про "поперечні" розміри фотона (в напрямку, перпендикулярному до напрямку його розповсюдження) можна отримати, аналізуючи результати дифракції паралельних променів світла на вузькій щілині (так звана "дифракція Фраунгофера"). Як випливає з виразу, що описує результат інтерференції продифрагованого в таких умовах світлового потоку, кутовий

розмір  $\theta_0$  центрального максимуму збільшується при зменшенні ширини щілини  $b$  і при  $b=\lambda$  сягає  $\pi$ , тобто світловий потік за цієї умови розкидається за щілиною на весь півпростір. При подальшому зменшенні  $b$  інтенсивність світла за щілиною швидко зменшується. Виходячи з того, що фотони є електромагнітними збуреннями, а атоми, у свою чергу, складаються з електрично заряджених частинок, витлумачити таку поведінку фотонів можна як наслідок їх безпосередньої взаємодії з атомами речовини на краях щілини, у результаті чого фотони і відхиляються від свого початкового напрямку руху у бік геометричної тіні. З цього можна зробити висновок, що й поперечні розміри фотона є, знову ж таки, співмірними з довжиною його хвилі. При цьому необхідно ясно розуміти, що у фотона, як у хвильового утворення, не існує чіткого обмеження просторових розмірів (як ми до цього звикли щодо макрочастинок). Говорити можна лише про розміри просторової області, де локалізується переважна частина всієї енергії фотона, наприклад 90 чи 99 % її (але ніколи не всі 100%, бо тоді ця область буде необмежено великою).

#### Фотони і світлова хвиля

Розглядаючи квант електромагнітної енергії (фотон) як елементарну частинку в одній шерензі з іншими, можна припустити, що довжина хвилі фотона має такий же самий фізичний сенс, як, наприклад, і де-Бройлівська довжина хвилі електрона (та інших тардіонів). Розглянемо цю відповідність детальніше, використовуючи постульоване ще у 1926 р. Е.Шредінгером для тардіонів знамените "рівняння Шредінгера", визнане основним рівнянням квантової фізики. Для вільної частинки це рівняння має вигляд:

$$i\hbar \frac{d\Psi}{dt} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta\Psi,$$

де  $i$  – уявна одиниця;  $\Delta$  – диференціальний оператор Лапласа; для одновимірного руху частинки (наприклад, вздовж осі  $Ox$ ):  $\Delta = d^2/dx^2$ ; решта позначень – загальноприйняті. Навіть елементарною підстановкою і з урахуванням рівності енергії вільної частинки  $E=p^2/2m$ , можна перекопатися у тому, що розв'язком рівняння Шредінгера є  $\Psi$ -функція:

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

Якщо використати вже згадані співвідношення між параметрами частинки і хвилі,  $E=\hbar\omega$ ,  $p=\hbar k$ , то для  $\Psi(x,t)$  отримаємо:

$$\Psi(x,t) = A \cdot \exp[-i(\omega t - kx)].$$

Це є дуже значний результат, адже останній вираз для  $\Psi(x,t)$  є розв'язком відомих рівнянь Максвелла (1865 р.) для електричної і магнітної складових напруженостей полів у плоскій, біжучій електромагнітній хвилі, що розповсюджується вздовж осі  $x$ , ( $A$  – амплітудне значення напруженостей). У цій відповідності ми вбачаємо глибокий фізичний сенс: ми писали рівняння для тардіонів, а воно виявилось правильним і для люксонів – ось вона, єдність законів природи! Відразу ж підкреслимо очевидну невідповідність фізичного сенсу, закладеного у ці рівняння: якщо у рівнянні Шредінгера енергія частинки (хвилі) пов'язується з аргументом експоненти, то у рівнянні Максвелла – вона пов'язується з амплітудою хвилі (множником  $A$ ), в той час як аргумент експоненти визначає лише частоту (часовий і просторовий періоди) осциляцій хвилі.

Отриманий таким чином неординарний результат дозволяє нам по новому підійти до розгляду такого феномену, як електромагнітна хвиля, оскільки тепер поняття хвилі стосовно фотона як кванта електромагнітної енергії, що є складовою частиною електромагнітної хвилі, ми можемо тлумачити так само, як і для будь-якої іншої елементарної частинки, тобто як  $\Psi$ -функцію. Сама по собі  $\Psi$ -функція реального фізичного сенсу не має, але водночас, згідно з геніальною здогадкою М. Борна, квадрат модуля її величини визначає густину ймовірності виявити (віднайти) частинку (в нашому випадку, фотона) в даній точці простору в даний момент часу. Відразу ж зауважимо, що коли мова йде про "точку простору", то при цьому слід розуміти не математичну точку, яка за визначенням позбавлена просторових розмірів, а "фізичну" точку. Такій "точці" притаманний певний просторовий об'єм, в якому може розміститись, наприклад, та ж молекула галюїдного срібла, здатна поглинути енергію фотона і перейти при цьому у якісно інший стан, а вже факт цього переходу ми можемо реально зафіксувати (принцип фотографії). Подібно до цього слід розуміти також і словосполучення "момент часу" – це не позбавлена часової протяжності мить, а інтервал часу певної тривалості, достатній для здійснення енергетичної взаємодії фотона з атомом (молекулою) речовини.

Отже, "виявити" фотон означає реалізувати цю ймовірність, а це, у свою чергу, означає, що після такого виявлення фотон припиняє своє існування, тобто ситуація виглядає так: доки ми фотона не виявили, то він є (існує – рухається, пере-

носить енергію). Хоча про те, як саме він "є" (в чому, власне, полягає процес "буття" фотона) – ми мало що можемо сказати напевно, бо існує тільки один єдиний спосіб дізнатися щось конкретне про нього – це "виявити" його, тобто знищити (що, до речі, є логічним результатом спроби "зупинити хвилю"). "Зняти" з фотона інформацію в інший спосіб (так, щоб не зашкодити його існуванню) неможливо, тому що "зняти інформацію" з об'єкта дослідження завжди означає тільки одне: отримати від нього енергію. Це можна зробити, як мінімум, двома шляхами: або відібрати від нього якусь частину його власної енергії, або змусити його до енергетичної взаємодії з сенсором-досліджувачем. Ні перше, ні друге у випадку з фотоном є неможливим. Оскільки у енергетичному сенсі фотон, як квант електромагнітної енергії, неподільний, то енергію від нього можна відібрати або тільки всю і відразу (після чого фотон як такий припиняє своє існування, бо він, власне, і був тією енергією), або ж зовсім нічого не відбирати (в такому разі фотон продовжить своє існування, але ж і ми не отримаємо від нього жодної інформації). Отже, виявивши фотон (наприклад, шляхом трансформації його у фотоприймачі на електрон, або фотографічно зареєструвавши його), ми фіксуємо вже тільки результат його "загибелі", тобто наслідок поглинання атомом (молекулою) приймача-реєстратора енергії, яку ніс фотон (або чим він, власне, і був). І хоча поки ми фотона не виявили, він сам про себе ніяких ознак нам не подавав, вже одне те, що ми його все ж можемо "виявити" і "виявляємо", означає, що він, існує, а отже, його можна вважати об'єктивною реальністю.

У результаті реєстрації одного окремого фотона ми можемо отримати інформацію лише про його просторові координати на момент виявлення і про його енергію (частоту), не отримуючи при цьому жодної інформації про хвильові параметри світлового потоку, до складу якого він належав, такі як фаза, орієнтація площини поляризації, напрямку руху. Виникає запитання, яким же чином формуються ці перераховані хвильові параметри у світловому потоці, який є ансамблем із величезної кількості окремих фотонів? Отже, висловимо наші міркування з цього приводу. Саме завдяки величезній кількості фотонів ми можемо впевнено вимірювати хвильові параметри світлового потоку. Дійсно, кожний окремий фотон у даній точці простору і в даний момент часу ми можемо виявити лише з певною ймовірністю. Подібно до того, як при просуванні від висот масштабів макросвіту до глибин мікросвіту, ми

змушені були перейти від звичного нам континуального сприйняття будови матерії до усвідомлення факту дискретності її будови, так і у випадку електромагнітної хвилі стає зрозумілим, що хвиля видається нам певним континуумом тільки при її макроенергетичному сприйнятті. Коли ж ми спускаємося по шкалі енергій вниз, до рівня мікроенергетичного сприйняття хвилі, то і вона також виявляє дискретність своєї будови – електромагнітна хвиля є такою, що складається з окремих порцій електромагнітної енергії, тобто дискретною (або квантованою) енергетично, просторово і у часі. Суттєвою відмінністю у квантуванні матерії і енергії електромагнітної хвилі є те, що не існує жодних природних обмежень на величину енергії електромагнітного кванта – величина цієї енергії може бути якою завгодно.

Отже, світлові потоки, з якими ми, як правило, маємо справу в наших експериментах такі, що складаються з величезної кількості окремих фотонів, кожен з яких є осцилюючим згустком електромагнітної енергії. Ймовірність виявлення кожного окремого фотона в даній точці простору і в даний момент часу визначається квадратом модуля його  $\Psi$ -функції як хвильової функції матерії. Довжина хвилі фотона, яка визначається  $\Psi$ -функцією, зумовлює розміри просторової області локалізації електромагнітного збурення (області, де, власне, й існує реальна величина ймовірності виявлення фотона). Очевидно, розміри цієї області на кілька порядків більші від розмірів, наприклад, тієї ж молекули галоїдного срібла, здатної поглинути енергію фотона і тим самим виявити його. Отже, такі звичні нам (при макроенергетичному сприйнятті хвилі) поняття, як "довжина хвилі", "фаза хвилі", забезпечуються, як мозаїчне панно, узгодженою колективною дією ансамблю, що складається з величезної кількості окремих частинок-квантів. Для ілюстрації мовленого проведемо паралелі з відомим експериментом по реєстрації картини інтерференції продифрагованого на металевій фользі електронного потоку, ослабленого по інтенсивності настільки, що електрони в область інтерференції надходили поодиноці. Тобто якби ми ослабили світловий потік, інтерферуючий після його дифракції, наприклад, на двох малих отворах (дослід Юнга) настільки, що в область інтерференції фотони також надходили б поодиноці, то реєструючи їх, наприклад, фотографічно, ми спочатку не побачили б у послідовно створюваній такими фотонами фотографічній картині жодної закономірності. Лише після тривалої експозиції на фотопері почала б вимальовуватися очікувана звична нам інтер-

ференційна картина, що є реєстрацією просторового перерозподілу інтенсивності світлових потоків від двох накладних отворів. Отриману так картину розподілу густини інтенсивності світла (набір інтерференційних смуг) ми можемо строго описати, використовуючи при цьому для інтерферуючих світлових потоків поняття фаз і довжин їх світлових хвиль. З цього прикладу ясно видно, що така фізична реальність, яка виявляє себе (і тлумачиться нами) як "довжина світлової хвилі", реально формується як результат узгодженої дії величезної кількості окремих фотонів, що всі у сукупності утворюють світловий потік, і втрачає свій сенс при переході до розгляду окремих квантів з цього ж світлового потоку. Підкреслимо, що саме енергетична мізерність величин окремих квантів радіохвилі і водночас величезна їх кількість разом і створюють у нас ілюзію про радіохвилю як про континуум при її макроенергетичному сприйнятті.

Розмірковуючи над сукупністю властивостей квантів і намагаючись зв'язати їх воедино, змушені визнати, що нам бракує знань про середовище, в якому ці кванти породжуються і існують. На наше глибоке переконання, існування хвильового руху без існування середовища, у якому цей рух розповсюджується, позбавлене фізичного сенсу (спробуйте уявити собі хвилі на поверхні води ... без води). Отже, ми змушені повернутися до поняття "вакууму", розуміючи під цим поняттям не ідеалізоване абсолютне НІЩО, а, слідом за П.А.М.Діраком, певний "конденсований" стан матерії, який, власне, і є тим середовищем, у якому формуються і розповсюджуються кванти електромагнітної енергії, і яке зумовлює всі притаманні квантам властивості. Це середовище присутнє скрізь: і всередині атомів, і у Космосі. Воно пов'язує воедино весь наш реальний світ з його матерією-речовиною і всіма подіями-процесами в ньому.

Очевидно, що як об'єкт дослідження вакуум є незвичайним середовищем. Головна для нас особливість вакууму як середовища те, що це середовище ніяк не виявляє себе по відношенню до людини, тобто ніяк не сприймається ні звичайними органами відчуття людини (даними їй від природи), ні будь-якими, створеними людиною, матеріальними або енергетичними сенсорами. Логічно, що за таких умов сприйняття поняття вакууму асоціюється у людини просто з порожнечою. Людина може сприймати лише звичайні тіла (матеріальні, такі що є "речовиною") за умови енергетичної дії збоку цих тіл на органи чуття

людини. Слова "звичайні тіла" вжиті тут нами саме у сенсі природності їх сприйняття людиною. Зауважимо, що з усіх органів чуття найбільш "інформаційно смним каналом" є зоровий, який "реалізується" за посередництвом очей людини, здатних сприймати енергетично електромагнітні коливання як світло, у вельми вузькому діапазоні енергій електромагнітних квантів.

Якщо виходити з припущення, що, крім "нашого світу" (світу реальних речей і подій, які природно сприймаються органами чуття людини), існує ще паралельний "світ вакууму" (такий що не сприймається органами чуття людини), то можна було б ввести в обіг деяку "енергетичну", а радше, лише пов'язану якимось певним чином з енергією координату, назовемо її "уявною енергетичною" координатою. Оскільки енергія у звичному нам розумінні є скалярною величиною, то не варто говорити про якусь просторову орієнтацію цієї координати. Некоректно говорити також і про будь-яку просторову локалізацію ("прив'язку") цієї координати, бо вона стосується кожної точки простору. Доцільно говорити також і про якусь певну просторово-часову локалізацію початку відліку на цій осі. Єдине, про що можна сказати, це те, що нульовій позначці на цій осі відповідає певний енергетичний рівень, вище від якого розташований (існує) світ реальних енергетично-матеріальних об'єктів і подій, а нижче – світ вакууму. де матерія перебуває у "сконденсованому" (за термінологією Дірака) стані, у якому народжуються й існують кванти електромагнітної енергії, які і є тією ниточкою, що зв'язує обидва світи, і дозволяють нам хоча б щось дізнатися про властивості світу вакууму. Кванти електромагнітної енергії виникають у вакуумі внаслідок енергетичних процесів, що відбуваються у світі реальних об'єктів і подій, після чого вони існують і розповсюджуються у вакуумі так, що залишаються несприйнятними для нас. Лише зустрічаючи на своєму шляху частинки речовини-матерії з реального світу, електромагнітні кванти легко (напрощується навіть слово "залюбки") вступають з ними у енергетичну взаємодію.

Додамо до цього, що все навколишнє розмаїття світла і кольорів виявляється може бути реалізованим лише у звичайних наших земних умовах, завдяки наявності множинних форм довоколишньої матерії. Саме завдяки взаємодії з матеріальними тілами, потоки білого сонячного світла змінюють напрямки свого розповсюдження та свої спектральні характеристики і потрапляючи нам в очі, створюють у нас відчуття океану різнокольорового світла. Якби ми раптом опинилися у

порожньому Космосі – то нічого, крім сліпучо білого диска Сонця та яскравих краплин зірок на фоні абсолютно чорного неба, не побачили б. Мимо нас проносилися б енергетично як завгодно потужні потоки фотонів, і не зустрічаючи на своєму шляху жодних матеріальних перешкод, вони безслідно проносилися б далі, й ми ніколи б і ніяк не змогли дізнатися про їх існування.

Авторами розробляється феноменологічна модель будови кванта електромагнітної енергії, але говорити про неї зараз передчасно.

Ще раз підкреслимо неподільність фотона – його жодним чином не можна розділити: від своєї появи і до свого зникнення він може існувати тільки цілим. Тільки цілим він може пройти через напівпрозоре дзеркало або ж тільки цілим відбитися від нього.

Попри все мовлене, вищезгаданий метод створення когерентних променів, що ґрунтується на уявленні про цуги світлових хвиль, дозволяє правильно тлумачити результати експериментів по інтерференції світлових потоків, що накладаються. Це означає, що у своїй суті цей метод правильний і необхідно лише дати йому належне тлумачення, згідно з сучасними уявленнями про природу світла.

#### Квантові пакети

При формуванні уявлень про світловий потік важливо пам'ятати, що у будь-якому джерелі світла поряд зі спонтанним діє також і механізм генерації індукованого випромінювання (на необхідність існування такого механізму генерації квантів вперше вказав Ейнштейн у 1916 р.).

Уявімо собі колектив ідентичних збуджених атомів, просторово розподілених у робочому об'ємі джерела світла; в усіх цих атомах електрони, що відповідають за генерацію квантів електромагнітного випромінювання, перебувають на верхніх дозволених енергетичних рівнях, тобто атоми знаходяться у нерівноважних станах (випадок так званої, інверсної заселеності рівнів). В одному з цих атомів раніше, ніж в інших відбудеться спонтанний перехід електрона, результатом якого буде випромінювання атомом кванта електромагнітної енергії, параметри якого, в загальному випадку, матимуть також випадковий характер характер (випадковий напрямок його руху: випадкова – у межах енергетичного розмиття рівнів – величина його енергії (частоти); випадкова просторова орієнтація площини його поляризації). Генерований так квант, пролітаючи поблизу іншого збудженого атома, може індукувати і в ньому електронний перехід із випромінюванням

і з цього атома кванта електромагнітної енергії. Особливістю індукованих переходів електронів є те, що генеровані при цьому кванти будуть ідентичними за всіма параметрами (когерентними) до індукованих квантів. Подібне індуковане розмноження ідентичних квантів буде відбуватися на всьому шляху їх розповсюдження в об'ємі активного робочого тіла джерела випромінювання і може мати лавинний характер.

Завдяки цьому механізмові генеруються ідентичні, а отже, взаємокогерентні кванти (фотони). Отже, вже на стадії генерації у будь-якому джерелі світла може генеруватися і ним же випромінюватися вже до деякої міри впорядкований (когерентний) світловий потік. Виходячи з цього, у загальному випадку світловий потік можна трактувати як такий, що складається з окремих просторово структурованих групувань, утворених кількісно більшими чи меншими групами ідентичних квантів. Такі угруповання, що складаються з ідентичних між собою квантів, ми у подальшому будемо називати "квантовими пакетами". Квантові пакети, що йдуть один за одним і один поряд з одним, й утворюють світловий потік. У межах кожного окремого пакету всі кванти взаємокогерентні, бо першим в пакеті завжди є той квант, що започаткував цей пакет – це він, з'явившись першим у результаті спонтанного переходу одного зі збуджених атомів десь всередині джерела та індуковані ним ідентичні йому кванти, проходячи назовні мимо інших збуджених атомів, індукували на своєму шляху появу решти квантів із цього пакета. Очевидно, що кванти із сусідніх пакетів не будуть когерентними між собою. Одночас кожний окремий квантовий пакет можна розглядати як єдину область самоузгодженого електромагнітного поля (щось на зразок домену у ферромагнетикі чи мікрокристаліку у полікристалі).

Отже, завдяки наявності механізму індукованого випромінювання, світло, що випромінюється будь-яким джерелом, не є зовсім хаотичним набором ніяк не узгоджених між собою квантів, а завжди є більш чи менш впорядкованим потоком, що складається з окремих, більшої чи меншої протяжності в просторі і у часі, квантових пакетів. При цьому "якість" світлового потоку (в сенсі його когерентності) визначається саме розмірами квантових пакетів – чим вони більші, тим якіснішим є світловий потік. Такі уявлення про механізм генерації світла дозволяють пояснити деякі особливості світлових потоків, випромінюваних різними за своєю природою джерелами світла.



Стає зрозумілим, чому кращі показники когерентності мають газосвітні джерела: атоми (молекули) у газі розташовані на значних відстанях один від одного, що не перешкоджає квантам світла подолати без поглинання чи розсіювання значний шлях всередині джерела, викликаючи на цьому шляху індуковане випромінювання інших збуджених атомів. Водночас низька когерентність твердотільних джерел світла, таких як, наприклад, лампи розжарювання, зумовлена тим, що випромінювання квантів світла з них відбувається практично лише з поверхневого шару атомів, а отже, умови для розвитку процесів індукованого випромінювання в них несприятливі. Зрозумілою стає й висока когерентність лазерного випромінювання – завдяки наявності у лазерах оптичного позитивного зворотного зв'язку, когерентні фотони з одного квантового пакета можуть тривалий час існувати всередині резонатора, розмножуючись у ньому протягом всього терміну. Завдяки цьому лазери здатні генерувати квантові пакети (цуги) завдовжки у сотні – тисячі метрів і більше (чого, до речі, не можна пояснити енергетичною "випромінювальною здатністю" одного, окремо взятого, атома речовини).

Модель квантових пакетів у складі світлового потоку легко узгоджується з уявленнями про хвильові цуги – хвильовий цуг, згідно з нашою моделлю, є просто квантовим пакетом. Просторова протяжність (довжина) квантового пакета вздовж напрямку його розповсюдження тепер більше не пов'язується з часом існування збудженого стану атома, а визначається лише умовами формування квантового пакета всередині джерела світла. В такому разі довжини квантових пакетів, що визначають довжини когерентності світлових потоків, можуть лежати в широких межах, залежно від фізичної природи активної області джерела світла і характеру процесів, що зумовлюють збудження і випромінювальну релаксацію активних атомів у ній. Зрозумілим стає і поділ квантових пакетів навпіл на напівпрозорих дзеркалах: частина квантів із кожного пакета просто *проходить* через напівпрозоре дзеркало, а решта – просто *відбивається* від нього.

### Квантові пакети і спектральні характеристики оптичного потоку

Як було показано вище, використавши модель квантових пакетів, можна надати простої і ясної фізичної інтерпретації явищам, пов'язаним з інтерференцією когерентних світлових потоків. Покажемо, що дана модель може успішно засто-

совуватись і в інших областях хвильової оптики, не заперечуючи при цьому напрацьованого класичною хвильовою оптикою математичного апарату, а лише наповнюючи його новим змістом. Отож, нехай квантовий пакет є лінійним набором когерентних фотонів. Промодулюємо його вздовж напрямку його розповсюдження відрізком синусоїди:

$$E(t) = \begin{cases} E_0 \sin \omega_0 t & \text{при } 0 \leq t \leq \tau, \\ 0 & \text{при } 0 > t > \tau, \end{cases} \quad (1)$$

де  $E_0$  – амплітудне значення напруженості електричного поля  $E(t)$ ,  $\tau = nT$  – часова протяжність квантового пакета, що складається із  $n$  фотонів (порахованих у напрямку руху пакета – згідно з нашої інтерпретацією це і буде часом когерентності світлового потоку),  $T = 2\pi/\omega_0$  – період світлової хвилі або, у нашій інтерпретації, часова протяжність одного фотона в напрямку його руху. Згідно з теоремою Фур'є, будь-яку скінченну і таку, що може бути проінтегрованою, функцію можна подати у вигляді безперервної суми нескінченної кількості гармонічних компонент нескінченно малої амплітуди. Це означає, що коливання  $E(t)$ , спричинені проходженням одного квантового пакета, можна розглядати як суперпозицію монохроматичних коливань з різними частотами  $\omega$ :

$$E(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} E(\omega) e^{i\omega t} d\omega,$$

де  $E(\omega)$  – спектральна густина випромінювання, або частотний спектр  $E(t)$ . Згідно з властивостями перетворення Фур'є,

$$E(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} E(t) e^{-i\omega t} dt. \quad (2)$$

Підставляючи (1) в (2) й інтегруючи в межах від 0 до  $\tau$  (на тому часовому проміжку, де існує функція (1)), отримаємо:

$$E(\omega) = E_0 \frac{\omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2} \times \left[ 1 - e^{-i\omega\tau} \left( \cos \omega_0 \tau + i \frac{\omega}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau \right) \right]. \quad (3)$$

Оскільки реально ми маємо справу не зі спектральною густиною  $E(\omega)$ , а спостерігаємо (чи ресструємо) спектральну інтенсивність світла, що визначається як:

$$I = k \cdot E(\omega) \cdot E^*(\omega), \quad (4)$$

де  $k$  – деякий розмірний коефіцієнт, а  $E^*(\omega)$  – комплексно-спряжена з  $E(\omega)$  величина, то провівши обрахунки згідно з (4) і (3), отримаємо:

$$I = k \cdot E_0^2 \frac{\omega_0^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2} \times \left[ (\cos \omega_0 \tau - \cos \omega \tau)^2 + \left( \sin \omega \tau - \frac{\omega}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau \right)^2 \right] \quad (5)$$

Вираз (5) можна істотно спростити, скориставшись тим, що квантовий пакет вздовж напрямку його руху являє собою ланцюжок із  $n$  фотонів (очевидно, що  $n \in$  завжди цілим числом). Виходячи з цього, замінимо т:

$$\tau = nT = \frac{2\pi n}{\omega_0}$$

З урахуванням цього, вираз (5) набуде вигляду:

$$I = k \cdot \frac{2E_0^2}{\omega_0^2} \cdot \frac{\left( 1 - \cos 2\pi n \frac{\omega}{\omega_0} \right)}{\left( 1 - \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2} \quad (6)$$

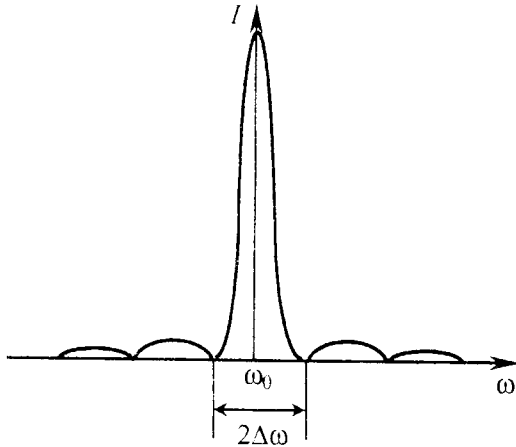


Рис. 1. Спектральна крива згідно (6).

Максимум спектральної кривої (6) на рис. 1 відповідає умові:  $\omega = \omega_0$ . Невизначеність виразу (6) за цієї умови легко розкривається:

$$I_{\max} = \left( \frac{kE_0 \tau}{2} \right)^2 = \left( \frac{kE_0 \pi n}{\omega_0} \right)^2$$

Як видно з останнього виразу, інтенсивність спектра у максимумі стрімко зростає при збільшенні довжини (тривалості) квантового пакета. Дослідимо, як змінюються частотні параметри спектра, залежно від тривалості квантового пакета. Основним параметром спектрального розподілу інтенсивності світла є напівширина його спектральної лінії  $\Delta\omega$ , яка визначається на поло-

винному рівні кривої спектрального розподілу інтенсивності:  $I=0,5I_{\max}$ . На жаль, трансцендентність підсумкового рівняння (6) не дозволяє отримати узагальненого аналітичного виразу для напівширини спектральної лінії. Для кожного конкретного випадку рівняння (6) можна розв'язати або графічно, або числовими методами. Як вихід із цієї ситуації, з метою отримати все-таки в аналітичному вигляді вираз для характеристики напівширини спектральної лінії  $\Delta\omega$  доцільно запропонувати дещо інший підхід до її визначення. За міру ширини спектральної характеристики сигналу  $\Delta\omega$  можна взяти половину інтервалу  $2\Delta\omega$  між двома першими (рахуючи від  $\omega_0$  вліво і вправо) нулями (див. рисунок). Умовою визначення частот перших нулів кривої (6), очевидно, буде:

$$2\pi n \left( \frac{\omega_0 \pm \Delta\omega}{\omega_0} \right) - 2\pi n = \pm 2\pi,$$

звідки:

$$\Delta\omega = \frac{\omega_0}{n} = \frac{2\pi}{nT_0} = \frac{2\pi}{\tau} \quad (7)$$

Отримана так напівширина спектральної лінії обернено пропорційна довжині квантового пакета, що повністю відповідає класичним уявленням. З виразу (7) видно, що при необмеженому зростанні довжини квантового пакета ( $\tau \rightarrow \infty$ ) напівширина спектральної лінії буде не обмежено зменшуватись ( $\Delta\omega \rightarrow 0$ ); мовою прихильників хвильової теорії це означає наближення світлової хвилі до монохроматичної з частотою коливань електромагнітного поля  $\omega_0$ .

### Квантові пакети і характеристики когерентності світлового потоку

Під довжиною когерентності світлового потоку  $L_{\text{ког}}$  ми розуміємо просто довжину пакетів когерентних квантів (цю просторову протяжність у напрямку руху). Очевидно, час когерентності  $\tau_{\text{ког}}$  є просто часовою протяжністю квантового пакета  $\tau$ , тобто тим часом, протягом якого пакет когерентних квантів буде пролітати повз нерухомого спостерігача. (Ці характеристики когерентності світлового потоку легко визначаються експериментально, наприклад за допомогою інтерферометра Майкельсона). Отже, час когерентності можна визначити ще й так:

$$\tau_{\text{ког}} = \frac{L_{\text{ког}}}{c} \quad (8)$$

Скориставшись виразами (7) і (8), пов'яжемо  $L_{\text{ког}}$  із напівшириною спектральної лінії:

$$L_{\text{ког}} = c \tau_{\text{ког}} = 2\pi \frac{c}{\Delta\omega}. \quad (9)$$

Оскільки відносний спектральний склад світла, що надходить до нас від далеких зірок, залишається незмінним (ефект Хабла залишимо поза увагою як такий, що не стосується предмету нашого розгляду), то можна стверджувати, що довжина когерентності світлового потоку при поширенні світла у просторі, а отже й, довжини квантових пакетів, також залишаються незмінними.

На практиці часто розподіл інтенсивності в оптичних спектрах досліджують як функцію довжини хвилі світла. Тоді  $L_{\text{ког}}$  у виразі (9) можна пов'язати з напівшириною спектральної кривої  $\Delta\lambda$ , скориставшись очевидним співвідношенням  $|d\omega/\omega| = |d\lambda/\lambda|$ :

$$L_{\text{ког}} = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda}, \quad (10)$$

де  $\lambda_0$  – довжина хвилі, що відповідає максимумові спектрального розподілу інтенсивності випромінювання по довжинах хвиль;  $\Delta\lambda$  – відповідна напівширина спектральної кривої. Відзначимо, що отриманий нами вираз для  $L_{\text{ког}}$  також повністю відповідає відомому. Скориставшись виразом (10), спробуємо дати оцінку величині  $L_{\text{ког}}$  для сонячного світла. Відомо, що спектр сонячного випромінювання близький до спектра АЧТ із температурою 5770 К. Максимум спектрального розподілу при цьому припадає на довжину хвилі  $\lambda_0 \approx 0,5$  мкм. Для визначення напівширини спектральної кривої скористасмося формулою Планка у вигляді:

$$u_{\lambda,T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}. \quad (11)$$

Підставивши відомі числові дані у вираз (11), визначимо інтенсивність сонячного випромінювання у максимумі його спектрального розподілу  $(u_{\lambda,T})_{\text{max}}$ . Дорівнявши потім праву частину (11) до величини  $0,5(u_{\lambda,T})_{\text{max}}$ , отримаємо умову для знаходження граничних (по рівню 0,5) величин  $\lambda$ , які визначають нам величину  $\Delta\lambda$ . Опускаючи власне розрахунки, наведемо підсумковий результат:  $\Delta\lambda \approx 0,6$  мкм. Підставляючи в (10) відповідні для сонячного випромінювання величини, одержимо:  $L_{\text{ког}} \approx 0,42$  мкм. Отримана величина  $L_{\text{ког}}$  співмірна з  $\lambda$  у спектрі сонячного світла, з чого напрашується висновок, що у сонячному світлі не має квантових пакетів або Сонце є просто джерелом

некогерентних хвиль.

На перший погляд і проводити таку оцінку навряд чи варто, адже, здавалося б, про яку інтерференцію може йти мова для білого світла з його широким суцільним спектром? Але ж, згадаймо райдугу. Взагалі ж одержаний оцінковий результат, на наш погляд, не слід сприймати категорично, бо механічне перенесення методів спектрального аналізу коротких сигналів на процес рівноважного теплового випромінювання, мабуть, не зовсім коректне. У подібних випадках можна сподіватись хіба що на певну наближеність отриманого таким чином результату до реальної величини  $L_{\text{ког}}$ . І хоча теплове випромінювання є результатом теплового руху атомів (молекул), тобто хаотичного процесу, певна частина квантів і в цьому випадку може генеруватися індукованим шляхом, а отже, об'єднуватися у квантові пакети, хай і невеликої довжини. Можливо, саме завдяки цьому ми все ж за певних умов спостерігаємо інтерференцію сонячного світла на стінках мильних бульбашок і у дощову погоду на плівках масла на калюжах?

Окрім таких характеристик світлового потоку, як довжина та час когерентності, які визначаються просторовою протяжністю пакетів когерентних квантів у напрямку їх поширення, для реальних світлових потоків вводять ще й такі, як радіус (чи розмір) когерентності,  $r_{\text{ког}}$  та об'єм когерентності,  $V_{\text{ког}}$ . Під  $r_{\text{ког}}$  розуміють максимальну відстань у межах світлового потоку в напрямку, перпендикулярному до напрямку його поширення, на якій ще можливі прояви інтерференції. З точки зору нашої інтерпретації, будови світлового потоку  $r_{\text{ког}}$  є поперечним розміром квантового пакета (його "шириною, товщиною") – просторовою протяжністю в напрямку, перпендикулярному до напрямку поширення світлового потоку. Експериментально встановлено, що для сонячного світла, яке падає на поверхню Землі,  $r_{\text{ког}}$  складає величину  $\sim 60$  мкм. Для світла, що надходить до нас від інших зірок, ця величина значно більша. Виходячи з наших уявлень про світловий потік, можна припустити, що поперечні розміри квантових пакетів із часом (при їх поширенні у просторі) зростають. На наш погляд, в такому припущенні немає нічого протиприродного: повторюване і нами в тому числі загальне твердження, що "при індукованих переходах електронів генеруються кванти електромагнітної енергії, ідентичні до індукованих квантів", не слід розуміти аж надто буквально. Наведене твердження є не

чим іншим, як абстракцією, гіперболою наших бажань (до речі, це один із прикладів створення дослідниками ідеалізованих моделей природних явищ). Природа ж не знає абстракцій. Реальність полягає в тому, що яким би досконалим не було джерело світла, його випромінювання, наприклад, ніколи не буде абсолютно монохроматичним – завжди буде існувати скінченна ширина спектральної смуги частот (або довжин хвиль) випромінюваного світла. Ця ширина може бути дуже малою і, зокрема, для сучасних газових лазерів (на оптичних частотах генерації!) вона може скласти величину всього сотих часток герца (або  $\sim 10^{-23}$  м), але вона ніколи не буде нульовою, бо інакше довжина когерентності такого світла мала б бути нескінченно великою. Оскільки швидкість світла скінченна, то це означає, що лазер мусив би працювати нескінченно довгий час, чого, певне ж, ніколи не буває. Отож, серед квантів, що з'явилися внаслідок індукованого механізму генерації і належать до одного квантового пакета, завжди існує певний розкид їх частот або модулів їх хвильових векторів. Подібної ситуації, очевидно, слід очікувати і щодо просторової орієнтації їх хвильових векторів, а отже, для квантів, що входять до складу одного квантового пакета, також має існувати певний розкид їх просторової орієнтації. З цього робимо висновок, що кутова (просторова) розбіжність квантового пакета є його природною властивістю, започаткованою вже на стадії формування квантового пакета в джерелі світла.

Виходячи з факту існування просторової когерентності випромінювання, робимо висновок, що незважаючи на просторову розбіжність квантового пакета, початкова спорідненість квантів (їх внутрішня взаємоузгодженість у межах квантового пакета) не лоривається – кванти зберігають взаємокогерентність впродовж всього часу існування квантового пакета. Зауважимо, що ця взаємокогерентність не порушується ні при відбитті квантового пакета, ні при його заломленні. Оскільки фотони в цілому є електронейтральними утвореннями, то можна припустити, що поперечні розміри квантового пакета – лінійна функція пройденого ним шляху (або часу його існування), тобто тим самим ми припускаємо, що кут розбіжності квантів у межах квантового пакета є величиною сталою протягом всього часу існування цього пакета і не залежить від об'ємної концентрації квантів у ньому. Припустимо, що мінімальний початковий поперечний розмір квантового пакета (відразу ж по виході його з джерела світла) дорівнює довжині його хвилі. Підкресли-

мо, що це може бути не тільки для лазерних джерел світла: квантовий пакет буде мати тим більші поперечні розміри, чим він довший. Пояснюється це тим, що завдяки багаторазовим відбиттям квантів одного квантового пакета від дзеркал оптичного резонатора при формуванні квантового пакета, його поперечні розміри можуть значно зрости (втім, вони не перевершають поперечних розмірів активної області джерела світла та розмірів вихідного вікна резонатора).

Виходячи з цих міркувань, обчислимо величину кута розбіжності квантових пакетів, скориставшись відомими величинами  $r_{\text{ког}}$  і  $\lambda$  для сонячного світла:  $\varphi \approx r_{\text{ког}}/R_3 = 4,0 \cdot 10^{-16}$  рад  $= 8,9 \cdot 10^{-11}$  кут.с. Тут  $R_3 = 1,49 \cdot 10^{11}$  м – радіус орбіти Землі. Тоді взаємозв'язок між  $r_{\text{ког}}$  світлового потоку і пройденою ним відстанню  $l$  визначиться виразом:

$$r_{\text{ког}} = \varphi l. \quad (12)$$

Це дає можливість по-новому поглянути на відомий з астрономії метод вимірювання кутового розміру зірок, шляхом визначення  $r_{\text{ког}}$  їх світлового потоку, що надходить на Землю. Проілюструємо на цьому прикладі можливість практичного застосування виразу (12). Так, відстань до найближчої до нас зірки Проксіми, альфи з сузір'я Центавра, виміряна за методом паралаксу, складася  $\sim 4,5$  світлових роки ( $\sim 4,26 \cdot 10^{16}$  м), тоді, згідно з (12), її світловий потік на поверхні Землі матиме  $r_{\text{ког}} \sim 17$  м. Одержане число добре узгоджується з даними по просторовій когерентності світла від зірок, отриманими Майкельсоном за допомогою інтерференційного телескопа.

Об'єм когерентності світлового потоку  $V_{\text{ког}}$ , згідно з нашими уявленнями, буде визначатись як просторовий об'єм квантового пакета. Виходячи з припущення про осесиметричність квантового пакета:

$$V_{\text{ког}} = L_{\text{ког}} 0,25\pi r_{\text{ког}}^2.$$

(у відомому виразі для  $V_{\text{ког}}$  множник  $0,25\pi$  відсутній). Очевидно, що об'єм когерентності світлового потоку при поширенні його у просторі зростає.

### Наш коментар

Все викладене вище є, на наш погляд, простим і зрозумілим і як би ми на цьому шляху були першими, то можна було б з задоволенням поставити крапку на цьому проміжному етапі. Та ми не перші. Всі прояви хвильових властивостей світла давно вже досконало вивчені і їм надані логічно узгоджені тлумачення, а отже, ми мусимо висловити своє бачення ситуації, що склалася.

Нам досить легко вдалося узгодити свою модель квантових пакетів із відомими поглядами, стосовно явищ інтерференції світлових потоків, що накладаються: формально для цього виявилось достатнім замінити уявлення про "цуги світлових хвиль" на уявлення про "квантові пакети". При цьому такі поняття, як "довжина когерентності" та "час когерентності", отримали просто і прозоре тлумачення: Перше є просто просторовою, а друге – часовою протяжністю квантових пакетів у напрямку їх руху.

Зауважимо, що при збільшенні довжин квантових пакетів (або довжини когерентності світла) в потоці оптичного випромінювання, згідно з виразом (7), ширина спектральної кривої зменшуватиметься тобто, світлова хвиля буде наближатись до монохроматичної, що добре узгоджується з класичним результатом. На противагу цьому, при зменшенні довжини квантового пакета, виникає серйозна неадекватність у трактовці результатів спектрального аналізу згідно з перетвореннями Фур'є. Зокрема, ця невідповідність виявляє себе при зменшенні довжини квантового пакета (гранично до довжини хвилі, тобто до одного фотона – це означає, що світловий потік є повністю некогерентним; такий випадок може бути реалізованим за умови відсутності дії механізму індукваного випромінювання в джерелі світла). Для такого випадку ( $\tau = T = 2\pi/\omega_0$ ), згідно з виразом (7), отримаємо:

$$\Delta\omega = \omega_0, \text{ або } \Delta\omega/\omega_0 = 1 \text{ ?!} \quad (13)$$

Спроба "наповнити" цей результат фізичним змістом означає, що послаючи на дифракційну ґратку поодинокі фотони з однією і тією ж енергією  $E_0$ , а значить, і з однаковою частотою  $\omega_0$ , після проходження ними ґратки на її виході слід очікувати появи фотонів із частотами  $\omega$ , які можуть лежати в межах  $\omega_0 \pm \omega_0$ , тобто від  $\omega=0$  до  $\omega=2\omega_0$ . Якщо перекласти цей результат на шкалу енергій, то енергія таких фотонів мала б лежати в діапазоні від 0 до  $2E_0$ . Очевидно, що реально такої ситуації бути не може – якщо на дифракційну ґратку посилати хай навіть поодинокі "зелені" фотони, то і на виході ґратки вони залишаться такими самими, а не "почервоніють" і не "посиніють", бо енергія фотона при проходженні ним дифракційної ґратки залишається незмінною.

Як же витлумачити цю ситуацію? Принагідно зауважимо, що саме ця ситуація якраз і є чудовою ілюстрацією сформульованого нами на початку статті застереження для користувачів, стосовно можливої їх "беззастережної довіри до матема-

тичних моделей", "особливо в граничних умовах їх застосування"!

Викладемо наше бачення ситуації, що склалася. На нашу думку, причиною її виникнення є те, що при створенні апарата перетворень Фур'є опікувалися виключно математичними аспектами проблеми без огляду на можливі її фізичні аспекти. Тим наче, що на той час не було відомо ні того, що електромагнітні хвилі є енергетично квантованими (дискретними!), ні того, що енергія окремого кванта електромагнітної хвилі жорстко пов'язана з його ж частотою. Так, у виразі для напруженості електромагнітного поля в деякій точці простору  $E = E_0 \sin \omega t$  інтенсивність хвилі (її енергія) пов'язувалася виключно з множителем  $E_0$ , а частота хвилі  $\omega$  при цьому не мала жодного відношення до її енергії і виконувала лише роль параметра, який, як аргумент гармонічної функції, визначав період часових осциляцій множника  $E_0$ . Насправді ж, як відомо, саме частотою визначається енергія квантів, що складають електромагнітну хвилю, а інтенсивність (енергія) хвилі забезпечується власне тільки кількістю квантів, що її складають. Отже, щойно наведений математичний запис рівняння електромагнітної хвилі відзеркалює лише формальну математичну модель, в основу якої закладені фізично недосконалі принципи. Така модель добре узгоджується з експериментом лише за умови:

$$2\varepsilon_0 E_0^2 \lambda^3 \gg h\omega. \quad (14)$$

Викладена в такому вигляді умова (14) є вимогою того, щоб кількість зареєстрованих квантів у складі електромагнітної хвилі в даній точці простору впродовж часу експериментального визначення її параметрів була значно більшою за одиницю. Тільки при виконанні цієї умови ми зможемо впевнено вимірювати величини континуальних параметрів хвилі, таких як інтенсивність (амплітуда) хвилі, її довжина, фаза та період. Зауважимо, що традиційний опис електромагнітного поля за допомогою рівнянь Максвелла слід розглядати як граничний випадок (граничною умовою є випадок рівності у виразі (14)) більш загального випадку (де згадані обмеження не діють), коли використовується опис за допомогою хвильових рівнянь для матерії типу рівняння Шредінґера.

Водночас ми знаємо, що, наприклад, у радіотехніці ніколи не виникало (і, підкреслимо, не могло виникнути) жодних проблем щодо використання апарата перетворень Фур'є, хоча і там ми також маємо справу з електромагнітними хвилями. Вся справа в тому, що частота електромаг-

нітних хвиль радіодіапазону на багато порядків менша, ніж оптичного. Це означає, що і енергія окремих "радіоквантів", також є на багато порядків меншою, а велика енергія радіохвилі (її потужність) в такому разі забезпечується просто величезною кількістю радіоквантів, що її складають. Відповідно і генеруються ці величезні кількості квантів ансамблями, що складаються з величезної кількості електронів, що має місце, наприклад, у металевих провідниках (антенах) при протіканні в них радіочастотних змінних струмів. Електрони, що рухаються в антені згідно зі змінами струму в ній, а отже, *прискорено*, випромінюють у навколишній простір кванти електромагнітної енергії, які й утворюють у ньому радіохвилю (біжучу електромагнітну хвилю). В зоні провідності (ЗП) металу щільність енергетичних рівнів електронів дуже висока (енергетичні "щілини"  $\Delta E$  між сусідніми рівнями в ЗП складають величини  $\sim 10^{-20} \dots 10^{-24}$  eV), це при тому, що енергетична ширина ЗП може бути завбільшки в кілька електронвольт. Водночас енергетичний розкид величин квантів, що генеруються антеною (для радіомовних станцій це складає всього  $\Delta E \sim 10^{-11}$  eV), набагато менший від ширини ЗП металу (принагідно зауважимо, що теплова енергія  $kT$ , яка припадає на один степінь вільності частинки, складає при звичайних температурах величину  $\sim 0,025$  eV). Із зіставлення наведених цифр стає зрозумілим, що сформувані радіоквант будь-якої (в межах вказаних енергетичних проміжків зони провідності) величини не є проблемою. Саме тому при застосуванні перетворень Фур'є для спектрального аналізу сигналів радіодіапазону ніколи не виникало (і не могло виникнути) жодних непорозумінь. Зауважимо також, що і проблеми з генерацією радіохвиль "завдовжки в один радіоквант" у радіотехніці, як правило, також не виникало з причин її "неактуальності" (вийнятком може слугувати хіба що радіолокація, де вимоги до генерування якомога коротших радіоімпульсів цілком природні; але й тут – енергія радіокванта з частотою  $10^{10}$  Гц ( $\lambda = 3$  см) складає величину  $\sim 10^{-5}$  eV, що набагато менше за величини можливих ширин ЗП металевих провідників).

На противагу цьому, в оптичному діапазоні частот, де енергії світлових квантів співмірні з енергетичними щільностями між енергетичними рівнями (зонами) робочого тіла, таке вільне поводження з вибором можливих енергій квантів неприпустиме. Саме цей факт і став причиною нереальності результатів, отриманих нами з перетворень Фур'є (базованих на уявленнях про кон-

тинуальності можливих частот хвиль і можливості їх безперервної зміни), для високоенергетичних оптичних квантів. Зауважимо, що при збільшенні довжини квантового пакета (довжини когерентності світла) перетворення Фур'є "працює" нормально, тобто дає цілком прийнятні, з точки зору фізики, результати. І це зрозуміло, оскільки в такому випадку (як видно з наших результатів) ширина спектральної кривої зменшується, а отже, зменшується й можливий енергетичний розкид квантів, який при цьому чудово "вписується" в природну ширину енергетичних рівнів (зон) робочого тіла.

Якщо ж коротко підсумувати все мовлене вище – без розумних обмежень апарат перетворень Фур'є у квантовій оптиці не може бути застосованим.

З іншого боку, у квантовій оптиці використовуються так звані співвідношення невизначеностей В.Гейзенберга. Поглянемо, який результат можна отримати, застосувавши їх до фотона як до елементарної частинки. Хай фотон рухається в додатному напрямку осі  $x$ . Тоді співвідношення невизначеностей для нього можна записати у вигляді:

$$\Delta p \Delta x \geq \hbar, \quad \Delta E \Delta t \geq \hbar.$$

Застосовуючи вираз для енергії фотона як для вільної елементарної частинки  $E = p^2/2m$  і використовуючи співвідношення де Бройля  $p = \hbar k$  та формули Ейнштейна  $E = mc^2$  і Планка  $E = \hbar \omega = hc/\lambda$ , з урахуванням виразів (7)-(10), можна отримати вираз для розміру просторової області локалізації фотона вздовж координати  $x$ . Шляхом нескладних перетворень дістанемо:  $\Delta E = \hbar c / \Delta x$ . Підставляючи цей вираз у співвідношення невизначеностей для енергії та зіставляючи часову невизначеність енергії кванта з його часовою протяжністю (що, згідно з нашими уявленнями, є періодом електромагнітної хвилі, набраної із такіх самих квантів), одержимо нетривіальний результат:

$$\Delta x \leq \lambda, \quad (15)$$

тобто інтервал невизначеності координати фотона визначається довжиною його ж хвилі (нагадаємо, що згідно з нашою інтерпретацією, поняття довжини хвилі, є просторовим розміром області локалізації кванта електромагнітної енергії або області простору, де локалізується його, простору, електромагнітне збурення).

Отриманий так результат (15) чудово збігається з нашими, зробленими вище, оцінками просторових розмірів кванта електромагнітної енергії. На завершення додамо, що вираз (13) є не чим

іншим, як співвідношенням невизначеностей. Справді, перепишемо його у вигляді:

$$\Delta\omega T = 2\pi. \quad (16)$$

Тут  $T$  є періодом світлової хвилі або часовою протяжністю одного фотона, що входить до її складу. Згідно зі ймовірнісним тлумаченням  $\Psi$ -функції Шредінгера, час  $T$  є тим часом, упродовж якого ми зможемо віднайти фотон в околі даної точки простору, тобто його можна тлумачити як невизначеність моменту фіксації фотона в часі  $\Delta t$ . Замінивши у виразі (14)  $T \rightarrow \Delta t$  і домноживши обидві його частини на сталу Планка  $\hbar$  та замінивши  $\hbar\Delta\omega$  на  $\Delta E$ , дістанемо рівняння невизначеностей для енергії:

$$\Delta E \cdot \Delta t = \hbar.$$

І, на закінчення, ще про один аспект тлумачення отриманих нами нових результатів. Поняття "радіус" та "об'єм" когерентності, що згідно з нашими уявленнями, є просто поперечними розмірами та об'ємами квантових пакетів, у загальноприйнятному тлумаченні мають інший сенс. Очевидною причиною цього є розбіжності в розумінні природи світла.

Якщо виходити з принципу Гюйгенса-Френеля, то точкове джерело світла має генерувати сферичну когерентну світлову хвилю. Оскільки в природі не існує точкових джерел світла, а отже, і сферичних когерентних світлових хвиль, то реальне джерело світла розглядається як набір окремих точкових. Тоді результуюче освітлення в деякій точці від такого джерела слід розглядати як суперпозицію (інтерференцію) світлових хвиль від відповідного набору точкових джерел. Математичне опрацювання цієї ідеї приводить до того, що  $r_{\text{ког}}$  визначається кутовим розміром реального джерела світла, під яким його видно в площині вимірювання радіуса когерентності:

$$r_{\text{ког}} = \lambda / \theta, \quad (17)$$

де  $\lambda$  – довжина світлової хвилі, а  $\theta$  – кутовий розмір джерела світла,  $r_{\text{ког}}$  якого визначається.

Згідно ж з нашими уявленнями про квантово-пакетну будову світлового потоку,  $r_{\text{ког}}$  має визначатися пройденою цим потоком відстанню  $l$  (12):

$$r_{\text{ког}} = \Phi \cdot l,$$

де  $\Phi$  – природна величина кута розбігу квантів, що належать до одного квантового пакета. Відразу ж зауважимо, що на даний момент ми не в змозі сказати щось певне щодо можливої залежності  $\Phi(\lambda)$ ; із загальних міркувань можна лише припустити, що зі збільшенням  $\lambda$  величина  $\Phi$  також здатна збільшуватись.

Із виразу (17) випливає, що однакові  $r_{\text{ког}}$  будуть мати світлові потоки від двох зірок з однаковими кутовими розмірами, незалежно від того, що одна з цих зірок може мати більший діаметр і, відповідно, бути більш віддаленою від Землі, бо, згідно з (17),  $r_{\text{ког}}$  світлового потоку визначається лише кутом  $\theta$ , під яким що зірку видно з Землі.

Із виразу (12) видно, що однакові  $r_{\text{ког}}$  будуть мати світлові потоки від рівновіддалених від Землі зірок, незалежно від величин їх кутових розмірів, оскільки  $r_{\text{ког}}$ , визначається не кутовим розміром джерела світла, а величиною відстані до нього.

Такі різнобіжні висновки варто перевірити експериментально. Зробити це можна кількома шляхами, наприклад виміряти величини  $r_{\text{ког}}$  для:

- 1) двох рівновіддалених від Землі зірок, але з різними кутовими розмірами;
- 2) двох зірок з однаковими кутовими розмірами, але різновіддалених від Землі;
- 3) світла від однієї зірки, але для двох різних довжин хвиль її світла.

Якщо, наприклад, у першому випадку будуть отримані різні величини  $r_{\text{ког}}$ , а в другому однакові – це буде аргументом на користь традиційних поглядів на світло; якщо ж навпаки – то це стане підтвердженням викладених нами уявлень про те, що світлові потоки складені із квантових пакетів, поперечні розміри яких зростають про поширенні світла у просторі. Якщо в останньому, третьому, випадку будуть отримані однакові величини  $r_{\text{ког}}$ , – це також буде аргументом на користь наших уявлень про будову світлового потоку. Зауважимо, що в сенсі постановки експерименту, останній, третій, випадок є найбільш простим, оскільки в ньому автоматично забезпечується умова дотримання однакової відстані при проведенні вимірювань  $r_{\text{ког}}$ , результати яких будуть порівнюватися. Якщо виміряні в такому експерименті величини  $r_{\text{ког}}$ , наприклад, для червоного і для синього світла будуть однаковими, то слід прийняти міркування, що приводять до виразу (12); коли ж виміряні величини  $r_{\text{ког}}$  будуть помітно відрізнятися, наприклад вдвічі, то вирішальними будуть експерименти за першим і другим пунктами, а у виразі (12) слід буде віддзеркалити, відповідно, залежність  $\Phi(\lambda)$ .

#### Заключне слово

Виходячи з уявлень про квантові пакети, в рамках цієї статті ми розглянули лише те коло проявів хвильових властивостей світла, які пов'язуються з інтерференцією світла, зокрема з тим

її різновидом, коли інтерферують зведені разом вторинні промені, попередньо утворені з одного первинного променя. Не менш важливим з точки зору узгодження їх пояснень з нашими уявленнями про будову світлового потоку є аналіз ще й таких проявів хвильових властивостей світла, як, наприклад, його інтерференція на тонких плівках, "кільця Ньютона" тощо. Відомо, що для пояснення цього різновиду інтерференції не виникає потреби в понятті когерентність – інтерференція спостерігається завжди і для світла від будь-яких джерел.

Особливий же інтерес з точки зору моделі квантових пакетів викликає коло явищ, пов'язаних з дифракцією світла. І тут першочерговим заданням є необхідність дати належне тлумачення змісту і сенсу принципів Гюйгенса та Гюйгенса-Френеля.

Ці питання ми плануємо розглянути в наших наступних працях.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Мандель Л., Вольф Э.* Оптическая когерентность и квантовая оптика // М.: Физматлит, 2000.