

Рішення
разової спеціалізованої вченої ради
про присудження ступеня доктора філософії

Здобувач ступеня доктора філософії, Клен Микита Дмитрович, 1997 року народження, громадянин України, освіта вища: закінчив у 2022 році Київський національний університет імені Тараса Шевченка за спеціальністю “Фізика та астрономія”, навчається в аспірантурі Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України, місто Київ, виконав акредитовану освітньо-наукову програму "Теоретична фізика".

Разова спеціалізована вчена рада, утворена наказом директора Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України від «11» травня 2026 року № 08/01-02, у складі:

Голови разової спеціалізованої вченої ради -

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

Рецензентів -

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

Офіційних опонентів -

Яценко Леонід Петрович, академік НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач відділу когерентної і квантової оптики Інституту фізики Національної академії наук України.

Вілларесі Паоло (Paolo Villoresi), доктор філософії (PhD), професор, директор Падуанського центру квантових технологій (Padua Quantum Technologies Research Center) Університету Падуї (Università degli Studi di Padova), Італія.

Сореллі Джакомо (Giacomo Sorelli), доктор філософії (PhD), керівник групи квантової суперроздільної здатності (Quantum Superresolution Group Leader) Інституту оптроники, системних технологій та використання зображень товариства Фраунгофера (Fraunhofer Institute of Optronics, System Technologies and Image Exploitation, Fraunhofer IOSB), Еттлінген, Німеччина.

на засіданні «13» липня 2026 року прийняла рішення про присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» Клену Микиті

Дмитровичу на підставі публічного захисту дисертації «Статистичні моделі та часова когерентність квантового світла в турбулентній атмосфері» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Дисертацію виконано в Інституті теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України. Науковий керівник Семенов Андрій Олександрович, доктор наук з галузі "Природничі науки", старший науковий співробітник, член-кор. НАН України, провідний науковий співробітник відділу синергетики та керівник групи квантової оптики та квантової інформації Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України.

Дисертацію подано у вигляді спеціально підготовленого рукопису. Дисертація повністю відповідає 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 року № 44 (зі змінами). Порушень академічної доброчесності в дисертації та в наукових працях, у яких було представлено результати дисертації, не виявлено.

Здобувач має 4 наукові публікації за темою дисертації, з них 3 опубліковані в журналі Q1:

1. M. Klen, A. A. Semenov. Numerical simulations of atmospheric quantum channels. *Physical Review A*, 108(3), 033718 (2023). <https://doi.org/10.1103/physreva.108.033718> (Q1)
2. M. Klen, D. Vasylyev, W. Vogel, A. A. Semenov. Time correlations in atmospheric quantum channels. *Physical Review A*, 109(3), 033712 (2024). <https://doi.org/10.1103/physreva.109.033712> (Q1)
3. I. Pechonkin, M. Klen, A. A. Semenov. Circular-beam approximation for quantum channels in a turbulent atmosphere. *Physical Review A*, 112(6), 063716 (2025). <https://doi.org/10.1103/pv7j-4zpf> (Q1)
4. A. Semenov, M. Klen, I. Pechonkin (2025, October 29). Quantum optics in the turbulent atmosphere: fundamental issues and applications. In V. Fernandez, G. Sorelli, & S. Schwartz (Eds), *Quantum Technologies for Defence and Security II* (p. 38). *Proceedings of SPIE* 13676, 136760H-13 (2025). <https://doi.org/10.1117/12.3069599>

У дискусії взяли участь (голова, рецензенти, офіційні опоненти, інші присутні). Під час обговорення дисертації були висловлені такі зауваження і поставлені такі запитання:

Рецензент Я. О. Золотарюк:

Дисертація не позбавлена окремих недоліків, які наведено нижче. Водночас ці зауваження не є підставою для негативної оцінки дисертації, а радше слугують

рекомендаціями, що можуть бути використані для уточнення або вдосконалення окремих її положень.

(i) Автор використовує параметр Ритова для характеристики сили турбулентності атмосферних каналів. Проте дисертація виграла б від вступного обговорення реальних метеорологічних величин, таких як температура або тиск, які відповідають розглянутим значенням параметра Ритова. Особливо з огляду на те, що автор приділив значну увагу обговоренню фізично реалістичних параметрів.

(ii) Робота значною мірою ґрунтується на гіпотезі «замороженої» турбулентності Тейлора. Хоча ця гіпотеза є загальноприйнятою для слабкої турбулентності, сучасні дослідження сильної турбулентності в приземному шарі атмосфери (до 100–150 м над поверхнею Землі) свідчать, що вона не завжди виконується (див. *Physics of Fluids* 34, 076602 (2022), DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0097729>). Тому обмеження застосовності гіпотези «замороженої» турбулентності Тейлора до квантових комунікацій у приземному шарі атмосфери доцільно розглянути більш детально.

Наступні зауваження стосуються переважно способу подання окремих результатів.

(iii) Призначення рисунка 1.1 є незрозумілим. Чи є він лише ілюстративним прикладом випадкової функції? Якщо так, то не пояснено, яким чином його було отримано.

(iv) Це зауваження стосується рисунків 3.1–3.3. (a) На рисунках 3.1 і 3.2 необхідно додати позначення на кшталт (a) та (b) або легенду, щоб читач міг легко відрізнити випадки колімованого та сфокусованого пучків. (b) На рисунках 3.1–3.2 залежності для колімованого та сфокусованого пучків майже збігаються, а відхилення від гаусового закону недостатньо помітні. Доцільніше було б накласти обидві залежності на одному графіку та додати збільшений фрагмент, який підкреслював би найбільш цікаві області. Це саме стосується і рисунка 3.3. (c) Якість подання даних є недостатньою. Наприклад, рисунок 3.3, очевидно, відповідає рисунку 9 зі статті [1]. Проте якщо у статті цей рисунок чітко виглядає як гістограма, то в дисертації окремі стовпчики практично неможливо розрізнити, через що гістограмний характер зображення втрачається.

Останні два зауваження мають радше технічний характер.

(v) На сторінці 53, дев'ятий рядок знизу містить помилку в посиланні. Незрозуміло, що означає позначення «[^]@bachmann2025».

(vi) У дисертації кілька разів (сторінки 38, 51) використовується термін «просторова частота» (spatial frequency) замість більш усталеного терміна «хвильове число» (wave number).

Офіційний опонент Л. П. Яценко:

Дисертація справляє дуже позитивне загальне враження та містить низку оригінальних наукових результатів. Наведені нижче зауваження не зменшують наукової цінності роботи й насамперед мають розглядатися як питання для дискусії та можливі напрями подальших досліджень.

1. Фізична інтерпретація моделі бета-розподілу

Одним із центральних висновків дисертації є те, що емпірична модель бета-розподілу часто перевершує фізично вмотивовані моделі PDT у широкому діапазоні атмосферних умов. Хоча цей висновок переконливо підтверджується чисельним моделюванням, фізичне походження успішності бета-розподілу розкрито недостатньо. Модель має переважно емпіричний характер, а її зв'язок із фізичними механізмами атмосферної турбулентності залишається не повністю зрозумілим.

Питання 1. Чи може автор надати фізичну інтерпретацію, яка пояснює, чому бета-розподіл настільки успішно відтворює статистику атмосферного пропускання в такому широкому діапазоні параметрів?

Питання 2. Чи розглядалися й порівнювалися з моделлю бета-розподілу інші обмежені розподіли, наприклад логістично-нормальний розподіл або інші перетворення гаусових випадкових величин?

2. Обмеження моделей, заснованих на формі пучка

У дисертації переконливо продемонстровано наявність зміщення, зумовленого неправильною специфікацією моделі (misspecification bias), у моделях блукання пучка та еліптичного пучка. Запропоноване пояснення пов'язує це зміщення насамперед із деформаціями форми пучка вищих порядків, які не враховуються низькопорядковими параметрами пучка. Однак залишається не зовсім зрозумілим, якою мірою виявлені розбіжності зумовлені гладкими деформаціями вищих порядків, а якою — утворенням спеклових структур під час поширення випромінювання в турбулентному середовищі.

Питання 3. Якою мірою автор пов'язує обмеження моделей, заснованих на формі пучка, з формуванням спеклів, індукованих турбулентністю, а не з гладкими деформаціями форми пучка?

Питання 4. Чи проводив автор безпосередній аналіз просторових розподілів інтенсивності для кількісної оцінки ролі спеклів у виявлених розбіжностях між моделями?

3. Фізична інтерпретація процедури Transmittance-Moment Matching

Запропонована методика Transmittance-Moment Matching є одним із найбільш оригінальних результатів дисертації. Водночас ця процедура фактично переносить вплив деформацій пучка вищих порядків до модифікованої статистики ефективного розміру пучка. Унаслідок цього параметр ефективного

розміру пучка частково втрачає своє безпосереднє геометричне трактування.

Питання 5. Наскільки параметр ефективного розміру пучка зберігає чіткий фізичний зміст після застосування процедури Transmittance-Moment Matching?

Питання 6. Чи можливо узагальнити підхід узгодження моментів на модель еліптичного пучка, чи збільшення кількості параметрів принципово обмежує таке узагальнення?

4. Часові кореляції та наближення «замороженої» турбулентності

Аналіз часових кореляцій є однією з найцікавіших частин дисертації. Проте весь аналіз ґрунтується на наближенні «замороженої» турбулентності Тейлора, у якому часові зміни виникають виключно внаслідок перенесення нерухомої турбулентної структури вітром. Хоча це наближення широко застосовується в атмосферній оптиці, реальна атмосферна турбулентність також зазнає власної часової еволюції («boiling»), яка може додатково сприяти декореляції.

Питання 7. Наскільки чутливими є отримані часи часової кореляції та введений радіус когерентності до відхилень від наближення «замороженої» турбулентності?

Питання 8. У гіпотетичному випадку відсутності вітру який фізичний механізм визначав би характерний час декореляції атмосферного пропускання?

5. Усереднений за апертурою просторовий радіус когерентності

Запроваджений у дисертації усереднений за апертурою просторовий радіус когерентності є корисною кількісною характеристикою часових кореляцій. Водночас сам термін «радіус когерентності» потенційно може бути сплутаний із традиційними характеристиками когерентності оптичного поля.

Питання 9. Чи не було б доцільніше трактувати введену величину як довжину кореляції флуктуацій пропускання, а не як радіус когерентності в традиційному оптичному розумінні?

6. Застосовність отриманих результатів до атмосферного квантового зв'язку

В останньому розділі продемонстровано кілька важливих застосувань отриманих результатів до протоколів квантового зв'язку зі змінними та дискретними змінними. Водночас значна частина дисертації присвячена статистичному опису самого процесу поширення випромінювання в атмосфері й залишається актуальною навіть для суто класичних систем оптичного зв'язку.

Питання 10. Які з результатів, отриманих у дисертації, автор вважає такими, що є справді специфічними саме для квантового зв'язку, а які слід розглядати як більш загальний внесок у статистичну атмосферну оптику?

Офіційний опонент П. Вілоресі (Paolo Villoresi):

1. Слід зазначити, що перелік використаних літературних джерел не охоплює

результатів, опублікованих останніми роками, унаслідок чого поза увагою залишилася значна кількість корисних досліджень, зважаючи на стрімкий розвиток цієї галузі. Включення деяких із цих праць було б доцільним.

2. Звертаємо увагу, що під час побудови чисельного моделювання вибір параметрів і кількості фазових екранів пов'язаний із внутрішніми масштабами атмосфери. Водночас існує інший підхід, у якому за основу береться область інтересу в площині спостереження, а для визначення меж просторових частот — масштаб детектора. Цей підхід, зокрема, розглянуто в посібнику Шмідта та детально описано в його розділі 7. Було б корисно обговорити співвідношення між цим більш феноменологічним підходом і використаним у дисертації. У цьому контексті також важливим є аналіз кута приходу хвилі (angle-of-arrival), оскільки він впливає на оптичне проектування приймача та можливих систем компенсації турбулентності.
3. Слід також відзначити, що перевірку аналітичних моделей виконано за допомогою чисельного моделювання для трьох значень дисперсії Ритова. Водночас розподіл імовірності пропускання (PDT) та розкид положення центроїда пучка вже були досліджені для багатьох реальних атмосферних каналів і могли б слугувати цінним орієнтиром для оцінки отриманих прогнозів. Це стосується як випадку чистого блукання пучка на коротких трасах, так і екстремальних випадків каналу між Канарськими островами, а також супутникових каналів JAXA, ESA і CAS. Якщо згадати лише наші власні результати, у літературі наведено дані для каналів різної довжини.² Обговорення цих робіт також було б корисним.
4. Зазначимо, що серед вибраних для аналізу довжин каналів не були розглянуті канали дуже малої дальності (між будівлями, 100–500 м) та міські канали (3–10 км). Оскільки вони відповідають багатьом практичним застосуванням, їх обговорення було б доцільним.
5. Вибір довжини хвилі для квантових станів також має істотне значення. Численні дослідження продемонстрували переваги переходу до С-діапазону, пов'язані зі зменшенням фонового освітлення та збільшенням параметра Фріда. Майже лінійне масштабування цього важливого параметра додатково обґрунтовує використання випромінювання з довжиною хвилі 1550 нм. Крім того, це дає змогу використовувати телекомунікаційні технології, які є більш розвиненими та дешевшими, ніж технології для ближнього інфрачервоного діапазону. Тому було б корисно також обговорити залежність отриманих результатів від довжини хвилі.
6. Розглянемо приклад запису «летючого» кубіта до квантової пам'яті, наведений у розділі 6.2. У дисертації загалом розглядається схема з детектуванням у вільному просторі. Хоча середовище квантової пам'яті може взаємодіяти з багатомодовим пучком, наступний імпульс зчитування не здатний відтворити просторовий спектр, сформований турбулентністю під час запису, що призводить до суттєвого зниження точності відтворення

(fidelity). Саме з цієї причини, а також через технічні вимоги, зокрема необхідність надвужкої спектральної фільтрації, квантову пам'ять зазвичай реалізують для взаємодії з однією просторовою модою — як у хвилеводі, так і у вільному просторі.

7. Крім того, використання світла С-діапазону зазвичай передбачає здійснення квантових вимірювань і детектування за допомогою одномодових волоконно-оптичних систем. Це накладає більш жорсткі вимоги до оцінювання пропускання каналу. У такому разі співвідношення змінюється від рівняння (5.3) до виразу, в якому підінтегральна функція містить одномодову функцію $u_t(r, z)\psi^*(r)$, а не лише $|u_t(r, z)|^2$. Цей аспект також пов'язаний із компенсацією впливу турбулентності активними або адаптивними методами, що широко використовуються, наприклад, у класичних системах когерентного супутникового зв'язку. Для квантових каналів це особливо важливо, оскільки втрати не можуть бути компенсовані простим збільшенням потужності передаваного сигналу. Уже існують відповідні дослідження, зокрема й наші власні, тому обговорення цього питання було б дуже корисним.
8. Насамкінець зазначимо, що отриманий у дисертації результат щодо збереження квантової запутаності та неklasичності загалом протягом часових інтервалів від мілісекунд до десятків мілісекунд у турбулентних атмосферних каналах є надзвичайно цінним для розроблення перспективних експериментальних схем. Доцільно було б доповнити роботу аналізом можливих застосувань цього результату. Наприклад, його можна використати під час дослідження можливості реалізації експерименту Колелли—Овергаузера—Вернера (COW) у космічних умовах для перевірки ефектів загальної теорії відносності на фотонних квантових станах, де необхідна відносна точність оцінювання фази становить порядку 10^{-8} , як описано у відповідних літературних джерелах.

Офіційний опонент Д. Сореллі (Giacomo Sorelli):

1. Чи можна надати фізичну інтуїцію щодо плато чисельно отриманого розподілу ймовірності пропускання (PDT), яке спостерігається для сфокусованого пучка за умов проміжної турбулентності на рис. 3.8?
2. З огляду на сильну залежність PDT від розміру апертури, дифракційне розширення пучка, очевидно, відіграє важливу роль. Канали, досліджені в дисертації, класифікуються за дисперсією Ритова, яка поєднує вплив дифракції (через довжину каналу z_{ap}) та турбулентності (через структурну константу турбулентності C_n^2). У зв'язку з цим було б цікаво порівняти два канали з однаковою дисперсією Ритова, але різними значеннями z_{ap} та C_n^2 . Чи слід очікувати, що відповідні PDT будуть практично однаковими, що свідчитиме про домінуючу роль дисперсії Ритова, чи все ж можуть виникати суттєві відмінності, зумовлені окремими внесками дифракції та

турбулентності? Іншими словами, чи визначається поведінка PDT переважно дифракцією, турбулентністю чи їх взаємодією?

3. Як можна фізично інтерпретувати пригнічення точок уздовж діагоналі на рис. 4.4?
4. У дисертації для отримання двочасового PDT використано припущення про однакову швидкість вітру для всіх фазових екранів. Таке спрощення обґрунтовується необхідністю зберегти модель «ідентифікованою та придатною для аналізу» (identifiable and tractable). Іншим поширеним підходом, який також дає змогу врахувати неоднорідності, зберігаючи при цьому модель «ідентифікованою та придатною для аналізу», є вибір швидкостей фазових екранів із гаусового розподілу із заданими середнім значенням і дисперсією. Чи можна очікувати істотних змін результатів при переході до такої менш однорідної моделі?
5. У розділі 6 часові властивості каналу подано через абсолютні зсуви, зумовлені вітром (см). Оскільки характерні масштаби зрештою визначаються турбулентністю та поширенням пучка, чи не було б більш інформативним виражати ці результати через характерні довжини, зумовлені турбулентністю, такі як параметр Фріда r_0 або довготривалий радіус пучка W_{LT} ? Чи могло б таке нормування виявити більш універсальну поведінку для різних атмосферних каналів?
6. Характерна частота повторення імпульсів для адаптивного квантового зв'язку у вільному просторі визначається відношенням v/ρ_0 , де ρ_0 — просторовий радіус когерентності, а v — поперечна швидкість вітру. Ця величина концептуально нагадує частоту Грінвуда, яка масштабується як v/r_0 і визначає необхідну смугу пропускання контуру корекції в адаптивній оптиці. В обох випадках основною вимогою є те, щоб канал залишався достатньо корельованим між моментом його характеристики та подальшою дією — чи то передаванням квантового стану, чи застосуванням корекції хвильового фронту. Чи міг би автор прокоментувати взаємозв'язок між цими двома величинами?
7. Яким чином було обрано порогове значення, використане при дослідженні адаптивного протоколу в розділі 7.3? Можна очікувати наявності компромісу між використанням лише реалізацій каналу з найвищим пропусканням і збереженням достатньо великої кількості можливостей для передавання. Чи міг би автор прокоментувати цей компроміс? Зокрема, чи існує оптимальне порогове значення, яке забезпечує баланс між якістю передаваних квантових станів і швидкістю передачі інформації?

Результати відкритого голосування:

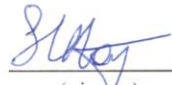
«За» 5 членів ради,

«Проти» 0 членів ради.

За результатами відкритого голосування разова спеціалізована вчена рада ухвалила присудити Клену Микиті Дмитровичу ступінь доктора філософії з галузі знань «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Відеозапис трансляції захисту дисертації додається.

Голова разової спеціалізованої вченої
ради


(підпис)

Сергій ШАРАПОВ
(власне ім'я та прізвище)

Засвідчую:

Вчений секретар

Інституту теоретичної фізики

ім. М.М. Боголюбова

Національної академії наук України

кандидат фізико-математичних наук




(підпис)

Іван СТАРОДУБ
(власне ім'я та прізвище)

**Decision
of the one-time specialized academic council
on the award of the degree of Doctor of Philosophy**

Candidate for the degree of Doctor of Philosophy, Mykyta Dmytrovych Klen, born in 1997, a citizen of Ukraine, higher education: in 2022 graduated from Taras Shevchenko National University of Kyiv with a specialization in “Physics and Astronomy”; is a postgraduate (PhD) student at the Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of the NAS of Ukraine, city of Kyiv; completed the accredited educational and scientific program “Theoretical Physics”.

The one-time specialized academic council, established by Order of the Director of the Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of the NAS of Ukraine No. 08/01-02 of «11» May 2026, composed of:

Chair of the one-time specialized academic council –

Sergei Hennadiiovych Sharapov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory of Strongly Correlated Low-Dimensional Systems, Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of the NAS of Ukraine

Reviewers –

Yaroslav Oleksandrovych Zolotaryuk, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Synergetics, Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of the NAS of Ukraine

Official opponents –

Leonid Petrovych Yatsenko, Academician of National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the department of coherent and quantum optics, Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine.

Paolo Villoresi, Doctor of Philosophy, Professor, Director of the Padua Quantum Technologies Research Center, University of Padua (Università degli Studi di Padova), Italy.

Giacomo Sorelli, Doctor of Philosophy (PhD), Group Leader of the Quantum Superresolution Group, Fraunhofer Institute of Optronics, System Technologies and Image Exploitation (Fraunhofer IOSB), Ettlingen, Germany.

at its meeting of «13» July 2026 decided to award the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 10 «Natural Sciences» to Mykyta Dmytrovych Klen on the basis of the public defense of the dissertation «Statistical models and temporal

coherence of quantum light in the turbulent atmosphere» in specialty 104 «Physics and Astronomy».

The dissertation was carried out at the Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of the NAS of Ukraine. Scientific supervisor: Andrii Oleksandrovykh Semenov, Habilitated Doctor of Natural Sciences, Senior Researcher, Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Leading Researcher of the Department of Synergetics and Leader of the Quantum Optics and Quantum Information Group, Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of the NAS of Ukraine.

The dissertation is submitted in the form of a specially prepared manuscript. It fully complies with the requirements of the “Procedure for the Award of the Degree of Doctor of Philosophy and the Cancellation of the Decision of a One-Time Specialized Academic Council of a Higher Education Institution or Scientific Institution on the Award of the Degree of Doctor of Philosophy”, approved by Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 44 of January 12, 2022 (as amended). No violations of academic integrity were found in the dissertation or in the scientific works presenting its results.

The applicant has 4 scientific publications on the topic of the dissertation, including 3 published in a Q1 journal:

1. M. Klen, A. A. Semenov. Numerical simulations of atmospheric quantum channels. *Physical Review A*, 108(3), 033718 (2023). <https://doi.org/10.1103/physreva.108.033718> (Q1)
2. M. Klen, D. Vasylyev, W. Vogel, A. A. Semenov. Time correlations in atmospheric quantum channels. *Physical Review A*, 109(3), 033712 (2024). <https://doi.org/10.1103/physreva.109.033712> (Q1)
3. I. Pechonkin, M. Klen, A. A. Semenov. Circular-beam approximation for quantum channels in a turbulent atmosphere. *Physical Review A*, 112(6), 063716 (2025). <https://doi.org/10.1103/pv7j-4zpf> (Q1)
4. A. Semenov, M. Klen, I. Pechonkin (2025, October 29). Quantum optics in the turbulent atmosphere: fundamental issues and applications. In V. Fernandez, G. Sorelli, & S. Schwartz (Eds), *Quantum Technologies for Defence and Security II* (p. 38). *Proceedings of SPIE 13676, 136760H-13* (2025). <https://doi.org/10.1117/12.3069599>

The following took part in the discussion (the chair, the reviewers, the official opponents, and others present) and made the following remarks:

Reviewer Yaroslav Zolotaryuk:

The thesis is not free from drawbacks, and I list them below. However, these points of critique are not raised to serve as a basis for a rejection of this thesis, but rather as suggestions that can be used to refine or nuance certain points in it.

(i) The Author uses the Rytov parameter to characterise the strength of turbulence of the atmospheric channels. However, the thesis would benefit from an introductory discussion about the real meteorological quantities, such as temperature or pressure, that correspond to the values of the Rytov parameter being discussed. Especially because the Authors devoted a lot of effort towards discussing the physically realistic parameters.

(ii) This work relies extensively on the Taylor frozen hypothesis. While it is widely accepted for the weak turbulence, recent research on the strong turbulence in the atmospheric surface layer (which is up to 100-150 meters above the ground), this hypothesis does not always work [see Physics of Fluids 34, 076602 (2022), DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0097729>]. Therefore, the limitations of the Taylor frozen hypothesis for quantum communications within the atmospheric surface layer should be addressed more carefully.

The next comments are more about how certain results are presented.

(iii) The purpose of Figure 1.1 is not clear. Is it an illustrative example of a random function? Even if it is so, it was not explained how it was calculated.

(iv) This comment concerns Figures 3.1-3.3. (a) Figures 3.1 and 3.2 need labels like (a) and (b) or legends so that the reader can easily distinguish between the collimated and focused beam cases. (b) In Figures 3.1-3.2, the dependencies for the collimated and focused beams are almost identical, and the deviations from the Gaussian law are not clearly seen. It would be more beneficial to superimpose two dependencies and to provide a zoomed area to highlight the most interesting areas. The latter is also true for Figure 3.3. (c) The quality of the data presentation is low. For example, Figure 3.3 seems to correspond to Figure 9 of the paper [I]. While in the paper the figure looks clearly as a histogram, in the one in the thesis, the separate columns cannot be distinguished, and the histogram-like nature of the figure is lost. The last two comments are rather technical.

(v) On page 53, line 9 from the bottom, there is a typo in the reference. I do not understand what “[^@bachmann2025]” stands for.

(vi) The term “spatial frequency” is used several times throughout the thesis (pages 38,51) instead of the more conventional term “wave number”.

Official opponent Leonid Yatsenko:

The dissertation makes a very positive overall impression and contains a number of original scientific results. The remarks listed below do not reduce the scientific value of the work and should primarily be regarded as points for discussion and possible directions for future research.

1. Physical interpretation of the Beta-distribution model

One of the central conclusions of the dissertation is that the empirical Beta-distribution model frequently outperforms physically motivated PDT models over a broad range of atmospheric conditions. While this conclusion is convincingly supported by numerical simulations, the physical origin of the success of the Beta-distribution remains insufficiently discussed. The model appears primarily empirical, and its connection to the underlying physical mechanisms of atmospheric turbulence is not entirely clear.

Question 1. Can the author provide a physical interpretation explaining why the Beta-distribution reproduces atmospheric transmittance statistics so successfully over such a broad parameter range?

Question 2. Have alternative bounded distributions, such as logistic-normal distributions or other transformations of Gaussian random variables, been considered and compared with the Betadistribution model?

2. Limitations of beam-shape-based models

The dissertation convincingly demonstrates the existence of misspecification bias in beamwandering and elliptical-beam models. The proposed explanation attributes this bias primarily to higher-order beam-shape deformations that are not captured by low-order beam parameters. However, it remains somewhat unclear to what extent the observed discrepancies originate from smooth higher-order deformations and to what extent they are associated with the formation of speckle structures under turbulent propagation.

Question 3. To what extent does the author attribute the limitations of beam-shape-based models to turbulence-induced speckle formation rather than to smooth beam-shape distortions?

Question 4. Has the author performed a direct analysis of spatial intensity distributions to quantify the role of speckles in the observed model discrepancies?

3. Physical interpretation of the Transmittance-Moment Matching procedure

The proposed Transmittance-Moment Matching technique represents one of the most original results of the dissertation. At the same time, the procedure effectively transfers the influence of higher-order beam deformations into modified effective beam-size statistics. As a consequence, the effective beam-size parameter loses part of its direct geometrical interpretation.

Question 5. To what extent does the effective beam-size parameter retain a clear physical meaning after the Transmittance-Moment Matching procedure is applied?

Question 6. Is it possible to generalize the moment-matching approach to the elliptical-beam model, or does the increased number of parameters fundamentally limit such a generalization?

4. Temporal correlations and the frozen-turbulence approximation

The analysis of temporal correlations constitutes one of the most interesting parts of the dissertation. However, the entire treatment is based on Taylor's frozen-turbulence approximation, in which temporal evolution arises solely from wind-driven translation of a static turbulence pattern. Although this approximation is widely used in atmospheric optics, real atmospheric turbulence also exhibits intrinsic temporal evolution ("boiling"), which may contribute to decorrelation.

Question 7. How sensitive are the obtained temporal correlation times and the introduced coherence radius to deviations from the frozen-turbulence approximation?

Question 8. In the hypothetical absence of wind, what physical mechanism would determine the characteristic decorrelation time of atmospheric transmittance?

5. Aperture-averaged spatial coherence radius

The aperture-averaged spatial coherence radius introduced in the dissertation provides a useful quantitative characterization of temporal correlations. Nevertheless, the term "coherence radius" may potentially be confused with traditional measures of optical-field coherence.

Question 9. Would it be more appropriate to interpret the introduced quantity as a correlation length of transmittance fluctuations rather than as a coherence radius in the traditional optical sense?

6. Applicability of the obtained results to atmospheric quantum communication

The final chapter demonstrates several important applications to continuous-variable and discrete-variable quantum communication protocols. At the same time, a significant part of the dissertation is devoted to the statistical description of atmospheric propagation itself and would remain relevant even in purely classical optical communication systems.

Question 10. Which of the results obtained in the dissertation does the author consider to be genuinely specific to quantum communication, and which results should be regarded as more general contributions to statistical atmospheric optics?

Official opponent Paolo Villoresi:

1. We can see that the choice of references does not include results from very recent years, thus losing a fair amount of useful results, given the great progress of the sector. Including some of the latter ones would be helpful.
2. We note that on the development of the numerical analysis, the setting and numerosity of the phase screens are related to the intrinsic atmospheric scale. In this context, a different approaches uses instead the reference to the observation-plane region of interest, and for the spatial frequency limits, the detector scale. This is discussed for example in the manual by Schmidt and detailed in its Chap. 7. A discussion on the relation of this more phenomenological viewpoint would be useful. In this regards, also the analysis of the angle-of-arrival is relevant, as

it conditions the optical design of the receiver and of potential turbulence correctors.

3. We note that the validation of the analytical models are realized by means of numerical simulations, with three different Rytov variances. Now, the probability distribution of transmittance (PDT) and the beam-centroid spread have been assessed for many real channels and may provide a valuable reference for the predictions. This from the pure wandering case of short tracks to the extreme cases of the Canary link, beside the satellite cases (JAXA, ESA and then CAS). Only to cite our own results, results on the different lengths are reported in literature². A discussion on these references may be useful too.
4. We note that in the selection of the channel lengths to be analysed, the very short range (interbuilding 100-500 m) and the metropolitan one (3-10 km) were not considered. As they correspond to several applications, a discussion would be useful.
5. The selection of the wavelength for the quantum states is also relevant. Many results have shown advantages in reduced background light and larger Fried parameter moving toward C-band. Indeed the almost linear scaling of this latter crucial parameter supports the adoption of 1550 nm light. This also allows the use of the telecom technology, that is both very advanced and cheaper than for NIR. Also on the wavelength dependence of the results, a discussion would be useful.
6. By taking the case of the example of the writing of a flying qubit on a quantum memory in sec. 6.2, the scheme generally considered in the Thesis is of free-space detection. While it's possible to interact with the memory active medium with a multimode beam, the subsequent reading pulse cannot reproduce the turbulence-induced spatial spectrum of the writing, causing a significant drop in fidelity. For this reason as well as for more technical ones as the necessary ultranarrow spectral filtering, the memory is usually made to interact with a single spatial mode, either guided or free space. In addition, C-band light usually foresees the quantum measurement and the detection to be realised with single-mode fiber systems. This aspect is imposing a more advanced criteria for the entire transmissivity assessment. Indeed the relation changes from Eq. 5.3 to one in which the integrand function contains the single mode function as $u_t(r, z)\psi^*(r)$ and not just $|u_t(r, z)|^2$. This aspect also relates on the mitigation of turbulence with active/adaptive means, very common for example in the classical coherent detection in satellite communications. This is very relevant in the situation of quantum channels, in which the losses cannot be mitigated by increasing the transmitted power. Some analysis are available, including from ours, and a discussion on this aspect would be very useful.
7. Finally we note that the result about the persistence of quantum entanglement and nonclassicality in general over millisecond to tens-of-milliseconds timescales in turbulent atmospheric channels is a very useful notion for advanced

experimental scheme. An analysis of potentialities may be included. As example, it may be used in the study of bringing the Colella-Overhauser-Werner (COW) interference test in the space context for assessing general relativity effect on photonic quantum states with a required relative precision in the phase estimate of the order of 10^{-8} as described in the references.

Official opponent Giacomo Sorelli:

1. Can we have some physical intuition on the plateau of the numerical PDT observed for a focused beam in intermediate turbulence in Fig. 3.8?
2. Given the strong dependence of the PDT on the aperture size, diffraction-induced beam broadening appears to play an important role. The channels investigated in the thesis are classified through their Rytov variance, which combines diffraction effects (through the propagation distance z_{ap}) and turbulence effects (through the turbulence structure constant C_n^2). It would therefore be interesting to compare two channels with the same Rytov variance but different values of z_{ap} and C_n^2 . Would one expect the resulting PDTs to be essentially identical, suggesting that the Rytov variance is the dominant parameter, or could significant differences arise from the separate contributions of diffraction and turbulence? In other words, is the behavior of the PDT primarily diffraction-dominated, turbulence-dominated, or determined by the interplay between the two effects?
3. How can I physically interpret the suppression of diagonal points in Fig. 4.4?
4. In the thesis, a constant wind velocity for all phase screens is used to derive the two-time PDT. This simplification is justified by the need to maintain the model "identifiable and tractable". Another common approach to account for inhomogeneities, while keeping the model "identifiable and tractable" is to draw the screens velocities from a Gaussian distribution with given mean and variance. Could one expect significant changes in the results from moving to a less homogeneous model?
5. In Chapter 6, the temporal properties of the channel are presented in terms of absolute wind-induced shifts (cm). Since the relevant scales are ultimately determined by turbulence and beam propagation, would it be more informative to express these results in terms of characteristic turbulence-induced length scales, such as the Fried parameter r_0 or the long-term beam radius W_{LT} ? Would such a normalization reveal a more universal behavior across different channel conditions?
6. The characteristic pulse rate for adaptive free-space quantum communication is determined by the ratio v/ρ_0 , where ρ_0 is the spatial coherence radius and v is the transverse wind speed. This quantity appears conceptually similar to the Greenwood frequency, which scales as v/r_0 and sets the required correction-loop bandwidth in adaptive optics. In both cases, the underlying requirement is that the channel remains sufficiently correlated between its characterization and the

subsequent action, whether transmitting a quantum state or applying a wavefront correction. Could the author comment on the relationship between these two quantities?

7. How was the threshold used in the study of the adaptive protocol in Section 7.3 chosen? I would expect a trade-off between exploiting only the highest-transmittance channel realizations and maintaining a sufficiently large number of transmission opportunities. Can the author comment on this interplay? More specifically, is there an optimal threshold that balances the quality of the transmitted quantum states against the resulting communication rate?

Results of the open vote:

«For» 5 council members,

«Against» 0 council members.

On the basis of the results of the open vote, the one-time specialized academic council awards Mykyta Dmytrovykh Klen the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge «Natural Sciences» in specialty 104 «Physics and Astronomy».

A video recording of the broadcast of the dissertation defense is attached.

Head of the one-time specialized academic council


(signature)

Sergei SHARAPOV

(name and surname)

Certified:

Scientific secretary of the
Bogolyubov Institute for Theoretical Physics
of the National Academy of Sciences of Ukraine
candidate of sciences (physics and mathematics)




(signature)

Ivan STARODUB

(name and surname)