

Відгук офіційного опонента

доктора фізико-математичних наук, професора кафедри теоретичної фізики
імені професора Івана Вакарчука Львівського національного університету імені
Івана Франка, член-кореспондента

НАН України Гнатенко Христини Павлівни

на дисертаційну роботу **Єременка Івана Сергійовича**

на тему: «Реалістичні вимірювання багатомодового квантового світла»,
представлену до захисту на здобуття ступеня доктора філософії
за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія»

Дисертаційна робота Івана Сергійовича Єременка присвячена розвитку теоретичного опису вимірювань багатомодового квантового світла. У роботі розглянуто дві важливі задачі: виявлення неklasичних кореляцій за допомогою гібридних вимірювальних схем та дослідження гаусівської бозонної вибірки з урахуванням неідеальності фотодетекторів, зокрема їхньої обмеженої здатності розрізняти кількість фотонів, мертвого та релаксаційного часу.

Актуальність роботи зумовлена необхідністю єдиного послідовного підходу до опису вимірювань багатомодового квантового світла, який охоплює як гібридні схеми з неперервними та дискретними результатами, так і задачі фотонного підрахунку з урахуванням реалістичних характеристик розрізнення числа фотонів. Для дослідження квантових ефектів і валідації квантових оптичних систем недостатньо розглядати ідеалізовану модель вимірювання, необхідно враховувати реальні властивості експериментального приладу. Представлений у дисертаційній роботі формалізм дає змогу поєднати опис багатомодового квантового стану з реалістичною моделлю вимірювання.

Наукова новизна досліджень. У дисертаційній роботі вперше отримано ряд вагомих наукових результатів. Зокрема, на прикладі двомодового стисненого вакуумного стану вперше показано, що неklasичні кореляції у гібридних схемах вимірювання можуть проявлятися навіть за відсутності нелокальності Белла у відповідній статистиці. Вперше отримано вираз, що описує статистику фотонного підрахунку на виході гаусівської бозонної вибірки для довільних типів детекторів, представлених елементами додатної операторнозначної міри. Вперше знайдено співвідношення для опису моделей розрізнення числа фотонів з урахуванням неідеальності фотодетекторів. Вперше узагальнено процедури валідації гаусівської бозонної вибірки з урахуванням згрупованих статистик, орбітальних ймовірностей, критерію Пірсона, а також баєсівського тесту. Також у дисертаційній роботі вперше показано, що неповне розрізнення числа фотонів суттєво впливає на статистичний розподіл вихідних даних гаусівської бозонної вибірки.

Практичне значення результатів дисертації полягає в тому, що вони відкривають можливості для точнішої інтерпретації експериментів із багатомодовим квантовим світлом з урахуванням характеристик фотодетекторів, їх неідеальності. Наукові напрацювання, представлені в роботі, можуть бути застосовані для дослідження неklasичних кореляцій, аналізу гібридних

вимірювальних схем та валідації квантових оптичних пристроїв. Урахування неідеальності детекторів дає змогу коректніше порівнювати експериментальні результати з теоретичними моделями.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами та грантами. Дисертаційну роботу виконано в Інституті теоретичної фізики імені М. М. Бо-голюбова Національної академії наук України в межах науково-дослідних відомчих тем Відділення фізики і астрономії Національної академії наук України «Індуковані шумом динаміка та кореляції в нерівноважних системах» (0120U101347), «Стохастичні процеси в конденсованих середовищах, біологічних системах та полях випромінювання» (0125U000031), а також проєктів Національного фонду досліджень України: «Некласичні та гібридні кореляції квантових систем за реалістичних умов» (№ 2020.02/0111), «Квантові кореляції електромагнітного випромінювання» (№ 2023.03/0165) та міжнародного проєкту, що фінансувався Фондом Саймонса (SFI-PD-Ukraine-00014573).

Структура та зміст дисертації, її завершеність і відповідність установленим вимогам. Дисертаційна робота складається з анотацій українською та англійською мовами, вступу, трьох розділів, загальних висновків та списку використаних джерел. Наприкінці роботи подано список публікацій і конференцій, на яких було представлено результати досліджень.

У вступі висвітлено актуальність обраної теми, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено його об'єкт і предмет, розкрито наукову новизну отриманих результатів та їхнє теоретичне і практичне значення. Також представлено інформацію про апробацію результатів дослідження та публікації, підготовлені за темою дисертації.

У першому розділі представлено теоретичний апарат для опису багатомодового квантового світла і квантових вимірювань. Розглянуто додатні операторнозначні міри, гаусівські стани, представлення Кегілла–Глаубера та реалістичні моделі фотодетекторів. Також у розділі представлено реалістичні моделі детектування з розрізненням числа фотонів. Відповідний формалізм застосовано до аналізу статистики локальних вимірювань.

У другому розділі розглянуто приклад змішаної неперервно-дискретної вимірювальної статистики. Зокрема, проаналізовано гібридну схему вимірювання двомодового квантового світла, що поєднує гомодинне детектування та порогове фотодетектування після когерентного зміщення. Вивчено сукупність умовних ймовірностей результатів для різних локальних налаштувань. На прикладі двомодового стисненого вакуумного стану проаналізовано некласичні кореляції. Показано, що вони можуть проявлятися як фазово-просторова некласичність без порушення локального реалізму (нелокальності Белла). Продемонстровано відмінність між нелокальністю Белла та фазово-просторовою некласичністю. Результати розділу опубліковано у статті в журналі *Physical Review A* у 2022 році.

У третьому розділі розглянуто гаусівську бозонну вибірку у випадку реалістичного фотодетектування. Для досліджень застосовано теоретичний апарат для опису багатомодового квантового світла і квантових вимірювань.

Проаналізовано багатомодову фотолічильну статистику з урахуванням характеристик реальних фотодетекторів, мертвого та релаксаційного часу, а також обмеженого розрізнення числа фотонів. Для гаусівського стану знайдено загальний вираз для фотолічильних імовірностей, який у граничних випадках узгоджується з результатами, представленими в літературі. Окрему увагу приділено валідації гаусівської бозонної вибірки. Для розв'язання проблеми швидкого зростання кількості можливих подій при повній реконструкції розподілу розглянуто згруповані статистики зареєстрованих патернів. Показано, що модель фотодетектора суттєво впливає на спостережувані статистики та результати валідації. Результати, представлені в розділі, опубліковано у статті в журналі *Physical Review A* у 2024 році.

У загальних висновках до роботи систематизовано отримані основні наукові результати, що відповідають поставленим завданням і засвідчують досягнення мети роботи. Сформульовано основні положення проведених наукових досліджень. На завершення роботи представлено бібліографію, яка охоплює 113 джерел, та один додаток зі списком публікацій, конференцій, де були представлені результати досліджень.

Повнота викладення матеріалу дисертації у наукових публікаціях. Відповідно до додатка, представленого в роботі, результати дослідження опубліковано у двох статтях у високореєтинговому журналі *Physical Review A*, який належить до квартилю Q1 та індексується у *Web of Science* і *Scopus*. Усі публікації мають співавторів. В одній зі статей здобувач є першим автором. Результати дослідження також представлено у вигляді усної доповіді на конференції в Києві та постерної доповіді на конференції в Турині (Італія).

У дисертації Івана Сергійовича Єременка «Реалістичні вимірювання багатомодового квантового світла», а також у відповідних наукових публікаціях ознак порушення академічної доброчесності не виявлено.

Зауваження до дисертаційної роботи:

1. У дисертаційній роботі обґрунтовано важливість урахування реалістичних характеристик фотодетекторів. Підсиленню роботи сприятиме ширше обговорення того, наскільки запропоновані підходи та отримані результати змінюються у випадку інших моделей неідеальності детекторів.
2. Наявні незначні неточності в оформленні літератури. Зокрема, у посиланні 16 пропущено видання *Progress in Optics*. У посиланнях 86, 87, 90 та 91 для одного автора (K. Brádler) використано різні варіанти написання прізвища.
3. Рисунки 3.5 та 3.6 мають надто дрібні розміри, зокрема підписи осей, що дещо ускладнює аналіз представлених результатів.
4. Результати дослідження представлено автором на двох конференціях. Бажаним було б ширше представлення отриманих наукових результатів на міжнародних наукових заходах у майбутньому, що сприятиме їх поширенню та використанню іншими дослідниками.

Висловлені зауваження мають переважно рекомендаційний характер і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи, її наукову новизну, фундаментальне та практичне значення й обґрунтованість основних висновків.

Дисертаційна робота Івана Сергійовича Єременка «Реалістичні вимірювання багатомодового квантового світла» є самостійним, цілісним і завершеним науковим дослідженням, виконаним на належному науковому рівні та таким, що відповідає вимогам, установленим до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії. За актуальністю тематики, науковою новизною, рівнем виконання та значущістю отриманих результатів дисертація відповідає заявленій спеціальності 104 «фізика та астрономія», а також вимогам до відповідних робіт. Останні наведені у Постанові Кабінету Міністрів України № 261 від 23 березня 2016 року «Про затвердження Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у закладах вищої освіти» (зі змінами), у Постанові Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 року «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (зі змінами). Автор дисертаційного дослідження, Іван Сергійович Єременко, заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Офіційний опонент:

доктор фізико-математичних наук,
професор кафедри теоретичної фізики
імені професора Івана Вакарчука
Львівського національного університету
імені Івана Франка,
член-кореспондент НАН України

Христина ГНАТЕНКО

24 серпня 2026