

Відгук опонента

провідного наукового співробітника відділу статистичної фізики та квантової теорії поля Інституту теоретичної фізики імені О.І. Ахієзера ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут», доктора фізико-математичних наук,
старшого дослідника

Сотнікова Андрія Геннадійовича

на дисертаційну роботу

Єременка Івана Сергійовича

«Реалістичні вимірювання багатомодового квантового світла»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія»
(галузь знань 10 – «Природничі науки»)

Дисертаційна робота І.С. Єременка присвячена дослідженню вимірювальної статистики багатомодового квантового світла, а також розробці послідовного теоретичного опису вимірювань, що явно враховує реалістичні характеристики використовуваних детекторів. Зокрема, увагу зосереджено на формалізмі додатних операторнозначних мір, фазово-просторових представленнях Кехілла–Глаубера, аналізі гібридної (неперервно-дискретної) схеми вимірювання та реалістичних моделях фотодетектування з частковим розрізненням чисел фотонів. Запропонований у дисертаційній роботі підхід до аналізу гібридної схеми, що поєднує збалансоване гомодинне детектування та порогове фотодетектування, дає змогу виявляти неklasичні кореляції світла, які не зводяться до нелокальності Белла. Отриманий матрично-функціональний опис фотолічильної статистики гаусівської бозонної вибірки з реалістичними фотодетекторами може бути використаний для покращення інтерпретації результатів масштабних фотонних експериментів, спрямованих на демонстрацію квантової переваги, а також для побудови практичних процедур їх валідації. Таким чином, тема дисертаційної роботи І.С. Єременка є беззаперечно **актуальною**. Варто відзначити, що дисертантом виконано належну апробацію результатів на міжнародних наукових конференціях і симпозіумах світового рівня.

Актуальність досліджень дисертаційної роботи І.С. Єременка підтверджується також тим, що вони є складовою частиною низки дослідницьких проєктів, які виконувались у рамках двох відомчих науково-дослідних тем Відділення фізики і астрономії НАН України «Індуковані шумом динаміка та кореляції в нерівноважних системах» та «Стохастичні процеси в конденсованих середовищах, біологічних системах та полях випромінювання», двох проєктів Національного фонду досліджень України № 2020.02/0111 «Неklasичні та гібридні кореляції квантових систем за реалістичних умов» і № 2023.03/0165 «Квантові кореляції електромагнітного випромінювання», а також міжнародного

проекту Фонду Саймонса SFI-PD-Ukraine-00014573, які виконувались в Інституті теоретичної фізики імені М.М. Боголюбова НАН України.

Дисертаційна робота складається зі вступу, трьох основних розділів, загальних висновків, списку літератури та одного додатка. Розглянемо результати основних розділів у відповідній послідовності.

У **першому розділі** наведено огляд теоретичного апарату, необхідного для опису багатомодових оптичних станів та вимірювань. Сформульовано операторний опис оптичних мод, багатомодових і гаусівських квантових станів та їхніх коваріаційних матриць, а також опис квантових вимірювань через формалізм додатних операторнозначних мір. Введено фазово-просторові представлення Кехілла–Глаубера та отримано інтегральну фазово-просторову форму правила Борна, яка встановлює зв'язок між квазіймовірнісним описом стану і фазово-просторовими символами елементів ДОЗМ. Розглянуто реалістичні моделі фотодетектування з розрізненням чисел фотонів, зокрема порогові детектори, масиви порогових детекторів та методи детектування на основі підрахунку імпульсів фотоструму.

У **другому розділі** досліджено гібридну схему вимірювання двомодового світла, у якій одна мода аналізується за допомогою збалансованого гомодинного детектування, а інша — за допомогою порогового фотодетектування після фазово-просторового зміщення. На прикладі двомодового стисненого вакуумного стану показано, що відповідна вимірювальна поведінка не демонструє порушення локального реалізму у сенсі нелокальності Белла, однак порушує нерівність, що відповідає більш слабкій моделі класичного фазово-просторового опису. Таким чином, показано, що гібридне вимірювання дозволяє виявляти неklasичні кореляції світла на рівні конкретної вимірювальної статистики, не зводячи їх до нелокальності Белла.

Третій розділ присвячено гаусівській бозонній вибірці за умов реалістичного розрізнення чисел фотонів. Отримано загальний матрично-функціональний вираз для фотолічильної статистики на виході багатомодового інтерферометра, який у відповідних граничних випадках зводиться до хафніанової форми для детекторів з ідеальним розрізненням чисел фотонів та до торонтоніана для порогових детекторів. Розглянуто реалістичні моделі детектування з частковим розрізненням чисел фотонів — масиви порогових детекторів та схеми підрахунку імпульсів фотоструму з урахуванням мертвого і релаксаційного часу. На основі отриманого формалізму сформульовано процедури валідації гаусівської бозонної вибірки з використанням згрупованих орбітальних статистик, критерію Пірсона та баєсівського тесту. Також показано, що навіть часткове розрізнення чисел фотонів істотно підвищує ефективність розрізнення квантової статистики від класичних альтернатив.

Таким чином, у дисертаційній роботі І.С. Єременка шляхом розвинення та застосування операторного опису квантових вимірювань і фазово-просторового формалізму **отримано ряд нових важливих результатів та розвинено сучасні**

методи теоретичного дослідження. Дисертація повністю відповідає спеціальності 104 – «Фізика та астрономія».

На мою думку, до **найбільш цікавих наукових результатів**, що отримані у дисертації, можна віднести отриманий у розділі 3 загальний матрично-функціональний опис фотолічильної статистики гаусівської бозонної вибірки для довільних реалістичних фотодетекторів. Для цього дисертантом послідовно введено опис вимірювань через елементи додатної операторнозначної міри та отримано компакту формулу для ймовірності реєстрації заданого патерну, яка виражається через функціонал матриці, пов'язаної з коваріаційною матрицею Q -представлення вихідного гаусівського стану. Показано, що в граничних випадках цей загальний вираз відтворює відомі результати — хафніанову форму для детекторів з ідеальним розрізненням чисел фотонів та торонтоніанову форму для порогових детекторів, — а також дозволяє описувати проміжні реалістичні моделі: масиви порогових детекторів, а також методи детектування на основі підрахунку імпульсів фотоструму з мертвим часом (лавинні фотодіоди) і релаксаційним часом (надпровідникові нанодротові однофотонні детектори). Слід зазначити, що розглянуті моделі детектування відповідають реальним типам фотодетекторів, які застосовуються в сучасних експериментах з гаусівської бозонної вибірки, що дає змогу безпосередньо використовувати отримані результати для інтерпретації й валідації таких експериментів. Таким чином, отримані у дисертації **результати та розвинуті методи мають практичне значення**. У цілому, дослідження дисертаційної роботи доповнюють і розширюють наявні уявлення про роль вимірювального процесу в описі багатомодового квантового світла, зокрема про співвідношення між нелокальністю Белла та фазово-просторовою неklasичністю, а також про вплив реалістичного фотодетектування на валідацію квантово-обчислювальних схем, що підтверджує також **фундаментальне теоретичне значення** отриманих результатів.

Обґрунтованість та достовірність отриманих в дисертації теоретичних результатів забезпечується застосуванням сучасних добре апробованих методів математичної та теоретичної фізики, зокрема формалізму додатних операторнозначних мір та фазово-просторових представлень квантової оптики. У рамках застосованих модельних припущень наукові положення, висновки, сформульовані у дисертації, є цілком обґрунтованими. Достовірність результатів підтверджується також їх публікацією у двох статтях у провідному фаховому виданні *Physical Review A*.

Окрім організацій, у яких проводились семінари дисертанта за темою дисертації, вважаю за доцільне ознайомити з науковими результатами дисертаційної роботи І.С. Єременка фахівців таких інститутів НАН України і університетів МОН України, як Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Інститут фізики НАН України (м. Київ), Інститут радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова НАН України (м. Харків).

За змістом дисертації можна зробити такі **зауваження**:

- 1) У формулі (1.62) вперше використано аббревіатуру TMSV, хоча у списку скорочень на с. 16 його явно не розшифровано. Там лише наявна аббревіатура українською ДМСВС — двомодовий стиснений вакуумний стан; для узгодженості варто було би навести пояснення щодо еквівалентності скорочення англomовному аналогу — two-mode squeezed vacuum (TMSV).
- 2) Розглянута в розділі 2 гібридна схема і критерії в підрозділах 2.5-2.6 сформульовані для двомодового (біпартитного) випадку, тоді як апарат розділу 1 і задача гаусівської бозонної вибірки в розділі 3 явно багатомодові. Чи можна узагальнити КХШХ-подібний критерій локального реалізму та тест на фазово-просторову неklasичність на багатосторонній/багатомодовий випадок (наприклад, кілька пар гомодин і пороговий детектор), і чи очікується збереження тієї самої якісної картини — локальний реалізм зберігається, але фазово-просторова неklasичність присутня?
- 3) У підрозділі 3.1 (с. 97–99) автор явно виключає з розгляду темнові відліки, післяімпульси, нестабільність інтерферометра та спектральну/просторову розрізняюваність фотонів. Було б корисно дізнатися, чи можуть ці ефекти бути включені в той самий формалізм ДОЗМ без істотної зміни його структури, і чи слід очікувати, що врахування, наприклад, темнових відліків якісно змінить висновок про корисність часткового розрізнення чисел фотонів для валідації гаусівської бозонної вибірки.
- 4) У чисельних ілюстраціях (підрозділ 3.9) використано значення на кшталт $K=3$ для масиву порогових детекторів і $\tau_d=0,25\tau_m$ для мертвого часу лавинного фотодіоду, які, судячи з тексту, є ілюстративними. Наскільки ці значення відповідають характеристикам реальних лавинних фотодіодів чи масивів надпровідникових нанодротових однофотонних детекторів, що застосовуються в сучасних експериментах з гаусівської бозонної вибірки? Чи зберігається продемонстроване покращення валідаційної здатності при використанні реалістичних (взятих з експерименту) значень цих параметрів?

Хотів би, однак, зазначити, що перелічені зауваження не впливають істотно на отримані автором дисертації результати і на загальну високу оцінку роботи. Дисертація добре структурована і написана належною для роботи науковою мовою. Основні результати опубліковано, зокрема, у двох статтях у провідному науковому виданні з квартилем Q1 (Physical Review A). При цьому, очевидно, що значний внесок у роботу належить особисто дисертанту. Новизна та наукове значення отриманих результатів не викликають сумнівів. Опубліковані роботи повно і вірно відбивають зміст і висновки дисертаційної роботи, а також особистий внесок здобувача. Дисертація І.С. Єременка є завершеною науковою роботою, в якій отримано нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності розв'язують важливу наукову проблему теоретичної фізики, а саме: розроблено послідовний теоретичний опис вимірювань багатомодового квантового світла з урахуванням реалістичних характеристик вимірювальних приладів, який застосовано до аналізу неklasичних кореляцій у гібридних вимірювальних схемах

та до опису й валідації гаусівської бозонної вибірки за наявності реалістичного розрізнення чисел фотонів.

Вважаю, що, враховуючи актуальність обраної теми, новизну та наукову значущість отриманих результатів, достовірність і обґрунтованість висновків, дисертаційна робота «Реалістичні вимірювання багатомодового квантового світла» повністю задовольняє вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 зі змінами, а її автор, Іван Сергійович Єременко, поза сумнівом, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 — «Фізика та астрономія» (галузь знань 10 — «Природничі науки»).

Опонент

доктор фіз.-мат. наук, старший дослідник,
провідний науковий співробітник
відділу статистичної фізики та квантової теорії поля
Інституту теоретичної фізики імені О.І. Ахієзера
ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут»

Андрій СОТНІКОВ