

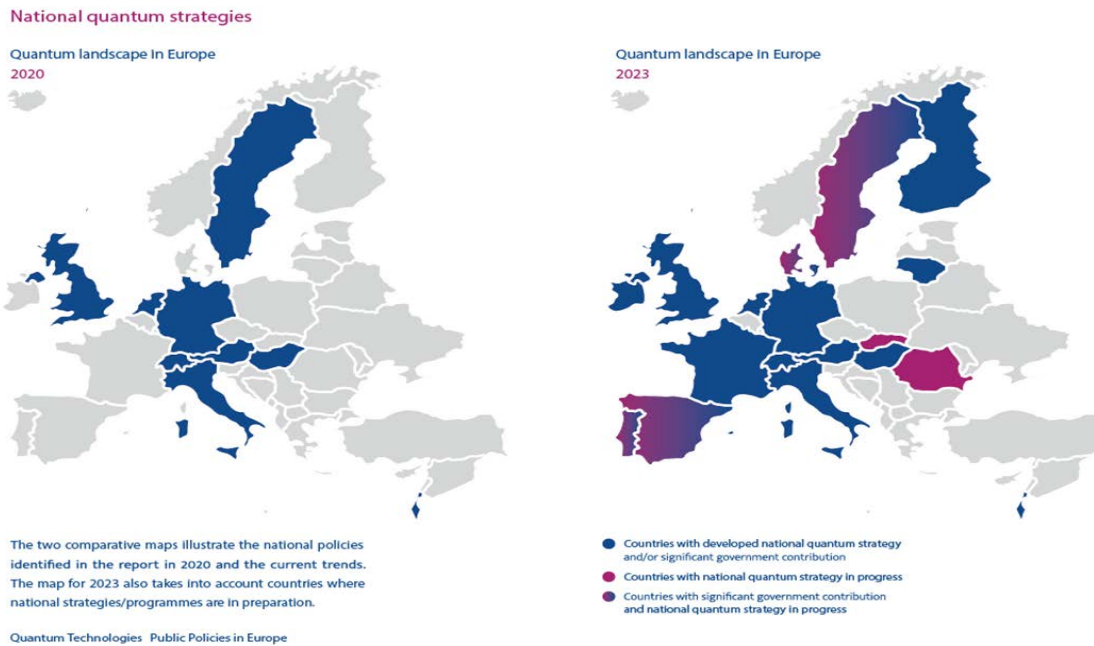
Technologie kwantowe: rozwojowa szansa dla Polski

Pionierskie i szeroko rozpoznawane na arenie międzynarodowej badania polskich naukowców sprawiają, że nasz kraj może stać się jednym z głównych beneficjentów drugiej kwantowej rewolucji technologicznej, w którą rozpoczęła inwestycje większość rozwiniętych regionów świata. Do wykorzystania tej unikalnej szansy niezbędne staje się stworzenie Narodowego Programu Kwantowego, który dzięki właściwie określonej strategii, odpowiedniej alokacji zasobów oraz transparentnym zasadom ich dystrybucji uczyni z Polski jeden z kluczowych ośrodków rozwoju technologii kwantowych w skali globalnej. Komercjalizacja opracowanych rozwiązań znacząco przyczyni się do wzrostu krajowego sektora zaawansowanych technologii, zapewni zwiększenie technologicznej niezależności oraz odporności na rosnące zagrożenia zewnętrzne. Jednak by Polska mogła w pełni czerpać z technologii kwantowych jako źródła wzrostu gospodarczego, dobrobytu i bezpieczeństwa potrzebne są skoordynowane wielodomenowe działania państwa obejmujące resorty właściwe dla nauki, edukacji, obronności, bezpieczeństwa, cyfryzacji, przemysłu, energetyki, ochrony zdrowia i środowiska naturalnego.

1. Druga kwantowa rewolucja w skali globalnej

Technologie kwantowe to obecnie jeden z najważniejszych obszarów badań na świecie. Szczególnie aktywne na tym polu są regiony o wysokim potencjale naukowym, jak Unia Europejska, Stany Zjednoczone i Chiny. Ze względu na swoje strategiczne znaczenie dla bezpieczeństwa i rozwoju, technologie kwantowe są przedmiotem coraz większych inwestycji, jednocześnie stając się elementem międzynarodowej rywalizacji.

W 2018 r. Unia Europejska zainicjowała program flagowy (www.qt.eu), z ponadmiliardowym budżetem, by zapewnić Europie rolę lidera w technologiach kwantowych. Agenda rozwoju do 2030 roku, zakłada, że Europa stanie się pierwszą na świecie „doliną kwantową”. W grudniu 2023 r. 15 państw UE przyjęło Europejską Deklarację Technologii Kwantowych, która podkreśla strategiczne znaczenie technologii kwantowych dla konkurencyjności naukowej i przemysłowej Europy. Deklaracja ta jest podpisywana sukcesywnie przez kolejne kraje UE. Polska odgrywa na arenie europejskiej ważną rolę z uwagi na koordynowanie od 2016 r. przez Narodowe Centrum Nauki inicjatywy QuantERA (www.quantera.eu), która jest największą siecią agencji grantowych w zakresie finansowania technologii kwantowych w Europie (41 organizacji, 101 finansowanych projektów, 522 zaangażowane grupy badawcze). Dzięki temu dostępna jest wiedza na temat finansowanych badań i możliwość monitorowania kierunków rozwoju. Należy podkreślić, że większość krajów europejskich tworzy narodowe strategie kwantowe, mając na celu wzmocnienie własnej konkurencyjności.



Źródło: www.quantera.eu

Wzorcowym przykładem strategii narodowej jest amerykańska National Quantum Initiative (www.quantum.gov) z filarami: *Science; Workforce; Industry; Infrastructure; Economic Security; International Cooperation*. Wg słów prezydenta Joe Bidena: *Quantum computing has the potential to transform everything, from how we create new medicines to how we power artificial intelligence and cybersecurity. It is technology that is vital to our economy and equally important to our national security*. Własne, odpowiednio ukierunkowane programy, posiadają także mniejsze kraje, jak np. Singapur (www.qepsg.org).

2. Potencjał innowacyjny i technologiczny

Technologie kwantowe otwierają perspektywę opracowania przełomowych nowych urządzeń i wynalazków, których przewagi nad dzisiejszymi rozwiązaniami będą opierały się na bezpośrednim wykorzystaniu zjawisk kwantowych oraz kwantowych właściwości cząstek i ich oddziaływań. Taki przełom technologiczny staje się obecnie możliwy dzięki osiągnięciu odpowiedniego poziomu rozwoju technologii „klasycznych”, zrozumienia teoretycznego oraz metod eksperymentalnych w fizyce kwantowej, w szczególności pozwalających na precyzyjną kontrolę i odczyt stanu kwantowego pojedynczych cząstek. Warto jednak zauważyć, że pewien typ technologii kwantowych jest już dojrzały i stosowany od wielu lat komercyjnie. Mowa tu o zegarach atomowych, udostępniających niezwykle precyzyjny wzorzec czasu i częstotliwości, wykorzystywany m.in. w telekomunikacji i energetyce (synchronizacja sieci), finansach (ang. *high frequency trading*), nawigacji oraz na potrzeby bezpieczeństwa i obronności (m.in. synchronizacja sieci radarowych). Dalszy rozwój technologii kwantowych niesie niezwykle szeroki potencjał innowacyjny w następujących głównych obszarach technologicznych:

Obliczenia kwantowe. Komputery kwantowe wykonują obliczenia cyfrowe lub analogowe wykorzystując efekty kwantowe takie jak superpozycja, interferencja i splątanie stanów kwantowych. Najbardziej powszechnym rozwijanym obecnie rodzajem komputerów kwantowych są tzw. komputery uniwersalne, oparte na kubitach i bramkach cyfrowych na nich wykonywanych, pozwalające na realizację dowolnego algorytmu kwantowego. Alternatywnym podejściem jest rozwiązywanie problemów obliczeniowych analogowo, poprzez zakodowanie ich jako stan podstawowy hamiltonianu systemu kwantowego poddawanego ewolucji poprzez ciągłą modulację jego parametrów. Przewiduje się, że komputery kwantowe pozwolą na uzyskanie przewagi nad klasycznymi metodami obliczeniowymi w rozwiązywaniu konkretnego typu problemów, w szczególności optymalizacyjnych, w metodach Monte Carlo oraz uczenia maszynowego, a także w metodach opartych o generację liczb losowych. Będą miały również znaczenie dla cyberbezpieczeństwa opartego na metodach obliczeniowych, pozwalając na łamanie tradycyjnych metod szyfrowania. Symulatory kwantowe natomiast pozwalają na określenie właściwości układów kwantowych (istotnych np. do zrozumienia procesów chemicznych czy biologicznych) za pomocą metod obliczeniowych lub poprzez badanie innego układu kwantowego o podobnych właściwościach. Pozwoli to na innowacje w projektowaniu nowych materiałów, chemicznych procesów przemysłowych oraz nowych leków dzięki bardziej wiarygodnym symulacjom efektów kwantowych istotnych w tym obszarze. Główne przewidywane aktualnie obszary zastosowań komputerów i symulatorów kwantowych to podniesienie efektywności procesów przemysłowych, m.in. produkcji nawozów azotowych, projektowanie lepszych baterii i materiałów przemysłowych (inżynieria materiałowa), opracowywanie nowych leków i enzymów, uczenie maszynowe, optymalizacje transportu, portfeli inwestycyjnych, predykcje finansowe, cyberbezpieczeństwo, a także analizy numeryczne i symulacje istotne dla rozwoju innych dziedzin nauki. W obszarze obronności i bezpieczeństwa państwa przykładowymi zagadnieniami, które wymagają dużych nakładów obliczeniowych są optymalizacja strategii transportu czy analiza dużych modeli matematycznych dla potencjalnych scenariuszy rozwoju konfliktów hybrydowych.

Telekomunikacja kwantowa. Rozwój nowych technologii komunikacji, opartej w ogólności o kwantowe właściwości światła, ma dwa kluczowe aspekty. W pierwszym rzędzie istotny jest aspekt bezpieczeństwa komunikacji, w szczególności bezpiecznego ustalenia symetrycznych kluczy kryptograficznych niezbędnych do szyfrowania wymienianych informacji. W obecnych technologiach stosowane jest podejście tzw. bezpieczeństwa obliczeniowego (zrealizowanego w szczególności w postaci szyfrowania asymetrycznego, np. RSA), opartego na założeniu, że zasoby obliczeniowe przeciwnika są niewystarczające do złamania szyfrowania poprzez kryptoanalizę lub atak siłowy (ang. *brute-force*). Takie podejście jednak zagrożone jest rozwojem nowych technik obliczeniowych, m.in. realizowanych na komputerach kwantowych. Kwantowa dystrybucja klucza (ang. *Quantum Key Distribution*, QKD) oparta jest na zupełnie innym podejściu do ochrony procesu ustalenia symetrycznych kluczy kryptograficznych, opartym o bezpieczeństwo teorio-informacyjne. W odróżnieniu od bezpieczeństwa obliczeniowego, poziom takiego bezpieczeństwa można ściśle udowodnić w oparciu o podstawowe prawa (w przypadku QKD – prawa fizyki kwantowej), które ograniczają ilość informacji, które podsłuchujący może pozyskać. Od kilku

lat dostępne są już pierwsze komercyjnie urządzenia do budowy sieci QKD na poziomie pilotażowych instalacji w naziemnych infrastrukturach krytycznych. Trwa proces standaryzacji i przygotowania do certyfikacji takich rozwiązań. Równolegle funkcjonują też pierwsze demonstratory kwantowej dystrybucji klucza z orbity, przy zastosowaniu dedykowanych rozwiązań satelitarnych. W dłuższej perspektywie czasowej najbliższych 10-20 lat komunikacja kwantowa, oprócz rozwiązania problemu bezpiecznej wymiany informacji klasycznej, ma zapewnić możliwość dystrybucji informacji kwantowej na duże odległości oraz jej przechowywania. W szczególności rozwijana jest możliwość dystrybucji i zarządzania splątaniem kwantowym jako zasobem przyszłych sieci kwantowych, które mają powstać na wzór obecnego „klasycznego” Internetu. Docelowo komputery i symulatory kwantowe zostaną zintegrowane z takimi sieciami, pozwalając na rozproszone przetwarzanie i bezpieczne korzystanie z informacji kwantowej. W tym obszarze bardzo istotny jest rozwój kompetencji specjalistów i dostęp do własnych laboratoriów, które pozwolą nie tylko na rozwijanie oryginalnych rozwiązań, ale również na niezależną od producentów ocenę szyfratorów kwantowych, ich podatności i ich certyfikacji dla potrzeb bezpieczeństwa informacji w obrocie krajowym i międzynarodowym. O ile wykrywanie luk w bezpieczeństwie szyfratorach klasycznych wymaga wiedzy z kryptologii i znajomości technologii informacyjnych, o tyle wykrywanie luk w szyfratorach kwantowych z uwagi na cenę niezbędnego wyposażenia i barierę kompetencyjną będzie niedługo domeną niewielu krajów świata, w gronie których powinna być Polska.

Sensoryka kwantowa i metrologia. Ten obszar technologii obejmuje całą gamę różnych czujników, których działanie oparte jest zazwyczaj na wyjątkowej czułości sprzężenia prostego układu kwantowego z zewnętrzną wielkością fizyczną, która modyfikuje właściwości tego układu, umożliwiając tym samym pomiar tej wielkości. Takie układy kwantowe często budowane są na kubitach analogicznych do tych stosowanych w komputerach lub symulatorach kwantowych. Wiele czujników opartych jest na zjawisku interferencji stanów kwantowych. Czujniki kwantowe mogą służyć m.in. do pomiaru pola magnetycznego, pola elektrycznego, pola grawitacyjnego, przyspieszenia, siły, masy, ciśnienia czy temperatury. Takie pomiary np. ilości gazów czy ich składu mają kluczowe znaczenie dla monitorowania zmian klimatycznych na Ziemi, wykrywania zanieczyszczeń i niebezpiecznych materiałów, kontroli procesów technologicznych w przemyśle półprzewodnikowym, czy diagnostyce medycznej. Obok wspomnianych czujników rozwijane są oczywiście w dalszym ciągu ultraprecyzyjne wzorce czasu i częstotliwości w postaci coraz bardziej zaawansowanych zegarów atomowych lub optycznych. Niektóre nowoczesne czujniki kwantowe, np. grawimetry służące do pomiaru zmian pola grawitacyjnego Ziemi, są już komercyjnie dostępne, choć ich szerokie praktyczne zastosowanie wymaga jeszcze licznych udoskonaleń. Inne typy czujników są na znacznie niższym poziomie gotowości technologicznej i możliwość ich praktycznego wykorzystania będzie zależała od przewyższenia często praktycznych, konstrukcyjnych wyzwań związanych ze stabilnością działania, wrażliwością na zakłócenia czy opłacalnością i poręcznością samego urządzenia. Zastosowanie czujników kwantowych umożliwia na przykład ultraprecyzyjną radiopelengację, dzięki możliwości precyzyjnego ustalenia podstawy czasu w dużej sieci odbiorników radiowych. Przekształcenie posiadanych już przez polskich naukowców wyników badań podstawowych w zdolności w zakresie

budowy anten radiowych wysokiej czułości, umożliwi wykrywanie emisji ujawniających: promieniowanych i przewodzonych, nawet dla urządzeń ekranowanych zgodnie z obowiązującymi na dziś normami w zakresie bezpieczeństwa informacji. W tej dziedzinie posiadanie przewagi technologicznej nad przeciwnikami umożliwia pozyskiwanie informacji, zaś posiadanie technologii służy wymianie barterowej z innymi dostawcami. Przykładowy praktyczny problem współczesnego pola walki to wykrywanie umocnień przy użyciu grawimetrów kwantowych czy też użycie czujników kwantowych do wykrywania pól minowych.

Warto na koniec wspomnieć, że praca nad rozwojem technologii kwantowych służy nie tylko innowacyjności bezpośrednio w opisanym powyżej, bardzo bogatym obszarze zastosowań, ale wpływa również na inne dziedziny pokrewne. Przykładowo badania nad komputerami i algorytmami kwantowymi wpłynęły na rozwój klasycznych metod obliczeniowych, metod projektowania elektroniki (zarówno dyskretnej, jak i wysoko zintegrowanej), układów kriogenicznych, komponentów optycznych, scalonych układów fotonicznych, nanofotoniki, nanoinżynierię materiałową czy rozwój precyzyjnych metod produkcyjnych. Badania nad komunikacją kwantową wpływają na technologie satelitarne oraz standardową komunikację, wymuszając np. lepsze zrozumienie transmisji. Ogromny potencjał ma zastosowanie technik kwantowych w rozwoju technologii medycznych. W piśmiennictwie wskazuje się na zastosowania w diagnostyce, w sensorach elektrochemicznych, ale również w terapii, w tym chociażby zastosowanie tunelowania kwantowego w terapii radioopornych nowotworów, takich jak glejak mózgu. Rozwój technologii kwantowych stymuluje zatem bardzo szeroko pojętą innowacyjność, wymagając jednocześnie współpracy specjalistów z różnych dziedzin i gałęzi gospodarki.

Z uwagi na wymienione powyżej przykłady tematyka kwantowa jest coraz częściej analizowana w kontekście przewagi strategicznej możliwej dzięki jej użyciu. Dotyczy to nie tylko bezpieczeństwa informacji czy szybkości ich przetwarzania, ale również ultraczułych anten radiowych, czy też czujników grawimetrycznych, opartych na sensorach kwantowych. Wagę technologii kwantowych w obszarach militarnych podkreśla utworzenie w ramach sojuszu NATO *Transatlantic Quantum Community*.

3. Polskie dokonania naukowe, komercjalizacyjne i infrastrukturalne

Polscy naukowcy od początku lat 90. XX w. odgrywali kluczową rolę w pionierskich badaniach nad technologiami kwantowymi co ma odzwierciedlenie w częstych cytowaniach polskich artykułów w literaturze światowej, licznym udziale w międzynarodowych konsorcjach naukowych, oraz fakcie, że obecnie polskie ośrodki stały się atrakcyjnym miejscem odbywania staży naukowych dla młodych badaczy z zagranicy (ang. *brain gain*). Połączenie doskonałości w naukach ścisłych z entuzjazmem i energią wielu krajowych ośrodków sprawiło, że Polska znalazła się w czołówce krajów tworzących podwaliny tej nowej dziedziny wiedzy. Wyrazem tego jest fakt, że część prac, za które przyznano w 2022 roku nagrodę Nobla z fizyki była przeprowadzona w Polsce przy współpracy z polskimi naukowcami. Sukcesy polskiej nauki w obszarze technologii kwantowych bardzo dobrze obrazuje fakt, że w ramach prestiżowych programów prowadzonych przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej Fundacji w 2018 roku powstały w ramach Międzynarodowych Agend Badawczych aż dwa innowacyjne centra doskonałości zajmujące się tymi technologiami na Uniwersytecie

Warszawskim i Uniwersytecie Gdańskim, jak również finansowany był szereg innych projektów z zakresu technologii kwantowych. Na poziomie międzynarodowym polskie ośrodki naukowe stworzyły lub rozwinęły takie obszary badawcze jak pamięci kwantowe i sensory rydbergowskie (UW), obliczenia układów molekularnych z uwzględnieniem elektrodynamiki kwantowej (UW), obliczenia ab initio widm cząsteczek atmosferycznych (UMK), samotestujące kwantowe generatory liczb losowych (UG), oprogramowanie do mitygacji błędów na komputerach kwantowych (CFT PAN), kryształy czasowe (UJ), detektory poszukujące ciemnej materii za pomocą magnetometrów (UJ) i zegarów optycznych (UMK), ultradokładną spektroskopię częstotliwościową we wnękach optycznych oraz subnominalną spektroskopię dwugrzebieniową (UMK), systemy elektroniczne do pułapkowania i laserowego chłodzenia układów zawierających antymaterię (PW), pozytonowy tomograf emisyjny wykorzystujący plastikowe scyntylatory (UJ), a także światłowodową i satelitarną komunikację kwantową oraz obrazowanie kwantowe (UW, UMK) oraz komponenty do ich realizacji (PWr). Ogromne możliwości otwiera również chemia kwantowa, w których zjawisko kwantowego tunelowania elektronu jest wykorzystywane w rozwijaniu sensorów elektrochemicznych (IChF PAN).

Wśród mających polskie korzenie naukowe komercjalizacyjnych sukcesów znajdziemy m. in. jeden z najbardziej popularnych na świecie ekosystemów kontrolnych do pracy ze spułapkowanymi jonami zaprojektowany przez PW we współpracy z grupami naukowymi m.in. z Oksfordu, National Institute of Standards and Technology (NIST), Hanoweru, Maryland, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) oraz skomercjalizowany przez Creotech i używany obecnie przez liczne grupy naukowe i przemysłowe rozwijające komputery kwantowe na jonach, jak również światłowodowe grzebienie optyczne opracowane na PWr i produkowane przez Mode-locked Technology z Wrocławia, systemy aktywnie stabilizowanego światłowodowego transferu częstości i czasu opracowane na AGH i produkowane przez PikTime Systems z Poznania używane przez PTB, National Physical Laboratory, NIST, Naval Research Laboratory, detektory podczerwieni i układy fotoniczne produkowane przez VIGO Photonics z Ożarowa Mazowieckiego, czy też kropki kwantowe tworzone we wrocławskim startupie QNA. W AROBS Polska z Gdańska rozwijana jest we współpracy z UMK i Politechniką Mediolańską technologia odczytu sygnałów jednofotonowych, a także projekt kontrolera źródła splątania kwantowego.

Na podkreślenie zasługuje powstanie unikatowej infrastruktury z dedykowanymi łączami światłowodowymi z eliminacją szumów do przesyłania wzorcowego sygnału czasu i częstości łączącej PCSS PAN w Poznaniu, Obserwatorium Astrogeodynamicznym CBK PAN w Borowcu, Krajowe Laboratorium Fizyki Atomowej, Molekularnej i Optycznej (KL FAMO) w Toruniu, 32-metrowy radioteleskop w Piwnicach koło Torunia i GUM w Warszawie. Jest to możliwe dzięki unikatowemu na skalę światową modelowi ogólnopolskiej badawczej infrastruktury sieciowej PIONIER, a także dzięki dobrej współpracy pomiędzy członkami Konsorcjum i Orange Polska. Obecnie realizowane jest połączenie pomiędzy KL FAMO a niemieckim narodowym instytutem metrologii PTB. Równolegle testowane są już połączenia światłowodowe dedykowane kwantowej dystrybucji kluczy kryptograficznych. To nowe „autostrady” umożliwiające podróż w świat powszechnego wykorzystania kwantowych technologii przyszłości. Tak jak w przeszłości sieć elektryczna pozwoliła korzystać z

elektryczności a standardowe sieci światłowodowe dały dostęp do szerokopasmowego internetu, internet kwantowy jest technologią jutra. Polskie środowisko ściśle ze sobą współpracuje efektywnie wykorzystując dostępne zasoby, czego znakomitym przykładem są prowadzone od ponad dwudziestu lat prace doświadczalne z zakresu technologii kwantowych w ramach KL FAMO działającego przy UMK w Toruniu. Znaczącym osiągnięciem polskich naukowców zaangażowanych w działalność Laboratorium jest konstrukcja polskiego optycznego zegara atomowego. Dzięki temu Polska znalazła się na uprzywilejowanej pozycji w obliczu dokonanej w 2019 r. redefinicji układu jednostek miar SI, w wyniku której wzorzec czasu i częstości stał się niezbędnym elementem do realizacji wzorców jednostek innych wielkości fizycznych.

4. Narodowy Program Kwantowy

Zdecydowana większość prac badawczo-rozwojowych prowadzonych w Polsce w zakresie technologii kwantowych finansowana jest w ramach otwartych programów, konkurując bezpośrednio z innymi obszarami tematycznymi. Jakkolwiek skuteczność w zdobywaniu środków potwierdza wysoką jakość badań kwantowych, taki tryb nie pozwala osiągnąć odpowiedniej skali działań, nie zapewnia odpowiedniej ciągłości finansowania, a co najważniejsze nie zawiera odpowiednich zachęt do komercjalizacji i wdrożeń. Dodatkowo, podobnie do innych wysokich technologii, na przykład w biotechnologii i produkcji leków specyfiką domeny kwantowej są dłuższe cykle inwestycyjne, które zniechęcają prywatnych inwestorów do inwestowania w przedsięwzięcia o długim okresie zwrotu. Jest to również przeszkoda w dostępie do finansów publicznych, objętych relatywnie krótkim cyklem rozliczeniowym. Dlatego do badań i rozwoju przemysłu kwantowego niezbędne jest opracowanie dedykowanych narzędzi wsparcia. Aby wykorzystać w pełni potencjał polskiego środowiska i umożliwić współpracę międzynarodową, niezbędne jest ustanowienie Narodowego Programu Kwantowego. Poniżej znajduje się zarys jego koncepcji, który w ocenie Klastra powinien umożliwić rozwój technologii i ich gospodarcze wykorzystanie.

Tematycznie dobrą formułą dla takiego programu będzie organizacja w ramach kilku rozproszonych geograficznie hubów dziedzinowych (obliczenia kwantowe, komunikacja kwantowa, metrologia kwantowa, itp.) które pozwolą zintegrować społeczność naukową, także z uwzględnieniem mniejszych ośrodków akademickich. Każdy z hubów powinien podjąć działania prowadzone w pięciu obszarach. Pierwszy obszar to badania podstawowe stanowiące fundament dla obszaru drugiego, czyli aplikacji i wdrożeń. Te dwa zasadnicze obszary programu będą wspierane przez pozostałe: obszar trzeci – infrastruktura, obszar czwarty – przygotowanie kadr, obszar piąty – komunikacja i koordynacja. Rezultatem programu w długim horyzoncie czasowym będzie stworzenie warunków do prężnego rozwoju wysoko rozwiniętej gałęzi gospodarki wykorzystującej technologie kwantowe. Konsekwentna realizacja programu spowoduje, że Polska stanie się centrum, ku któremu ciężyć będą komercyjne przedsięwzięcia wykorzystujące technologie kwantowe, dzięki dużej koncentracji i akumulacji środków.

Obszar I: Badania podstawowe (ok. 24% budżetu programu). Powstaną sieci centrów prowadzących badania podstawowe eksplorujące zarówno nowe efekty kwantowe jak również możliwość ich wykorzystania do tworzenia nowych technologii. Działania te

wspierane będą zarówno przez duże programy badawcze umożliwiające współpracę wielu grupom badawczym na danym temacie jak i granty badawcze przeznaczone dla poszczególnych grup. Ponadto wsparcie rozwoju kadry badawczej będzie prowadzone poprzez finansowanie pozycji profesorskich umożliwiających tworzenie grup badawczych oraz poprzez program staży podoktorskich w części realizowanych zagranicą a w części w kraju.

Obszar II: Aplikacje i wdrożenia (ok. 24% budżetu programu). Powstaną sieci centrów technologicznych, których głównym celem będzie wykorzystywanie wyników badań podstawowych do tworzenia nowych rozwiązań technologicznych i ich wdrażanie do produktów komercyjnych. Działania te wspierane będą zarówno przez duże programy aplikacyjno-wdrożeniowe umożliwiające współpracę wielu podmiotom gospodarczym jak i mniejsze granty aplikacyjno-wdrożeniowe przeznaczone dla poszczególnych podmiotów.

Obszar III: Infrastruktura (ok. 22% budżetu programu). Powstanie kilka dużych inwestycji infrastrukturalnych wspierających badania podstawowe jak również aplikacje i wdrożenia. Te inwestycje uzupełnione będą mniejszymi grantami aparaturowymi oraz środkami przeznaczonymi na bieżące utrzymanie infrastruktury wspierającej badania podstawowe, aplikacje i wdrożenia w zakresie technologii kwantowych.

Obszar IV: Kształcenie (ok. 21% budżetu programu). W ośrodkach akademickich zostaną zorganizowane studia zamawiane o profilu: fizyka, fizyka techniczna, nanofotonika, technologie kwantowe. Studenci tych studiów zostaną wspierani dedykowanym programem stypendialnym. Dalsze ich kształcenie wsparte będzie stypendiami doktoranckim. Dla studentów i uczniów szkół zorganizowane zostaną płatne letnie staże zarówno w ośrodkach badawczych jak i podmiotach gospodarczych, których działalność związana jest z rozwojem technologii kwantowych. Ponadto prowadzona będzie działalność wzmagająca zainteresowanie dzieci i młodzieży przedmiotami ścisłymi (ang. *science, technology, engineering, mathematics*, STEM): fizyka, matematyka, informatyka, elektronika, robotyka poprzez przedmiotowe kółka, wsparcie dla przedmiotowych konkursów i rozwój szkolnych laboratoriów.

Obszar V: Upowszechnianie, popularyzacja i koordynacja (ok. 9% budżetu programu). Będzie prowadzona bieżąca koordynacja, monitorowanie oraz dostosowanie programu do zmieniających się warunków i potrzeb. Działania te obejmować będą między innymi obsługę konkursów oraz sprawozdawczość. Szczególnie istotna będzie również standaryzacja oraz harmonizacja tego programu z innymi programami wspierającymi rozwój: sztucznej inteligencji (ang. *artificial intelligence*, AI), technologii kosmicznych czy technologii wykorzystywanych w obronności. Ponadto prowadzone będą działania promocyjne obejmujące konferencje, obsługę stron internetowych, mediów społecznościowych, filmy reklamowe, programy popularnonaukowe.

Podstawowe założenia programu to: długofalowość, kompleksowość, wysokość finansowania oparta o wskaźniki makroekonomiczne, pełna transparentność poprzez dystrybucję środków w otwartych konkursach, regularny monitoring i ewaluacja, weryfikacja osiągniętych celów oraz adaptacja do zmieniających się warunków zewnętrznych. Docelowy czas trwania programu to 20 lat z okresowym przeglądem aktywności organizowanym co 5 lat. Odpowiednia częstotliwość sprawozdawczości umożliwi ewaluację wyników cząstkowych

prowadzonych projektów oraz umożliwi weryfikację odpowiednio dobranych wskaźników w trakcie okresu realizacji programu, jak również regulację budżetów alokowanych na poszczególne obszary. Wydłużony horyzont finansowy projektów kwantowych umożliwi stabilność finansową i organizacyjną, która stanowi wymierną blokadę innowacyjności w obszarze wysokich technologii. W ocenie ekspertów klastra po osiągnięciu pełnej skali działania roczne finansowanie programu odpowiadałoby 1 promilowi PKB, co obecnie odpowiada ok. 3 000 MPLN/rok, równoważne 750 MUSD/rok, przy czym ewaluacja częściowa projektów wieloletnich odbywałaby się w cyklach 3-5 letnich, podobnie do obecnych mechanizmów wsparcia.

5. Oczekiwane wyniki

Kluczowym aspektem Narodowego Programu Kwantowego jest wkład w budowę gospodarki opartej na wiedzy, co jest istotne w przypadku kraju takiego jak Polska, w którym większość PKB jest wytwarzana poza sektorem wysokich technologii. Dostępne jest szereg opracowań, które pozwalają ocenić wpływ technologii kwantowych na gospodarkę w skali globalnej.

Potencjał technologii kwantowych dostrzegli eksperci Światowego Forum Ekonomicznego, które opublikowało w styczniu 2024 raport "Quantum Economy Blueprint" (<https://www.weforum.org/publications/quantum-economy-blueprint/>). Raport podsumowuje wysiłki czynione przez wiele krajów świata oraz wskazuje cele gospodarcze dla różnych branż: nauk biologicznych, logistyki, przemysłu samochodowego, kosmicznego, obronnego, wytwarzania środków produkcji, bankowości, usług finansowanych i ubezpieczeń (ang. *banking, financial services and insurance*, BFSI). W odniesieniu do tego ostatniego obszaru dostępne jest też stanowisko amerykańskiej organizacji pozarządowej zajmującej się ochroną inwestorów: Financial Industry Regulatory Authority pochodzące z października 2023 roku (www.finra.org/rules-guidance/key-topics/fintech/report/quantum-computing).

Raport Światowego Forum Ekonomicznego podsumowuje dostępność technologii kluczowych dla rozwoju technologii kwantowych i obliczeń kwantowych - istnieją obszary, w których przemysł europejski jest całkowicie nieobecny. Przykładowo, zostały przedstawione projekcje dotyczące rynku sensorów kwantowych, który w samych Stanach Zjednoczonych w 2022 roku był wyceniany na 270 mln USD, zaś perspektywa rocznej stopy wzrostu złożonego (CAGR) do roku 2032 oceniana jest w zależności od źródła na ok 13% dla Stanów Zjednoczonych oraz od 5 do 14% dla świata. Warto zauważyć, że projekcje te dotyczą samego rynku produkcji sensorów a nie dotyczą skutków pośrednich, które na przykład w przypadku metrologii mają charakter mnożnikowy (nowe złoża surowców, przewaga technologiczna rozwiązań cywilnych i wojskowych w zakresie ochrony informacji i analizy pola walki, nowe farmaceutyki oraz poprawa procesów technologicznych ich wytwarzania itp.). Podobne szacunki dotyczą rynku komunikacji kwantowej, który w 2022 roku w Stanach Zjednoczonych był wyceniany na 690 mln USD, zaś do roku 2030 ma wzrosnąć do 2,48 mld USD przy stopie wzrostu powyżej 20% (spotyka się również CAGR 29%). Na prorozwojową rolę technologii kwantowych wskazują analitycy jednej z czołowych firm konsultingowych - Boston Consulting Group. W raporcie z 2021 roku globalny przyrost wartości gospodarki za sprawą tylko jednej technologii - symulacji z użyciem komputerów kwantowych - został

oszacowany na poziomie 850 mld USD rocznie w ciągu najbliższych 15-30 lat. Warto również nadmienić, że niektóre z technologii z zestawienia BCG - na przykład wyżarzanie kwantowe do optymalizacji m.in. portfeli inwestycyjnych - jest wykorzystywane już dziś, a odpowiada za 30% tej kwoty.

Powyższe wskaźniki pokazują, że branża technologii kwantowych w najbliższej dekadzie stoi przed perspektywą bezprecedensowego dwucyfrowego wzrostu. Polska ma znaczący potencjał, aby poprzez wsparcie starannie wybranych tematów badawczo-rozwojowych zostać z beneficjentów tego wzrostu jako dostawca technologii i podmiot, który je kontroluje. W przeciwnym razie naszemu krajowi grozi pozostanie w roli użytkownika czy też odbiorcy końcowego. Warto tu odnotować, że strategie rozwoju technologii kwantowych rozwijają kraje o podobnym lub niższym PKB per capita: Indie, Brazylia, Tajlandia, Filipiny czy Węgry. Technologie kwantowe mają bezpośredni wpływ na rozwój wielu obszarów nauki i gałęzi przemysłu, takich jak elektronika, mikroelektronika i fotonika, a pośrednio także na energetykę, sektor biotechnologii, inżynierię materiałową, przemysł półprzewodnikowy, cyberbezpieczeństwo i obronność.

6. Podsumowanie

Technologie kwantowe otwierają drogę dla rewolucyjnych rozwiązań technologicznych, wykorzystując bezpośrednio zjawiska kwantowe zachodzące w skali atomowej. Obecnie rozwój technologii kwantowych jest istotnym punktem krajowych strategii państw wysokorozwiniętych, stymulując nie tylko postęp naukowy, ale także stanowiąc w znacznej mierze dojrzałą technologię gotową do zastosowań w telekomunikacji, energetyce, finansach oraz na potrzeby bezpieczeństwa i obronności.

Narodowy Program Kwantowy, zakładający kompleksowe podejście i długoterminową strategię dystrybucji środków poprzez otwarte konkursy, ma na celu wykorzystanie tego potencjału w celu prężnego rozwoju gospodarki i technologicznego postępu poczynając od wczesnej edukacji, poprzez ukierunkowane programy studiów, po narzędzia wsparcia przedsiębiorstw wysokich technologii. Program ze swojej natury powinien mieć charakter międzyresortowy, uwzględniający działania w obszarze nauki, cyfryzacji, obronności, rozwoju i edukacji narodowej. Uczyni on także z Polski wartościowego partnera na arenie europejskiej i globalnej.

Autorzy dokumentu: Konrad Banaszek, Teodor Buchner, Roman Ciuryło, Tomasz Czyszanowski, Anna Kamińska, Tadeusz Kocman, Sylwia Kostka, Radosław Łapkiewicz, Marcin Pawłowski, Adam Sawicki, Grzegorz Sęk, Anna Szerling.



KLASTER
TECHNOLOGII
KWANTOWYCH

Koordinator klastra:
Quantum Optical Technologies sp. z o.o.
ul. Lisa-Kuli 4, 35-032 Rzeszów
E-mail: info@klasterkwantowy.pl