

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Інституту теоретичної фізики

ім. М. М. Боголюбова

Національної академії наук України

доктор фізико-математичних наук

Сергій ПЕРЕПЕЛИЦЯ

“26” травня 2026 р.



ВИСНОВОК

відділу синергетики

Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова

Національної академії наук України

**про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів
дисертації Єременка Івана Сергійовича на тему:**

«Реалістичні вимірювання багатомодового квантового світла»,

поданої на здобуття ступеня доктора філософії

10 – Природничі науки

за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія

ВИТЯГ

з протоколу № 5 від 13 травня 2026 р.

засідання відділу синергетики

Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова

Національної академії наук України

СЛУХАЛИ: аспіранта Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної академії наук України Єременка Івана Сергійовича за матеріалами дисертаційної роботи “Реалістичні вимірювання багатомодового квантового світла”, що висувається на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія.

ПРИСУТНІ:

керівник семінару – доктор фіз.-мат. наук, Ярослав ЗОЛОТАРЮК;

член-кор. НАН України, доктор наук з галузі "Природничі науки" Андрій СЕМЕНОВ;

доктор фіз.-мат. наук Олександр ВІДИБІДА;

академік НАН України, доктор фіз.-мат. наук, проф. Богдан ЛЕВ;
кандидат фіз.-мат. наук Володимир КОЗИРСЬКИЙ;
кандидат фіз.-мат. наук Анатолій ЖОХІН;
кандидат фіз.-мат. наук Андрій МАХОРТ;
кандидат фіз.-мат. наук Віктор ЖАБА;
кандидат фіз.-мат. наук Ольга КОЧЕРГА;
кандидат фіз.-мат. наук Олександр ЧЕРНЯК;
кандидат фіз.-мат. наук Євген СТОЛЯРОВ;
кандидат фіз.-мат. наук Костянтин ГРИГОРИШИН;
кандидат фіз.-мат. наук Олександр КЛЮШНІЧЕНКО;
аспірант Артем ГРЕБЕНЮК;
аспірант Михайло ДМИТРУК;
аспірант Микита КЛЕН;
аспірант Ілля ПЕЧОНКІН;
провідний інженер Олена ДОВЖИК.

УХВАЛИЛИ: вважати дисертаційну роботу І. С. Єременка “Реалістичні вимірювання багатомодового квантового світла” завершеним науковим дослідженням і затвердити такий висновок.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Єременка Івана Сергійовича “Реалістичні вимірювання багатомодового квантового світла” написана за матеріалами робіт, що виконані ним під час навчання в аспірантурі в Інституті теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної академії наук України (2022-2026 рр.) у відділі синергетики. Тема дисертації затверджена на засіданні вченої ради Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної академії наук України від 10 листопада 2022 р., протокол № 7, керівником призначено доктора наук з галузі “Природничі науки” Андрія СЕМЕНОВА.

Актуальність роботи

Багатомодове квантове світло є одним із ключових об’єктів сучасної квантової оптики. Саме в багатомодових станах проявляються складні кореляції між різними ступенями вільності поля, які використовуються для дослідження неklasичності випромінювання, квантових комунікацій, квантової метрології та спеціалізованих моделей квантових обчислень. Водночас квантовий стан світла не спостерігається безпосередньо. Експериментально доступною є лише статистика результатів конкретної вимірювальної процедури. Тому для коректного опису багатомодового квантового світла необхідно враховувати не тільки сам стан і його перетворення в оптичній схемі, а й фізичну модель вимірювання.

Особливої важливості ця проблема набуває у випадку реалістичних

фотодетекторів. Ідеалізовані моделі вимірювання часто припускають досконале розрізнення чисел фотонів або повну відповідність між числом фотонів у моді та зареєстрованим результатом. У реальних експериментах це припущення, як правило, не виконується. Порогові фотодетектори розрізняють лише відсутність або наявність спрацювання, масиви порогових детекторів дають лише наближене розрізнення чисел фотонів, а детектори, що працюють через підрахунок імпульсів фотоструму, можуть втрачати частину подій через мертвий час та релаксаційні ефекти. Такі особливості змінюють статистику вимірювань і мають бути включені в теоретичний опис від самого початку.

Окремий аспект актуальності пов'язаний із гібридними вимірювальними схемами, у яких різні підсистеми аналізуються за допомогою фізично різних приладів. Наприклад, одна мода може вимірюватися збалансованим гомодинним детектуванням, а інша — пороговим фотодетектором після фазово-просторового зміщення. Такі схеми поєднують неперервні та дискретні результати вимірювання і дозволяють досліджувати неklasичні кореляції світла в ситуаціях, де вони не обов'язково проявляються як порушення нерівностей Белла. Це робить гібридні вимірювання важливим інструментом для аналізу неklasичності багатомодових станів.

Інший важливий напрям пов'язаний із гаусівською бозонною вибіркою. Ця модель неуніверсальних квантових обчислень є спеціалізованою задачею вибірки з розподілу фотонних подій на виході багатомодового лінійного інтерферометра. Її експериментальна цінність значною мірою залежить від можливості коректно порівнювати отриману статистику з теоретичними моделями та відрізнити її від класичних альтернатив. У великих багатомодових системах повний розподіл вихідних патернів є надто складним для прямого аналізу, тому використовуються згруповані статистики, зокрема орбітальні ймовірності та статистики колізійних подій. Реалістичне розрізнення чисел фотонів безпосередньо впливає на ці величини, а отже, і на процедури валідації гаусівської бозонної вибірки.

Таким чином, актуальність роботи зумовлена необхідністю послідовного теоретичного опису вимірювань багатомодового квантового світла з урахуванням реальних властивостей фотодетекторів. Такий опис має поєднувати операторний формалізм, додатні операторнозначні міри, фазово-просторові представлення та статистичні методи аналізу вимірювальних результатів. Це дозволяє єдиним підходом розглядати як гібридні схеми для виявлення неklasичних кореляцій, так і гаусівську бозонну вибірку з реалістичним детектуванням з розрізненням чисел фотонів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконувалась у відділі синергетики Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України в рамках науково-дослідних робіт (2022–2026 рр.):

1. Відомча тема відділення фізики та астрономії НАН України “Індуковані

шумом динаміка та кореляції в нерівноважних системах”, Р/К 0120U101347.

2. Відомча тема відділення фізики та астрономії НАН України “Стохастичні процеси в конденсованих середовищах, біологічних системах та полях випромінювання”, Р/К 0125U000031.
3. Проєкт Національного фонду досліджень України 2020.02/0111 “Некласичні та гібридні кореляції квантових систем за реалістичних умов”.
4. Проєкт Національного фонду досліджень України 2023.03/0165 “Квантові кореляції електромагнітного випромінювання”.
5. Проєкт Simons Foundation International SFI-PD-Ukraine-00014573, PI LB.

Метою досліджень, проведених у дисертації, є розвиток теоретичного опису вимірювань багатомодового квантового світла та застосування цього опису до аналізу некласичних кореляцій у гібридних вимірювальних схемах і до гаусівської бозонної вибірки з реалістичним розрізненням чисел фотонів.

Для досягнення поставленої мети сформульовано такі завдання:

- Описати гібридну вимірювальну схему, у якій поєднуються збалансоване гомодинне детектування та порогове фотодетектування після фазово-просторового зміщення, і застосувати її до аналізу некласичних кореляцій у двомодовому стисненому вакуумному стані.
- Вивести загальний вираз для фотолічильної статистики на виході гаусівської бозонної вибірки для довільних фотодетекторів, які описуються елементами додатної операторнозначної міри.
- Конкретизувати отриманий матрично-функціональний формалізм для основних моделей детектування: ідеальних детекторів з розрізненням чисел фотонів, порогових фотодетекторів, мультиплексованих масивів порогових детекторів, а також моделей з мертвим часом і релаксаційним часом.
- Сформулювати процедури валідації гаусівської бозонної вибірки за умов реалістичного розрізнення чисел фотонів на основі згрупованих статистик, орбітальних ймовірностей, статистик колізійних подій, критерію Пірсона та баєсівського тесту.
- Проаналізувати вплив неідеального розрізнення чисел фотонів на вихідну статистику гаусівської бозонної вибірки та на можливість відрізнити квантову статистику від класичних еталонних моделей.

Серед **найбільш важливих наукових результатів**, отриманих у роботі, семінар відзначає такі:

- Досліджено гібридну схему вимірювання, що поєднує неперервний результат збалансованого гомодинного детектування в одній моді та дискретний результат порогового фотодетектування після фазово-просторового зміщення в іншій моді. На прикладі двомодового стисненого вакуумного стану показано, що така схема дозволяє виявляти некласичні кореляції світла навіть у випадках, коли відповідна статистика не

демонструє нелокальності Белла.

- Виведено загальний матрично-функціональний вираз для фотолічильної статистики на виході гаусівської бозонної вибірки з довільними реалістичними фотодетекторами, що задаються елементами додатної операторнозначної міри. У відповідних граничних випадках цей вираз узгоджується з відомими формами для ідеального детектування з розрізненням чисел фотонів та порогового детектування.
- Отримано конкретні матричні функціонали для реалістичних моделей детектування з розрізненням чисел фотонів, зокрема для мультиплексованих масивів порогових детекторів, для детекторів з підрахунком імпульсів фотоструму, а також для моделей із мертвим часом і релаксаційним часом. Це дозволило безпосередньо включити фізичні характеристики фотодетекторів у розрахунок вихідної статистики гаусівської бозонної вибірки.
- Запропоновано та проаналізовано процедури валідації гаусівської бозонної вибірки за умов реалістичного фотодетектування. Для цього використано згруповані статистики, зокрема орбітальні ймовірності та статистики колізійних подій, а також критерій Пірсона і баєсівський тест для порівняння квантової статистики з класичними еталонними моделями.
- Показано, що навіть часткове розрізнення чисел фотонів може суттєво змінювати орбітальні ймовірності та підвищувати ефективність відрізнєння квантової статистики гаусівської бозонної вибірки від класичних альтернатив. Водночас встановлено, що використання надто ідеалізованих моделей фотодетекторів може призводити до некоректної оцінки вихідної статистики та результатів валідації.

Практичне значення одержаних результатів

У роботі розроблено теоретичний опис вимірювань багатомодового квантового світла, який дозволяє враховувати реальні властивості фотодетекторів у задачах аналізу некласичних кореляцій та гаусівської бозонної вибірки. Для гібридних вимірювальних схем отримані результати дають можливість досліджувати некласичні кореляції світла в ситуаціях, де поєднуються неперервні та дискретні результати вимірювання, зокрема гомодинне детектування та порогове фотодетектування після фазово-просторового зміщення. Для гаусівської бозонної вибірки практичне значення полягає у можливості коректно описувати фотолічильну статистику за умов реалістичного розрізнення чисел фотонів. Отримані результати дозволяють враховувати пороговість, скінченну здатність до розрізнення чисел фотонів, мертвий час і релаксаційні ефекти детекторів. Це є важливим для валідації квантових оптичних пристроїв, оскільки згруповані статистики, орбітальні ймовірності та статистики колізійних подій істотно залежать від моделі фотодетектування.

Особистий внесок здобувача.

Дослідження, представлені в роботах [1, 2], виконано у співпраці зі співавторами. У роботі [1] особистий внесок здобувача полягав у формулюванні фізичної моделі гаусівської бозонної вибірки з реалістичним розрізненням чисел фотонів, побудові матрично-функціонального опису фотолічильної статистики, аналізі моделей детектування та формулюванні підходів до валідації. Безпосереднє написання програмного коду для чисельних розрахунків не належить до особистого внеску здобувача. У роботі [2] внесок здобувача полягав у формулюванні та аналізі гібридної вимірювальної схеми, що поєднує збалансоване гомодинне детектування та порогове фотодетектування після фазово-просторового зміщення, а також у дослідженні прикладу двомодового стисненого вакуумного стану. Науковий керівник А. А. Семенов здійснював загальне керівництво дослідженням, брав участь у постановці задач і обговоренні результатів.

Основні результати дисертації викладені у 2 роботах:

- [1] I. S. Yeremenko, M. A. Dmytruk, and A. A. Semenov. Realistic photon-number resolution in Gaussian boson sampling. *Physical Review A*, **110**, 043715 (2024). <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.110.043715> (Q1)
- [2] V. S. Kovtoniuk, I. S. Yeremenko, S. Ryl, W. Vogel, and A. A. Semenov. Nonclassical correlations of radiation in relation to Bell nonlocality. *Physical Review A*, **105**, 063722 (2022). <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.105.063722> (Q1)

Апробація результатів дисертації

Результати дисертаційної роботи доповідались на наступних семінарах та конференціях:

- [1] I. S. Yeremenko, “Realistic Photon-Number Resolution and Its Impact on Gaussian Boson Sampling”: усна доповідь на 25th Symposium on Photonics and Optics (SPO 2024), Київ, Україна, 4–8 листопада 2024 р.
- [2] I. S. Yeremenko, M. A. Dmytruk, and A. A. Semenov, “Advancing Gaussian Boson Sampling with Realistic Photon-Number-Resolving Detectors”: стендова доповідь на конференції Quantum 2025: From Foundations of Quantum Mechanics to Quantum Information and Quantum Metrology & Sensing, Турин, Італія, 18–24 травня 2025 р.

Характеристика особистості здобувача

Єременко Іван Сергійович закінчив у 2022 році Київський національний університет імені Тараса Шевченка за освітньою програмою “Квантова теорія поля” спеціальності “Фізика та астрономія” та отримав ступінь магістра. З 2022 року навчався в аспірантурі Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України з відривом від виробництва за спеціальністю 104 – фізика та астрономія, та зараховано на посаду провідного інженера відділу синергетики

ІТФ ім. М.М. Боголюбова НАН України, основним науковим напрямком діяльності є дослідження реалістичних вимірювань багатомодового квантового світла, зокрема гібридних вимірювальних схем та гаусівської бозонної вибірки з реалістичним фотодетектуванням.

УХВАЛЕНО:

1. Затвердити висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Єременка Івана Сергійовича “Реалістичні вимірювання багатомодового квантового світла”.
2. Визнати, що за актуальністю, ступенем наукової новизни, обґрунтованістю, науковою та практичною цінністю здобутих результатів дисертація Єременка І. С. відповідає спеціальності 104 - Фізика та астрономія та вимогам **Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії**, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 (зі змінами).
3. Рекомендувати дисертацію Єременка Івана Сергійовича “Реалістичні вимірювання багатомодового квантового світла” до захисту на здобуття ступеня доктора філософії у разовій спеціалізованій вченій раді за спеціальністю 104 - Фізика та астрономія.
4. Рекомендувати вченій раді ІТФ ім. М.М. Боголюбова НАН України затвердити склад разової спеціалізованої вченої ради:

Голова ради:

Іоргов Микола Зіновійович, доктор фіз.-мат наук, завідувач лабораторії теорії інтегровних систем Інституту теоретичної фізики Національної академії наук України.

Рецензенти:

Назаренко Андрій Володимирович, доктор фіз.-мат наук, провідний науковий співробітник відділу математичних методів в теоретичній фізиці.

Стародуб Іван Олексійович, кандидат фіз.-мат. наук, вчений секретар Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної академії наук України.

Офіційні опоненти:

Сотніков Андрій Геннадійович член-кореспондент Національної академії наук України, доктор фіз.-мат. наук, старший дослідник, провідний науковий співробітник відділу статистичної фізики та квантової теорії поля Національного наукового центру “Харківський фізико-технічний інститут”.

Гнатенко Христина Павлівна член-кореспондент Національної академії наук України, доктор фіз.-мат. наук, професор, професор кафедри теоретичної фізики ім. професора Івана Вакарчука Львівського національного університету ім Івана Франка.

Головуючий на засіданні –
доктор фіз.-мат. наук,
завідувач відділу синергетики
Інституту теоретичної фізики
ім. М.М. Боголюбова
Національної академії наук України

Ярослав ЗОЛОТАРЮК

Секретар засідання –
науковий співробітник
відділу синергетики
Інституту теоретичної фізики
ім. М.М. Боголюбова
Національної академії наук України

Іван СТАРОДУБ