

---

# Narodowe Laboratorium Fotoniki i Technologii Kwantowych – NLPQT

Piotr Fita\*, Mihai Suster\*\*

Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

---

**Abstrakt.** Narodowe Laboratorium Fotoniki i Technologii Kwantowych – NLPQT to projekt inwestycyjny, którego celem jest budowa infrastruktury pozwalającej na prowadzenie badań i prac badawczo-rozwojowych w zakresie technologii wykorzystujących światło i zjawiska kwantowe. Infrastruktura jest budowana przez zespoły badawcze pracujące w siedmiu polskich jednostkach naukowych. Po zakończeniu inwestycji będzie ona dostępna zarówno dla pracowników naukowych z innych ośrodków, jak i dla zainteresowanych przedsiębiorców działających w obszarze nowych technologii. W artykule przedstawiamy założenia dotyczące budowanej infrastruktury i opisujemy przykładowe stanowiska badawcze, których konstrukcja została już prawie ukończona.

**Słowa kluczowe:** optyka, fotonika, metrologia, lasery, technologie kwantowe, infrastruktura badawcza,

**Abstract.** The National Laboratory of Photonics and Quantum Technologies – NLPQT is an investment project aimed at building an infrastructure that will allow research and development work in the field of technologies that use light and quantum phenomena. The infrastructure is built by research teams working in seven Polish research institutions. After the investment is completed, it will be available both to researchers from other research centers and to interested entrepreneurs operating in the field of new technologies. In the article, we present the assumptions regarding the NLPQT infrastructure and describe example research stations, the construction of which has already been almost completed.

**Keywords:** optics, photonics, metrology, lasers, quantum technologies, research infrastructure

---

Dynamiczny rozwój technologii wytwarzania, przetwarzania i detekcji światła w ciągu ostatnich kilkunastu lat zrewolucjonizował wiele dziedzin życia. Wszyscy korzystamy z telefonów wyposażonych w znakomite kamery i jasne wyświetlacze o dużej rozdzielczości, a mieszkania oświetlamy diodami LED, dzięki czemu nasze zużycie energii elektrycznej jest nieporównanie mniejsze niż wcześniej. Mniej widoczne, choć również wszechobecne stosowane, jest uwięzienie w światłowodach promieniowanie o długościach fali poza zakresem czułości ludzkiego wzroku. Służy ono do błyskawicznego przesyłania olbrzymich ilości informacji, co pozwala nam, między innymi, na robienie zakupów bez wychodzenia z domu, oglądanie nieprzebranych zasobów zdjęć i filmów z każdego zakątka kuli ziemskiej, granie w gry komputerowe z graczami z całego świata oraz korzystanie ze wszystkich, trudnych nawet do wymienienia, usług które przyniósł rozwój internetu. Satelitarne i lotnicze lizary<sup>1</sup> służące do wyznaczania profilu powierzchni ziemi

z niespotykaną wcześniej dokładnością, nie tylko pozwoliły na dokonanie sensacyjnych odkryć archeologicznych [1, 2], ale i dostarczają dostępnych dla każdego danych, które w każdej chwili można obejrzeć za pomocą odpowiednich serwisów internetowych [3, 4]. To zaledwie kilka przykładów wpływu, jaki na kształt dzisiejszego świata wywarł rozwój fotoniki. Można się spodziewać, że będzie on jeszcze większy, zwłaszcza jeśli komercyjne rozwiązania fotoniczne zostaną połączone z technologiami kwantowymi.

Mówi się, że stoimy teraz u progu drugiej rewolucji kwantowej, która będzie skutkiem opanowania metod przetwarzania informacji przy wykorzystaniu efektów kwantowych i zatrudnieniu zjawisk kwantowych do rozwiązywania zagadnień abstrakcyjnych [5] – powinniśmy już wyglądać komputera kwantowego! Spośród różnych możliwych realizacji urządzeń do kwantowego przetwarzania informacji, obecnie najbardziej zaawansowane i obiecujące są te wykorzystujące kwantowe własności fotonów i oddziałujących z nimi atomów. Potwierdza to decyzja o przyznaniu nagrody Nobla w dziedzinie fizyki za rok 2022. Otrzymali ją zajmujący się optyką kwantową Alain Aspect, John Clauser i Anton Zeilinger za przeprowadzenie doświadczeń ze splątanymi fotonami, potwierdzenie łamania nierówności Bella i pionierskie prace w zakresie kwantowej informacji. Tak więc i w obszarze technologii kwantowych rewolucję możemy zawdzięczać światłu!

Biorąc pod uwagę znaczenie technologii wykorzystujących światło należy inwestować w ich rozwój i kłaść

---

\*ORCID: 0000-0002-1065-6770

\*\*ORCID: 0000-0002-1948-6341

1. LIDAR (ang. *light detection and ranging*) to metoda teledetekcji, która wykorzystuje światło lasera impulsowego do pomiaru odległości (zmiennych odległości) od obiektu. Odbite impulsy świetlne, w połączeniu z innymi danymi zarejestrowanymi przez system, generują precyzyjne, trójwymiarowe informacje o badanym kształcie. Wiele rozwiązań technologicznych, także na rynku polskim, wykorzystuje to bardzo zaawansowane urządzenie w przemyśle, usługach i biznesie, m.in. w lotnictwie, pomiarach geologicznych, analizie obrazu ziemi, pracy samochodów autonomicznych czy telefonach komórkowych (przyp. red.)

nacisk na prowadzenie prac badawczo-rozwojowych w tej dziedzinie. Niezbędne inwestycje są jednak bardzo kosztowne i zazwyczaj przekraczają możliwości finansowe polskich firm. Rozwiązanie przynosi Narodowe Laboratorium Fotoniki i Technologii Kwantowych – NLPQT. Jest to ogólnopolski projekt infrastrukturalny finansowany z Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020 (działanie 4.2), którego celem jest stworzenie w Polsce infrastruktury pozwalającej na prowadzenie prac naukowych i badawczo-rozwojowych w zakresie fotoniki i technologii kwantowych. Projekt kierowany przez prof. dr. hab. Czesława Radzewicza realizowany jest przez konsorcjum składające się z siedmiu ośrodków naukowo-badawczych. Liderem jest Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, a poza tym w skład konsorcjum wchodzi: Instytut Chemii Fizycznej PAN w Warszawie, Politechnika Śląska w Gliwicach, Politechnika Wrocławska, Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe (w ramach Instytutu Chemii Bioorganicznej PAN w Poznaniu), Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie oraz Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu.

Zbudowana infrastruktura ma służyć nie tylko naukowcom bezpośrednio zaangażowanym w projekt, ale będzie udostępniana także innym badaczom, partnerom przemysłowym oraz przedsiębiorcom. Jej budowa nie polega wyłącznie na zakupie i uruchomieniu gotowych urządzeń. Wręcz przeciwnie – większość powstających stanowisk badawczych, których docelowo będzie 86, wykorzystuje autorskie rozwiązania opracowane w grupach badawczych zajmujących się ich budową. W rezultacie do dyspozycji polskiej nauki i przemysłu będzie unikatowa, niedostępna komercyjnie aparatura stworzona dzięki *know-how* polskich naukowców.

Zakres zastosowań infrastruktury budowanej w ramach projektu jest bardzo szeroki i obejmuje praktycznie wszystkie tematy badań z zakresu fotoniki i optycznych technologii kwantowych, jakie prowadzone są w Polsce. Wśród powstających stanowisk znaleźć można aparaturę wspierającą projektowanie i budowanie nowych laserów, urządzeń do kryptografii kwantowej, systemów do mikroobróbki laserowej, sensorów optycznych, aparaturę służącą do projektowania, wytwarzania i badania światłowodów, a także do obrazowania, spektroskopii, ultraprecyzyjnej metrologii i wielu innych zastosowań. Ze względu na tak szeroki zakres tematyczny infrastruktura została podzielona na trzy obszary technologiczne związane z wytwarzaniem i dystrybucją wzorcowej częstotliwości optycznej, fotoniką i zastosowaniami efektów kwantowych.

### **Krajowy system generacji i dystrybucji wzorcowej częstotliwości optycznej**

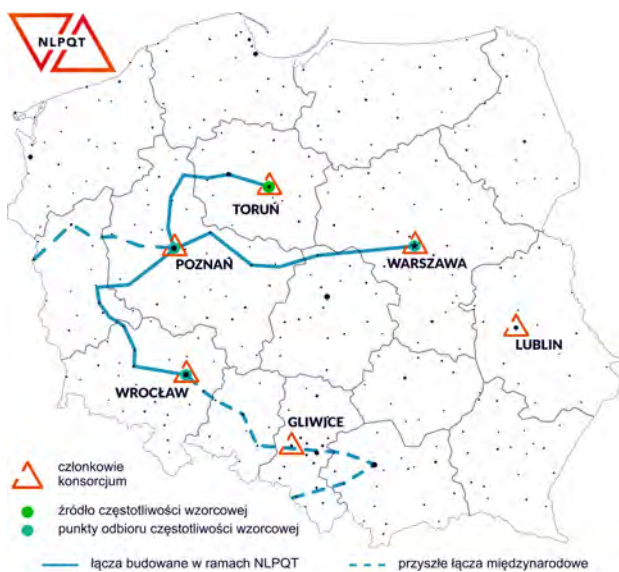
Jednym z celów projektu NLPQT jest budowa systemu, który za pomocą sieci światłowodowej pozwoli na dystrybucję wzorcowej częstotliwości optycznej z laboratorium znajdującego się na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika do kilku punktów odbiorczych w różnych miastach Polski (ryc. 1). Pozwoli to na wykorzystanie doświadczeń toruńskich fizyków w zakresie budowy ultrastabilnych optycznych źródeł częstotliwości wzorcowych, zdobytych między innymi podczas budowy polskiego optycznego zegara atomowego (POZA).

Optyczny sygnał referencyjny o niskim szumie fazowym będzie dystrybuowany z Torunia do członków konsorcjum NLPQT, którzy udostępnią go będą zainteresowanym naukowcom i partnerom przemysłowym, a w przyszłości także klientom biznesowym. Dzięki wykorzystaniu tzw. grzebienia częstotliwości, stabilność źródła częstotliwości w zakresie optycznym może być przeniesiona do innych zakresów, w tym częstotliwości mikrofalowych i radiowych. Sygnał wzorcowy o częstotliwości stabilizowanej za pomocą ultrastabilnej wnęki optycznej może być stosowany we wszystkich aplikacjach, w których konieczna jest stabilność krótkoterminowa lub synchronizacja dystrybucji sygnału. Stabilność osiągalna przy użyciu układów tego typu, w skalach czasowych do 100 sekund, jest o ponad dwa rzędy wielkości lepsza niż sygnału masera wodorowego. Z kolei w połączeniu z optycznym zegarem atomowym możliwe będzie uśrednienie sygnału będącego wzorcem częstotliwości i uzyskanie stabilności odpowiedniej do wykrywania anomalii grawitacyjnych w skali czasowej sekund lub minut.

Transmisja sygnału optycznego za pomocą włókien światłowodowych, zachowująca stabilność częstotliwości, wymaga zastosowania odpowiednich technik. Nieuniknione drgania włókien przekładają się na fluktuacje prędkości fazowej światła we włóknie, te zaś prowadzą do fluktuacji częstotliwości światła transmitowanego przez włókno. By wykorzystać możliwości zbudowanych w Toruniu źródeł częstotliwości wzorcowej konieczne jest zastosowanie w torze transmisji odpowiednich urządzeń kompensujących te fluktuacje. Dotychczas uruchomiono łącze testowe umożliwiające dystrybucję referencyjnej częstotliwości optycznej w sieci PIONIER na trasie Toruń-Poznań-Toruń. W testowanym łączu, jako sygnał referencyjny transmitowane było światło lasera o długości fali 1542,14 nm i ultrawąskim widmie, a dzięki bezpośredniemu zdudnianiu sygnału nadawanego i odbieranego w badanej „pętli” możliwe było wykonanie dokładnego pomiaru skuteczności stabilizacji w zbudowanym systemie transmisyjnym. W testowanej linii o długości

600 km uzyskano długoterminową stabilność dystrybuowanego sygnału na poziomie  $10^{-20}$  (dla czasu obserwacji  $10^5$  s). Wyniki te pokazują, że zbudowany system spełnia wymagania stabilizacji fazowej dystrybucji ultrastabilnej optycznej częstotliwości wzorcowej i będzie można go zastosować w łączach docelowych.

Oprócz samej sieci dystrybucji rozwijane są także technologie mające wspierać jej praktyczne zastosowania. Na Politechnice Wrocławskiej prowadzone są prace nad sterownikami diod laserowych o bardzo niskich szumach, które znajdują zastosowanie m. in. w technologii grzebieni częstotliwości optycznych. Podczas testowania tych sterowników uzyskano rekordowo niski (w skali światowej) poziom szumu fazy obwiednia-nośna ultrakrótkich impulsów światła, będącej miarą tego, jak dobrze ustabilizowano położenie maksimum obwiedni impulsów względem fazy oscylacji pola elektrycznego fali elektromagnetycznej. Świadczy to o doskonałych parametrach szumowych zbudowanych sterowników [6].



Ryc. 1. Schemat łącz do dystrybucji optycznej częstotliwości wzorcowej (materiały projektu NLPQT)

### Laboratoria technologii fonicznych

Laboratoria technologii fonicznych stanowią najszerszą tematycznie część projektu NLPQT. Zbudowana w ramach NLPQT sieć stanowisk rozszerzy istniejące lub stworzy zupełnie nowe możliwości badawcze w zakresie szeroko pojętej fotoniki. Do zastosowań powstałej aparatury należą, m. in. badania spektroskopowe materiałów (np. analiza śladowych zanieczyszczeń powietrza lub tworzenie charakterystyk nowych materiałów dla fotowoltaiki i medycyny), wytwarzanie specjalistycznych światłowodów, opracowywanie i tworzenie charakterystyk nano- i mikrostruktur do zastosowań optoelektronicznych i biomedycznych, projektowanie, wytwarzanie

i testowanie nowych źródeł światła, czy też dwu- i trójwymiarowe obrazowanie obiektów biologicznych. Budowane są także stanowiska do projektowania, konstruowania i diagnostyki laserów, czy mikroelektronicznych i fonicznych układów czujnikowych.

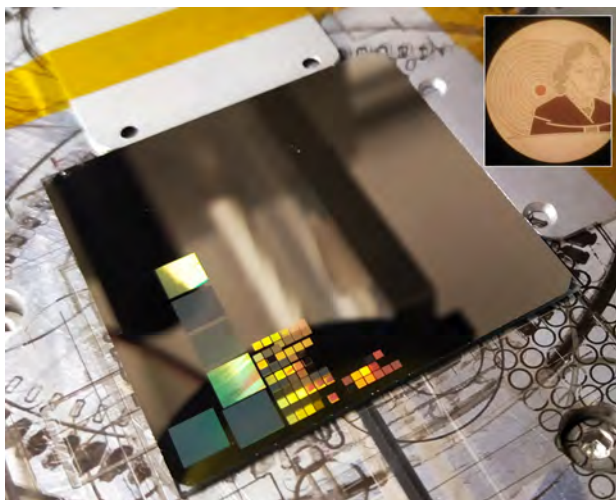


Ryc. 2. Stanowisko mikroobróbki laserowej powstające na Politechnice Wrocławskiej (materiały projektu NLPQT)

Do stanowisk budzących największe zainteresowanie przemysłu należą m. in. te, które służą do laserowej mikroobróbki i mikrostrukturyzacji powierzchni. Na Politechnice Wrocławskiej zbliża się ku końcowi budowa systemu wyposażonego w trzystanowiskowy system obróbki, w którym źródłem promieniowania jest femtosekundowy laser TruMicro 2030 o szerokim zakresie parametrów pracy. Umożliwia on obróbkę z wykorzystaniem trzech długości fali (1030 nm, 515 nm oraz 343 nm), przestrajanie czasu trwania impulsu od 300 fs do 20 ps, wybór częstotliwości repetycji do 50 MHz oraz możliwość generacji sekwencji impulsów laserowych. Dzięki temu stanowisko oferuje bardzo szerokie możliwości mikroobróbki laserowej: od cięcia i modyfikowania szkła, polimerów, metali i materiałów twardych, po strukturyzację i funkcjonalizację powierzchni, znakowanie i spawanie. Stanowisko jest także wyposażone w narzędzia do obrazowania efektów pracy – profilometr oraz mikroskop sił atomowych, a także zintegrowany mikroskop pozwalający na precyzyjne pozycjonowanie materiału oraz wstępną analizę wyników bez konieczności usuwania obrabianego obiektu z systemu. W fazie testów jest też podobne urządzenie zbudowane w Centrum Laserowym zlokalizowanym w Instytucie Chemii Fizycznej PAN (IChF PAN) w Warszawie. Za jego pomocą możliwe jest kształtowanie powierzchni oraz obszarów przypowierzchniowych na drodze mikroabłacji laserowej z rozdzielczością  $1 \mu\text{m}$ , co pozwala tworzyć periodyczne struktury powierzchniowe LIPSS (ang. *laser-induced periodic surface structures*), czy też platformy do pomiarów spektroskopowych powierzchniowo wzmocnionego efektu



Ramana SERS (ang. *surface-enhanced Raman spectroscopy*). Urządzenia do mikroobróbki laserowej pozwolą na opracowywanie nowych rozwiązań oraz przeprowadzanie studiów wykonalności dla przemysłu.



Ryc. 3. Struktury LIPSS na stanowisku mikroobróbki laserowej powstającym w Centrum Laserowym w IChF PAN w Warszawie. Wstawka w prawym górnym rogu przedstawia podobiznę Mikołaja Kopernika wykonaną podczas testów stanowiska (materiały projektu NLPQT)

W Centrum Laserowym IChF PAN prowadzone są również prace nad rozwojem konstrukcji laserów światłowodowych, w tym laserów o bardzo wysokiej odporności na warunki zewnętrzne oraz femtosekundowych laserów dużej mocy, które mogą stanowić źródło światła w urządzeniach do mikroobróbki. Budowa takich laserów wymaga dostępu do zaawansowanych technik obróbki światłowodów i dlatego laboratorium wyposażone zostało w stację do przygotowywania oraz spawania włókien światłowodowych. W skład stacji wchodzi automatyczne obcinarki światłowodowe, urządzenia termiczne do usuwania powłoki akrylowej światłowodów, sprzęt do testowania wytrzymałości spawów światłowodowych, odtwarzacz powłoki ochronnego oraz, oczywiście, spawarki: laserowa oraz żarnikowa.

Technologie światłowodowe są bardzo silnie reprezentowane w projekcie NLPQT. Budowane stanowiska nie tylko pozwolą na rozwój ich zastosowań, ale również na projektowanie, wytwarzanie i tworzenie charakterystyk specjalistycznych światłowodów szklanych i polimerowych. W Pracowni Technologii Światłowodów na Uniwersytecie Marii Curie-Skłodowskiej zainstalowana została już wyciągarka światłowodów specjalnych. Jest to zestaw urządzeń pozwalający na wyciąganie włókien światłowodowych ze szkła krzemionkowego i szkieł typu *high silica* o średnicy zewnętrznej od 80 do 800 mikrometrów i długości do 200 km. Wyciągarka doskonale nadaje się do produkcji światłowodów właściwie dowolnego typu, np. z gradientowym lub skokowym profilem

współczynnika załamania, światłowodów mikrostrukturalnych, a nawet światłowodów z rdzeniem powietrzynnym, które stanowią popularny obiekt badań pod kątem ich wykorzystania w nowoczesnych źródłach laserowych, telekomunikacji i systemach czujnikowych. Zestaw głowic pomiarowych pozwala na dokładny pomiar i kontrolę wymiarów światłowodu w dwóch kierunkach zarówno przed, jak i po nałożeniu pokryw ochronnych. Zaawansowany system aplikacji oraz piece UV i piece termiczne pozwalają na pokrycie światłowodów niemalże wszystkimi znanymi obecnie powłokami ochronnymi, a także na stosowanie własnych kompozycji takich powłok.

### Laboratoria technologii kwantowych

Prace w obszarze technologii kwantowych skoncentrowane są przede wszystkim na stworzeniu ogólnokrajowej infrastruktury umożliwiającej praktyczne wykorzystanie właściwości pojedynczych obiektów kwantowych. Szczególny nacisk położony jest na możliwość stosowania pojedynczych fotonów do komunikacji kwantowej, co umożliwi zarówno dalsze prace badawczo-rozwojowe nad kwantową dystrybucją klucza kryptograficznego (ang. *quantum key distribution, QKD*), jak i integrację takich rozwiązań z innymi mechanizmami stosowanymi do zabezpieczania danych przesyłanych w istniejących systemach informatycznych i telekomunikacyjnych. Ponadto w ramach projektu powstaną dedykowane stanowiska do prac w zakresie zastosowań obiektów kwantowych jak pojedyncze elektrony, kropki kwantowe czy atomy.

Technika QKD pozwala w sposób całkowicie odporny na wszelkie ataki hackerskie dokonać wymiany klucza kryptograficznego pomiędzy nadawcą i odbiorcą poufnej wiadomości. Wymieniony klucz pozwala zaszyfrować poufne informacje i przesłać je tradycyjną siecią telekomunikacyjną. W technice QKD klucz kryptograficzny zostaje wygenerowany dopiero w momencie jego wymiany, a dzięki wykorzystaniu efektów kwantowych próby jego przechwycenia prowadzą do zaalarmowania przesyłających go stron. Dzięki temu można mieć pewność, że dane zaszyfrowane za pomocą wymienianego klucza mogą być odszyfrowane wyłącznie przez uprawnionego odbiorcę. Nośnikami informacji służących do przesłania klucza kwantowego są fotony, dzięki czemu wymiana klucza może odbywać się za pomocą światłowodów, które obecnie stanowią podstawowy kanał telekomunikacyjny.

Pierwsze testy zakupionych w ramach projektu NLPQT systemów QKD (Cerberis oraz Clavis) zostały przeprowadzone w Poznańskim Centrum Superkomputerowo-Sieciowym (PCSS). Następnie wykorzystano istniejącą infrastrukturę światłowodową



Ryc. 4. Układy optyczne w Laboratorium Fotoniki Kwantowej na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, gdzie rozwijane są techniki kwantowej komunikacji (fot. Mirosław Kaźmierczak) (Uniwersytet Warszawski)

Poznania, przez którą udało się bezpiecznie nadać i odebrać sygnał szyfrowany kwantowo między dwoma jednostkami PCSS oddalonymi od siebie o 7 kilometrów. We wrześniu 2021 po raz pierwszy w Polsce nawiązane zostało międzymiastowe połączenie QKD. Nadajnik sygnału QKD znajdował się w Laboratorium Fotoniki Kwantowej na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Optyczny sygnał kwantowy za pomocą sieci światłowodowej Uniwersytetu Warszawskiego oraz sieci PIONIER przekazywany był do odbiornika umieszczonego w węzle sieci PIONIER w Sochaczewie. Po nawiązaniu połączenia pomiędzy urządzeniami na kanale kwantowym i na kanale klasycznym uzyskano generację kluczy kryptograficznych z szybkością około 300 bitów na sekundę. Najnowszą infrastrukturą QKD uruchomioną w ramach NLPQT jest łącze pomiędzy Poznaniem a Warszawą korzystające z dedykowanych włókien sieci PIONIER o łącznej długości wszystkich torów optycznych wynoszącej 380 km. System transmisyjny został zbudowany w konfiguracji tzw. zaufanych węzłów i posiada pięć pośrednich węzłów transmisyjnych, co umożliwia jego elastyczną konfigurację i uruchomienie niezależnych usług transmisji kluczy pomiędzy wybranymi węzłami pośrednimi. Łącze QKD Poznań-Warszawa wykorzystuje urządzenia firmy ID Quantique – Cerberis XG najnowszej generacji, a system transmisyjny jest monitorowany oraz zarządzany przez zespół admi-

nistratorów sieci PIONIER. Jest to obecnie najdłuższe łącze QKD w Europie.

Długodystansowe łącze QKD Warszawa-Poznań otwiera nowe możliwości realizacji badań oraz projektów związanych z sieciami technologii QKD oraz komunikacji kwantowej. Infrastruktura umożliwi również prowadzenie dalszych badań nad integracją łączy QKD z obecną infrastrukturą sieciową oraz realizacją szeregu scenariuszy zastosowań i usług wykorzystujących technologie QKD.

#### Dostęp do infrastruktury NLPQT

Infrastruktura NLPQT stanie się komercyjnie dostępna dla zainteresowanych jej wykorzystaniem w styczniu 2024. Więcej informacji na temat projektu NLPQT, osób zaangażowanych w jego realizację i powstającej infrastruktury można znaleźć pod adresem <http://nlpqt.fuw.edu.pl> Dofinansowanie projektu NLPQT z Funduszy Europejskich wynosi 145 161 566,30 zł

#### Literatura

- [1] Preston, D., *Lost City Discovered in the Honduran Rain Forest*, <https://www.nationalgeographic.com/adventure/article/150302-honduras-lost-city-monkey-god-maya-ancient-archaeology>; dostęp 21.09.2022.
- [2] Prümers H., Betancourt C. J., Iriarte J., Robinson M., Schaich M., “Lidar reveals pre-Hispanic low-density urbanism in the Bolivian Amazon”, *Nature* 606, 325 (2022).
- [3] *Dane pomiarowe LIDAR (LIDAR)*, <https://www.geoportal.gov.pl/dane/dane-pomiarowe-lidar#>; dostęp 21.09.2022.
- [4] *HERE udostępnia swoje dane lidar, również dla Polski*, <https://geoforum.pl/news/31873/here-udostepnia-swoje-dane-lidar-rowniez-dla-polski>; dostęp 21.09.2022.
- [5] Sowiński T., „Świat u progu Drugiej Rewolucji Kwantowej”, *Postępy Fizyki* 71 (1), 21 (2020).
- [6] Steinleitner P. et al., “Single-cycle infrared waveform control”, *Nature Photonics* 16, 512 (2022).