



Warszawa 1 października 2025

Kwantowa komunikacja nowej generacji

W erze błyskawicznej wymiany danych i narastającego ryzyka cyberataków naukowcy poszukują bezpiecznych metod przesyłania informacji. Jednym z rozwiązań jest kryptografia kwantowa – technologia kwantowa wykorzystująca pojedyncze fotony do ustalania kluczy szyfrujących. Zespół z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego opracował i sprawdził w infrastrukturze miejskiej nowatorski system kwantowej dystrybucji klucza. System wykorzystuje tzw. kodowanie wysoko-wymiarowe. Zaproponowany układ jest prostszy w budowie i skalowaniu niż dotychczasowe rozwiązania, a jednocześnie oparty na zjawisku znanym fizykom od prawie dwustu lat – efekcie Talbota. Rezultaty badań zostały opublikowane w prestiżowych czasopismach „Optica Quantum”, „Optica” oraz “Physical Review Applied”.

– W naszych badaniach zajmujemy się kwantową dystrybucją klucza (QKD) – technologią, która wykorzystuje pojedyncze fotony do ustanawiania bezpiecznego klucza kryptograficznego między dwiema osobami – mówi dr Michał Karpiński, kierownik Laboratorium Fotoniki Kwantowej Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Standardowo wykorzystuje się tzw. kubity – najprostsze jednostki informacji kwantowej. Choć ta metoda jest już dobrze przetestowana, nie zawsze nadaje się do bardziej wymagających zastosowań. Dlatego naukowcy pracują teraz nad tzw. kodowaniem wielowymiarowym. Zamiast kubitów, których pomiar daje jeden z dwóch wyników, używają bardziej złożonych stanów kwantowych, które przyjmują więcej wartości.

W Laboratorium Fotoniki Kwantowej FUW naukowcy koncentrują się na superpozycji fotonów w czasie – sytuacjach, w których foton nie jest ani wcześniej, ani później, ale jest w kombinacji tych stanów. Pomiar czasu detekcji pojedynczego fotonu dla takiej superpozycji w czasie da losowy wynik. Taki stan koduje informację za pomocą zależności pomiędzy wcześniejszym i późniejszym impulsem, czyli w fazie fali świetlnej. – Już wcześniej potrafiono wydajnie wykrywać superpozycje złożone z dwóch impulsów: wcześniejszego i późniejszego. My poszliśmy krok dalej – interesują nas przypadki, w których tych przedziałów czasowych jest więcej: od dwóch do czterech lub więcej – dodaje dr Karpiński.

Czasowy efekt Talbota

Inspiracją dla badaczy był efekt Talbota – zjawisko znane z optyki klasycznej, po raz pierwszy opisane w 1836 roku przez Henry'ego Foxa Talbota, pioniera fotografii. – Gdy światło przechodzi przez siatkę dyfrakcyjną, jej obraz powtarza się w regularnych odstępach – jakby „odradzał się” w pewnej odległości.

Co ciekawe, ten sam efekt zachodzi nie tylko w przestrzeni, ale również w czasie – pod warunkiem, że regularny ciąg impulsów świetlnych rozchodzi się w ośrodku o

odpowiedniej dyspersji, takim jak szklany światłowód – wyjaśnia Maciej Ogrodnik, realizujący doktorat na Wydziale Fizyki UW. – Dzięki optycznej analogii przestrzenno-czasowej możemy zastosować efekt Talbota do krótkich impulsów świetlnych, w tym dla pojedynczych fotonów – uzyskując tym samym nowe możliwości analizy i przetwarzania stanów kwantowych. W naszym przypadku ciąg impulsów światła działa jak siatka dyfrakcyjna – i może się „samoodtworzyć” w czasie pod wpływem dyspersji, po przebyciu pewnego dystansu w światłowodzie. Co więcej, sposób, w jaki impulsy interferują, zależy od ich fazy – a to pozwala nam wykrywać różne typy superpozycji.

Zespół badaczy z Wydziału Fizyki UW opracował eksperymentalną wersję czterowymiarowej QKD. – Co ważne, cały układ oparty jest na dostępnych na rynku komponentach. Kluczowy trik polega na tym, że w całym systemie użyto tylko jednego detektora fotonów do wykrycia superpozycji wielu impulsów – zamiast skomplikowanej sieci interferometrów – mówi Adam Widomski, realizujący doktorat na Wydziale Fizyki UW. – Pozwala to znacznie obniżyć złożoność i cenę układu pomiarowego. Ponadto, nasza metoda nie wymaga osobnej, często czasochłonnej i trudnej kalibracji odbiornika.

– Tradycyjnie, gdy chcemy wykryć fazę między impulsami, stosujemy układ wielu interferometrów – coś w rodzaju drzewa, w którym impulsy są dzielone i przesuwane w czasie. Niestety, takie układy są mało wydajne, bo niektóre wyniki pomiarów są bezużyteczne. Efektywność pomiaru spada wraz z rosnącą liczbą impulsów, a odbiornik wymaga dokładnej kalibracji i stabilizacji – mówi Maciej Ogrodnik.

– Zaletą naszej metody jest wysoka wydajność, dzięki wykorzystaniu wszystkich zdarzeń detekcji fotonów. Wadą naszej metody są względnie wysokie błędy pomiarowe. Nie stanowią one jednak przeszkody w realizacji QKD, co pokazaliśmy dzięki współpracy z badaczami zajmującymi się teorią kryptografii kwantowej. Co więcej, nie musimy przebudowywać układu dla różnych wymiarów superpozycji – możemy wykrywać superpozycje 2-, 4- wymiarowe bez zmiany sprzętu ani konieczności stabilizacji odbiornika. To ogromna zaleta w porównaniu z wcześniejszymi metodami – dodaje Adam Widomski.

Nie tylko szybkość, ale i bezpieczeństwo

Badacze przetestowali swoje rozwiązanie zarówno na światłowodach w laboratorium, jak i w infrastrukturze światłowodowej Uniwersytetu Warszawskiego, na dystansie kilkunastu kilometrów. – Dzięki nowej metodzie z wykorzystaniem czasowego efektu Talbota, z powodzeniem zademonstrowaliśmy QKD z użyciem dwu i czterowymiarowego kodowania z zastosowaniem tego samego nadajnika i odbiornika. Mimo błędów związanych z prostą doświadczalnie metodą, nasze wyniki potwierdzają zwiększenie wydajności informacyjnej układu wynikającej z właściwości kodowania wysokowymiarowego – precyzuje Adam Widomski.

Główną zaletą QKD jest teoretyczne bezpieczeństwo protokołu, które można udowodnić przy podstawowych założeniach. Dlatego od początku projektu badacze z UW współpracowali z grupami z Włoch i Niemiec, które specjalizują się w dowodach bezpieczeństwa QKD. – Dokładniejsza analiza wskazuje, że dotychczasowy opis wielu protokołów QKD jest niepełny, co może wykorzystać atakujący. Niestety używana przez nas metoda też ma tę podatność. Uczestniczyliśmy w pracach nad rozwiązaniem tego problemu. Nasi współpracownicy zauważyli, że pewna modyfikacja odbiornika pozwala na zebranie większej ilości danych, dzięki czemu można wyeliminować wspomnianą podatność. Dowód bezpieczeństwa nowego protokołu został opublikowany w czasopiśmie „Physical Review Applied”, a jego zastosowanie do naszego eksperymentu omawiamy w najnowszym artykule - mówi Maciej Ogrodnik.

Realizacja badań doprowadziła nie tylko do nowych wyników badań naukowych ale zbudowała też kompetencje w zakresie najnowszych fotonicznych technologii kwantowych w laboratoriach Wydziału Fizyki UW.

Współpraca była realizowana w ramach programu współpracy międzynarodowej w zakresie technologii kwantowych QuantERA, koordynowanego przez Narodowe Centrum Nauki. Badania zostały przeprowadzone z wykorzystaniem infrastruktury Narodowego Laboratorium Fotoniki i Technologii Kwantowych (NLPQT) na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego (nlpqt.fuw.edu.pl).

Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego:

Fizyka i astronomia na Uniwersytecie Warszawskim pojawiły się w 1816 roku w ramach ówczesnego Wydziału Filozofii. W roku 1825 powstało Obserwatorium Astronomiczne. Obecnie w skład Wydziału Fizyki UW wchodzi Instytuty: Fizyki Doświadczalnej, Fizyki Teoretycznej, Geofizyki, Katedra Metod Matematycznych Fizyki oraz Obserwatorium Astronomiczne. Badania pokrywają niemal wszystkie dziedziny współczesnej fizyki, w skalach od kwantowej do kosmologicznej. Kadra naukowo-dydaktyczna Wydziału składa się z ponad 250 nauczycieli akademickich. Na Wydziale Fizyki UW studiuje ponad 1100 studentów i ok. 170 doktorantów. Uniwersytet Warszawski w rankingu szanghajskim dla poszczególnych dziedzin (Shanghai's Global Ranking of Academic Subjects) znajduje się wśród 300 najlepszych na świecie jednostek, kształcących w dziedzinie fizyki.

PUBLIKACJE NAUKOWE:

Maciej Ogrodnik, Adam Widomski, Dagmar Bruß, Giovanni Chesi, Federico Grasselli, Hermann Kampermann, Chiara Macchiavello, Nathan Walk, Nikolai Wyderka, Michał Karpiński, *High-dimensional quantum key distribution with resource-efficient detection*, *Optica Quantum* 3, 372–380 (2025)
<https://doi.org/10.1364/OPTICAQ.560373>

Adam Widomski, Maciej Ogrodnik, Michał Karpiński, *Efficient detection of multidimensional single-photon time-bin superpositions*, *Optica* 11, 926 (2024) <https://doi.org/10.1364/OPTICA.503095>

Federico Grasselli, Giovanni Chesi, Nathan Walk, Hermann Kampermann, Adam Widomski, Maciej Ogrodnik, Michał Karpiński, Chiara Macchiavello, Dagmar Bruß, Nikolai Wyderka, *Quantum key distribution with basis-dependent detection probability*, *Physical Review Applied* 23, 044011 (2025),
<https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.23.044011>

KONTAKTY:

Dr Michał Karpiński
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
email: michal.karpinski@fuw.edu.pl
tel. +48 22 55 32 740

Mgr Maciej Ogrodnik
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
email: maciej.ogrodnik@fuw.edu.pl

Mgr inż. Adam Widomski
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
email: adam.widomski@fuw.edu.pl

POWIĄZANE STRONY WWW:

<https://www.fuw.edu.pl>

Strona Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

<https://photon.fuw.edu.pl/>

strona Laboratorium Fotoniki Kwantowej na Wydziale Fizyki UW,

<https://www.fuw.edu.pl/informacje-prasowe.html>

Serwis prasowy Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

MATERIAŁY GRAFICZNE:

FUW251001b_fot01

https://www.fuw.edu.pl/tl_files/press/images/2025/FUW251001b_fot01.png Detekcja czasowych superpozycji z użyciem czasowego dywanu Talbota (wizualizacja: Maciej Ogrodnik, Uniwersytet Warszawski).