

ЗАТВЕРДЖУЮ



Директор Інституту теоретичної фізики

ім. М. М. Боголюбова

Національної академії наук України

доктор фізико-математичних наук


Сергій ПЕРЕПЕЛИЦЯ

“ 4 ” березня 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 Ковтонюка Вадима Сергійовича на тему:**

**«Некласичність статистик вимірювання квантового електромагнітного
випромінювання»,**

поданої на здобуття ступеня доктора філософії

з галузі знань 10 – Природничі науки

за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія

ВИТЯГ

з протоколу № 2 від 19 лютого 2026 р.

засідання відділу синергетики

Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова

Національної академії наук України

СЛУХАЛИ: аспіранта відділу синергетики Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної академії наук України Ковтонюка Вадима Сергійовича за матеріалами дисертаційної роботи “Некласичність статистик вимірювання квантового електромагнітного випромінювання”, що висувається на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – природничі науки за спеціальністю 104 – фізика та астрономія.

ПРИСУТНІ:

керівник семінару – кандидат фіз.-мат. наук Анатолій ЖОХІН;

академік НАН України, доктор фіз.-мат. наук, проф. Богдан ЛЕВ;

академік НАН України, доктор фіз.-мат. наук Валерій ГУСИНІН;

член-кор. НАН України, доктор наук з галузі "Природничі науки" Андрій СЕМЕНОВ;
доктор фіз.-мат. наук Сергій ПЕРЕПЕЛИЦЯ;
доктор фіз.-мат. наук Володимир ЗАСЕНКО;
доктор фіз.-мат. наук Сергій ШАРАПОВ;
доктор фіз.-мат. наук Микола ІОРГОВ;
доктор фіз.-мат. наук Олександр ВІДИБІДА;
доктор фіз.-мат. наук Ярослав ЗОЛОТАРЮК;
кандидат фіз.-мат. наук Іван СТАРОДУБ;
кандидат фіз. мат. наук Віктор ЖАБА;
кандидат фіз.-мат. наук Андрій МАХОРТ;
кандидат фіз.-мат. наук Володимир КОЗИРСЬКИЙ;
кандидат фіз.-мат. наук Ольга КОЧЕРГА;
кандидат фіз.-мат. наук Олександр ЧЕРНЯК;
кандидат фіз.-мат. наук Євген СТОЛЯРОВ;
кандидат фіз.-мат. наук Мусфер АДЖИМАМБЕТОВ;
доктор філософії Юрій ЖУРАВЛЬОВ;
аспірант Іван ЄРЕМЕНКО;
аспірант Микита КЛЕН;

УХВАЛИЛИ: вважати дисертаційну роботу В. С. Ковтонюка “Некласичність статистик вимірювання квантового електромагнітного випромінювання” завершеним науковим дослідженням і затвердити такий висновок.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Ковтонюка Вадима Сергійовича “Некласичність статистик вимірювання квантового електромагнітного випромінювання” 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

Некласичність квантових станів оптичного випромінювання демонструє необхідність квантування електромагнітного поля для пояснення результатів вимірювання, що проводяться над ним. Воно є необхідним ресурсом для низки оптичних квантових технологій, включно з неуніверсальними квантовими обчисленнями та квантовою метрологією. Такі відомі ефекти як субпуассонівська статистика фотовідліків або квадратурне стиснення являють собою частинний

прояв оптичної неklasичності.

Водночас, статистика вимірювань неklasичного оптичного стану необов'язково вимагає для свого пояснення квантування електромагнітного поля. У такому разі її можна відтворити за допомогою статистичної суміші когерентних станів, а для опису такої статистики можна використати класичну електродинаміку. Тому задача визначення неklasичності саме статистики вимірювань становить інтерес як з фундаментальної точки зору (розуміння ролі квантових явищ в результатах вимірювань), так і з точки зору формулювання нових методів для більш точної обробки результатів вимірювань.

Оскільки оптична неklasичність відноситься до так званих опуклих квантових ресурсів, дослідження статистики вимірювань на її наявність може використовувати методи конвексної геометрії. Аналогічні методи, що використовують так званий показчик (квантова спостережувана, яка є функцією від результатів вимірювання), застосовуються для визначення інших квантових ресурсів, таких як запутаність або нелокальність Белла. На практиці це означає перевірку порушень певних нерівностей, які є лінійним відносно статистики вимірювань.

Обробка експериментальних даних, що підтверджують порушення таких нерівностей не становить значних проблем. Проте теоретичне визначення відповідного показчика є нетривіальною обчислювальною задачею. Фактично для визначення, чи є статистика вимірювань неklasичною, потрібно розглянути усі можливі показчики, що практично можна зробити лише у простих частинних випадках. Суттєво спростити дану задачу можна за рахунок звуження класу показчиків до так званих щільних показчиків. Вони є мінімальним необхідним і достатнім набором для дослідження неklasичності статистики вимірювань. Саме тому визначення щільних показчиків є важливою задачею.

Окремою сферою є визначення неklasичності умовних станів двомодової системи. Дана задача неодноразово розглядалася в літературі, однак лише у контексті визначення неklasичності станів, а не їхньої статистики вимірювань. Оскільки саме неklasичність статистики вимірювання має практичне значення, застосування методів дослідження такої неklasичності до умовних станів дозволить отримати більш реалістичну оцінку придатності таких систем для квантового оброблення інформації, враховуючи неминучі обмеження та шуми, що виникають безпосередньо в процесі детектування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконувалась у відділі синергетики Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова Національної академії наук 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 розробка практичних методів виявлення некласичності статистики вимірювань, а також некласичних та нелокальних кореляцій.

Для досягнення поставленої мети сформульовано такі завдання:

- сформулювати строге загальне означення щільних показчиків оптичної некласичності.
- Отримати загальний метод обчислення щільних показчиків для якомога ширшого класу вимірювань.
- Застосувати отримані щільні нерівності для дослідження некласичності статистики вимірювання станів у квантовій оптиці за реалістичних умов.
- Розробити метод виявлення некласичності умовних станів двомодового стану за допомогою дослідження статистики вимірювань.

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

- сформульовано строге загальне означення щільних показчиків оптичної некласичності.
- Було розроблено методику побудови щільних показчиків оптичної некласичності для випадку, коли розподіл імовірностей результатів вимірювань для когерентних станів має однопараметричну залежність від комплексної амплітуди (наприклад, для випадків фотодетектування).
- За допомогою отриманих щільних нерівностей було виявлено некласичність статистики фотовідліків фазостисненого когерентного стану за різних реалістичних сценаріїв.
- Було розроблено метод виявлення прихованої некласичності умовних станів двомодового стану за допомогою дослідження статистики вимірювань.

Практичне значення одержаних результатів

Оскільки оптична некласичність являє собою необхідний квантовий ресурс у низці оптичних квантових технологій, визначення її наявності або відсутності

становить не лише фундаментальний, а й прикладний інтерес. Проте практична застосовність будь-яких методів є обмеженою через інформаційну неповноту вимірювань. З огляду на цей факт, методи, що дозволяють отримати максимально можливу інформацію про відсутність або наявність оптичної неklasичності на підставі наявних даних вимірювання мають непересічне значення.

У роботі було запропоновано методику побудови щільних нерівностей, що виявляють неklasичність, для випадку коли розподіл імовірностей результатів вимірювання для когерентних станів має однопараметричну залежність від комплексної амплітуди. Така методика може бути застосована до широкого класу реалістичних вимірювань, – фактично вона охоплює всі фазонечутливі вимірювання, до яких відноситься лічба фотонів з ідеальними та реалістичними фотодетекторами. У порівнянні з наявними методами дослідження неklasичності статистик вимірювань, відповідні нерівності є значно менш складними для застосування, що дозволяє застосувати їх до більшого класу експериментальних сценаріїв. Потенціал даних нерівностей був продемонстрований на прикладі виявлення неklasичності статистики фотовідліків фазостисненого когерентного стану. Така неklasичність не виявляється загальноприйнятими маркерами неklasичності, такими як параметр Манделя. Для виявлення неklasичності умовних станів двомодового стану було отримано метод, за допомогою якого можна виявити неklasичність навіть у випадках, коли умовні статистики вимірювання є класичними.

Особистий внесок здобувача.

Дослідження, представлені в роботах [2], [4], [5] були проведені переважно кандидатом. Науковий керівник Андрій СЕМЕНОВ надав основні концептуальні ідеї, визначив напрямки досліджень і здійснював керуванням проектом протягом його виконання. У статті [1] здобувач брав участь в формуванні концептуальної ідеї неklasичних кореляцій (входить в дисертацію) та в виведенні гібридних нерівностей Белла (не входить в дисертацію). У статті [3] особистий внесок у дослідження полягав в адаптації методу визначення неklasичності статистиків фотовідліків для випадку JPM детектора.

Основні результати дисертації викладені у 4 роботах у наукових журналах:

- [1] V. S. Kovtoniuk, I. S. Yeremenko, S. Ryl, V. Wogel, A. A. Semenov. Nonclassical correlations of radiation in relation to Bell nonlocality. *Physical Review A* 105 (6), 063722 (2022). <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.105.063722> (Q1)
- [2] V. S. Kovtoniuk, E. V. Stolyarov, O. V. Kliushnichenko, A. A. Semenov. Tight inequalities for nonclassicality of measurement statistics. *Physical Review A* 109 (5), 053710 (2024). <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.109.053710> (Q1)
- [3] E. V. Stolyarov, O. V. Kliushnichenko, V. S. Kovtoniuk, A. A. Semenov. Photon-number resolution with microwave Josephson photomultipliers. *Physical Review A* 108 (6), 063710 (2023). <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.108.063710> (Q1)

- [4] V. S. Kovtoniuk, A. B. Klimov, A. A. Semenov. Latent optical nonclassicality of conditionally prepared states. *Physical Review A* 111 (5), 053701 (2025). <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.111.053701> (Q1)
- [5] V. S. Kovtoniuk, M. Bohmann, A. A. Semenov. Nonclassical photocounting statistics with a single on-off detector. arxiv:2601.13869 (2026). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2601.13869>

Апробація результатів дисертації

Результати дисертаційної роботи доповідались на наступних семінарах та конференціях:

- [1] V. Kovtoniuk, A. Semenov, «Necessary and sufficient condition for hybrid Bell nonlocality»: 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.
- [2] V. Kovtoniuk, A. Klimov, A. Semenov, «Latent Nonclassicality: Implicit Information from Conditionally Prepared States»: усна доповідь на конференції Quantum 2025: From Foundations of Quantum Mechanics to Quantum Information and Quantum Metrology & Sensing, Турин, Італія, 18–24 травня 2025 р.
- [3] V. S. Kovtoniuk, «Hybrid Bell nonlocality», Боголюбівські читання, 25 листопада 2025.
- [4] V. Kovtoniuk, E. Stolyarov, O. Kliushnichenko, V. Uzunova, and A. Semenov, «Noisy photon-number resolution: Nonclassicality criteria with realistic quantum devices», Scientific event in Lviv dedicated to the World Quantum Day, 24–26 квітня 2024 р.
- [5] V. Kovtoniuk, A. Semenov, «Latent quantum resources», Scientific event in Lviv dedicated to the World Quantum Day, 10–11 квітня 2025 р.
- [6] V. Kovtoniuk «Tight tests for nonclassicality», 25th Symposium on Photonics and Optics SPO 2024, Київ, Україна, 8 листопада 2024 р.

Характеристика особистості здобувача

Ковтонюк Вадим Сергійович закінчив у 2022 році Київський національний університет імені Тараса Шевченка за освітньою програмою “Квантові комп’ютери, обчислення та інформація” спеціальності “Фізика та астрономія” та отримав ступінь магістра. З 2022 року навчався в аспірантурі Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної академії наук України з відривом від виробництва за спеціальністю 104 – фізика та астрономії, та зараховано на посаду провідного інженера відділу синергетики ІТФ ім. М. М. Боголюбова НАН України, основним науковим напрямком діяльності є

дослідження неklasичності статистики вимірювань оптичних станів та квантових кореляцій.

УХВАЛЕНО:

1. Затвердити висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Ковтонюка Вадима Сергійовича “Некласичність статистик вимірювання квантового електромагнітного випромінювання”.
2. Визнати, що за актуальністю, ступенем наукової новизни, обґрунтованістю, науковою та практичною цінністю здобутих результатів дисертація Ковтонюка Вадима Сергійовича відповідає спеціальності 104 - Фізика та астрономія та вимогам **Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у закладах вищої освіти (наукових установах), затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 р. № 261, пп. 6, 7, 8 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 Ковтонюка Вадима Сергійовича “Некласичність статистик вимірювання квантового електромагнітного випромінювання” 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 та затвердити склад разової спеціалізованої вченої ради:

Голова ради:

Золотарюк Ярослав Олександрович, доктор фіз.-мат. наук, завідувач відділу синергетики Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної академії наук України.

Рецензенти:

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

Шарапов Сергій Геннадійович, доктор фіз.-мат. наук, завідувач лабораторії сильнокорельованих низьковимірних систем Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної академії наук України.

Офіційні опоненти:

Ян Шперлінг (Jan Sperling), доктор філософії (PhD), професор Університету Падерборна (Paderborn University), Німеччина.

Яромір Фюрашек (Jaromír Fiurášek), доктор філософії (PhD), професор, завідувач кафедри оптики в Оломоуцькому Університеті Палацького (Palacky University Olomouc), Чеська Республіка.

Головуючий на засіданні –
кандидат фіз.-мат. наук,
т.в.о. завідувача відділу синергетики
ІТФ ім. М.М. Боголюбова НАН України.

Анатолій ЖОХІН

Секретар засідання –
науковий співробітник
відділу синергетики
ІТФ ім. М.М. Боголюбова НАН України.

Іван СТАРОДУБ