Облікова картка дисертації

I. Загальні відомості

Державний обліковий номер: 0826U004377

Особливі позначки: відкрита

Дата реєстрації: 06-08-2026

Статус: Захищена

Реквізити наказу МОН / наказу закладу:

II. Відомості про здобувача

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Єременко Іван Сергійович

2. Ivan S. Yeremenko

Кваліфікація:

Ідентифікатор ORCID ID: 0009-0002-3072-6331

Вид дисертації: доктор філософії

Аспірантура/Докторантура: так

Шифр наукової спеціальності: 104

Назва наукової спеціальності: Фізика та астрономія

Галузь / галузі знань: природничі науки

Освітньо-наукова програма зі спеціальності: фізика та астрономія

Дата захисту: 17-09-2026

Спеціальність за освітою: фізика

Місце роботи здобувача: Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної академії наук України

Код за ЄДРПОУ: 05417124

Місцезнаходження: вул. Метрологічна, Київ, 03143, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Національна академія наук України

Ідентифікатор ROR:

III. Відомості про організацію, де відбувся захист

Шифр спеціалізованої вченої ради (разової спеціалізованої вченої ради): PhD 16549

Повне найменування юридичної особи: Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної академії наук України

Код за ЄДРПОУ: 05417124

Місцезнаходження: вул. Метрологічна, Київ, 03143, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Національна академія наук України

Ідентифікатор ROR:

IV. Відомості про підприємство, установу, організацію, в якій було виконано дисертацію

Повне найменування юридичної особи: Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної академії наук України

Код за ЄДРПОУ: 05417124

Місцезнаходження: вул. Метрологічна, Київ, 03143, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Національна академія наук України

Ідентифікатор ROR:

V. Відомості про дисертацію

Мова дисертації: Українська

Коди тематичних рубрик: 29.05.15, 29.31

Тема дисертації:

1. Реалістичні вимірювання багатомодового квантового світла

2. Realistic measurements of multimode quantum light

Реферат/анотація:

1. Дисертацію присвячено теоретичному опису вимірювань багатомодового квантового світла з урахуванням схем детектування та неідеальностей реальних фотодетекторів. Актуальність роботи зумовлена тим, що спостережувана статистика визначається не лише квантовим станом, а й властивостями вимірювального пристрою. Це особливо важливо для дослідження некласичних кореляцій і гаусівської бозонної вибірки, де скінченна здатність детекторів розрізняти числа фотонів, мертвий час і релаксаційні ефекти можуть істотно змінювати вихідну статистику та результати її валідації. Метою роботи є розвиток теоретичного опису вимірювань багатомодового квантового світла та його застосування до двох задач: аналізу гібридних вимірювальних схем для виявлення некласичних кореляцій і опису гаусівської бозонної вибірки з реалістичним розрізненням чисел фотонів. Використано операторний опис багатомодових квантових станів, формалізм додатних операторнозначних мір, характеристичні функції гаусівських станів, фазово-просторові

представлення Кехілла–Глаубера та статистичні методи аналізу вимірювальних результатів. У першій частині розглянуто гібридну схему, в якій одну моду світла аналізують за допомогою збалансованого гомодинного детектування, а другу — за допомогою порогового фотодетектування після фазово-просторового зміщення. Для неї сформульовано простір локальних налаштувань і результатів, записано спільні ймовірності та побудовано їх фазово-просторове подання через символи елементів додатних операторнозначних мір. На прикладі двомодового стисненого вакуумного стану показано, що відповідна вимірювальна поведінка не демонструє порушення локального реалізму в сенсі нелокальності Белла, але не допускає класичного фазово-просторового відтворення статистики. Отже, гібридне вимірювання дає змогу виявляти некласичні міжмодові кореляції на рівні вимірювальної статистики. У другій частині побудовано загальний опис фотолічильної статистики на виході схеми гаусівської бозонної вибірки для довільних реалістичних фотодетекторів, заданих елементами додатної операторнозначної міри. Імовірність реєстрації патерну виражено через функціонал матриці, пов'язаної з коваріаційною матрицею Q-представлення вихідного гаусівського стану. У граничних випадках загальний матричний функціонал зводиться до хафніана для детекторів з ідеальним розрізненням чисел фотонів і до торонтоніана для порогових детекторів. Принципово розрізнено фотонний патерн до детектування та зареєстрований патерн результатів, оскільки реалістичний детектор повертає результат власної вимірювальної процедури, а не обов'язково істинне число фотонів у моді. Окремо розглянуто масиви порогових детекторів зі скінченною кількістю елементів і фотодетектування на основі підрахунку імпульсів фотоструму. Для останнього враховано мертвий час, характерний для лавинних фотодіодів, і релаксаційний час, важливий для надпровідникових нанодротових однофотонних детекторів. Для окремих режимів отримано аналітичні спрощення, придатні для застосування у задачах гаусівської бозонної вибірки. Для валідації використано згруповані статистики — орбіти зареєстрованих патернів, які переходять один в один перестановками мод, а також статистики подій із кратною реєстрацією. Орбітальні ймовірності оцінено прямим сумуванням за патернами та фазово-просторовим моделюванням на основі додатного P-представлення. Сформульовано процедури порівняння статистики цільових термалізованих стиснених станів зі статистиками класичних еталонних моделей за критерієм Пірсона □ 2 і баєсівським тестом. Така процедура не є повною сертифікацією квантової переваги, однак дає практичний спосіб перевірки узгодженості експериментально доступних згрупованих статистик із цільовою моделлю та класичними альтернативами. Чисельні результати показують, що реалістична здатність детекторів розрізняти числа фотонів істотно впливає на орбітальні ймовірності та ефективність валідаційних тестів. Навіть мінімальне розрізнення чисел фотонів може підвищувати впевненість у відокремленні квантової статистики гаусівської бозонної вибірки від класичних альтернатив, тоді як нехтування мертвим часом і релаксацією може призводити до некоректної оцінки вихідної статистики. Наукова новизна полягає у демонстрації некласичних кореляцій світла в гібридній схемі вимірювання; у виведенні загального матрично-функціонального виразу для фотолічильної статистики гаусівської бозонної вибірки з довільними реалістичними фотодетекторами; у конкретизації цього виразу для основних моделей детектування з розрізненням чисел фотонів; а також у формулюванні валідаційних процедур, які безпосередньо враховують неідеальну здатність детекторів розрізняти числа фотонів. Отримані результати можуть бути використані для коректнішої інтерпретації багатомодових фотонних експериментів і вдосконалення методів валідації квантових оптичних пристроїв.

2. The thesis is devoted to the theoretical description of measurements of multimode quantum light, taking into account detection schemes and imperfections of realistic photodetectors. The relevance of the work is determined by the fact that the observed statistics depend not only on the quantum state but also on the measurement device. This is particularly important for nonclassical correlations and Gaussian boson sampling, where finite photon-number resolution, detector dead time, and relaxation effects can substantially modify the output statistics and their validation. The aim of the work is to develop a theoretical description of measurements of multimode quantum light and apply it to two problems: the analysis of hybrid measurement schemes for detecting nonclassical correlations and the description of Gaussian boson sampling with realistic photon-number resolution. The operator description of multimode quantum states, positive operator-valued measures, characteristic

functions of Gaussian states, Cahill–Glauber phase-space representations, and statistical methods for analyzing measurement outcomes are used. The first part considers a hybrid scheme in which one mode of light is analyzed by balanced homodyne detection and the other by displaced threshold photodetection. For this scheme, the space of local settings and outcomes is formulated, joint probabilities are written, and their phase-space representation in terms of the symbols of positive operator-valued measure elements is constructed. Using a two-mode squeezed vacuum state as an example, it is shown that the corresponding measurement behavior does not violate local realism in the sense of Bell nonlocality, but does not admit a classical phase-space reconstruction of the statistics. Thus, the hybrid measurement reveals nonclassical intermode correlations at the level of measurement statistics. In the second part, a general description of photocounting statistics at the output of a Gaussian boson sampling scheme is constructed for arbitrary realistic photodetectors specified by positive operator-valued measure elements. The probability of registering a pattern is expressed through a functional of a matrix associated with the covariance matrix of the Q-representation of the output Gaussian state. In the limiting cases, the functional reduces to the hafnian for detectors with ideal photon-number resolution and to the Torontonian for threshold detectors. A distinction is made between the photon pattern before detection and the registered outcome pattern, since a realistic detector returns the result of its own measurement procedure rather than necessarily the true photon number in a mode. Arrays of threshold detectors with a finite number of elements and photodetection based on counting photocurrent pulses are considered separately. For the latter, dead time, characteristic of avalanche photodiodes, and relaxation time, important for superconducting nanowire single-photon detectors, are taken into account. Analytical simplifications suitable for Gaussian boson sampling are obtained for several regimes. Grouped statistics are used for validation, namely orbits of registered patterns transformed into one another by permutations of modes, as well as statistics of collision events. Orbit probabilities are estimated by direct summation over patterns and by phase-space simulations based on the positive-P representation. Procedures are formulated for comparing the statistics of target thermalized squeezed states with classical reference models using Pearson’s □ 2 test and a Bayesian test. Such a procedure is not a full certification of quantum advantage, but provides a practical method for testing the consistency of experimentally accessible grouped statistics with the target model and classical alternatives. The numerical results show that realistic photon-number resolution substantially affects orbit probabilities and the efficiency of validation tests. Even minimal photon-number resolution can increase confidence in distinguishing the quantum statistics of Gaussian boson sampling from classical alternatives, whereas neglecting detector dead time and relaxation can lead to an incorrect assessment of the output statistics. The scientific novelty lies in demonstrating nonclassical correlations of light in a hybrid measurement scheme; deriving a general matrix-functional expression for the photocounting statistics of Gaussian boson sampling with arbitrary realistic photodetectors; specifying this expression for the main models of detection with photon-number resolution; and formulating validation procedures that directly account for the imperfect ability of detectors to distinguish photon numbers.

Державний реєстраційний номер ДіР:

Пріоритетний напрям розвитку науки і техніки: Фундаментальні наукові дослідження з найбільш важливих проблем розвитку науково-технічного, соціально-економічного, суспільно-політичного, людського потенціалу для забезпечення конкурентоспроможності України у світі та сталого розвитку суспільства і держави

Стратегічний пріоритетний напрям інноваційної діяльності: Розвиток сучасних інформаційних, комунікаційних технологій, робототехніки

Підсумки дослідження: Нове вирішення актуального наукового завдання

Публікації:

- V. S. Kovtoniuk, I. S. Yeremenko, S. Ryl, W. Vogel, and A. A. Semenov, “Nonclassical correlations of radiation in relation to Bell nonlocality”, Phys. Rev. A 105, 063722 (2022), doi: 10.1103/PhysRevA.105.063722.

- I. S. Yeremenko, M. A. Dmytruk, and A. A. Semenov, “Realistic photonnumber resolution in Gaussian boson sampling”, Phys. Rev. A 110, 043715 (2024), doi: 10.1103/PhysRevA.110.043715.
- I. S. Yeremenko, “Realistic Photon-Number Resolution and Its Impact on Gaussian Boson Sampling”, oral presentation at the 25th Symposium on Photonics and Optics (SPO 2024), Kyiv, Ukraine, November 4–8, 2024.
- I. S. Yeremenko, M. A. Dmytruk, and A. A. Semenov, “Advancing Gaussian Boson Sampling with Realistic Photon-Number-Resolving Detectors”, poster presentation at Quantum 2025: From Foundations of Quantum Mechanics to Quantum Information and Quantum Metrology & Sensing, Turin, Italy, May 18–24, 2025.

Наукова (науково-технічна) продукція: методи, теорії, гіпотези

Соціально-економічна спрямованість: розвиток наукових засад квантових інформаційних технологій та методів валідації квантових оптичних пристроїв.

Охоронні документи на ОПІВ:

Впровадження результатів дисертації: Планується до впровадження

Зв'язок з науковими темами:

VI. Відомості про наукового керівника/керівників (консультанта)

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Семенов Андрій Олександрович

2. Andrii A. Semenov

Кваліфікація: д. ф.-м. н., старший науковий співробітник, 05.12.13

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0001-5104-6445

Додаткова інформація: https://scholar.google.com.ua/citations?user=aUco_KwAAAAJ&hl=ru

Повне найменування юридичної особи: Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної академії наук України

Код за ЄДРПОУ: 05417124

Місцезнаходження: вул. Метрологічна, Київ, 03143, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Національна академія наук України

Ідентифікатор ROR:

VII. Відомості про офіційних опонентів та рецензентів

Офіційні опоненти

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Сотніков Андрій Геннадійович

2. Andrii H. Sotnikov

Кваліфікація: д. ф.-м. н., с.д., член-кор. НАН України, 01.04.02

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0002-3632-4790

Додаткова інформація: https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=15023703100

Повне найменування юридичної особи: Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут" Національної академії наук України

Код за ЄДРПОУ: 14312223

Місцезнаходження: вул. Академічна, Харків, Харківський р-н., 61108, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Національна академія наук України

Ідентифікатор ROR:

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Гнатенко Христина Павлівна
2. Khrystyna P. Hnatenko

Кваліфікація: д. ф.-м. н., с.д., член-кор. НАН України, 01.04.02

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0003-2801-5872

Додаткова інформація:

Повне найменування юридичної особи: Львівський національний університет імені Івана Франка

Код за ЄДРПОУ: 02070987

Місцезнаходження: вул. Університетська, Львів, 79000, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

Рецензенти

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Стародуб Іван Олексійович
2. Ivan O. Starodub

Кваліфікація: к. ф.-м. н., 01.04.02

Ідентифікатор ORCID ID: 0009-0002-0885-1697

Додаткова інформація:

Повне найменування юридичної особи: Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної академії наук України

Код за ЄДРПОУ: 05417124

Місцезнаходження: вул. Метрологічна, Київ, 03143, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Національна академія наук України

Ідентифікатор ROR:

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Назаренко Андрій Володимирович

2. Andrii V. Nazarenko

Кваліфікація: д. ф.-м. н., 01.04.02

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0002-6080-742

Додаткова інформація:

Повне найменування юридичної особи: Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної академії наук України

Код за ЄДРПОУ: 05417124

Місцезнаходження: вул. Метрологічна, Київ, 03143, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Національна академія наук України

Ідентифікатор ROR:

VIII. Заключні відомості

Власне Прізвище Ім'я По-батькові голови ради	Іоргов Микола Зіновійович
Власне Прізвище Ім'я По-батькові головуючого на засіданні	Іоргов Микола Зіновійович
Відповідальний за підготовку облікових документів	Єременко Іван Сергійович
Реєстратор	Юрченко Тетяна Анатоліївна
Керівник відділу УкрІНТЕІ, що є відповідальним за реєстрацію наукової діяльності	Юрченко Тетяна Анатоліївна