

Облікова картка дисертації

I. Загальні відомості

Державний обліковий номер: 0826U001908

Особливі позначки: відкрита

Дата реєстрації: 25-05-2026

Статус: Наказ про видачу диплома

Реквізити наказу МОН / наказу закладу: Наказ Інституту теоретичної фізики імені М. М. Боголюбова Національної академії наук України від 10 серпня 2026 року № 12/01-2.



II. Відомості про здобувача

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Клен Микита Дмитрович

2. Mykyta D. Klen

Кваліфікація:

Ідентифікатор ORCID ID: 0009-0009-3030-6450

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: 13-07-2026

Спеціальність за освітою: Фізика та астрономія

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 13971

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: Англійська

Коди тематичних рубрик: 29.31, 29.31.15, 29.33.18, 29.33.43, 29.05.15

Тема дисертації:

1. Статистичні моделі та часова когерентність квантового світла в турбулентній атмосфері
2. Statistical models and temporal coherence of quantum light in the turbulent atmosphere

Реферат/анотація:

1. Волоконно-оптичні канали лежать в основі локальних квантових мереж, проте вільний простір пропонує альтернативу для бездротового зв'язку між наземними станціями та авіаційними платформами. На відміну від стаціонарних середовищ, атмосферні канали піддаються впливу турбулентності, що викликає стохастичні флуктуації показника заломлення і відповідні деформації форми променя, блукання променя навколо осі поширення та сцинтиляції. Вплив турбулентності на квантовий стан світла у квазімонохроматичній моді визначається ефективністю проходження — відношенням інтенсивності, яка потрапила в апертуру приймача, до загальної інтенсивності променя. Тому розподіл імовірності ефективності проходження (РІЕП) є ключовим для характеристики каналів. Попри це, у науковій літературі залишаються невирішені питання: відсутність критеріїв вибору моделей РІЕП та ігнорування часових кореляцій при розповсюдженні крізь турбулентну атмосферу. У цьому дослідженні визначено межі

застосовності існуючих моделей шляхом порівняння їхніх прогнозів з чисельними симуляціями на базі методу фазових екранів із розрідженим спектром, оцінюючи точність за допомогою статистики Колмогорова-Смирнова. Моделювання в режимах від слабкої до сильної турбулентності показало, що інтенсивність турбулентності визначає лише дисперсію РІЕП, не змінюючи суттєво її форму. Натомість асиметрія розподілу сильно залежить від розміру апертури: малі апертури дають позитивну асиметрію, тоді як великі апертури зміщують хвіст у бік нижчих значень (негативна асиметрія). Більшість аналітичних моделей не здатні відтворити цей перехід. Валідація припущень, на яких ґрунтуються аналітичні моделі, виявила, що зміщення центру променя залежить від деформації його форми, а розподіл логарифмів півосей не є гауссовим. Ми також виявили систематичну похибку специфікації моделі, яка є наслідком припущення про ідеалізовану кругову або еліптичну форму променя, що не здатна повністю відтворити його складні деформації. Це спрощення систематично зміщує передбачувані статистичні моди та середні значення РІЕП. Для усунення цієї проблеми запроваджено метод узгодження моментів ефективності проходження, який перепараметризовує фізично обґрунтовані моделі через перші моменти ефективності проходження. Застосування цієї техніки до моделі кругового променя значно покращує статистику Колмогорова-Смирнова порівняно з іншими підходами. Емпірична модель на базі бета-розподілу демонструє найвищу узгодженість із даними у більшості режимів, оскільки вона краще враховує варіації асиметрії, зумовлені розміром апертури. Виходячи за межі статичних описів, розроблено концепцію двочасового РІЕП, що характеризує спільні розподіли ефективності проходження як функцію часового інтервалу між імпульсами з урахуванням гіпотези замороженої турбулентності Тейлора. Введено усереднений за апертурою радіус просторової когерентності, що кількісно визначає зсув вітру, при якому кореляції спадають до $\exp(-1)$. Цей радіус можна апроксимувати лінійною залежністю від розміру апертури приймача. На основі цієї формалізації оцінено стійкість квантової заплутаності та неklasичності: хоча заплутаність між імпульсами зберігається протягом десятків мілісекунд, ефективність квантової пам'яті обмежує практичне використання дискретних змінних кількома мілісекундами. Протоколи адаптивної селекції з яскравими класичними імпульсами дозволяють зберігати неklasичність у подібних часових вікнах, що обґрунтовує доцільність часового кодування в мережах вільного простору. Підсумовуючи, робота усуває неоднозначності в описі атмосферних квантових каналів, встановивши розмір апертури приймача як визначальний параметр для вибору моделі. Серед фізично обґрунтованих моделей круговий промінь із узгодженням моментів демонструє найкращу точність, хоча потребує чисельного інтегрування. Серед усіх моделей, емпірична бета-модель є оптимальним практичним рішенням завдяки аналітичному виразу в замкнутій формі та параметризації лише двома першими моментами, ефективно враховуючи випадкову природу каналу. Хоча атмосферні канали забезпечують значні часові вікна для протоколів, повне розкриття потенціалу заплутаних станів вимагає подолання технологічних бар'єрів у зберіганні квантової інформації.

2. Fiber links form the foundation of local quantum communication networks, yet free-space optical links offer a scalable alternative for expanding these networks through wireless connections between moving ground-based stations and airborne platforms. Unlike controlled fiber environments, free-space channels are subject to atmospheric turbulence that induces stochastic refractive-index fluctuations, causing beam wandering, deformations, and intensity fluctuations known as scintillation. The impact of turbulence on the quantum state of light prepared in a quasi-monochromatic mode is captured by transmittance — the ratio of intensity collected by the receiving aperture to the total beam intensity. Consequently, the probability distribution of transmittance (PDT) is central to atmospheric channel characterization. However, theoretical gaps persist regarding the interpretation of optimal analytical model selection and the inability to account for temporal correlations within this framework. This research establishes the range of applicability for existing PDT models by comparing their predictions against numerical simulations based on the phase screen method with a sparse spectrum approach, assessing accuracy via the Kolmogorov-Smirnov statistic. Simulations spanning weak-to-strong turbulence regimes reveal that turbulence strength primarily governs PDT variance without significantly altering its shape. Conversely, skewness exhibits high variability and sign reversals depending on the receiving aperture size: apertures much smaller than the beam width yield positive skewness, while larger apertures shift the tail toward

lower transmittance values (negative skewness). Most analytical models fail to capture this transition due to rigid skewness behavior. We also validated the models' underlying assumptions, finding that the beam center is not consistently independent of shape deformation and that the logarithms of the beam's semi-axes deviate from a joint Gaussian distribution. Furthermore, we identify a model misspecification bias arising from idealized circular or elliptical beam shapes that fail to capture complex beam deformations. This simplification systematically shifts the predicted statistical mode and mean values of the PDT. To resolve this, we introduce the transmittance-moments-matching technique that reparametrizes beam-shape based models in terms of first transmittance moments. Applying this technique to the circular beam model produces superior Kolmogorov-Smirnov statistics compared to other physics-based alternatives. However, our empirical beta distribution model demonstrates the best overall performance across the majority of tested regimes due to its ability to naturally account for aperture-driven skewness variations. Moving beyond static descriptions, we develop a two-time PDT framework to characterize joint transmittance distributions as a function of pulse time separation, utilizing the Taylor frozen turbulence hypothesis. We introduce an aperture-averaged spatial coherence radius that quantifies the wind-driven displacement at which transmittance correlations decay to $\exp(-1)$, demonstrating linear scaling with receiving aperture size. This formalization provides a statistical foundation for analyzing temporal quantum channel behavior. Building on this, we quantify entanglement and nonclassicality resilience: while discrete-variable entanglement persists for tens of milliseconds, practical protocols remain constrained by quantum memory efficiency to several milliseconds. Adaptive selection protocols utilizing bright classical pulses to probe channel transmittance successfully preserve nonclassicality over similar intervals, rendering time-bin encoding strategies feasible for free-space quantum networking. In conclusion, this work resolves ambiguities in atmospheric channel characterization by establishing receiving aperture size as the governing parameter for model selection, superseding turbulence strength. Among physics-based models, the circular-beam formulation with transmittance-moments-matching demonstrates superior predictive accuracy, though its reliance on numerical integration limits broad application. Consequently, the empirical Beta-distribution model emerges as the optimal practical choice, providing a closed-form analytical expression parameterized by only two moments and effectively capturing aperture-driven skewness variations. While atmospheric channels support practical temporal windows for time-bin encoding, unlocking the full potential of discrete-variable entanglement protocols requires addressing storage limitations inherent in current quantum hardware.

Державний реєстраційний номер ДіР: 0120U101347, 0125U000031, 2020.02/0111, 2023.03/0165, SFI-PD-Ukraine-00014573

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:

- M. Klen and A. A. Semenov, "Numerical simulations of atmospheric quantum channels", Phys. Rev. A 108, 033718 (2023).
- M. Klen, D. Vasylyev, W. Vogel, and A. A. Semenov, "Time correlations in atmospheric quantum channels", Phys. Rev. A 109, 033712 (2024).
- I. Pechonkin, M. Klen, and A. A. Semenov, "Circular-beam approximation for quantum channels in a turbulent atmosphere", Phys. Rev. A 112, 063716 (2025).

- A. Semenov, M. Klen, and I. Pechonkin, "Quantum Optics in the Turbulent Atmosphere: Fundamental Issues and Applications", in Quantum Technologies for Defence and Security II, edited by V. Fernandez, G. Sorelli, and S. Schwartz (p. 38). Proc. SPIE 13676, 136760H-13 (2025).

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

Соціально-економічна спрямованість: забезпечення промисловості чи населення новим видом інформаційно-комунікаційних послуг

Охоронні документи на ОПІВ:

Впровадження результатів дисертації: Планується до впровадження

Зв'язок з науковими темами: 0120U101347, 0125U000031

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. Яценко Леонід Петрович
2. Leonid P. Yatsenko

Кваліфікація: д. ф.-м. н., академік НАН України, 01.04.05

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0002-2896-021X

Додаткова інформація: <https://www.webofscience.com/wos/author/record/B-6326-2019>;
<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006845621>;
<https://scholar.google.com/citations?user=xNM5ru8AAAAJ&hl=en&oi=ao>

Повне найменування юридичної особи: Інститут фізики Національної академії наук України

Код за ЄДРПОУ: 05417302

Місцезнаходження: проспект Науки, Київ, 03680, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Національна академія наук України

Ідентифікатор ROR:

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Вілльоресі Паоло --

2. Paolo Villorresi

Кваліфікація: д.філософ, професор

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0002-7977-015X

Додаткова інформація: [https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7003483032;](https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7003483032)

<https://scholar.google.com/citations?user=jCkHDZ8AAAAJ>

Повне найменування юридичної особи: Університет Падуї

Код за ЄДРПОУ:

Місцезнаходження: Via 8 Febbraio, Padova, 35122, Італія

Форма власності: Державна

Сфера управління:

Ідентифікатор ROR:

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Сореллі Джакомо --

2. Giacomo Sorelli

Кваліфікація: д.філософ

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0003-2197-2768

Додаткова інформація: <https://scholar.google.com/citations?user=MtAUmvAAAAJ>

Повне найменування юридичної особи: Інституту оптроники, системних технологій та використання зображень товариства Фраунгофера

Код за ЄДРПОУ:

Місцезнаходження: Gutleuthausstraße 1, Ettlingen, 76275, Німеччина

Форма власності: Державна

Сфера управління:

Ідентифікатор ROR:

Рецензенти

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Золотарюк Ярослав Олександрович

2. Yaroslav O. Zolotariuk

Кваліфікація: д. ф.-м. н., 01.04.02

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0003-1079-0221

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**

Шарапов Сергій Геннадійович

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові
головуючого на засіданні**

Шарапов Сергій Геннадійович

**Відповідальний за підготовку
облікових документів**

Клен Микита Дмитрович

Реєстратор

Юрченко Тетяна Анатоліївна

**Керівник відділу УкрІНТЕІ, що є
відповідальним за реєстрацію наукової
діяльності**



Юрченко Тетяна Анатоліївна