Rada Dyscypliny Nauki Fizyczne
Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu
Adres: Grudziądzka 5/7, 87-100 Toruń
za pośrednictwem:
Rady Doskonałości Naukowej
pl. Defilad 1
00-901 Warszawa
(Pałac Kultury i Nauki, p. XXIV, pok. 2401)

ARTUR CZERWIŃSKI

Instytut Fizyki
Wydział Fizyki Astronomii i Informatyki Stosowanej
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

Wniosek

z dnia 26 października 2026 r.

o przeprowadzenie postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie:

nauki fizyczne

Wnioskuję – na podstawie art. 221 ust. 10 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce – aby komisja habilitacyjna podejmowała uchwałę w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego w głosowaniu ~~**tajnym**~~**/jawnym***[1]

Zostałem poinformowany, że:

Administratorem w odniesieniu do danych osobowych pozyskanych w ramach postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego jest Przewodniczący Rady Doskonałości Naukowej z siedzibą w Warszawie (pl. Defilad 1, XXIV piętro, 00-901 Warszawa).

Kontakt za pośrednictwem e-mail: kancelaria@rdn.gov.pl , tel. 22 656 60 98 lub w siedzibie organu.

Dane osobowe będą przetwarzane w oparciu o przesłankę wskazaną w art. 6 ust. 1 lit. c) Rozporządzenia UE 2016/679 z dnia z dnia 27 kwietnia 2016 r. w związku z art. 220 - 221 oraz art. 232 – 240 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, w celu przeprowadzenie postępowania o nadanie stopnia doktora habilitowanego oraz realizacji praw i obowiązków oraz środków odwoławczych przewidzianych w tym postępowaniu.

Szczegółowa informacja na temat przetwarzania danych osobowych w postępowaniu dostępna jest na stronie www.rdn.gov.pl/klauzula-informacyjna-rodo.html



……..
(podpis wnioskodawcy)

[1] * Niepotrzebne skreślić.

Załączniki:

1. Kopia dokumentu potwierdzającego posiadanie stopnia doktora.
2. Dane wnioskodawcy.
3. Autoreferat.
4. Wykaz osiągnięć naukowych albo artystycznych, stanowiących znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny.
5. Elektroniczne wersje artykułów naukowych składających się na osiągnięcia naukowe stanowiące znaczny wkład w rozwój dyscypliny (łącznie **14 plików pdf**).
6. Oświadczenia Habilitanta dotyczące wkładu w powstanie prac współautorskich (łącznie **8 oświadczeń** podpisanych elektronicznie przez wnioskodawcę).
7. Oświadczenia współautorów dotyczące wkładu w powstanie prac współautorskich (łącznie **17 oświadczeń** w formie dostarczonej przez współautorów).

Autoreferat

1. Imię i nazwisko.

Artur Czerwiński

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

Stopień naukowy doktora w dziedzinie nauk fizycznych w dyscyplinie fizyka

Podmiot nadający stopień: Rada Naukowa Instytutu Fizyki Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu

Rok uzyskania stopnia doktora: 2018

Tytuł rozprawy doktorskiej: *Applications of Selected Algebraic Methods to Quantum Tomography of Open Systems*

Posiadane dyplomy:

- tytuł zawodowy magistra, rok uzyskania: 2014, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu,

- tytuł zawodowy licencjata, rok uzyskania: 2012, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu.

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

od 01.06.2026 do chwili obecnej	Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Instytut Fizyki stanowisko: adiunkt
od 01.01.2024 do 30.09.2025	Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Instytut Fizyki stanowisko: adiunkt

od 01.12.2022 do 31.12.2023	Uniwersytet Warszawski Centrum Nowych Technologii Centrum Optycznych Technologii Kwantowych Laboratorium Technologii Kwantowych stanowisko: adiunkt
od 01.12.2019 do 30.11.2022	Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Instytut Fizyki stanowisko: adiunkt
od 01.10.2014 do 30.04.2016	Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk Centrum Fizyki Teoretycznej stanowisko: asystent
03.07.2011 – 29.09.2011	Institute for Quantum Computing, Waterloo, Kanada Quantum Photonics Laboratory Group stanowisko: research assistant/long-term visitor

4. **Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej.**

4.1. Określenie liczby osiągnięć naukowych stanowiących znaczny wkład w rozwój dyscypliny: nauki fizyczne

Zgodnie z art. 219 ust. 1 pkt 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, stopień doktora habilitowanego nadaje się osobie, która posiada w swoim dorobku **osiągnięcia naukowe albo artystyczne stanowiące znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny**, w tym co najmniej jedno osiągnięcie przyjmujące postać określoną w lit. a–c tego przepisu, tj. monografii naukowej, cyklu powiązanych tematycznie artykułów naukowych albo zrealizowanego oryginalnego osiągnięcia projektowego, konstrukcyjnego, technologicznego lub artystycznego.

Użycie przez ustawodawcę liczby mnogiej „osiągnięcia" wskazuje, że przedmiotem oceny powinno być więcej niż jedno osiągnięcie stanowiące znaczny wkład w rozwój dyscypliny. Interpretację tę wzmacnia art. 220 ust. 2 pkt 2 ustawy, zgodnie z którym wniosek o wszczęcie postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego obejmuje wykaz **osiągnięć**, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt 2 ustawy. Stanowisko takie zostało również przyjęte przez Radę Doskonałości Naukowej w poradniku dotyczącym postępowań habilitacyjnych, w którym wskazano, że warunkiem nadania stopnia doktora habilitowanego jest „przedłożenie do oceny co najmniej dwóch osiągnięć, które spełniają kryterium znaczącego wkładu w rozwój określonej dyscypliny"*. Analogiczna interpretacja została szczegółowo uzasadniona w literaturze dotyczącej postępowań awansowych [1].

Podejście to znajduje także odzwierciedlenie w aktualnych wzorach dokumentacji udostępnionych przez Radę Doskonałości Naukowej. Dokument zatytułowany „Wykaz **osiągnięć** naukowych albo artystycznych, stanowiących znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny" przewiduje, obok monografii, cyklu powiązanych tematycznie artykułów oraz osiągnięć projektowych, konstrukcyjnych, technologicznych lub artystycznych, możliwość wskazania także innych osiągnięć naukowych lub artystycznych.

Kierując się powyższym brzmieniem przepisów oraz interpretacją przedstawioną przez Radę Doskonałości Naukowej, w niniejszym Autoreferacie wyodrębniłem **trzy osiągnięcia naukowe**, które przedstawiam jako stanowiące znaczny wkład w rozwój dyscypliny nauki fizyczne. Osiągnięcia te, oznaczone literami A, B oraz C, mają odrębny przedmiot badawczy, a zarazem dokumentują kolejne kierunki rozwijanej przeze mnie działalności naukowej. Ich szczegółowa charakterystyka, wraz z określeniem mojego indywidualnego wkładu w powstanie poszczególnych prac, została przedstawiona w kolejnych częściach Autoreferatu.

---

* Cytat za: *Poradnik. Postępowania dotyczące nadawania stopnia doktora habilitowanego*, Rada Doskonałości Naukowej, https://www.rdn.gov.pl/dobre-praktyki.poradnik-postepowania-dotyczace-nadawania-stopnia-doktora-habilitowanego.html str. 12 (dostęp: 21.10.2026).

4.2. Osiągnięcie A: Rozwój formalnych narzędzi do rekonstrukcji i charakteryzacji stanów kwantowych w realistycznych warunkach eksperymentalnych

4.2.1. Lista publikacji składających się na osiągnięcie A i ocena bibliometryczna

Osiągnięcie A zostało przedstawione w formie cyklu powiązanych tematycznie artykułów naukowych, o którym mowa w **art. 219 ust. 1 pkt 2 lit. b** ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Ze względu na spełnienie powyższej przesłanki dotyczącej formy osiągnięcia, jest ono **wiodącym** osiągnięciem wykazywanym we wniosku.

Na osiągnięcie A składa się 9 publikacji naukowych opublikowanych w latach 2020–2025:

[A1] K. Sedziak-Kacprowicz, A. Czerwinski, P. Kolenderski, *Tomography of time-bin quantum states using time-resolved detection.* "Physical Review A" Tom **102** (Nr 5), 052420 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevA.102.052420

IF (2025): 3.0 **Liczba cytowań: 6**

[A2] A. Czerwinski, K. Sedziak-Kacprowicz, P. Kolenderski, *Phase estimation of time-bin qudits by time-resolved single-photon counting.* "Physical Review A" Tom **103** (Nr 4), 042402 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevA.103.042402

IF (2025): 3.0 **Liczba cytowań: 4**

[A3] A. Czerwinski, *Quantum state tomography with informationally complete POVMs generated in the time domain.* "Quantum Information Processing" Tom **20** (Nr 3), 105 (2021). DOI: 10.1007/s11128-021-03045-9

IF (2025): 2.2 **Liczba cytowań: 23**

[A4] A. Czerwinski, *Quantifying entanglement of two-qubit Werner states.* "Communications in Theoretical Physics" Tom **73** (Nr 8), 085101 (2021). DOI: 10.1088/1572-9494/ac01e1

IF (2025): 3.5 **Liczba cytowań: 10**

[A5] A. Czerwinski, *Quantum tomography of three-qubit generalized Werner states.* "International Journal of Modern Physics B" Tom **36** (Nr 19), 2250108 (2022). DOI: 10.1142/S0217979222501089

IF (2025): 2.3 **Liczba cytowań: 4**

[A6] A. Czerwinski, J. Szlachetka, *Efficiency of photonic state tomography affected by fiber attenuation.* "Physical Review A" Tom **105** (Nr 6), 062437 (2022). DOI: 10.1103/PhysRevA.105.062437

IF (2025): 3.0 **Liczba cytowań: 21**

[A7] A. Czerwinski, *Quantum tomography of entangled qubits by time-resolved single-photon counting with time-continuous measurements.* "Quantum Information Processing" Tom **21** (Nr 9), 332 (2022). DOI: 10.1007/s11128-022-03682-8

IF (2025): 2.2 **Liczba cytowań: 14**

[A8] A. Czerwinski, S. Haddadi, *Optimizing QKD efficiency by addressing chromatic dispersion and time measurement uncertainty.* "Physics Letters A" Tom **526**, 129972 (2024). DOI: 10.1016/j.physleta.2024.129972

IF (2025): 2.7 **Liczba cytowań: 3**

[A9] A. Czerwinski, J. J. Borkowski, *Quantum illumination using polarization-entangled photon pairs for enhanced object detection: comment*. "Optics Express" Tom **33** (Nr 18), 38005-38008 (2025). DOI: 10.1364/OE.548099

IF (2025): 3.4 **Liczba cytowań: 1**

Podsumowując, od strony bibliometrycznej na osiągnięcie A składa się 9 publikacji, z których:

- 3 zostały opublikowane w czasopiśmie **„Physical Review A”** (wydawca: American Physical Society),
- 2 w czasopiśmie **„Quantum Information Processing”** (wydawca: Springer),
- 1 w czasopiśmie **„Communications in Theoretical Physics”** (wydawca: IOP we współpracy z Chinese Physical Society oraz Institute of Theoretical Physics of the Chinese Academy of Sciences),
- 1 w czasopiśmie **„International Journal of Modern Physics B”** (wydawca: World Scientific Publishing),
- 1 w czasopiśmie **„Physics Letters A”** (wydawca: Elsevier),
- 1 w czasopiśmie **„Optics Express”** (wydawca: Optica Publishing Group).

Wszystkie wymienione czasopisma naukowe wydawane są przez wydawców o ugruntowanej pozycji w świecie nauki, a same czasopisma cieszą się uznaniem i zaufaniem wśród badaczy z fizyki teoretycznej. Ponadto każde czasopismo posiada aktualny **Impact Factor > 2**.

Łączny IF dla cyklu 9 publikacji wynosi **25,3**, a średnia wartość to **2,81**.

Liczba cytowań określona została na podstawie **Google Scholar** z uwzględnieniem następujących zasad:

- podane liczby cytowań to stan **na dzień 20.10.2026**,
- przy podawaniu liczby cytowań uwzględniono wyłącznie recenzowane czasopisma, książki, opublikowane prace dyplomowe oraz recenzowane materiały pokonferencyjne,
- podane liczby cytowań **nie uwzględniają** autocytowań.

Łączna liczba cytowań wybranego cyklu 9 publikacji wynosi **86**, co w przeliczeniu na publikację daje średnią wartość **9,56 cytowania na jedną pracę.**

Określenie wkładu Kandydata w powstanie publikacji składających się na osiągnięcie A:

- [A1], [A2], [A6], [A8], [A9] – zgodnie z oświadczeniami dołączonymi do wniosku,
- [A3], [A4], [A5], [A7] – prace jednoautorskie, 100% wkładu Kandydata.

W przypadku **każdej pracy** wchodzącej w skład Osiągnięcia A Kandydat pełnił funkcję **Autora Korespondującego.**

4.2.2. Merytoryczne ujęcie osiągnięcia A

Tomografia stanów zakodowanych w przedziałach czasowych

Pierwszy blok tematyczny składający się na osiągnięcie A obejmuje prace [A1] i [A2], poświęcone opracowaniu i analizie metod tomografii kwantowej dla stanów fotonicznych, w których informacja kwantowa zakodowana jest w przedziałach czasowych (ang. *time bins*). Wspólnym elementem obu prac jest wykorzystanie dyspersyjnej propagacji fotonu w światłowodzie oraz czasowo-rozdzielczej detekcji pojedynczych fotonów do zdefiniowania pomiaru pozwalającego na rekonstrukcję stanu kwantowego. Istotnym aspektem prowadzonych badań było odejście od idealnego modelu pomiaru i jawne uwzględnienie parametrów rzeczywistych urządzeń, w szczególności skończonej rozdzielczości czasowej detektorów.

Kodowanie informacji kwantowej w przedziałach czasowych (ang. *time-bin encoding*) zostało po raz pierwszy zaproponowane przez Fransona w kontekście testów naruszenia nierówności Bella [2]. W kolejnych latach koncepcja ta znalazła zastosowanie w protokołach kwantowej dystrybucji klucza (ang. *quantum key distribution*, QKD) [3–5], przetwarzaniu informacji kwantowej [6,7], a następnie również w protokołach teleportacji kwantowej [8]. Eksperymentalna realizacja stanów kodowanych w przedziałach czasowych wymaga zastosowania nieobciążonego (ang. *unbiased*) interferometru do ich przygotowania, natomiast ich pomiar może być realizowany z wykorzystaniem kolejnego interferometru lub odpowiedniego oddziaływania nieliniowego. Istotną zaletą takiego sposobu kodowania jest stosunkowo wysoka odporność na zakłócenia występujące podczas propagacji fotonów, a także możliwość uproszczenia układu eksperymentalnego stosowanego w protokołach komunikacji kwantowej. Z tego względu stany *time-bin* stanowią szczególnie interesujący nośnik informacji w systemach transmisyjnych, w których istotne są stabilność propagacji, możliwość przesyłania informacji na większe odległości oraz praktyczna realizacja operacji pomiarowych. Ich znaczenie aplikacyjne stanowiło motywację do rozwijania metod pozwalających nie tylko na przygotowanie i transmisję takich stanów, lecz także na ich precyzyjną rekonstrukcję i charakteryzację w realistycznych warunkach eksperymentalnych.

Podstawą rozważanego formalizmu jest kodowanie informacji kwantowej w modach czasowych pojedynczego fotonu. W takim podejściu stany bazowe układu nie są związane, na przykład, z polaryzacją fotonu, lecz z jego lokalizacją w kolejnych, rozdzielonych w czasie pakietach falowych. Stan kubitowy (ang. *qubit* od *quantum bit*, inaczej bit kwantowy) jest zatem realizowany przez pojedynczy foton znajdujący się w koherentnej superpozycji dwóch modów czasowych.

U podstaw modelu teoretycznego opublikowanego w pracy [A1] przyjęto, że amplituda pojedynczego pakietu falowego ma profil gaussowski

$$u(t) = \frac{1}{\pi^{1/4}\sqrt{\sigma}} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right), \tag{1}$$

gdzie parametr σ określa jego szerokość czasową. Stan pojedynczego fotonu tworzącego kubit może być wówczas opisany funkcją falową

$$\psi(t) = \alpha_0 u\left(t + \frac{\tau}{2}\right) + \alpha_1 u\left(t - \frac{\tau}{2}\right), \tag{2}$$

gdzie τ oznacza odstęp czasowy pomiędzy środkami obu pakietów, natomiast zespolone amplitudy α_0 i α_1 spełniają warunek normalizacji

$$|\alpha_0|^2 + |\alpha_1|^2 = 1. \tag{3}$$

Wprowadzenie dwóch rozdzielonych pakietów pozwala zdefiniować logiczne wektory bazowe

$$|0\rangle = \int_{-\infty}^{\infty} u\left(t + \frac{\tau}{2}\right)|t\rangle\, dt, \qquad |1\rangle = \int_{-\infty}^{\infty} u\left(t - \frac{\tau}{2}\right)|t\rangle\, dt, \tag{4}$$

gdzie $|t\rangle$ reprezentuje stan fotonu zlokalizowanego w określonej chwili czasu t. Fizycznie wektory $|0\rangle$ oraz $|1\rangle$ odpowiadają odpowiednio wcześniejszemu i późniejszemu przedziałowi czasowemu, w którym może znajdować się foton.

Ze względu na matematyczne własności pakietów gaussowskich wektory $|0\rangle$ i $|1\rangle$ nie są ściśle ortogonalne. Ich iloczyn skalarny wynosi [A1]:

$$\langle 0|1\rangle = \exp\left(-\frac{\tau^2}{4\sigma^2}\right). \tag{5}$$

Nakładanie się modów może być jednak uczynione zaniedbywalnie małym przez odpowiedni dobór stosunku odstępu czasowego τ do szerokości pakietu σ (odpowiednia separacja bazowych pakietów). W pracy [A1] rozważano przykładowo $\tau/\sigma = 7.7$, dla którego

$$\langle 0|1\rangle \approx 3 \times 10^{-7}. \tag{6}$$

Pozwala to z bardzo dobrym przybliżeniem traktować zbiór $\{|0\rangle, |1\rangle\}$ jako bazę ortogonalną dwuwymiarowej przestrzeni Hilberta. Logiczny kubit przyjmuje wówczas standardową postać [A1]

$$|\psi_{\text{in}}\rangle = \alpha_0|0\rangle + \alpha_1|1\rangle, \tag{7}$$

przy czym jego fizyczną realizacją pozostaje pojedynczy foton delokalizowany pomiędzy dwa różne przedziały czasowe.

Konstrukcja kubitu zaproponowana w pracy [A1], wraz z warunkiem przybliżonej ortogonalności określonym w równaniu (6), została odnotowana w literaturze naukowej. Przykładowo praca [9], wprowadzająca protokół QKD oparty na wielowymiarowych stanach kwantowych, cytuje artykuł [A1] jako uzasadnienie odpowiedniego rozdzielenia pakietów falowych. Odwołanie do pracy [A1] pojawia się również w wysoko cytowanej pracy przeglądowej [10], opublikowanej w czasopiśmie „Advanced Quantum Technologies", dotyczącej kontroli i pomiaru kwantowych impulsów światła na potrzeby nauki o informacji kwantowej i technologii kwantowych. Co więcej, dwie inne prace naukowe poświęcone stanom zakodowanym w przedziałach czasowych, tj. [11] oraz [12] wykorzystują formalizm matematyczny przedstawiony w pracy [A1], związany z konstrukcją kubitu. Cytowania te potwierdzają, że zaproponowany model matematyczny opisujący stany typu *time-bin* został nie tylko zauważony przez środowisko naukowe, ale również znalazł bezpośrednie zastosowanie w dalszych badaniach rozwijających tę tematykę.

Konstrukcja kubitu może zostać bezpośrednio uogólniona na układy d-poziomowe. Kudit (ang. *qudit*) jest wówczas reprezentowany przez pojedynczy foton znajdujący się w koherentnej superpozycji d pakietów falowych, których środki są oddalone od siebie o stały interwał τ. Jego funkcję falową można zapisać jako [A1]

$$\psi(t) = \sum_{n=0}^{d-1} \alpha_n u\left(t - n\tau + \frac{d-1}{2}\tau\right), \tag{8}$$

gdzie warunek normalizacji ma postać

$$\sum_{n=0}^{d-1} |\alpha_n|^2 = 1. \tag{9}$$

Odpowiadające poszczególnym przedziałom czasowym wektory bazowe zdefiniowane są następujaco

$$|n\rangle = \int_{-\infty}^{\infty} u\left(t - n\tau + \frac{d-1}{2}\tau\right)|t\rangle\, dt, \qquad n = 0, \ldots, d-1. \tag{10}$$

Dla odpowiednio dużego stosunku τ/σ nakładanie się sąsiednich modów jest zaniedbywalne i wektory te mogą być traktowane jako ortogonalna baza przestrzeni d-wymiarowej. Stan logicznego kuditu można zatem zapisać w standardowej postaci

$$|\psi_{\text{in}}\rangle = \sum_{n=0}^{d-1} \alpha_n |n\rangle. \tag{11}$$

Takie sformułowanie problemu tworzy bezpośrednie połączenie pomiędzy ciągłym profilem pojedynczego fotonu w dziedzinie czasu a skończenie wymiarową przestrzenią Hilberta wykorzystywaną w teorii informacji kwantowej. Parametry α_n zawierają informację o nieznanym stanie kwantowym, natomiast fizycznymi nośnikami stanów bazowych są rozdzielone w czasie pakiety falowe. Zadaniem tomografii jest wyznaczenie tych parametrów, a w ogólnym przypadku rekonstrukcja odpowiadającej im macierzy gęstości, na podstawie statystyki czasów detekcji fotonów po ich propagacji przez układ pomiarowy.

Kluczowym elementem formalizmu zastosowanego w pracach [A1] i [A2] jest opis propagacji czasowych modów pojedynczego fotonu w ośrodku dyspersyjnym. Jeżeli początkowy pakiet falowy ma postać $u(t)$ zgodnie z równaniem (1), to po propagacji przez światłowód o długości L i parametrze dyspersji β jego czasowy profil można zapisać jako efekt działania propagatora

$$u_L(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{D}(t, t', L) u(t')\, dt', \tag{12}$$

gdzie $\mathcal{D}(t, t', L)$ opisuje propagację w światłowodzie dyspersyjnym

$$\mathcal{D}(t, t', L) = \frac{1}{\sqrt{4\pi i \beta L}} \exp\left[\frac{i(t-t')^2}{4\beta L}\right]. \tag{13}$$

Dla zastosowanego w pracy gaussowskiego pakietu falowego równanie (12) prowadzi do zależności

$$u_L(t) = \frac{1}{\pi^{1/4}\sqrt{\sigma + \frac{2i\beta L}{\sigma}}} \exp\left[\frac{it^2}{4\beta L - 2i\sigma^2}\right]. \tag{14}$$

Wynik ten pokazuje, że propagacja w światłowodzie modyfikuje zarówno szerokość czasową pakietu, jak i jego fazę. W konsekwencji początkowo rozdzielone mody czasowe zaczynają się częściowo nakładać, a informacja o amplitudach i fazach współczynników stanu zostaje zakodowana w rozkładzie czasów detekcji fotonu.

Dla kubitu zakodowanego w dwóch przedziałach czasowych po propagacji przez światłowód funkcja falowa przyjmuje postać

$$\psi_L(t) = \alpha_0 u_L\left(t + \frac{\tau}{2}\right) + \alpha_1 u_L\left(t - \frac{\tau}{2}\right), \tag{15}$$

a zgodnie z regułą mechaniki kwantowej gęstość prawdopodobieństwa detekcji fotonu w chwili t dana jest rozkładem

$$p(t) = \left|\alpha_0 u_L\left(t + \frac{\tau}{2}\right) + \alpha_1 u_L\left(t - \frac{\tau}{2}\right)\right|^2. \tag{16}$$

Kolejnym krokiem było zapisanie tej zależności w języku operatorów pomiaru kwantowego i macierzy gęstości. Gęstość prawdopodobieństwa można wtedy przedstawić w postaci

$$p(t) = \mathrm{Tr}\left[\hat{M}(t)|\psi_{\mathrm{in}}\rangle\langle\psi_{\mathrm{in}}|\right], \tag{17}$$

gdzie $\hat{M}(t)$ jest czasowo zależnym dodatnim operatorem pomiarowym. Fizycznie, zapis w równaniu (17) oznacza przejście od obrazu Schrödingera, opisującego ewolucję stanów kwantowych, do reprezentacji Heisenberga, gdzie ewolucja przenosi się na operator pomiaru.

W przypadku idealnej detekcji, bez uwzględnienia jitteru czasowego, operator pomiaru ma postać [A1]

$$\hat{M}(t) = \mu(t)|\psi_M(t)\rangle\langle\psi_M(t)|, \tag{18}$$

gdzie

$$|\psi_M(t)\rangle = \frac{1}{\sqrt{\mu(t)}} \begin{pmatrix} u_L\left(t+\frac{\tau}{2}\right) \\ \\ u_L\left(t-\frac{\tau}{2}\right) \end{pmatrix}, \tag{19}$$

natomiast $\mu(t)$ jest wagą odpowiadającą danemu wynikowi pomiaru,

$$\mu(t) = \frac{\sigma}{\sqrt{\pi}\sqrt{4\beta^2L^2+\sigma^4}} \left(e^{-\frac{\sigma^2(t+\tau/2)^2}{4\beta^2L^2+\sigma^4}} + e^{-\frac{\sigma^2(t-\tau/2)^2}{4\beta^2L^2+\sigma^4}}\right). \tag{20}$$

Tak zdefiniowany operator $\hat{M}(t)$ zależy wyłącznie od właściwości kanału transmisyjnego oraz parametrów czasowych pakietu falowego i nie zależy od nieznanego stanu wejściowego. Oznacza to, że propagacja dyspersyjna wraz z czasowo-rozdzielczą detekcją definiuje ciągły zbiór operatorów pomiarowych. W przybliżeniu odpowiadającym dobrze rozdzielonym początkowym modom czasowym spełniona jest relacja

$$\int_{-\infty}^{\infty} \hat{M}(t)\, dt \approx \mathbb{I}, \tag{21}$$

a zatem rodzina $\{\hat{M}(t)\}$ może być interpretowana jako ciągła dodatnia miara operatorowa (ang. *positive operator-valued measure*, POVM).

Fizyczne znaczenie tej konstrukcji jest istotne dla całej metodologii prac [A1] i [A2]. Dyspersja, która w klasycznej transmisji optycznej jest zwykle traktowana jako źródło degradacji sygnału, w tym przypadku zostaje wykorzystana jako element procedury pomiarowej. Ewolucja czasowego profilu fotonu powoduje, że detekcja w różnych chwilach odpowiada różnym efektywnym operatorom pomiarowym, dzięki czemu możliwe jest odtworzenie informacji o stanie zakodowanym w przedziałach czasowych.

W realistycznym modelu zastosowanym dalej w pracach [A1] i [A2] idealne operatory $\hat{M}(t)$ zostały następnie zmodyfikowane poprzez uwzględnienie skończonej rozdzielczości czasowej detektora. Niepewność czasu rejestracji fotonu (określana jako *timing jitter*) została wprowadzona poprzez splot idealnego operatora pomiarowego z funkcją opisującą rozkład czasów detekcji przez realistyczny system pomiarowy. Prowadzi to do operatora

$$\hat{M}_D(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{M}(t')q_D(t-t')\, dt', \tag{22}$$

gdzie $q_D(t)$ jest rozkładem gaussowskim opisującym niepewność czasową detektora

$$q_D(t) = \frac{\exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_D^2}\right)}{\sqrt{2\pi\sigma_D^2}}, \tag{23}$$

a parametr σ_D charakteryzuje szerokość niepewności wprowadzonej przez detektor. W ten sposób niedoskonałość urządzenia pomiarowego została włączona w sposób ilościowy bezpośrednio do formalnego opisu pomiaru kwantowego.

Praca [A1]. W pracy [A1] została przedstawiona i zweryfikowana numerycznie moja metoda tomografii stanów zakodowanych w przedziałach czasowych. Formalizm został opracowany dla kubitów, a następnie uogólniony na kudity oraz splątane pary kubitów.

Mój zasadniczy wkład w pracę [A1] polegał na numerycznej implementacji formalizmu przedstawionego w części teoretycznej pracy oraz sformułowaniu podstaw metodycznych dla problemu tomografii kwantowej (wraz z metryką do oceny jakości tomografii). Opracowałem narzędzie numeryczne umożliwiające symulowanie pełnego procesu tomografii kwantowej, począwszy od wygenerowania klasy stanów wejściowych i odpowiadających im statystyk pomiarowych, poprzez wprowadzenie realistycznych niedoskonałości pomiaru i szumu statystycznego, aż do rekonstrukcji macierzy gęstości oraz ilościowej oceny jakości uzyskanego wyniku. Narzędzie to zostało wykorzystane do analizy trzech klas układów: kubitów, kutritów (ang. *qutrit*) oraz splątanych par kubitów. Przeprowadzone przeze mnie obliczenia pozwoliły na uzyskanie wyników, które zostały przedstawione w Tabelkach I, II oraz III w pracy [A1]. Swoją metodę, uzyskane wyniki oraz towarzyszącą im dyskusję przedstawiłem w trzecim rozdziale pracy "III. QUANTUM STATE TOMOGRAPHY."

Rekonstrukcja stanu była realizowana za pomocą dwóch metod estymacji: metody największej wiarygodności (ang. *maximum likelihood estimation*, MLE) oraz metody najmniejszych kwadratów (ang. *least squares*, LS). Macierz gęstości parametryzowałem w sposób zapewniający jej hermitowskość, dodatnią półokreśloność i jednostkowy ślad. Wygenerowane numerycznie dane pomiarowe obciążałem szumem Poissona, odpowiadającym fluktuacjom typowym dla eksperymentów wykorzystujących zliczanie pojedynczych fotonów. Tak skonstruowany model pozwalał na systematyczne badanie wpływu parametrów aparatury na dokładność tomografii.

Jako podstawową miarę jakości rekonstrukcji wykorzystałem wierność kwantową (*squared fidelity*) pomiędzy stanem wejściowym ρ_{in} i stanem odtworzonym ρ_{out}:

$$F(\rho_{\text{in}}, \rho_{\text{out}}) = \left[\text{Tr}\sqrt{\sqrt{\rho_{\text{in}}}\rho_{\text{out}}\sqrt{\rho_{\text{in}}}}\right]^2. \tag{24}$$

Analizę przeprowadziłem dla dużych zbiorów stanów wejściowych, co pozwoliło mi ocenić przeciętną skuteczność zaproponowanej procedury w funkcji parametrów układu eksperymentalnego.

Jednym z najważniejszych wyników pracy [A1] było wykazanie nieoczywistej zależności pomiędzy dyspersją w światłowodzie a niedoskonałością detekcji. Zwiększanie niepewności czasowej detektora prowadzi, zgodnie z oczekiwaniem, do pogorszenia jakości rekonstrukcji nieznanego stanu. Jednocześnie pokazałem jednak, że zwiększenie długości ośrodka dyspersyjnego może w określonym zakresie parametrów przeciwdziałać temu efektowi. Dłuższa propagacja powoduje silniejsze rozszerzenie modów czasowych, dzięki czemu odpowiadające im operatory pomiarowe dostarczają większej ilości informacji potrzebnej do rekonstrukcji stanu. W konsekwencji odpowiednio dobrana dyspersja może częściowo kompensować ograniczoną rozdzielczość czasową detektora.

Efekt ten zaobserwowano dla wszystkich analizowanych klas układów. W przypadku kubitów i kutritów zwiększenie długości światłowodu prowadziło, przy niezerowym jitterze, do wyraźnego wzrostu średniej wierności rekonstrukcji, a efekt był najbardziej istotny dla

$\sigma_D = 4$ ps, które było najwyższą wartością rozważaną w pracy [A1]. Dodatkowym efektem związanym ze wzrostem dyspersji było zmniejszenie się odchylenia standardowego dla rozważanej próby, co interpretować należy jako mniejszy rozrzut uzyskiwanych wyników, a zatem lepszą powtarzalność rekonstrukcji stanu kwantowego. Analogiczne zachowanie zaobserwowałem dla splątanych par kubitów, a wyniki dla tego przypadku pokazane zostały w Autoreferacie w Tabeli 1.

L \ σ_D		0 ps	1 ps	4 ps
200 m	LS	0.974(15)	0.937(41)	0.48(31)
	MLE	0.988(1)	0.951(36)	0.45(34)
500 m	LS	0.981(1)	0.978(11)	0.85(1)
	MLE	0.99(1)	0.984(16)	0.85(1)

Tabela 1: Średnia wierność (*fidelity*) rekonstrukcji stanów splątanych wraz z odchyleniem standardowym. Wyniki dla próby 200 stanów, zgodnie z metodologią opisaną w pracy [A1]. Źródło: Table III w pracy [A1].

Podsumowując, wyniki zaprezentowane przeze mnie w pracy [A1] pokazały zatem, że dyspersja, która w wielu zagadnieniach transmisyjnych traktowana jest przede wszystkim jako źródło degradacji sygnału, może zostać wykorzystana jako zasób wspomagający proces rekonstrukcji stanu kwantowego.

Oprócz przygotowania całej warstwy związanej z implementacją tomografii kwantowej byłem odpowiedzialny za napisanie rozdziału III pracy pt. *Quantum State Tomography*. Brałem również udział we współtworzeniu i redakcji pozostałych części artykułu oraz w przygotowaniu odpowiedzi na uwagi recenzentów. Mój wkład w publikację [A1] został oznaczony w samej publikacji jako równy wkładowi pierwszej autorki. Dodatkowo pełniłem funkcję Autora Korespondującego [1].

Praca [A2]. Praca [A2] stanowiła bezpośrednią kontynuację badań rozpoczętych w [A1], jednak jej celem było przejście od demonstracji działania zaproponowanej metody do systematycznej analizy jej wydajności oraz wyznaczenia zakresów parametrów eksperymentalnych umożliwiających dokładną rekonstrukcję stanu. W pracy pełniłem rolę głównego wykonawcy badań. Opracowałem metodykę pracy, przygotowałem oprogramowanie numeryczne, przeprowadziłem symulacje, opracowałem i zinterpretowałem wyniki oraz napisałem większość tekstu publikacji. Byłem również Autorem Korespondencyjnym[2] oraz główną osobą odpowiedzialną za przygotowanie odpowiedzi na uwagi recenzentów.

Podobnie jak w pracy [A1], podstawą metody były czasowo zależne operatory pomiarowe generowane wskutek dyspersyjnej propagacji stanów *time-bin* i detekcji rozdzielczej w czasie. Istotną zmianą było jednak odmienne potraktowanie niedoskonałości

[1] Rola Autora Korespondującego nie została poprawnie oznaczona w ostatecznej wersji artykułu [A1]. W związku z tym oświadczenie o wkładzie w pracę jest rozszerzone o zrzut ekranu z konta APS Submissions Server potwierdzające fakt pełnienia tej roli przeze mnie.

[2] Rola Autora Korespondującego nie została poprawnie oznaczona w ostatecznej wersji artykułu [A2]. W związku z tym oświadczenie o wkładzie w pracę jest rozszerzone o zrzut ekranu z konta APS Submissions Server potwierdzające fakt pełnienia tej roli przeze mnie.

pomiarowej. W [A2] oczekiwaną liczbę zliczeń dla k-tego pomiaru definiowałem za pomocą idealnego operatora $\hat{M}(t_k)$ z równania (18),

$$n_k^E = \mathcal{N}\,\mathrm{Tr}\left[\hat{M}(t_k)\rho\right], \tag{25}$$

natomiast wynik odpowiadający rzeczywistemu pomiarowi generowany był przy użyciu operatora $\hat{M}_D(t_k)$ z równania (22) uwzględniającego gaussowski jitter detektora,

$$n_k^M = \mathcal{N}\,\mathrm{Tr}\left[\hat{M}_D(t_k)\rho\right]. \tag{26}$$

Przyjęto dostatecznie dużą liczbę fotonów $\mathcal{N}$, aby szum Poissona był zaniedbywalny. Dzięki temu możliwe było wyizolowanie wpływu samej niepewności czasowej detekcji na jakość rekonstrukcji. Takie sformułowanie problemu badawczego odnotowane zostało w pracach innych autorów poprzez bezpośrednie nawiązania do wpływu jittera detekcji na jakość dystrybucji stanów typu *time-bin*, m.in. w pracy [13].

Nieznany stan rekonstruowany był bez zakładania jego szczególnej postaci. Wykorzystałem parametryzację Cholesky'ego

$$\rho_{\mathrm{out}} = \frac{W^\dagger W}{\mathrm{Tr}\,(W^\dagger W)}, \tag{27}$$

która gwarantuje, że estymowana macierz jest hermitowska, dodatnio półokreślona i posiada jednostkowy ślad. Parametry macierzy W wyznaczałem numerycznie za pomocą dwóch metod rekonstrukcji: estymacji największej wiarygodności (MLE) oraz metody najmniejszych kwadratów (LS).

Istotnym wynikiem metodycznym było ograniczenie liczby operatorów pomiarowych niezbędnych do rekonstrukcji. W pracy [A1] wykorzystałem 26 operatorów odpowiadających różnym chwilom detekcji. Systematyczna analiza przeprowadzona w [A2] wykazała, że liczbę tę można zmniejszyć do 13 bez zauważalnego pogorszenia jakości tomografii. Oznaczało to redukcję liczby wykorzystywanych pomiarów o 50%, istotną z punktu widzenia potencjalnej realizacji eksperymentalnej.

Zmieniłem również sposób oceny skuteczności rekonstrukcji. Zamiast opierać analizę wyłącznie na średniej wierności, zastosowałem wielkości opisujące zachowanie metody w najgorszym przypadku. Dla reprezentatywnego zbioru stanów $\mathcal{S}$ zdefiniowałem minimalną wierność

$$\mathcal{F}_{\min} = \min_{\rho_{\mathrm{in}}\in\mathcal{S}} \mathcal{F}\left(\rho_{\mathrm{in}}, \rho_{\mathrm{out}}\right) \tag{28}$$

oraz maksymalną odległość śladową

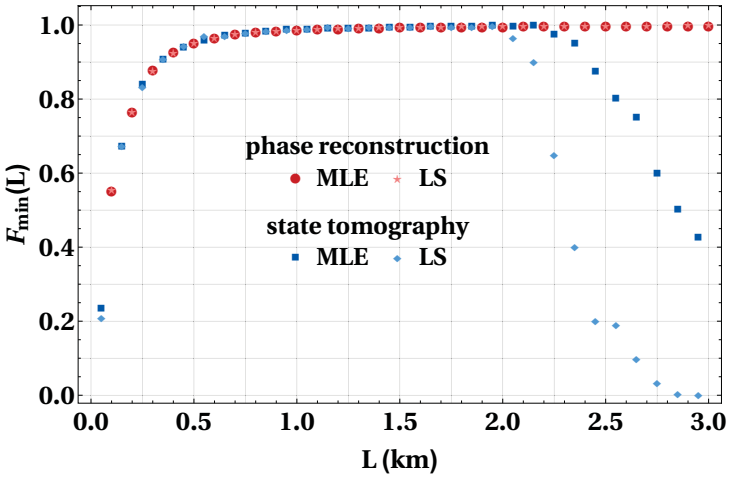
$$\mathcal{D}_{\max} = \max_{\rho_{\mathrm{in}}\in\mathcal{S}} \mathcal{D}\left(\rho_{\mathrm{in}}, \rho_{\mathrm{out}}\right), \tag{29}$$

gdzie

$$\mathcal{D}(\rho,\sigma) = \frac{1}{2}\,\mathrm{Tr}\,|\rho-\sigma|. \tag{30}$$

Takie podejście pozwalało określić dolną granicę jakości rekonstrukcji dla całej analizowanej próbki, a nie jedynie jej przeciętną wartość.

Dla pełnej tomografii kubitów wykazałem, że zależność jakości rekonstrukcji od długości światłowodu ma charakter niemonotoniczny. Efekt ten przedstawiłem na Fig. 1 pracy [A2], odtworzonej w Autoreferacie jak Rysunek 1.



Rysunek 1: Minimalna wierność $\mathcal{F}_{\min}$ w funkcji długości światłowodu dla pełnej tomografii kubitów oraz rekonstrukcji fazy względnej przy jitterze detektora $\sigma_D = 1$ ps. Przedstawiono wyniki uzyskane metodami LS i MLE. Oryginalna Fig. 1 z pracy [A2].

Jak pokazałem na Rys. 1, dla pełnej rekonstrukcji stanu początkowe zwiększanie długości światłowodu prowadzi do szybkiego wzrostu $\mathcal{F}_{\min}$. W okolicy $L = 1000$ m minimalna wierność osiąga wartość około 0,99, po czym przez pewien zakres długości pozostaje prawie stała. Dla jeszcze dłuższych włókien jakość pełnej tomografii zaczyna się jednak pogarszać. Jest to związane ze zmianą geometrii pomiaru: wraz ze wzrostem dyspersji stany odpowiadające operatorom $\hat{M}_D(t)$ koncentrują się coraz bliżej równika sfery Blocha, przez co pomiar dostarcza mniej informacji potrzebnej do rekonstrukcji wszystkich niezależnych parametrów macierzy gęstości (zob. wizualizacje na Fig. 2 z pracy [A1]).

Obserwacja ta doprowadziła do wydzielenia szczególnego problemu estymacji fazy względnej – rozumianej w tym kontekście jako rekonstrukcja stanów różniących się jedynie czynnikiem fazowym. Rozważałem rodzinę czystych stanów kubitowych odpowiadających punktom na równiku sfery Blocha

$$\rho_{\text{in}}(\phi) = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 1 & e^{-i\phi} \\ e^{i\phi} & 1 \end{pmatrix}, \tag{31}$$

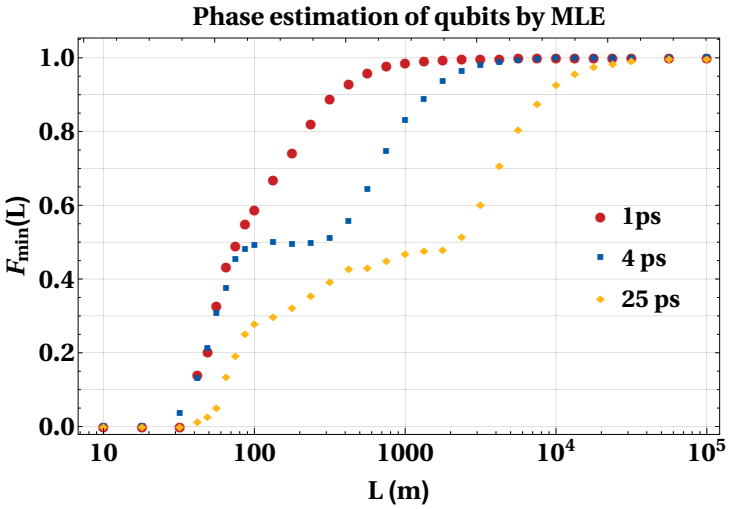
gdzie $0 \leq \phi < 2\pi$.

Pomimo ograniczonej geometrii analizowanej rodziny stanów początkowych, w procedurze rekonstrukcji nie zakładałem żadnej wiedzy *a priori* o ich strukturze i nadal estymowane były wszystkie parametry ogólnej macierzy gęstości kubitu, zgodnie z równaniem (27).

W przeciwieństwie do pełnej tomografii, dla estymacji fazy koncentracja operatorów pomiarowych w pobliżu równika jest korzystna. Wraz ze wzrostem długości światłowodu minimalna wierność asymptotycznie zbliżała się do jedności i nie obserwowałem późniejszego pogorszenia jakości rekonstrukcji. Symulacje zostały przeprowadzone dla długości sięgających 1000 km.

Odporność tego efektu na realistyczne wartości jitteru zbadałem następnie dla $\sigma_D = 1$ ps, 4 ps oraz 25 ps. Wyniki przedstawiono na Fig. 2 pracy [A2] (Rysunek 2 w Autoreferacie).

Rys. 2 pokazuje, że zwiększenie dyspersji może kompensować nawet znacznie większą niepewność czasową detektora. Dla $\sigma_D = 25$ ps minimalna wierność przekracza



Rysunek 2: Minimalna wierność $\mathcal{F}_{\min}$ dla estymacji fazy kubitów metodą MLE w funkcji długości światłowodu dla $\sigma_D = 1$ ps, 4 ps oraz 25 ps. Oś długości przedstawiono w skali logarytmicznej. Oryginalna Fig. 2 z pracy [A2].

0,9 dla długości rzędu 10^4 m, a dla jeszcze dłuższych włókien wyniki dla różnych wartości jitteru stopniowo się zbliżają. Oznacza to, że niepewność czasowa nie musi stanowić fundamentalnego ograniczenia dla rekonstrukcji fazy, jeżeli właściwości dyspersyjne kanału zostaną odpowiednio dobrane.

Analogiczną analizę przeprowadziłem dla kutritów. Pełna rekonstrukcja stanu trójpoziomowego okazała się bardziej wymagająca niż w przypadku kubitów, jednak zachowana została ta sama zasadnicza zależność pomiędzy długością światłowodu a jakością rekonstrukcji. Dla $\sigma_D = 1$ ps i $L = 500$ m minimalna wierność uzyskana metodą MLE wyniosła 0,9009.

Jednocześnie analizowałem szczególną rodzinę stanów kutritowych różniących się dwiema fazami względnymi,

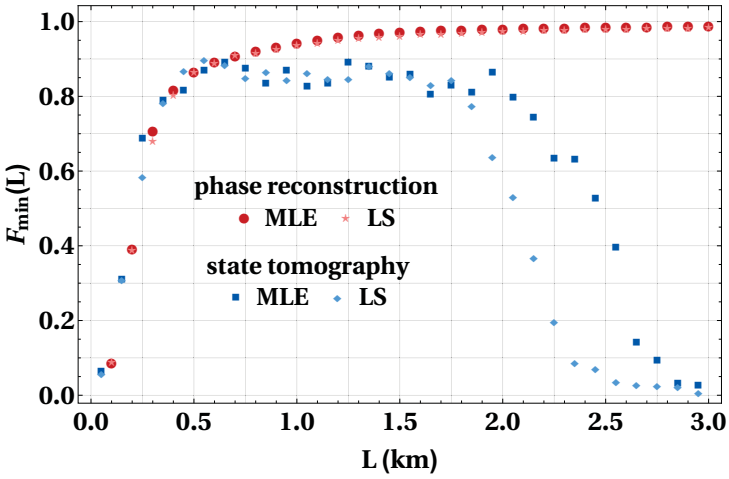
$$\rho_{\text{in}}\left(\phi_{12}, \phi_{13}\right) = \frac{1}{3}\begin{pmatrix} 1 & e^{-i\phi_{12}} & e^{-i\phi_{13}} \\ e^{i\phi_{12}} & 1 & e^{i(\phi_{12}-\phi_{13})} \\ e^{i\phi_{13}} & e^{i(\phi_{13}-\phi_{12})} & 1 \end{pmatrix}. \tag{32}$$

Podobnie jak dla kubitów, również tutaj rekonstrukcja była przeprowadzana bez wykorzystywania informacji *a priori* o strukturze stanu.

Porównanie pełnej tomografii z problemem estymacji faz dla kutritów przedstawiłem na Fig. 4 pracy [A2] (Rysunek 3 w Autoreferacie).

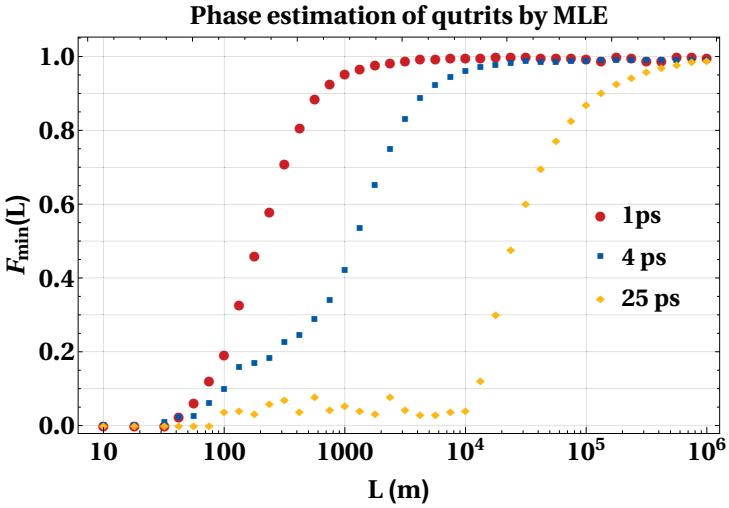
Rys. 3 uwidacznia różnicę pomiędzy dwoma reżimami działania zaproponowanej metody. Dla pełnej tomografii istnieje ograniczony zakres długości światłowodu zapewniający wysoką jakość rekonstrukcji, po przekroczeniu którego $\mathcal{F}_{\min}$ zaczyna spadać. Dla rekonstrukcji faz względnych minimalna wierność rośnie natomiast wraz z długością włókna i asymptotycznie zbliża się do jedności. Pokazuje to, że pogorszenie informacyjnej kompletności pomiaru dla bardzo silnej dyspersji nie oznacza utraty jego użyteczności w przypadku bardziej wyspecjalizowanych zadań estymacyjnych.

Podobnie jak w przypadku kubitów, również dla kutritów przeprowadziłem pogłębioną analizę problemu estymacji fazy, czyli rekonstrukcji szczególnej klasy stanów różniących się czynnikami fazowymi zdefiniowanymi w równaniu (32). Wnioski z badań



Rysunek 3: Minimalna wierność $\mathcal{F}_{\min}$ w funkcji długości światłowodu dla pełnej tomografii oraz rekonstrukcji faz względnych kutritów przy $\sigma_D = 1$ ps. Przedstawiono wyniki metod LS i MLE. Oryginalna Fig. 4 z pracy [A2].

okazały się zbieżne – nawet zakładając $\sigma_D = 25$ ps, to przy odpowiedniej długości światłowodu i związanej z nim dyspersji, minimalna wierność rekonstrukcji zaczyna rosnąć, zbliżając się asymptotycznie do wartości maksymalnej równej 1 (Rysunek 4).



Rysunek 4: Minimalna wierność $\mathcal{F}_{\min}$ dla estymacji fazy kutritów metodą MLE w funkcji długości światłowodu dla $\sigma_D = 1$ ps, 4 ps oraz 25 ps. Oś długości przedstawiono w skali logarytmicznej. Oryginalna Fig. 5 z pracy [A2].

Wyniki [A2] pozwoliły zatem wyróżnić dwa zasadniczo różne reżimy wykorzystania propagacji dyspersyjnej. W pełnej tomografii istnieje optymalny zakres dyspersji, zapewniający kompromis pomiędzy rozdzielczością czasową pomiaru a jego zdolnością do dostarczenia kompletnej informacji o stanie. W przypadku estymacji fazy większa dyspersja pozostaje natomiast korzystna i może skutecznie kompensować skończoną rozdzielczość czasową detektora.

Jednocześnie wskazałem istotne ograniczenie praktyczne tej koncepcji. W modelu [A2] zakładano stałą liczbę fotonów docierających do detektora, niezależnie od długości światłowodu. W rzeczywistym układzie zwiększenie L prowadzi jednak do wzrostu tłumienia

i zmniejszenia liczby zarejestrowanych fotonów. Zatem wnioski z badań są ważne tylko przy założeniu, że moc źródła wzrasta wraz z odpowiednim zwiększaniem się długości światłowodu. Pełna ocena praktycznej użyteczności metody wymaga zatem uwzględnienia kompromisu pomiędzy korzystnym wpływem dyspersji a stratami transmisyjnymi. Problem ten stał się naturalnym punktem wyjścia do dalszych badań prowadzonych w ramach osiągnięcia A, w szczególności do pracy [A6], w której tłumienie światłowodu zostało jawnie włączone do modelu tomografii fotonicznej, a także pracy [A8], w której zaproponowałem protokół QKD wykorzystujący kompleksowe modelowanie profilu czasowego fotonu w połączeniu ze skutkami dyspersji, wpływem niepewności czasowo-rozdzielczego systemu detekcji oraz efektami strat propagacyjnych.

Znaczenie prac [A1] i [A2] w kontekście osiągnięcia A i dyscypliny. Prace [A1] i [A2] tworzą spójny etap badań nad rekonstrukcją i charakteryzacją stanów kwantowych w realistycznych warunkach eksperymentalnych. Ich wspólnym rezultatem jest opracowanie formalnego i numerycznego podejścia, w którym właściwości kanału transmisyjnego oraz niedoskonałości aparatury pomiarowej są traktowane jako integralne elementy procedury tomograficznej, a nie jako zewnętrzne poprawki nakładane na idealny model pomiaru.

Szczególnie istotnym wynikiem było wykazanie, że kontrolowana ewolucja wywołana dyspersją może pełnić funkcję zasobu pomiarowego. Odpowiednio dobrana długość ośrodka dyspersyjnego pozwala zmodyfikować strukturę POVM w taki sposób, aby częściowo skompensować ograniczoną rozdzielczość czasową detektora. W pracy [A1] mechanizm ten został zademonstrowany numerycznie dla kubitów, kutritów i splątanych par kubitów, natomiast w [A2] przeprowadziłem jego systematyczną analizę, określiłem zakresy parametrów zapewniające wysoką jakość rekonstrukcji oraz wykazałem szczególną przydatność tego podejścia do estymacji fazy względnej.

Z punktu widzenia mojego indywidualnego wkładu prace te wyznaczają również przejście od implementacji numerycznej wspólnie opracowanego formalizmu w [A1] do samodzielnego prowadzenia zasadniczej części programu badawczego w [A2]. Opracowane przeze mnie narzędzia numeryczne umożliwiły przeprowadzenie wieloparametrowych analiz jakości tomografii, porównanie różnych metod estymacji oraz ilościowe określenie wpływu parametrów rzeczywistej aparatury na dokładność rekonstrukcji stanów kwantowych.

Dynamiczne generowanie informacyjnie zupełnych pomiarów w dziedzinie czasu

Praca [A3] stanowi formalne rozwinięcie idei wykorzystania dynamiki układu kwantowego jako zasobu wspomagającego proces tomografii. W przeciwieństwie do prac [A1] i [A2], w których mechanizm ten analizowany był w konkretnym układzie fotonicznym opartym na propagacji stanów *time-bin* przez ośrodek dyspersyjny, w pracy [A3] sformułowałem ogólny model dynamicznego generowania informacyjnie zupełnych dodatnich miar operatorowych (IC-POVM).

Punktem wyjścia jest sytuacja, w której dostępny zbiór dodatnich operatorów pomiarowych

$$\mathcal{M} = \{M_1, M_2, \ldots, M_r\} \tag{33}$$

nie jest informacyjnie zupełny, a zatem jednorazowe wykonanie odpowiadających mu pomiarów nie dostarcza informacji wystarczającej do rekonstrukcji nieznanej macierzy

gęstości. Założyłem jednak, że dynamika badanego układu jest znana i może być opisana rodziną całkowicie dodatnich i zachowujących ślad map kwantowych. Szczegółową analizę przeprowadziłem dla losowej dynamiki unitarnej, której działanie można zapisać w postaci

$$\Lambda_t[\rho] = \sum_\alpha \pi_\alpha(t) U_\alpha \rho U_\alpha^\dagger. \tag{34}$$

Dla operatora M_k prawdopodobieństwo wyniku pomiaru w chwili t przyjmuje postać

$$p_k(t) = \mathrm{Tr}\{M_k \rho(t)\} = \sum_\alpha \pi_\alpha(t)\, \mathrm{Tr}\left\{U_\alpha^\dagger M_k U_\alpha \rho(0)\right\}. \tag{35}$$

Zapis ten można interpretować jako przejście z obrazu Schrödingera do obrazu Heisenberga: zamiast analizować ewolucję nieznanego stanu, można traktować znaną dynamikę jako mechanizm generujący kolejne efektywne operatory pomiarowe

$$U_\alpha^\dagger M_k U_\alpha. \tag{36}$$

W konsekwencji wielokrotne wykonanie tego samego rodzaju pomiaru w odpowiednio dobranych chwilach czasu może dostarczyć informacji odpowiadającej wielu różnym operatorom pomiarowym.

W pracy wyprowadziłem warunek umożliwiający odzyskanie poszczególnych wielkości

$$\mathrm{Tr}\left\{U_\alpha^\dagger M_k U_\alpha \rho(0)\right\} \tag{37}$$

na podstawie pomiarów wykonanych w różnych chwilach czasu. Jeżeli macierz zbudowana z wartości funkcji $\pi_\alpha(t_j)$ jest odwracalna, tj.

$$\det[\pi_\alpha(t_j)] \neq 0, \tag{38}$$

to wyniki pomiarów czasowych pozwalają wyznaczyć prawdopodobieństwa odpowiadające operatorom wygenerowanym przez dynamikę. Rekonstrukcja pełnego stanu jest możliwa wtedy, gdy powstały w ten sposób zbiór operatorów rozpięty jest na całej przestrzeni operatorów $\mathcal{L}(\mathcal{H})$ i spełnia warunek zupełności właściwy dla IC-POVM.

Formalizm został następnie zastosowany do konkretnych modeli dynamiki kubitów. Dla kubitu podlegającego dekoherencji fazowej wykazałem, że można rozpocząć od dwóch dodatnich operatorów, a następnie poprzez pomiary wykonywane w różnych chwilach wygenerować cztery liniowo niezależne operatory tworzące IC-POVM. W bardziej ogólnym modelu losowej dynamiki unitarnej wykazałem natomiast, że wystarczający może być tylko jeden początkowy operator pomiarowy. Pomiar odpowiadającego mu prawdopodobieństwa w czterech różnych chwilach czasu pozwala wówczas wygenerować komplet informacji wymagany do rekonstrukcji dowolnego stanu kubitu.

Podejście zostało również rozszerzone na kutrit. Dla odpowiednio zdefiniowanej losowej dynamiki unitarnej, opisanej za pomocą operatorów Weyla, wykazałem, że jeden element symetrycznej informacyjnie zupełnej miary operatorowej (SIC-POVM) może zostać wykorzystany do wygenerowania pozostałych elementów pomiaru. Pomiar jednego operatora w dziewięciu różnych chwilach pozwala w takim przypadku uzyskać pełną informację potrzebną do rekonstrukcji stanu kutritu. Wynik ten pokazuje, że algebraiczne własności dynamiki układu mogą zostać bezpośrednio wykorzystane do ograniczenia liczby różnych fizycznych konfiguracji pomiarowych.

Praca [A3] jest publikacją jednoautorską. Opracowałem koncepcję badania, formalizm matematyczny dynamicznego generowania IC-POVM, sformułowałem i udowodniłem przedstawione w pracy twierdzenia dla kubitów i kutritów oraz przeprowadziłem analizę znaczenia otrzymanych wyników dla tomografii stanów kwantowych.

Znaczenie pracy [A3] w kontekście osiągnięcia A i dyscypliny. Znaczenie pracy [A3] w ramach osiągnięcia A polega przede wszystkim na uogólnieniu idei wykorzystywania ewolucji układu jako części procedury pomiarowej. Wyniki prac [A1] i [A2] pokazały tę możliwość w konkretnym układzie fotonicznym, natomiast w [A3] przedstawiłem formalne warunki, przy których znana dynamika kwantowa może przekształcić niezupełny początkowo zbiór operatorów w pomiar informacyjnie zupełny. Otrzymane wyniki wskazują, że ograniczona liczba dostępnych konfiguracji pomiarowych nie musi uniemożliwiać pełnej rekonstrukcji stanu, jeżeli możliwe jest wykorzystanie kontrolowanej lub dobrze scharakteryzowanej ewolucji układu. Praca wnosi tym samym wkład w rozwój metod tomografii kwantowej ukierunkowanych na zmniejszenie złożoności pomiarowej i efektywniejsze wykorzystanie informacji dostępnej w dynamice badanego układu.

Na dzień złożenia wniosku habilitacyjnego praca [A3] była licznie cytowana w artykułach związanych z kwantową teorią informacji (23 niezależne cytowania). Cytowania te pojawiają się zwykle w kontekście jednego z podstawowych wniosków wynikających z pracy [A3], związanego z możliwością zmniejszenia liczby różnych rodzajów pomiarów niezbędnych do przeprowadzenia rekonstrukcji stanu kwantowego. Nie sposób szczegółowo omówić wszystkich literaturowych odwołań do tej pracy. Niemniej jednak na szczególną uwagę zasługuje praca [14] pt. *Dynamical quantum state tomography with time-dependent channels*, opublikowana w czasopiśmie „Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical", w której model pozwalający na dynamiczne generowanie zbioru pomiarowego IC-POVM został istotnie rozwinięty i uogólniony. Autorzy pracy [14] nie tylko odwołują się do twierdzeń i warunków przedstawionych w mojej pracy [A3], lecz także wprost wskazują na str. 4, że praca [A3] stanowiła inspirację dla ich własnych badań. Przykład ten pokazuje, że zaproponowana przeze mnie koncepcja dynamicznego generowania informacyjnie zupełnych zbiorów pomiarowych została podjęta przez innych badaczy i stała się punktem wyjścia do dalszego rozwoju tego kierunku badań.

Tomografia i charakteryzacja splątania stanów Wernera

Prace [A4] i [A5] tworzą spójny ciąg badań poświęconych rekonstrukcji oraz ilościowej charakteryzacji wielocząstkowych stanów splątanych w warunkach niedoskonałych pomiarów. W pracy [A4] przeanalizowałem dwukubitowe stany Wernera, natomiast w pracy [A5] rozszerzyłem opracowane podejście na trójkubitowe uogólnione stany Wernera. W obu przypadkach podstawowym celem było określenie, w jakim stopniu ograniczona liczba zarejestrowanych układów kwantowych oraz wynikający z niej szum statystyczny wpływają nie tylko na dokładność rekonstrukcji macierzy gęstości, lecz również na wnioskowanie o stopniu splątania badanego układu.

Praca [A4]. W pracy [A4] rozważałem rodzinę dwukubitowych stanów Wernera [15]

$$\rho_W^{2q}(\eta) = \eta|\Psi^-\rangle\langle\Psi^-| + \frac{1-\eta}{4}\mathbb{I}_4, \qquad 0 \leq \eta \leq 1, \tag{39}$$

gdzie

$$|\Psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|01\rangle - |10\rangle\right). \tag{40}$$

Parametr η określa udział maksymalnie splątanego stanu Bella w mieszaninie ze stanem maksymalnie mieszanym. Dla $\eta > 1/3$ stany tej rodziny są splątane, natomiast

dla mniejszych wartości parametru pozostają separowalne. Taka konstrukcja pozwala w kontrolowany sposób analizować przejście od stanów mieszanych pozbawionych splątania do stanu maksymalnie splątanego.

Do rekonstrukcji stanu zastosowałem symetryczną informacyjnie zupełną dodatnią miarę operatorową (SIC-POVM). Dla pojedynczego kubitu pomiar definiuje się poprzez 4 wektory

$$\begin{aligned} |\phi_1\rangle &= |0\rangle\,, & |\phi_2\rangle &= \frac{1}{\sqrt{3}}\,|0\rangle + \sqrt{\frac{2}{3}}\,|1\rangle\,, \\ |\phi_3\rangle &= \frac{1}{\sqrt{3}}\,|0\rangle + \sqrt{\frac{2}{3}}\mathrm{e}^{\mathrm{i}\frac{2\pi}{3}}\,|1\rangle\,, & |\phi_4\rangle &= \frac{1}{\sqrt{3}}\,|0\rangle + \sqrt{\frac{2}{3}}\mathrm{e}^{\mathrm{i}\frac{4\pi}{3}}\,|1\rangle\,, \end{aligned} \tag{41}$$

gdzie $\{|0\rangle\,,|1\rangle\}$ oznacza standardową bazę w $\mathcal{H}$. Następnie, za pomocą powyższych wektorów definiuje się operatory pomiaru:

$$M_k := \frac{1}{2}\,|\phi_k\rangle\langle\phi_k|\,, \tag{42}$$

które spełniają warunek $\sum_{k=1}^{4} M_k = \mathbb{I}_2$. W przypadku pary kubitów wykorzystałem iloczyny tensorowe

$$M_\alpha^{2q} = M_i \otimes M_j, \tag{43}$$

co prowadzi do zestawu 16 operatorów pomiarowych.

Aby model odpowiadał warunkom eksperymentalnym, do statystyk zliczeń wprowadziłem szum Poissona. Liczba par fotonów przypadających na pojedynczy pomiar była traktowana jako zmienna losowa

$$\widetilde{\mathcal{N}}_\alpha \in \mathrm{Pois}(\mathcal{N}), \tag{44}$$

a symulowane liczby koincydencji były wyznaczane zgodnie z zależnością

$$n_\alpha^{2q} = \widetilde{\mathcal{N}}_\alpha \,\mathrm{Tr}\left(M_\alpha^{2q}\rho_W^{2q}(\eta)\right). \tag{45}$$

Rekonstrukcję nieznanej macierzy gęstości przeprowadziłem metodą minimalizacji funkcji χ^2. Macierz estymowanego stanu parametryzowałem za pomocą rozkładu Cholesky'ego, co zapewniało hermitowskość, dodatnią półokreśloność oraz jednostkowy ślad otrzymanej macierzy.

Jako miary jakości rekonstrukcji zastosowałem wierność kwantową (ang. *quantum fidelity*), czystość (ang. *purity*) oraz zgodność[3] (ang. *concurrence*). Ostatnia z tych wielkości miała szczególne znaczenie, ponieważ umożliwiała bezpośrednie określenie ilości splątania rekonstruowanych dwukubitowych stanów Wernera. Zgodność, oznaczana literą C, jest monotoniczną miarą splątania określoną na zbiorze stanów dwukubitowych. Dla dowolnego stanu spełnia nierówność $0 \leq C \leq 1$, z uwzględnieniem, że $C = 0$ dla stanów separowalnych, a $C = 1$ dla stanów maksymalnie splątanych (np. stany z grupy Bella).

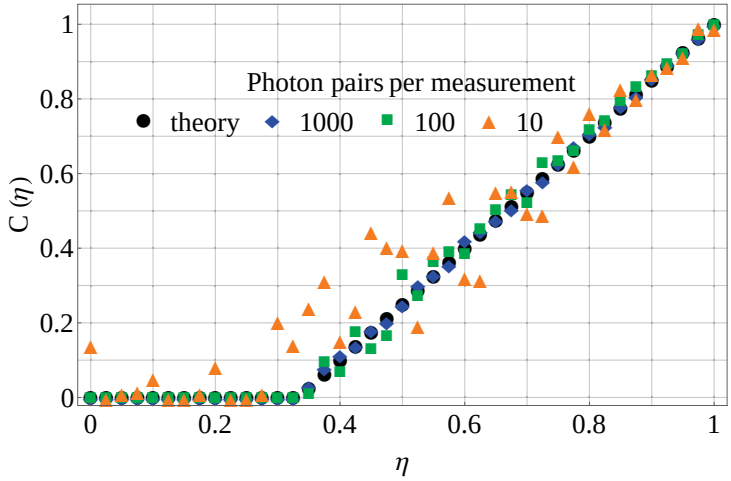
Analizę przeprowadziłem dla trzech średnich liczebności par fotonów przypadających na pojedynczy pomiar:

$$\mathcal{N} = 10, \qquad \mathcal{N} = 100, \qquad \mathcal{N} = 1000. \tag{46}$$

[3]Przyjęto tłumaczenie miary splątania *concurrence* na język polski jako 'zgodność' za książką "Korelacje nieklasyczne. Kwantowe splątanie i dyskord", str. 132, Ref. [16].

Dla $\mathcal{N} = 1000$ rekonstrukcja była praktycznie niewrażliwa na szum Poissona: wierność pozostawała bliska jedności, a wartości zgodności odtwarzały przebieg teoretyczny. Dla $\mathcal{N} = 100$ obserwowałem jedynie umiarkowane odchylenia. Natomiast przy $\mathcal{N} = 10$ szum statystyczny prowadził do istotnych błędów zarówno w rekonstrukcji stanu, jak i w ilościowej ocenie jego splątania.

Szczególnie istotny wynik dotyczył sytuacji, w której wpływ szumu prowadził do zawyżenia rekonstruowanej zgodności. Dla niektórych wartości η estymowany stan wykazywał większe splątanie niż stan wejściowy. Co więcej, dla $\eta \leq 1/3$, gdy rzeczywisty stan Wernera jest separowalny, część rekonstrukcji prowadziła do dodatniej wartości zgodności. Oznacza to, że niedostateczna statystyka pomiarowa może prowadzić do fałszywej identyfikacji splątania, gdy w rzeczywistości stany wejściowe były separowalne.



Rysunek 5: Zgodność rekonstruowanych dwukubitowych stanów Wernera dla trzech średnich liczb par fotonów przypadających na pojedynczy pomiar. Linia teoretyczna odpowiada rzeczywistej wartości zgodności stanu wejściowego, natomiast wyniki symulacji pokazują wpływ szumu Poissona na ilościową ocenę splątania. Rysunek pochodzi z pracy [A4].

Jednocześnie stwierdziłem, że wszystkie analizowane miary jakości rekonstrukcji zbliżają się do wartości teoretycznych wraz ze wzrostem η. Oznacza to, że tomografia stanów bliskich czystemu stanowi Bella pozostaje stosunkowo odporna na ograniczoną statystykę, nawet gdy liczba par fotonów wykorzystywanych w pojedynczym pomiarze jest niewielka.

Praca [A5]. Praca [A5] stanowi bezpośrednie rozszerzenie metodologii opracowanej w [A4] na układy trójkubitowe. Rozważałem w niej uogólnione stany Wernera postaci

$$\rho_W^{3q}(\eta) = \eta|\mathrm{GHZ}\rangle\langle\mathrm{GHZ}| + \frac{1-\eta}{8}\mathbb{I}_8, \tag{47}$$

gdzie

$$|\mathrm{GHZ}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|000\rangle + |111\rangle\right). \tag{48}$$

W ten sposób przeanalizowałem przejście od stanu maksymalnie mieszanego (dla $\eta = 0$) do czystego, trójcząstkowego stanu GHZ ($\eta = 1$).

Formalizm pomiarowy oparty na SIC-POVM został rozszerzony z dwóch do trzech kubitów poprzez zastosowanie iloczynów tensorowych operatorów pomiarowych. Podobnie

jak w [A4], w symulacjach uwzględniłem szum Poissona, a rekonstrukcja stanu była realizowana na podstawie zaszumionych statystyk pomiarowych. Dokładność estymacji analizowałem jako funkcję parametru η oraz średniej liczby kopii układu wykorzystywanych w pojedynczym pomiarze.

Wykazałem, że dla $\mathcal{N} = 1000$ metoda pozwala na bardzo dokładną rekonstrukcję całej rodziny trójkubitowych uogólnionych stanów Wernera (zob. Fig. 1 w pracy [A5]). Wierność przekraczała wartość 0.95 dla wszystkich analizowanych wartości η. Dla $\mathcal{N} = 100$ jakość rekonstrukcji pozostawała nadal stosunkowo wysoka, natomiast w przypadku $\mathcal{N} = 10$ wpływ szumu statystycznego był już znaczny. Podobnie jak w [A4], dokładność rekonstrukcji poprawiała się jednak wraz ze zmniejszaniem entropii stanu wejściowego.

W pracy rozszerzyłem analizę poza samą rodzinę uogólnionych stanów Wernera i porównałem rekonstrukcję dwóch fundamentalnie różnych klas trójkubitowego splątania: stanu GHZ oraz stanu

$$|W\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(|001\rangle + |010\rangle + |100\rangle \right). \tag{49}$$

Symulacje wykazały, że w obecności szumu Poissona stan W jest rekonstruowany dokładniej niż stan GHZ, szczególnie dla niewielkiej liczby kopii układu. Dla $\mathcal{N} = 10$ uzyskana wierność wyniosła odpowiednio około 0.82 dla stanu GHZ oraz około 0.94 dla stanu W. Wynik ten pokazał, że odporność tomografii na szum statystyczny zależy nie tylko od liczby wykonanych pomiarów, lecz również od struktury badanego stanu splątanego.

Dodatkowo przeanalizowałem zachowanie koherencji rekonstruowanego stanu GHZ jako funkcji liczby układów dostępnych w pomiarze. Pozwoliło to określić, w jaki sposób ograniczona statystyka wpływa na odtwarzanie dalekich elementów pozadiagonalnych macierzy gęstości, które odpowiadają za charakterystyczną koherencję stanu GHZ.

Wyniki pracy [A5] wskazały również na praktyczną możliwość wykorzystania modelu numerycznego do określania minimalnej liczby zliczeń potrzebnych do osiągnięcia zadanej jakości rekonstrukcji. Jeżeli znana jest w przybliżeniu klasa lub czystość stanu generowanego przez źródło, model może posłużyć do oszacowania wymaganej liczby detekcji, a tym samym do optymalizacji czasu eksperymentu tomograficznego.

Obie prace [A4] i [A5] zostały przeze mnie wykonane całkowicie samodzielnie i są publikacjami jednoautorskimi. Samodzielnie opracowałem koncepcję badań, modele matematyczne i numeryczne, zaimplementowałem procedury symulacyjne oraz metody rekonstrukcji stanów, przeprowadziłem obliczenia, zinterpretowałem otrzymane wyniki i przygotowałem pełne teksty obu publikacji.

Znaczenie prac [A4] i [A5] w kontekście osiągnięcia A i dyscypliny. Znaczenie prac [A4] i [A5] dla osiągnięcia A polega na rozszerzeniu problematyki tomografii kwantowej z samej rekonstrukcji macierzy gęstości na wiarygodną charakteryzację fizycznych własności stanów splątanych w warunkach ograniczonej statystyki pomiarowej. Wyniki pokazały, że wysoka jakość formalnej rekonstrukcji stanu nie może być rozpatrywana w oderwaniu od niepewności statystycznej, ponieważ błędy pomiarowe mogą prowadzić do jakościowo niepoprawnych wniosków dotyczących splątania.

W pracy [A4] wykazałem w szczególności możliwość fałszywej identyfikacji splątania wywołanej szumem Poissona, natomiast w [A5] pokazałem, że podatność procedury tomograficznej na szum zależy również od struktury wielocząstkowego stanu kwantowego. Przejście od układów dwukubitowych do trójkubitowych pozwoliło jednocześnie zweryfikować możliwość skalowania opracowanego podejścia do bardziej złożonych przestrzeni

Hilberta.

Obie prace wnoszą zatem wkład w rozwój metod rekonstrukcji i charakteryzacji stanów kwantowych poprzez ilościowe określenie granic wiarygodności tomografii prowadzonej przy skończonej liczbie zliczeń oraz przez wskazanie warunków, w których szum statystyczny może prowadzić do błędnej interpretacji właściwości fizycznych rekonstruowanego układu.

Praca [A4], w której zaproponowałem model tomografii dwukubitowych stanów Wernera połączony z ilościową analizą splątania w obecności szumu Poissona, została następnie bezpośrednio wykorzystana i rozwinięta przez innych badaczy. W pracy *Quantum Tomography with Gaussian Noise* [17], opublikowanej w czasopiśmie „Quantum Information and Computation", autorzy wprost odwołują się do modelu przedstawionego w [A4] jako wcześniejszego podejścia do tomografii i kwantyfikacji splątania dwukubitowych stanów Wernera. Następnie zachowują zasadniczą strukturę problemu, obejmującą stany Wernera oraz pomiar SIC-POVM, ale rozszerzają analizę na inny model zaburzeń eksperymentalnych, zastępując szum Poissona szumem Gaussowskim. Dodatkowo, poza rekonstrukcją stanu i analizą splątania, rozpatrują również koherencję kwantową jako kolejną wielkość służącą do oceny jakości rekonstrukcji.

Jeszcze wyraźniejszym rozwinięciem tej linii badań jest praca *Quantum Tomography of Two-Qutrit Werner States* [18], opublikowana w czasopiśmie „Photonics". Autorzy ponownie wskazują [A4] jako punkt odniesienia dla swojego modelu, ale uogólniają problem z układu dwóch kubitów na układ dwóch kutritów. Wprowadzają zatem wyższy wymiar przestrzeni Hilberta, zachowując jednocześnie zasadniczą ideę łączenia tomografii stanów Wernera z analizą własności fizycznych rekonstruowanego stanu. W tym przypadku jako miary jakości i własności odtworzonego stanu analizowane są jednocześnie wierność, czystość, splątanie i koherencja, a wpływ niedoskonałości pomiarowych modelowany jest za pomocą szumu Gaussowskiego.

Oba przykłady pokazują, że model zaproponowany przeze mnie w pracy [A4] nie pozostał jedynie pojedynczym zastosowaniem tomografii do stanów Wernera, lecz został podjęty przez niezależnych badaczy jako podstawa dalszych prac. Rozwój ten następował w dwóch kierunkach: poprzez analizę innych modeli szumu eksperymentalnego oraz poprzez rozszerzenie formalizmu na układy o większym wymiarze. Stanowi to bezpośredni przykład oddziaływania wyników pracy [A4] na dalsze badania dotyczące realistycznej tomografii stanów kwantowych i ilościowej charakteryzacji ich własności.

W przypadku pracy [A5] liczba odniesień literaturowych jest mniejsza, jednak dwa cytowania pojawiają się w kontekście metod tomografii stanów trzykubitowych i wykorzystują elementy formalizmu przedstawionego przeze mnie. Przykładowo, praca *Three-qubit W state tomography via full and marginal state reconstructions on* ibm_osaka, opublikowana w „Quantum Information Processing" [19], implementuje zbliżoną metodę tomografii z wykorzystaniem procesora ibm_osaka. Druga ze wspomnianych prac, pt. *Quantum tomography of three-qubit state*, opublikowana w „Optics Communications" [20], również częściowo opiera swój formalizm na koncepcji przedstawionej w pracy [A5]. Przykłady te wskazują, że zaproponowane przeze mnie podejście do tomografii stanów trzykubitowych znalazło zastosowanie w dalszych badaniach prowadzonych przez innych autorów. Dodatkowym potwierdzeniem zauważenia pracy [A5] przez środowisko naukowe jest fakt, że w dniu 4 lipca 2025 r. została ona wyróżniona przez redakcję „International Journal of Modern Physics B" jako *Editor's Pick*, co wiązało się z jej dodatkową promocją

i zwiększoną widocznością, m.in. na portalu ResearchGate[4].

Wpływ tłumienia światłowodu na tomografię stanów fotonicznych i detekcję splątania

Praca [A6] stanowi rozwinięcie wcześniejszych badań nad rekonstrukcją i charakteryzacją stanów kwantowych poprzez uwzględnienie fizycznego mechanizmu strat fotonów podczas transmisji światłowodowej. Celem pracy było określenie, w jaki sposób tłumienie w kanale transmisyjnym wpływa na jakość tomografii stanów fotonicznych oraz na możliwość ilościowej oceny splątania po transmisji. W przeciwieństwie do prac [A4] i [A5], w których głównym źródłem niedoskonałości była ograniczona statystyka pomiarowa oraz [A1] i [A2], gdzie badaliśmy wpływ czasowej detekcji w połączeniu z dyspersją, w artykule [A6] liczba fotonów docierających do układu pomiarowego została bezpośrednio uzależniona od długości światłowodu oraz współczynnika tłumienia.

Warstwa matematyczna i metodologiczna pracy została opracowana przeze mnie. Punktem wyjścia był opis transmisji zgodny z prawem Beera–Lamberta. Dla światłowodu o długości L i współczynniku tłumienia α (wyrażonego w dB) prawdopodobieństwo transmisji pojedynczego fotonu można zapisać jako

$$T(L) = e^{-\Lambda L}, \tag{50}$$

gdzie

$$\Lambda = \frac{\ln 10}{10}\alpha. \tag{51}$$

Jeżeli źródło generuje $\mathcal{N}$ fotonów, to liczba fotonów docierających do odbiornika może być modelowana rozkładem dwumianowym

$$\widetilde{\mathcal{N}} \in \mathcal{B}\left(\mathcal{N}, e^{-\Lambda L}\right). \tag{52}$$

W celu nadania temu modelowi pełnej interpretacji kwantowomechanicznej opisałem proces strat jako nieunitarną ewolucję stanu Focka. Dla pojedynczego fotonu, którego stan początkowy jest równy

$$\varrho_{\text{in}} = |1\rangle\langle 1|, \tag{53}$$

stan po propagacji przez światłowód o długości L przyjmuje postać

$$\varrho(L) = \left(1 - e^{-\Lambda L}\right)|0\rangle\langle 0| + e^{-\Lambda L}|1\rangle\langle 1|. \tag{54}$$

Wykazałem, że proces ten można przedstawić w reprezentacji Krausa jako rodzinę całkowicie dodatnich i zachowujących ślad map kwantowych. Równoważnie, ewolucję można opisać równaniem master

$$\frac{d\varrho(L)}{dL} = \Lambda\left[E_{01}\varrho(L)E_{01}^{\dagger} - \frac{1}{2}\left\{E_{01}^{\dagger}E_{01}, \varrho(L)\right\}\right], \tag{55}$$

gdzie $E_{01} = |0\rangle\langle 1|$. Tym samym tłumienie światłowodowe zostało opisane jako szczególny przypadek procesu dekoherencji analogicznego do kanału tłumienia amplitudy. Formalizm ten został następnie uogólniony przeze mnie na stan Focka zawierający dowolną liczbę $\mathcal{N}$ fotonów.

[4]Link: Editor Pick from International Journal of Modern Physics B, dostęp 18.10.2026.

Na tej podstawie opracowałem metodologię numerycznej analizy tomografii stanów zakodowanych w stopniach swobody fotonów. Rekonstrukcja była oparta na symetrycznych informacyjnie zupełnych dodatnich miarach operatorowych (SIC-POVM). Liczba fotonów dostępnych w każdym pomiarze była losowana zgodnie z modelem strat światłowodowych, a następnie uwzględniano dodatkowo szum zliczeniowy. Dzięki temu możliwe było powiązanie jakości rekonstrukcji bezpośrednio z fizycznymi parametrami kanału: długością światłowodu, współczynnikiem tłumienia oraz liczbą fotonów generowanych przez źródło.

Dla pojedynczych kubitów przeprowadziłem analizę średniej wierności rekonstrukcji

$$F_{\mathrm{av}}(L) \tag{56}$$

w funkcji długości światłowodu. Wyniki pokazały systematyczne pogarszanie jakości rekonstrukcji wraz ze wzrostem strat. Jednocześnie zwiększenie liczby fotonów przypadających na pojedynczy pomiar pozwalało przesunąć granicę odległości, dla której tomografia pozostawała wiarygodna. W granicy bardzo silnego tłumienia średnia wierność dla czystych stanów kubitowych dążyła do wartości około 1/2, co odpowiada sytuacji, w której dane pomiarowe nie zawierają już wystarczającej informacji o stanie wejściowym.

Szczególnie istotną część pracy stanowiła analiza splątanych par kubitów. Rozważałem rodzinę maksymalnie splątanych stanów

$$|\Phi(\phi)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|00\rangle + e^{i\phi}|11\rangle\right), \tag{57}$$

przy czym oba fotony mogły być transmitowane przez światłowody o niezależnych długościach L_1 i L_2. Dla stanów rekonstruowanych po transmisji obliczałem zgodność, a następnie jej średnią wartość

$$C_{\mathrm{av}}(L_1, L_2). \tag{58}$$

Pozwoliło to bezpośrednio określić obszar parametrów kanału, w którym pomiar tomograficzny nadal umożliwia wiarygodne wykrywanie silnych korelacji kwantowych.

Dla parametrów przedstawionych na Rys. 6 wykazałem, że warunek

$$C_{\mathrm{av}}(L_1, L_2) > \frac{1}{\sqrt{2}}, \tag{59}$$

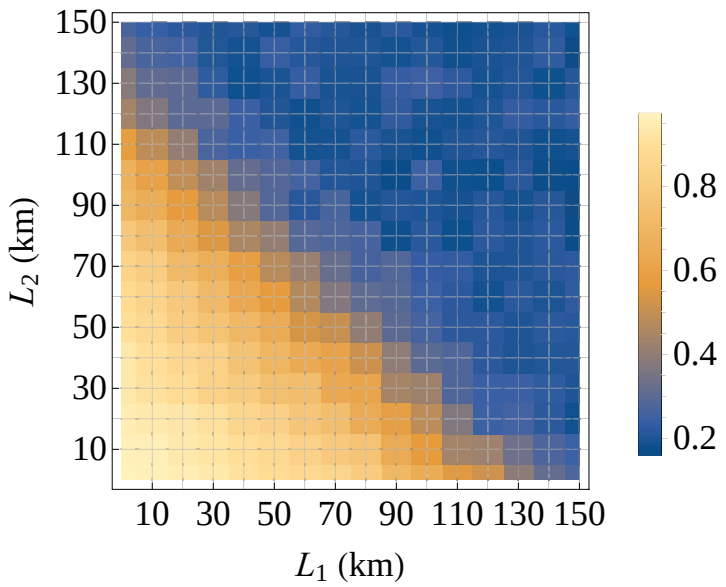
związany z możliwością naruszenia nierówności Bell–CHSH, pozostaje spełniony w przybliżeniu dla

$$L_1 + L_2 < 110 \text{ km}. \tag{60}$$

Wynik ten pozwala interpretować model nie tylko jako narzędzie do oceny dokładności tomografii, lecz również jako metodę wyznaczania praktycznych ograniczeń transmisji splątania w kanałach światłowodowych. Analogiczne obliczenia można przeprowadzić dla innych wartości mocy źródła i współczynnika tłumienia, uzyskując granice właściwe dla konkretnego układu eksperymentalnego.

Dalszym rozwinięciem metodologicznym było rozszerzenie analizy ilościowej splątania na układy dwukutritowe. W pracy [A5], dotyczącej trójkubitowych uogólnionych stanów Wernera, analiza wielocząstkowego splątania nie opierała się na jednej ścisłej mierze pozwalającej przypisać rekonstruowanemu stanowi konkretną wartość splątania. W [A6] dla stanów dwóch kutritów, jako element warstwy metodycznej, zaproponowałem negatywność (ang. *negativity*) jako miarę splątania

$$\mathrm{N}[\rho] = \frac{\left\|\rho^{\Gamma_A}\right\|_1 - 1}{2}, \tag{61}$$



Rysunek 6: Średnia zgodność rekonstruowanych splątanych stanów dwukubitowych jako funkcja długości dwóch światłowodów L_1 i L_2. Liczba par fotonów przypadających na pojedynczy pomiar wynosi $\mathcal{N} = 1000$, a współczynnik tłumienia $\alpha = 0.2$ dB/km. Rysunek pochodzi z pracy [A6].

gdzie ρ^{Γ_A} oznacza częściową transpozycję macierzy gęstości względem podukładu A, natomiast $\|\cdot\|_1$ jest normą śladową. Negatywność jest monotoniczną miarą splątania i dla rozważanej w pracy klasy maksymalnie splątanych stanów dwóch kutritów umożliwia bezpośrednią ilościową ocenę stopnia splątania po transmisji.

Wprowadzenie tej miary pozwoliło metodologicznie rozszerzyć analizę znaną z dwukubitowej zgodności na układy o większym wymiarze lokalnej przestrzeni Hilberta. W przypadku dwóch kutritów można zatem badać nie tylko wierność rekonstrukcji, lecz również zmianę ilości splątania wykrywanego przez procedurę tomograficzną w funkcji niezależnych długości obu kanałów światłowodowych.

Mój indywidualny wkład w pracę [A6] obejmował opracowanie koncepcji badania, całej warstwy matematycznej i metodologicznej związanej z modelowaniem strat fotonów, opisem procesu w ramach teorii układów otwartych, konstrukcją procedury tomograficznej oraz doborem miar służących do oceny jakości rekonstrukcji i splątania. Przygotowałem również implementacje numeryczne oraz uzyskałem i przeanalizowałem wyniki dotyczące kubitów, w tym stanów splątanych. Analizy numeryczne dotyczące kutritów, obejmujące implementację, generowanie wyników oraz przygotowanie odpowiadających im wykresów i opisów, zostały wykonane przez współautora, mgr Jakuba Szlachetkę.

Znaczenie pracy [A6] w kontekście osiągnięcia A i dyscypliny. Praca [A6] rozszerza zakres osiągnięcia A poprzez bezpośrednie połączenie metod tomografii kwantowej z fizycznym modelem kanału transmisyjnego. W poprzednich pracach analizowałem przede wszystkim wpływ właściwości pomiaru i ograniczonej statystyki na jakość rekonstrukcji, natomiast w [A6] wprowadziłem model, w którym liczba dostępnych wyników pomiarowych wynika z rzeczywistych strat fotonów podczas propagacji.

Istotnym wkładem metodologicznym było przedstawienie tłumienia światłowodowego jako prawidłowo zdefiniowanej nieunitarnej dynamiki kwantowej stanu Focka oraz

połączenie tego formalizmu z kompletną procedurą tomografii stanów zakodowanych w stopniach swobody fotonów. Pozwoliło to ilościowo określić zależność pomiędzy parametrami kanału, liczbą fotonów dostępną w pomiarze i wiarygodnością rekonstrukcji.

Praca rozwija również zagadnienie charakteryzacji splątania. Dla stanów dwukubitowych zastosowałem zgodność w celu wyznaczania granic transmisji umożliwiających obserwację silnych korelacji kwantowych, natomiast dla dwóch kutritów zaproponowałem negativity jako ilościową miarę splątania. Oznacza to przejście od samej rekonstrukcji macierzy gęstości do bezpośredniej oceny, czy i w jakim stopniu własności kwantowe istotne z punktu widzenia zastosowań pozostają wykrywalne po transmisji przez rzeczywisty, stratny kanał optyczny.

Na dzień złożenia wniosku praca [A6] została zacytowana 22 razy w niezależnych publikacjach naukowych, co wskazuje, że znalazła trwałe miejsce w międzynarodowym nurcie badań dotyczących charakteryzacji zasobów kwantowych. Praca jest cytowana przede wszystkim w kontekście tłumienia światłowodowego jako jednego z istotnych czynników ograniczających skuteczną dystrybucję stanów splątanych.

Tomografia stanów splątanych z wykorzystaniem pomiarów ciągłych w czasie

Praca [A7] rozwija metodologię tomografii kwantowej opartej na pomiarach wykonywanych w dziedzinie czasu. Stanowi ona bezpośrednie nawiązanie do prac [A1] i [A2], w których analizowałem wpływ niepewności czasowej detekcji na tomografię stanów kodowanych w przedziałach czasowych. W pracy [A7] problem ten został przeniesiony na tomografię stanów polaryzacyjnych, przy czym pomiary nie są generowane przez propagację dyspersyjną impulsów, lecz przez znaną, ciągłą w czasie dynamikę unitarną układu. Jednocześnie praca rozwija ideę przedstawioną w [A3], zgodnie z którą dynamika układu może zostać wykorzystana jako zasób pozwalający na generowanie informacyjnie zupełnego zbioru operatorów pomiarowych.

Założyłem, że stan polaryzacyjny kubitu podlega znanej ewolucji unitarnej

$$\rho(t) = U(t)\rho(0)U^{\dagger}(t). \tag{62}$$

Jeżeli dostępny eksperymentalnie pomiar opisany jest przez dodatni operator M_{ξ}, to prawdopodobieństwo wyniku pomiaru w chwili t można zapisać jako

$$p_{\xi}(t) = \mathrm{Tr}\left[M_{\xi}U(t)\rho(0)U^{\dagger}(t)\right] = \mathrm{Tr}\left[U^{\dagger}(t)M_{\xi}U(t)\rho(0)\right]. \tag{63}$$

W obrazie Heisenberga można zatem zdefiniować ciągłą rodzinę operatorów

$$M_{\xi}(t) = U^{\dagger}(t)M_{\xi}U(t), \tag{64}$$

co oznacza, że jedna fizyczna konfiguracja pomiarowa, połączona ze znaną dynamiką układu i detekcją rozdzielczą w czasie, może generować wiele różnych operatorów pomiarowych.

W pracy rozważałem konkretną dynamikę polaryzacji, którą w realizacji eksperymentalnej można powiązać z kontrolowaną dwójłomnością w światłowodzie. Wykazałem, że wychodząc wyłącznie od projektora na polaryzację poziomą

$$M_H = |H\rangle\langle H|, \tag{65}$$

można poprzez odpowiedni dobór sześciu chwil pomiaru wygenerować zbiór równoważny pomiarom polaryzacji

$$\{|H\rangle, |V\rangle, |D\rangle, |A\rangle, |R\rangle, |L\rangle\}, \tag{66}$$

a więc informacyjnie zupełny zbiór umożliwiający rekonstrukcję dowolnego stanu kubitu. W praktyce oznacza to zastąpienie sekwencyjnej zmiany konfiguracji elementów polaryzacyjnych przez pomiar wykonywany w jednej konfiguracji aparatury, przy jednoczesnym rozróżnianiu czasu detekcji fotonów.

Istotnym elementem modelu było uwzględnienie ograniczonej rozdzielczości czasowej rzeczywistych detektorów. Podobnie jak w pracach [A1] i [A2], niepewność czasu detekcji została opisana za pomocą rozkładu Gaussa charakteryzowanego przez parametr σ_j, odpowiadający jitterowi czasowemu detektora. Realistyczny operator pomiarowy został zdefiniowany jako splot idealnego operatora $M_\xi(t)$ z funkcją opisującą niepewność czasową:

$$\widetilde{M}_\xi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} M_\xi(\tau)\, q_j(t-\tau)\, d\tau. \tag{67}$$

Analiza geometryczna operatorów na sferze Blocha wykazała, że wzrost σ_j powoduje stopniową utratę czystości efektywnych operatorów pomiarowych oraz kurczenie się ich trajektorii w kierunku środka kuli Blocha (zob. Fig. 2 w pracy [A7]). W granicy dużej niepewności czasowej[5] różne chwile detekcji przestają odpowiadać dobrze rozróżnialnym pomiarom, a zatem informacja umożliwiająca rekonstrukcję stanu zanika.

Na podstawie tego formalizmu opracowałem kompletną procedurę tomografii kubitów. Dane pomiarowe generowane były z uwzględnieniem zarówno jitteru czasowego, jak i szumu Poissona związanego ze skończoną liczbą rejestrowanych fotonów. Rekonstrukcję macierzy gęstości przeprowadzałem metodą największej wiarygodności z wykorzystaniem parametryzacji Cholesky'ego, gwarantującej fizyczność otrzymywanego estymatora.

Dokładność metody została w pierwszej kolejności przeanalizowana dla dużego zbioru stanów pokrywających kulę Blocha oraz osobno dla stanów czystych. Wyniki wykazały, że wpływ jitteru jest szczególnie silny w przypadku stanów czystych (zob. Table 1 w pracy [A7]). Jest to konsekwencją geometrycznego charakteru zaburzenia operatorów pomiarowych: w miarę zwiększania niepewności czasowej efektywne operatory przesuwają się w kierunku wnętrza kuli Blocha, przez co tracą zdolność do precyzyjnego odtwarzania stanów położonych na jej powierzchni.

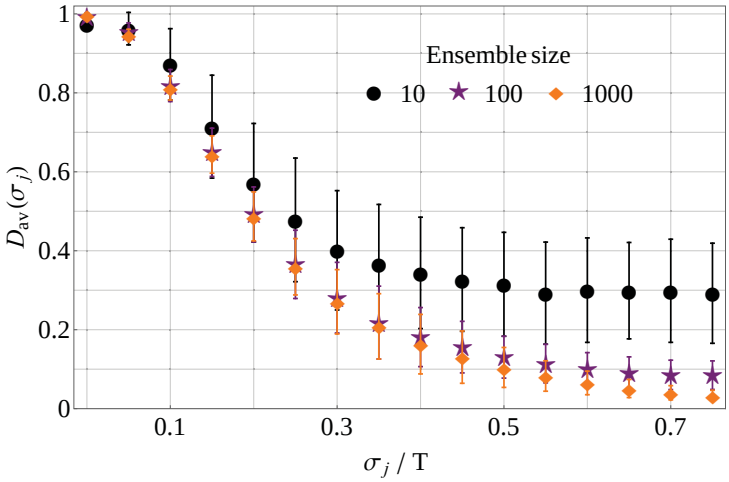
Aby zbadać ten efekt w sposób niezależny od samej wierności rekonstrukcji, przeanalizowałem również zdolność procedury do zachowania rozróżnialności stanów ortogonalnych. Dla par stanów wejściowych ρ_{in} oraz $\rho_{\text{in}}^{\perp}$ obliczałem odległość śladową pomiędzy odpowiadającymi im stanami zrekonstruowanymi,

$$D\left(\rho_{\text{out}}, \rho_{\text{out}}^{\perp}\right) = \frac{1}{2}\,\text{Tr}\left|\rho_{\text{out}} - \rho_{\text{out}}^{\perp}\right|. \tag{68}$$

Dla idealnej rekonstrukcji stanów ortogonalnych wielkość ta jest równa jedności.

Jak wykazałem na Rys. 7, dla dużej liczby fotonów odległość śladowa systematycznie maleje wraz ze wzrostem jitteru. Dla $\sigma_j = 0$ ortogonalność jest odtwarzana prawidłowo, natomiast dla $\sigma_j = 0.75\,T$ średnia odległość śladowa zbliża się do zera. Oznacza to, że przy tak dużej niepewności czasowej procedura tomograficzna praktycznie traci zdolność

[5]Dla zachowania większej ogólności w swoich analizach, wartość jitteru, σ_j, określałem względem T, które wyraża okres periodycznej dynamiki nałożonej na operator pomiaru zgodnie z równaniem (64).



Rysunek 7: Średnia odległość śladowa D_{av} pomiędzy stanami zrekonstruowanymi dla par ortogonalnych kubitów w funkcji niepewności czasowej detektora σ_j. Wyniki przedstawiono dla trzech różnych liczb fotonów przypadających na pojedynczy pomiar. Rysunek pochodzi z pracy [A7].

rozróżniania nawet stanów wejściowych, które są idealnie ortogonalne. Wynik ten pozostaje w bezpośrednim związku z kurczeniem się trajektorii operatorów pomiarowych w przestrzeni Blocha.

W pracy rozszerzyłem następnie formalizm na tomografię splątanych par fotonów. Dla każdego fotonu zastosowałem ten sam czasowo zależny operator pomiarowy, a pomiary dla układu dwukubitowego zostały zdefiniowane jako

$$M_H^{2q}(t_i, t_j) = M_H(t_i) \otimes M_H(t_j). \tag{69}$$

Wykorzystanie sześciu chwil pomiarowych dla każdego fotonu prowadzi do zbioru 36 operatorów dwukubitowych. Model odpowiada tym samym standardowej, nadkompletnej tomografii polaryzacyjnej, lecz poszczególne konfiguracje pomiarowe są generowane poprzez dynamikę układu i rozdzielczą czasowo detekcję.

Analizę przeprowadziłem dla maksymalnie splątanych stanów postaci

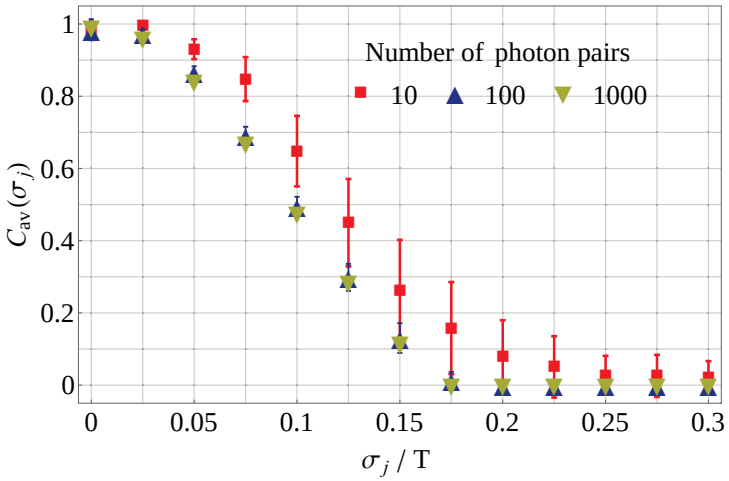
$$|\Phi(\alpha)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|00\rangle + e^{i\alpha}|11\rangle\right), \tag{70}$$

dla których parametr α obejmował pełny zakres fazy względnej. Jako podstawową miarę ilości wykrywanego splątania zastosowałem zgodność. Dla każdego zrekonstruowanego stanu wyznaczałem $C[\rho_{\mathrm{out}}]$, a następnie średnią wartość C_{av} dla całej próbki.

Wyniki przedstawione na Rys. 8 wykazały bardzo silną zależność możliwości detekcji splątania od rozdzielczości czasowej pomiaru. Wraz ze wzrostem σ_j rekonstruowana zgodność szybko maleje, a dla $\sigma_j \geq 0.25\,T$ średnia wartość zgodności jest praktycznie równa zeru, niezależnie od analizowanej liczby par fotonów.

Szczególnie istotnym wynikiem pracy było wyznaczenie zakresu niepewności czasowej, w którym procedura pozwala zachować poziom splątania wystarczający, zgodnie z zastosowanym w pracy kryterium opartym na zgodności, do stwierdzenia naruszenia nierówności Bell–CHSH. Przy uwzględnieniu przedziału trzech odchyleń standardowych wykazałem, że warunek ten można zagwarantować dla

$$0 \leq \frac{\sigma_j}{T} \leq 0.065. \tag{71}$$



Rysunek 8: Średnia zgodność C_{av} rekonstruowanych maksymalnie splątanych stanów dwukubitowych w funkcji niepewności czasowej detektora σ_j. Wyniki przedstawiono dla trzech różnych liczb par fotonów przypadających na pojedynczy pomiar. Rysunek pochodzi z pracy [A7].

Po przekroczeniu tej granicy przedział statystyczny rekonstruowanej zgodności zaczyna obejmować wartości niższe od przyjętego progu. Wynik ten pozwolił powiązać parametr techniczny detektora, jakim jest jitter czasowy, z konkretnym kryterium użyteczności procedury tomograficznej do identyfikacji nieklasycznych korelacji.

Analiza ujawniła również interesujący efekt związany z bardzo małą liczbą fotonów. Dla $\mathcal{N} = 10$ niektóre średnie wartości analizowanych miar były pozornie korzystniejsze niż dla większych zespołów. Jednocześnie towarzyszyło im jednak znacznie większe rozproszenie wyników. Wykazałem, że efekt ten nie oznacza poprawy jakości pomiaru, lecz jest konsekwencją silnego szumu Poissona. Wynik ten pokazuje znaczenie równoczesnego analizowania wartości średnich oraz ich niepewności statystycznej przy ocenie wydajności procedur tomograficznych.

Praca [A7] została wykonana przeze mnie w pełni samodzielnie i jest publikacją jednoautorską. Opracowałem koncepcję badań, model matematyczny pomiarów ciągłych w czasie, sposób implementacji jitteru detektora, metodologię tomografii pojedynczych i splątanych kubitów oraz procedury numeryczne. Samodzielnie przeprowadziłem wszystkie symulacje, analizę wyników i przygotowałem tekst publikacji.

Znaczenie pracy [A7] w kontekście osiągnięcia A i dyscypliny. Praca [A7] łączy kilka kierunków rozwijanych w ramach osiągnięcia A. Z prac [A1] i [A2] zaczerpnięta i rozwinięta została koncepcja jawnego uwzględnienia ograniczonej rozdzielczości czasowej detektorów w modelu tomografii fotonicznej, natomiast z pracy [A3] wynika idea wykorzystania znanej dynamiki układu do generowania informacyjnie zupełnego zbioru pomiarowego. W [A7] oba te elementy zostały połączone w jednym modelu dotyczącym polaryzacyjnych stanów pojedynczych i splątanych fotonów.

Istotnym rozwinięciem było przejście od analizy dokładności samej rekonstrukcji do badania, w jaki sposób niedoskonałość detekcji wpływa na możliwość rozróżniania stanów oraz identyfikowania splątania. Dzięki wykorzystaniu odległości śladowej i zgodności możliwe było bezpośrednie określenie utraty informacji fizycznej wraz ze wzrostem jitteru czasowego.

Za szczególnie istotny rezultat uważam wyznaczenie ilościowej granicy dopuszczalnej niepewności czasowej dla detekcji silnych korelacji kwantowych. Pokazuje to, że opracowany formalizm może służyć nie tylko do symulowania jakości rekonstrukcji, ale również do określania wymagań technicznych stawianych rzeczywistym układom detekcyjnym. Praca [A7] wnosi tym samym wkład w rozwój metod tomografii kwantowej uwzględniających rzeczywiste ograniczenia aparatury pomiarowej oraz łączy formalizm pomiarów ciągłych w czasie z praktycznym problemem charakteryzacji splątanych stanów fotonicznych.

Optymalizacja kwantowej dystrybucji klucza poprzez kontrolę czasowego profilu pojedynczych fotonów

Praca [A8] stanowi zastosowanie rozwijanych przeze mnie wcześniej metod opisu czasowych własności pojedynczych fotonów do konkretnego problemu technologii kwantowej, jakim jest światłowodowa kwantowa dystrybucja klucza. W pracy połączyłem formalizm funkcji falowych w dziedzinie czasu, model dyspersji chromatycznej w światłowodzie oraz model czasowej niepewności detekcji wykorzystywane wcześniej w pracach [A1], [A2] i [A7] z analizą wydajności protokołu QKD opartego na schemacie BB84. Istotnym rozszerzeniem modelu było uwzględnienie parametru chirpu $\mathcal{C}$, opisującego kwadratową fazę funkcji falowej pojedynczego fotonu, oraz wykazanie, że parametr ten może zostać wykorzystany jako stopień swobody służący do optymalizacji działania systemu QKD.

Punktem wyjścia był opis czasowego modu pojedynczego fotonu za pomocą gaussowskiej funkcji falowej

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{\sqrt{2\pi}\sqrt{\sigma}}} \exp\left[-\frac{1+i\mathcal{C}}{4\sigma^2}t^2\right], \tag{72}$$

gdzie σ określa początkową szerokość czasową fotonu, natomiast $\mathcal{C}$ jest parametrem chirpu. Wartość $\mathcal{C} = 0$ odpowiada impulsowi bez chirpu, natomiast dla $\mathcal{C} \neq 0$ funkcja falowa posiada dodatkową fazę kwadratową zależną od czasu. Co istotne, zmiana parametru $\mathcal{C}$ nie zmienia początkowego rozkładu prawdopodobieństwa detekcji $|\psi(t)|^2$, lecz wpływa na późniejszą ewolucję czasowego profilu fotonu w ośrodku dyspersyjnym.

Podobnie jak we wcześniejszych pracach [A1] i [A2], propagację fotonu przez światłowód opisałem za pomocą propagatora dyspersyjnego

$$\mathcal{D}(t,\widetilde{t},L) = \frac{1}{\sqrt{4\pi i\beta L}} \exp\left[\frac{i(t-\widetilde{t})^2}{4\beta L}\right], \tag{73}$$

gdzie L jest długością kanału, a β oznacza parametr dyspersji prędkości grupowej. Funkcja falowa po transmisji wyznaczana jest zgodnie z zależnością

$$\psi_L(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{D}(t,\widetilde{t},L)\psi(\widetilde{t})\, d\widetilde{t}. \tag{74}$$

Dzięki jawnej obecności parametru C w funkcji początkowej możliwe było zbadanie, w jaki sposób odpowiednie przygotowanie fazy fotonu wpływa na jego czasowe poszerzenie podczas propagacji.

Drugim elementem modelu była czasowa niepewność detekcji. Zastosowałem tutaj podejście bezpośrednio związane z pracami [A1], [A2] oraz [A7], opisując profil czasowy

detektora za pomocą rozkładu Gaussa

$$\chi_d(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_j^2}} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_j^2}\right), \tag{75}$$

gdzie σ_j oznacza jitter czasowy. Efektywny rozkład czasu detekcji został zdefiniowany jako splot rozkładu czasowego fotonu po propagacji z odpowiedzią detektora,

$$\widetilde{p}_L(t) = \int_{-\infty}^{\infty} p_L(\tau)\chi_d(t-\tau)\, d\tau. \tag{76}$$

Formalizm ten pozwala jednocześnie uwzględnić fizyczne poszerzenie pakietu falowego wywołane dyspersją oraz ograniczoną rozdzielczość czasową urządzenia detekcyjnego.

Na tej podstawie opracowałem model protokołu BB84, w którym bity klucza kodowane są w polaryzacji pojedynczych fotonów, natomiast czasowy profil fotonu decyduje o prawdopodobieństwie jego poprawnej rejestracji w zadanym oknie detekcyjnym. Wyznaczyłem prawdopodobieństwo detekcji właściwego fotonu, jak również prawdopodobieństwo zarejestrowania w tym samym oknie czasowym fotonu należącego do poprzedniego lub kolejnego przedziału czasowego. Model uwzględnia ponadto tłumienie kanału (zgodnie z pracą [A6]) oraz ciemne zliczenia detektora – pełny formalizm matematyczny opisałem w części II Theoretical Framework, B. QKD protocol involving chromatic dispersion and time uncertainty.

Wydajność protokołu oceniałem za pomocą prawdopodobieństwa wygenerowania surowego bitu klucza, wartości QBER oraz szybkości generowania bezpiecznego klucza

$$\mathcal{K} = \max\left\{0, p_{\text{raw}}\left[1 - 2H(Q)\right]\right\}, \tag{77}$$

gdzie p_{raw} oznacza prawdopodobieństwo wygenerowania surowego bitu klucza (pełny wzór w Eq. (13) w pracy [A8]), Q jest wartością QBER (Eq. (14) w pracy [A8]), natomiast $H(Q)$ oznacza binarną funkcję entropii. Wprowadziłem również wielkość $L_{\max}$, określającą maksymalny zasięg bezpiecznej komunikacji poprzez warunek

$$\mathcal{K}_{\text{raw}}(L_{\max}) = 0, \tag{78}$$

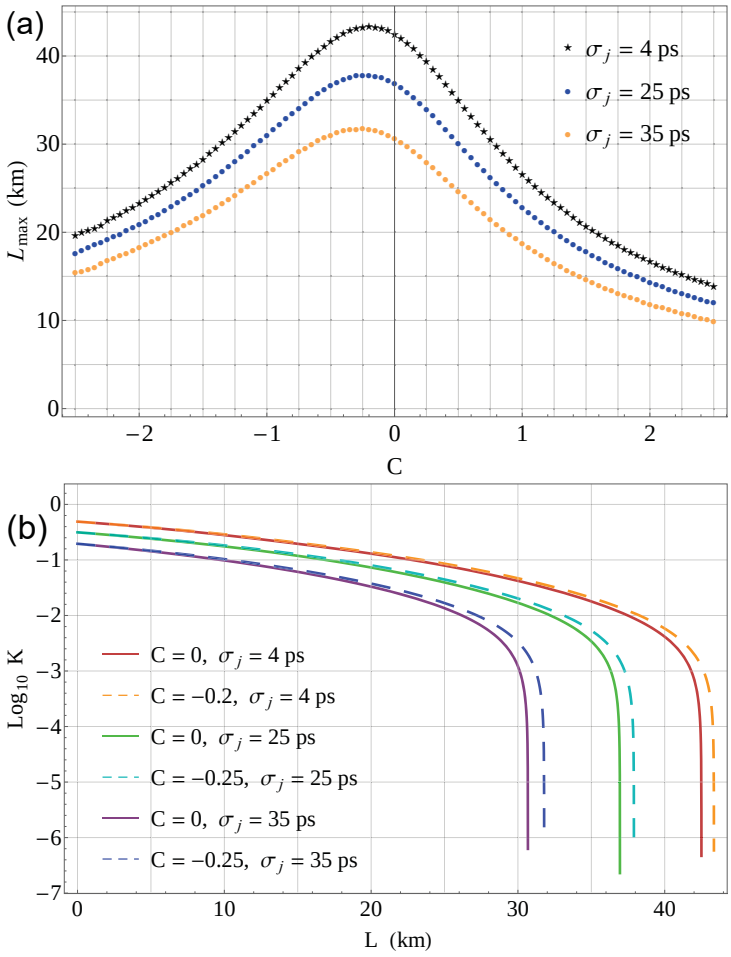
gdzie $\mathcal{K}_{\text{raw}}(L) = p_{\text{raw}}\left[1 - 2H(Q)\right]$.

Pierwszy etap analizy obejmował określenie wpływu szerokości okna detekcyjnego na wydajność protokołu. Zbyt szerokie okno zwiększa prawdopodobieństwo rejestracji niepożądanych zdarzeń, natomiast zbyt wąskie prowadzi do utraty części właściwego sygnału. Dla parametrów zastosowanych w pracy optymalnym kompromisem okazało się okno o szerokości $v = 50$ ps, które następnie wykorzystałem w dalszej analizie wpływu chirpu.

Kluczowym wynikiem pracy było wykazanie, że wpływ parametru $\mathcal{C}$ na wydajność protokołu nie jest monotoniczny. Proste zastosowanie dużych wartości $|\mathcal{C}|$ nie prowadzi do poprawy działania systemu. Dla przykładowych wartości $\mathcal{C} = -1$ oraz $\mathcal{C} = 1$ szybkość generowania klucza była niższa niż dla fotonów bez chirpu. Analiza pełnego zakresu parametru wykazała jednak istnienie wyraźnego optimum dla niewielkich ujemnych wartości $\mathcal{C}$.

Jak pokazałem na Rys. 9(a), funkcja $L_{\max}(\mathcal{C})$ posiada maksimum dla niewielkich ujemnych wartości chirpu. Dla analizowanych parametrów optymalne wartości znajdowały się w przybliżeniu w zakresie

$$-0.3 \lesssim \mathcal{C} \lesssim -0.2. \tag{79}$$



Rysunek 9: Wpływ parametru chirpu $\mathcal{C}$ na wydajność protokołu QKD: (a) maksymalny zasięg bezpiecznej komunikacji $L_{\max}$ w funkcji $\mathcal{C}$ dla różnych wartości jitteru czasowego detektora; (b) szybkość generowania klucza dla wartości $\mathcal{C}$ optymalizujących zasięg komunikacji w porównaniu z przypadkiem fotonów bez chirpu ($\mathcal{C} = 0$). Szerokość okna detekcyjnego wynosi $v = 50$ ps. Rysunek pochodzi z pracy [A8].

Odpowiednie przygotowanie czasowej fazy pojedynczego fotonu pozwala zatem częściowo skompensować wpływ dyspersji chromatycznej i czasowej niepewności detekcji.

Znaczenie tego wyniku zademonstrowałem bezpośrednio na Rys. 9(b), gdzie porównałem szybkości generowania klucza dla zoptymalizowanych ujemnych wartości $\mathcal{C}$ z przypadkiem impulsu bez chirpu. We wszystkich analizowanych przypadkach zastosowanie zoptymalizowanego chirpu prowadziło do poprawy wydajności protokołu oraz zwiększenia maksymalnego zasięgu bezpiecznej komunikacji.

Przeprowadziłem również analizę dla różnych wartości parametru dyspersji β. Pozwoliła ona wykazać, że korzyść wynikająca z optymalizacji chirpu występuje dla różnych właściwości kanału transmisyjnego. W szczególności dla rozważanego zakresu parametrów względna poprawa szybkości generowania klucza była wyraźniejsza dla światłowodu charakteryzującego się mniejszą wartością dyspersji. Oznacza to, że parametr chirpu może być traktowany jako dodatkowy element projektowania systemu QKD, którego optymalna wartość powinna być dobierana wspólnie z parametrami kanału oraz charakterystyką czasową detektora.

Istotą uzyskanego wyniku jest wykorzystanie pełniejszej charakterystyki pojedyn-

czego fotonu niż samego jego stopnia swobody służącego do kodowania informacji. W rozważanym protokole BB84 bit klucza kodowany jest w polaryzacji, natomiast czasowy mod fotonu nie przenosi bezpośrednio informacji logicznej. Jego właściwości mają jednak bezpośredni wpływ na prawdopodobieństwo poprawnej detekcji, QBER oraz szybkość generowania klucza. Kontrolując fazę czasowej funkcji falowej poprzez parametr $\mathcal{C}$, można zatem zwiększyć wydajność protokołu bez zmiany sposobu kodowania bitów kwantowych.

Mój indywidualny wkład w pracę [A8] obejmował sformułowanie koncepcji badania, opracowanie modelu matematycznego i metodologii, w tym opisu czasowych funkcji falowych pojedynczych fotonów, propagacji dyspersyjnej, niepewności czasowej detekcji oraz modelu QKD, a także przygotowanie implementacji numerycznej i uzyskanie wyników przedstawionych w pracy. Przeprowadziłem główną analizę otrzymanych wyników oraz przygotowałem pierwszą wersję manuskryptu. Współautor, dr Saeed Haddadi, uczestniczył w analizie i interpretacji wyników, w szczególności przedstawionych na wykresach, współredagowaniu wstępu, dyskusji i wniosków, krytycznej rewizji manuskryptu oraz przygotowaniu odpowiedzi na uwagi recenzentów.

Znaczenie pracy [A8] w kontekście osiągnięcia A i dyscypliny. Praca [A8] stanowi końcowy etap rozwoju jednej z głównych linii metodologicznych tworzących osiągnięcie A. W pracach [A1] i [A2] czasowe funkcje falowe pojedynczych fotonów, propagacja dyspersyjna oraz jitter detektora zostały wykorzystane do analizy możliwości rekonstrukcji stanów zakodowanych w przedziałach czasowych. W pracy [A6] rozwinięty został formalizm opisu tłumienia światłowodowego oraz jego wpływ na dystrybucję zasobów kwantowych. W pracy [A7] model czasowej niepewności detekcji został następnie zastosowany do oceny wiarygodności tomografii i detekcji splątania. W [A8] połączyłem elementy z tych prac z modelem konkretnego protokołu komunikacji kwantowej i wykorzystane nie tylko do opisu ograniczeń systemu, lecz również do jego aktywnej optymalizacji.

Najważniejszym rezultatem pracy jest wykazanie, że dokładna charakteryzacja czasowego modu pojedynczego fotonu i jego fizycznej transformacji podczas propagacji może prowadzić do bezpośredniej korzyści technologicznej. Kwadratowa faza funkcji falowej, która nie wpływa na początkowy rozkład czasu detekcji, staje się istotnym zasobem po przejściu przez kanał dyspersyjny. Odpowiedni dobór parametru $\mathcal{C}$ pozwala ograniczyć niekorzystne skutki poszerzenia impulsu, zwiększyć szybkość generowania bezpiecznego klucza oraz wydłużyć maksymalny zasięg komunikacji.

Wynik ten dobrze ilustruje szerszą ideę leżącą u podstaw osiągnięcia A: precyzyjny opis i charakteryzacja stanów kwantowych oraz procesów fizycznych, którym podlegają, nie mają wyłącznie znaczenia diagnostycznego. Mogą również stanowić podstawę świadomego projektowania i optymalizacji technologii kwantowych. W pracy [A8] pokazano to na przykładzie QKD, gdzie kontrola właściwości czasowej funkcji falowej pojedynczego fotonu przekłada się bezpośrednio na mierzalną poprawę parametrów użytkowych protokołu.

Krytyczna weryfikacja modelu stanów splątanych w kwantowej iluminacji

Najnowszą publikacją wchodzącą w skład osiągnięcia A jest praca [A9], opublikowana w 2025 roku w czasopiśmie „Optics Express” w formie komentarza do artykułu eksperymentalnego [21] poświęconego kwantowej iluminacji (and. *quantum illumination*) z wykorzystaniem par fotonów splątanych w polaryzacji. Praca ta stanowi odmienne od

wcześniejszych zastosowanie rozwijanych przeze mnie narzędzi formalnych. Jej celem nie było zaproponowanie nowej procedury rekonstrukcji stanu, lecz krytyczna weryfikacja poprawności matematycznego modelu zastosowanego w opublikowanym eksperymencie oraz wskazanie konsekwencji błędnego opisu ewolucji stanów kwantowych w kanałach stratnych.

Kwantowa iluminacja jest przykładem protokołu kwantowego, w którym korelacje pomiędzy fotonem sygnałowym i referencyjnym mogą być wykorzystane do detekcji obiektu w obecności strat i szumu. W literaturze naukowej poważnie rozważa się możliwość wykorzystania kwantowego obrazowania opartego na kwantowej iluminacji w nowej generacji systemów lidarowych (ang. *Light Detection and Ranging*, LiDAR). Urządzenia te mogą stanowić podstawę przyszłych systemów wykrywania zagrożeń w powietrzu [22]. Jednak aby możliwe było przejście od badań koncepcyjnych do praktycznych demonstracji, konieczne jest oparcie wszystkich rozważań na poprawnych podstawach matematycznych kwantowej teorii informacji.

W komentowanej pracy [21] jako miarę nieklasycznych korelacji zastosowano nierówność Clausera–Horne'a–Shimony'ego–Holta (CHSH), a autorzy argumentowali, że wykorzystanie splątania polaryzacyjnego umożliwia detekcję obiektów o bardzo małym współczynniku odbicia. Podstawowym problemem, który zdiagnozowałem w [A9], był jednak niepoprawny opis działania kanału stratnego na stan fotoniczny.

Punktem wyjścia do mojej analizy były prawidłowo zdefiniowane operatory Krausa opisujące stratę pojedynczego fotonu,

$$K_0 = \sqrt{1-\eta}\,|0\rangle\langle 1|, \qquad K_1 = |0\rangle\langle 0| + \sqrt{\eta}\,|1\rangle\langle 1|, \tag{80}$$

gdzie η oznacza transmitancję kanału. Działanie odpowiadającego im kanału kwantowego na początkowy stan jednofotonowy

$$\varrho_{\mathrm{in}} = |1\rangle\langle 1| \tag{81}$$

prowadzi do stanu

$$\Lambda_\eta\left[\varrho_{\mathrm{in}}\right] = (1-\eta)|0\rangle\langle 0| + \eta|1\rangle\langle 1|. \tag{82}$$

Stan ten opisuje probabilistyczną utratę fotonu podczas transmisji.

W krytykowanej publikacji [21] obiekt odpowiadający takiej macierzy gęstości został następnie błędnie zinterpretowany jako operator Krausa. W pracy [A9] pokazaliśmy, że prowadzi to do pomieszania dwóch zasadniczo różnych obiektów formalizmu teorii kwantowej: stanu układu oraz operatora opisującego działanie kanału kwantowego. W konsekwencji zaproponowany w komentowanej pracy "drugi sposób" modelowania strat nie stanowi poprawnej reprezentacji operacji kwantowej.

Problem ten ma bezpośredni związek z formalizmem rozwiniętym wcześniej w pracy [A6], w której tłumienie fotonów zostało przeze mnie opisane jako nieunitarna ewolucja kwantowa w przestrzeni Focka. Proces strat nie może być w ogólności reprezentowany przez pojedynczy operator zachowujący strukturę czystego stanu. Poprawny opis wymaga uwzględnienia różnych możliwych wyników procesu, w tym zdarzenia odpowiadającego utracie fotonu, poprzez odpowiednią reprezentację Krausa.

Drugim zasadniczym problemem zidentyfikowanym w pracy [A9] był sposób traktowania splątania polaryzacyjnego. W komentowanym modelu założono, że strata fotonu wpływa na część stanu opisującą liczbę fotonów, natomiast część polaryzacyjna pozostaje niezmieniona i jest transformowana operatorem jednostkowym. Takie rozdzielenie prowadzi

do niefizycznego wniosku, zgodnie z którym nawet niemal całkowita utrata fotonu w ramieniu sygnałowym pozostawiałaby niezmienione splątanie polaryzacyjne.

W pracy [A9] wskazaliśmy, że utrata jednego z fotonów tworzących parę splątaną oznacza, iż pozostały foton nie może być nadal częścią tego samego dwucząstkowego stanu splątanego. Nie można zatem opisywać procesu strat jako zmiany wyłącznie liczby fotonów przy jednoczesnym pozostawieniu dwufotonowego stanu polaryzacyjnego bez zmian. Poprawny model musi uwzględniać wspólną strukturę stanu fotonicznego i fizyczną konsekwencję zdarzeń, w których jeden z fotonów zostaje utracony.

Niepoprawny opis kanału został następnie w komentowanej publikacji wykorzystany do skonstruowania zredukowanej macierzy gęstości poprzez wykonanie śladu częściowego po stopniach swobody związanych z liczbą fotonów. Ponieważ część polaryzacyjna została wcześniej założona jako niezmienna, procedura ta prowadziła do sztucznego zachowania maksymalnie splątanego stanu polaryzacyjnego. W konsekwencji otrzymywano wysokie wartości parametru CHSH również w przypadku bardzo małej transmitancji kanału.

W [A9] wykazaliśmy, że wynik ten nie stanowi fizycznej odporności splątania na straty, lecz jest konsekwencją błędnego założenia przyjętego na poziomie konstrukcji modelu. Z tego względu teoretyczne wyniki komentowanej publikacji dotyczące zachowania parametru CHSH w funkcji reflektancji obiektu nie mogą być traktowane jako poprawne uzasadnienie obserwowanej przewagi kwantowej. Jednocześnie wyraźnie oddzieliliśmy tę krytykę od oceny samych danych eksperymentalnych: komentarz dotyczył matematycznego modelu wykorzystywanego do ich interpretacji, a nie poprawności wykonanych pomiarów eksperymentalnych.

W pracy zwróciliśmy również uwagę na niepoprawny zapis reprezentacji Krausa dla kanału depolaryzującego. Dla kanału kwantowego poprawna postać transformacji jest dana przez

$$\Lambda[X] = \sum_{\alpha} K_{\alpha} X K_{\alpha}^{\dagger}, \tag{83}$$

przy warunku

$$\sum_{\alpha} K_{\alpha}^{\dagger} K_{\alpha} = \mathbb{I}. \tag{84}$$

W komentowanej pracy operatory sprzężone hermitowsko zostały umieszczone w odwrotnej kolejności. Chociaż w przypadku zastosowanych operatorów hermitowskich błąd ten nie zmieniał numerycznie wyniku, wskazaliśmy go jako kolejny przykład konieczności zachowania ścisłości formalnej przy opisie rzeczywistych kanałów kwantowych.

Praca [A9] powstała we współpracy z mgr Jakubem J. Borkowskim, doktorantem Szkoły Doktorskiej Nauk Ścisłych i Przyrodniczych UMK. Stanowi ona jednocześnie przykład wykorzystania rozwijanej przeze mnie metodologii w pracy naukowej prowadzonej wspólnie z młodszym badaczem. Publikacja ma formę komentarza naukowego, którego zasadniczym rezultatem jest identyfikacja i formalne wyjaśnienie błędów w istniejącym modelu teoretycznym oraz wskazanie konsekwencji tych błędów dla interpretacji wyników dotyczących korelacji kwantowych.

Znaczenie pracy [A9] w kontekście osiągnięcia A i dyscypliny. Praca [A9] stanowi metodologiczne zamknięcie cyklu publikacji tworzących osiągnięcie A. W poprzednich pracach rozwijałem narzędzia służące do rekonstrukcji stanów kwantowych, modelowania niedoskonałości pomiarowych, opisu strat w kanałach optycznych oraz ilościowej charakteryzacji splątania. W [A9] kompetencje te zostały wykorzystane do krytycznej oceny

istniejącego modelu opublikowanego w literaturze dotyczącej technologii kwantowej.

Szczególnie bezpośredni związek występuje pomiędzy pracami [A6] i [A9]. W [A6] opracowałem fizycznie poprawny opis tłumienia fotonów jako nieunitarnej dynamiki kwantowej oraz badałem jego konsekwencje dla tomografii i detekcji splątania. W [A9] formalizm dotyczący kanałów stratnych został wykorzystany do wykazania, dlaczego model zastosowany w innym obszarze fotonicznych technologii kwantowych nie może prawidłowo opisywać ewolucji badanego układu.

Praca jest również związana z publikacjami [A4]–[A7], w których istotnym elementem było pytanie, na ile na podstawie rekonstruowanego lub zmodyfikowanego przez środowisko stanu można wiarygodnie wnioskować o obecności i ilości splątania. W [A9] problem ten nabiera szczególnego znaczenia, ponieważ błędny opis stanu po przejściu przez kanał stratny prowadzi bezpośrednio do niepoprawnych wniosków dotyczących naruszenia nierówności CHSH i trwałości korelacji kwantowych.

Jednocześnie [A9] poszerza zakres zastosowań metod rozwijanych w ramach osiągnięcia A. Podczas gdy w [A8] dokładna charakteryzacja czasowych właściwości pojedynczych fotonów została wykorzystana do optymalizacji protokołu kwantowej dystrybucji klucza, w [A9] poprawny opis stanów splątanych i kanałów stratnych okazuje się niezbędny do właściwej interpretacji wyników w obszarze quantum illumination, należącym do szeroko rozumianych technologii kwantowego obrazowania i detekcji.

Znaczenie tej pracy dla osiągnięcia A nie polega zatem na wprowadzeniu kolejnej techniki tomograficznej, lecz na pokazaniu szerszej roli formalnych metod charakteryzacji stanów kwantowych. Fizycznie poprawny opis stanu, jego ewolucji oraz stosowanych kryteriów korelacji stanowi warunek konieczny do wiarygodnej interpretacji eksperymentu i oceny deklarowanej przewagi kwantowej. W tym sensie [A9] pokazuje, że narzędzia rozwijane w ramach osiągnięcia A mogą służyć nie tylko do konstruowania nowych metod i modeli, lecz również do weryfikowania, korygowania i porządkowania istniejącej literatury naukowej.

Uważam ten aspekt za istotny z punktu widzenia całego osiągnięcia: cykl rozpoczyna się od opracowywania narzędzi rekonstrukcji stanów i analizy realistycznych ograniczeń eksperymentalnych, a kończy ich wykorzystaniem do krytycznej oceny modelu zastosowanego w opublikowanym eksperymencie z zakresu technologii kwantowych. Pokazuje to przejście od rozwoju własnego formalizmu do jego wykorzystania jako narzędzia pozwalającego oceniać fizyczną spójność i wiarygodność modeli stosowanych w szerszym obszarze nauk kwantowych, w tym w kontekście intensywnie rozwijających się technologii kwantowych. Kontekst ten wzmacnia ocenę znaczenia Osiągnięcia A, które jako cykl powiązanych tematycznie artykułów w rozumieniu art. 219 ust. 1 pkt 2 lit. b Ustawy, stanowi wiodące osiągnięcie naukowe przedstawione do oceny w procedurze habilitacyjnej.

Kończąc omawianie osiągnięcia A, chciałbym również zwrócić uwagę na uwzględnienie pracy [A1] w publikacji autorstwa prof. Tomasza Dohnalika oraz prof. Józefa Szudego pt. „Krajowe laboratorium FAMO (KL FAMO). Powstanie i działalność” [23]. Artykuł ten został opublikowany w czasopiśmie „Postępy Fizyki”, a jego celem było podsumowanie 20 lat działalności laboratorium FAMO. Traktuję jako szczególne wyróżnienie fakt, że prowadzone przeze mnie badania teoretyczne nad propagacją i tomografią stanów kwantowych typu *time-bin* zostały uwzględnione w opracowaniu podsumowującym dwie dekady działalności tego laboratorium.

4.3. Osiągnięcie B: Opracowanie fizycznie spójnego modelu matematycznego opisującego zjawisko nadpromienistości

4.3.1. Elementy składające się na osiągniecie B

Osiągnięcie B stanowi odrębne osiągnięcie naukowe Habilitanta, przedstawione jako znaczący wkład w rozwój dyscypliny nauki fizyczne. W odróżnieniu od osiągnięcia A, które zostało przedstawione w formie cyklu powiązanych tematycznie artykułów naukowych w rozumieniu art. 219 ust. 1 pkt 2 lit. b ustawy, osiągnięcie B dokumentuje odrębny rezultat badań dotyczących matematycznego modelowania zjawiska nadpromienistości. Osiągnięcie to zostało przedstawione w publikacji [B1] wraz z integralnym materiałem uzupełniającym (*Supplementary Information*).

[B1] J.J. Borkowski, A. Czerwinski, P. Kolenderski, *Revisiting superradiance dynamics from single diamond nanocrystals with a physically consistent model for fluorescence decay.* "Nature Communications" Tom **17** (Nr 1), 58 (2026). DOI: 10.1038/s41467-025-67847-6

IF (2025): 15.7 **Liczba cytowań: 1**

Suplement do publikacji dostępny jest za pośrednictwem linku: https://static-content.springer.com/esm/art%3A10.1038%2Fs41467-025-67847-6/MediaObjects/41467_2025_67847_MOESM1_ESM.pdf

Publikacja [B1] ukazała się w czasopiśmie „Nature Communications", należącym do grupy Nature Portfolio (Impact Factor za 2025 r.: **15,7**), w dziale *Matters Arising*, przeznaczonym do krytycznej analizy i naukowej weryfikacji wyników opublikowanych wcześniej na łamach czasopisma. Publikacje tego typu pełnią istotną rolę w procesie samokontroli nauki, umożliwiając identyfikację błędów interpretacyjnych, nieścisłości metodologicznych oraz ograniczeń modeli teoretycznych funkcjonujących w literaturze naukowej.

Ze względu na wymagania redakcyjne pierwotnie przygotowany manuskrypt musiał zostać w znacznym stopniu skrócony. Treści, które nie znalazły się w artykule głównym, zostały przeniesione do materiału uzupełniającego (*Supplementary Information*), stanowiącego integralną część publikacji [B1] i przedstawionego osiągnięcia B. Materiał ten zawiera szczegółową analizę równań wykorzystywanych do modelowania zjawiska nadpromienistości, a także dodatkowe przykłady ilustrujące własności i fizyczną spójność zaproponowanego modelu matematycznego.

4.3.2. Merytoryczne ujęcie osiągnięcia B

Nadpromienistość jest zjawiskiem kolektywnej emisji promieniowania przez układ emiterów, w którym wzajemne korelacje prowadzą do jakościowo innej dynamiki emisji niż w przypadku niezależnie promieniujących atomów lub centrów barwnych. Zjawisko to, pierwotnie opisane w modelu Dickego, pozostaje istotnym przedmiotem badań również w kontekście układów ciała stałego i ich potencjalnych zastosowań w technologiach kwantowych. Szczególnie interesującym przykładem są centra barwne azot-wakancja (ang. *nitrogen-vacancy*, NV) w nanokryształach diamentu, dla których możliwe jest obserwowanie emisji optycznej w temperaturze pokojowej.

Punktem wyjścia dla pracy [B1] był model zaproponowany wcześniej w czasopiśmie „Nature Communications" w celu opisania eksperymentalnie obserwowanej nadpromienistości z pojedynczych nanokryształów diamentu [24]. Model ten, dalej nazywany Modelem Bradaca[6], opierał się na opisie dynamiki populacji kolektywnych stanów Dickego $|J, M, \sigma\rangle$ z wykorzystaniem równania typu Goriniego–Kossakowskiego–Lindblada–Sudarshana (GKLS), uzupełnionego o człony fenomenologiczne opisujące m.in. defazowanie oraz przejścia intersystemowe (ang. *inter-system crossing*, ISC). Model miał umożliwiać obliczenie czasowej zależności intensywności fluorescencji i interpretację danych eksperymentalnych.

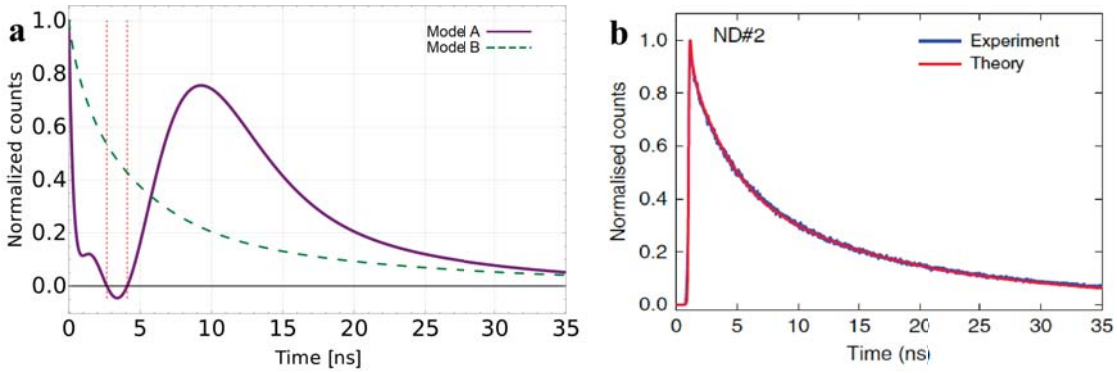
Bezpośrednia implementacja równań Modelu Bradaca, przeprowadzona z wykorzystaniem parametrów podanych w komentowanej pracy, ujawniła jednak istotne problemy. Otrzymane krzywe fluorescencji różniły się od wyników symulacji opublikowanych dla tych samych parametrów, a w niektórych przypadkach prowadziły również do wyników, które nie mogą posiadać interpretacji fizycznej. Intensywność fluorescencji przyjmowała wartości ujemne, natomiast w granicy długiego czasu pozostawała różna od zera. Oznaczałoby to odpowiednio ujemną liczbę rejestrowanych fotonów oraz niezanikającą emisję układu pomimo braku dalszego wzbudzania.

Problem ten został zilustrowany na Rys. 10**a** dla układu zawierającego siedem centrów NV. Fioletowa linia przedstawia wynik otrzymany po bezpośredniej implementacji Modelu Bradaca, natomiast zielona linia przerywana odpowiada opracowanemu w pracy [B1] Modelowi Borkowskiego. W przypadku Modelu Bradaca pojawia się obszar ujemnej fluorescencji, a sam przebieg znacząco różni się od symulacji przedstawionej w pierwotnej publikacji (porównywanej z raportowanymi wynikami eksperymentalnymi). Model Borkowskiego eliminuje te anomalie i prowadzi do przebiegu zgodnego z podstawowymi wymaganiami fizycznymi dla procesu zaniku fluorescencji.

Samo wykazanie niefizycznych rezultatów nie było jednak głównym celem pracy [B1]. Zasadniczym osiągnięciem było zidentyfikowanie źródeł niezgodności oraz opracowanie spójnego modelu matematycznego dynamiki fluorescencji. Szczegółowa analiza, przedstawiona zwłaszcza w materiale uzupełniającym do pracy [B1], wykazała, że problemy Modelu Bradaca dotyczą kilku różnych elementów formalizmu: współczynników określających prawdopodobieństwa przejść pomiędzy stanami kolektywnymi, znaków poszczególnych członów równania, czynników związanych z liczbą dostępnych przejść, a także samego wzoru służącego do obliczania fluorescencji.

Jednym z kluczowych elementów analizy było ponowne wyprowadzenie prawdopodobieństwa defazowania kolektywnego stanu Dickego. Dla lokalnego operatora zmiany fazy

[6]Na potrzeby niniejszego opracowania, w odniesieniu do modeli przedstawionych w pracach [24] oraz [B1] przyjęto nazewnictwo od pierwszego autora każdej z prac. Nie są to oficjalne terminy literaturowe.



Rysunek 10: Porównanie modeli fluorescencji dla $N = 7$ centrów NV. Panel (a) przedstawia wyniki symulacji według Modelu Bradaca (linia fioletowa) i opracowanego w pracy [B1] Modelu Borkowskiego (linia zielona przerywana). Czerwone linie pionowe wskazują miejsca zmiany znaku fluorescencji otrzymanej z Modelu Bradaca. Panel (b) przedstawia wyniki Modelu Bradaca reportowane w pracy [23] zestawione z danymi eksperymentalnymi. Rysunek pochodzi z pracy [B1].

$2\hat{s}_j^{(\sigma)z}$ otrzymano

$$\langle J, M, \sigma | \, 2\hat{s}_j^{(\sigma)z} \, | J, M, \sigma \rangle = \frac{M}{J}. \tag{85}$$

W konsekwencji prawdopodobieństwo procesu powinno być proporcjonalne do czynnika $|M/J|^2$, a nie do $1 - |M/J|^2$, jak w [24]. Różnica ta ma bezpośrednie znaczenie fizyczne, ponieważ decyduje o sposobie przepływu populacji pomiędzy podprzestrzeniami opisującymi kolektywnie emitujące centra NV. Przykładowo dla $M = 0$ prawdopodobieństwo opuszczenia danego stanu na skutek samego defazowania powinno być równe zeru.

Uwzględnienie poprawnych współczynników prowadzi do następującego członu opisującego zmianę populacji $P_{J,M}^{(\sigma)}$ wyłącznie na skutek defazowania:

$$\left.\frac{d}{dt} P_{J,M}^{(\sigma)}(t)\right|_{\mathrm{d}} = -\gamma_d^{\sigma} \left[2J \left|\frac{M}{J}\right|^2 P_{J,M}^{(\sigma)}(t) - 2\left(J + \frac{1}{2}\right) \left|\frac{M+\frac{1}{2}}{J+\frac{1}{2}}\right|^2 P_{J+\frac{1}{2},M+\frac{1}{2}}^{(\sigma)}(t) \right]. \tag{86}$$

Pierwszy składnik opisuje utratę populacji danego stanu na skutek defazowania, natomiast drugi odpowiada napływowi populacji z podprzestrzeni o większej wartości J. W Modelu Bradaca struktura ta była zaburzona m.in. przez nieprawidłowe umieszczenie czynnika $2J$ oraz znak prowadzący do sytuacji, w której oba człony powodowały zmniejszenie populacji.

Osobnej korekty wymagały człony opisujące przejścia międzysystemowe. Dla przejścia pomiędzy kolektywnymi stanami Dickego odpowiedni współczynnik powinien mieć strukturę $(J + M)(J - M + 1)$, wynikającą ze standardowej teorii emisji kolektywnej. W Modelu Bradaca jeden z tych czynników był pominięty. Analogiczna analiza doprowadziła do korekty równania opisującego obserwowaną fluorescencję. W Modelu Borkowskiego przyjmuje ono postać

$$F_{N_\sigma}(t) = \gamma \left[N_{nc}^{(\sigma)}(t) + \sum_{J=\frac{1}{2}}^{\frac{N}{2}} \sum_{M=-J}^{J} \left(J(J+1) - M(M-1)\right) P_{J,M}^{(\sigma)}(t) \right], \tag{87}$$

gdzie $N_{nc}^{(\sigma)}(t)$ oznacza liczbę centrów NV emitujących niezależnie po utracie kolektywnego charakteru stanu.

Łącznie w pracy [B1] oraz suplemencie zidentyfikowano i przeanalizowano dziewięć elementów formalizmu wymagających zmiany. Część z nich miała charakter algebraiczny, natomiast inne wynikały z odmiennej, fizycznie uzasadnionej interpretacji prawdopodobieństw przejść związanych z defazowaniem. Istotne było przy tym nie tylko wskazanie błędnych elementów, lecz również wykazanie, dlaczego zaproponowane współczynniki i znaki wynikają ze struktury stanów Dickego oraz teorii otwartych układów kwantowych.

Poprawność Modelu Borkowskiego została następnie zweryfikowana numerycznie dla kilku różnych liczb centrów NV. Analizowano przypadki $N = 2$, $N = 7$ oraz $N = 10$, wykorzystując te same wartości parametrów fizycznych, które zastosowano w pracy będącej przedmiotem komentarza. W każdym z badanych przypadków Model Borkowskiego usuwał anomalie występujące w Modelu Bradaca. Intensywność fluorescencji pozostawała nieujemna, a w granicy długiego czasu dążyła do zera, zgodnie z fizycznym oczekiwaniem dla układu, który po wzbudzeniu stopniowo traci energię poprzez emisję i procesy nieradiacyjne.

Znaczenie osiągnięcia B polega zatem przede wszystkim na dostarczeniu fizycznie spójnego modelu matematycznego umożliwiającego interpretację eksperymentów dotyczących nadpromienistości w nanokryształach diamentu. W przypadku złożonych zjawisk kolektywnych zgodność krzywej symulacyjnej z wybranym zakresem danych eksperymentalnych nie może być jedynym kryterium poprawności modelu. Równania muszą również zachowywać podstawowe własności fizyczne, takie jak nieujemność obserwowanych intensywności, prawidłowy kierunek przepływu populacji oraz zanik fluorescencji w granicy długiego czasu. Praca [B1] pokazała, że niespełnienie tych warunków może prowadzić do błędnej interpretacji dynamiki badanego układu nawet wtedy, gdy same wyniki eksperymentalne pozostają poprawne.

Mój indywidualny wkład w powstanie pracy [B1] obejmował przede wszystkim weryfikację poprawności modelu matematycznego opracowanego przez Doktoranta oraz koordynowanie jego pracy badawczej. Istotną częścią mojego wkładu była kontrola spójności formalizmu matematycznego z fizyczną interpretacją opisywanych procesów. Współredagowałem analizę porównawczą modelu krytykowanego i modelu poprawionego, a także samodzielnie wyprowadziłem część dodatkowych wzorów przedstawionych w materiale uzupełniającym do publikacji. Odpowiadałem również za kompleksową korektę pierwszej wersji artykułu oraz współredakcję pozostałych części pracy, w szczególności wstępu i podsumowania. Brałem udział w przygotowaniu odpowiedzi na uwagi recenzentów oraz w kolejnych etapach poprawiania manuskryptu.

Pełniłem również funkcję Autora Korespondującego[7]. W przypadku pracy [B1] rola ta wiązała się z istotnie większym zakresem odpowiedzialności niż w przypadku typowej publikacji naukowej. Wynikało to ze specyfiki artykułu, który został zgłoszony do działu „Matters Arising" czasopisma „Nature Communications" jako praca bezpośrednio kwestionująca poprawność modelu opublikowanego wcześniej na łamach tego czasopisma. Szczególnie istotnym elementem procesu redakcyjnego było wykazanie, że zidentyfikowane nieprawidłowości nie mają charakteru drugorzędnego, lecz prowadzą do istotnych problemów z fizyczną interpretacją modelu i wymagają merytorycznej korekty.

Praca została przeze mnie zgłoszona do publikacji 2 lipca 2024 r., natomiast jej ostateczna publikacja nastąpiła 5 stycznia 2026 r. W trakcie trwającego około półtora roku procesu redakcyjnego i recenzyjnego odpowiadałem jako Autor Korespondujący za komunikację z redakcją, uzasadnianie znaczenia zgłoszonych przez nas zastrzeżeń,

[7]W związku z nieprecyzyjnym oznaczeniem w ostatecznej wersji pracy, oświadczenie o wkładzie dotyczące pracy [B1] zostało uzupełnione o potwierdzenie pełnienia przeze mnie roli Autora Korespondującego.

wyjaśnianie skali zidentyfikowanych problemów w modelu Bradaca oraz przedstawianie argumentacji przemawiającej za koniecznością ich korekty. Do moich obowiązków należało również uzgadnianie z redakcją ostatecznego zakresu pracy, dostosowywanie manuskryptu do wymagań formatu „Matters Arising" oraz koordynowanie przygotowania materiału uzupełniającego, w którym umieszczono część szczegółowej argumentacji matematycznej niemieszczącej się w ograniczonej objętości artykułu głównego.

Znaczenie osiągnięcia B dla dyscypliny należy rozpatrywać przede wszystkim jako wkład w zapewnienie poprawnych podstaw teoretycznych dla dalszych badań nad kolektywną emisją promieniowania w układach ciała stałego. Oddziaływanie światła z materią należy do fundamentalnych zagadnień fizyki, dlatego stosowany do jego opisu formalizm matematyczny powinien być fizycznie spójny i prowadzić do wyników zgodnych z podstawowymi własnościami badanego układu. Opracowanie takiego formalizmu stanowi konieczny punkt wyjścia do dalszych badań teoretycznych i interpretacji wyników eksperymentalnych.

Uzyskane wyniki pokazują również, że istotnym elementem pracy naukowej jest nie tylko tworzenie nowych modeli, lecz także krytyczna weryfikacja wyników już obecnych w literaturze. W naukach ścisłych możliwość niezależnego odtworzenia obliczeń oraz sprawdzenia zgodności modelu z jego interpretacją fizyczną stanowi jeden z podstawowych mechanizmów samokontroli nauki. Nasze badania wykazały, że nawet model opublikowany w renomowanym czasopiśmie „Nature Communications" może zawierać błędy wymagające korekty. Fakt, że praca [24] uzyskała około 200 cytowań, dodatkowo pokazuje znaczenie niezależnej weryfikacji. Zaproponowany przez nas fizycznie spójny model został opublikowany w 2026 r. [B1], dlatego na obecnym etapie jego oddziaływanie nie może być jeszcze oceniane na podstawie liczby cytowań. Niemniej jednak znaczenie naszej pracy dla badań nad nadpromienistością zostało już zauważone w polskim środowisku fizycznym. W czasopiśmie Postępy Fizyki, tom 77, nr 1, praca [B1] została omówiona w dziale „Kwartał Badań", prezentującym wybrane istotne osiągnięcia polskich autorów [25].

4.4. Osiągnięcie C: Modelowanie atmosferycznych kanałów optycznych oraz ocena wydajności satelitarnych systemów dystrybucji klucza kryptograficznego

4.4.1. Elementy składające się na osiągnięcie C

Osiągnięcie C stanowi odrębne osiągnięcie naukowe Habilitanta, przedstawione jako znaczący wkład w rozwój dyscypliny nauki fizyczne. Osiągnięcie to zostało udokumentowane publikacjami [C1]–[C3], przedstawiającymi rozwój metod modelowania satelitarnych kanałów optycznych dla zastosowań w komunikacji optycznej.

[C1] A. Czerwinski, *Atmospheric modeling of free-space optical transmission: satellite downlinks and horizontal channels*. "Optical and Quantum Electronics" Tom **57** (Nr 10), 577 (2025). DOI: 10.1007/s11082-025-08505-5

IF (2025): - **IF (2024): 4.0** **Liczba cytowań: 19**

[C2] A. Czerwinski, M. Lasota, M. Jarzyna, M. Kucharczyk, M. Jachura, K. Banaszek, *Modeling Optical Key Distribution over a Satellite-to-Ground Link Under Weak Atmospheric Turbulence.* "IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics" Tom **32** (Nr 1), 3300113 (2026). DOI: 10.1109/JSTQE.2025.3597073

IF (2025): 4.5 **Liczba cytowań: 3**

[C3] A. Czerwinski, J.J. Borkowski, M. Wiśniewski, S. Haddadi, *Optical downlink modeling for low-earth-orbit and medium-earth-orbit satellites under atmospheric turbulence with a quantum-state-tomography use case.* "Physical Review A" Tom **114** (Nr 8), 022602 (2026). DOI: 10.1103/z9rv-yl1w

IF (2025): 3.0 **Liczba cytowań: 0**

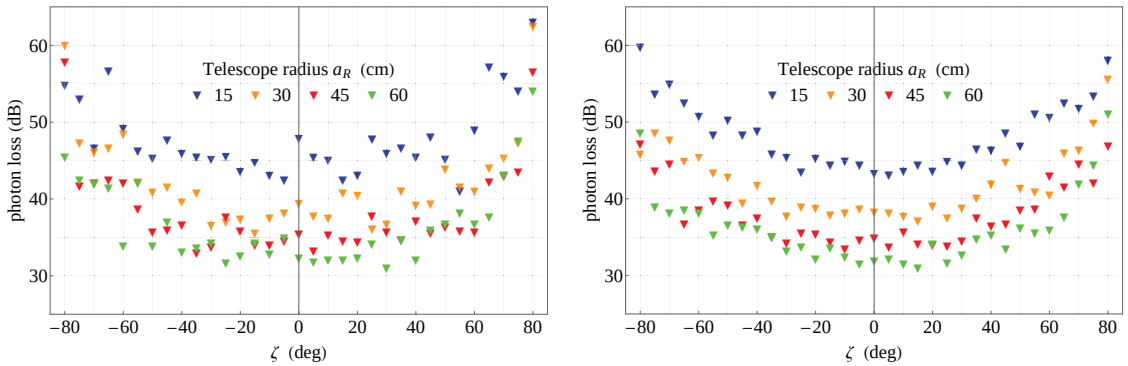
Osiągnięcie C zostało wyodrębnione jako oddzielne osiągnięcie naukowe, ponieważ dotyczy niezależnego problemu badawczego względem osiągnięcia A. Podczas gdy osiągnięcie A koncentruje się na rekonstrukcji i charakteryzacji stanów kwantowych na podstawie wyników pomiarów, osiągnięcie C poświęcone jest modelowaniu otwartego kanału transmisyjnego wykorzystywanego do przesyłania informacji kwantowej (bądź klasycznej) oraz analizie wpływu atmosfery na wydajność systemów komunikacji satelitarnej.

Prace [C1], [C2] oraz [C3] tworzą spójny ciąg badań obejmujący opracowanie i analizę modeli atmosferycznych kanałów optycznych, ocenę wpływu turbulencji atmosferycznych na transmisję sygnałów optycznych (klasycznych bądź kwantowych) oraz ilościową analizę wydajności protokołów dystrybucji klucza kryptograficznego realizowanych z wykorzystaniem łączy satelitarnych. Wyniki te stanowią istotny wkład w rozwój narzędzi wykorzystywanych do projektowania przyszłych systemów satelitarnej komunikacji kwantowej. Metody opracowane i zaimplementowane w ramach prac [C1], [C2] oraz [C3] pozwalają modelować budżet łącza satelitarnego jako proces stochastyczny, którego przebieg uzależniony jest od wielu zmiennych charakteryzujących kanał, w tym turbulentne własności atmosfery. W pracach [C1], [C2] oraz [C3] Kandydat pełnił rolę Autora Korespondującego i jednocześnie pierwszego autora z wiodącym merytorycznym wkładem w każdą pracę.

4.4.2. Merytoryczne ujęcie osiągnięcia C

Praca [C1] Praca [C1] stanowi punkt wyjścia dla osiągnięcia C i ma przede wszystkim charakter metodyczny. Jej celem nie było wprowadzenie nowych modeli teoretycznych, lecz opracowanie spójnej procedury numerycznego modelowania transmisji w atmosferycznych kanałach optycznych (ang. *free-space optical*, FSO) oraz demonstracja zakresu analiz, które można wykonywać z jej wykorzystaniem. Całkowitą transmitancję kanału opisano jako wynik współdziałania strat wewnętrznych układu, tłumienia atmosferycznego, strat dyfrakcyjnych oraz stochastycznych fluktuacji natężenia wywołanych turbulencjami atmosferycznymi. W implementacji wykorzystano m.in. profil Hufnagela–Valleya do opisu wysokościowej zależności C_n^2, wariancję Rytova i indeks scyntylacji oraz rozkład log-normalny do modelowania losowych fluktuacji odbieranej mocy.

Opracowany schemat zastosowano zarówno do satelitarnych łączy typu downlink, jak i do poziomych (horyzontalnych) kanałów FSO. Przeprowadzone symulacje pozwoliły m.in. przeanalizować wpływ średnicy apertury odbiorczej, szerokości początkowej wiązki, kąta zenitalnego i wysokości optycznej stacji naziemnej (ang. *optical ground station*, OGS) na budżet łącza. W szczególności pokazano, że zwiększenie wysokości OGS nie musi istotnie zmniejszać średnich strat transmisyjnych, lecz może wyraźnie ograniczać fluktuacje związane z turbulencjami, a tym samym poprawiać stabilność łącza. Porównanie stacji zlokalizowanych w Toruniu i w obserwatorium Chelmos stanowiło praktyczną ilustrację tego efektu. Przykład ten zaprezentowany został na Rysunku 11. Zaproponowana implementacja miała stanowić podstawę do dalszego sprzęgania modelu kanału z konkretnymi protokołami komunikacji optycznej i kwantowej, co zostało następnie rozwinięte w pracach [C2] i [C3].



(a) $H_{OGS} = 65$ m. (b) $H_{OGS} = 2340$ m.

Rysunek 11: Porównanie budżetu łącza (wyrażonego w dB) w dziedzinie kąta zenitalnego ζ dla Torunia (wysokość 65 m n.p.pm) oraz obserwatorium w Chelmos (wysokość 2340 m n.p.m). Kolory odpowiadają różnym promieniom teleskopów odbiorczych: 15 cm, 30 cm, 45 cm, and 60 cm. Rysunek oryginalnie opublikowany jako Fig. 5 w pracy [C1]

Praca [C1] została opublikowana 13 października 2025 r. i w ciągu pierwszego roku od publikacji uzyskała 19 niezależnych cytowań w pracach innych autorów, po wyłączeniu cytowań pochodzących od prac własnych. Wśród prac cytujących znajdują się również publikacje wydane w języku chińskim [26] i rosyjskim [27], co pokazuje, że praca [C1] wyszła poza obszar tradycyjnej anglojęzycznej literatury naukowej. Tak szybkie zainteresowanie wskazuje, że przedstawione podejście zostało zauważone przez międzynarodowe środowisko badawcze i może być wykorzystywane jako punkt odniesienia w dalszych badaniach dotyczących modelowania atmosferycznych kanałów optycznych i technologii satelitarnych.

Praca [C2] Drugim elementem osiągnięcia C są wyniki opublikowane w pracy [C2], w której opracowany aparat modelowania atmosferycznego kanału optycznego został wykorzystany do analizy wydajności protokołu *intensity modulation/direct detection optical key distribution* (IM/DD OKD) w satelitarnym łączu typu downlink. W pracy tej nie proponowaliśmy nowego protokołu OKD. Formalizm IM/DD OKD został zaczerpnięty z wcześniejszej literatury [28], natomiast zasadniczym celem pracy [C2] było połączenie tego protokołu z czasowo zmiennym, stochastycznym modelem atmosferycznego kanału optycznego i określenie, w jaki sposób fluktuacje transmitancji wpływają na ilość bezpiecznego klucza możliwego do wygenerowania podczas pojedynczego przelotu satelity. Wstępne wyniki związane z tą tematyką zostały zaprezentowane przeze mnie na konferencji "IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications", w dniach 11-13 października 2023 w Vancouver w Kanadzie [29].

Rozważano satelitę na kołowej niskiej orbicie okołoziemskiej o wysokości $H = 420$ km i parametrach odpowiadających orbicie ISS oraz transmisję do optycznej stacji naziemnej. Model kanału obejmował kilka niezależnych mechanizmów wpływających na transmitancję: tłumienie wynikające z absorpcji i rozpraszania w atmosferze, geometryczne straty związane z poszerzaniem wiązki, błędy wskazywania (*pointing errors*) oraz fluktuacje natężenia wywołane turbulencjami. Całkowitą chwilową transmitancję kanału opisano w postaci

$$\eta = \eta_{\mathrm{int}}\, \eta_{\mathrm{atm}}(\zeta)\, \eta_{\mathrm{st}}(z, x)\, \mathscr{L}, \tag{88}$$

gdzie η_{int} reprezentuje straty wewnętrzne układu, $\eta_{\mathrm{atm}}(\zeta)$ opisuje absorpcję i rozpraszanie atmosferyczne, $\eta_{\mathrm{st}}(z, x)$ uwzględnia straty geometryczne i błędy wskazywania, natomiast $\mathscr{L}$ jest zmienną losową opisującą fluktuacje natężenia spowodowane turbulencjami. Zarówno długość drogi optycznej, z, jak i tłumienie atmosferyczne zależą od położenia satelity względem optycznej stacji naziemnej, opisanego kątem zenitalnym ζ.

Wysokościową zależność parametru struktury współczynnika załamania $C_n^2(h)$ modelowano za pomocą profilu Hufnagela–Valleya, przy czym wpływ warunków wiatrowych uwzględniono za pośrednictwem profilu Buftona–Greenwooda. W warunkach słabych turbulencji siłę fluktuacji natężenia określano poprzez indeks Rytova

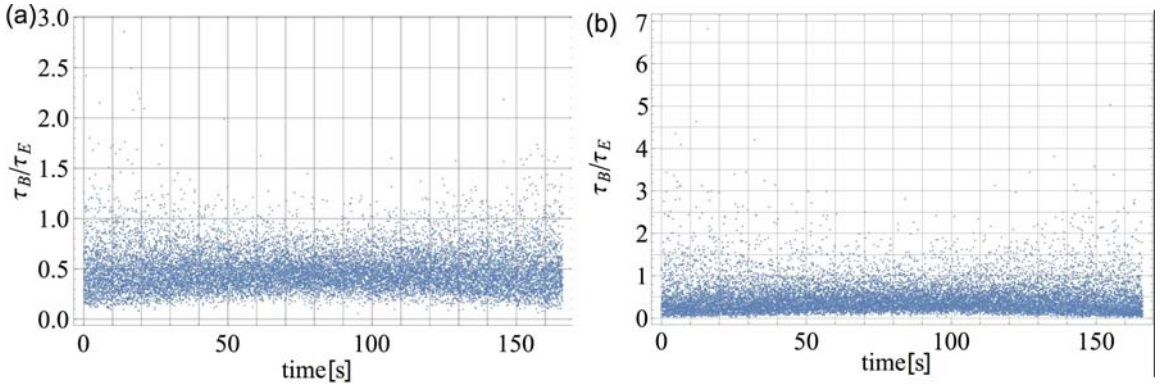
$$\sigma_I^2 \approx \sigma_R^2 = 2.25\, k^{7/6} (\sec\zeta)^{11/6} \int_{H_{\mathrm{OGS}}}^{H} C_n^2(z) (z - H_{\mathrm{OGS}})^{5/6}\, dz, \tag{89}$$

gdzie H_{OGS} oznacza wysokość stacji naziemnej n.p.m. Równanie (89) umożliwiało wyznaczanie rozkładu log-normalnego opisującego losowe zmiany odbieranej mocy.

Istotnym elementem metodologii było przejście od statycznego budżetu łącza do symulacji czasowej całego przelotu satelity. Na podstawie oszacowania czasu koherencji atmosfery przyjąłem, że w przedziałach o długości 1 ms warunki transmisji mogą być traktowane jako w przybliżeniu stałe. Symulacje czasowe fluktuacji mocy potwierdziły, że dla przyjętych parametrów zmiany natężenia w takim przedziale pozostają niewielkie (zob. Fig. 3 w pracy [C2] wraz z uzasadnieniem teoretycznym). Całkowity czas efektywnej komunikacji podczas zenitalnego przelotu satelity wynosił około 166 s, dzięki czemu cały przelot można było podzielić na kolejne przedziały czasowe, dla których niezależnie wyznaczano chwilową transmitancję kanału.

Kluczową konsekwencją takiego podejścia jest fakt, że parametry protokołu nie są optymalizowane dla jednej, uśrednionej wartości strat, lecz dla czasowo zmieniających się warunków transmisyjnych. Przykład otrzymanej dynamiki stosunku transmitancji kanału legalnego odbiorcy Boba do transmitancji kanału podsłuchującej Ewy przedstawiłem na

Rys. 12. W symulacjach przyjęto przy tym scenariusz celowo korzystny dla potencjalnego podsłuchującego: promień apertury teleskopu Boba wynosił 15 cm, natomiast dla Ewy rozważano wartości 20 cm oraz 30 cm. Ponadto w kanale Ewy nie uwzględniano losowych fluktuacji natężenia ani błędów wskazywania (jedynie starty deterministyczne wynikające z tłumienia i poszerzania poprzecznego przekroju wiązki).



Rysunek 12: Stosunek chwilowych transmitancji τ_B/τ_E dla zenitalnego przelotu satelity LEO, otrzymany dla scenariusza słabszego wiatru (a) oraz silniejszego wiatru (b). Teleskop Ewy ma promień 20 cm. Fluktuacje atmosferyczne powodują czasową zmienność warunków, w których realizowany jest protokół IM/DD OKD. Rysunek pochodzi z pracy [C2].

W kolejnym etapie stochastyczny model kanału został połączony z formalizmem generowania klucza w protokole IM/DD OKD. W przypadku bezpośredniego uzgadniania klucza (*direct reconciliation*) wydajność dla pojedynczego symbolu opisana jest zależnością

$$\mathcal{K}_d = \max\left\{p_{\text{raw}}\left[1 - f\,h(\epsilon) - I(A:E)\right], 0\right\}, \tag{90}$$

gdzie p_{raw} jest prawdopodobieństwem uzyskania bitu klucza surowego, ϵ oznacza prawdopodobieństwo błędu, $f \geq 1$ charakteryzuje efektywność procedury korekcji błędów, natomiast $I(A:E)$ jest informacją wzajemną pomiędzy nadawcą i podsłuchującym. Analogicznie, dla odwrotnego uzgadniania klucza (*reverse reconciliation*) otrzymuje się

$$\mathcal{K}_r = \max\left\{p_{\text{raw}}\left[1 - f\,h(\epsilon) - I(B:E)\right], 0\right\}. \tag{91}$$

Wpływ kanału propagacyjnego wchodzi do tych zależności poprzez głębokości modulacji odbieranych przez Boba i Ewę. Ich relację można zapisać za pomocą parametru określonego w pracy jako przewaga podsłuchującego,

$$\mathscr{E} = \left(\frac{\tau_E \sigma_B}{\tau_B \sigma_E}\right)^2. \tag{92}$$

W przypadku detekcji ograniczonej wyłącznie szumem śrutowym zależność ta upraszcza się do $\mathscr{E} = \tau_E/\tau_B$. W bardziej realistycznym modelu wprowadzono również szum termiczny detektorów, co umożliwiło zbadanie sytuacji, w których warunki detekcji Boba i Ewy są asymetryczne.

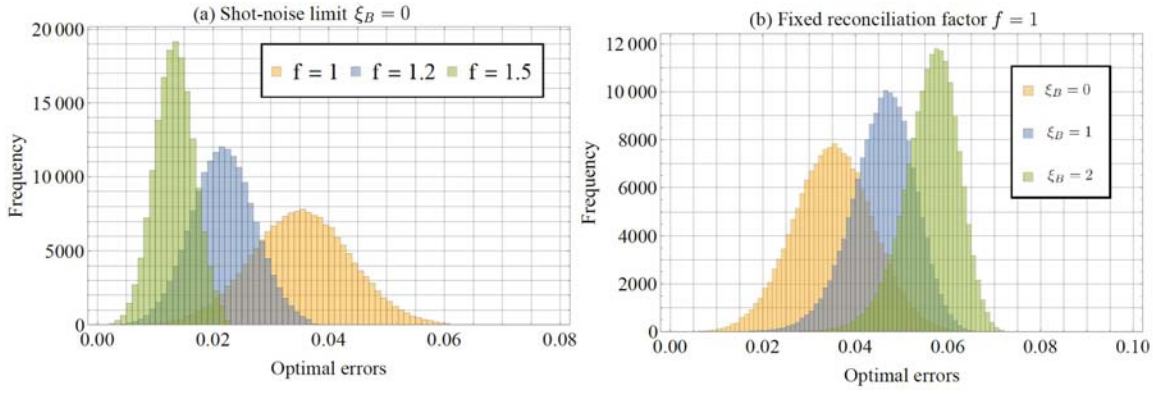
Dla każdego przedziału 1 ms optymalizowano próg dyskryminacji κ, maksymalizując chwilową wartość generowanego klucza. Następnie wyniki sumowano po całym czasie komunikacji, uzyskując wielkość nazwaną w pracy [C2] *secret key capacity*, czyli całkowitą długość bezpiecznego klucza możliwego do wygenerowania podczas jednego przelotu satelity.

Tak zdefiniowana wielkość była szczególnie użyteczna z punktu widzenia analizy misji satelitarnej, ponieważ pozwalała odejść od chwilowej szybkości generowania klucza i ocenić całkowity zasób uzyskiwany podczas pojedynczej sesji komunikacyjnej.

Wyniki wykazały silną zależność całkowitej długości klucza zarówno od warunków atmosferycznych, jak i parametrów odbiorników. Przykładowo, dla promienia apertury Ewy równego 20 cm, przy ograniczeniu obu odbiorników wyłącznie szumem śrutowym i idealnym uzgadnianiu ($f = 1$), w warunkach słabszego wiatru uzyskano 7.41 Gb dla uzgadniania bezpośredniego oraz 18.8 Gb dla uzgadniania odwrotnego (por. Tabelki I oraz II w pracy [C2]). Przy silniejszym wietrze wartości te spadły odpowiednio do 7.03 Gb oraz 17.2 Gb. Zwiększenie promienia apertury Eve do 30 cm znacząco pogarszało sytuację legalnego odbiorcy. Dla słabszego wiatru i $f = 1$ całkowita długość klucza zmniejszała się wówczas do 1.09 Gb w przypadku uzgadniania bezpośredniego i 2.69 Gb dla uzgadniania odwrotnego.

Jeszcze silniejszy wpływ wykazywał szum termiczny odbiorników. Symbolami, ξ_B oraz ξ_E oznaczyłem szum termiczny w relacji do szumu śrutowego odpowiednio w przypadku detektora Boba i Ewy. Dla $a_E = 30$ cm, $\xi_B = 1$, $\xi_E = 0$ oraz słabszego wiatru pojemność bezpiecznego klucza wynosiła już tylko 86.9 Mb dla uzgadniania bezpośredniego i 214 Mb dla uzgadniania odwrotnego przy $f = 1$. Wzrost parametru f, oznaczający pogorszenie efektywności procedury uzgadniania, prowadził do dalszego zmniejszania generowanego klucza. Wyniki te pokazały, że potencjalna wysoka wydajność IM/DD OKD jest ściśle związana nie tylko z własnościami kanału atmosferycznego, lecz również z jakością detekcji i efektywnością klasycznego przetwarzania końcowego.

Odrębnym elementem pracy była analiza rozkładów optymalnego prawdopodobieństwa błędu. Ponieważ próg dyskryminacji κ był optymalizowany niezależnie dla każdego przedziału czasowego, podczas całego przelotu otrzymywano rozkład wartości ϵ, a nie jedną ustaloną stopę błędów. Jak pokazano na Rys. 13, pogorszenie efektywności uzgadniania, czyli wzrost f, powodowało zwężenie rozkładu i jego przesunięcie w kierunku mniejszych wartości błędu. Wprowadzenie szumu termicznego prowadziło natomiast do przesunięcia optymalnego zakresu w kierunku większych wartości ϵ. Wynik ten pokazuje kompromis pomiędzy dopuszczalnym poziomem błędów, wydajnością kodów korekcji oraz maksymalizacją całkowitej długości klucza.



Rysunek 13: Rozkłady optymalnego prawdopodobieństwa błędu otrzymane w wyniku maksymalizacji ilości generowanego klucza dla kolejnych przedziałów czasowych przelotu satelity. Rysunek ilustruje wpływ efektywności uzgadniania oraz szumu termicznego na optymalny obszar pracy protokołu. Rysunek pochodzi z pracy [C2].

W pracy przeanalizowałem również znaczenie błądzenia wiązki (*beam wander*) w odniesieniu do błędów wskazywania. Dla rozważanego łącza satelitarnego na wysokości 420 km otrzymano $\sigma_p^2 = 17.84$ m^2, podczas gdy dla przyjętego scenariusza turbulencji oszacowana wariancja błądzenia wiązki wynosiła około 0.87 m^2. Wynik ten uzasadniał pominięcie efektu błądzenia wiązki w dalszej analizie dla rozpatrywanego łącza LEO, wskazując jednocześnie, że efekt ten może nabierać znaczenia dla krótszych łączy optycznych (zob. Appendix w pracy [C2]).

Mój indywidualny wkład do pracy [C2] był skoncentrowany przede wszystkim na warstwie modelowania numerycznego i połączeniu modelu atmosferycznego z formalizmem IM/DD OKD. Na podstawie dostępnej literatury opracowałem metodę modelowania atmosferycznego kanału transmisyjnego dla łącza satelita–Ziemia, przedstawioną w Sec. III pracy [C2], a następnie zaimplementowałem ją numerycznie w sposób umożliwiający generowanie chwilowych wartości transmitancji wraz z czasową ewolucją losowych efektów atmosferycznych. Odpowiadałem również za numeryczną implementację zależności opisujących generowanie klucza w protokole IM/DD OKD oraz sprzężenie tych zależności z fluktuującą transmitancją kanału. Na tej podstawie przeprowadziłem symulacje całego przelotu satelity, których wynikiem było wyznaczenie całkowitej długości klucza przedstawionej w Tabelach II i III pracy [C2].

Do mojego wkładu należała także analiza rozkładów błędów przedstawiona na Fig. 5 pracy [C2] oraz analiza porównawcza wpływu błądzenia wiązki, rozwinięta w Dodatku. Przygotowałem pierwszą wersję manuskryptu, uczestniczyłem następnie w jego rewizji i redakcji wraz z pozostałymi współautorami oraz pełniłem funkcję Autora Korespondującego, koordynując również przygotowanie odpowiedzi na uwagi recenzentów. Nie przypisuję sobie autorstwa samego protokołu IM/DD OKD, który pierwotnie opisany został w pracy [27]; mój zasadniczy wkład polegał na opracowaniu i implementacji sposobu jego analizy w realistycznym, czasowo zmiennym satelitarnym kanale atmosferycznym.

Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że praca [C2] została opublikowana w specjalnym wydaniu czasopisma „IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics" pt. *Advances in Free Space Laser Communications*. Tematyka pracy została dodatkowo wybrana jako motyw okładki tego numeru[8], co traktuję jako wyróżnienie wskazujące na znaczenie przedstawionego problemu dla aktualnych badań nad optyczną komunikacją w swobodnej przestrzeni. Grafikę wykorzystaną na okładce zaprojektował mgr Mateusz Kucharczyk, współautor pracy [C2]. Mój udział obejmował konsultowanie z nim koncepcji wizualnej i sposobu przełożenia głównej idei pracy na formę graficzną. Ponadto, jako Autor Korespondujący odpowiadałem za komunikację z redakcją w sprawach związanych z przygotowaniem okładki, w tym za uzgodnienie wymagań technicznych i redakcyjnych, dostosowanie materiału graficznego do wytycznych czasopisma oraz kwestie związane z prawami autorskimi.

W szerszej perspektywie praca [C2] stanowi drugi etap osiągnięcia C: model atmosferycznego kanału optycznego rozwijany w [C1] został tutaj powiązany z konkretnym systemem dystrybucji klucza, co umożliwiło ilościową ocenę wpływu zmiennych warunków atmosferycznych na wydajność całej satelitarnej sesji komunikacyjnej.

Metody i wyniki opisane w pracy [C2] stanowią ważny punkt odniesienia do dalszych prac nad rozwojem tematyki OKD, w tym praktycznych implementacji protokołu [30].

[8] `https://doi.org/10.1109/JSTQE.2026.3655516`, (dostęp 24.10.2026).

Praca [C3] Trzecim i zarazem zamykającym elementem osiągnięcia C jest praca [C3], w której rozwinięto metodologię modelowania satelitarnych kanałów optycznych oraz zastosowano ją do analizy transmisji z satelitów znajdujących się na niskiej i średniej orbicie okołoziemskiej. W odróżnieniu od pracy [C2], skoncentrowanej na wydajności konkretnego protokołu dystrybucji klucza, praca [C3] miała bardziej ogólny charakter koncepcyjny. Jej celem było określenie, w jaki sposób podstawowe mechanizmy strat i fluktuacji atmosferycznych wpływają na budżet satelitarnego łącza optycznego, a następnie pokazanie, jak otrzymany model może zostać bezpośrednio wykorzystany do oceny wykonalności konkretnego zastosowania kwantowego. Jako przykład takiego zastosowania wybrano tomografię stanów kwantowych traktowaną jako narzędzie bieżącej weryfikacji jakości zasobów kwantowych generowanych na pokładzie satelity i przesyłanych do optycznej stacji naziemnej.

Punktem wyjścia było opracowanie spójnego modelu całkowitej transmitancji łącza satelita–Ziemia. Transmitancję przedstawiono jako iloczyn niezależnych czynników opisujących główne mechanizmy strat, w sposób analogiczny do wzoru (88) wykorzystanego w pracy [C2].

W przypadku strat wynikających z absorpcji i rozpraszania wykorzystano wysokościowo zależny model atmosfery, natomiast siłę turbulencji opisano za pomocą parametru struktury współczynnika załamania $C_n^2(h)$, wyznaczanego na podstawie modelu Hufnagela–Valleya. Fluktuacje intensywności charakteryzowano poprzez indeks scyntylacji, którego przybliżona postać dla transmisji typu downlink w reżimie słabych turbulencji może zostać zapisana zgodnie z równaniem (89).

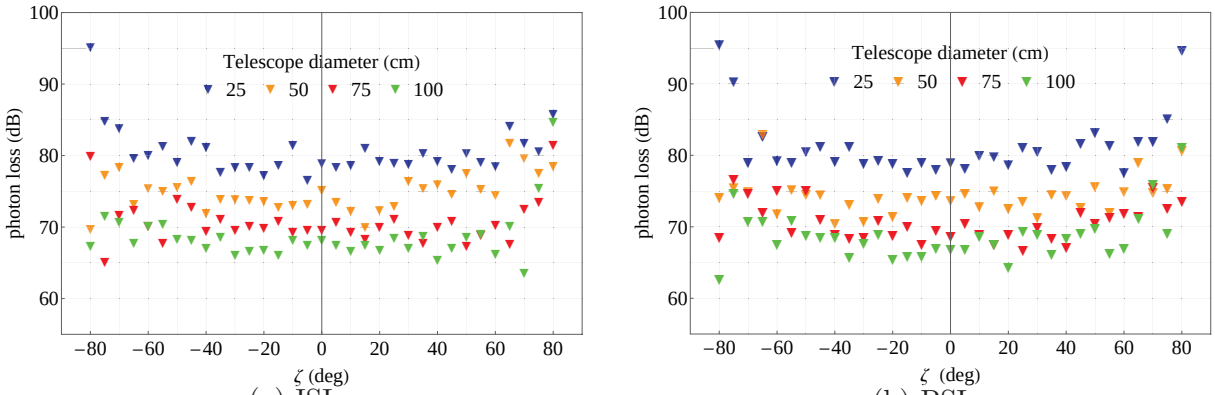
Istotnym rozszerzeniem analizy było jawne uwzględnienie efektu uśredniania aperturowego (ang. *aperture averaging*). Indeks scyntylacji intensywności (ang. *intensity scintillation index*, ISI), oznaczany σ_I^2, opisuje lokalne fluktuacje intensywności dla odbiornika punktowego, natomiast rzeczywisty teleskop integruje promieniowanie na skończonej powierzchni apertury. W konsekwencji część lokalnych fluktuacji ulega uśrednieniu, co prowadzi do indeksu scyntylacji mocy (ang. *power scintillation idex*, PSI), σ_P^2. Relacja pomiędzy wariancją mocy odbieranej przez rzeczywisty teleskop a wariancją lokalnej intensywności prowadzi do definicji współczynnika uśredniania aperturowego

$$\mathrm{Av}(D) = \frac{\sigma_P^2}{\sigma_I^2}, \tag{93}$$

gdzie D oznacza średnicę apertury odbiorczej. Wzrost średnicy teleskopu prowadzi do zmniejszenia wartości $\mathrm{Av}(D)$, a tym samym do ograniczenia wpływu turbulencji na chwilową moc odbieranego sygnału. Istnieje kilka przybliżonych wzorów pozwalających oszacować $\mathrm{Av}(D)$, które omówione zostały w pracy [C3].

W ramach pracy przeprowadzono porównawcze symulacje dla satelity LEO na wysokości 420 km oraz satelity MEO na wysokości 20 200 km. Analizowano apertury odbiorcze o średnicach od 25 do 100 cm oraz zakres kątów zenitalnych od $-80°$ do $+80°$. Wyniki pokazały istotnie odmienny charakter obu reżimów orbitalnych. Dla satelitów LEO uśrednianie aperturowe może skutecznie zmniejszać amplitudę fluktuacji wywołanych turbulencją, szczególnie przy większych średnicach teleskopu. Dla satelitów MEO efekt ten jest znacznie słabszy, ponieważ bardzo duża długość drogi propagacji ogranicza skuteczność uśredniania przestrzennego. Rys. 14 ilustruje praktyczne znaczenie tego efektu dla satelity MEO, a pełne porównanie wraz z analizą znajduje się w pracy [C3].

Drugą warstwą pracy [C3] było zastosowanie opracowanego modelu kanału do konkretnego problemu z zakresu technologii kwantowych. Zaproponowano scenariusz,



(a) ISI (b) PSI

Rysunek 14: Budżet łącza przy transmisji typu downlink dla satelity MEO w funkcji kąta zenitalnego, przy modelowaniu fluktuacji turbulencyjnych za pomocą (a) indeksu scyntylacji intensywności ISI oraz (b) indeksu scyntylacji mocy PSI, uwzględniającego efekt uśredniania aperturowego. Rysunki pochodzą z pracy [C3].

w którym źródło znajdujące się na satelicie generuje stany kwantowe zakodowane w polaryzacji, a ich jakość jest okresowo weryfikowana na Ziemi za pomocą tomografii stanów kwantowych. Tomografia pełni w tym przypadku funkcję diagnostyczną: nie jest celem samej transmisji, lecz umożliwia kontrolę jakości zasobu kwantowego, który może następnie zostać wykorzystany w protokołach komunikacji lub sieciach informacji kwantowej.

Do rekonstrukcji kubitów przyjęto pomiar typu SIC-POVM składający się z czterech operatorów $\{M_k\}_{k=1}^4$. Dla każdego ustawienia pomiarowego źródło emituje wiązkę złożoną z $\mathcal{N}$ identycznie przygotowanych fotonów. Kluczowym elementem łączącym model kanału optycznego z tomografią jest zależność

$$\widetilde{\mathcal{N}} = \eta(\zeta)\,\mathcal{N}, \tag{94}$$

gdzie $\widetilde{\mathcal{N}}$ oznacza liczbę fotonów docierających do odbiornika. Tym samym geometria przelotu satelity, tłumienie, dyfrakcja i turbulencje zostają bezpośrednio odwzorowane na ilość danych dostępnych dla rekonstrukcji stanu kwantowego.

Zarejestrowane liczby fotonów modelowano przy użyciu statystyki Poissona:

$$m_k \sim \mathrm{Pois}\Big(\Big\lceil \widetilde{\mathcal{N}}\,\mathrm{Tr}(M_k\rho_{\mathrm{in}})\Big\rfloor\Big)\,. \tag{95}$$

W konsekwencji względne znaczenie szumu śrutowego rośnie wraz ze spadkiem transmitancji kanału. Ponieważ sygnał rośnie proporcjonalnie do $\widetilde{\mathcal{N}}$, podczas gdy odchylenie standardowe fluktuacji Poissona rośnie jak $\sqrt{\widetilde{\mathcal{N}}}$, otrzymuje się przybliżoną zależność

$$\mathrm{SNR} \propto \sqrt{\widetilde{\mathcal{N}}}. \tag{96}$$

Oznacza to, że wpływ strat satelitarnych na QST nie sprowadza się jedynie do zmniejszenia liczby zarejestrowanych fotonów, lecz bezpośrednio pogarsza statystyczną jakość rekonstrukcji.

Macierz gęstości rekonstruowano metodą najmniejszych kwadratów, minimalizując funkcję

$$f_{\mathrm{LS}} = \sum_{k=1}^{4}(e_k - m_k)^2, \tag{97}$$

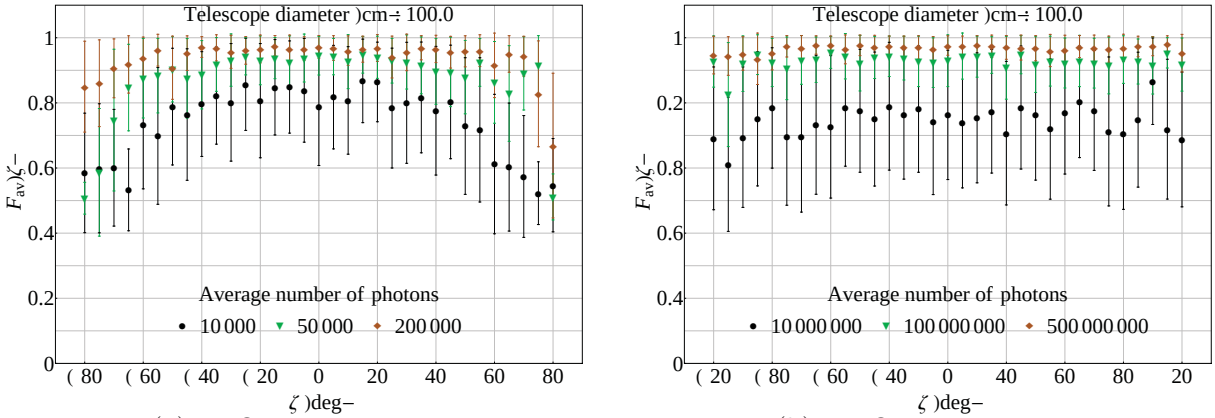
gdzie e_k oznacza oczekiwany wynik modelowany zakładając ogólą postać nieznanej macierzy gęstości, według parametryzacji Cholesky'ego, która zapewnia hermitowskość, dodatnią półokreśloność i jednostkowy ślad rekonstruowanego stanu. Jako miarę jakości rekonstrukcji zastosowano wierność Uhlmanna–Jozsy,

$$F(\rho_{\text{in}}, \rho_x) = \left[\mathrm{Tr}\sqrt{\sqrt{\rho_{\text{in}}}\,\rho_x\,\sqrt{\rho_{\text{in}}}}\right]^2 . \tag{98}$$

Dla każdego rozważanego kąta zenitalnego wykonywano rekonstrukcję dla zespołu 220 stanów wejściowych, wyznaczając średnią wierność rekonstrukcji oraz jej odchylenie standardowe.

Wyniki symulacji pokazały wyraźną różnicę pomiędzy scenariuszami LEO i MEO. Dla LEO umiarkowane straty transmisyjne pozwalają na uzyskanie wysokiej jakości rekonstrukcji przy realistycznych liczbach fotonów, a pomiędzy średnicą teleskopu i wymaganym budżetem fotonowym istnieje wyraźny kompromis. Dla apertur 75–100 cm wysoką jakość rekonstrukcji można osiągać przy znacznie mniejszych ensemble fotonów niż dla apertur 25–50 cm. Zwiększenie apertury pozwala więc nie tylko zebrać większą liczbę fotonów, lecz również skrócić czas niezbędny do wykonania pojedynczej procedury tomograficznej.

Dla MEO sytuacja jest jakościowo odmienna. Wskutek znacznie większych strat konieczne stają się wiązki rzędu 10^7—5×10^8 fotonów, a małe apertury pozostają niewystarczające nawet przy bardzo dużych budżetach fotonowych. Dopiero dla średnic około 75–100 cm pojawia się zakres parametrów umożliwiający uzyskanie użytecznej rekonstrukcji.



(a) LEO, $D = 100$ cm (b) MEO, $D = 100$ cm

Rysunek 15: Przykładowe wyniki tomografii stanów kwantowych dla satelitarnych łączy typu downlink w warunkach pomijalnego promieniowania tła: (a) satelita LEO na wysokości 420 km oraz (b) satelita MEO na wysokości 20 200 km. Przedstawiono średnią wierność rekonstrukcji wraz z odchyleniem standardowym próby w funkcji kąta zenitalnego dla różnych budżetów fotonowych. Rysunki pochodzą z pracy [C3], wykresy wykonał współautor, mgr Jakub J. Borkowski, na podstawie opracowanej przeze mnie metodologii.

W celu zwiększenia realizmu rozszerzyłem model również o fotony tła pochodzące z promieniowania nieba. Oczekiwaną liczbę takich fotonów w oknie detekcyjnym opisałem zależnością

$$N_{\text{bg}} = \frac{\lambda}{hc}\, B_\lambda\, \tau\, \Delta\lambda\, \Omega_{\text{FOV}}\, A_{\text{tel}}\, \eta_{\text{int}}, \tag{99}$$

gdzie B_λ jest spektralną luminancją nieba, τ oznacza czas akwizycji, $\Delta\lambda$ szerokość filtra optycznego, Ω_{FOV} pole widzenia odbiornika, a A_{tel} powierzchnię apertury teleskopu. Analiza

ta pokazała, że wpływ promieniowania tła staje się szczególnie istotny w sytuacji, gdy do odbiornika dociera niewielka liczba fotonów sygnałowych. Dotyczy to przede wszystkim małych apertur, dużych kątów zenitalnych oraz łączy MEO. Zwiększenie apertury i budżetu fotonowego może częściowo kompensować ten efekt, ale zależność nie jest monotonicznie korzystna: większa apertura zbiera również większą ilość promieniowania tła, natomiast zwiększenie liczby fotonów generowanych przez źródło wiąże się z wydłużeniem czasu detekcji i w konsekwencji gromadzeniem większej liczby przypadkowych zliczeń.

Mój indywidualny wkład do pracy [C3] obejmował opracowanie koncepcji i planu badania oraz całej warstwy metodologicznej związanej z modelowaniem efektów atmosferycznych w satelitarnej transmisji optycznej. Napisałem w całości rozdział *II. Atmospheric Channel Modeling for the Optical Downlink*, a następnie zaimplementowałem numerycznie modele atmosferyczne i przeprowadziłem symulacje budżetu łącza dla satelitów LEO i MEO, w tym obliczenia przedstawione na Fig. 1–4 pracy. Byłem również autorem rozdziału *III. Results of Numerical Simulations on Atmospheric Transmittance*.

W części dotyczącej zastosowania kwantowego opracowałem metodologię rozwiązania problemu tomografii stanów generowanych przez źródło satelitarne oraz napisałem podrozdział *IV.A. QST as a Satellite-Based Quantum Use Case*. Opracowałem też metodologię rozszerzającą problem tomografii kwantowej o fotony promieniowania atmosfery, modelowane zgodnie z równaniem (99). Numeryczna implementacja procedury tomograficznej, przeprowadzenie właściwych obliczeń oraz przygotowanie i prezentacja wyników QST były zadaniem mgr. Jakuba J. Borkowskiego. Mgr Maciej Wiśniewski uczestniczył natomiast przede wszystkim w analizie uzyskanych wyników oraz przygotowaniu ich interpretacji i wniosków. Moja rola obejmowała koordynowanie pracy zespołu i mentoring obu młodszych współautorów. Pełniłem również funkcję Autora Korespondującego i uczestniczyłem w przygotowaniu odpowiedzi na uwagi recenzentów.

Praca [C3] stanowi naturalne domknięcie osiągnięcia C, ponieważ pokazuje przejście od modelowania samego kanału atmosferycznego, poprzez analizę budżetu satelitarnego łącza optycznego, do oceny działania konkretnej technologii kwantowej w warunkach rzeczywistej transmisji. Jednocześnie praca ta tworzy wyraźną klamrę pomiędzy osiągnięciami C i A. Tomografia stanów kwantowych, która w osiągnięciu A była jednym z głównych przedmiotów moich własnych badań metodologicznych, numerycznych i implementacyjnych, została w [C3] wykorzystana jako narzędzie do charakteryzacji zasobów przesyłanych przez modelowany kanał satelitarny. Zmieniła się przy tym moja rola w realizacji badań. W pracach składających się na wcześniejsze etapy osiągnięcia A w większości samodzielnie rozwijałem i implementowałem metody rekonstrukcji stanów oraz wykonywałem zasadniczą część analiz numerycznych. W [C3] wykorzystałem zdobyte wcześniej doświadczenie do zaprojektowania metodologii problemu, a następnie wdrożenia do tej tematyki dwóch młodszych badaczy, którym powierzyłem realizację kolejnych etapów analizy. W tym sensie praca [C3] dokumentuje nie tylko połączenie dwóch rozwijanych przeze mnie kierunków badawczych — tomografii stanów kwantowych i modelowania satelitarnych kanałów optycznych — lecz również przejście od roli bezpośredniego wykonawcy badań do roli autora koncepcji, koordynatora i mentora rozwijającego samodzielność naukową młodszych współpracowników.

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

Istotna aktywność naukowa realizowana na Uniwersytecie Warszawskim

od 01.12.2022 do 31.12.2023

Uniwersytet Warszawski
Centrum Nowych Technologii
Centrum Optycznych Technologii Kwantowych
Laboratorium Technologii Kwantowych
stanowisko: adiunkt

W okresie od **01.12.2022 do 31.12.2023** byłem zatrudniony na stanowisku adiunkta w Centrum Nowych Technologii Uniwersytetu Warszawskiego, gdzie prowadziłem działalność naukową w grupie kierowanej przez prof. Konrada Banaszka w ramach projektu „Quantum Optical Technologies (QOT) / Kwantowe Technologie Optyczne", finansowanego w ramach programu Międzynarodowe Agendy Badawcze realizowanego przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej (MAB 4/2017). Moje stanowisko było stanowiskiem typu *post-doc* zaplanowanym w ramach wskazanego projektu.

Zatrudnienie na Uniwersytecie Warszawskim miało charakter badawczy i umożliwiło mi rozwinięcie nowego kierunku działalności naukowej związanego z modelowaniem optycznych kanałów satelita–Ziemia oraz zastosowaniem takich modeli do analizy protokołów bezpiecznej komunikacji. Głównym przedmiotem prowadzonych przeze mnie badań była Optyczna Dystrybucja Klucza (ang. *Optical Key Distribution*, OKD) realizowana za pośrednictwem atmosferycznego kanału optycznego. Podjęta tematyka badawcza była zdecydowanie różna od prac realizowanych w okresie mojego zatrudnienia na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu we wcześniejszym okresie, tj. od 01.12.2019 do 30.11.2022.

Pierwszym etapem prac było opracowanie modelu numerycznego umożliwiającego symulowanie wpływu turbulencji atmosferycznych na transmisję sygnału optycznego z satelity do stacji naziemnej. Model ten został następnie połączony z formalizmem protokołu OKD w celu wyznaczania parametrów transmisji oraz szacowania długości bezpiecznego klucza możliwego do ustanowienia podczas połączenia satelita–Ziemia. Badania te wymagały połączenia zagadnień z zakresu optyki atmosferycznej, modelowania propagacji światła, komunikacji satelitarnej oraz fizycznych metod dystrybucji klucza.

Istotnym rezultatem działalności naukowej prowadzonej w Centrum Nowych Technologii UW jest publikacja [C2]:

A. Czerwinski, M. Lasota, M. Jarzyna, M. Kucharczyk, M. Jachura, K. Banaszek, *Modeling Optical Key Distribution over a Satellite-to-Ground Link Under Weak Atmospheric Turbulence*, „IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics" Tom **32** (Nr 1), 3300113 (2026), DOI: 10.1109/JSTQE.2025.3597073.

Publikacja została włączona do osiągnięcia C opisanego w części 4. Autoreferatu. Praca ukazała się w „IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics" w wydaniu specjalnym „Advances in Free Space Laser Communications". Została również wybrana na okładkę tego

wydania. Publikacja stanowi bezpośredni rezultat linii badawczej realizowanej przeze mnie podczas zatrudnienia na Uniwersytecie Warszawskim.

Dodatkowo wyniki badań prowadzonych na UW prezentowałem również podczas międzynarodowej konferencji:

IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 11 –13 października 2023, Vancouver, Canada,

gdzie zaprezentowałem poster: *Optical key distribution modeling via a satellite downlink under weak atmospheric turbulence*. Czynny udział w międzynarodowej i prestiżowej konferencji naukowej również stanowi formę „istotnej aktywności naukowej".

Udział w konferencji umożliwił przedstawienie rezultatów badań realizowanych na Uniwersytecie Warszawskim międzynarodowemu środowisku specjalistów zajmujących się optycznymi systemami komunikacji kosmicznej i satelitarnej.

Ponadto w okresie zatrudnienia na UW rozwijałem również współpracę międzynarodową z badaczami z Semnan University w Iranie. Jednym z jej rezultatów była publikacja:

S. Haddadi, M. Ghominejad, A. Czerwinski, *Quantum dense coding with gravitational cat states.* „Communications in Theoretical Physics" Tom **76** (Nr 3), 035101 (2024), DOI: 10.1088/1572-9494/ad23da.

Praca została opublikowana z afiliacją Uniwersytetu Warszawskiego i została wykazana jako publikacja [D14] w części 7.1.1. Autoreferatu w ramach dodatkowego dorobku naukowego. Stanowi ona dodatkowy przykład aktywności naukowej realizowanej przeze mnie podczas zatrudnienia poza Uniwersytetem Mikołaja Kopernika w Toruniu.

Znaczenie działalności naukowej prowadzonej na Uniwersytecie Warszawskim

Okres zatrudnienia w Centrum Nowych Technologii Uniwersytetu Warszawskiego stanowił istotny etap mojego rozwoju naukowego po uzyskaniu stopnia doktora. Nie była to krótkotrwała wizyta ani okazjonalna współpraca z innym ośrodkiem, lecz trwające trzynaście miesięcy zatrudnienie badawcze na drugiej uczelni, obejmujące realizację samodzielnie powierzonych zadań badawczych, pracę w nowym zespole naukowym oraz uzyskanie konkretnych rezultatów w postaci publikacji i prezentacji konferencyjnej.

Szczególne znaczenie tego okresu polega również na trwałym wpływie na dalszy rozwój mojego profilu naukowego. Podczas pracy na Uniwersytecie Warszawskim rozszerzyłem wcześniejsze zainteresowania związane z informacją i komunikacją kwantową o problematykę modelowania atmosferycznych kanałów optycznych oraz komunikacji satelitarnej. Kierunek ten był następnie przeze mnie samodzielnie rozwijany i stał się podstawą osiągnięcia C przedstawionego w części 4. Autoreferatu. Zatrudnienie na UW nie stanowiło zatem jedynie czasowej zmiany miejsca prowadzenia badań, lecz doprowadziło do wykształcenia nowej, trwałej linii badawczej obecnej w moim późniejszym dorobku.

W mojej ocenie przedstawiona działalność jednoznacznie dokumentuje istotną aktywność naukową realizowaną w uczelni innej niż moja macierzysta jednostka naukowa. Obejmowała ona długoterminowe zatrudnienie badawcze, realizację określonego programu badań, współpracę z nowym zespołem naukowym, uzyskanie publikowanych wyników oraz ich prezentację na forum międzynarodowym.

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

6.1. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych

od 01.06.2026 do chwili obecnej **Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu**

Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej

Od 01.06.2026 jestem zatrudniony na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu na stanowisku adiunkta w grupie pracowników badawczo-dydaktycznych. W związku z charakterem stanowiska realizuję obowiązki dydaktyczne w wymiarze proporcjonalnym do wymiaru zatrudnienia. W roku akademickim 2026/2027 zostały mi powierzone zajęcia z przedmiotu „Matematyka 2", których realizacja przewidziana jest w semestrze letnim, począwszy od 22 lutego 2027 r.

Niezależnie od prowadzenia zajęć dydaktycznych, w 2026 r. aktywnie uczestniczyłem w pracach podejmowanych na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UMK nad rozwojem i unowocześnianiem oferty kształcenia. Moje zaangażowanie koncentrowało się w szczególności na wprowadzaniu do programów studiów treści związanych z teorią informacji, technologiami kwantowymi oraz komunikacją satelitarną. W ramach tych działań uczestniczyłem w przygotowaniu dwóch nowych elementów programu kształcenia.

- **Opracowanie koncepcji przedmiotu „Metody matematyczne w teorii informacji" dla kierunku fizyka, studia pierwszego stopnia, ścieżka kształcenia „Technologie kwantowe"**

Opracowałem koncepcję nowego przedmiotu, którego założeniem jest przedstawienie wybranych narzędzi matematycznych, w szczególności elementów algebry liniowej i rachunku prawdopodobieństwa, w bezpośrednim kontekście ich zastosowania w klasycznej i kwantowej teorii informacji. Takie podejście ma umożliwić studentom poznawanie metod matematycznych równolegle z ich zastosowaniem do problemów istotnych dla współczesnych technologii informacyjnych i kwantowych.

Przedmiot został zaplanowany w wymiarze 30 godzin wykładu oraz 30 godzin ćwiczeń. Mój wkład obejmował przygotowanie skróconego i pełnego opisu przedmiotu, opracowanie szczegółowej listy zagadnień przewidzianych do realizacji podczas wykładów i ćwiczeń oraz sformułowanie efektów uczenia się. Przedmiot został następnie włączony do programu kształcenia ścieżki „Technologie kwantowe", a jego pierwsza realizacja planowana jest w roku akademickim 2027/2028.

Poza przygotowaniem własnego przedmiotu, uczestniczyłem w dyskusjach nad ogólną koncepcją i układem programu dla ścieżki kształcenia „Technologie kwantowe."

- **Opracowanie sylabusa laboratorium do przedmiotu „Satelitarna komunikacja optyczna i kwantowa" dla kierunku Automatyka i robotyka, studia drugiego stopnia, specjalność „Technologie Kosmiczne"**

Drugim obszarem mojego zaangażowania był udział w przygotowaniu programu kształcenia dla nowej specjalności „Technologie Kosmiczne” na kierunku Automatyka i robotyka. W ramach prac nad uruchomieniem specjalności zadeklarowałem gotowość do współprowadzenia przedmiotu „Satelitarna komunikacja optyczna i kwantowa”. Za część wykładową przedmiotu odpowiada dr hab. Piotr Kolenderski, prof. UMK, natomiast mnie powierzono przygotowanie koncepcji i programu zajęć laboratoryjnych towarzyszących wykładowi.

Założeniem opracowywanego przeze mnie laboratorium jest połączenie podstaw teoretycznych komunikacji optycznej i kwantowej z praktycznymi kompetencjami numerycznymi. Zajęcia mają obejmować implementację w języku Python wybranych modeli i protokołów, w tym modeli opisujących wpływ atmosfery na transmisję optyczną oraz wybranych zagadnień związanych z komunikacją kwantową. We współpracy z dr hab. Piotrem Kolenderskim, prof. UMK, przygotowałem kompleksowy sylabus przedmiotu, obejmujący szczegółową tematykę zajęć oraz odpowiadające jej efekty uczenia się.

Wcześniejsza działalność dydaktyczna na UMK

Charakter mojego zatrudnienia w poprzednich latach wpływał na zakres formalnych obowiązków dydaktycznych. Podczas zatrudnienia na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu w latach 2019–2022 oraz 2024–2025, a także na Uniwersytecie Warszawskim w latach 2022–2023, byłem każdorazowo zatrudniony na stanowisku adiunkta w grupie pracowników badawczych, bez obowiązkowego pensum dydaktycznego.

Pomimo braku formalnego obowiązku prowadzenia zajęć, w roku akademickim 2021/2022 dobrowolnie podjąłem się realizacji 30 godzin zajęć w ramach przedmiotu „Fizyka-wyrównanie”. Zajęcia odbywały się w semestrze zimowym i były skierowane do studentów pierwszego roku i miały na celu uzupełnienie oraz uporządkowanie podstawowej wiedzy z fizyki i matematyki niezbędnej do dalszego studiowania przedmiotów akademickich.

od 01.03.2020 do chwili obecnej **Wyższa Szkoła Humanistyczno-Ekonomiczna w Brzegu**

Studia podyplomowe: nauczyciel fizyki

Od 01.03.2020 współpracuję z Wyższą Szkołą Humanistyczno-Ekonomiczną w Brzegu w zakresie organizacji i realizacji kształcenia na studiach podyplomowych na kierunku „Nauczyciel fizyki”. Studia są adresowane do nauczycieli innych przedmiotów, którzy chcą rozszerzyć swoje kwalifikacje zawodowe o możliwość nauczania fizyki.

W ramach współpracy odpowiadam za cztery przedmioty ujęte w programie studiów:

- Fizyka fal z elementami akustyki,
- Fizyka atomu z elementami mechaniki kwantowej,
- Elementy fizyki jądrowej,
- Podstawy fizyki z elementami fizyki relatywistycznej.

W odniesieniu do każdego z przedmiotów mój zakres obowiązków obejmuje:

- opracowanie zakresu tematycznego i listy zagadnień;

- przygotowanie autorskich materiałów dydaktycznych udostępnianych na platformie edukacyjnej, w tym skryptów i prezentacji;
- opracowanie testów zaliczeniowych;
- ocenę prac i wyników zaliczeń uczestników studiów podyplomowych;
- bieżące konsultacje merytoryczne oraz odpowiadanie na pytania uczestników studiów.

Współpraca ma charakter ciągły i obejmuje zarówno przygotowanie treści dydaktycznych, jak i ich późniejsze wykorzystanie w procesie kształcenia i oceny uczestników studiów podyplomowych.

02.05.2019 – 30.09.2024 **Akademia Nauk Stosowanych Wincentego Pola w Lublinie**

(dawniej: Wyższa Szkoła Społeczno – Przyrodnicza im. Wincentego Pola w Lublinie)

W latach 2019–2024 współpracowałem z Akademią Nauk Stosowanych Wincentego Pola w Lublinie (dawna nazwa: Wyższa Szkoła Społeczno-Przyrodnicza im. Wincentego Pola w Lublinie) w zakresie organizacji i realizacji kształcenia na kwalifikacyjnych studiach podyplomowych dla nauczycieli. Moje zaangażowanie obejmowało kilka uzupełniających się obszarów działalności dydaktycznej:

- pełnienie roli wiodącego wykładowcy na studiach podyplomowych „Fizyka z astronomią dla nauczycieli" oraz prowadzenie doraźnych zastępstw dydaktycznych na kierunkach „Matematyka dla nauczycieli", „Przyroda dla nauczycieli" i „Geografia dla nauczycieli";
- prowadzenie wykładów o charakterze ogólnopedagogicznym i dydaktycznym, realizowanych wspólnie dla słuchaczy różnych kierunków nauczycielskich;
- pełnienie funkcji promotora prac końcowych;
- pełnienie funkcji opiekuna dydaktyczno-merytorycznego (tutora) dla słuchaczy kierunków „Fizyka z astronomią dla nauczycieli" oraz „Matematyka dla nauczycieli" w roku akademickim 2019/2020;
- pełnienie funkcji koordynatora regionalnego i egzaminatora w Ośrodku Studiów Podyplomowych w Toruniu oraz Bydgoszczy w roku akademickim 2019/2020 oraz 2020/2021.

Prowadzenie zajęć dydaktycznych

Na kierunku „Fizyka z astronomią dla nauczycieli" odpowiadałem za realizację następujących przedmiotów:

- Kinematyka i dynamika,
- Drgania i fale mechaniczne. Fale akustyczne,
- Magnetyzm i indukcja elektromagnetyczna.

W odniesieniu do każdego z tych przedmiotów mój zakres obowiązków obejmował:

- przygotowanie sylabusa oraz określenie zakresu merytorycznego zajęć;
- przygotowanie i wykorzystanie autorskich prezentacji oraz materiałów dydaktycznych;

- prowadzenie zajęć zgodnie z przyjętym programem;
- opracowanie zagadnień egzaminacyjnych;
- weryfikację osiągnięcia zakładanych efektów uczenia się oraz ocenę wyników słuchaczy.

Promotorstwo prac końcowych

Szczególnie istotnym elementem mojej działalności dydaktycznej było pełnienie funkcji promotora prac końcowych przygotowywanych przez słuchaczy studiów podyplomowych. W Akademii Nauk Stosowanych Wincentego Pola jednym z wymagań do zakończenia kształcenia było przygotowanie indywidualnej pracy końcowej pod opieką promotora.

Pełnienie tej funkcji wymagało systematycznej, indywidualnej współpracy ze słuchaczem i obejmowało w szczególności:

- konsultacje dotyczące wyboru i sformułowania tematu pracy końcowej;
- pomoc w określeniu zakresu i struktury pracy;
- wsparcie w doborze literatury naukowej oraz innych źródeł;
- konsultowanie kolejnych etapów przygotowania pracy;
- ocenę pierwszej wersji tekstu oraz przekazanie szczegółowych uwag merytorycznych i redakcyjnych;
- ocenę ostatecznej wersji pracy oraz przygotowanie pisemnej recenzji stanowiącej element dokumentacji związanej z ukończeniem studiów.

W całym okresie współpracy z Akademią Nauk Stosowanych Wincentego Pola w Lublinie byłem promotorem **łącznie 140 prac końcowych**, w tym:

- „Fizyka z astronomią dla nauczycieli" – **98 prac**;
- „Matematyka dla nauczycieli" – **37 prac**;
- „Chemia dla nauczycieli" – **2 prace**;
- „Informatyka dla nauczycieli" – **2 prace**;
- „Edukacja przedszkolna i wczesnoszkolna" – **1 praca**.

Tak duża liczba prac końcowych pokazuje moje wieloletnie doświadczenie w indywidualnej opiece nad słuchaczami studiów podyplomowych, obejmującej zarówno pomoc w formułowaniu problemu i struktury pracy, jak i końcową ocenę przygotowanego opracowania.

Opieka dydaktyczno-merytoryczna nad słuchaczami

W roku akademickim 2019/2020 pełniłem również funkcję tutora, czyli opiekuna dydaktyczno-merytorycznego słuchaczy kierunków „Fizyka z astronomią dla nauczycieli" oraz „Matematyka dla nauczycieli".

Zakres moich obowiązków w ramach tej funkcji obejmował:

- przygotowywanie uzupełniających materiałów dydaktycznych do poszczególnych przedmiotów;
- bieżący kontakt ze słuchaczami i udzielanie konsultacji dotyczących treści realizowanych w ramach studiów;
- wyjaśnianie zagadnień sprawiających słuchaczom szczególne trudności;
- weryfikację efektów uczenia się poprzez sprawdzanie i ocenianie egzaminów semestralnych obejmujących przedmioty realizowane na danym kierunku.

Wieloletnia współpraca z Akademią Nauk Stosowanych Wincentego Pola w Lublinie umożliwiła mi zdobycie rozległego doświadczenia zarówno w prowadzeniu i organizacji zajęć dydaktycznych, jak i w indywidualnej opiece nad słuchaczami, w szczególności poprzez promotorstwo 140 prac końcowych.

Doświadczenie dydaktyczne w szkolnictwie podstawowym i ponadpodstawowym

Uzupełnieniem mojej działalności dydaktycznej w szkolnictwie wyższym jest kilkuletnie doświadczenie w pracy nauczyciela przedmiotów ścisłych w szkołach podstawowych i ponadpodstawowych. W latach 2019–2024 prowadziłem zajęcia z matematyki, fizyki i chemii w następujących placówkach:

- Szkoła Podstawowa nr 1 im. Uczestników Strajku Szkolnego 1906–1907 w Toruniu, 30.01.2024–21.06.2024 – nauczyciel matematyki oraz doraźne zastępstwa na lekcjach fizyki i chemii;
- Uniwersyteckie Liceum Ogólnokształcące w Toruniu, 01.09.2021–31.08.2022 – nauczyciel fizyki;
- IV Liceum Ogólnokształcące im. Tadeusza Kościuszki w Toruniu, 01.09.2021–15.01.2022 – nauczyciel fizyki;
- Liceum Akademickie im. Króla Władysława Jagiełły w Toruniu, 02.09.2019–31.08.2021 – nauczyciel matematyki, fizyki i chemii; dodatkowo prowadzenie egzaminów z fizyki dla uczniów realizujących edukację domową oraz zajęć pozalekcyjnych;
- Technikum Mundurowe przy Zakładzie Doskonalenia Zawodowego w Toruniu, 09.09.2019–31.08.2020 – nauczyciel matematyki i fizyki.

Doświadczenie to pozwoliło mi poznać w praktyce specyfikę nauczania przedmiotów ścisłych na różnych etapach edukacyjnych, a także problemy i potrzeby dydaktyczne uczniów o zróżnicowanym poziomie przygotowania. Stanowi ono istotne uzupełnienie mojej działalności w zakresie kształcenia nauczycieli na studiach podyplomowych.

6.2. Informacja o osiągnięciach organizacyjnych

Koordynator projektu European Quantum Academy po stronie Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu

Data rozpoczęcia projektu: od 01.05.2026

Czas trwania projektu: 4 lata

European Quantum Academy (EQA) to ogólnoeuropejska inicjatywa wybrana do realizacji przez Komisję Europejską na podstawie procedury konkursowej. Projekt skupia ponad 70 instytucji partnerskich oraz ponad 100 organizacji współpracujących z całej Europy. Celem projektu jest rozwój kształcenia specjalistów w obszarze technologii kwantowych, obejmującego szerokie spektrum działań, od szkół średnich, poprzez studia wyższe i szkoły doktorskie, po szkolenia zawodowe oraz programy eksperckie. UMK jest jednym z partnerów projektu z budżetem mającym sfinansować powstanie Pracowni Kwantowej dla studentów.

Zgodnie z założeniami projektu planowana Pracownia Kwantowa ma być rozwiązaniem modelowym, które w oparciu o dokumentację będzie mogło zostać odtworzone w innych instytucjach partnerskich. Pracownia składać się będzie z układów eksperymentalnych oraz towarzyszących im materiałów dydaktycznych umożliwiających nabycie kompetencji w zakresie 4 tematów:

(a) magnetooptyczne pułapkowanie atomów,

(b) kryptografia kwantowa,

(c) źródło splątanych par fotonów,

(d) optyczne pincety dla nanocząstek.

Projekt EQA stanowi paneuropejską odpowiedź na zapotrzebowanie rynku w obszarze technologii kwantowych. Projekt ma wspierać budowę europejskiego ekosystemu technologii kwantowych oraz przygotowanie kadr dla rozwijających się obszarów związanych z komunikacją kwantową, obliczeniami kwantowymi i technologiami sensorowymi.

Całkowity budżet projektu wynosi 19,8 mln euro, a jego realizacja została zaplanowana na 4 lata. Projekt jest współfinansowany ze środków UE w ramach programu Digital Europe. W strukturze EQA wyróżniono sześć regionalnych akademii kwantowych, obejmujących obszar całej Unii Europejskiej oraz Ukrainę.

Zakres obowiązków organizacyjnych wykonywanych w ramach projektu:

- **w okresie wrzesień – październik 2025 (przygotowanie wniosku grantowego):** nieformalna rola Lidera grupy przygotowującej wniosek po stronie UMK. Zakres obowiązków obejmował udział w spotkaniach roboczych tworzącego się konsorcjum, przygotowanie koncepcji merytorycznego wkładu UMK w projekt, negocjacje dotyczące zakresu zadań i budżetu oraz koordynowanie wewnętrznej procedury UMK związanej z ubieganiem się o finansowanie europejskie i zapewnieniem wkładu własnego;
- **w okresie styczeń 2026 – kwiecień 2026 (etap przygotowania projektu do podpisania umowy grantowej)**: nieformalna rola Koordynatora procesu przygotowania projektu do fazy realizacji (po pozytywnej ocenie merytorycznej). Zakres obowiązków obejmował bieżącą komunikację z Rektoratem UMK oraz liderami konsorcjum, koordynowanie działań niezbędnych do zawarcia umowy grantowej, uzupełnianie wymaganej dokumentacji oraz przekazywanie informacji niezbędnych do realizacji procedur wewnętrznych UMK i wymagań formalnych związanych z finansowaniem projektu ze środków Unii Europejskiej;
- **w okresie od 1 maja 2026 – do chwili obecnej (faza realizacji projektu)**: formalna rola Koordynatora projektu EQA na UMK. Zakres obowiązków obejmuje udział w spotkaniach konsorcjum, planowanie i koordynowanie realizacji zadań wynikających z harmonogramu projektu, bieżącą komunikację z właściwymi jednostkami Rektoratu UMK oraz liderami konsorcjum, monitorowanie realizacji zobowiązań projektowych, a także zarządzanie budżetem przypisanym do UMK.

6.3. Informacja o osiągnięciach popularyzujących naukę lub sztukę

Współpraca z Działem Promocji i Komunikacji UMK w celu popularyzacji nauki

Dział Promocji i Komunikacji UMK odpowiada za przygotowywanie treści na Portal Informacyjny Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu: https://portal.umk.pl/

Aktywnie współpracuję z Sekcją Redakcyjną w zakresie popularyzacji własnych osiągnięć naukowych oraz realizowanych inicjatyw badawczych i projektowych. W ramach tej współpracy powstały trzy publikacje popularnonaukowe zamieszczone na Portalu Informacyjnym UMK.

Kwantowy błysk w diamencie – publikacja z dnia 27.01.2026 we współpracy z Panią Żanetą Kopczyńską – Redaktorką Portalu UMK

Link: https://portal.umk.pl/pl/article/kwantowy-blysk-w-diamencie (dostęp 02.10.2026)

Publikacja opisuje badania nad zjawiskiem nadpromienistości, koncentrując się w szczególności na wynikach pracy pt. *Revisiting superradiance dynamics from single diamond nanocrystals with a physically consistent model for fluorescence decay* opublikowanej w „Nature Communications" (wskazanej jako praca [B1] w pkt 4.3. Autoreferatu). Jako Autor Korespondujący tej pracy udzieliłem obszernych wypowiedzi na potrzeby przygotowania publikacji oraz dokonałem szczegółowej i starannej korekty jej wstępnej wersji, dbając zarówno o poprawność merytoryczną przedstawianych informacji, jak i o przystępny, popularnonaukowy sposób prezentacji zagadnienia.

Publikacja została następnie zauważona przez redakcję portalu „Co Nowego", gdzie ukazało się streszczenie artykułu z Portalu Informacyjnego UMK, autorstwa Marka Kwiatkowskiego:

Link: https://conowego.pl/aktualnosci/kwantowy-blysk-w-diamencie-wklad-polskich-naukowcow-282958 (dostęp 02.10.2026).

Fizycy w Europejskiej Akademii Kwantowej – publikacja z dnia 13.05.2026

Istotnym działaniem w zakresie popularyzacji nauki i technologii kwantowych było przygotowanie komunikatu informującego o udziale UMK w projekcie European Quantum Academy (projekt wskazany w ramach dorobku organizacyjnego omówionego w punkcie 6.2. Autoreferatu). Jestem głównym autorem tekstu, który po korekcie redakcyjnej został opublikowany na Portalu Informacyjnym UMK oraz powielony na stronie Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej:

- Portal UMK: https://portal.umk.pl/pl/article/fizycy-w-europejskiej-akademii-kwantowej (dostęp: 8.10.2026)
- Strona WFAiIS: https://www.fizyka.umk.pl/wiadomosci/?id=45609 (dostęp: 8.10.2026).

Dodatkowo tłumaczenie tekstu na język angielski opublikowane zostało na anglojęzycznej stronie UMK:

„Physicists at the European Quantum Academy” - https://idub.umk.pl/en/physicists-at-the-european-quantum-academy/ (dostęp: 8.10.2026).

***Klucz do bezpiecznej komunikacji satelitarnej* – publikacja z dnia 14.05.2026 we współpracy z Panią Żanetą Kopczyńską**

Link do wersji w języku polskim: https://portal.umk.pl/pl/article/klucz-do-bezpiecznej-komunikacji-satelitarnej (dostęp 8.10.2026)

Link do wersji w języku angielskim: „The key to secure satellite communications” https://portal.umk.pl/en/article/the-key-to-secure-satellite-communications (dostęp 8.10.2026).

Publikacja popularyzuje badania nad komunikacją satelitarną, koncentrując się w szczególności na wynikach artykułu pt. *Modeling Optical Key Distribution over a Satellite-to-Ground Link Under Weak Atmospheric Turbulence*, wskazanego jako praca [C2] w ramach osiągnięcia C w części 4. Autoreferatu.

Podobnie jak w przypadku publikacji „Kwantowy błysk w diamencie”, również w tym przypadku ściśle współpracowałem z Redakcją Portalu UMK w celu przedstawienia zagadnienia w sposób poprawny merytorycznie, a jednocześnie przystępny dla odbiorcy niespecjalistycznego. W ramach tej współpracy dokonałem kompleksowej korekty pierwszej wersji publikacji oraz udzieliłem szczegółowych wypowiedzi eksperckich, które zostały wykorzystane w tekście w formie bezpośrednich cytatów.

Publikacja popularnonaukowa „Klucz do bezpiecznej komunikacji satelitarnej” przedstawia nie tylko wyniki i znaczenie badań opublikowanych w konkretnym artykule naukowym, lecz również umieszcza je w szerszym kontekście rozwoju technologii komunikacji satelitarnej i ich możliwych zastosowań. Przyczyniła się tym samym do upowszechnienia informacji o badaniach nad nowoczesnymi technologiami komunikacyjnymi i kosmicznymi prowadzonych na UMK.

Temat badań nad komunikacją satelitarną prowadzonych na UMK został następnie podjęty przez inne media o profilu naukowo-technicznym oraz ogólnoinformacyjnym. Na podstawie materiału opublikowanego na Portalu Informacyjnym UMK powstała seria dalszych publikacji:

- Forum Akademickie: „Klucz do bezpiecznej komunikacji satelitarnej” https://forumakademickie.pl/klucz-do-bezpiecznej-komunikacji-satelitarnej/ (dostęp: 8.10.2026). Artykuł stanowi bezpośrednie przeniesienie tekstu z Portalu UMK.
- Spider’s Web: „Polacy testują kosmiczne szyfrowanie. Największym wrogiem zwykłe powietrze”, autor: Bogdan Stech, https://spidersweb.pl/2026/05/polacy-testuja-kosmiczne-szyfrowanie.html (dostęp 8.10.2026). Artykuł zawiera omówienie badań Kandydata i współpracowników na temat komunikacji satelitarnej, wraz z dodatkowymi komentarzami na temat rozwoju i znaczenia tej technologii.
- TVP Info: „Komunikacja laserowa. Polscy naukowcy pracują nad kluczowym systemem”, https://www.tvp.info/93262844/komunikacja-laserowa-naukowcy-z-umk-i-uw-pracuja-nad-komunikacja-satelitarna-przyszlosci (dostęp 8.10.2026). Artykuł zawiera omówienie publikacji z Portalu UMK, z pominięciem niektórych szczegółów.

- TVP World: „How Polish scientists are using lasers to secure satellite communications”, autor: Ammar Anwer, https://tvpworld.com/93283985/polish-scientists-develop-lasers-for-encrypted-satellite-communication (dostęp 8.10.2026). Omówienie w języku angielskim, któremu towarzyszył krótki materiał video przygotowany przez TVP World. Materiał video dostępny jest na kanale YouTube stacji TVP World pod tytułem „#Poland researches a pioneering #satellite laser #communication”: https://www.youtube.com/watch?v=MQpEoJKw038 (dostęp 8.10.2026).
- Portal Co Nowego: „Klucz do bezpiecznej komunikacji satelitarnej? Ważne badanie z Polski!”, autor: Marek Kwiatkowski, https://conowego.pl/aktualnosci/klucz-do-bezpiecznej-komunikacji-satelitarnej-wazne-badanie-z-polski-296424 (dostęp 12.10.2026). Artykuł stanowi autorskie omówienie badań nad protokołem OKD na podstawie publikacji popularnonaukowej zamieszczonej na Portalu Informacyjnym UMK

Szeroki oddźwięk medialny publikacji „Klucz do bezpiecznej komunikacji satelitarnej” świadczy zarówno o wysokim potencjale poznawczym i aplikacyjnym prowadzonych badań, jak i o ich atrakcyjności z punktu widzenia odbiorców zainteresowanych nowoczesnymi technologiami komunikacyjnymi i kosmicznymi. Zainteresowanie ze strony portali naukowo-technicznych oraz mediów ogólnoinformacyjnych pokazuje, że wyniki badań dotyczących satelitarnej komunikacji optycznej i kwantowej wykraczają poza wąskie grono specjalistów i są postrzegane jako istotne dla rozwoju nowych technologii. Jednocześnie fakt, że kolejne publikacje medialne powstały na bazie materiału opublikowanego pierwotnie na Portalu Informacyjnym UMK, który współtworzyłem poprzez przygotowanie wypowiedzi eksperckich i merytoryczną korektę treści, pozwala wskazać bezpośredni związek między moją aktywnością popularyzatorską a dalszym upowszechnieniem tej tematyki. W tym sensie publikacja nie tylko przyczyniła się do promocji konkretnych wyników naukowych, lecz również do zwiększenia społecznej świadomości znaczenia technologii kwantowych i komunikacji satelitarnej.

7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.

7.1. Inne publikacje naukowe, których autorem (współautorem) jest Kandydat [tylko publikacje powstałe po uzyskaniu stopnia naukowego doktora]

7.1.1. Lista dodatkowych publikacji

[D1] A. Czerwinski and J. J. Borkowski, *Quantum illumination using polarization-path entangled single photons for low reflectivity object detection in a noisy background: comment*. "Optics Express" (2026). DOI: 10.1364/OE.565670 [praca przyjęta do wydania]

IF (2025): 3.4

[D2] A. Czerwinski, M. Wiśniewski, and P. Moszczyński, *Machine Learning of Quantum Entanglement from Noisy Measurements*. "Electronics" Tom **15** (Nr 14), 3197 (2026). DOI: 10.3390/electronics15143197

IF (2025): 2.9

[D3] H. Kuniyil, S. Al-Kuwari, A. Ali, A. Czerwinski, and S. M. Arslan, *Optimizing continuous-wave pumped entanglement-based quantum key distribution in a noisy environment*. "Physical Review A" Tom **113** (Nr 5), 052613 (2026). DOI: 10.1103/1x96-wt6w

IF (2025): 3.0

[D4] A. Czerwinski, *Philosophy of Polarization-Path Entanglement in Quantum Optics*. "Optics" Tom **6** (Nr 3), 39 (2025). DOI: 10.3390/opt6030039

IF (2025): 1.8

[D5] A. Czerwinski, *Quantum Perspective on Digital Money: Towards a Quantum-Powered Financial System*. "Telecom" Tom **6** (Nr 3), 50 (2025). DOI: 10.3390/telecom6030050

IF (2025): 2.8

[D6] A. Czerwinski, K. Czerwinska, X. Cai, A. Ali, H. Kuniyil, A. ur Rahman, S. Al-Kuwari, and S. Haddadi, *Single-photon emission modeling with statistical estimators for the exponential distribution*. "Quantum Information Processing" Tom **24** (Nr 7), 192 (2025). DOI: 10.1007/s11128-025-04817-3

IF (2025): 2.2

[D7] S. Elghaayda, A. Ali, S. Al-Kuwari, A. Czerwinski, M. Mansour, S. Haddadi, *Performance of a Superconducting Quantum Battery*. "Advanced Quantum Technologies" Tom **8** (Nr 9), 2400651 (2025). DOI: 10.1002/qute.202400651

IF (2025): 4.3

[D8] X. Cai, Y. Feng, J. Ren, K. Lan, S. Sun, X. Meng, and A. Czerwinski, *Quantum speed limits in dephasing dynamics of a qubit system coupled to thermal environments.* "APL Quantum" Tom **2** (Nr 2), 026102 (2025). DOI: 10.1063/5.0255326

IF (2025): -

[D9] H. Dolatkhah, A. Czerwinski, A. Ali, S. Al-Kuwari, and S. Haddadi, *Tripartite measurement uncertainty in Schwarzschild space-time.* "The European Physical Journal C" Tom **84** (Nr 11), 1162 (2024). DOI: 10.1140/epjc/s10052-024-13554-3

IF (2025): 4.9

[D10] A. Czerwinski, *Quantum State Tomography of Photonic Qubits with Realistic Coherent Light Sources.* "Quantum Information and Computation" Tom **24** (Nr 1), 31-39 (2024). DOI: 10.2478/qic-2024-0002

IF (2025): 1.6

[D11] A. Czerwinski, X. Cai, and S. Haddadi, *Effects of chromatic dispersion on single-photon temporal wave functions in quantum communications.* "Quantum Information Processing" Tom **23** (Nr 10), 342 (2024). DOI: 10.1007/s11128-024-04551-2

IF (2025): 2.2

[D12] A. Czerwinski, *Mathematics Serving Economics: A Historical Review of Mathematical Methods in Economics.* "Symmetry" Tom **16** (Nr 10), 1271 (2024). DOI: 10.3390/sym16101271

IF (2025): 2.2

[D13] S. Haddadi M. Ghominejad, and A. Czerwinski, *Quantumness of gravitational cat states in correlated dephasing channels.* "The European Physical Journal C" Tom **84** (Nr 7), 670 (2024). DOI: 10.1140/epjc/s10052-024-13034-8

IF (2025): 4.9

[D14] S. Haddadi M. Ghominejad, and A. Czerwinski, *Quantum dense coding with gravitational cat states.* "Communications in Theoretical Physics" Tom **76** (Nr 3), 035101 (2024). DOI: 10.1088/1572-9494/ad23da

IF (2025): 3.5

[D15] A. Czerwinski, *Special Issue on Photonic State Tomography: Methods and Applications.* "Photonics" Tom **10** (Nr 12), 1370 (2023). DOI: 10.3390/photonics10121370

IF (2025): 2.1

[D16] X. Meng, Y. Sun, Q. Wang, J. Ren, X. Cai, and A. Czerwinski, *Dephasing Dynamics in a Non-Equilibrium Fluctuating Environment.* "Entropy" Tom **25** (Nr 4), 634 (2023). DOI: 10.3390/e25040634

IF (2025): 2.1

[D17] S. Haddadi, M. Hadipour, S. Haseli, A.U. Rahman, and A. Czerwinski, *Quantum Advantages of Teleportation and Dense Coding Protocols in an Open System.* "Mathematics" Tom **11** (Nr 6), 1407 (2023). DOI: 10.3390/math11061407

IF (2025): 2.3

[D18] N. Zidan, A.U. Rahman, S. Haddadi, A. Czerwinski, and S. Haseli, *Local Quantum Uncertainty and Quantum Interferometric Power in an Anisotropic Two-Qubit System.* "Universe" Tom **9** (Nr 1), 5 (2023). DOI: 10.3390/universe9010005

IF (2025): 2.5

[D19] M. Hadipour, S. Haseli, H. Dolatkhah, S. Haddadi, and A. Czerwinski, *Quantum Speed Limit for a Moving Qubit inside a Leaky Cavity.* "Photonics" Tom **9** (Nr 11), 875 (2022). DOI: 10.3390/photonics9110875

IF (2025): 2.1

[D20] A. Czerwinski, *Entanglement Dynamics Governed by Time-Dependent Quantum Generators.* "Axioms" Tom **11** (Nr 11), 589 (2022). DOI: 10.3390/axioms11110589

IF (2025): 1.5

[D21] A. Czerwinski, *Quantum Communication with Polarization-Encoded Qubits under Majorization Monotone Dynamics.* "Mathematics" Tom **10** (Nr 21), 3932 (2022). DOI: 10.3390/math10213932

IF (2025): 2.3

[D22] A. Czerwinski, *Selected Concepts of Quantum State Tomography.* "Optics" Tom **3** (Nr 3), 268-286 (2022). DOI: 10.3390/opt3030026

IF (2025): 1.8

[D23] A. Czerwinski, *Entanglement quantification enhanced by dark count correction.* "International Journal of Quantum Information" Tom **20** (Nr 7), 2250021 (2022). DOI: 10.1142/S0219749922500216

IF (2025): 1.2

[D24] A. Czerwinski, D*ynamics of Open Quantum Systems—Markovian Semigroups and Beyond.* "Symmetry" Tom **14** (Nr 8), 1752 (2022). DOI: 10.3390/sym14081752

IF (2025): 2.2

[D25] A. Czerwinski and K. Czerwinska, *Statistical Analysis of the Photon Loss in Fiber-Optic Communication.* "Photonics" Tom **9** (Nr 8), 568 (2022). DOI: 10.3390/photonics9080568

IF (2025): 2.1

[D26] A. Czerwinski, *Entanglement characterization by single-photon counting with random noise.* "Quantum Information and Computation" Tom **22** (Nr 1&2), 0001-0016 (2022). DOI: 10.26421/QIC22.1-2-1

IF (2025): 1.6

[D27] A. Czerwinski, *Hamiltonian tomography by the quantum quench protocol with random noise.* "Physical Review A" Tom **104** (Nr 5), 052431 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevA.104.052431

IF (2025): 3.0

[D28] J. Szlachetka and A. Czerwinski, *Quantum State Tomography of Qutrits by Single-Photon Counting with Imperfect Measurements.* "Acta Physica Polonica A" Tom **140** (Nr 3), 210 (2021). DOI: 10.12693/AphysPolA.140.210

IF (2025): 0.5

[D29] A. Czerwinski, *Quantum State Tomography of Four-Level Systems with Noisy Measurements.* "Acta Physica Polonica A" Tom **139** (Nr 6), 666-672 (2021). DOI: 10.12693/AphysPolA.139.666

IF (2025): 0.5

[D30] A. Czerwinski, *Quantum Tomography of Pure States with Projective Measurements Distorted by Experimental Noise.* "Acta Physica Polonica A" Tom **139** (Nr 2), 164-168 (2021). DOI: 10.12693/AphysPolA.139.164

IF (2025): 0.5

[D31] A. Czerwinski, Open quantum systems integrable by partial commutativity. "Physical Review A" Tom **102** (Nr 6), 062423 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevA.102.062423

IF (2025): 3.0

[D32] A. Czerwinski, *Dynamic State Reconstruction of Quantum Systems Subject to Pure Decoherence.* "International Journal of Theoretical Physics" Tom **59** (Nr 11), 3646-3661 (2020). DOI: 10.1007/s10773-020-04625-8

IF (2025): 2.3

Podsumowanie ilościowe dorobku publikacyjnego

W ramach osiągnięć A–C, przedstawionych w części 4. Autoreferatu, wykazałem łącznie 13 publikacji składających się na osiągnięcia stanowiące znaczny wkład w rozwój dyscypliny w rozumieniu art. 219 ust. 1 pkt 2 ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. W tym wiodące osiągnięcie habilitacyjne w formie cyklu powiązanych tematycznie artykułów, o którym mowa w art. 219 ust. 1 pkt 2 lit. b ustawy – Osiągnięcie A składające się z 9 publikacji naukowych.

Ponadto, na dzień złożenia wniosku habilitacyjnego, mój dorobek obejmuje **32** inne publikacje naukowe w recenzowanych czasopismach, które powstały **po uzyskaniu stopnia doktora.** Publikacje te zostały oznaczone jako [D1]–[D32], natomiast ich syntetyczne omówienie przedstawiono w punkcie 7.1.2 Autoreferatu.

W moim dorobku znajdują się również 4 publikacje powstałe w okresie studiów doktoranckich w latach 2014–2018, które były związane z badaniami stanowiącymi podstawę mojej rozprawy doktorskiej i uzyskania stopnia doktora w 2018 r. Dla porządku chronologicznego i całościowego ujęcia dorobku naukowego wymieniam te prace poniżej jako [**E1**]-[**E4**].

[**E1**]. A. Czerwinski, *Minimal number of observables for quantum tomography of systems with evolution given by double commutators.* "Quantum Studies: Mathematics and Foundations" Tom **4** (Nr 4), 287-294 (2017). DOI: 10.1007/s40509-017-0101-6

IF (2025): 0.9

[**E2**] A. Czerwinski and A. Jamiolkowski, *Dynamic Quantum Tomography Model for Phase-Damping Channels.* "Open Systems & Information Dynamics" Tom **23** (Nr 4), 1650019 (2016). DOI: 10.1142/S1230161216500190

IF (2025): 1.4

[**E3**] A. Czerwinski, *Optimal evolution models for quantum tomography.* "Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical" Tom **49** (No. 7), 075301 (2016). DOI: 10.1088/1751-8113/49/7/075301

IF (2025): 1.9

[**E4**] A. Czerwinski, *Applications of the Stroboscopic Tomography to Selected 2-Level Decoherence Models.* "International Journal of Theoretical Physics" Tom **55** (Nr 2), 658-668 (2016). DOI: 10.1007/s10773-015-2703-2

IF (2025): 2.3

Podsumowując, na dzień złożenia wniosku habilitacyjnego, **jestem autorem lub współautorem 49** artykułów naukowych w recenzowanych czasopismach.

7.1.2. Krótkie omówienie publikacji z pkt 7.1.1. (nieujętych w pkt 4. Autoreferatu)

Poza publikacjami wchodzącymi w skład osiągnięć naukowych przedstawionych w części 4. Autoreferatu, po uzyskaniu stopnia doktora rozwijałem również kilka dodatkowych kierunków badawczych związanych przede wszystkim z informacją kwantową, optyką kwantową oraz teorią układów otwartych. Część tych badań pozostaje tematycznie bliska głównym osiągnięciom habilitacyjnym, jednak nie została do nich włączona ze względu na potrzebę zachowania ich możliwie jednoznacznej i zwartej struktury tematycznej. Pozostałe publikacje dokumentują natomiast stopniowe rozszerzanie przeze mnie zainteresowań na nowe problemy teorii i technologii kwantowych.

Jednym z kontynuowanych kierunków były badania nad tomografią kwantową oraz wiarygodnością rekonstrukcji stanów w obecności niedoskonałości pomiarowych. W pracach [D28]–[D30], opublikowanych w czasopiśmie „Acta Physica Polonica A” wydawanym przez IF PAN, analizowałem wpływ nieidealnych i zaszumionych pomiarów na rekonstrukcję stanów qutritów, układów czteropoziomowych oraz czystych stanów kwantowych. Na szczególną uwagę zasługuje praca [28], która powstała we współpracy z doktorantem Jakubem Szlachetką. Tematyka ta została następnie rozwinięta w kierunku problemu charakteryzacji splątania przy realistycznych błędach detekcyjnych. W pracach [D23] i [D26] badałem wpływ ciemnych zliczeń i losowego szumu na ilościową ocenę splątania. W szczególności chciałbym zauważyć, że analiza przedstawiona w pracy [D23] oparta była o dane eksperymentalne i pozwoliła wykazać, że wprowadzone przeze mnie metody wykazują się większą czułością na splątanie kwantowe niż alternatywne metody rekonstrukcji macierzy gęstości. Z kolei w pracy [D10]

przeanalizowałem tomografię fotonicznych kubitów z uwzględnieniem realistycznych koherentnych źródeł światła. Praca ta dodatkowo zakładała realizację pomiarów tomograficznych przy obecności silnego światła klasycznego i związanego z nim rozpraszania Ramana. Tak sformułowany problem wpisuje się w ideę koegzystencji sygnałów klasycznych i kwantowych w jednym medium transmisyjnym. Zagadnienie to jest obecnie rozwijane głównie w kontekście komunikacji kwantowej celem zbadania możliwości multipleksowania transmisji kwantowej i klasycznej w tej samej infrastrukturze, a badania takie prowadzi między innymi dr Mikołaj Lasota z UMK w Toruniu we współpracy z badaczami w Warszawy i Wrocławia [31].

Uzupełnieniem nurtu badań związanego z tomografią stanów kwantowych jest publikacja przeglądowa [D22][†], w której przedstawiłem wybrane koncepcje i metody tomografii stanów kwantowych, oraz artykuł redakcyjny [D15] związany z przygotowanym przeze mnie numerem specjalnym czasopisma „Photonics" poświęconym metodom i zastosowaniom fotonicznej tomografii stanów.

Wśród pozostałych publikacji warto również wyróżnić jednoautorską pracę poświęconą tomografii hamiltonianu układów wielokubitowych, opublikowaną w czasopiśmie „Physical Review A" [D27]. Przedstawiono w niej metodę rekonstrukcji hamiltonianu z wykorzystaniem protokołu *quantum quench*, uwzględniającą zakłócenia pomiarów w postaci losowych transformacji unitarnych oraz niepewności czasowej. Przeprowadzona analiza numeryczna pozwoliła ocenić odporność metody na zakłócenia oraz określić zależność dokładności rekonstrukcji od liczby wykorzystywanych par stanów kwantowych. Choć przedmiotem rekonstrukcji jest hamiltonian, a nie stan kwantowy, praca pozostaje bliska tematyce tomografii stanów kwantowych i wiodącego osiągnięcia habilitacyjnego, ponieważ dotyczy odtwarzania informacji o układzie kwantowym na podstawie nieidealnych pomiarów w obecności szumu.

Istotnym obszarem mojej działalności po doktoracie była również teoria dynamiki otwartych układów kwantowych. W pracy [D31] zajmowałem się klasą układów otwartych całkowalnych z wykorzystaniem warunku częściowej przemienności, natomiast w pracy [D32] analizowałem dynamiczną rekonstrukcję stanów podlegających czystej dekoherencji. Problematyka ewolucji nieunitarnej była następnie rozwijana w pracach dotyczących dynamiki splątania generowanej przez zależne od czasu generatory [D20], dynamiki monotonicznej względem relacji majoryzacji w kontekście komunikacji kwantowej [D21] oraz ogólniejszego opisu dynamiki Markowowskiej i niemarkowowskiej w formie artykułu przeglądowego [D24]. Praca [D24] jako forma przeglądowa spotkała się ze szczególnym zainteresowaniem ze strony badaczy

† Praca [D22] została opublikowana w czasopiśmie „Optics", wydawanym przez MDPI. Wydawnictwo to spotyka się z krytycznymi opiniami części środowiska akademickiego, m.in. w związku z modelem publikacyjnym opartym w znacznej mierze na pobieraniu od autorów opłat za publikację artykułu (ang. *article processing charge*, APC). W tym kontekście chciałbym zaznaczyć, że żadna z moich publikacji wydanych przez MDPI nie wiązała się z poniesieniem przeze mnie kosztów opłaty publikacyjnej. Zwolnienie z APC wynikało każdorazowo albo z indywidualnego zaproszenia redakcji do bezpłatnego opublikowania pracy, albo z wykorzystania kuponów pokrywających koszt publikacji, przyznanych mi w związku z wykonanymi wcześniej recenzjami naukowymi. Jednocześnie pragnę podkreślić, że wszystkie moje prace opublikowane w czasopismach wydawnictwa MDPI ukazały się w tytułach posiadających wskaźnik Impact Factor 2025, co oznacza, że czasopisma te przeszły niezależny proces weryfikacji prowadzony przez firmę Clarivate i zostały ujęte w Journal Citation Reports (JCR).

teorii otwartych układów kwantowych. Według Google Scholar na dzień 15.10.2026 została zacytowana **32** razy, z wyłączeniem autocytowań i cytowań w artykułach typu *pre-print*.

Badania te zostały poszerzone dzięki współpracy międzynarodowej o analizę różnych właściwości dynamicznych układów kwantowych oddziałujących z otoczeniem. W pracach [D16] i [D8] analizowano odpowiednio dekoherencję w nierównowagowym środowisku fluktuującym oraz kwantowe ograniczenia szybkości ewolucji w dynamice defazowania związanej ze środowiskami termicznymi. Problem kwantowej granicy szybkości ewolucji pojawił się również w pracy [D19], dotyczącej poruszającego się kubitu umieszczonego w stratnej wnęce. Prace te poszerzyły zakres mojej działalności z problemów rekonstrukcji stanu na analizę fundamentalnych ograniczeń i właściwości czasowej ewolucji otwartych układów kwantowych.

Kolejną grupę publikacji stanowią badania związane z komunikacją kwantową i fizycznym modelowaniem fotonów wykorzystywanych jako nośniki informacji. W pracy [D25] przeprowadziłem statystyczną analizę strat fotonów w transmisji światłowodowej, natomiast w pracy [D11] analizowałem wpływ dyspersji chromatycznej na czasowe funkcje falowe pojedynczych fotonów wykorzystywanych w komunikacji kwantowej. W pracy [D6] problem modelowania emisji pojedynczych fotonów został połączony z zastosowaniem estymatorów statystycznych dla rozkładu wykładniczego. Badania dotyczące konkretnych protokołów komunikacji obejmują również analizę zalet teleportacji i kodowania gęstego w układach otwartych [D17] oraz optymalizację opartego na splątaniu protokołu kwantowej dystrybucji klucza w obecności szumu z założeniem ciągłego pompowania [D3].

Osobnym elementem tej działalności jest rozwijanie metod wykorzystujących analizę danych do charakteryzacji zasobów kwantowych. W pracy [D2] zastosowano metody uczenia maszynowego do rozpoznawania splątania na podstawie zaszumionych danych pomiarowych. Kierunek ten stanowi rozszerzenie wcześniejszych badań nad odpornością metod charakteryzacji stanów na niedoskonałości eksperymentalne: zamiast wyłącznie rekonstruować pełną macierz gęstości, analizowana jest możliwość bezpośredniego wydobycia informacji o interesującej własności fizycznej z nieidealnych wyników pomiarów.

Po doktoracie podejmowałem również problematykę innych zasobów i protokołów teorii informacji kwantowej. W pracy [D18] analizowane były lokalna niepewność kwantowa oraz kwantowa moc interferometryczna w anizotropowym układzie dwukubitowym. Prace [D13] i [D14] dotyczą natomiast tzw. gravitational cat states, odpowiednio ich własności kwantowych w skorelowanych kanałach dephasingowych oraz możliwości wykorzystania ich w protokole kodowania gęstego. W pracy [D9] analizowano relacje nieoznaczoności pomiarowej w układzie trójdzielnym w czasoprzestrzeni Schwarzschilda. Publikacje te pozwoliły mi uczestniczyć w badaniach na styku teorii informacji kwantowej, układów otwartych i relatywistycznej teorii kwantowej.

Rozszerzeniem zainteresowań na inne obszary technologii kwantowych była współpraca międzynarodowa dotycząca koncepcji nadprzewodzącej baterii kwantowej. Współpraca ta doprowadziła do powstania pracy [D7], która opublikowana została w czasopiśmie „Advanced Quantum Technologies” w roku 2025 i spotkała się z ogromnym zainteresowaniem ze strony środowiska naukowego. Na dzień przygotowania wniosku, według Google Scholar, została zacytowana w 40 niezależnych publikacjach naukowych. Praca najwyżej cytowany element mojego dorobku naukowego.

Badania nad możliwościami praktycznego wykorzystania efektów kwantowych były podejmowane również z bardziej przekrojowej perspektywy. W pracy [D5] przedstawiłem analizę potencjalnego znaczenia technologii kwantowych dla przyszłych systemów pieniądza cyfrowego, natomiast w pracy [D4] omówiłem fundamentalne i interpretacyjne aspekty splątania między polaryzacyjnymi i przestrzennymi stopniami swobody pojedynczych fotonów.

W ostatnim okresie dodatkowym kierunkiem stała się krytyczna analiza metod stosowanych w protokole kwantowej iluminacji (ang. *quantum illumination*). W pracy [D1], przygotowanej wspólnie z doktorantem, mgr. Jakubem J. Borkowskim, analizie poddano model detekcji obiektów o małej reflektancji w zaszumionym otoczeniu z wykorzystaniem pojedynczych fotonów splątanych pomiędzy stopniami swobody polaryzacji i drogi, opublikowany w czasopiśmie „Optics Express" [32]. Praca ta wpisuje się w szerszy nurt badań dotyczących wiarygodnej oceny deklarowanej przewagi kwantowej oraz konieczności zachowania spójności pomiędzy modelem matematycznym, rzeczywistą procedurą pomiarową i wnioskami dotyczącymi praktycznej użyteczności zasobów kwantowych.

Praca [D1] jest tematycznie i metodologicznie ściśle powiązana z pracą [A9], która miała podobny charakter i została włączona do osiągnięcia A omówionego w części 4. Autoreferatu. Na dzień złożenia wniosku praca [D1] posiada nadany numer DOI, jednak nie została jeszcze opublikowana w ostatecznej wersji na stronie czasopisma. Z tego względu nie została włączona do grupy osiągnięć przedstawionych jako stanowiące znaczny wkład w rozwój dyscypliny.

Część mojego dorobku po doktoracie ma również charakter przekrojowy i interdyscyplinarny. Przykładem jest praca [D12], poświęcona historycznemu rozwojowi zastosowań metod matematycznych w ekonomii. Publikacje tego rodzaju nie stanowią głównego nurtu mojej działalności w naukach fizycznych, lecz dokumentują szersze zainteresowanie rolą metod matematycznych w modelowaniu złożonych problemów oraz zastosowaniami formalnych narzędzi poza ich pierwotnym obszarem.

Całość dodatkowego dorobku pokazuje, że moja działalność naukowa po uzyskaniu stopnia doktora nie ograniczała się wyłącznie do problemów włączonych do głównych osiągnięć habilitacyjnych. Równolegle rozwijałem zagadnienia dotyczące teorii otwartych układów kwantowych, dynamiki dekoherencji, komunikacji kwantowej, statystycznego modelowania fotonów, metod charakteryzacji splątania oraz innych zasobów informacji kwantowej. W ostatnich latach zakres ten został dodatkowo rozszerzony o uczenie maszynowe, *quantum illumination* oraz wybrane problemy związane z nowymi technologiami kwantowymi. Istotną część tych prac realizowałem w ramach współpracy z badaczami z innych ośrodków oraz z młodszymi naukowcami, co równocześnie przyczyniało się do rozwoju mojej sieci współpracy naukowej.

7.2. Doświadczenie w opiece naukowej nad doktorantami oraz ocenie rozpraw doktorskich

a) w charakterze promotora pomocniczego

od 01.04.2024 – do chwili obecnej Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

Szkoła Doktorska Nauk Ścisłych i Przyrodniczych

Doktorant: mgr Jakub J. Borkowski

Zakres obowiązków promotora pomocniczego:

- regularne omawianie koncepcji, problemów i planów badawczych,
- formułowanie i uzgadnianie zadań badawczych,
- monitorowanie postępów prac oraz weryfikacja poprawności uzyskiwanych wyników;
- mentoring w zakresie prowadzenia badań naukowych oraz przygotowania publikacji;
- koordynowanie procesu pisania artykułów badawczych

W toku współpracy z Doktorantem powstały prace [A9], [B1] oraz [C3] opisane w części 4. Autoreferatu, a także praca [D1] wymieniona w części 7.1. wśród pozostałych publikacji.

Warto podkreślić, że rezultaty współpracy naukowej z mgr. Jakubem J. Borkowskim są obecne we wszystkich trzech osiągnięciach habilitacyjnych A–C przedstawionych w części 4. Autoreferatu. Tym samym współpraca z Doktorantem stanowi istotny element mojego dorobku naukowego po uzyskaniu stopnia doktora i pokazuje, że sprawowana przeze mnie opieka naukowa prowadzi do wymiernych rezultatów publikacyjnych w kilku rozwijanych przeze mnie kierunkach badawczych.

b) w charakterze zewnętrznego Recenzenta

12.05.2026 – 28.09.2026

Pondicherry University, Indie

Department of Physics

School of Physical Chemical and Applied Sciences

Rola: Member of the Board of Examiners

Doktorantka: Vedhanayagi R

Tytuł rozprawy doktorskiej: Design and Analysis of Scalable Teleportation Protocols for Quantum Networks

Dyscyplina rozprawy: fizyka

Na zaproszenie Pondicherry University zostałem powołany do pełnienia funkcji Member of the Board of Examiners w postępowaniu dotyczącym oceny rozprawy doktorskiej z zakresu fizyki. Powierzenie mi tej funkcji przez zagraniczną uczelnię stanowi dówód rozpoznawalności w środowisku naukowym a także formę uznania moich kompetencji w obszarze informacji i komunikacji kwantowej.

Zakres powierzonych obowiązków:

- recenzja rozprawy doktorskiej przedstawionej przez Doktorantkę,
- przygotowanie szczegółowej listy sugerowanych poprawek,
- opracowanie listy pytań przewidzianych na obronę rozprawy doktorskiej,
- przygotowanie końcowej rekomendacji dla Komisji wraz z uzasadnieniem.

c) udokumentowana współpraca naukowa z doktorantami bez formalnej funkcji promotora pomocniczego

od 01.06.2026 – do chwili obecnej **Wojskowa Akademia Techniczna**

Instytut Optoelektroniki, Zakład Inżynierii Kwantowej

Współpraca z mgr Maciejem Wiśniewskim przed początkiem jego kształcenia w Szkole Doktorskiej. Zakres współpracy obejmuje:

- mentoring w zakresie warsztatu badawczego oraz procesu przygotowania publikacji naukowych;

- sugerowanie i formułowanie problemów badawczych;

- regularną dyskusję postępów prac oraz weryfikację uzyskiwanych wyników;

- wsparcie przy przygotowaniu koncepcji rozprawy doktorskiej.

Współpraca z mgr Maciejem Wiśniewskim doprowadziła do powstania dwóch publikacji naukowych: pracy [C3], omówionej w części 4. Autoreferatu, oraz pracy [D2], wykazanej w części 7.1. Autoreferatu. Istotnym elementem współpracy było również wsparcie przy sformułowaniu zarysu koncepcji rozprawy doktorskiej oraz jej głównych celów badawczych, a także pomoc w przygotowaniu do rozmowy rekrutacyjnej do Szkoły Doktorskiej WAT.

Mgr Maciej Wiśniewski rozpoczął w dniu 01.10.2026 kształcenie w Szkole Doktorskiej WAT pod opieką naukową płk. dr. hab. inż. Marka Życzkowskiego, prof. WAT, Kierownika Zakładu Inżynierii Kwantowej. Roboczy tytuł rozprawy doktorskiej brzmi: „Model sieci komunikacji kwantowej wykorzystujących satelitarno-naziemną dystrybucję zasobów kwantowych". Rozprawa przygotowywana jest w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne w Instytucie Optoelektroniki WAT.

W dniu 12.10.2026 mgr Maciej Wiśniewski złożył do prof. dr. hab. inż. Jana Jabczyńskiego, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej, wniosek o wyznaczenie promotorów rozprawy doktorskiej w następującym składzie:

- Promotor: płk dr hab. inż. Marek Życzkowski, prof. WAT;
- Promotor pomocniczy: dr Artur Czerwiński.

Moja kandydatura do pełnienia funkcji promotora pomocniczego uzyskała poparcie płk. dr. hab. inż. Marka Życzkowskiego, prof. WAT. Na dzień przygotowania Autoreferatu wniosek oczekuje na formalne rozpatrzenie przez właściwą Radę Dyscypliny Naukowej.

01.12.2019 – 30.06.2022 **Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu**

Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej

- **Współpraca z dr Karoliną Sędziak-Kacprowicz,** w okresie gdy była uczestniczką studiów doktoranckich prowadzonych na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UMK. Zakres współpracy:

- wspólne przygotowanie publikacji naukowych [A1] oraz [A2];
- dyskusja nad przygotowywanymi wystąpieniami konferencyjnymi, posterami oraz seminariami dotyczącymi prowadzonych badań;
- krytyczna ocena wstępnego tekstu rozprawy doktorskiej.

Współpraca naukowa oraz wsparcie udzielone przeze mnie w zakresie wstępnej oceny rozprawy doktorskiej zostały podkreślone przez dr Karolinę Sędziak-Kacprowicz w sekcji *Acknowledgements* jej rozprawy doktorskiej pt. „Encoding Quantum Information in Temporal Modes of Photon Pairs", której obrona odbyła się w 2022 r. (promotor: dr hab. Piotr Kolenderski, prof. UMK).

- Współpraca z dr Martą Misiaszek-Schreyner, w okresie gdy była uczestniczką studiów doktoranckich prowadzonych na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UMK. Zakres współpracy:

- konsultacje dotyczące doboru metod tomografii stanu kwantowego do problemu charakteryzacji źródła par splątanych;
- dyskusja uzyskanych wyników oraz doboru metryk służących do oceny jakości splątania kwantowego.

Współpraca została odnotowana w podziękowaniach zamieszczonych w rozprawie doktorskiej pt. „Applications of single-photon technology", obronionej w 2022 r. (promotor: dr hab. Piotr Kolenderski, prof. UMK). W tekście rozprawy znajdują się również bezpośrednie odwołania do numerycznych metod tomografii kwantowej mojego autorstwa oraz cytowania do moich publikacji [33].

- **Współpraca z mgr Jakubem Szlachetką** – doktorantem w szkole Doktorskiej Nauk Ścisłych i Przyrodniczych UMK w Toruniu. Zakres współpracy:

- dyskusję nad problematyką światłowodowej transmisji stanów kwantowych kodowanych na pojedynczych fotonach;
- wspólne przygotowanie publikacji naukowej [A6] – wkład obu stron zgodny z oświadczeniami dołączonymi do wniosku.

Publikacja [A6], będąca wynikiem współpracy z Doktorantem, została ujęta w ramach osiągnięcia A, opisanego w części 4. Autoreferatu. Jednocześnie publikacja ta została wskazana przez mgr Jakuba Szlachetkę jako element cyklu artykułów stanowiących podstawę jego rozprawy doktorskiej. Rozprawa doktorska, przygotowana w formie zbioru publikacji, została złożona w dniu 30.09.2026, a jej promotorem jest dr hab. Piotr Kolenderski, prof. UMK.

7.3. Udział w projektach badawczo-rozwojowych z zakresu technologii kwantowych i komunikacji optycznej realizowanych na zlecenie Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA)

► Multi-Dimensional Free-Space Quantum Key Distribution Protocol

Okres realizacji: od 12.2024 do chwili obecnej

Cel projektu: opracowanie i przetestowanie systemu kwantowej dystrybucji klucza (QKD) wykorzystującego wielowymiarowe kodowanie stanów pojedynczych fotonów z zastosowaniem różnych stopni swobody, w szczególności polaryzacji, czasu i częstotliwości. Projekt ukierunkowany jest na transmisję kwantową w otwartej przestrzeni, z perspektywą zastosowania opracowywanych rozwiązań w łączach satelitarnych.

Zakres mojego wkładu: analiza wydajności protokołów QKD wykorzystujących różne stopnie swobody fotonów oraz modelowanie wpływu atmosfery na transmisję optyczną w wolnej przestrzeni. W szczególności moje zadania obejmują ocenę odporności stanów kwantowych kodowanych w polaryzacji oraz w przedziałach czasowych na zaburzenia powstające podczas propagacji przez turbulentną atmosferę. Prace te wykorzystują moje wcześniejsze doświadczenie badawcze w zakresie modelowania atmosferycznych kanałów optycznych oraz charakteryzacji stanów kwantowych.

► Space Based Links for the Quantum Internet

Okres realizacji: od 09.2024 – w trakcie (planowane zakończenie: listopad 2026)

Cel projektu: opracowanie koncepcji i rozwiązań technologicznych umożliwiających integrację naziemnych sieci kwantowych z infrastrukturą satelitarną, w szczególności w zakresie dystrybucji zasobów kwantowych na duże odległości. Jednym z głównych rezultatów projektu było przygotowanie demonstratora w postaci symulatora satelitarnego Internetu Kwantowego, umożliwiającego analizę wydajności wybranych protokołów w realistycznych warunkach operacyjnych.

Zakres mojego wkładu:

- pełnienie funkcji Lead Researcher, tj. lidera merytorycznego projektu;
- główny wkład w przygotowanie koncepcji naukowo-technicznej projektu na etapie opracowywania wniosku projektowego (*Proposal*);
- opracowanie kompleksowego modelu numerycznego służącego do symulacji wpływu atmosfery na transmisję optyczną zarówno w łączu satelita–Ziemia (*downlink*), jak i w łączu stacja naziemna–satelita (*uplink*);
- opracowanie protokołu rozproszonych obliczeń kwantowych wykorzystującego satelitarną dystrybucję zasobów kwantowych, który został następnie zaimplementowany jako jedna z głównych funkcjonalności symulatora;
- udział w testowaniu symulatora, generowaniu danych oraz weryfikacji uzyskiwanych rezultatów;

- formułowanie wniosków naukowych i technicznych oraz wkład w przygotowanie raportu końcowego projektu.

Projekt miał dla mnie szczególne znaczenie, ponieważ umożliwił wykorzystanie wcześniejszych badań dotyczących propagacji sygnałów optycznych w atmosferze w znacznie szerszym kontekście architektury satelitarnego Internetu Kwantowego. Pełnienie funkcji Lead Researcher wiązało się ponadto z odpowiedzialnością za spójność merytoryczną realizowanych prac badawczo-rozwojowych oraz za powiązanie poszczególnych elementów modelowania z funkcjonalnościami opracowywanego demonstratora.

► CCSDS Standardised Ranging for Optical Communication Terminals

Okres realizacji: 2022–2026

Cel projektu: opracowanie rozwiązań umożliwiających precyzyjny pomiar odległości pomiędzy satelitą na niskiej orbicie okołoziemskiej (LEO) a stacją naziemną oraz rozwój metod wspierających optyczną transmisję danych w łączach satelitarnych.

Zakres mojego wkładu: opracowanie modelu numerycznego transmisji optycznej uwzględniającego najważniejsze zjawiska wpływające na jakość łącza satelita–Ziemia, w tym turbulencje atmosferyczne, fluktuacje natężenia odbieranego sygnału, tłumienie atmosferyczne, dyfrakcję oraz błędy kierowania wiązki. Model umożliwiał analizę parametrów transmisji w zależności od elewacji satelity oraz przyjętych warunków atmosferycznych i stanowił wkład w rozwój emulatora do testów laboratoryjnych.

7.4. Szczególne wyróżnienia i osiągnięcia zawodowe

W toku kariery naukowej otrzymałem wyróżnienia potwierdzające zarówno jakość prowadzonej działalności badawczej, jak i kompetencje w zakresie eksperckiej oceny publikacji naukowych.

- **Stypendium Ministra Edukacji i Nauki dla wybitnych młodych naukowców**, przyznane w 2022 r. na okres trzech lat (pobierane w okresie od 10.2022 do 09.2025). Stypendium stanowiło formę wyróżnienia dotychczasowego dorobku naukowego oraz osiągnięć uzyskanych na wczesnym etapie samodzielnej kariery badawczej.
- **Outstanding Reviewer Award 2023,** tytuł przyznany przez IOP Publishing za szczególną jakość działalności recenzenckiej dla czasopisma „Journal of Physics: Materials" (Identyfikator poświadczenia: 96198633). Wyróżnienie stanowi zewnętrzne potwierdzenie jakości i rzetelności wykonywanych przeze mnie recenzji artykułów naukowych. Informacja o wyróżnieniu jest dostępna pod adresem: https://accreditations.ioppublishing.org/8ca71465-7432-41b8-a19f-47ce74cc4c0c#acc.oZkv1GRc
- **IOP Trusted Reviewer Status**, przyznany w roku 2022 przez IOP Publishing jako potwierdzenie wysokiego poziomu kompetencji w zakresie recenzowania publikacji naukowych (Numer certyfikatu: 57327016). Status ten przyznawany jest recenzentom, którzy ukończyli kurs IOP „Peer Review Excellence", a ich kompetencje w zakresie

rzetelnej oceny manuskryptów zostały zweryfikowane przez wydawcę. Certyfikat można zweryfikować pod adresem: https://accreditations.ioppublishing.org/25b2b5fa-57d0-44a9-b202-8f04b1698f75#gs.awuz8q

Wymienione wyróżnienia dokumentują dwa uzupełniające się aspekty mojej aktywności zawodowej: uznanie dorobku badawczego na poziomie krajowym oraz zewnętrzne potwierdzenie kompetencji eksperckich w międzynarodowym obiegu naukowym. Szczególnie wyróżnienia przyznane przez IOP Publishing pozostają bezpośrednio związane z moją wieloletnią działalnością recenzencką i potwierdzają, że poza publikowaniem własnych wyników uczestniczę również w procesie oceny jakości badań prowadzonych przez innych naukowców.

7.5. Krótkie naukowe wizyty zagraniczne

Uzupełnieniem mojej działalności naukowej i projektowej były krótkoterminowe wizyty w zagranicznych ośrodkach naukowych i badawczo-technologicznych, realizowane na zaproszenie przedstawicieli tych instytucji. Wizyty te służyły bezpośredniej wymianie doświadczeń, prezentacji prowadzonych przeze mnie badań oraz nawiązywaniu i rozwijaniu kontaktów ze środowiskiem międzynarodowym.

- **Korea University, IBS Center for Molecular Spectroscopy and Dynamics (CMSD)**

Miejsce: Seul, Korea Południowa

Termin: 23 sierpnia 2023 r.

Wizytę odbyłem na zaproszenie prof. Tai Hyun Yoona. Jej program obejmował spotkanie z prof. Cho Minhaengiem, Dyrektorem CMSD, a także spotkanie i dyskusję naukową z prof. Yoonem oraz członkami jego grupy badawczej. Istotnym elementem wizyty było wygłoszenie przeze mnie seminarium pt. *Opportunities and challenges of optical communications* dla pracowników naukowych i studentów Centrum oraz plenarna dyskuja.

Wizyta stworzyła możliwość zaprezentowania mojej problematyki badawczej w zagranicznym ośrodku naukowym oraz bezpośredniej wymiany doświadczeń z badaczami zajmującymi się nowoczesnymi technologiami optycznymi i spektroskopowymi. Stanowiła również element rozwijania moich międzynarodowych kontaktów naukowych.

- **European Space Research and Technology Centre (ESTEC)**

Miejsce: Noordwijk, Holandia

Termin: 8 maja 2025 r.

Wizytę w ESTEC odbyłem na zaproszenie Jorge Piris Riopereza z European Space Agency (ESA). Jej celem było omówienie aktualnych i planowanych działań projektowych ESA, zapoznanie się z infrastrukturą badawczą i technologiczną ESTEC oraz wymiana doświadczeń z pracownikami Agencji.

W ramach wizyty uczestniczyłem również w prezentacji i dyskusji dotyczącej realizowanego projektu ESA „MULTI-DIMENSIONAL FREE SPACE QUANTUM KEY DISTRIBUTION

PROTOCOL", związanego z rozwojem technologii kwantowej dystrybucji klucza przeznaczonej do zastosowań w komunikacji satelitarnej. Pobyt w ESTEC umożliwił mi bezpośrednie zapoznanie się z zapleczem badawczo-technologicznym ESA oraz dyskusję nad prowadzonymi i planowanymi pracami w obszarze technologii kosmicznych i komunikacji kwantowej.

7.6. Dodatkowe kwalifikacje zawodowe i ukończone studia podyplomowe

7.6.1. Ukończone studia podyplomowe

W toku kariery zawodowej systematycznie uzupełniałem swoje wykształcenie o kompetencje związane zarówno z działalnością dydaktyczną, jak i z nowymi metodami stosowanymi w badaniach naukowych. Ukończyłem następujące studia podyplomowe:

Uniwersytet WSB Merito we Wrocławiu

- **Artificial Intelligence. Machine Learning**, ukończone 30.05.2026 r.

Akademia Nauk Stosowanych Wincentego Pola w Lublinie

(dawniej: Wyższa Szkoła Społeczno-Przyrodnicza im. Wincentego Pola w Lublinie)

- **Chemia dla nauczycieli**, ukończone 28.02.2021 r.; praca końcowa: *Rozwój poglądów na temat budowy materii – od starożytności do czasów współczesnych*;
- **Zarządzanie oświatą**, ukończone 30.06.2020 r.; praca końcowa: *Marketingowe zarządzanie szkołą niepubliczną*;
- **Fizyka z astronomią dla nauczycieli**, ukończone 29.02.2020 r.; praca końcowa: *Elementy fizyki relatywistycznej w podstawie programowej 4-letniego liceum ogólnokształcącego*;
- **Matematyka dla nauczycieli**, ukończone 29.02.2020 r.; praca końcowa: *Elementy analizy matematycznej w podstawie programowej z 2018 roku – przykłady zadań i scenariusze lekcji*.

Wyższa Szkoła Nauk o Zdrowiu w Bydgoszczy

- **Przygotowanie pedagogiczne – kwalifikacje nauczycielskie**, ukończone 20.10.2019 r.

Ukończone studia z zakresu przygotowania pedagogicznego oraz nauczania matematyki, fizyki i chemii stanowiły formalne uzupełnienie moich kwalifikacji dydaktycznych i znalazły praktyczne zastosowanie w pracy nauczycielskiej oraz w późniejszej działalności związanej z kształceniem nauczycieli na studiach podyplomowych. Z kolei studia z zakresu *Artificial Intelligence. Machine Learning* służyły poszerzeniu kompetencji w zakresie współczesnych

metod analizy danych i uczenia maszynowego, wykorzystywanych również w rozwijanych przeze mnie badaniach naukowych.

7.6.2. Certyfikaty i szkolenia istotne z punktu widzenia wniosku

- Certyfikat zawodowy: **Certified Penetration Tester (CPT)**, Nr G-111731

  Data uzyskania poświadczenia: 16.05.2026

  Wystawca certyfikatu: Global Association for Quality Management (GAQM)

Certyfikat CPT potwierdza wiedzę i kompetencje z zakresu cyberbezpieczeństwa ofensywnego oraz etycznego hakowania. Obejmuje zagadnienia związane z prowadzeniem testów penetracyjnych, tj. kontrolowanych prób ataku na infrastrukturę i systemy IT w celu identyfikacji podatności oraz oceny ich odporności na rzeczywiste zagrożenia. Uzyskane kompetencje stanowią istotne uzupełnienie mojego przygotowania w zakresie bezpieczeństwa systemów komunikacyjnych, w szczególności w kontekście rozwijanych przeze mnie zagadnień związanych z kwantową dystrybucją klucza oraz kryptografią postkwantową.

- **Warsztaty: Kryptografia**

  Termin: 04.05.2026–08.05.2026

  Organizator: Eksperckie Centrum Szkolenia Cyberbezpieczeństwa w Warszawie

Warsztaty obejmowały szeroki zakres zagadnień z obszaru kryptologii, w tym kryptografię symetryczną, steganografię, funkcje skrótu, matematyczne podstawy kryptografii asymetrycznej oraz zagrożenia dla współczesnych systemów kryptograficznych wynikające z rozwoju obliczeń kwantowych. Omówiono i przedyskutowano różne strategie związane z obroną przed kryptoanalizą z wykorzystaniem komputera kwantowego.

7.7. Czynny i bierny udział w innych wydarzeniach ważnych dla wniosku

7.7.1. Udział czynny

Webinar organizowanych przez czasopismo AppliedMath: „From Equations to Impact: Translate Math Research into Real-World Solutions”

Data: 6 czerwca 2025 r., wydarzenie online organizowane przez czasopismo *AppliedMath*

Rola: zaproszony prelegent (Invited Speaker)

Tytuł referatu: *Common mistakes in applying quantum theory to physical systems: a case study*.

W ramach międzynarodowego webinarium naukowego wygłosiłem na zaproszenie 30-minutowy referat poświęcony problemowi poprawności modeli matematycznych stosowanych do opisu układów kwantowych oraz konsekwencjom wynikającym z nieprawidłowego

zastosowania formalizmu mechaniki kwantowej[‡]. Referat ten był dla mnie okazją do zaprezentowania wyników badań, które następnie opublikowane zostały w pracach [A9] oraz [B1]. W wydarzeniu wystąpiło dwóch zaproszonych prelegentów, a po referatach odbyła się wspólna sesja dyskusyjna. Pełne nagranie wydarzenia zostało następnie publicznie udostępnione przez organizatora.

7.7.2 Udział w wydarzeniach branżowych i naukowych z zakresu technologii kwantowych

- **Inside Quantum Technology Nordics 2025**

  Data: 20-22 maja 2025 r.

  Miejsce: Göteborg, Szwecja

  Organizator: IQT

Udział w międzynarodowym wydarzeniu poświęconym rozwojowi technologii kwantowych, obejmującym zagadnienia związane m.in. z komunikacją kwantową, obliczeniami kwantowymi oraz rozwojem europejskiego sektora technologii kwantowych.

- **Workshop on Quantum Satellite Networks**

  Data: 6-7 marca 2025 r.

  Miejsce: Wiedeń, Austria

  Organizator: Europejska Agencja Kosmiczna

Udział w specjalistycznych warsztatach poświęconych rozwojowi satelitarnych sieci kwantowych, bezpośrednio związanych z tematyką realizowanych przeze mnie projektów dotyczących satelitarnej komunikacji kwantowej i Kwantowego Internetu.

‡ https://sciforum.net/event/AppliedMath1, dostęp 19.10.2026

Bibliografia

[kolejność zgodna z kolejnością przywoływania w Autoreferacie]

[1] M. Gurdek, Liczba osiągnięć naukowych albo artystycznych, stanowiących znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny, konieczna do wykazania we wniosku habilitacyjnym, „Roczniki Administracji i Prawa” 22(2), 153–172 (2022). DOI: 10.5604/01.3001.0016.0955.

[2] J.D. Franson, Bell inequality for position and time, „Physical Review Letters” 62, 2205 (1989).

[3] D. Stucki, N. Brunner, N. Gisin, V. Scarani, H. Zbinden, Fast and simple one-way quantum key distribution, „Applied Physics Letters” 87, 194108 (2005).

[4] T. Inagaki, N. Matsuda, O. Tadanaga, M. Asobe, H. Takesue, Entanglement distribution over 300 km of fiber, „Optics Express” 21, 23241 (2013).

[5] T. Ikuta, H. Takesue, Four-dimensional entanglement distribution over 100 km, „Scientific Reports” 8, 817 (2018).

[6] J.M. Donohue, M. Agnew, J. Lavoie, K.J. Resch, Coherent ultrafast measurement of time-bin encoded photons, „Physical Review Letters” 111, 153602 (2013).

[7] P.C. Humphreys, B.J. Metcalf, J.B. Spring, M. Moore, X.-M. Jin, M. Barbieri, W.S. Kolthammer, I.A. Walmsley, Linear optical quantum computing in a single spatial mode, „Physical Review Letters” 111, 150501 (2013).

[8] M. Anderson, T. Müller, J. Skiba-Szymanska, A.B. Krysa, J. Huwer, R.M. Stevenson, J. Heffernan, D.A. Ritchie, A.J. Shields, Gigahertz-clocked teleportation of time-bin qubits with a quantum dot in the telecommunication C band, „Physical Review Applied” 13, 054052 (2020).

[9] Y. Zhou, C. Zhou, Y. Wang, Y.F. Lu, M.S. Jiang, X.X. Zhang, W.S. Bao, Finite-key analysis of practical time-bin high-dimensional quantum key distribution with afterpulse effect, „Chinese Physics B” 31(8), 080303 (2022).

[10] M. Karpiński, A.O. Davis, F. Sośnicki, V. Thiel, B.J. Smith, Control and measurement of quantum light pulses for quantum information science and technology, „Advanced Quantum Technologies” 4(9), 2000150 (2021).

[11] J. Kim, J. Park, H.S. Kim, G. Kim, J.T. Kim, J. Park et al., Fully controllable time-bin entangled states distributed over 100-km single-mode fibers, „EPJ Quantum Technology” 11(1), 53 (2024).

[12] A. Singh, A. Sethia, L. Esmaeilifar, R. Valivarthi, N. Sinclair, M. Spiropulu, D. Oblak, Photonic quantum information with time-bins: Principles and applications, „Physics Reports” 1193, 1–79 (2026).

[13] E. Fitzke, R. Krebs, T. Haase, M. Mengler, G. Alber, T. Walther, Time-dependent POVM reconstruction for single-photon avalanche photodiodes using adaptive regularization, „New Journal of Physics” 24(2), 023025 (2022).

[14] M. Cao, T. Deng, Y. Wang, Dynamical quantum state tomography with time-dependent channels, „Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical” 57, 215301 (2024). DOI: 10.1088/1751-8121/ad45ce.

[15] R.F. Werner, Quantum states with Einstein-Podolsky-Rosen correlations admitting a hidden-variable model, „Physical Review A” 40, 4277 (1989).

[16] J. Jurkowski, Korelacje nieklasyczne. Kwantowe splątanie i dyskord, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń 2014.

[17] H. Wang, K. He, Y. Hao, S. Yang, Quantum tomography with Gaussian noise, „Quantum Information and Computation” 22(13–14), 1144–1157 (2022).

[18] H. Wang, K. He, Quantum tomography of two-qutrit Werner states, „Photonics” 9(10), 741 (2022).

[19] H. Talath, B.P. Govindaraja, B.G. Divyamani, H. Akshata Shenoy, A.R. Usha Devi, Sudha, Three-qubit W state tomography via full and marginal state reconstructions on ibm_osaka, „Quantum Information Processing” 24, 345 (2025).

[20] N. Karimi, M. Yahyavi, Quantum tomography of three-qubit state, „Optics Communications” 580, 131604 (2025).

[21] K. Sengupta, K.M. Shafi, S. Asokan et al., Quantum illumination using polarization-entangled photon pairs for enhanced object detection, „Optics Express” 32(23), 40150 (2024).

[22] M. Krelina, Quantum technology for military applications, „EPJ Quantum Technology” 8(1), 24 (2021).

[23] T. Dohnalik, J. Szudy, Krajowe laboratorium FAMO (KL FAMO). Powstanie i działalność, „Postępy Fizyki” 73(4), 2–15 (2022).

[24] C. Bradac et al., Room-temperature spontaneous superradiance from single diamond nanocrystals, „Nature Communications” 8, 1205 (2017).

[25] *Czy superradiancja w nanodiamentach została dobrze opisana? Polscy fizycy korygują model teoretyczny*, dział „Kwartał Badań”, „Postępy Fizyki” 77(1), 18–21 (2026).

[26] 谢慧辉, 徐超, 李曼婷, 易文豪, 白海, 10 km 1 Gbps 面向超特高压输电线路无信号区域 APT 自由空间光通信, „光学与光电技术” 24(4), 108–116 (2026).

Tłumaczenie opisu bibliograficznego na język angielski: H.-H. Xie, C. Xu, M.-T. Li, W.-H. Yi, H. Bai, 10 km 1 Gbps APT Free-Space Optical Communication for Ultra-High Voltage Transmission Lines in Non-Signal Areas, „Optics & Optoelectronic Technology” 24(4), 108–116 (2026).
URL: https://www.researching.cn/ArticlePdf/m00019/2026/24/4/13.pdf (dostęp: 21.10.2026).

[27] Ю.В. Писецкий, К.А. Вотинов, Б.Г.К. Маратова, Энергетические и атмосферные факторы в выборе между радиочастотными и оптическими технологиями для спутниковых систем связи, „Raqamli iqtisodiyot (Цифровая экономика)” 13 (2025), 180–191.
URL: https://cyberleninka.ru/article/n/energeticheskie-i-atmosfernye-faktory-v-vybore-

mezhdu-radiochastotnymi-i-opticheskimi-tehnologiyami-dlya-sputnikovyh-sistem-svyazi (dostęp: 21.10.2026).

[28] K. Banaszek, M. Jachura, P. Kolenderski, M. Lasota, Optimization of intensity-modulation/direct-detection optical key distribution under passive eavesdropping, „Optics Express" 29(26), 43091–43103 (2021).

[29] A. Czerwinski, M. Jarzyna, M. Jachura, M. Kucharczyk, M. Lasota, K. Banaszek, Optical key distribution modeling via a satellite downlink under weak atmospheric turbulence, IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications, Vancouver, Kanada, 11 –13 października 2023 r. DOI: 10.13140/RG.2.2.12942.13121.

[30] M. Kucharczyk, M. Jarzyna, M. Lasota, P. Kolenderski, J.P. Turkiewicz, P.J. Urban, K. Banaszek, Experimental realization of optical key distribution under strong wiretap eavesdropping, „Applied Optics" 65(28), 9585–9591 (2026).

[31] M. Lasota et al., Quantum Key Distribution-as-a-Service for end-to-end security in multi-orchestrated 6G networks, „Opto-Electronics Review" 33(3), e155875 (2025). DOI: 10.24425/opelre.2025.155875.

[32] K.M. Shafi, A. Padhye, C.M. Chandrashekar, Quantum illumination using polarization-path entangled single photons for low reflectivity object detection in a noisy background, „Optics Express" 31(20), 32093–32104 (2023).

[33] M. Misiaszek-Schreyner, Applications of single-photon technology, arXiv:2205.10221 (2022). URL: https://arxiv.org/abs/2205.10221.

PODPIS ZAUFANY
ARTUR
CZERWIŃSKI
26.10.2026 11:33:41 GMT+1
Dokument podpisany elektronicznie
podpisem zaufanym

……..……..…….

(podpis wnioskodawcy)

Kandydat: Artur Czerwiński

Wykaz osiągnięć naukowych albo artystycznych, stanowiących znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny

Informacje zawarte w poszczególnych punktach tego dokumentu powinny uwzględniać podział na okres przed uzyskaniem stopnia doktora oraz po jego uzyskaniu.

I. WYKAZ OSIĄGNIĘĆ NAUKOWYCH ALBO ARTYSTYCZNYCH, O KTÓRYCH MOWA W ART. 219 UST. 1. PKT 2 USTAWY

1. Monografie naukowe, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2a ustawy; lub

BRAK

2. Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b ustawy; lub

Osiągnięcie A: Rozwój formalnych narzędzi do rekonstrukcji i charakteryzacji stanów kwantowych w realistycznych warunkach eksperymentalnych

Osiągnięcie A zostało przedstawione w formie cyklu powiązanych tematycznie publikacji naukowych, o którym mowa w **art. 219 ust. 1 pkt 2 lit. b** ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

Na osiągnięcie A składa się **cykl 9 publikacji naukowych** opublikowanych w latach 2020–2025:

[A1] K. Sedziak-Kacprowicz, A. Czerwinski, P. Kolenderski, *Tomography of time-bin quantum states using time-resolved detection.* "Physical Review A" Tom **102** (Nr 5), 052420 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevA.102.052420

IF (2025): 3.0

[A2] A. Czerwinski, K. Sedziak-Kacprowicz, P. Kolenderski, *Phase estimation of time-bin qudits by time-resolved single-photon counting.* "Physical Review A" Tom **103** (Nr 4), 042402 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevA.103.042402

IF (2025): 3.0

[A3] A. Czerwinski, *Quantum state tomography with informationally complete POVMs generated in the time domain.* "Quantum Information Processing" Tom **20** (Nr 3), 105 (2021). DOI: 10.1007/s11128-021-03045-9

IF (2025): 2.2

[A4] A. Czerwinski, *Quantifying entanglement of two-qubit Werner states.* "Communications in Theoretical Physics" Tom **73** (Nr 8), 085101 (2021). DOI: 10.1088/1572-9494/ac01e1

IF (2025): 3.5

[A5] A. Czerwinski, *Quantum tomography of three-qubit generalized Werner states.* "International Journal of Modern Physics B" Tom **36** (Nr 19), 2250108 (2022). DOI: 10.1142/S0217979222501089

IF (2025): 2.3

[A6] A. Czerwinski, J. Szlachetka, *Efficiency of photonic state tomography affected by fiber attenuation.* "Physical Review A" Tom **105** (Nr 6), 062437 (2022). DOI: 10.1103/PhysRevA.105.062437

IF (2025): 3.0

[A7] A. Czerwinski, *Quantum tomography of entangled qubits by time-resolved single-photon counting with time-continuous measurements.* "Quantum Information Processing" Tom **21** (Nr 9), 332 (2022). DOI: 10.1007/s11128-022-03682-8

IF (2025): 2.2

[A8] A. Czerwinski, S. Haddadi, *Optimizing QKD efficiency by addressing chromatic dispersion and time measurement uncertainty.* "Physics Letters A" Tom **526**, 129972 (2024). DOI: 10.1016/j.physleta.2024.129972

IF (2025): 2.7

[A9] A. Czerwinski, J. J. Borkowski, *Quantum illumination using polarization-entangled photon pairs for enhanced object detection: comment*. "Optics Express" Tom **33** (Nr 18), 38005-38008 (2025). DOI: 10.1364/OE.548099

IF (2025): 3.4

3. Zrealizowane oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne, technologiczne lub artystyczne, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2c ustawy;

BRAK

4. Inne, niż wymienione w pkt. I.1-3, osiągnięcia naukowe lub artystyczne.

Osiągnięcie B: Opracowanie fizycznie spójnego modelu matematycznego opisującego zjawisko nadpromienistości

Osiągnięcie B stanowi odrębny wkład Habilitanta w rozwój dyscypliny nauki fizyczne i zostało wyodrębnione na podstawie publikacji przedstawionej poniżej wraz z materiałem uzupełniającym.

[B1] J.J. Borkowski, A. Czerwinski, P. Kolenderski, *Revisiting superradiance dynamics from single diamond nanocrystals with a physically consistent model for fluorescence decay*. "Nature Communications" Tom **17** (Nr 1), 58 (2026). DOI: 10.1038/s41467-025-67847-6

IF (2025): 15.7

Suplement do publikacji dostępny jest za pośrednictwem linku: https://static-content.springer.com/esm/art%3A10.1038%2Fs41467-025-67847-6/MediaObjects/41467_2025_67847_MOESM1_ESM.pdf

Publikacja została opublikowana w czasopiśmie „Nature Communications", należącym do grupy *Nature Portfolio* i zaliczanym do najbardziej rozpoznawalnych multidyscyplinarnych czasopism naukowych (obecny Impact Factor wynosi 15.7). Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że praca została opublikowana w dziale Matters Arising, przeznaczonym do krytycznej analizy oraz naukowej weryfikacji wyników opublikowanych wcześniej na łamach czasopisma. Publikacje tego typu pełnią istotną rolę w procesie kontroli nauki, umożliwiając identyfikację błędów interpretacyjnych, nieścisłości metodologicznych oraz ograniczeń modeli teoretycznych wykorzystywanych w literaturze naukowej.

Osiągnięcie C: Modelowanie atmosferycznych kanałów optycznych oraz ocena wydajności satelitarnych systemów dystrybucji klucza kryptograficznego

Osiągnięcie C stanowi odrębny nurt badawczy Habilitanta związany z modelowaniem atmosferycznych kanałów optycznych oraz analizą wydajności systemów kwantowej komunikacji satelitarnej. Na osiągnięcie składają się rezultaty opublikowane w trzech oryginalnych pracach badawczych:

[C1] A. Czerwinski, *Atmospheric modeling of free-space optical transmission: satellite downlinks and horizontal channels*. "Optical and Quantum Electronics" Tom **57** (Nr 10), 577 (2025). DOI: 10.1007/s11082-025-08505-5

IF (2025): - IF (2024): 4.0

[C2] A. Czerwinski, M. Lasota, M. Jarzyna, M. Kucharczyk, M. Jachura, K. Banaszek, *Modeling Optical Key Distribution over a Satellite-to-Ground Link Under Weak Atmospheric Turbulence*. "IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics" Tom **32** (Nr 1), 3300113 (2026). DOI: 10.1109/JSTQE.2025.3597073

IF (2025): 4.5

[C3] A. Czerwinski, J.J. Borkowski, M. Wiśniewski, S. Haddadi, *Optical downlink modeling for low-earth-orbit and medium-earth-orbit satellites under atmospheric turbulence with a quantum-state-tomography use case.* "Physical Review A" Tom **114** (Nr 8), 022602 (2026). DOI: 10.1103/z9rv-yl1w

IF (2025): 3.0

Osiągnięcie C zostało wyodrębnione jako oddzielne osiągnięcie naukowe, ponieważ dotyczy niezależnego problemu badawczego względem osiągnięcia A. Podczas gdy osiągnięcie A koncentruje się na rekonstrukcji i charakteryzacji stanów kwantowych na podstawie wyników pomiarów, osiągnięcie C poświęcone jest modelowaniu otwartego kanału transmisyjnego wykorzystywanego do przesyłania informacji kwantowej (bądź klasycznej) oraz analizie wpływu atmosfery na wydajność systemów komunikacji satelitarnej.

Prace [C1], [C2] oraz [C3] tworzą spójny ciąg badań obejmujący opracowanie i analizę modeli atmosferycznych kanałów optycznych, ocenę wpływu turbulencji atmosferycznych na transmisję sygnałów optycznych (klasycznych bądź kwantowych) oraz ilościową analizę wydajności protokołów kwantowej dystrybucji klucza realizowanych z wykorzystaniem łączy satelitarnych. Wyniki te stanowią istotny wkład w rozwój narzędzi wykorzystywanych do projektowania przyszłych systemów satelitarnej komunikacji kwantowej. Metody opracowane i zaimplementowane przez Habilitanta pozwalają modelować budżet łącza satelitarnego jako proces stochastyczny, którego przebieg uzależniony jest od wielu zmiennych charakteryzujących kanał, w tym turbulentne własności atmosfery.

W przypadku prac dwu- lub wieloautorskich zaleca się złożenie oświadczenia przez habilitanta oraz współautorów wskazujące na ich merytoryczny (a NIE procentowy) wkład w powstanie każdej pracy [np. twórca hipotezy badawczej, pomysłodawca badań, wykonanie specyficznych badań (np. przeprowadzenie konkretnych doświadczeń, opracowanie i zebranie ankiet, itp.), wykonanie analizy wyników, przygotowanie manuskryptu artykułu, i inne]. Określenie wkładu danego autora, w tym habilitanta, powinno być na tyle precyzyjne, aby umożliwić dokładną ocenę jego udziału i roli w powstaniu każdej pracy.

Osiągnięcia A, B oraz C, stanowiące znaczny wkład w rozwój dyscypliny nauki fizyczne w rozumieniu w art. 219 ust. 1. pkt 2 Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, zostały szczegółowo omówione w Autoreferacie. **Osiągnięcie A stanowi wiodące osiągnięcie habilitacyjne o szczególnej formie cyklu powiązanych tematycznie artykułów naukowych, zgodnie wymaganiami określonymi w art. 219 ust. 1. pkt 2b ustawy.**

Integralną częścią dokumentacji są pisemne oświadczenia Kandydata oraz współautorów, które pozwalają na dokładną ocenę wkładu poszczególnych osób – zarówno w wymiarze **jakościowym** (opis merytoryczny) jak i **ilościowym** (podanie wkładu procentowego, zgodnie z aktualnym wzorem oświadczenia obowiązującym na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu).

II. WYKAZ AKTYWNOŚCI NAUKOWEJ ALBO ARTYSTYCZNEJ

1. Wykaz członkostwa w redakcjach naukowych monografii.

BRAK

2. Wykaz wystąpień na krajowych lub międzynarodowych konferencjach naukowych lub artystycznych, z wyszczególnieniem przedstawionych wykładów na zaproszenie i wykładów plenarnych.

PO UZYSKANIU STOPNIA DOKTORA

W okresie po uzyskaniu stopnia doktora do chwili złożenia wniosku wykazem uczestniczyłem czynnie w 11 krajowych i międzynarodowych konferencjach, warsztatach i szkołach naukowych, prezentując wyniki badań w formie wykładów, wystąpień ustnych oraz posterów. Wśród tych wystąpień znalazły się dwa wykłady na zaproszenie oraz dwa wystąpienia typu *keynote speech*.

1. School on Space Quantum Technology: communication, computing and sensors, 15–17 grudnia 2025, Toruń, Polska; wykład na zaproszenie: *Modeling optical signal propagation through the atmosphere*.

2. 4th International Conference on Advanced Materials and Equipment Manufacturing (AMEM 2025), 4–6 grudnia 2025, Zhengzhou, Chiny; wykład typu keynote speech: *Satellite Based Quantum Internet: Optical Technologies in Space*.

3. 6th International Conference on Telecommunications, Optics and Computer Science (TOCS 2025), 21–23 listopada 2025, Nanyang, Chiny; wykład typu keynote speech: *Satellite Based Quantum Internet: Optical Technologies in Space*.

4. Quantum Information Networks (QIN) Workshop, 9–10 września 2025, Noordwijk, Holandia; wystąpienie ustne: *Space Based Links for the Quantum Internet*.

5. 7th International Conference on Photonics Research (INTERPHOTONICS 2025), 7–14 kwietnia 2025, Ölüdeniz, Turcja; wykład na zaproszenie: *Optimizing QKD efficiency in fiber-based networks*.

6. IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 11–13 października 2023, Vancouver, Kanada; poster: *Optical key distribution modeling via a satellite downlink under weak atmospheric turbulence*.

7. Quantum SpeedUp 2022, 5–8 grudnia 2022, Gdańsk, Polska; wystąpienie ustne: *Quantum tomography of time-bin entangled photon pairs*.

8. Single Photon Workshop 2022 (SPW 2022), 31 października – 4 listopada 2022, Seul, Korea Południowa; wystąpienie ustne: *Quantification of time-bin entanglement by time-resolved photon counting*.

9. VI Polska Konferencja Optyczna (PKO 2022), 12–15 czerwca 2022, Płock, Polska wystąpienie ustne: *Analiza jakości źródła par fotonów splątanych w czasie*.
10. XLVII Kongres Fizyków Polskich, 19–23 września 2021, Bydgoszcz, Polska; wystąpienie ustne: *Rekonstrukcja stanu kwantowego splątanych w czasie par fotonów*.
11. Quantum Optics X, 5–11 września 2021, Toruń, Polska; poster: *Quantum tomography of time-bin states by time-resolved single-photon counting*.

PRZED UZYSKANIEM STOPNIA DOKTORA

Przed uzyskaniem stopnia doktora uczestniczyłem czynnie w krajowych i międzynarodowych konferencjach oraz spotkaniach naukowych, prezentując wyniki badań w formie wystąpień ustnych i posterów. Poniższe zestawienie przedstawia listę najważniejszych konferencji, z pominięciem wydarzeń o charakterze typowo studenckim/doktoranckim.

1. 22nd Central European Workshop on Quantum Optics (CEWQO), 6–10 lipca 2015, Warszawa, Polska; poster: *New Developments in the Stroboscopic Tomography*.
2. 47 Symposium on Mathematical Physics, 19–21 czerwca 2015, Toruń, Polska; poster: *Index of Cyclicity for a Generator of Evolution Given by Two Double Commutators*.
3. OPTO Meeting for Young Researchers, 27–30 maja 2015, Wrocław, Polska; wystąpienie ustne: *Applications of the Stroboscopic Tomography to Pauli Channels*.
4. OPTO Meeting for Young Researchers, 3–6 lipca 2013, Toruń, Polska; wystąpienie ustne: *Time evolution of open quantum systems*.
5. Conference on Quantum Information and Quantum Control IV, 8–12 sierpnia 2011, Toronto, Kanada; poster: *Phase retrieval from intensity measurements*.

3. Wykaz udziału w komitetach organizacyjnych i naukowych konferencji krajowych lub międzynarodowych, z podaniem pełnionej funkcji.

PO UZYSKANIU STOPNIA DOKTORA

W toku działalności naukowej uczestniczyłem w pracach komitetów naukowych, programowych i technicznych międzynarodowych konferencji naukowych z zakresu m.in. optyki, fotoniki, telekomunikacji, technologii cyfrowych oraz metod obliczeniowych. Pełniłem następujące funkcje:

1. Technical Committee Member – *5th International Conference on Advanced Materials and Equipment Manufacturing (AMEM 2026)*, 11–13 grudnia 2026, Wuhan, Chiny.
2. Academic Committee Member – *4th International Conference on Big Data, Computational Intelligence and Applications (BDCIA 2026)*, 6–8 listopada 2026, Huanggang, Chiny.
3. Technical Committee Member – *3rd International Conference on Communication, Information and Digital Technologies (CIDT 2026)*, 11–13 września 2026, Singapur.
4. Technical Committee Member – *4th International Conference on Advanced Materials and Equipment Manufacturing (AMEM 2025)*, 4–6 grudnia 2025, Zhengzhou, Chiny.
5. Technical Program Member – *6th International Conference on Telecommunications, Optics and Computer Science (TOCS 2025)*, 21–23 listopada 2025, Nanyang, Chiny.
6. Academic Committee Member – *3rd International Conference on Big Data, Computational Intelligence and Applications (BDCIA 2025)*, 14–16 listopada 2025, Huanggang, Chiny.
7. Conference Chair – *2025 International Conference on Laser, Optical Technology and Applications (LOTA 2025)*, 29–31 sierpnia 2025, Kunming, Chiny.
8. Technical Program Committee – *The 3rd International Conference on Optical Communication and Optical Information Processing (OCOIP2025)*, 1–3 sierpnia 2025, Hefei, Chiny.
9. Technical Program Committee – *The International Conference on Optoelectronic Materials and Advanced Manufacturing (OMAM 2025)*, 23–25 maja 2025, Wuhan, Chiny.
10. Technical Program Member – *5th International Conference on Telecommunications, Optics and Computer Science (TOCS 2024)*, 26–27 grudnia 2024, Sanya, Chiny.
11. Technical Program Committee – *The 2nd International Conference on Optical Communication and Optical Information Processing (OCOIP2024)*, 20–22 grudnia 2024, Wuhan, Chiny.

12. Technical Program Committee – *International Conference on Optical Communication and Optical Information Processing (OCOIP2023)*, 13–15 listopada 2023, Sanya, Chiny.

13. Program Committee Member – *2021 International Conference on Bioengineering, Biomedical Signal and Image Processing (BIOMESIP 2021)*, 19–21 lipca 2021, Maspalomas, Gran Canaria, Hiszpania.

Łącznie pełniłem funkcje w komitetach naukowych, programowych lub technicznych 13 międzynarodowych konferencji naukowych, w tym funkcję **Conference Chair** podczas 2025 International Conference on Laser, Optical Technology and Applications (LOTA 2025). Moja rola jako **Conference Chair** w LOTA 2025 została oficjalnie udokumentowana w opublikowanych materiałach pokonferencyjnych **SPIE Proceedings Volume 14004**, pierwsze strony materiałów, tzw. Front Matter, dostępne są w trybie otwartego dostępu na stronie internetowej wydawcy: https://doi.org/10.1117/12.3106800, dostęp 17.10.2026.

PRZED UZYSKANIEM STOPNIA DOKTORA

BRAK

4. Wykaz uczestnictwa w pracach zespołów badawczych realizujących projekty finansowane w drodze konkursów krajowych lub zagranicznych, z podziałem na projekty zrealizowane i będące w toku realizacji, oraz z uwzględnieniem informacji o pełnionej funkcji w ramach prac zespołów.

PO UZYSKANIU STOPNIA DOKTORA

4.1. Projekty będące w toku realizacji

1. Space Based Links for the Quantum Internet

Okres realizacji: od 09.2024 r.; planowane zakończenie: 11.2026 r.

Instytucja finansująca: European Space Agency (ESA)

Funkcja: Lead Researcher

2. European Quantum Academy (EQA)

Okres realizacji: od 05.2026 r.; projekt zaplanowany na okres 4 lat

Instytucja finansująca: Komisja Europejska

Funkcja: Koordynator projektu z ramienia partnera uczestniczącego w konsorcjum

3. Multi-Dimensional Free-Space Quantum Key Distribution Protocol

Okres realizacji: od 12.2024 r.

Instytucja finansująca: European Space Agency (ESA)

Funkcja: Researcher

4.2. Projekty zrealizowane

1. CCSDS Standardised Ranging for Optical Communication Terminals

Instytucja finansująca: European Space Agency (ESA)

Funkcja: Researcher

Okres: 2023-2026

2. Quantum Optical Technologies (QOT) / Kwantowe Technologie Optyczne

Instytucja finansująca: Fundacja na rzecz Nauki Polskiej (FNP), program Międzynarodowe Agendy Badawcze (MAB FENG)

Funkcja: wykonawca projektu na stanowisku *post-doc*

Okres zatrudnienia do projektu: 01.12.2022 – 31.12.2023

3. Bezpieczna komunikacja kwantowa w multipleksowanych sieciach optycznych

Instytucja finansująca: Narodowe Centrum Nauki (NCN), program OPUS

Funkcja: wykonawca nieetatowy

Okres: 01.10.2021 – 03.10.2026

4. Samokalibrujący elektroniczny kontroler satelitarnego generatora splątania kwantowego

Instytucja finansująca: Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBR)

Funkcja: członek zespołu badawczego UMK realizującego zadania w ramach podwykonawstwa

Okres mojej aktywności w zespole podwykonawczym: 07.2020–12.2020

5. Applications of single-photon technologies

Instytucja finansująca: Fundacja na rzecz Nauki Polskiej (FNP), program FIRST TEAM

Funkcja: wykonawca projektu na stanowisku *post-doc*

Okres mojego zatrudnienia przy projekcie: 1.12.2019 – 30.08.2020

PRZED UZYSKANIEM STOPNIA DOKTORA

4.3. Projekty zrealizowane

1. Niemarkowowska dynamika kwantowa

Instytucja finansująca: Narodowe Centrum Nauki (NCN), program OPUS

Funkcja: stypendysta-doktorant

Okres: 1.05.2016 – 31.12.2018

2. Rozwiązalność, chaos i sterowanie w układach kwantowych

Instytucja finansująca: Narodowe Centrum Nauki (NCN), program MAESTRO

Funkcja: wykonawca na stanowisku asystenta

Okres mojego zatrudnienia przy projekcie: 1.10.2014 – 30.04.2016

5. Wykaz członkostwa w międzynarodowych lub krajowych organizacjach i towarzystwach naukowych wraz z informacją o pełnionych funkcjach.

PO UZYSKANIU STOPNIA DOKTORA

Organizacja: Institute of Physics (IOP)

Okres przynależności: 10.04.2025 – 31.12.2025

Pełniona funkcja: Associate Member

PRZED UZYSKANIEM STOPNIA DOKTORA

BRAK

6. Wykaz staży w instytucjach naukowych lub artystycznych, w tym zagranicznych, z podaniem miejsca, terminu, czasu trwania stażu i jego charakteru.

PO UZYSKANIU STOPNIA DOKTORA

BRAK

PRZED UZYSKANIEM STOPNIA DOKTORA

03.07.2011 – 29.09.2011	Institute for Quantum Computing, Waterloo, Kanada
	Quantum Photonics Laboratory Group
	stanowisko: research assistant/long-term visitor
	charakter stażu: staż studencki w laboratorium badawczym

7. Wykaz członkostwa w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism wraz z informacją o pełnionych funkcjach (np. redaktora naczelnego, przewodniczącego rady naukowej, itp.).

PO UZYSKANIU STOPNIA DOKTORA

Moja działalność redakcyjna obejmuje zarówno stałe członkostwo w zespołach redakcyjnych czasopism naukowych, jak i pełnienie funkcji redaktora gościnnego wydania specjalnego. Wiąże się ona z oceną merytoryczną zgłaszanych prac, podejmowaniem decyzji redakcyjnych oraz współpracą z autorami i recenzentami w toku procesu publikacyjnego. Podejmując decyzje redakcyjne zawsze kieruję się rzetelną i obiektywną oceną treści nadsyłanych prac naukowych.

- AppliedMath (ISSN 2673-9909),
  Funkcja: Editorial Board Member
  Okres: od 9 maja 2022 r. do chwili obecnej

W ramach działalności w zespole redakcyjnym uczestniczę w bieżącym procesie oceny manuskryptów zgłaszanych do czasopisma. Na dzień złożenia wniosku habilitacyjnego podjąłem 40 decyzji redakcyjnych dotyczących zgłoszonych manuskryptów.

- Universe (ISSN 2218-1997)

Funkcja: Early-Career Editorial Board Member

Okres: od 6 czerwca 2025 r. do chwili obecnej

- Discover Quantum Science

Funkcja: Editorial Board Member

Okres: od 14 lipca 2025 r. do 19 marca 2026 r.

- Frontiers in Quantum Science and Technology (ISSN 2813-2181)

Funkcja: Review Editor (Community reviewer)

Okres: od 9 września 2022 r. do chwili obecnej

- Photonics

Funkcja: Guest Editor

Okres: od 28 lutego 2022 r. do 30 czerwca 2023 r.

Pełnienie funkcji Guest Editor związane było z koordynowaniem wydania specjalnego „Photonic State Tomography: Methods and Applications”, poświęconego metodom i zastosowaniom tomografii stanów fotonicznych.

PRZED UZYSKANIEM STOPNIA DOKTORA

BRAK AKTYWNOŚCI REDAKCYJNEJ

8. Wykaz recenzowanych prac naukowych lub artystycznych, w szczególności publikowanych w czasopismach międzynarodowych.

   PO UZYSKANIU STOPNIA DOKTORA

Prowadzę regularną działalność recenzencką na rzecz krajowych i międzynarodowych czasopism naukowych, przede wszystkim z zakresu fizyki, informacji i technologii kwantowych, optyki i fotoniki oraz nauk matematycznych. **Do chwili przygotowania niniejszego wykazu powierzono mi do recenzji łącznie 106 odrębnych manuskryptów w 53 czasopismach naukowych.** Lista czasopism, w kolejności arbitralnej, znajduje się poniżej. W poniższym zestawieniu liczba przypisana do danego czasopisma oznacza liczbę odrębnych manuskryptów przekazanych mi do recenzji, a nie liczbę sporządzonych raportów recenzenckich. Kolejne rundy recenzji tego samego manuskryptu, w szczególności ponowna ocena pracy po wprowadzeniu przez autorów poprawek, **nie są liczone** jako odrębne recenzowane prace. Ze względu na poufny charakter procesu recenzyjnego nie podaję tytułów ani innych danych umożliwiających identyfikację recenzowanych manuskryptów.

Lp.	Czasopismo	Liczba recenzowanych manuskryptów
1	npj Quantum Information	2
2	Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical	5
3	Scientific Reports	4
4	Quantum Information and Computation	3
5	Entropy	15
6	Applied Sciences	5
7	Photonics	5
8	Sensors	2

Lp.	Czasopismo	Liczba recenzowanych manuskryptów
9	Quantum Reports	1
10	Machine Learning: Science and Technology	1
11	Acta Physica Polonica A	1
12	Electronics	2
13	Cryptography	1
14	Universe	3
15	Open Journal of Mathematical Sciences	2
16	AppliedMath	1
17	Axioms	2
18	Crystals	1
19	Acoustics	1
20	Processes	1
21	Optics	2
22	Mathematics	4
23	Physica Scripta	1
24	Symmetry	5
25	Quantum Information Processing	4
26	New Journal of Physics	1
27	Laser Physics Letters	1
28	Fractal and Fractional	1
29	Quantum Science and Technology	2
30	J — Multidisciplinary Scientific Journal	1
31	Optical and Quantum Electronics	1

Lp.	Czasopismo	Liczba recenzowanych manuskryptów
32	Optics Express	2
33	Journal of Sensor and Actuator Networks	1
34	Dynamics	1
35	Journal of Physics: Materials	1
36	Measurement Science and Technology	1
37	Classical and Quantum Gravity	2
38	Information	1
39	Physica A: Statistical Mechanics and its Applications	1
40	Communications in Theoretical Physics	1
41	Journal of Optics	1
42	Physics Letters A	1
43	International Journal of Quantum Information	1
44	Natural Computing	1
45	EPJ Quantum Technology	1
46	Applied Physics B	1
47	International Journal of Theoretical Physics	2
48	Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics	1
49	Decisions in Economics and Finance	1
50	Academia Quantum	1
51	ChemEngineering	1
52	Magnetism	1
53	IEEE Journal on Selected Areas in Communications	1
	Łącznie	**106**

Większość wykonanych recenzji została zweryfikowana przez bazę Web of Science i jest widoczna w publicznym profilu https://www.webofscience.com/wos/author/record/C-9128-2015 (dostęp 22.10.2026).

PRZED UZYSKANIEM STOPNIA DOKTORA
BRAK AKTYWNOŚCI RECENZENCKIEJ

9. Wykaz uczestnictwa w programach europejskich lub innych programach międzynarodowych.

PO UZYSKANIU STOPNIA DOKTORA

European Quantum Academy (EQA)

Program: **Digital Europe Programme**

Okres realizacji: od 01.05.2026 – projekt zaplanowany na okres 4 lat

Rola: **Koordynator projektu na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu**, który jest jednym z partnerów w konsorcjum realizującym projekt.

Zakres udziału: koordynacja realizacji zadań UMK w ramach międzynarodowego konsorcjum projektu, udział w pracach konsorcjum, planowanie i monitorowanie realizacji zadań oraz współpraca z władzami uczelni i liderami projektu.

PRZED UZYSKANIEM STOPNIA DOKTORA
BRAK

10. Wykaz udziału w zespołach badawczych, realizujących projekty inne niż określone w pkt. II.4.

PO UZYSKANIU STOPNIA DOKTORA

Projekty zrealizowane

Tytuł projektu: *Phenomenological Study of Entangled Top Quark Pairs*

Instytucja realizująca: School of Particles and Accelerators, Institute for Research in Fundamental Sciences (IPM), Iran

Okres realizacji: 01.01.2025–31.12.2025

Funkcja: zagraniczny współpracownik naukowy (*Foreign Collaborator*)

Kierownik projektu: Dr. Saeed Haddadi

W ramach projektu zostałem formalnie zaproszony jako zagraniczny współpracownik naukowy do zespołu realizującego badania dotyczące własności kwantowych par kwarków top. Rezultatem współpracy jest manuskrypt:

S. Haddadi, M. Azizi, A. Czerwinski, H. Arian Zad, *Experimental probe of quantum coherence in top-quark pair production*, arXiv:2602.21069 (2026),

https://doi.org/10.48550/arXiv.2602.21069

który na dzień przygotowania dokumentacji habilitacyjnej znajduje się w procesie recenzji w czasopiśmie *Physics Letters B*.

PRZED UZYSKANIEM STOPNIA DOKTORA
BRAK

11. Wykaz uczestnictwa w zespołach oceniających wnioski o finansowanie badań, wnioski o przyznanie nagród naukowych, wnioski w innych konkursach mających charakter naukowy lub dydaktyczny.

BRAK

III. WSPÓŁPRACA Z OTOCZENIEM SPOŁECZNYM I GOSPODARCZYM

1. Wykaz dorobku technologicznego.

PO UZYSKANIU STOPNIA DOKTORA

Demonstrator satelitarnego Internetu Kwantowego – projekt ESA „Space Based Links for the Quantum Internet" (realizowany w latach 2024–2026)

Współudział w opracowaniu demonstratora w postaci oprogramowania symulacyjnego umożliwiającego analizę satelitarnej dystrybucji zasobów kwantowych oraz realizacji wybranych protokołów Kwantowego Internetu. Mój wkład obejmował opracowanie modelu numerycznego atmosferycznych kanałów optycznych dla transmisji *downlink* i *uplink*, opracowanie protokołu rozproszonych obliczeń kwantowych zaimplementowanego jako jedna z funkcjonalności symulatora oraz udział w testowaniu i walidacji demonstratora.

PRZED UZYSKANIEM STOPNIA DOKTORA
BRAK

2. Współpraca z sektorem gospodarczym.

PO UZYSKANIU STOPNIA DOKTORA

- Projekt: „TAMAbox – wirtualne i fizyczne urządzenia chroniące przed atakami typu DDoS (Distributed Denial of Service)”
  Zamawiający: EXATEL S.A.
  Podwykonawca: STARTOVA UMK Sp. z o.o.
  Okres realizacji prac podwykonawczych: 23.03.2026 – 27.08.2026

W ramach zespołu podwykonawczego STARTOVA UMK Sp. z o.o. odpowiadałem za przygotowanie raportu dotyczącego analizy ryzyka oraz modelu zagrożeń związanych z atakami na własność intelektualną, ze szczególnym uwzględnieniem ochrony oprogramowania przed kradzieżą oraz inżynierią wsteczną. W ramach tego zadania przeprowadziłem przegląd procesu standaryzacji algorytmów kryptografii postkwantowej (**PQC**) prowadzonego przez National Institute of Standards and Technology (NIST), a także przygotowałem matematyczną analizę podstaw bezpieczeństwa wybranych algorytmów PQC.

Przygotowany przeze mnie samodzielnie raport stanowił rezultat **Etapu I** prac podwykonawczych realizowanych na rzecz EXATEL S.A. Ponadto uczestniczyłem w przygotowaniu raportu w ramach **Etapu IV** (ostatni etap umowy podwykonawczej), którego celem było sformułowanie rekomendacji dotyczących możliwości wykorzystania algorytmów PQC do ochrony oprogramowania przed atakami na własność intelektualną i próbami inżynierii wstecznej.

- Projekt: „Samokalibrujący elektroniczny kontroler satelitarnego generatora splątania kwantowego”

Okres mojej aktywności w zespole podwykonawczym: 07.2020–12.2020

Finansowanie: Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Beneficjent: Syderal Polska, obecnie AROBS Polska Sp. z o.o.

Podwykonawcy: Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu oraz Uniwersytet Gdański

Rola: wykonawca prac badawczo-rozwojowych

Projekt dotyczył opracowania rozwiązań przeznaczonych do satelitarnego systemu komunikacji wykorzystującego pary fotonów splątanych w polaryzacji. Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, jako podwykonawca przedsiębiorstwa Syderal Polska, odpowiadał za przygotowanie i charakteryzację źródła par fotonów splątanych.

Mój wkład obejmował opracowanie metody numerycznej służącej do ilościowej oceny jakości splątania generowanego przez źródło. Opracowałem algorytm przetwarzający surowe dane eksperymentalne w macierz gęstości opisującą stan pary splątanych fotonów. Metoda wykorzystywała narzędzia estymacji stanu kwantowego, uzupełnione o opracowaną przeze mnie procedurę numeryczną ograniczającą wpływ błędów eksperymentalnych na wynik rekonstrukcji. Na podstawie otrzymanej macierzy gęstości możliwe było wyznaczanie miar splątania, w szczególności *concurrence* oraz *entanglement of formation*, i tym samym ilościowa ocena jakości działania źródła.

Realizacja tych prac stanowiła przykład bezpośredniego wykorzystania moich kompetencji z zakresu tomografii stanów kwantowych i charakteryzacji splątania w projekcie badawczo-rozwojowym realizowanym we współpracy z przedsiębiorstwem sektora technologii kosmicznych.

PRZED UZYSKANIEM STOPNIA DOKTORA

BRAK

3. Wykaz uzyskanych praw własności przemysłowej, w tym uzyskanych patentów krajowych lub międzynarodowych.

BRAK

4. Wykaz wdrożonych technologii.

BRAK

5. Wykaz wykonanych ekspertyz lub innych opracowań wykonanych na zamówienie instytucji publicznych lub przedsiębiorców.

PO UZYSKANIU STOPNIA DOKTORA

Opracowanie analityczno-symulacyjne parametrów satelitarnego łącza dystrybucji splątania dla konfiguracji projektu QUAntum SpAce netwoRk (QUASAR)

Instytucja zlecająca opracowanie: European Space Agency (ESA), ScyLight Strategic Programme Line

Wykonawca: STARTOVA UMK Sp. z o.o. (zespół projektowy w składzie: dr Maria Gieysztor, dr Artur Czerwiński, mgr inż. Piotr Ablewski)

Charakter opracowania: analiza numeryczna budżetu łącza oraz poziomu szumu tła dla satelitarnego systemu dystrybucji splątania

Rok wykonania: 2026

W dniu 14 sierpnia 2026, Victor Virag z ScyLight Strategic Programme Line ESA zwrócił się z prośbą do firmy STARTOVA UMK Sp. z o.o. o przeprowadzenie symulacji. Zespół STARTOVA UMK Sp. z o.o., odpowiedzialny za realizację projektu ESA „Space Based Links for the Quantum Internet", wykonał analizę numeryczną parametrów satelitarnego łącza do dystrybucji splątania dla scenariusza rozpatrywanego w ramach projektu QUAntum SpAce netwoRk (QUASAR). ESA zwróciła się do zespołu ze względu na opracowane wcześniej narzędzie symulacyjne oraz doświadczenie w modelowaniu satelitarnych kanałów optycznych. Zadanie obejmowało przeprowadzenie symulacji budżetu łącza oraz szumu tła dla satelity znajdującego się na kołowej orbicie heliosynchronicznej na wysokości około 560 km, z uwzględnieniem przelotu nad optycznymi stacjami naziemnymi Matera i Helmos. Celem analizy było oszacowanie oczekiwanych parametrów pracy łącza dla wskazanego scenariusza misji na podstawie stosowanej przez zespół metodologii modelowania.

Mój indywidualny wkład obejmował przede wszystkim opracowanie matematycznego modelu błędów celowania (ang. *pointing errors*), których uwzględnienie było jednym z wymagań określonych przez ESA, a które nie były wcześniej zaimplementowane w wykorzystywanym symulatorze. Zaproponowany przeze mnie formalizm został następnie zaimplementowany w oprogramowaniu jako nowa funkcjonalność umożliwiająca uwzględnianie wpływu błędów związanych z celowaniem na parametry satelitarnego łącza optycznego. Ponadto uczestniczyłem w dyskusjach dotyczących przygotowania konfiguracji symulacyjnej oraz w analizie i ocenie uzyskanych wyników.

Jednocześnie chciałbym zaznaczyć, że STARTOVA UMK Sp. z o.o. nie była formalnym członkiem konsorcjum projektu QUASAR. Opracowanie zostało wykonane na bezpośrednią prośbę ESA jako zewnętrzne wsparcie analiz dotyczących rozpatrywanego scenariusza satelitarnej dystrybucji splątania.

PRZED UZYSKANIEM STOPNIA DOKTORA

BRAK

6. Wykaz udziału w zespołach eksperckich lub konkursowych.

BRAK

7. Wykaz projektów artystycznych realizowanych ze środowiskami pozaartystycznymi.

BRAK

IV. DANE NAUKOMETRYCZNE

1. Impact Factor (w dziedzinach i dyscyplinach, w których parametr ten jest powszechnie używany jako wskaźnik naukometryczny).

   Impact Factor dla cyklu publikacji wskazanych jako wiodące osiągnięcie habilitacyjne:
   Łączny IF dla cyklu 9 publikacji wynosi: **25,3** a średnia wartość to **2,81**.
   Impact Factor podany według wartości po ostatniej aktualizacji w czerwcu 2026.

2. Liczba cytowań publikacji wnioskodawcy, z oddzielnym uwzględnieniem autocytowań.
   Źródło: **Web of Science™**
   Łączna liczba cytowań (*Sum of Times Cited*): **379**
   Liczba cytowań po wyłączeniu autocytowań (*without self-citations*): **276**

3. Indeks Hirscha: **12**

Dane naukometryczne w punktach 2. oraz 3. przedstawiono na podstawie bazy Web of Science według stanu na dzień: **26.10.2026** (dzień złożenia wniosku habilitacyjnego).
Link do profilu Habilitanta: https://www.webofscience.com/wos/author/record/C-9128-2015 (dostęp 26.10.2026).

Informacje zawarte w pkt. IV powinny wskazywać również na bazę danych, na podstawie której zostały podane.
Przy wyborze tej bazy należy zwracać uwagę na specyfikę dziedziny i dyscypliny naukowej, w której kandydat ubiega się o nadanie stopnia doktora habilitowanego.
Rada Doskonałości Naukowej informuje, że podawanie danych naukometrycznych – w opinii Rady Doskonałości Naukowej – jest wskazane i zalecane, wynika to także ze stosowanej powszechnie praktyki przez samych kandydatów ubiegających się o awans naukowy. Należy jednak podkreślić, że podane we wnioskach o wszczęcie postępowania awansowego dane naukometryczne nie mogą stanowić kryterium oceny dorobku naukowego Kandydata dla podmiotów doktoryzujących, habilitujących oraz samej Rady Doskonałości Naukowej,

organów prowadzących postępowania w sprawie nadania stopnia lub tytułu. Zadaniem tych organów jest przede wszystkim ocena ekspercka dorobku naukowego Kandydata ubiegającego się o awans naukowy, zaś decyzja o nadaniu stopnia lub tytułu nie powinna być uzależniona od podania tych danych.



……..……

(podpis wnioskodawcy)