

## V. PRZEGLĄD PIŚMIENICTWA

**Laurent Adatto, *Enjeux et perspectives du développement des technologies quantiques* (Challenges and Prospects in the Development of Quantum Technologies | Wyzwania i perspektywy w rozwoju technologii kwantowych), „ISTE OpenScience” 2023, vol. 23-8, s. 1–15.**

Autor opracowania wyraźnie zaznaczył, że jego celem jest wyjaśnienie elementów fizyki kwantowej, które są niezbędne do rozwoju nowych technologii głównie z perspektywy dydaktycznej. W dalszej części opracowania skupia się na francuskim planie kwantowym oraz elementach porównawczych dotyczących głównych międzynarodowych planów na dużą skalę i rozwoju specyficznego dla cyfrowych gigantów. W opracowaniu wyjaśniono także potencjalne zagrożenia i pułapki związane z rozwojem kwantów, ze szczególnym uwzględnieniem aspektów cyberbezpieczeństwa technologii kwantowych.

W ocenie Autora technologie kwantowe wdrażają właściwości fizyki kwantowej, które są nieodłącznie związane z materią w „nieskończenie małym” wymiarze, tj. w skali atomów i poniżej na poziomie cząstek subatomowych, takich jak elektrony. Koncepcja fizyki kwantowej pojawiła się w 1900 r., w następstwie pionierskich prac Maxa Plancka nad promieniowaniem ciała doskonale czarnego i drganiami cieplnymi generowanymi zgodnie z prawem skorelowanym ze stałą, znaną jako stała Plancka. W późniejszych badaniach nad tą skalą wymiarową oczywiste stało się, że niepodzielna wielkość może generować zmianę stanu. Właściwość ta w ocenie Autora jest kluczem do fizyki kwantowej. Ukształtowała ona związaną z nią etymologię: ta niepodzielna wielkość nazywana jest po łacinie *quantum*, w liczbie pojedynczej od *quanta*. Jest ona powiązana z nowym wymiarem fizyki, tj. z fizyką kwantową, która różni się od odkrytej wcześniej fizyki klasycznej.

W fizyce klasycznej przejście z jednego stanu do drugiego jest progresywne i nie jest ograniczone *minimalnymi* wartościami.

Z fizyką kwantową zintegrowana jest mechanika kwantowa, której głównymi gałęziami są dualizm falowo-korpuskularny, podwójna forma materii w nieskończenie małej skali (w przypadku światła – korpuskularna forma fotonu i forma długości fali), superpozycja kwantowa (na razie rozumiana tylko teoretycznie i matematycznie, biorąc pod uwagę, że cząstka lub zestaw cząstek może znajdować się jednocześnie w różnych miejscach z różnymi powiązanymi prawdopodobieństwami) oraz splątanie (dwie cząstki lub zestaw cząstek skorelowanych ze sobą przez ich stan kwantowy niezależnie od odległości, jaka je dzieli).

Splątanie kwantowe doskonale łączy stany dwóch odległych cząstek (mogących znajdować się w znacznych odległościach), które są połączone niewidzialną nicią fotoniczną, tworząc pojedynczy system kwantowy. Kryptografia kwantowa czerpie z tej charakterystyki splątania. W rezultacie możliwe będzie wygenerowanie absolutnych kluczy kodujących.

Splątanie kwantowe ma potencjał do radykalnych innowacji w kryptografii, informacji i informatyce. Jako przykład tego, w jaki sposób właściwość splątania kwantowego może być wykorzystywana do kształtowania technologii bardzo wysokiego poziomu, Unia Europejska niedawno zaplanowała uruchomienie systemu satelitów wykorzystujących technologię splątania kwantowego. Podobnie, teleportacja poprzez integralną transmisję informacji w kwantowym stanie materii staje się możliwa i została już pomyślnie przetestowana na poziomie cząstek i tutaj ponownie jest znana jako teleportacja kwantowa. Jeśli chodzi o kryptografię kwantową, splątanie i jego agregaty skorelowanych cząstek, niezależnie od odległości, umożliwią absolutne bezpieczeństwo podczas działania. Jednocześnie potencjalna moc komputera kwantowego pozwoli odszyfrować wszystkie obecne klucze bezpieczeństwa kryptograficznego, które nie są oparte na mechanice kwantowej. Wyzwania te pokazują poziom radykalnej innowacji związanej z postępem w technologiach kwantowych.

Fizyka kwantowa w ocenie Autora już doprowadziła do znaczących innowacji w losach świata. Te pionierskie wynalazki obejmują tranzystory, układy scalone, lasery i systemy pozycjonowania typu GPS.

Kwantowa charakterystyka superpozycji oznacza, że cząstki (materia, foton) mogą być przypisane do dwóch jednoczesnych stanów, a moc obliczeniowa komputera kwantowego wynika właśnie z superpozycji, podczas gdy klasyczne komputery implementują instrukcje binarne.

Tak więc u podstaw obliczeń kwantowych, jak wskazuje Autor, leży zachowanie materii w skali nieskończenie małej, w której cząstki nie przestrzegają już praw fizyki klasycznej, analogicznie do tych, które rządzą działaniem tradycyjnych komputerów w trybie binarnym (stan 1 lub 0 obraźliwej jednostki bitu), ale tych z fizyki kwantowej, w których dedykowana jednostka – kubit może jednocześnie przyjmować stany 1 i 0, a poza tym probabilistyczne kombinacje tych dwóch stanów. Jest to zastosowanie podstawowej zasady superpozycji kwantowej do rozwoju obliczeń kwantowych. Kubit jest zatem podstawowym elementem, który przenosi mechanizmy leżące u podstaw działania komputerów kwantowych. Jednocześnie jest to również jednostka do pomiaru kwantowej mocy obliczeniowej.

Autor wyraźnie zaznacza, że komputery klasyczne i komputery kwantowe zasadniczo różnią się od siebie. Ta dychotomia jest obecna na wielu poziomach. Dotyczy struktury, architektury, komponentów, procedur operacyjnych i algorytmów. Oznacza to, że moc obliczeń kwantowych, z ich optymalnymi algorytmami opartymi na procesach probabilistycznych, jest niewspółmierna do mocy obliczeń tradycyjnych. A będzie ona jeszcze większa, gdy komputery kwantowe, lub początkowo częściowo kwantowe, będą w stanie integrować coraz większą liczbę kubitów.

Zastosowanie technologii kwantowych w obliczeniach oznacza, że mogą one być wykonywane równolegle, co prowadzi do wykładniczego wzrostu dostępnej mocy. Co więcej, stale rosnąca masa danych generowanych przez *Big Data*

wymaga coraz większej mocy obliczeniowej, która może wkrótce pokazać granice najbardziej wyrafinowanych superkomputerów w konwencjonalnej technologii obliczeniowej i prawa Moore'a, które się wyczerpuje. Niespotykana moc obliczeń kwantowych to innowacja, która pozwoli ograniczyć masowość obliczeń danych, a także umożliwi niespodziewany dotąd postęp w wielu obszarach obliczeń i zastosowań obliczeniowych. Oczekuje się, że wraz z postępowaniem w dziedzinie komputerów kwantowych i obliczeń kwantowych możliwe do wykonania operacje będą stawały się coraz bardziej złożone. Począwszy od operacji na akcjach, przepływach i sektorze finansowym, dotyczących *Big Data*, przez ultraskomplikowane obliczenia związane z zachowaniem i przewidywaniem ruchów nieskończenie małych cząstek, do chemii i biochemii w perspektywie bezprecedensowego wyrafinowania, które w szczególności zrewolucjonizują dziedzinę medycyny, a w powiązany sposób – długowieczność ludzkiego życia.

W odniesieniu do tego przejścia od badań podstawowych do procedur operacyjnych technologii kwantowych kluczowe znaczenie będzie miało ustanowienie dominujących i standardowych projektów, z których będą mogli korzystać konkurenci i, co będzie bardziej korzystne dla wspólnego dobra, kooperanci. Mogłoby to wygenerować synergie i pomosty w tego typu badaniach, pomagając obniżyć bardzo wysokie koszty. Wśród elementów, których standaryzacja mogłaby przyspieszyć proces badawczy, znajdują się kubity, kluczowe elementy opisane powyżej.

Autor, odnosząc się do cyberbezpieczeństwa i technologii, wskazuje, że główny sektor technologii kwantowych dotyczy kwestii cyberbezpieczeństwa. Wiąże się z tym walka z cyberprzestępczością poprzez rozwój technologii kwantowych, wzmocniona przez rozwój środków zaradczych zaprojektowanych w celu ochrony przed potencjalnymi atakami cyberprzestępczymi przeprowadzanymi, przynajmniej częściowo, przy użyciu elementów technologii kwantowych o fenomenalnej mocy, w szczególności tych zdolnych do łamania najbezpieczniejszych kluczy kryptograficznych opartych na tradycyjnych obliczeniach.

France Digitale i Wavestone wezwały do wzmocnienia rozwoju kwantowego, w miarę możliwości promowanego i uzgodnionego na skalę europejską, w celu ochrony przed niebezpieczeństwami związanymi z wrogim wykorzystaniem technologii kwantowych dla podważania cyberbezpieczeństwa, nawet w dziedzinie niezależności politycznej.

Nadejście „kwantowej supremacji” spowodowanej zaprojektowaniem uniwersalnego komputera kwantowego może nastąpić w ocenie Autora tylko w ramach czasowych zgodnych ze stopniowym postępowaniem tych ultraskomplikowanych technologii, tj. co najmniej w ciągu najbliższych 10 do 20 lat. Wyścig w tym obszarze toczy się między „mieczem” (postępami w technologiach kwantowych wpływającymi na kwestie cyberbezpieczeństwa) a „tarczą” (środkami ochrony przed nimi poprzez ochronę instalacji cybernetycznych, w szczególności instalacji strategicznych, kluczy i bezpiecznych algorytmów szyfrowania).

W rezultacie finansowanie rozwoju cyberbezpieczeństwa (opartego na technologiach kwantowych i niekwantowych) zdolnego do przeciwstawienia się cyberprzestępczości opartej na obliczeniach kwantowych, które stale się rozwijają, powinno być ogromne.

Co ważne, Autor zwraca uwagę, że oprócz rozwoju technologicznego cyberbezpieczeństwa odpowiednie polityki powinny promować kształcenie profili ekspertów, w szczególności poprzez szkolenia na wysokim poziomie w szkolnictwie wyższym (specjalistyczne studia magisterskie, doktoranckie, habilitacyjne, kursy badawcze) i szkołach inżynierskich. Jest to cena, którą trzeba będzie zapłacić, jeśli polityka mająca na celu zapewnienie bezpieczeństwa w obliczu cyberprzestępczości opartej na technologiach kwantowych ma mieć decydujący wpływ. Szkolnictwo wyższe w połączeniu z klastrami badawczymi, w tym CNRS, stanowi integralną część Planu Kwantowego. W szczególności należy wykorzystać potencjał rozwoju klastrów i ekosystemów łączących badania, szkolnictwo wyższe, laboratoria uniwersyteckie, szkoły inżynierskie, interdyscyplinarność i powiązania z przedsiębiorstwami, zwłaszcza start-upami. W tym obszarze Quantum Engineering Grenoble (QuEnG) jest jedną z pionierskich francuskich sieci klastrów kwantowych opartych na tych elementach. Centrum nanonauki w kampusie Saclay ma również wysoki poziom wiedzy specjalistycznej w zakresie technologii kwantowych.

Utworzona w 2014 r. federacja badawcza CNRS Paris Centre for Quantum Computing (PCQC) zrzesza CNRS, Uniwersytet Paryski i Sorbonę, a wkrótce także nowe podmioty, w tym Inria, w celu poszukiwania symbiozy i interdyscyplinarności między ekspertami w dziedzinie nauk fizycznych i informatyki.

W dalszej części opracowania Autor opisuje francuski program kwantowy, tzw. Quantum Plan. W dniu 21 stycznia 2021 r. prezydent Emmanuel Macron przedstawił tzw. Plan Quantique – 5-letni program inwestycyjny o wartości 1,8 mld euro mający na celu rozwój sektora technologii kwantowych. Francuski plan kwantowy ma szczególny związek z francuską polityką odbudowy oraz potrzebą wykorzystania badań w przemyśle. Istotne w tej mierze pozostawało podjęcie takich kroków, które miałyby na celu zapobieżenie przejęcia patentów finansowanych w ramach francuskiego planu Quantum przez podmioty zewnętrzne. Wymagało to uwzględnienia aspektów cyberbezpieczeństwa technologii kwantowych. Chodziło głównie o to, aby przyszły uniwersalny komputer kwantowy i jego możliwości obliczeniowe „dały możliwość posiadania prometejskiej mocy”. Wdrożenie Planu Quantum jest koordynowane głównie przez trzy ministerstwa – Badań, Sił Zbrojnych i Gospodarki – a także Państwowy Sekretariat Technologii Cyfrowych, Sekretariat Generalny Inwestycji i Publiczny Bank Inwestycyjny Bpifrance. Projekt, oficjalnie znany jako „Quantum Plan”, jest również powiązany z badaniami publicznymi za pośrednictwem CNRS, Inria i CEA<sup>1</sup>.

Jeśli spojrzeć na szczegóły alokacji, fundusze państwowe na Plan Kwantowy wynoszą 1 mld euro. Publiczne instytucje badawcze, w tym CNRS, Inria i CEA, znajdują się wśród uczestników programu. Fundusze mają być przeznaczone w szczególności na wewnętrzne badania kwantowe i programy rozwojowe. Laboratoria związane z tymi organami są uważane za główny atut Planu Kwantowego, ze względu na ich synergiczny potencjał dla postępu kwantowego. Do tego dochodzą zyski z sektora

---

<sup>1</sup> CEA, *Research at the heart of the quantum plan*, oficjalna strona internetowa CEA, Francuska Komisja Energii Atomowej, 2021; CNRS, *La recherche française au cœur du Plan Quantique*, Publication officielle du CNRS – Centre national de la recherche scientifique, 2021; Inria – Institut national de recherche en informatique et en automatique.

prywatnego (firmy i fundusze inwestycyjne) – łącznie w wysokości 550 mln. Wśród firm uczestniczących w Planie Quantum znajdują się francuskie firmy zaangażowane w technologię kwantowe, zarówno w ramach swojej podstawowej działalności, jak i peryferyjnie, w szczególności w odniesieniu do technologii zamieszkujących: urządzeń, które nie są kwantowe, ale które wspierają postęp w rozwoju kwantowym. Do francuskich liderów związanych z Quantum Plan należą Air Liquide, Airbus, Atos, STMicroelectronics, Total i Thalès. Unia Europejska przeznaczyła 200 mln euro na wsparcie finansowe.

Zaangażowanie sektora prywatnego we francuski program kwantowy zostało opisane w oparciu o casus Atos. Francuski gigant globalnych usług cyfrowych Atos, zatrudniający ponad 110 tys. pracowników na całym świecie i osiągający roczne obroty przekraczające 10 mld euro, jest głównym francuskim graczem sektora prywatnego w kwantowych badaniach i rozwoju. Atos opracował symulatory kwantowe, które są znane na całym świecie ze swojej jakości, także w Dolinie Krzemowej.

Plan został bardzo pozytywnie przyjęty przez bezstronny „francuski ekosystem”, który obejmuje instytucje badawcze i laboratoria, przemysł, innowacyjne firmy związane z sektorem kwantowym, od start-upów, czasem bezpośrednio z laboratoriami badawczymi, po najbardziej innowacyjne firmy na świecie.

Plan Kwantowy jest również powiązany z inspirowanymi keynesizmem procesami ożywienia gospodarczego, które stają się jeszcze bardziej istotne w czasach kryzysu. Plan jest powiązany z projektem France Relance 2030, ogłoszonym we wrześniu 2020 r., z przewidywanym rekordowym budżetem w wysokości 100 mld euro. Jest on również powiązany z 4. Programem Inwestycji w Przyszłość (PIA 4) przedstawionym w tym samym miesiącu, z budżetem w wysokości 20 mld euro, przeznaczonym na innowacje, z czego ponad połowa jest bezpośrednio związana z ożywieniem gospodarczym.

Plan Quantum można porównać z podobnym rządowym projektem cyfrowej zaawansowanej technologii z 2018 r. czy Planem Sztucznej Inteligencji.

W związku z Planem Quantum utworzono system monitorowania wniosków patentowych składanych przez francuskich graczy w tym sektorze. Istnieje obawa, że patenty związane z kwantami mogą zostać przejęte przez zagraniczne firmy, zwłaszcza te inwestujące we francuskie firmy zaangażowane w Plan Quantum. Dekret IEF (Investissements Étrangers en France – Inwestycje zagraniczne we Francji), który umożliwia badanie charakteru i kontrahenta takich inwestycji, będzie miał zastosowanie do sektora technologii kwantowych.

Odnosząc się do polityki unijnej, Autor zwraca uwagę, że w październiku 2018 r. Unia Europejska wprowadziła inicjatywę Quantum European Flagship, przeznaczając na nią 1 mld euro w ciągu pięciu lat. Plan europejski dotuje już około 20 projektów, w tym projekty francuskie. Z kolei Stany Zjednoczone uruchomiły plan o nazwie National Quantum Initiative Act w grudniu 2018 r., ponownie na okres 5 lat o puli 1,25 mld dolarów, oraz otworzyły trzy ultranowoczesne centra poświęcone technologiiom kwantowym. Wielka Brytania rozpoczęła badania nad technologiami kwantowymi już w 2013 r. i w 2019 r. przeznaczyła 1 mld funtów na rozwój tych urządzeń. W grudniu 2019 r. Rosja uruchomiła swój plan kwantowy z budżetem w wysokości 750 mln euro. Pod koniec 2019 r. Izrael i Japonia zrobiły

to samo, z zapowiedzianymi kwotami odpowiednio 350 i 200 mln dolarów. Będąc świadkiem nowej współpracy między państwami i dużymi firmami, Japonia podpisała umowę z IBM w sprawie technologii kwantowych, jedną z dwóch najbardziej zaawansowanych firm w tej dziedzinie wraz z Google, jak wspomniano wcześniej. W lutym 2020 r., Indie przeznaczyły 1,12 mld dolarów na swój plan kwantowy.

Niniejsze opracowanie ukazuje, jak istotną rolę w przyszłości odegrają technologie kwantowe. Ich rozwój jest nieunikniony. Staną się one największym czynnikiem postępu technologicznego w XXI w. Prawidłowe ich funkcjonowanie oparte na koncepcji miecza i tarczy, o której była mowa powyżej, wymaga badań interdyscyplinarnych, w tym także badań w obszarach nie tylko fizyki, informatyki, ale także prawa.

*Hanna Wolska\**

*Anna Trela\*\**

<https://doi.org/10.14746/spp.2025.1.49.12>

---

\* University of Gdansk, Poland | Uniwersytet Gdański, Polska, <https://orcid.org/0000-0002-9806-6336>, e-mail: [hanna.wolska@prawo.ug.edu.pl](mailto:hanna.wolska@prawo.ug.edu.pl).

\*\* Adam Mickiewicz University, Poznań, Poland | Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Polska, <https://orcid.org/0000-0002-2014-5579>, e-mail: [atrela@amu.edu.pl](mailto:atrela@amu.edu.pl).