

ГІПОТЕЗИ. ПОЛЕМІКА

УДК 535.1

ПРО КОГЕРЕНТНІСТЬ ЕЛЕКТРОМАГНІНИХ ХВИЛЬ, ЗОКРЕМА, СВІТЛОВИХ (Частина друга)

Дем'яненко П.О., Зіньковський Ю.Ф.

Дифракція фотонів

Якщо на плоску ДГ спрямувати лазерний промінь з довжиною світлової хвилі λ , то на віддаленому за нею екрані утвориться низка дифракційних максимумів. Порядок розташування цих максимумів в площині екрану визначається простим виразом: $d \sin \vartheta_m = m \lambda$ (тут: d – крок ДГ; $m = \pm 1, \pm 2, \dots$ – “порядок” або просто порядковий номер дифракційного максимуму, що відраховується по обидва боки від центрального, який лежить на лінії лазерного променя і для якого $m = 0$; ϑ_m – кут між напрямками на центральний (нульовий) і m -ий дифракційний максимуми, що відраховується по обидва боки від точки падіння лазерного променя на ДГ). Цей вираз є результатом нескладного математичного опрацювання ідеї принципу Гюйгенса-Френеля (ПГФ): *будь-яку точку простору, якої досягла світлова хвиля, можна розглядати як джерело вторинних, сферичних, когерентних світлових хвиль.*

Здавалося б, все гаразд – використання хвильового підходу дозволяє отримати бездоганний опис експериментальних результатів. Але, загалом, ситуація, на наш погляд, є незадовільною. Адже сьогодні ми твердо знаємо, що:

- в природі немає (і бути не може) *точкових ДС*, а отже, немає (і бути не може) і *сферичних когерентних світлових хвиль*;
- світлове випромінювання генерується не у вигляді *безперервних ЕМ хвиль*, що розповсюджуються *в усі боки*, а *дискретними порціями*, у вигляді *окремих* квантів ЕМ енергії, які є локалізованими в просторі і в часі утвореннями і мають *певні напрямки розповсюдження*.

Таким чином, виходить, що тлумачення явища дифракції світла як *дифракції світлових хвиль*, вже не просто не відповідає сучасним уявленням про природу світла, а є вже до деякої міри навіть шкідливим. Адже замість того, щоб сприяти розвитку і формуванню в головах студентів вірних світоглядних уявлень, таке тлумачення, як і загалом будь-які алогічні речі, завуальовує й те, ще нетривке в їхніх головах, *правильне*, чого вони вже встигли набути. Чим же тоді, врешті, є ПГФ? Всього лиш вдалою *феноменологічною моделлю*, яка дозволяє вірно обраховувати результати експерименту?

Щоб спробувати відповісти на ці питання повернемося знову до розгляду дифракції світла на ДГ. Ота низка дифракційних максимумів на екрані за ДГ, що так добре описується виразом з хвильової теорії світла, є резуль-

татом спільного прояву хвильових властивостей величезної кількості окремих фотонів, що складала світловий потік і всі разом, проходячи крізь ДГ, продифрагували на ній. В зв'язку з цим постає запитання: яким чином притаманні окремим фотонам параметри тієї світлової хвилі, яка є предметом розгляду в хвильовій теорії світла? Яким чином формуються хвильові параметри світлового потоку, як континууму, який реально є набраним із окремих фотонів? Виходячи саме з останнього – факту комплементарності світлового потоку – викладемо своє бачення того, що відбувається з фотонами при їх проходженні через ДГ, або, як дифрагують фотони.

Але попередньо сформулюємо ще такі зауваження.

Перше. При просуванні від висот масштабів макросвіту до глибин мікросвіту, ми змушені були перейти від звичного нам ("очевидного", як нам здавалося) *континуального* сприйняття матерії до усвідомлення факту *дискретності* її будови. Подібно цьому і макроенергетичні потоки ЕМ енергії також сприймаються нами спочатку як *континуальні*, і це дозволяє успішно застосовувати для їх опису математичний апарат теорії хвиль. Якщо ж подібним чином і в цьому випадку спускатися по шкалі енергії вниз, зменшуючи послідовно потужність енергетичного потоку, то він, врешті, також почне виявляти дискретність своєї будови. З'ясовується, що ЕМ хвиля, як енергетичний потік, також є набраною з окремих квантів ЕМ енергії, тобто потік ЕМ енергії також є енергетично *дискретизованим* і просторово, і у часі. Усвідомлення цього факту дозволяє логічно несуперечливим чином сприйняти сутність корпускулярно-хвильового дуалізму ЕМ випромінювання загалом і світла, зокрема. Суттєвою відмінністю у квантуванні матерії і енергії ЕМ хвиль є те, що, як показує весь попередній досвід, природних обмежень на величину енергії ЕМ кванта немає – вона може бути *довільною*.

Друге. Довжина хвилі фотона, яка визначається просторовим періодом осциляції його Ψ -функції, водночас визначає і розміри просторової області локалізації енергії ЕМ збурення, де, власне, і існує реальна величина ймовірності виявлення фотона. Очевидно, розміри цієї області на кілька порядків перевершують розміри тієї ж молекули $AgBr$, здатної поглинути енергію фотона і тим самим надати нам інформацію про нього. Це означає, що впевнено можна стверджувати лише те, що з-поміж багатьох інших саме цій, конкретній, молекулі вдалося поглинути енергію цього фотона. Таким чином, встановлення факту поглинання енергії фотона молекулою дає змогу отримати лише наближені висновки про просторову локалізацію фотона і не дає конкретної інформації про його просторові розміри. А такі звичні параметри світлової хвилі як її довжина чи фаза, якими ми впевнено послуговуємося в експериментах з ДГ, визначаються в цих експериментах як інтегральний результат дії величезної кількості окремих фотонів, що складала цю

світлову хвилю (потік).

Аби скласти уявлення про можливості *дифракції одного (окремого) фотона*, слід було б реалізувати всі можливі варіанти прояву його поведінки після проходження ним ДГ. Для проведення “ідеально чистого експерименту” слід було б примусити *один і той же фотон* багаторазово дифрагувати *повторно*, реалізуючи щоразу один із множини усіх можливих варіантів ймовірності його поведінки, яка визначається квадратом модуля його Ψ -функції. Зрозуміло, що провести подібний експеримент можна, хіба що, уявно. Реальною альтернативою такому експерименту може бути співставлення йому результатів інтегральної дії дифракції величезної кількості *ідентичних* фотонів. За таких умов теоретично можна забезпечити можливість реалізації ймовірностей всіх потенційно можливих варіантів виявлень *одного* фотона. Практично здійснити це можна двома способами – “швидким” *а)* і “повільним” *б)*:

а) – спрямувати на ДГ інтенсивний потік випромінювання зі спектром якомога ближчим до монохроматичного (наприклад, від He-Ne лазера; це дає нам підстави вважати, що всі фотони в цьому потоці є *ідентичними*) і відразу отримати результат дифракції, власне, це і є розглянутий нами вище “класичний” приклад дифракції, який вичерпно описується простим виразом, що витікає із хвильових уявлень про світло;

б) – спрямувати на ДГ *ідентичні* фотони *поодинці* і протягом тривалого часу інтегрувати результати їх послідовної окремішньої дії.

Для ілюстрації цього випадку можна провести паралель з відомим експериментом по реєстрації картини інтерференції, створюваної продифрагованим на кристалічній ґратці металу потоком *електронів*, ослабленим по інтенсивності так, що електрони в область інтерференції надходили поодинці. Якщо схожим чином ослабити світловий потік, що падає на ДГ, настільки, щоб фотони також проходили через ДГ поодинці, то реєструючи їх послідовну сумарну дію, наприклад, фотографічно, ми спочатку не побачили б у послідовно створюваній таким чином фотографічній картині жодної закономірності. Лише після тривалої експозиції на фотопапері почала б проступати знайома інтерференційна картина, яку вже можна було б описувати відомим виразом, звично послуговуючись при цьому поняттями фази та довжини світлової хвилі.

Підсумуємо сказане. Ідентичність інтерференційних картин дифракції світлових потоків в обох випадках проведення експерименту дозволяє стверджувати: при проходженні світлового потоку через ДГ, взаємодія з нею кожного окремого фотона з цього потоку (“*дифракція фотона*”) відбувається так, начебто він був там один – результат проходження окремого фотона через ДГ не залежить від присутності там інших фотонів. Усвідомлення цього, дозволяє відкинути можливе припущення, що прояви хвильових властивостей потоку фотонів є наслідком “колективного ефек-

ту", тобто, є результатом *взаємодії* множини фотонів між собою. Це не так. *Хвильові властивості притаманні саме кожному окремому фотону і при взаємодії з ДГ кожен з них виявляє себе як повноцінна хвиля*, незалежно від того, дифрагує він "на самоті", чи "в компанії" з іншими фотонами.

Після проходження через ДГ кожний окремий фотон вже несе в собі всю інформацію про повну дифракційну картину, яка має створитися на екрані за ДГ. Але щоб відтворити всю цю картину відразу – один-єдиний продифрагований фотон зробити це просто "фізично" не в змозі. Все, на що він реально здатний – це лише провзаємодіяти з одною-єдиною фоточутливою молекулою і тим самим відтворити в межах екрану (площини фотопаперу) один-єдиний дрібний фрагмент повної дифракційної картини. І лише величезна кількість ідентичних фотонів своєю спільною дією, здатні реалізувати практично всі ймовірно можливі варіанти поведінки одного фотона, що описується квадратом модуля хвильової функції фотона. У підсумку на екрані створюється повна картина дифракції, яку можна тлумачити також і як інтегральний результат уявної багатократної дифракції одного і того ж фотона.

Зауважимо, що після всього мовленого вже самé використання термінології хвильової оптики для опису результату проходження окремих фотонів через ДГ може викликати певний спротив. Так, наприклад, якщо словосполучення "дифракція фотонів", ще може не викликати відвертого несприйняття (врешті фотон є осцилюючим згустком ЕМ енергії і його відхилення від прямолінійного розповсюдження при проходженні ним ДГ можна припустити), то щоб дотримуватися хвильової термінології і надалі, ми вже змушені будемо говорити, що після проходження ДГ *фотон інтерферує сам із собою*, що буде вже явною нісенітницею, бо не відповідає самій дефініції поняття "інтерференція".

Для того, щоб зрозуміти, що ж, власне, відбувається з фотоном при проходженні його через ДГ (що слід розуміти під словами "дифракція фотона") нагадаємо, що фотон є рухомим осцилюючим згустком ЕМ енергії, який *не має* чітко визначених ("окреслених") просторових обмежень (*границь*). Просторова область, розміри якої співвимірні з де-Бройлівською довжиною хвилі фотона, містить в собі *не всю* його енергію, а лише її переважну *долю*. Розміри ж просторової області, якій "розміщувалася б" *вся* енергія фотона – безмежно великі. Таким чином, можна вважати, що фотон, падаючи на ДГ "накриває" собою її *всю* і проходить крізь неї подібно тому, як це робить континуальна хвиля – *відразу через всі її щілини* – дифрагуючи на них. Відповідно до частоти осциляції ЕМ поля фотона і кроку ДГ, результатом проходження фотона крізь ДГ буде утворення за нею, просторово періодичного розподілу густини ймовірності напрямків руху фотона, як згустку ЕМ енергії, що пройшов крізь ДГ. Практично реалізованим із *множини* всіх цих можливих напрямків буде лише якийсь *один* із них.

Таким же чином буде поводити себе *кожен* із множини фотонів світлового потоку, що падає на ДГ, і, відповідно, *кожен* з них буде реалізовувати лише якийсь *один* із множини ймовірно можливих напрямків руху після проходження ними ДГ. А в підсумку ми отримуємо ілюзію, що нібито на ДГ дифрагує певна континуальна світлова хвиля, результат дифракції якої можна впевнено витлумачити в термінах хвильової оптики (використовуючи такі хвильові параметри як довжина хвилі, фаза коливань, тощо).

Закінчимо цей розділ такими словами: оскільки підсумковий результат дифракції потоку фотонів вичерпно описується виразом, який витікає із уявлень про світло, як про хвилю – напрацьований математичний апарат хвильової оптики можна і слід використовувати, як робочий інструмент для опису хвильових проявів світлових потоків. При цьому слід чітко розуміти, що:

- хвильові властивості світлового потоку потенційно в повному обсязі несе в собі *кожен окремий* фотон із їх множини N , які *всі разом* складають цей світловий потік;
- *кожен окремий* фотон реалізує собою лише *один із множини N* фрагментів повної інтегро-дифракційної картини на екрані за ДГ.

То як же бути тепер з принципом Гюйгенса, фундованим, як з'ясувалося, на фізично невірних засадах, але який, попри все, дозволяє вірно витлумачувати результати проявів хвильових властивостей світлових потоків? – Нам залишається тільки зняти капелюха і схилити в пошані голову перед прозорінням генія.

Природа когерентності світлових потоків. Квантові пакети

Уявлення про те, що світловий потік складається із певних “цугів світлових хвиль”, попри всю їх фізичну непереконливість, є вельми корисними. Вони дозволяють вірно витлумачити ряд експериментальних фактів – і згадувані методи отримування когерентних світлових променів (шляхом поділу одного первинного променя на кілька вторинних), і результати наступної інтерференції вторинних променів. Це означає, що в своїй суті ці інтуїтивні уявлення є вірними і їм слід лише надати належного тлумачення, узгодженого із сучасним розумінням природи світла.

При формуванні уявлень про будову світлового потоку важливо пам'ятати, що в будь-якому (штучному, чи природному) джерелі світла (ДС) поряд зі *спонтанним* механізмом генерації фотонів діє також і механізм їх *індукованої* генерації.

Під словом *спонтанний* розуміють такий тип переходу електрона із збудженого стану в рівноважний, який відбувається *самовільно*, тобто за відсутності явних причин, що обумовлювали б його – він є *непрогнозованим, непередбачуваним*. Іноді говорять, що спонтанні переходи відбуваються з невідомих нам причин. Реально це означає, що ми не вбачаємо жодних “зовнішніх” або “внутрішніх” чинників, котрі могли б ініціювати і

обумовлювати відбуття таких переходів. Таким чином, термін *спонтанний* нам залишається розуміти виключно як *самовільний*, оскільки зрозумілих спонукальних причин для відбуття таких переходів ми ні в чому не вбачаємо.

Результатом спонтанних переходів є випромінювання квантів ЕМ енергії, параметри яких жодним чином не взаємоузгоджені між собою і мають, загалом, *випадковий* характер:

- випадкові – в межах енергетичного розмиття рівнів – величини їх *енергій (частот)*;
- випадкові *напрямки* їх рухів;
- випадкові *фази коливань* їх ЕМ полів;
- випадкові *просторові орієнтації площин поляризації* їх ЕМ полів.

На протипагу спонтанним, *індуковані* переходи електронів є чітко обумовленими. Вони ініціюються дією на збуджені, і ще не релаксовані електрони, ЕМ полів квантів, що пролітають мимо них. Ці рухомі *кванти-індуктори* були щойно генерованими в *таких же* квантових системах (атомах, молекулах, кристалах) в результаті спонтанних або також індукованих переходів в них збуджених електронів.

Особливістю *індукованих* переходів електронів є те, що генеровані таким чином кванти, *за всіма своїми параметрами є ідентичними до тих квантів, що їх індукували*. Індуковане розмножування квантів може відбуватися впродовж всього шляху їх розповсюдження в об'ємі активного робочого тіла джерела випромінювання і може набувати *лавинного* характеру. Суттєвою відмінністю індукованого механізму генерації світла від спонтанного є те, що завдяки йому лазерні джерела випромінювання генерують *когерентні* оптичні потоки – такі, що складаються з ідентичних, взаємокогерентних, фотонів.

Таким чином, завдяки спільній дії двох щойно розглянутих механізмів випромінювання, світловий потік, випромінюваний із будь-якого ДС *a priori* є вже до деякої міри когерентним і структурно впорядкованим – тобто таким, що просторово є набраним із окремих *груп квантів*. Кожна з таких груп започатковується якимось одним із *спонтанно* генерованих квантів. На своєму шляху всередині активного об'єму ДС цей квант *індукує* генерацію певного числа квантів, формуючи таким чином *групу із ідентичних квантів*. Такі окремі групи взаємоузгоджених квантів будемо називати *квантовими пакетами (КП)*. Кожний окремий КП в складі світлового потоку можна розглядати як певну область самоузгодженого ЕМ поля (щось на кшталт *домена* у феромагнетику або сегнетоелектрику, або мікрокристала у полікристалі). Підкреслимо: параметри квантів всередині кожного окремого КП є взаємоузгодженими, бо всі ці кванти за своїми параметрами є ідентичними до того *першого* кванта, що започаткував цей КП. Параметри квантів із сусідніх КП між собою *не обов'язково*

мають бути узгодженими, адже ці КП були започатковані різними спонтанно генерованими квантами.

Таким чином, завдяки дії механізму індукованого випромінювання, світло, що випромінюється із будь-якого ДС, не є зовсім хаотичним набором ніяк неузгоджених між собою квантів, а завжди є більшою, чи меншою мірою впорядкованим потоком, що є набраним із окремих КП. При цьому “якість” світла (в сенсі його когерентності) визначається саме розмірами КП, що складають світловий потік – чим вони є просторово більшими (довшими, ширшими), тим “якіснішим” буде світловий потік, що складається з них.

Уявлення про квантово-пакетну будову світлового потоку дозволяє надати ясного фізичного тлумачення поняттю про “цуги світлових хвиль”: все стає простим і зрозумілим, якщо під «цугом хвиль» розуміти «КП». Просторова протяжність КП («довжина цугу») при цьому більше не пов’язується з часом існування збудженого стану атома і визначається виключно умовами формування КП в ДС. Зрозумілим стає і поділ “цугів” на напівпрозорих дзеркалах: частина квантів з кожного КП просто проходить через напівпрозоре дзеркало, а решта – просто відбивається від нього.

Уявлення про КП дозволяє пояснити особливості світлових потоків, генерованих різними ДС. Відомо, наприклад, що показники когерентності газосвітних ДС кращі, ніж теплових. Це пояснюється тим, що газосвітні ДС мають порівняно великі (геометрично) об’єми і невеликі концентрації активних центрів, здатних поглинаючи енергію збудження, спонтанно або індуковано перевипромінювати її. Окремо слід відзначити сприятливі умови для розповсюдження світла в цих джерелах, завдяки чому спонтанно чи індуковано генеровані кванти можуть безперешкодно (без поглинання чи розсіювання) долати значні шляхи всередині ДС. Впродовж таких рухів вони можуть індукувати випромінювання інших збуджених атомів, формуючи таким чином КП, що мають значні просторові розміри.

Низька когерентність світла, що випромінюється тепловими ДС (наприклад, лампами розжарювання) обумовлена тим, що випромінювання квантів світла в них відбувається практично тільки з поверхні розжареного тіла, а отже умови для розвитку процесів індукованого випромінювання і формування КП є несприятливими.

Очевидною стає і висока когерентність лазерного випромінювання – завдяки створенню позитивного оптичного зворотного зв’язку, когерентні фотони з одного КП можуть тривалий час існувати всередині високодобротних ($Q \approx 10^9 \dots 10^{10}$) великогабаритних (до кількох метрів) оптичних резонаторів лазерів, розмножуючись в них протягом всього цього часу. Завдяки цьому сучасні газові лазери здатні генерувати КП багатокілометрових довжин, що суттєво перевищує розрахунково-оцінкові довжини цугів світлових хвиль (~ 3 м).

Квантові пакети і спектральні характеристики оптичного потоку.

Приймаючи квантово-пакетну модель будови світлового потоку, пов'яжемо його спектральні характеристики з лінійними розмірами КП, що утворюють цей оптичний потік

Отже, хай КП є лінійним набором (ланцюжком) із ідентичних фотонів, що рухаються один за одним (що, власне, і є моделлю “цугу світлових хвиль”). Промодельюємо коливання електричного поля, яке виникає під час руху такого КП відносно нерухомого спостерігача, що перебуває в точці $x = 0$, плоскою біжучою хвилею, що рухається вздовж осі x :

$$E(t) = \begin{cases} E_0 \sin \omega_0 t & \text{при } 0 \leq t \leq \tau \\ 0 & \text{при } t > \tau \end{cases}, \quad (4)$$

де E_0 – амплітудне значення напруженості електричного поля; $\tau = nT$ – часова протяжність КП, що складається із n фотонів, порохованих в напрямку руху КП; $T = 2\pi/\omega_0$ – період світлової хвилі або, в нашій інтерпретації, часова протяжність одного фотона в напрямку його руху.

Якщо функція скінчена і може бути проінтегрованою, то згідно з теоремою Фур'є, вона може бути представленою у вигляді безперервної суми нескінченного числа гармонічних компонент з нескінченно малими амплітудами. В нашому випадку це означає, що коливання напруженості електричного поля ЕМ світлової хвилі $E(t)$, викликане проходженням одного КП, можна розглядати, як суперпозицію монохроматичних коливань з різними частотами ω :

$$E(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} E(\omega) e^{i\omega t} d\omega. \quad (5)$$

Згідно з властивостями перетворення Фур'є, справедливою є також рівність:

$$E(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} E(t) e^{-i\omega t} dt, \quad (6)$$

що дозволяє визначити спектральну густину випромінювання $E(\omega)$, або частотний спектр коливання $E(t)$.

Підставляючи (4) в (6) і інтегруючи в межах від 0 до τ (там, де функція $E(t)$ визначена), отримаємо:

$$E(\omega) = E_0 \frac{\omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2} \left[1 - e^{-i\omega\tau} \left(\cos \omega_0\tau + i \frac{\omega}{\omega_0} \sin \omega_0\tau \right) \right] \quad (7)$$

Оскільки реально ми маємо справу не зі спектром $E(\omega)$, а спостерігаємо (чи реєструємо) спектральну інтенсивність світла, визначимо останню як:

$$I = E(\omega) \cdot E^*(\omega), \quad (8)$$

де $E^*(\omega)$ – комплексна величина, спряжена з $E(\omega)$. Провівши обрахунки згідно з (8) і (7), отримаємо:

$$I = E_0^2 \frac{\omega_0^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2} \left[(\cos \omega_0 \tau - \cos \omega \tau)^2 + \left(\sin \omega \tau - \frac{\omega}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau \right)^2 \right] \quad (9)$$

Вираз (9) можна суттєво спростити, якщо прийняти до уваги, що КП є ланцюжком із n фотонів (де n , очевидно, ціле число). Приймаючи часову протяжність одного фотона T такою, що дорівнює періоду коливань світлової хвилі,

зробимо заміну: $\tau = nT = \frac{2\pi n}{\omega_0}$. З урахуванням цього, (9) набуде вигляду:

$$I = \frac{2 E_0^2}{\omega_0^2} \cdot \frac{\left(1 - \cos 2\pi n \frac{\omega}{\omega_0} \right)}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right)^2} \quad (10)$$

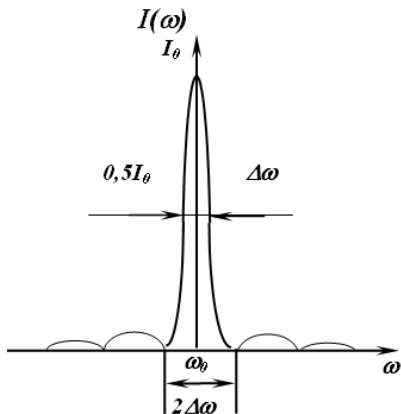


Рис.1. Спектральна густина інтенсивності світла, що викликається проходженням одного КП.

$\Delta\omega$ – ширина спектральної кривої, визначена на половинному рівні $I(\omega)$; $2\Delta\omega$ – ширина смуги частот між двома першими нулями кривої $I(\omega)$

Максимум спектрального розподілу (10) відповідає умові: $\omega = \omega_0$. Невизначеність виразу (10) за цієї умови легко розкривається:

$$I_{\max} = \left(\frac{E_0 \tau}{2} \right)^2 = \left(\frac{E_0 \pi n}{\omega_0} \right)^2 \quad (11)$$

Як видно з (11), інтенсивність спектру в його максимумі стрімко зростає при збільшенні τ – часової протяжності КП.

Основним параметром спектрального розподілу інтенсивності світла є півширина його спектральної лінії $\Delta\omega_{0,5}$, яка визначається на половинному рівні інтенсивності: $I=0,5I_{\max}$. На жаль, трансцендентність виразів (9) і (10), не дозволяє отримати узагальненого аналітичного виразу для $\Delta\omega_{0,5}$. В кожному конкретному випадку, маючи експериментально визначену залежність $I(\omega)$, величину $\Delta\omega_{0,5}$ можна визначити або графічно, або, апроксимувавши $I(\omega)$, скористатися для визначення $\Delta\omega_{0,5}$ числовими методами. Та все ж, бажано було б мати аналітичний вираз, який пов'язував би основний параметр спектрального розподілу $I(\omega)$ з параметрами КП. Це давало б можливість досліджувати, як змінюються частотні параметри спектру, залежно від часової протяжності КП.

Спробуємо отримати такий вираз. Графічне зображення залежності $I(\omega)$, згідно з виразом (10), має вигляд, представлений на рис.1. Як видно з цього рисунку, за міру півширини спектральної лінії з невеликою похибкою можна прийняти половину інтервалу $2\Delta\omega$ між двома першими (рахуючи від ω_0 вліво і вправо) нулями. Умовою визначення частот перших нулів, очевидно, буде: $2\pi n \left(\frac{\omega_0 \pm \Delta\omega}{\omega_0} \right) - 2\pi n = \pm 2\pi$, звідки:

$$\Delta\omega = \frac{\omega_0}{n} = \frac{2\pi}{nT_0} = \frac{2\pi}{\tau} \quad (12)$$

Отримана таким чином, ширина спектральної лінії є обернено пропорційною часовій протяжності КП і добре узгоджується з класичними уявленнями. Очевидно, при необмеженому зростанні довжини КП ($\tau \rightarrow \infty$) півширина спектральної лінії буде необмежено зменшуватись ($\Delta\omega \rightarrow 0$); мовою прихильників хвильової теорії це означає, що світлова хвиля в такому разі буде наближатися до монохроматичної з частотою ω_0 .

Квантові пакети і параметри когерентності світлового потоку

Модель квантово-пакетної будови світлового потоку дозволяє надати

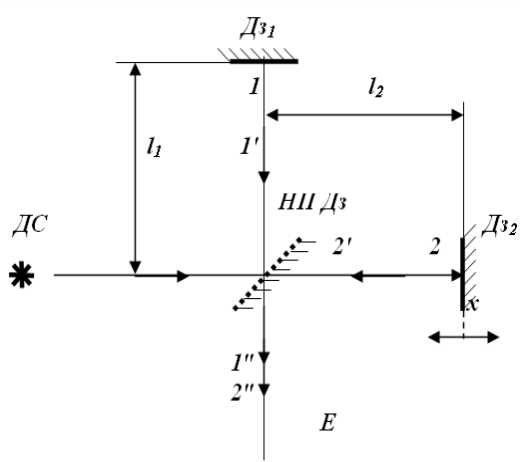


Рис. 2. Визначення довжини когерентності світла в інтерферометрі Майкельсона.

l_1, l_2 – вторинні світлові промені, утворені поділом первинного на напівпрозорому дзеркалі $НПДз$; $1', 2'$ – промені, відбиті назад непрозорими дзеркалами $Дз_1$ та $Дз_2$; $1'', 2''$ – промені, зведені $НПДз$, щоб інтерферувати на екрані E ; l_1, l_2 – довжини пліч інтерферометра; x – напрямок зсуву $Дз_2$.

кало $НПДз$, розділяється ним на два вторинних промені 1 і 2 , що розповсюджуються вздовж взаємно перпендикулярних пліч інтерферометра. Відбиті назад непрозорими дзеркалами $Дз_1$ і $Дз_2$ промені $1'$ і $2'$ знову повертаються на $НПДз$, після взаємодії з яким утворюються промені $1''$ і $2''$, котрі вже разом рухаються в напрямку екрану E . За умови рівності пліч інтерферометра ($l_1 = l_2$) на екрані буде видно чітку інтерференційну картину. Пояснюється це тим, що КП в світлових потоках $1''$ і $2''$ отримані шляхом поділу на $НПДз$ КП первинного світлового променя. За умови рівності пліч інтерферометра оптичні шляхи променів $1''$ і $2''$ однакові і в площині екрану зустрічаються “свої” частинки розділених раніше КП, які, вочевидь, є взаємокогерентними, а отже, здатними інтерферувати. Якщо довжину одного з пліч інтерферометра, збільшувати (зменшувати) (наприклад, шляхом зсуву $Дз_2$ в напрямку x), то при цьому контраст інтерференційної картини буде зменшуватися і за деякої величини зміщення $x = |l_1 - l_2|$ смугаста інтерференційна картина щезне зовсім – залишиться рівномірно освітлене

простого і зрозумілого тлумачення параметрам його когерентності. Так, довжина когерентності ($L_{ког}$) світлового потоку є просторовою протяжністю (довжиною) КП, вимірною в напрямку їх руху. Аналогічно, час когерентності ($\tau_{ког}$) є простою часовою протяжністю КП в напрямку їх руху – час протягом якого КП пролітає повз нерухомого спостерігача.

Ці величини можна легко визначити експериментально за допомогою інтерферометра Майкельсона (рис.2). Генерований джерелом світла $ДС$ первинний світловий промінь, потрапляючи на напівпрозоре дзер-

поле. Це означає, що подвійна величина зсуву $2x$, яку тепер додатково мають подолати одні з половинок розділених на **НПДз** КП, стала більшою за їх власні довжини і вони тепер “запізнюються” на зустріч на екрані зі “своїми” половинками. Там тепер зустрічаються вже половинки з різних КП, які між собою некогерентні і інтерферувати не здатні. Із опису цього досліджу стає очевидним, що довжина когерентності світлового потоку $L_{\text{ког}} = 2x$ і визначається довжинами КП, що складають цей потік.

Вочевидь, час когерентності $\tau_{\text{ког}}$ світлового потоку визначиться як частка від ділення довжини когерентності на швидкість світла:

$$\tau_{\text{ког}} = \frac{L_{\text{ког}}}{c} \quad (13)$$

Скориставшись (12), пов’яжемо $L_{\text{ког}}$ з півшириною спектральної лінії:

$$L_{\text{ког}} = c\tau_{\text{ког}} = c \frac{2\pi}{\Delta\omega} \quad (14)$$

На практиці часто розподіл інтенсивності в оптичних спектрах досліджують, як функцію довжини хвилі світла. Пов’яжемо величину $L_{\text{ког}}$ з півшириною спектральної лінії $\Delta\lambda$, скориставшись для цього очевидним співвідношенням: $\left| \frac{d\lambda}{\lambda} \right| = \left| \frac{d\omega}{\omega} \right|$:

$$L_{\text{ког}} = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}; \quad (15)$$

цей вираз для $L_{\text{ког}}$ також повністю співпадає з відомим.

Відомо, що вперше інтерференцію світла спостерігав Т.Юнг, скориставшись для цього сонячним світлом. Користуючись виразом (15) спробуємо дати оцінку величині $L_{\text{ког}}$ для сонячного світла. Спектр сонячного випромінювання є близьким до спектру АЧТ з температурою 5770 К. Максимум спектрального розподілу при цьому припадає на довжину хвилі $\lambda_0 \cong 0,55$ мкм. Для визначення півширини спектральної кривої сонячного випромінювання скористаємось формулою Планка у вигляді:

$$u_{\lambda,T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}. \text{ Підставляючи сюди відомі числові дані для сонячного}$$

випромінювання, визначимо спочатку спектральну густину його інтенсивності в максимумі спектральної кривої $(u_{\lambda,T})_{\text{max}}$, а потім, дорівнявши праву частину виразу величині $0,5(u_{\lambda,T})_{\text{max}}$, отримаємо умову для знаходження граничних (по рівню 0,5) величин λ , різниця яких і визначить величину $\Delta\lambda$. Опускаючи, власне, розрахунки, наведемо підсумковий результат: $\Delta\lambda \cong 0,6$ мкм. Підставляючи в (15) відповідні для сонячного випромінювання величини, отримаємо: $L_{\text{ког}} \cong 0,5$ мкм. Отримана таким чином величина $L_{\text{ког}}$ є співвимірною з довжинами світлових хвиль в складі сонячного випромінювання З цього напрошується висновок, що в потоці сонячного світла немає КП, або, як ще кажуть – Сонце є джерелом некогерентного

світла. Це дійсно так, якщо визначати когерентність хвиль, що накладаються, як взаємоузгодженість протягом тривалих інтервалів часу фаз їх коливань. Очевидно, що така дефініція когерентності може бути застосованою виключно до монохроматичних (одночастотних) хвиль. Оскільки сонячне світло з його широким спектром частот *a priori* є немонохроматичним, то виходить, що немає сенсу навіть говорити про його когерентність.

Але ж Юнг спостерігав інтерференцію саме сонячного світла і при тому в усіх його кольорах райдуги! Та й ми буденно спостерігаємо це явище на стінках мильних бульбашок або на плівках мастила на поверхні калюж в дощову погоду. В чім же тут справа? А справа в тім, що вторинні когерентні промені в щойно перерахованих прикладах отримуються поділом первинного світлового потоку (а отже, і КП, що його складають), але вже не в “поздовжньому”, а в “поперечному” напрямку відносно напрямку розповсюдження світла. Тобто, в усіх цих прикладах інтерференції є сенс говорити про когерентність світла, але не при *поздовжню* його когерентність, а про *поперечну*. Теплове випромінювання з поверхні Сонця хоча і є результатом хаотичного теплового руху плазмових часток, та все ж певна доля квантів світла і в цьому випадку може генеруватися індукованим шляхом і утворювати КП, хай, може, і невеликої “довжини”, але зате такі, що мають певну “ширину”.

Радіус (розмір) та об'єм когерентності.

Таким чином, окрім таких характеристик світлового потоку як *довжина когерентності* та *час когерентності*, які визначаються просторовою протяжністю КП, виміряною в напрямку поширення світла, для реальних світлових потоків існують ще й такі його характеристики як *радіус* (або *розмір*) *когерентності*, $r_{\text{ког}}$ та *об'єм когерентності*, $V_{\text{ког}}$. Під $r_{\text{ког}}$ розуміють максимальну відстань в межах світлового потоку, в напрямку перпендикулярному до напрямку його поширення, на якій ще можливі прояви інтерференції. З точки зору квантово-пакетної будови світлового потоку, $r_{\text{ког}}$ є поперечним розміром КП (їх “шириною”, “товщиною”) – просторовою протяжністю КП в напрямку, перпендикулярному до напрямку поширення світлового потоку.

Експериментально встановлено, що для сонячного світла, яке падає на поверхню Землі, $r_{\text{ког}}$ становить величину ~ 60 мкм. Разом з тим, для світла, що приходить до нас від інших, значно віддаленіших, зірок, $r_{\text{ког}}$ є значно більшим. Виходячи із сформованих уявлень про квантово-пакетну будову світлового потоку, слід припустити, що поперечні розміри КП при їх поширенні у просторі *зростають*. Таке припущення є цілком природнім. У повторюваному всіма і скрізь (і нами в тому числі, див., наприклад, вище, с.12) загальному твердженні, що “*при індукованих переходах електронів генеруються кванти ЕМ енергії, які є ідентичними до тих квантів, що їх індукували*”, слово “ідентичними” не слід розуміти аж надто буквально. Наведене

твердження насправді є абстракцією, гіперболою наших бажань і може слугувати наочним прикладом *ідеалізованих* моделей природних явищ. Природа ж не знає абстракцій. А реальність полягає в тому, що яким би досконалим не було ДС, його випромінювання, наприклад, *ніколи* не буде *абсолютно монохроматичним* – завжди буде існувати скінчена ширина спектральної смуги частот (або довжин хвиль) випромінюваного ним світла. Ця ширина може бути як завгодно малою (зокрема, для газових лазерів вона може скласти величину всього соті долі герца або 10^{-23} м!), але вона *ніколи не буде нульовою*, бо інакше довжина когерентності такого світла мала б бути нескінченно великою. Оскільки швидкість світла скінчена, то це означає, що лазер мусив би працювати нескінченно довгий час, чого, певне ж, бути не може. Підсумовуючи сказане, можна стверджувати, що серед індуковано генерованих квантів, що утворюють КП, завжди є певний розкид їх частот.

Подібні міркування можна висловити і стосовно “ідентичності” інших параметрів індуковано генерованих квантів. Зокрема, можна стверджувати, що має бути і певний розкид напрямків просторової орієнтації векторів імпульсів руху квантів, що утворюють КП. Це означає, що кутова (просторова) розбіжність квантів, що належать до складу одного КП, є їх природною властивістю, започаткованою вже на стадії формування КП в ДС.

Виходячи з факту існування просторової когерентності світла від далеких зірок, робимо висновок, що незважаючи на значну просторову розбіжність КП, початкова спорідненість квантів (їх внутрішня взаємоузгодженість в межах КП) не поривається – кванти зберігають взаємокогерентність на протязі всього часу існування КП, яка не порушується ні при відбитті світла, ні при його заломленні. Оскільки фотони в цілому є електронейтральними утвореннями, то можна припустити, що поперечні розміри КП є лінійною функцією пройденого ним шляху (або часу його існування) тобто, можна вважати, що *кут розбіжності фотонів є величиною сталою* на протязі всього часу існування КП і, що він, зокрема, не залежить від об’ємної концентрації фотонів.

Мінімальний початковий поперечний розмір КП (відразу ж на виході його з ДС) можна прийняти співвимірним з довжиною світлової хвилі. Зауважимо, що для лазерних ДС це може бути і не так. Багаторазові відбиття квантів з одного КП від дзеркал оптичного резонатора можуть суттєво збільшити поперечні розміри КП (втім, не більше, ніж діаметр вихідного променя лазера).

Виходячи з викладених вище міркувань, можна записати взаємозв’язок між $r_{\text{ког}}$ світлового потоку і пройденою ним відстанню l :

$$r_{\text{ког}} = \Phi \cdot l \quad (16)$$

Величину кута розбіжності КП Φ обрахуємо, скориставшись відомою величиною $r_{\text{ког}}$ для сонячного світла $\Phi \approx r_{\text{ког}} / R_{\text{ЗС}} = 4,0 \cdot 10^{-16}$ рад = $8,9 \cdot 10^{-11}$ кут. сек. Тут $R_{\text{ЗС}} = 1,49 \cdot 10^{11}$ м – відстань від Землі до Сонця. Як видно із ро-

зрахунків, природна кутова розбіжність індуковано генерованих квантів є настільки малою, що реально виявляти себе вона здатна лише на астрономічних відстанях від ДС. У випадку ж наших реальних ДС вона, зазвичай, губиться на тлі інших, значно “дієвіших” причин кутових розбіжностей. Однією з таких причин може бути, наприклад, явище, так званої, дифракції

світлового потоку “на вихідному вікні” ДС: $\Theta_{\text{диф}} \cong \frac{1,22\lambda}{d}$, тут $\Theta_{\text{диф}}$ – кутова

розбіжність світлового потоку з довжиною світлової хвилі λ після його “дифракції на вихідному вікні ДС” (або іншими словами: після проходження ним через вихідний отвір ДС) що має розмір d . Для напівпровідникових лазерів з вихідними вікнами мікронних розмірів, ця причина кутової розбіжності стає визначальною для їх вихідного світлового потоку.

Природна розбіжність КП дозволяє по-новому витлумачити експериментально встановлений факт великих значень $r_{\text{ког}}$ для світла від зірок. Так, для світла від найближчої до нас зірки (Проксими, Альфи з сузір'я Центавра, віддаленої від нас на $\sim 4,5$ св. роки або на $\sim 4,3 \cdot 10^{16}$ м) розрахована за виразом (16) величина $r_{\text{ког}}$ складає ~ 17 м. Це число добре узгоджується з даними Майкельсона по вимірюванню просторової когерентності світла від зірок за допомогою інтерференційного телескопу.

Об'єм когерентності світлового потоку, $V_{\text{ког}}$, згідно з нашими уявленнями про квантово-пакетну будову світлового потоку, визначається, очевидно, просторовим об'ємом КП. Приймаючи КП осесиметричним, можна записати: $V_{\text{ког}} = 0,25\pi L_{\text{ког}} r_{\text{ког}}^2$ у відомому виразі для $V_{\text{ког}}$ множника $0,25\pi$ немає). Очевидно, об'єм когерентності світлового потоку при його поширенні також зростає.

Далі буде

Дем'яненко П.О., Зінковський Ю.Ф. Про когерентність електромагнітних хвиль, зокрема, світлових (частина 2). 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 2). 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 2). Quantum-packet model of light beam was proposed. This model organically reconciles wave-corpuscle properties of light beam and explains nature of it coherency and physics sense of it parameters.

Key words: quantum packets, coherency, coherency parameters.