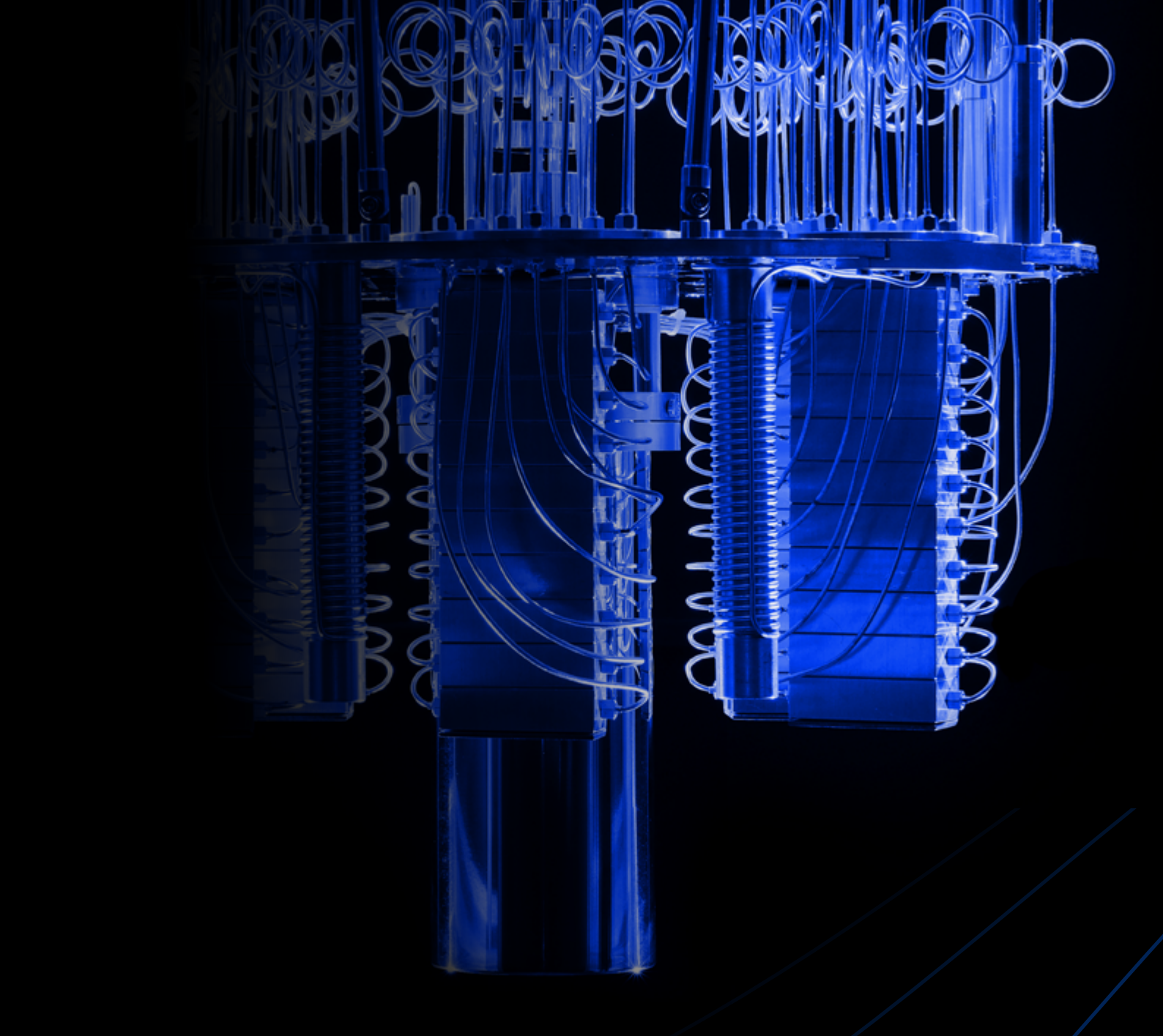




RAPORT QUANTUM
COMPUTING 2024-2025

IBM Quantum Innovation Center
Photonic and Trapped-ion
Quantum Computers

POLSKI WĘZEL OBLICZEŃ KWANTOWYCH

Spis treści

Przedmowa	6	Uwaga na bezpieczeństwo Internetu — Algorytm Shora	46
		Kwantowa komunikacja	48
Wstęp	10	Recepta na masywne wolumeny danych — Algorytm Grovera	50
Splątanie kwantowe na miarę Nobla	12	Symulacje kwantowe	51
Nobel za makroskopowe tunelowanie kwantowe	16	Czy to jest realne?	52
Kiedy klasyczne komputery przestają sobie radzić?	20	Pierwsze komputery kwantowe	53
		Fotoniczne komputery kwantowe	56
Rozdział 1: Świat komputerów kwantowych	24	Komputer kwantowy PIAST-Q	58
Wprowadzenie	26	Błędy w obliczeniach kwantowych	60
Jak to właściwie działa?	30	Obecne możliwości i architektury	61
Eksperyment z dwoma szczelinami	32		
Paradoks EPR	33	Rozdział 2: Polski węzeł obliczeń kwantowych	62
Twierdzenie Bella	34	Sieć IBM Quantum Network	65
Rozbrajamy bombę	36	Kroki milowe w latach 2022-25	66
Jak osiągnąć przewagę w obliczeniach?	38	Kwantowe centrum innowacji IBM Quantum w Polsce	69
Do czego można to wykorzystać?	40	Dostępne bramkowe komputery kwantowe	72
Wcielmy się w rolę sprzedawcy	44	Pełne wsparcie dla użytkowników	74

Spis treści

Programowanie komputerów kwantowych	76	Rozdział 4: Zastosowania	112
Perspektywy w ramach kwantowego hubu	78	Eksperymentalne obliczenia kwantowe krajowych użytkowników	116
Droga do kwantowego rozwoju	80	Zastosowanie obliczeń kwantowych	120
Administracja i zarządzanie obliczeniami kwantowymi	82	Ograniczanie i korekcja błędów w komputerach kwantowych NISQ	122
Rozdział 3: Kluczowe kompetencje i zagadnienia	84	Optymalizacja kombinatoryczna	124
Wprowadzenie	86	Chemia kwantowa	126
Programowanie komputerów kwantowych	88	Sztuczna inteligencja i uczenie maszynowe	128
Podstawy matematyczne	90	Uczenie Maszynowe	130
Podstawy informatyki kwantowej	92	Fizyka wysokich energii i badania jądrowe	132
Obliczenia kwantowe	94	Sektor finansowy	134
Wykorzystanie algorytmów kwantowych	96	Inne zastosowania	136
Programy kształcenia dla szkół wyższych	98	Podsumowanie i wnioski	141
Ramowy program kształcenia dla kierunku Informatyka kwantowa	100		
Informatyka kwantowa podział semestralny	102		
Programy kształcenia dla kierunków dziedzinowych	106		
Kwantowa Akademia	108		

Przedmowa

Wraz z tym raportem czytelnik otrzymuje możliwość zapoznania się z efektami działalności Polskiego Centrum Innowacji Kwantowej – IBM Quantum obejmującymi lata 2022-2025. Dokument jest wynikiem współpracy wielu zespołów naukowo-badawczych w kraju i powstał na bazie wykonanych zadań analitycznych, programistycznych i eksperymentalnych z wykorzystaniem dostępu do infrastruktury zasobów komputerów kwantowych IBM Quantum. Na podsta-

wie zebranych doświadczeń raport przybliży również czytelnikowi aktualny stan rozwoju programowalnych bramkowych komputerów kwantowych IBM Quantum oraz pierwszych w Polsce komputerów kwantowych ORCA-PT1 oraz PIAST-Q. Raport wprowadza jednocześnie do analizy możliwych zastosowań technologii kwantowych w symulacjach i obliczeniach. Należy zaznaczyć, iż raport jest formą podsumowania i nie wyczerpuje tematyki oraz wszystkich zagadnień po-

dejmowanych przez krajowych użytkowników naukowych, lecz stara się przybliżyć i wskazać liczne zagadnienia badawczo-rozwojowe szczegółowo podejmowane przez krajowe zespoły eksperckie. Przyjęto założenie, iż podsumowanie zadań powinno w naturalny sposób wprowadzać również czytelnika w świat technologii kwantowych wyjaśniając fizyczne podstawy funkcjonowania komputerów kwantowych. Dołożono starań, aby raport porządkował chronologicznie i tematycznie najważniejsze zagadnienia na pograniczu informatyki i fizyki, aby tym samym trafić do szerszego grona czytelników. W efekcie, raport został podzielony na cztery komplementarne rozdziały.

Celem raportu jest wprowadzenie czytelnika w obszar zaawansowanych technologii kwantowych, możliwości ich wykorzystania w symulacjach i obliczeniach komputerowych, a także omówienie kluczowych kompetencji niezbędnych do pracy w tym obszarze wraz z podsumowaniem realizacji działalności Polskiego Węzła Obliczeń Kwantowych.

Rozdział

01

Rozdział 1 przedstawia szereg podstawowych zagadnień wraz z przykładami oraz licznymi ilustracjami przybliżając czytelnikowi założenia, których poznanie ułatwia zrozumienie istoty funkcjonowania komputerów kwantowych, niedoskonałości i wyzwań, a zarazem ogromnego potencjału wdrożeniowego. Wprowadzenie ułatwia czytelnikowi zrozumienie opisów i licznych odniesień zaprezentowanych w dalszych rozdziałach. Rozdział ten jest też próbą przedstawienia wielu ograniczeń i wyzwań związanych z klasycznymi podejściami do obliczeń dużej mocy.

Rozdział

02

Rozdział 2 podsumowuje realizacje głównych zadań w ramach Polskiego Węzła Obliczeń Kwantowych oraz wyjaśnia zagadnienia od strony technologicznej dla bardziej zaawansowanych czytelników zainteresowanych informatyką kwantową oraz testowym dostępem do eksperymentalnej infrastruktury komputerów kwantowych. W rozdziale tym znajduje się również przegląd rozwiązań technologicznych wraz z oceną stopnia zaawansowania i planowanego rozwoju udostępnianych komputerów kwantowych w perspektywie najbliższych lat.

Rozdział

03

Rozdział 3 omawia podstawowe umiejętności, które należy opanować, aby swobodnie poruszać się po zagadnieniach związanych z technologiami kwantowymi. Posiadanie kompetencji w czterech kluczowych obszarach opisanych w rozdziale jest niezbędne do uzyskania częściowych kwalifikacji w programowaniu komputerów kwantowych, określonych w Polskich Ramach Kwalifikacji. Materiały edukacyjne przybliżające każdy z tych obszarów w formie interaktywnych kursów są dostępne za pośrednictwem odnośników w tekście.

Rozdział

04

Rozdział 4 jest podsumowaniem zebranych wyników eksperymentów krajowych użytkowników naukowych, które wykorzystywały zasoby komputerów kwantowych IBM Quantum w okresie od 2022 do 2025 roku przy wsparciu Polskiego Węzła Obliczeń Kwantowych. W tym rozdziale czytelnik znajdzie również zidentyfikowane potencjalne obszary zastosowań obliczeń i symulacji kwantowych na bazie krajowego potencjału naukowo-badawczego oraz możliwości ich wykorzystania w nauce i gospodarce.

Wstęp



Wynalezienie tranzystora – kluczowego komponentu, na którym opiera się cała współczesna elektronika.



Rozwój technologii kwantowych obejmuje również rozwój komputerów kwantowych.

Od kilku lat obserwujemy wręcz niewyobrażalny wyścig w rozwoju technologii kwantowych, za którym stoją najsilniejsze światowe gospodarki. Wiele czołowych firm technologicznych zajmujących się rozwojem komputerów kwantowych przewiduje, że kulminacja rozwoju technologii kwantowych nastąpi do roku 2030. Jest więc wciąż trochę czasu na przygotowanie się na nadchodzącą **drugą rewolucję kwantową**.

Aktualnie istnieje już wiele przykładowych oraz praktycznych rozwiązań wykorzystujących technologie kwantowe, często jednak nie są to jeszcze w pełni gotowe i powszechnie dostępne na rynku rozwiązania. Podobnie wygląda obecnie sytuacja z urządzeniami kwantowymi (nazywanymi w dalszej części komputerami kwantowymi), których aktualny stan zaawansowania wymaga jeszcze ogromnego wysiłku w ich dalszym rozwoju na poziomie zarówno sprzętowym, jak i programowym. Dopóki nie powstanie pierwszy komputer kwantowy, którego moc obliczeniowa znacząco przewyższy moc najsilniejszych superkomputerów w rozwiązaniu złożonego problemu, dopóty trudno jest realnie ocenić wpływ jaki on wywrze na różne sektory gospodarki i społeczeństwo w przyszłości. Historia uczy jednak nas, że w zdecydowanej większości przypadków nie doceniamy długoterminowego potencjału nowych, niezbadanych jeszcze technologii przełomowych, a do takich bez wątpienia należą technologie kwantowe. Komputery kwantowe nie są szybszymi komputerami lub nowymi generacjami bardziej wydajnych klasycznych superkomputerów. Fundamentalne założenia leżące u podstaw budowy współczesnych maszyn liczących, od najmniejszych układów scalonych, mikroprocesorów, aż po wydajne procesory w komputerach osobistych czy najsilniejsze superkomputery, znacząco różnią się od tego, jak funkcjonuje komputer kwantowy, gdzie jego działaniem rządzi nie klasyczna, a kwantowa mechanika.

W raporcie przyglądamy się bliżej temu na jakim etapie rozwoju są komputery kwantowe oraz jak możemy je już dziś eksperymentalnie wykorzystać. Podczas gdy inżynierowie pracują nad udoskonaleniem kolejnych generacji komputerów kwantowych, na przecięciu się informatyki, matematyki, fizyki i wielu innych dziedzin naukowych, opracowywane są nowe metody i algorytmy kwantowe. To właśnie dzięki współpracy praktyków i teoretyków poszerza się potencjalny obszar zastosowań obliczeń kwantowych, a jednocześnie wskazywane są coraz to nowsze wymagania, które nowe generacje komputerów kwantowych muszą spełnić, aby znalazły one zastosowania w praktyce.

Cofnijmy się jednak do początku lat 80, kiedy rozwój komputerów klasycznych nabierał dopiero rozpędu. Jednym z kluczowych momentów, a jednocześnie silnym impulsem do teoretycznych prac związanych z zastosowaniami obliczeń kwantowych były rozważania Richarda Feynmana. Wykorzystując klasyczne komputery do modelowania i symulacji zjawisk fizycznych na poziomie atomów i molekuł Feynman wykazał, że złożoność tych problemów jest bardzo duża, a czas potrzebny na klasyczne obliczenia musi być liczony w miliardach lat i jest dla nas najzwyczajniej nie do zaakceptowania. Aby zmierzyć się z nietrywialnym problemem Feynman zaproponował ideę budowy symulatora kwantowego oraz wykorzystania jego kwantowej natury do symulacji kwantowych zamiast klasycznych obliczeń. Tym samym pojawiły się nowe obszary zastosowań komputerów kwantowych oraz przełomów jakich możemy spodziewać się w inżynierii materiałowej, biochemii czy nanotechnologii.

Aby nieco przybliżyć podstawowe etapy rozwoju mechaniki kwantowej, należy jednak cofnąć się w czasie do lat 60 ubiegłego stulecia i słynnego twierdzenia Bella. John Bell odpowiedział na fundamentalne pytania i naukowe spory, które od lat 30 toczyli najwybitniejsi fizycy świata z Albertem Einsteinem na czele. Teoretyczne założenia zostały potwierdzone eksperymentalnie, a to już mały krok do etapu wdrożenia.



Technologie kwantowe obejmują szerokie spektrum możliwych zastosowań wykraczających znacznie poza obszar komputerów i obliczeń kwantowych, w tym obejmują technologie kwantowej komunikacji i kryptografii oraz nowe generacje sensorów stosowanych w metrologii i technikach pomiarowo-obrazowych. Dalszy postęp technologiczny w każdym z tych obszarów może w najbliższych latach przynieść zupełnie nowe i trudne do przewidzenia konsekwencje dla społeczeństwa, nauki oraz gospodarki.

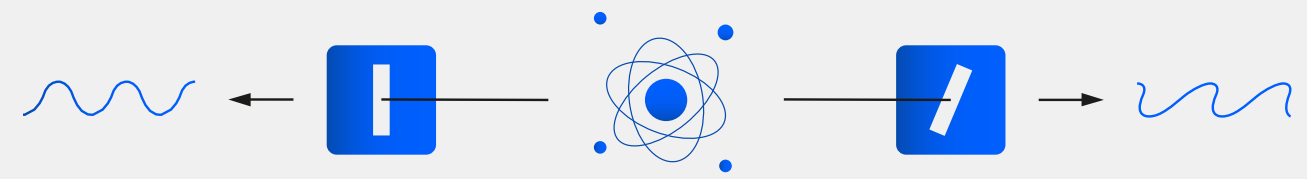
Splątanie kwantowe na miarę Nobla

4 października 2022 Szwedzka Akademia Nauk ogłosiła przyznanie nagrody Nobla z fizyki dla trzech naukowców — Alain Aspect, John F. Clauser oraz Anton Zeilinger — "za eksperymenty ze splątanymi fotonami, ustalające naruszenie nierówności Bella i pionierską informatykę kwantową". Prowadzenie tych badań naukowych było kluczowe w zrozumieniu podstaw mechaniki kwantowej jako fundamentalnej nauki rządzącej prawami naszego świata, a także przetarło szlak dla technologii kwantowych, w tym komputerów kwantowych.

Noblistów z 2022 roku można traktować jako ojców drugiej rewolucji kwantowej, gdzie bardzo ważnymi i szeroko wykorzystywanymi elementami są stany splątane oraz tzw. nierówności Bella. Każdy z Noblistów przeprowadził przełomowe eksperymenty wykorzystujące splątane stany kwantowe. Powyższe zagadnienia są kluczowe nie tylko dla komputerów i obliczeń kwantowych, ale również dla komunikacji kwantowej. Nobliści pokazali w swoich pracach eksperymentalnych wykorzystujących splątane fotony, że na poziomie mikroświata nierówności Bella nie są zachowane. Aby zrozumieć wagę konsekwencji tego

faktu, zastanówmy się nad samym **splątaniem kwantowym**. W pierwszej kolejności trzeba uświadomić sobie, że świat kwantowy nie jest deterministyczny i wiele „równoległych” stanów może współistnieć ze sobą z różnymi prawdopodobieństwami, a dopiero akt pomiaru niejako materializuje jeden z nich.

Wyobraźmy sobie, że wyemitowane zostaną dwa fotony w przeciwnych kierunkach, a pomiar stanu jednego z fotonów określa to, co zmierzmy, obserwując drugi foton. Mówimy wtedy o splątaniu kwantowym tych fotonów. Jednak trzeba pamiętać, że każdy z tych fotonów jest **superpozycją** (takim niepodglądanym współlistnieniem) różnych stanów i dopiero przy pomiarze manifestuje się konkretna wartość badanego parametru, jednocześnie określając pomiar tego parametru u drugiego fotonu. Jest to o tyle szokujące z punktu widzenia naszej intuicji, że to wpływanie na pomiar drugiego fotonu nie zależy od tego, jak daleko się on znalazł. To, co się wydarzy w kontekście jednej cząstki w splątanej parze, automatycznie określa, co się stanie z drugą cząstką, nawet jeśli znajdują się w odległych miejscach (np. w przeciwnych kątach pokoju lub skrajnych brzegach galaktyki). Jednocześnie



już od długiego czasu dyskutowano, czy ta korelacja w splątanej parze wynika z tego, że cząstki posiadają tzw. ukryte zmienne i instrukcje określające jaki, powinien być wynik eksperymentu. W tym miejscu musimy przejść do twierdzenia Bella i jego nierówności. W dużym uproszczeniu twierdzenie określa, że jeśli istnieją ukryte zmienne, to korelacja pomiędzy wynikami większej liczby pomiarów nigdy nie przekroczy pewnego progu. Jednocześnie mechanika kwantowa przewiduje, że pewien typ eksperymentów łamie nierówność Bella i w rezultacie daje mocniejszą korelację, niż ta klasycznie możliwa.

John Stuart Bell opisał w 1964r. twierdzenie, które dotyczy mechaniki kwantowej i pokazuje, w jaki sposób różni się ona od mechaniki klasycznej. Twierdzenie Bella, zwane również **nierównością Bella**, powstało bazując na podstawowym i wspomnianym powyżej założeniu mechaniki kwantowej, czyli, że stan splątany dwóch cząstek kwantowych (np. fotonów) nie może być sprowadzony do opisu stanów jego poszczególnych elementów. Pojedyncza cząstka w danej splątanej parze nie posiada określonego stanu. Twierdzenie mówi, iż powiązania pomiędzy rezultatami pomiarów właściwości takich cząsteczek mogą być silniejsze niż w sytuacji, gdy ich stan byłby zdefiniowany. Główne założenie twierdzenia Bella, czyli, że „żadna lokalna teoria zmiennych ukrytych nie może opisać wszystkich zjawisk mechaniki kwantowej” odpowiada na tzw. **paradoks EPR** [1]. Paradoks EPR jest wcześniejszym wynikiem pracy Alberta Einsteina, Borysa Podolskiego i Nathana Rosena, która opiera się na założeniach, że parametry cząstek kwantowych posiadają wartości niezależne od aktów obserwacji, a oddziaływania fizyczne zachodzą ze skończoną prędkością. Bell w swojej pracy udowodnił, że powyższa teoria tzw. realizmu lokalnego wymusza statystyczne korelacje wyników pomiarów, które nie są spełnione przez mechanikę kwantową i tym samym pokazał, że jest ona sprzeczna z tym założeniem [2].



Nierówność Bella można dość prosto zobrazować – albo rzeczywistość nie odpowiada założeniom realizmu lokalnego, albo istnieje błąd w samej mechanice kwantowej. Rozstrzygnięcie tej kwestii można osiągnąć tylko w drodze eksperymentu, nad czym pracowali nobliści z 2022 roku. Używając dość luźnej analogii można powiedzieć, że to trochę tak, jakbyśmy obserwowali pary rozbiegających się w dwie strony bliźniaków i obserwowali różne szczegóły ich wyglądu. W świecie dużych wielkości, gdzie rządzi mechanika Newtonowska, wszelkie obserwowane korelacje dotyczyłyby cech obiektywnych, jednoznacznych i immanentnych. Gdyby te pary braci były kwantowe, zauważylibyśmy, że patrzenie na jednego z braci, określa to, co widzimy u drugiego. Natomiast nierówności Bella utwierdzają nas w tym, że ci bliźniacy nie umawiają się w chwili rozbiegnięcia się, jak będą wyglądać szczegóły ich wyglądu, jak ich ktoś w końcu zobaczy.



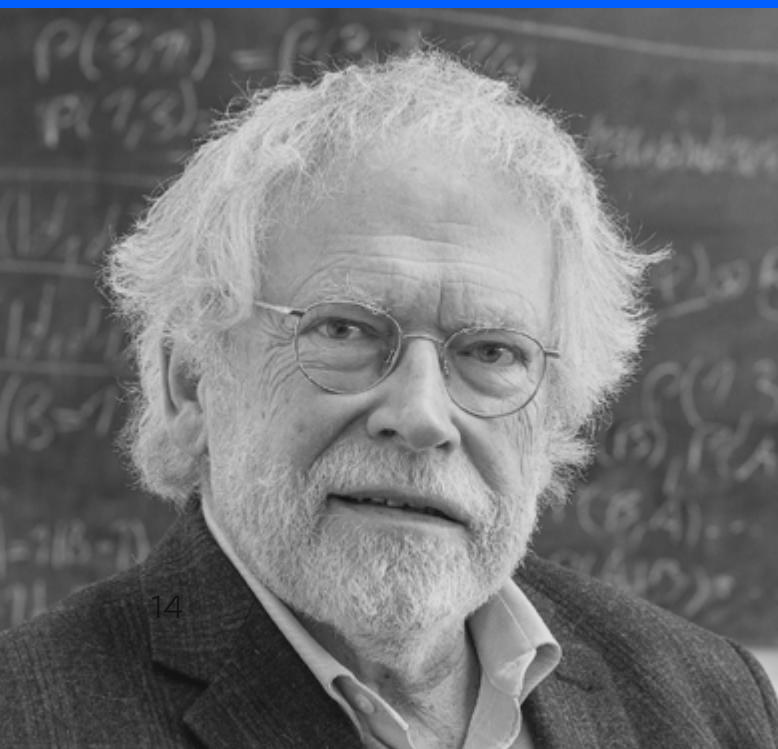
John F. Clauser

J.F. Clauser & Assoc., Walnut Creek,
CA, Stany Zjednoczone



Alain Aspect

Université Paris-Saclay oraz École
Polytechnique, Palaiseau, Francja



Anton Zeilinger

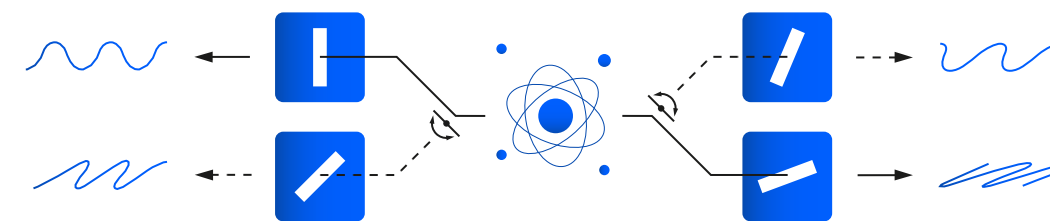
Uniwersytet Wiedeński, Austria

John Clauser

John Clauser zaprojektował układ eksperymentalny, którego wyniki obaliły tzw. nierówności Bella, udowadniając tym samym, że mechanika kwantowa wyklucza realizm lokalny. Użył on atomów wapnia, które po oświetleniu specjalnym światłem emitowały splątane fotony. Po obu stronach atomu ustawił filtry do pomiaru polaryzacji cząstek. Seria pomiarów wykluczyła możliwość istnienia lokalnych zmiennych ukrytych.

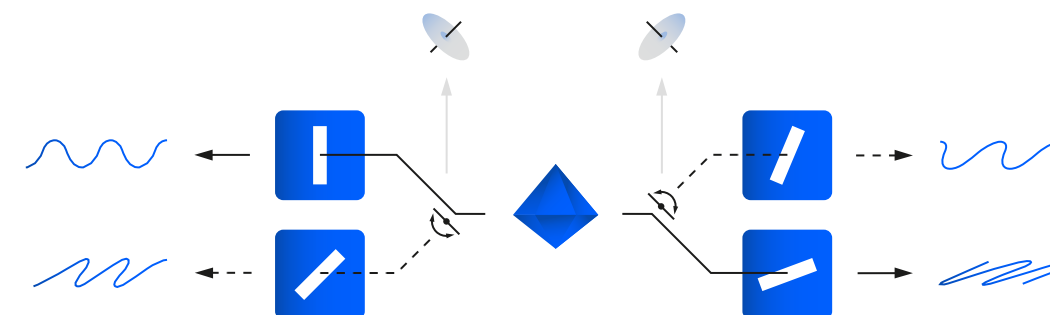
Alain Aspect

Alain Aspect powtórzył i udoskonalił eksperymenty Clausera, a także jako pierwszy udowodnił eksperymentalnie dualizm korpuskularno-falowy pojedynczych fotonów. Wprowadził on modyfikację pozwalającą na zmianę ustawienia filtrów po tym jak foton został wyemitowany z atomu. Pozwoliło to potwierdzić, że na wyniki nie wpłynęło początkowe ustawienie aparatury badawczej.



Anton Zeilinger

Anton Zeilinger wykonał kolejne testy nierówności Bella, tym razem korzystając ze specjalnego kryształu jako źródła fotonów, a także losowości do ustawiania konfiguracji filtrów. W jednym z eksperymentów, do ustawienia aparatury wykorzystano sygnały z odległych galaktyk, co pozwoliło wykluczyć możliwość ich wzajemnego oddziaływania. Zeilinger prowadził także badania nad kwantową teleportacją cząstek oraz badał splątanie kwantowe fotonów wysyłanych na duże odległości, co pozwoliło mu osiągnąć już w 2004 r. kanał komunikacji kwantowej o długości 144 km.



Zdjęcia autorstwa (od góry) [Peter Lyons, Royal Society uploader, Jaqueline Godany],
licencja CC.

Nobel za makroskopowe tunelowanie kwantowe

7 października 2025 Królewska Szwedzka Akademia Nauk ogłosiła przyznanie Nagrody Nobla z fizyki trzem naukowcom — Johnowi Clarke'owi, Michelowi H. Devoretowi oraz Johnowi M. Martinisowi — „za eksperymentalne wykazanie i kontrolę zjawisk kwantowych w nadprzewodzących obwodach elektrycznych”. Osiągnięcia te miały fundamentalne znaczenie dla rozwoju fizyki kwantowej, pokazując, że zjawiska dotąd kojarzone wyłącznie z mikroświatem mogą być obserwowane i precyzyjnie kontrolowane w układach makroskopowych. Prace laureatów stworzyły podstawy technologiczne dla współczesnych komputerów kwantowych opartych na nadprzewodzących kubitach oraz nowej klasy kwantowych urządzeń pomiarowych.

Noblistów z 2025 roku można uznać za twórców przelotu, w którym mechanika kwantowa przestała być domeną pojedynczych cząstek, a zaczęła funkcjonować jako narzędzie inżynierskie. Kluczową rolę odegrały tu nadprzewodzące obwody elektryczne, w których — dzięki odpowiedniej konstrukcji i ekstremalnie niskim temperaturom — możliwe jest obserwowanie

efektów takich jak tunelowanie kwantowe czy istnienie dyskretnych poziomów energii. W przeciwieństwie do klasycznych obwodów, gdzie prąd i napięcie mają jednoznaczne wartości, układy te mogą znajdować się w superpozycji stanów, a ich zachowanie opisuje się probabilistycznie, zgodnie z zasadami mechaniki kwantowej.

Aby zrozumieć znaczenie tych badań, warto zauważyć, że w klasycznej fizyce obwody elektryczne są obiektami deterministycznymi — znając parametry układu, można jednoznacznie przewidzieć jego zachowanie. Tymczasem w nadprzewodzących obwodach kwantowych energia układu przyjmuje jedynie określone, dyskretne wartości, a przejścia pomiędzy nimi mogą zachodzić poprzez tunelowanie, czyli proces, który nie ma odpowiednika w fizyce klasycznej. To właśnie te własności umożliwiają budowę kubitów — podstawowych jednostek informacji kwantowej.



Prace laureatów stworzyły podstawy technologiczne dla współczesnych komputerów kwantowych opartych na nadprzewodzących kubitach oraz nowej klasy kwantowych urządzeń pomiarowych.

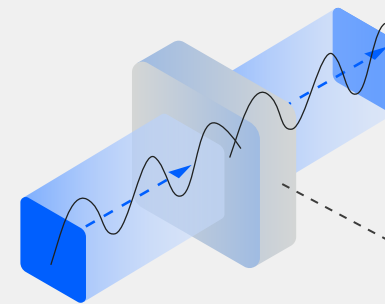


John Clarke

Profesor Uniwersytetu
Kalifornijskiego w Berkeley

John Clarke

Zaprojektował i zrealizował jedno z pierwszych eksperymentów, w których jednoznacznie wykazano istnienie kwantowych stanów energetycznych w nadprzewodzących obwodach. Wykorzystując złącza Josephsona, skonstruował układy, w których możliwe było zaobserwowanie tunelowania pomiędzy różnymi stanami energetycznymi obwodu. Jego prace dostarczyły pierwszych bezpośrednich dowodów na to, że obiekty składające się z ogromnej liczby elektronów mogą zachowywać się zgodnie z prawami mechaniki kwantowej, co podważało klasyczną intuicję dotyczącą granicy między światem mikro- i makroskopowym.



Tunelowanie kwantowe w złączach Josephsona

Michel H. Devoret

Uniwersytet Kalifornijski w Santa Barbara
Uniwersytet Yale

Michel H. Devoret

Rozwinął badania, wprowadzając precyzyjne metody kontroli i odczytu stanów kwantowych w nadprzewodzących obwodach. Jego eksperymenty pozwoliły nie tylko obserwować dyskretne poziomy energii, ale także manipulować nimi w sposób kontrolowany. Devoret wykazał, że odpowiednio zaprojektowane układy mogą być stabilne na tyle długo, by wykonywać na nich operacje kwantowe, co było kluczowym krokiem w kierunku praktycznego wykorzystania tych struktur jako elementów obliczeniowych.



John M. Martinis

Uniwersytet Kalifornijski w Santa Barbara

John M. Martinis

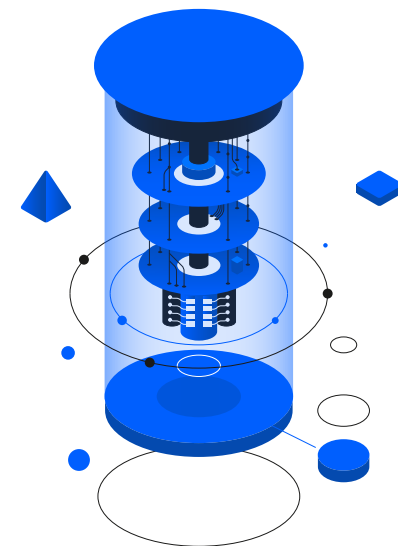
Skoncentrował się na dalszym rozwoju i integracji nadprzewodzących obwodów kwantowych, pokazując, że mogą one działać jako funkcjonalne kubity zdolne do przetwarzania informacji. Jego prace eksperymentalne doprowadziły do stworzenia układów, w których możliwe było inicjowanie, kontrolowanie oraz odczytywanie stanów kwantowych z wysoką precyzją. Dzięki temu nadprzewodzące kubity stały się jedną z wiodących platform technologicznych w rozwoju komputerów kwantowych.

Kiedy klasyczne komputery przestają sobie radzić

W dzisiejszych czasach trudno wyobrazić sobie świat bez wszechobecnych klasycznych komputerów. Stanowią one filar funkcjonowania instytucji i przedsiębiorstw, a także znajdują szerokie zastosowania codziennego użytku w wielu gospodarstwach domowych. Rozpoczynając od pracy biurowej z dokumentami, arkuszami kalkulacyjnymi czy innymi zaawansowanymi programami, przez wykorzystanie dedykowanych maszyn do pracy na liniach przemysłowych i produkcyjnych, aż do multimedialnej rozrywki, którą są w stanie dostarczyć w formie filmów, muzyki, gier czy interaktywnych symulacji.

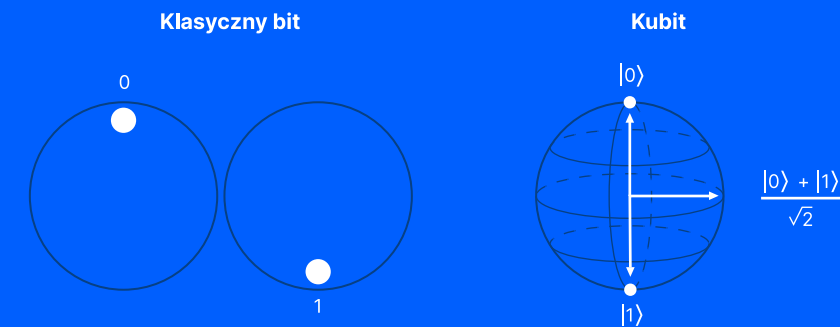
Tak jak zaznaczyliśmy już na wstępie, za wszystkimi zastosowaniami klasycznych komputerów stoją prawa fizyki i elektroniki, a każda operacja na komputerze klasycznym opiera się o zakodowane i sterowane przepływy energii elektrycznej zakodowanych w ciągi binarne zer i jedynek. Zasadniczo więc, warto myśleć o informatyce jako o nauce obliczeniowej wywodzącej się z matematyki i fizyki, a więc i podlegającej jej prawom.

Podstawową jednostką służącą do przetwarzania informacji w klasycznych komputerach jest **bit**. Jednym bitem jest w tym przypadku stan wspomnianego już tranzystora działającego jak prosty przełącznik. Najogólniej mówiąc, logicznej „jedynce” odpowiada wysokie napięcie, a logicznemu „zeru” napięcie niskie. Choć napięcie przyjmuje dowolne wartości z pewnego przedziału, na potrzeby kodowania informacji rozróżniane są tylko **dwa możliwe stany**. Odpowiednikiem klasycznego bitu jako podstawowej klasycznej jednostki informacji jest dowolny kwantowy układ dwustanowy – **kubit**.

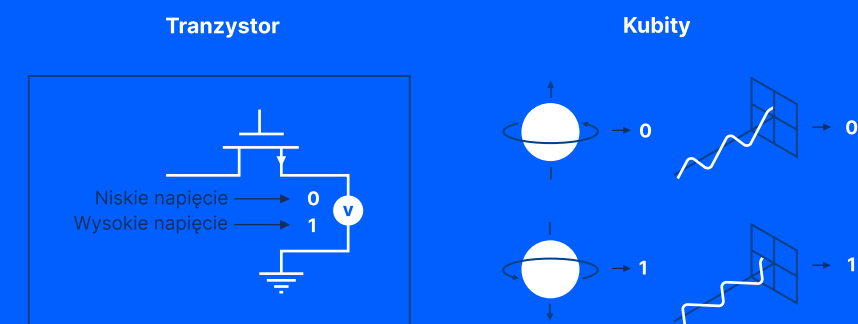


Kubit jako dwustanowy układ i podstawowa kwantowa jednostka informacji może w rzeczywistości bazować na różnych cząstkach kwantowych, takich jak na przykład:

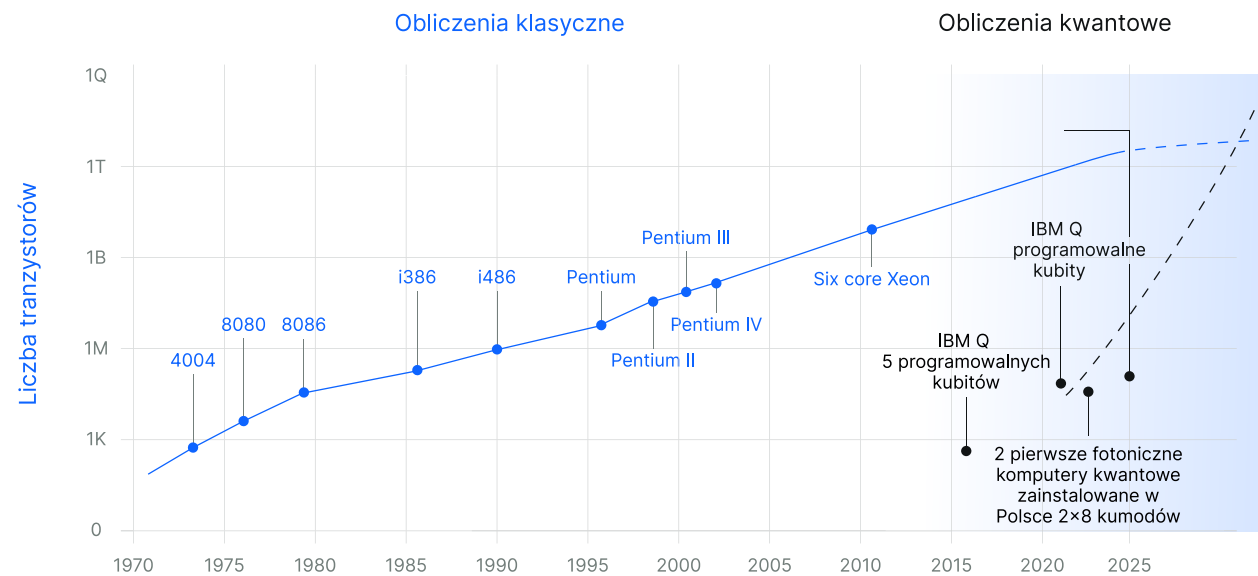
- dwa spiny elektronu
- dwa poziomy energetyczne atomu
- foton o dwóch wzajemnie ortogonalnych stanach polaryzacji.



To właśnie w tym miejscu warto upatrywać analogii pomiędzy klasycznym, a kwantowym komputerem wynikającej z dwustanowości podstawowej jednostki informacji. Nie zmienia to jednak faktu, że sposób zapisu i przetwarzania informacji w przypadku komputerów kwantowych jest znacząco różny. Warto również zaznaczyć, iż wymienione powyżej różne cząstki kwantowe są obecnie budulcem wykorzystywanym do eksperymentalnych konstrukcji **różnych typów komputerów kwantowych**. W odróżnieniu od bitu, kubit wykazuje naturę kwantową, gdyż może znajdować się w **superpozycji** dwóch stanów bazowych. Obrazowo rzecz ujmując, kubit może więc być w obu stanach jednocześnie, np. być jednocześnie trochę bardziej jedynką i trochę mniej zerem. W przypadku klasycznego bitu jest to oczywiście niemożliwe. Superpozycja to jedna z fundamentalnych własności obiektów kwantowych wykorzystywanych w komputerach kwantowych.



Choć na pierwszy rzut oka wszystkie operacje wykonywane w klasycznym komputerze dzieją się w sposób natychmiastowy, to w rzeczywistości każda z nich zajmuje pewien bardzo krótki odcinek czasu. Pomimo że, dla dzisiejszych maszyn cyfrowych nie jest wyzwaniem wykonanie tysięcy czy nawet milionów takich operacji, to wiele zadań stawianych zarówno przez współczesną gospodarkę jak i zwykłych użytkowników jest na tyle złożona, że wciąż stanowi wyzwanie nawet dla najpotężniejszych superkomputerów.



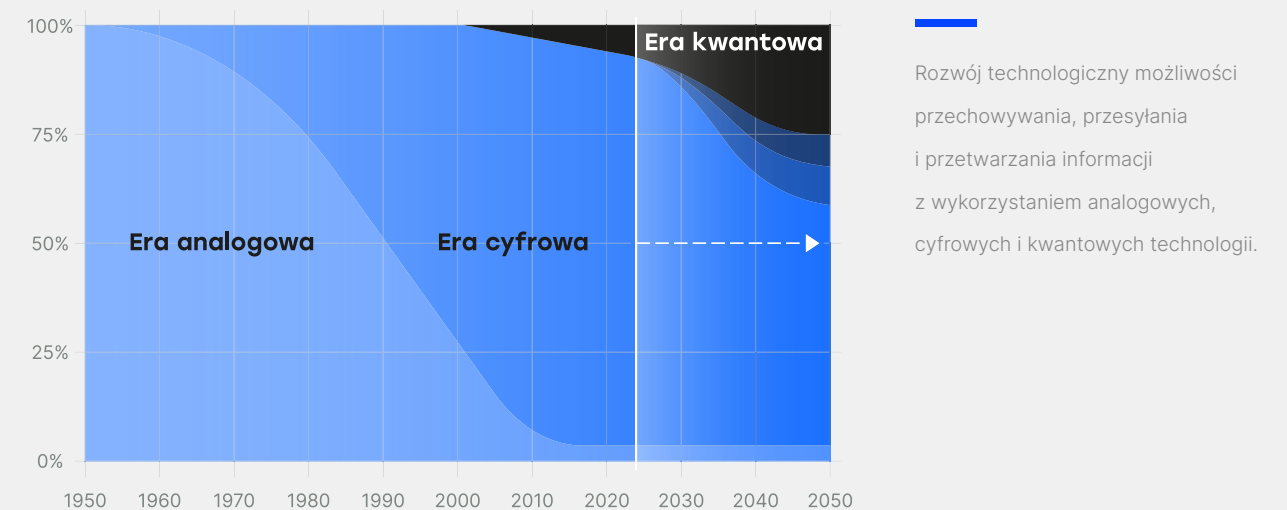
Okazuje się, że komputery klasyczne, oparte o krzemową technologię tranzystorów, mają wiele ograniczeń. O ile klasyczne komputery dobrze sprawdzają się w przypadku wielu zadań, np. wyświetlanie stron internetowych, czy obsługa programów użytkowych edytujących tekst, dźwięk czy materiały wideo, o tyle często można usłyszeć o nowych wyzwaniach i problemach z przetwarzaniem i analizą większej ilości danych. Przykładem może być tutaj produkcja map elektronicznych. Użytkownicy zazwyczaj nie mają problemu z ich wyświetlaniem, jednak samo ich stworzenie wymaga wykorzystania ogromnej mocy obliczeniowej klasycznych superkomputerów. Edycja jednego fragmentu geometrii drogi często wiąże się z przeliczeniem przyległych do niej dróg czy też sprawdzeniem dopuszczalności samej zmiany. Uogólniając, często takie obliczenia właśnie ze względu na ich złożoność obliczeniową są wykonywane w przybli-

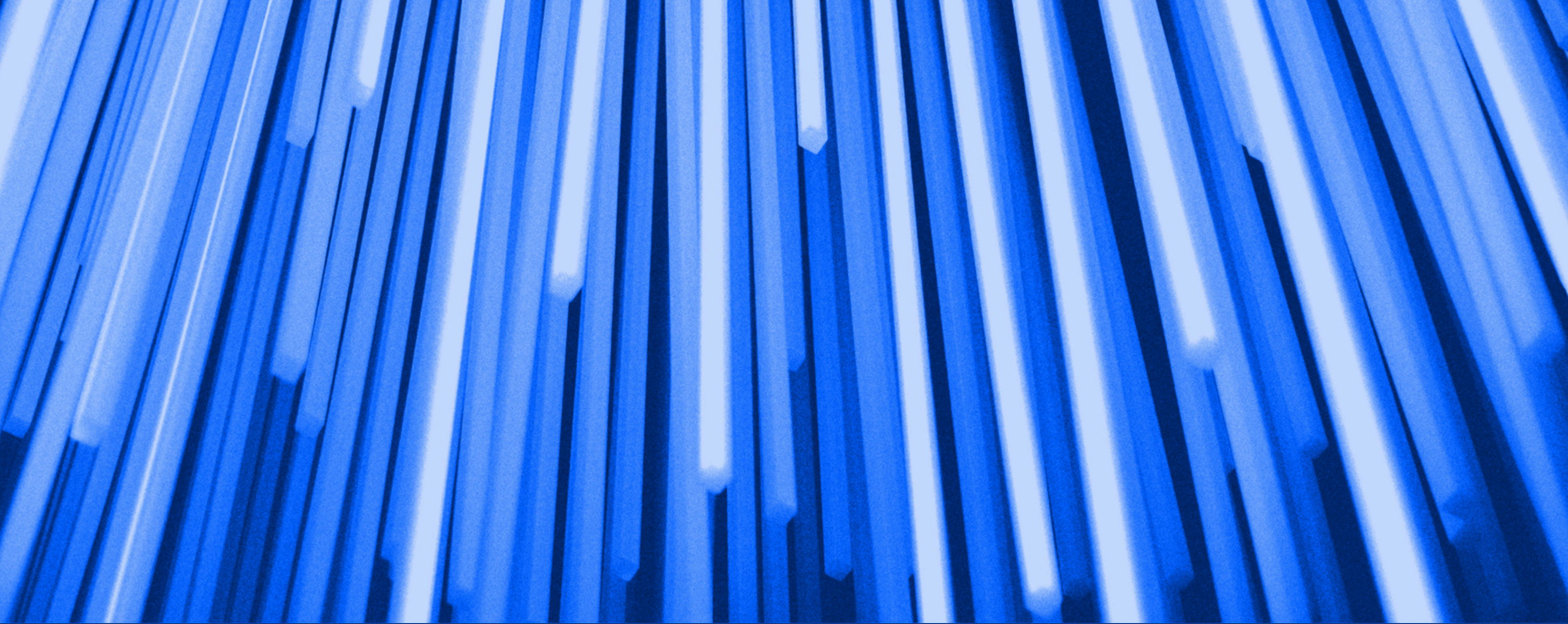
żony sposób, a i tak mogą zajmować sekundy, minuty, godziny czy dni, co dla użytkownika końcowego już jest zauważalnym narzutem czasowym.

W ostatnich latach rozwój klasycznych komputerów ma dynamikę wzrostu mniejszą niż wskazuje wspomniane na wstępie **prawo Moore'a**. Wiele wskazuje, że jesteśmy świadkami końca ery prawa Moore'a określającej dynamiczny postęp rozwoju klasycznych komputerów w ostatnich dekadach. Tak jak wyjaśniliśmy na wstępie raportu, jest to spowodowane dojściem do fizycznej bariery rozmiarów tranzystorów, których rozmiar zbliża się do rozmiaru pojedynczych atomów. W tak małej skali niepomijalną rolę odgrywają właśnie zjawiska kwantowe, które w przypadku klasycznych układów dwustanowych stanowią dużą przeszkodę dla dalszej miniaturyzacji. W związku z tym coraz większą uwagę poświęca się nowym rozwiązaniom,

które pozwolą utrzymać tempo rozwoju i sprostać wciąż rosnącemu zapotrzebowaniu współczesnego świata na moc obliczeniową. Propozycją rozwiązania tego problemu jest wykorzystanie zjawisk mechaniki kwantowej za pomocą **programowalnego komputera kwantowego**. Dotychczasowe postępy technologii kwantowych obserwowane na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat pozwalają przypuszczać, że tempo wzrostu mocy obliczeniowej kolejnych generacji procesorów kwantowych będzie znaczące.

Warto podkreślić, że w najbliższej przyszłości nie należy spodziewać się, że komputery kwantowe całkowicie zastąpią klasyczne komputery. Do zdecydowanej większości codziennych zastosowań klasyczne urządzenia cyfrowe nadają się po prostu znacznie lepiej. Jedynie w przypadku wybranych i wymagających zadań, komputer kwantowy ma dużą szansę, aby uzyskać przewagę nad jego klasycznym odpowiednikiem. Aktualnie, udało się eksperymentalnie wykazać przewagę kwantową dla bardzo specyficznych problemów takich jak próbkowanie losowych obwodów kwantowych oraz próbkowanie bozonów. W raporcie postaramy się pokazać wybrane obszary zadań i zagadnień ważnych dla przemysłu, nauki i społeczeństwa w Polsce, które w pierwszej kolejności mogą z podobnej przewagi skorzystać.





ROZDZIAŁ

Świat komputerów kwantowych

01

Wprowadzenie

Zapoczątkowana w połowie XX wieku rewolucja cyfrowa, zwana także trzecią rewolucją przemysłową, przyniosła ze sobą narzędzia i wynalazki, które na zawsze odmieniły gospodarkę i przemysł, a także doprowadziły do powstania tzw. społeczeństwa informacyjnego. Zamiast pracy i kapitału, strategicznym zasobem stały się dane, informacja i wiedza.

Zanim omówimy podstawowe zasady działania komputerów kwantowych warto tytułem wprowadzenia przypomnieć zasady działania klasycznych komputerów. Wydarzeniem, które znacznie przyspieszyło te zmiany, było wynalezienie tranzystora pod koniec lat czterdziestych XX wieku — kluczowego komponentu, na którym opiera się klasyczny komputer. Tranzystor jest elementem półprzewodnikowym, co oznacza, że w pewnych warunkach przewodzi prąd, a w pewnych nie. Działanie tranzystora opiera się na sterowaniu przepływem prądu elektrycznego z wykorzystaniem fizycznych własności półprzewodników. Tranzystory to najmniejsze elementy klasycznego komputera, które przełączają się pomiędzy dwoma stanami napięciowymi, czyli stanami binarnymi 0 i 1. Z tranzystorów natomiast zbudowane są bramki logiczne realizujące podstawowe funkcje logiczne algebry Boole'a oraz różne typy pamięci klasycznego komputera. Wraz z rozwojem techniki liczba dostępnych tranzystorów i budowanych z nich bramek logicznych wzrastała w niewiarygodnym tempie. Współczesne komputery wykorzystują już **miliony bramek logicznych** do przetwarzania informacji, czyli danych zapisanych w postaci binarnej.

Bramki logiczne to pewien ściśle określony, ale jednak abstrakcyjny model, który pozwala przejść z fizycznego spojrzenia na klasyczne komputery na poziom logiczny. Jest to o tyle istotne, że właśnie tutaj można dopatrywać się subtelnej granicy pomiędzy czysto fizycznym a matematycznym ujęciem istoty działania klasycznego komputera. Zakładając odpowiedni poziom niezawodności działania bramek logicznych, od pewnego momentu nie musieliśmy już skupiać się tylko na technicznych aspektach, fizycznych właściwościach czy kontroli przepływu elektronów w tranzystorach.



W efekcie postępu technologicznego mogliśmy naturalnie przejść na nieco wyższy, logiczny poziom oraz skupić się na istocie działania bramek logicznych, czyli operacjach na dwóch stanach binarnych 0 i 1. **Binarny sposób zapisu informacji oraz jej przetwarzanie z wykorzystaniem wielu bramek logicznych to zasada działania każdego klasycznego komputera.** Samo przetwarzanie informacji w komputerze odbywa się zgodnie ze skończonym i precyzyjnie zdefiniowanym ciągiem instrukcji realizującym określony algorytm, który umożliwia wykonanie zadania i rozwiązanie problemu. Jedną z kluczowych właściwości klasycznego komputera jest możliwość zapisu i wgrywania ciągu instrukcji w postaci programów komputerowych zapisanych w różnych językach programowania. Dzięki temu, że liczba dostępnych bramek logicznych umożliwiała coraz bardziej zaawansowane przetwarzanie danych, jednocześnie wzrastała moc obliczeniowa komputerów. Pojawiały się równocześnie języki programowania wysokiego poziomu, czyli kolejne warstwy abstrakcji ułatwiające programowanie klasycznych komputerów. Przetwarzaniem informacji, w tym tworzeniem programów komputerowych, opisem procesów algorytmicznych, rozwiązywaniem problemów z wykorzystaniem komputerów, obliczeniami i ich złożonością zajmuje się informatyka. Tym samym, w dużym skrócie i uproszczeniu, na tle działania klasycznych komputerów, pokazując kolejne warstwy abstrakcji, przeszliśmy w krót-

kim opisie od fizyki i matematyki do informatyki.

Przez ostatnie dekady przyzwyczailiśmy się przechowywać i przetwarzać informacje w oparciu o binarny zapis danych, bramki logiczne i układy scalone, z których zbudowane są główne elementy, czyli procesory klasycznych komputerów. Wielu z nas traktuje klasyczne komputery jako osobiste i podręczne narzędzia tak powszechne w użytkowaniu, że nie zastanawiamy się nad ich fizyczną naturą. Rozwój trwa w najlepsze i wszystko wskazuje na to, że komputery klasyczne jeszcze przez długi czas z nami pozostaną. Nie wszyscy jednak zdajemy sobie sprawę, iż w dużym uproszczeniu, liczba tranzystorów i bramek logicznych wchodzących w skład układu scalonego od lat pięćdziesiątych ubiegłego stulecia regularnie rosła w równych okresach czasu. W efekcie co dwa lata podwajała się nam również dostępna moc obliczeniowa klasycznych komputerów zgodnie ze znanym **Prawem Moore'a**.

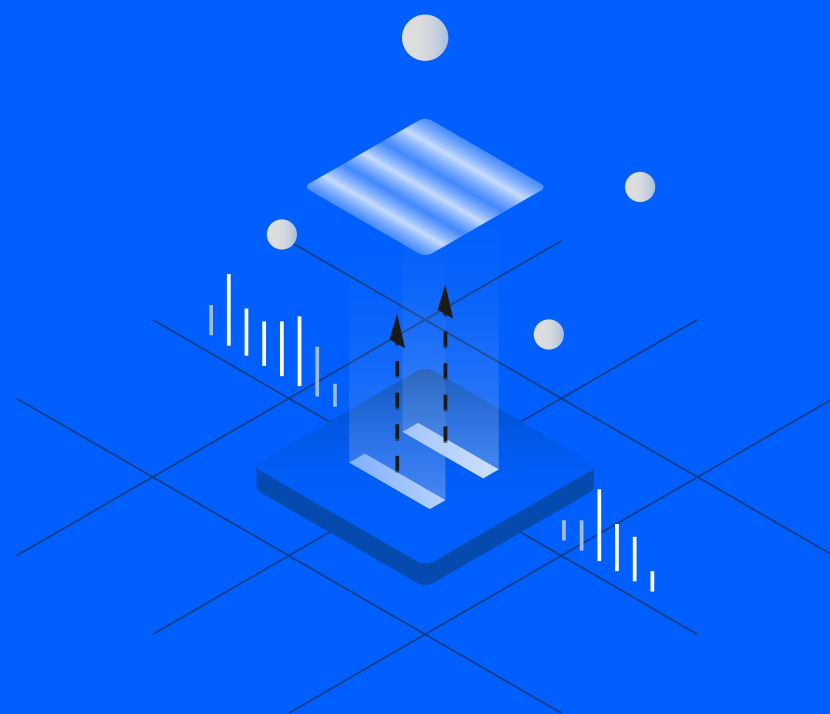
Problem w tym, iż od kilkunastu lat inżynierowie, naukowcy i technicy poważnie zmagają się z dalszą miniaturyzacją tranzystorów, bramek logicznych i układów scalonych. Na rynku pojawiają się oczywiście reklamowane mocno nowe generacje procesorów, ale w ogólności składają się one jednak z coraz większej liczby rdzeni. Nie są to niestety szybsze procesory

Miejsce instalacji pierwszych komputerów kwantowych w Polsce

Poznańskie Centrum
Superkomputerowo-Sieciowe,
grudzień 2023

ogólnego przeznaczenia wytworzone w procesach technologicznych dalszej miniaturyzacji, a raczej coraz silniej wyspecjalizowane układy scalone i procesory dedykowane do realizacji określonych funkcji. Ich efektywne i współbieżne wykorzystanie wymaga zaawansowanych umiejętności programistycznych i doświadczenia. Innymi słowy, coraz trudniej jest nam od strony aplikacyjnej wydobyć potencjalną moc obliczeniową drzemącą w już nie setkach, tysiącach, a setkach milionów układów przetwarzania najsilniejszych klasycznych superkomputerów na świecie. Dodatkowo, dochodzi szereg praktycznych wyzwań oraz kosztów związanych z wysokim zużyciem energii superkomputerów i chłodzeniem zapewniającym im odpowiednie warunki pracy. Mówiąc krótko, dalsze zmniejszanie skali układu scalonego powoduje pojawienie się efektów kwantowych, które utrudniają lub wręcz uniemożliwiają produkcję szybszych klasycznych procesorów. Skala wytwarzanych układów scalonych osiągnęła obecnie rozmiary kilku nanometrów, a to już swojego rodzaju **bariera miniaturyzacji pomiędzy dobrze znanym nam klasycznym, a jeszcze nieodkrytym kwantowym światem**. To właśnie niepożądane efekty mechaniki kwantowej stoją za tą barierą dalszego rozwoju klasycznych komputerów. Dzięki ogromnemu wysiłkowi nauki i techniki, efekty kwantowe, które przeszkadzały w ostatnich latach w dalszej miniaturyzacji tranzystorów okazują się nowym i przełomowym budulcem urządzeń kwantowych (nazywanych dalej w raporcie komputerami kwantowymi). Tym samym, komputery kwantowe mogą teoretycznie nie tylko udostępnić nam niewyobrażalną moc obliczeniową, ale potencjalnie znacząco poprawić wydajność energetyczną przetwarzania informacji, znajdując wiele nowych, praktycznych oraz przełomowych zastosowań.

1.1



Jak to właściwie działa?

Aby zobrazować działanie komputera kwantowego, wyobraźmy sobie, że szukamy konkretnego, interesującego nas rękopisu. Dostaliśmy informację, że poszukiwane przez nas pismo znajduje się w pewnym starym księgozbiornie, w którym na skutek wielu lat braku odpowiedniej opieki zaniedbane zostało alfabetyczne ułożenie wolumenów. Mając zaufanie do otrzymanej informacji o obecności rękopisu na półkach naszego księgozbiornu, zabieramy się do poszukiwań. Zaczynając od pierwszego regału, przeglądamy kolejne pozycje, sprawdzając, czy któraś z nich jest tą, której szukamy. Szybko jednak orientujemy się, że na poszukiwaniach spędzimy więcej czasu, niż zakładaliśmy — księgozbiór jest duży, a półki na każdym z kilkudziesięciu regałów wręcz uginają się pod ciężarem wszelakiej maści książek i pism, nie wspominając o wypełnionych skrzyniach pozostawionych między regałami.

Nie jesteśmy w stanie określić czy będziemy mieli szczęście i szukaną książkę znajdziemy od razu, po kilku pierwszych próbach, czy może zrealizuje się najgorszy możliwy przypadek i znajdziemy ją dopiero pod koniec naszych poszukiwań. Jeśli wielokrotnie przeszukiwalibyśmy rozważany księgozbiór, to statystycznie znajdowałibyśmy szukaną książkę w połowie maksymalnego czasu poszukiwań. Rozsądek jednak nakazuje nam zaplanowanie tyle czasu, ile zajmuje przeszukiwanie całej biblioteki.

Rozważmy teraz ponownie ten sam księgozbiór. Załóżmy, że zarówno księgozbiór jak i pisma w nim przechowywane mają szereg pewnych specyficznych, wręcz zadziwiających właściwości. Mając dokładną wiedzę o tym, jakiej konkretnie pozycji szukamy, możemy wykorzystać ją do tego, aby lekkim potrząśnięciem regałów wprawić je w drgania w taki sposób, aby szukany przez nas rękopis wypadł na podłogę, **samemu się ujawniając**. Oczywiście potrząśnięcie regałami jest znacznie szybsze niż przeglądanie wszystkich książek, które się na nim znajdują, więc dzięki wspomnianym właściwościom zaoszczędziliśmy sporo czasu. Ważne jest tutaj podkreślenie, że możemy to zrobić z **dowolną** książką znajdującą się na regale — o ile jesteśmy w stanie jednoznacznie zdecydować, czy jest to książka, której szukamy, czy też nie.

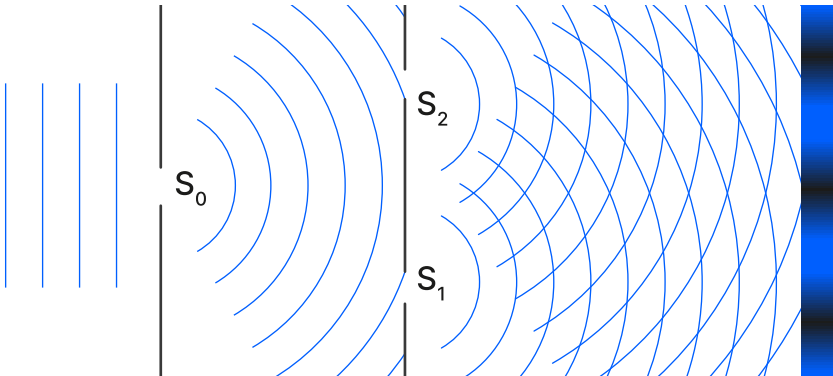


Wyobrażenie to wydaje się być nieprawdopodobne w otaczającym nas, makroskopowym świecie, jednak jest to bardzo dobra analogia do tego, co możemy faktycznie zaobserwować na poziomie kwantowym.

Eksperyment z dwoma szczelinami

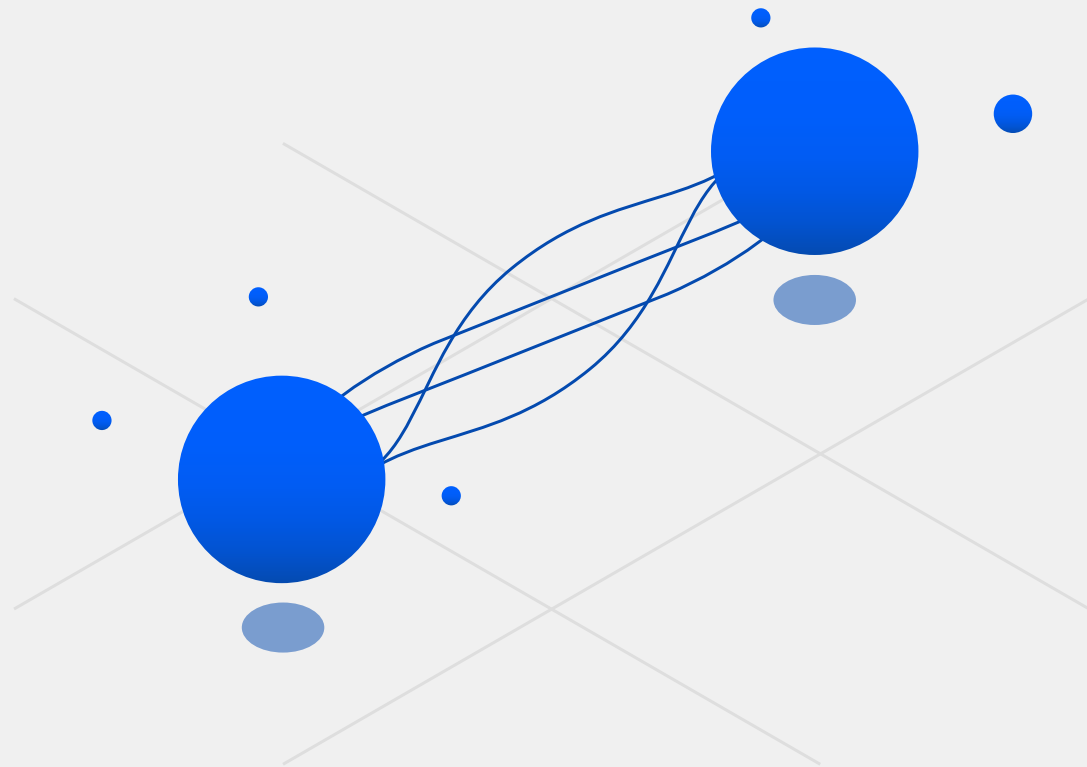
Komputery kwantowe nie wykorzystują zjawisk klasycznej fizyki, lecz odpowiednio wykorzystują efekty znane z mechaniki kwantowej. Jednym z najbardziej znanych przykładów obrazujących niezwykle właściwości kwantowe cząstek jest słynne doświadczenie z dwoma szczelinami. Po raz pierwszy doświadczenie zostało zaprojektowane i wykonane przez angielskiego fizyka Thomasa Younga na początku XIX wieku, które wielu z nas może pamiętać jeszcze z lekcji fizyki.

W samym doświadczeniu wykorzystane zostało światło płomienia świecy. Choć nie było to idealne źródło fotonów, to już wtedy udało się zaobserwować wzór interferencyjny na ekranie, świadczący o **falowej naturze światła**. Dopiero około 100 lat później eksperyment ten wstrząsnął jednak światem naukowym, kiedy udało się uzyskać spójne źródło światła, pozwalające na generację pojedynczych fotonów. Okazało się, że seria pojedynczych fotonów przepuszczonych przez identyczny układ szczelin również wytwarza **prążki interferencyjne** na ekranie. Aby jednak obraz interferencyjny w ogóle powstał, wymagana jest obecność fotonu w obu szczelinach. Choć było to trudne do przyjęcia oraz burzyło wszelką dotychczasową intuicję na temat praw natury i klasycznej fizyki, jedynym wytłumaczeniem musiało być to, że ten sam pojedynczy **foton znajdował się w obu szczelinach jednocześnie!** Dziś, po wielu latach eksperymentów i teoretycznych rozważań, wiemy, że takie zjawisko faktycznie występuje i dotyczy ono nie tylko fotonów, ale też innych cząstek elementarnych występujących w mikroświecie. Nazywamy je właśnie superpozycją i objawia się ono tym, że do momentu pomiaru cząstka zachowuje się tak, jakby była w każdym możliwym stanie jednocześnie.



Zaskakującym rezultatem tego eksperymentu była obserwacja probabilistycznej natury mechaniki kwantowej. Gdy do jednej ze szczelin zostanie przyłożony detektor fotonów, obraz interferencyjny nie pojawia się, a detektor wykrywa cząstkę mniej więcej w 50% przypadków. Wszystko wskazywało na to, że akt pomiaru w nieodwracalny sposób wpływa na stan kwantowy układu. Ponadto, sam akt pomiaru sprawia, że stan kwantowy zapada się z pewnym prawdopodobieństwem. Taki stan rzeczy pociąga za sobą daleko idące i fundamentalne pytania o prawa rządzące naturą.

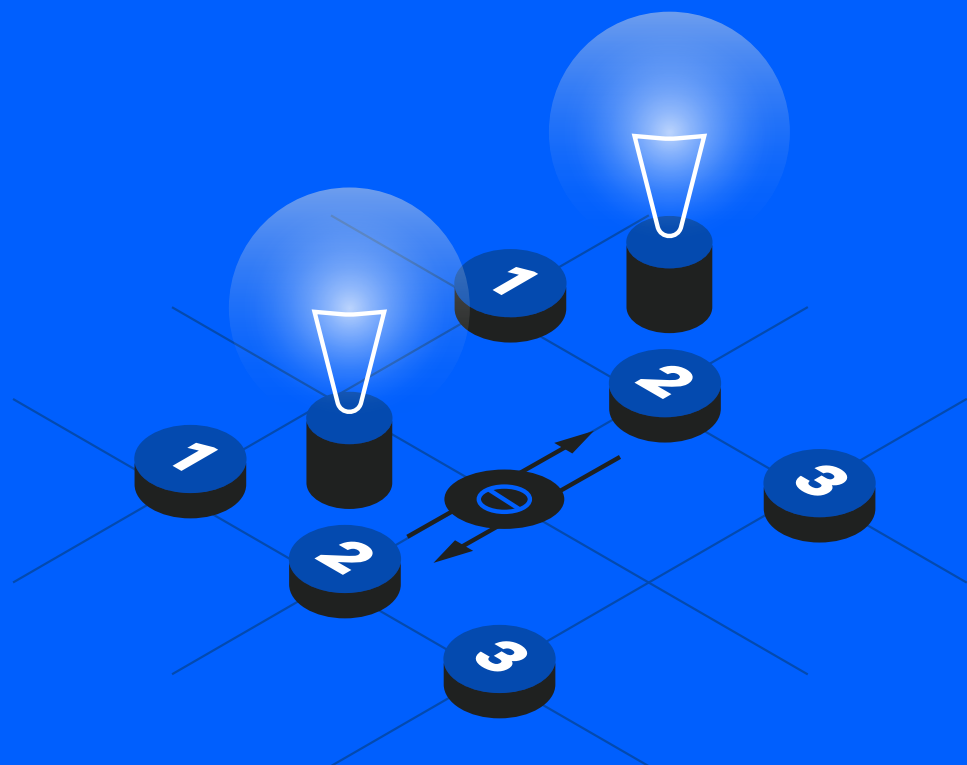
Paradoks EPR



Z interpretacją rzeczywistości, jaką mechanika kwantowa zaoferowała na początku XX wieku, nie zgadzało się wielu wybitnych fizyków, w tym sam Albert Einstein, który splątanie nazywał „upiornym działaniem na odległość”. Wraz z Podolskim i Rosenem zaproponował on w 1935 r. eksperyment myślowy znany jako paradoks EPR [2].

Wyobraźmy sobie eksperyment, w którym dwie cząstki, np. fotony, zostają odpowiednio przygotowane, a następnie rozdzielone na dowolnie dużą odległość. Jeżeli wpłyniemy w jakiś sposób na stan

jednej z cząstek, stan splątanego partnera wydaje się natychmiastowo również ulegać zmianie. Efekt ten sprawia wrażenie, że informacja o zmianie stanu została przekazana z prędkością większą od prędkości światła, co w jawny sposób stoi to w sprzeczności z powszechnie uznawaną **zasadą lokalności**. Odpowiedzią na powstały paradoks, według trzech wspomnianych uczonych było istnienie pewnych ukrytych, potencjalnie niemożliwych do zmierzenia zmiennych, które od samego początku eksperymentu zawierały informacje o tym, jak ma zachować się para splątanych cząstek.



Twierdzenie Bella

W celu zilustrowania twierdzenia Bella posłużymy się prostą analogią. Wyobraźmy sobie urządzenie z trzema przyciskami oraz żarówką. Wciśnięcie jednego z przycisków powoduje zapalenie się żarówki na jeden z dwóch kolorów. Drugie identyczne urządzenie zostaje odpowiednio przygotowane, a następnie oddzielone od pierwszego, w sposób, który uniemożliwia jakąkolwiek niekontrolowaną komunikację między nimi.

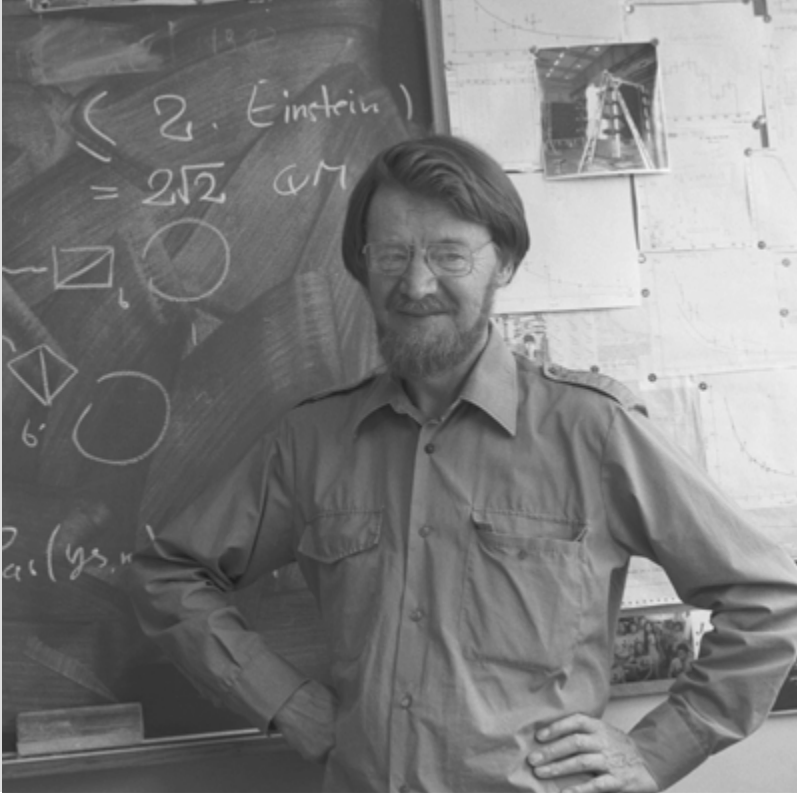
Jeżeli na obu urządzeniach zostanie wciśnięty ten sam przycisk, obie żarówki zawsze zapalają się na ten sam kolor. Ponowne naciskanie tego samego przycisku sprawia, że żarówka dalej świeci tym samym kolorem. Jest to sytuacja analogiczna do **dwóch splątanych cząstek**.

Co jednak stanie się, jeśli na obu urządzeniach wciśniemy różne przyciski? Wówczas na pierwszy rzut oka nie widać żadnej reguły — czasami kolor żarówek jest taki sam, a innym razem różny. Istnieją dwie możliwości wyjaśnienia takiego zachowania — albo rezultat wciśnięcia danego przycisku został już wcześniej zaprogramowany w obu urządzeniach, albo jest on zupełnie losowy, zależny za każdym razem od rzutu monetą.

John Stewart Bell

postać której dokonania przybliżyły ludzkość do zrozumienia jak wszechświat działa w mikroskali. W 1964 r. wykazał on matematycznie, że korelacji w splątanej parze cząstek nie można wytłumaczyć żadną lokalną teorią zmiennych ukrytych [2].

Źródło: Zdjęcie autorstwa CERN PhotoLab



W celu ustalenia, która wersja jest prawdziwa, wykonujemy prosty test, wciskając po kolei na obu urządzeniach wszystkie możliwe kombinacje przycisków. Dla przykładu założmy, że ukryty mechanizm determi-

nujący zachowanie obu urządzeń działa w następujący sposób: przycisk 1 zapala żarówkę na szaro, przycisk 2 na niebiesko, a przycisk 3 na szaro. Wyniki eksperymentu możemy przedstawić w tabeli:

UKRYTY MECHANIZM	PRZYCISKI								
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1									
2									
3									
Ten sam kolor?	Tak	Nie	Tak	Nie	Tak	Nie	Tak	Nie	Tak

Jak można zauważyć, żarówka zapaliła się na ten sam kolor w 5 na 9 możliwych przypadków, co odpowiada szansie równej ok. 55%. Ponieważ zakładamy istnienie ukrytego mechanizmu, bez względu na to, ile razy powtórzymy doświadczenie, zawsze otrzymamy te same wyniki. Podobne rozumowanie można przeprowadzić dla każdej innej kombinacji kolorów określonych w tym mechanizmie i w każdym przypadku rezultat będzie identyczny — zgodność w 5 na 9 przypadków. Jeżeli natomiast urządzenia działałyby w sposób losowy, czyli zgodny z założeniami mechaniki kwantowej,

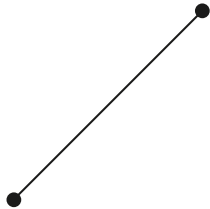
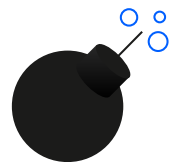
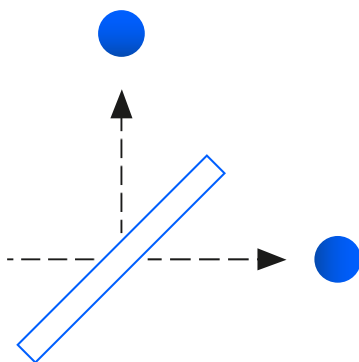
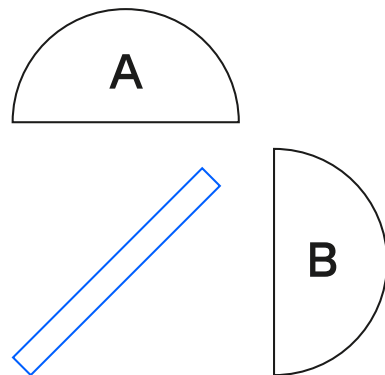
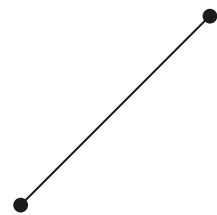
szansa na to, że kolory będą takie same, wynosi dokładnie 50%.

Zgodnie z twierdzeniem Bella, w doświadczeniach fizycznych z rzeczywistymi cząstkami kwantowymi obserwujemy właśnie tę drugą ewentualność, a więc nie mógł istnieć żaden ukryty mechanizm zawczasu determinujący wynik analogicznego eksperymentu. Nagroda Nobla z fizyki w 2022 roku powędrowała do grona trzech naukowców, którzy eksperymentalnie udowodnili naruszenie nierówności Bella.

Rozbrajamy bombę



Wizualizacja rozbrojenia bomby
dostępna na stronie quantum.psnc.pl po
zeskanowaniu kodu QR.



Na prostym przykładzie pokażemy, jak można wykorzystać **superpozycję i splątanie**, w celu uzyskania lepszego niż jest to możliwe klasycznie detektora bomb. Do tego celu potrzebne będzie skonstruowanie obwodu optycznego składającego się ze źródła fotonów, dwóch płytek półprzepuszczalnych, dwóch zwierciadeł oraz dwóch detektorów. Pojedynczy foton po przejściu przez pierwszą płytkę półprzepuszczalną znajduje się w stanie superpozycji, co oznacza, że znajduje się jednocześnie w górnej i dolnej ścieżce. Następnie interferuje sam ze sobą, przez co następuje wygaszenie na drodze do detektora A i wzmocnienie na drodze do detektora B. Ponieważ na ścieżce do detektora A występuje interferencja destruktywna, to prawdopodobieństwo odczytu fotonu w detektorze B wynosi 100%. Jest to pewnego rodzaju transformacja opisanego wcześniej eksperymentu z dwoma szczelinami, w którym również cząstka interferowała sama ze sobą, dzięki czemu możliwe było utworzenie wzoru interferencyjnego na ekranie.

Do układu na jednej ze ścieżek fotonu dodamy teraz bombę, która wybuchnie przy kontakcie z fotonem. Ponieważ wybuch bomby stanowi klasyczny akt pomiaru, istnieje 50-procentowe prawdopodobieństwo, że bomba wybuchnie. Jeżeli jednak foton przeleciał górną część obwodu, to znów z prawdopodobieństwem 50% rozdzieli się na wiązkę górną i dolną, a zatem z równym prawdopodobieństwem aktywuje detektory A i B.

Brak interferencji jest związany z aktem pomiaru wykonanym przez bombę. Od tego momentu foton nie znajduje się już w stanie superpozycji, a przyjmuje konkretną pozycję w układzie. W przeciwieństwie do poprzedniego przypadku, mamy teraz jakąkolwiek szansę na aktywację detektora A. Z prawdopodobieństwem 25% możemy wykryć bombę bez konieczności jej detonacji.

Prawdopodobieństwo 25% nie wydaje się duże, zwłaszcza jeśli zależy od niego detonacja bomby. Jednak nadal jest to więcej niż bylibyśmy w stanie zrobić, wykorzystując zasady mechaniki klasycznej, gdzie niemożliwe byłoby wykrycie bomby bez jej detonacji. Poza tym, stosując innego rodzaju płytki półprzepuszczalne ze współczynnikami transmisji i odbicia innymi niż 50%, możliwe jest zbliżenie się do prawdopodobieństwa równego 100%.

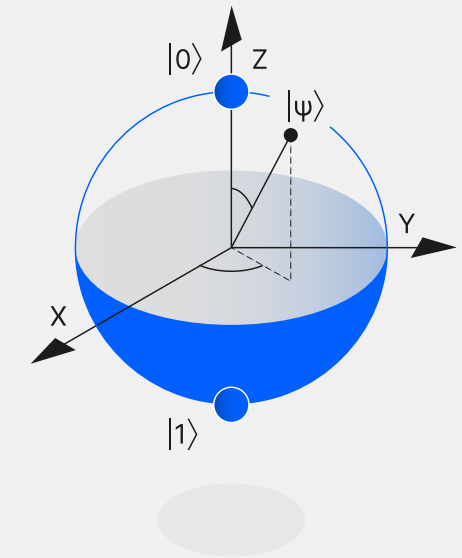


Jak osiągnąć przewagę w obliczeniach?

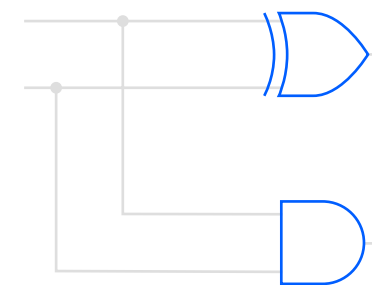
W praktyce można zaprojektować wiele eksperymentów, które będą przedstawiać intrygujące zjawiska kwantowe. Przykładem zastosowania takich procesów fizycznych mogą być bardzo dokładne kwantowe sensory. Jednak do przeprowadzenia obliczeń kwantowych, potrzebujemy uzyskać zmienne, które będzie można wykorzystać w algorytmach kwantowych. Dlatego analogicznie do klasycznego bitu — zmiennej przyjmującej jedną z dwóch wartości binarnych — 0

lub 1, posłużymy się teraz naszym kubitem — kwantową zmienną binarną. Kubit, wprowadzony w stan superpozycji znajduje się w obu stanach jednocześnie i dopiero jego odczyt powoduje otrzymanie konkretnej wartości. Możemy wykorzystać tę własność, wykonując równolegle wiele obliczeń przy użyciu tej samej cząstki, by następnie szybko odczytać właściwy wynik. Osiągnięcie takiego przyspieszenia nie byłoby możliwe przy użyciu klasycznego komputera.

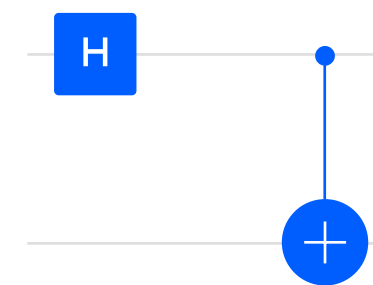
Graficzną reprezentację kubitów przedstawia **sfera Blocha**, czyli zespolona sfera o promieniu 1, w której przy pomocy dwóch kątów można zakodować punkt reprezentujący kubit. Wówczas operacje na kubitach można przedstawić jako rotacje lub transformacje wokół osi X, Y, Z, gdzie X i Z są osiami rzeczywistymi związanymi z różnymi bazami pomiarowymi kubitów, natomiast oś Y jest związana z zespolonym czynnikiem fazowym kubitów. Prawdopodobieństwo odczytu danego stanu zależy od położenia wektora względem biegunów sfery.



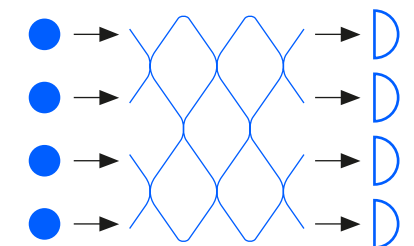
Obwód cyfrowy



Obwód kwantowy



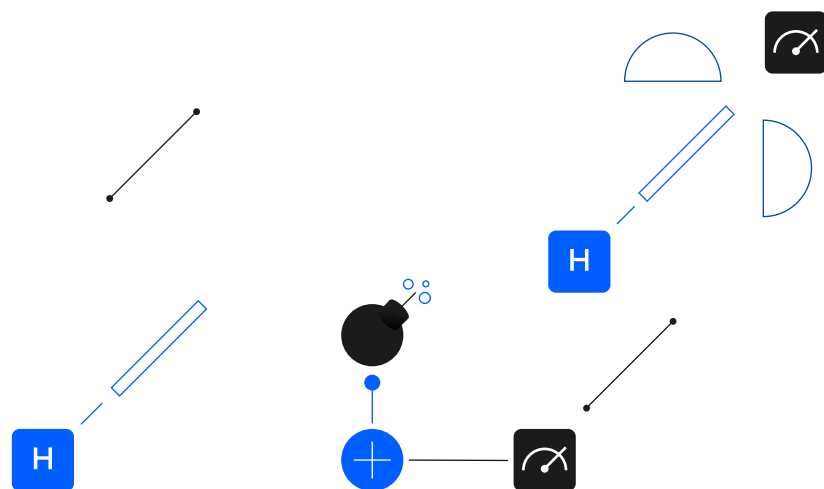
Obwód optyczny



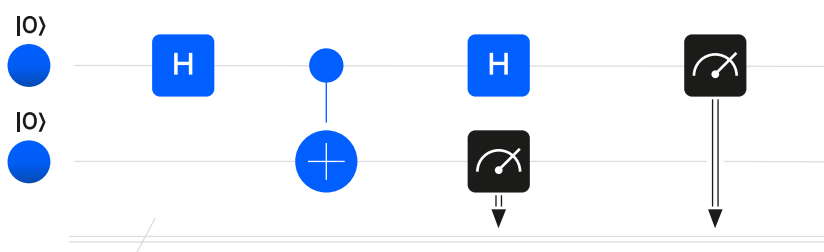
Każdy algorytm kwantowy można zapisać przy pomocy transformacji kubitów. Poprzez analogię do układów logicznych (cyfrowych), do zapisu algorytmów kwantowych stosuje się obwody kwantowe składające się z bramek. Do najpopularniejszych **bramek** należą **X**, **Y** oraz **Z**, służące do rotacji kubitów wokół odpowiadających osi na sferze Blocha, a **także bramka Hadamarda**

(bramka H) służąca do tworzenia superpozycji oraz dwukubitowa bramka **CNOT tworząca splątanie pomiędzy kubitami**. Opisany powyżej układ z bombą można przedstawić za pomocą takiego właśnie **obwodu kwantowego**, wykorzystując bramki wytwarzające superpozycję i splątanie.

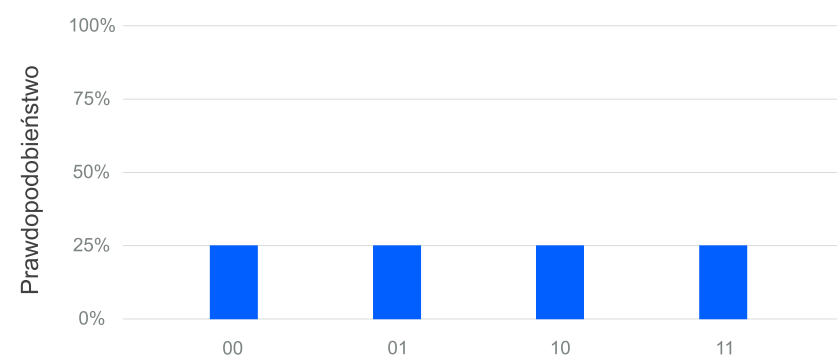
Wyniki uruchomienia takiego obwodu kwantowego są probabilistyczne, jednak wykonując pewną liczbę prób, można zauważyć rozkład zbliżony do teoretycznego. Obrazuje to histogram, na którym możliwe są 4 możliwości. Wartość 1 pierwszego kubitu oznacza detonację bomby. Jeśli bomba nie została zdetonowana i wartość kubitu pierwszego wynosi 0, mamy dwie możliwości dla kubitu drugiego - 0 i 1. Ich prawdopodobieństwa są równe i wynoszą odpowiednio 25%.



Programowanie komputerów kwantowych sprowadza się do projektowania i budowy obwodów kwantowych składających się z wielu bramek kwantowych. Ponieważ pomiar i otrzymanie wyniku w komputerze kwantowym zawsze związane jest z jakimś prawdopodobieństwem, należy wielokrotnie wykonać odczyt.



Kluczowym zadaniem w programowaniu komputera kwantowego jest stworzenie układu kwantowego w taki sposób, aby **prawdopodobieństwo odczytania najlepszego wyniku dla rozwiązywanego problemu było jak największe.**

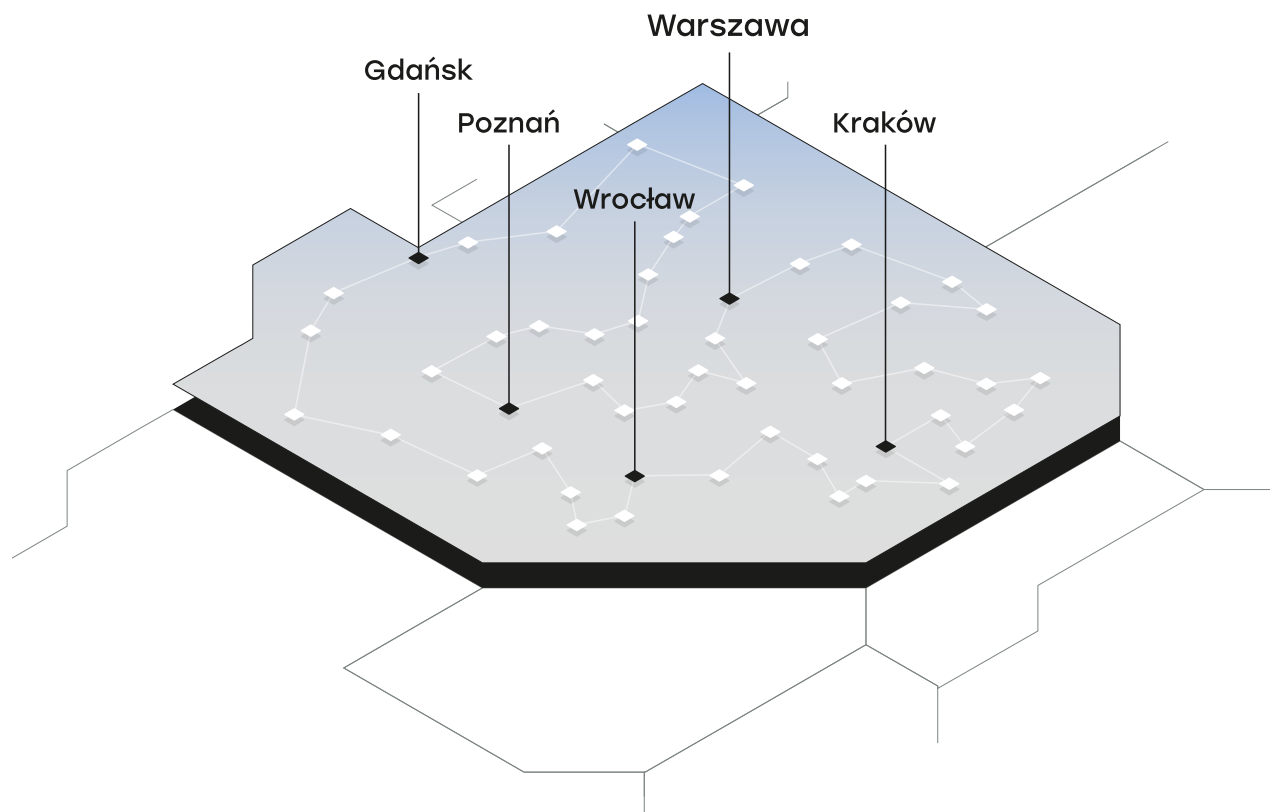


1.2



Do czego
można to
wykorzystać?

- 01.** WCIELMY SIĘ W ROLĘ SPRZEDAWCY
- 02.** UWAGA NA BEZPIECZEŃSTWO INTERNETU
- 03.** KWANTOWA KOMUNIKACJA
- 04.** ALGORYTM GROVERA
- 05.** SYMULACJE KWANTOWE



Wcielmy się w rolę sprzedawcy

Przykładem zadania zbyt złożonego nawet dla superkomputerów, które po odpowiednim przekształceniu można rozwiązać na komputerze kwantowym może być optymalne ułożenie trasy dla przedstawiciela handlowego w taki sposób, aby ten mógł w jak najkrótszym czasie rozwiązać wszystkie przesyłki. O ile dla niewielkiej liczby punktów do odwiedzenia, zwykły komputer jest w stanie obliczyć optymalną trasę w krótkim czasie, o tyle dla większej liczby takich miejsc (większej niż kilkanaście) złożoność oblicze-

niowa rośnie do niewyobrażalnie dużych rozmiarów*. Dzieje się tak, ponieważ liczba wszystkich możliwych tras, zwana również permutacją, rośnie bardzo szybko wraz ze wzrostem punktów docelowych. Przykładowo, jeśli kierowca chciałby ustalić najszybszą trasę między szesnastoma miastami wojewódzkimi w Polsce, najszybszy superkomputer rozwiązałby taki problem w jedną setną sekundy. Wydaje się to rozsądnym i akceptowalnym czasem. Co by się jednak stało, gdyby zaszła potrzeba odwiedzenia kolejnych dziewięciu

```
from qlauncher import *

qc = QiskitBackend('ibm_kingston')

p = TravellingSalesman.from_preset('default')

ql = QLauncher(p, QAOA(), qc)

result = ql.run()
```

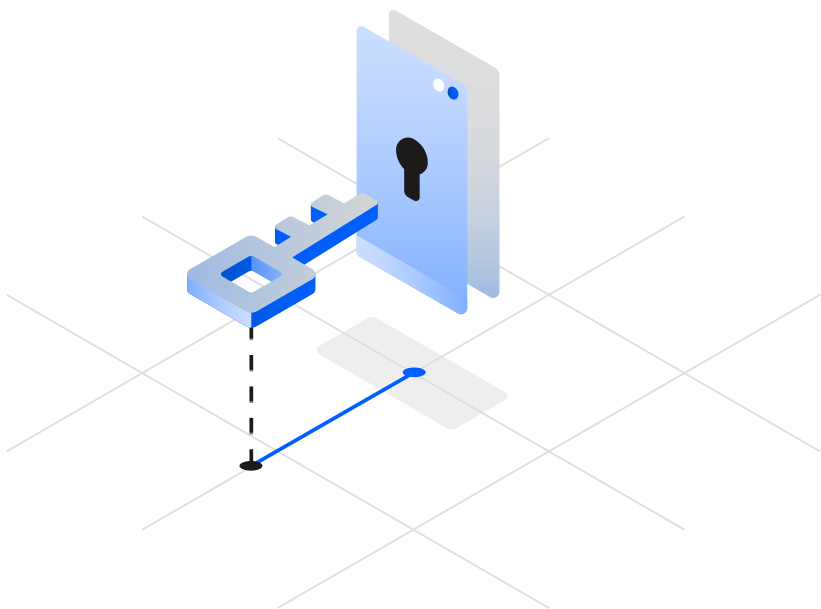
miast? Okazuje się, że dla 25 miast, obliczenie najkrótszej trasy przez najszybszy na świecie superkomputer zajęłoby już cały rok!* Jeśli dalej byśmy zwiększali liczbę miast, będzie jeszcze trudniej. Dla wybranych 37 miast w Polsce o liczbie mieszkańców większej niż 100 tysięcy, czas obliczeń wyniósłby trylion lat (dla porównania: szacowany wiek wszechświata to 13 miliardów lat), a dla wszystkich miast powiatowych w Polsce, takie obliczenia zajęłyby 10^{609} lat. Taki okres czasu obliczeń jest tak duży, że trudno nawet wskazać jakąś rozsądną i ciekawą analogię.



Korzystając z komputerów kwantowych możemy „zrównoleglić” obliczenia. Komputer kwantowy korzystając ze zjawiska superpozycji, splątania wielu kubitów oraz interferencji jest w stanie szybko znaleźć poszukiwane rozwiązanie problemu.

* Obecnie prędkość najszybszych superkomputerów jest na poziomie jednego exaFLOPS-a, czyli około 10^{18} operacji zmiennoprzecinkowych na sekundę, co daje około 10^{21} operacji na godzinę, a więc około 10^{25} operacji rocznie. Wszystkich tras, którymi kurier może odwiedzić miasta jest $n!$, a więc dla 25 paczek mamy około 10^{25} możliwości. Przyjmujemy dla uproszczenia, że jedną możliwą drogę wystarczy wykonać tylko jedną operację, chociaż w rzeczywistości ta liczba byłaby jeszcze kilkanaście razy większa.

Uwaga na bezpieczeństwo Internetu



Algorytm Shora

Jednym z najpopularniejszych zastosowań, do których możliwe będzie zastosowanie komputerów kwantowych, jest łamanie obecnie używanych szyfrów kryptograficznych. Jednym z najczęściej używanych algorytmów do szyfrowania haseł na stronach internetowych, czy też zabezpieczania transakcji bankowych jest algorytm RSA oparty o parę asymetrycznych kluczy. Swoją popularność zawdzięcza temu, iż mimo swej prostoty złamanie zabezpieczeń, czyli odkrycie klucza prywatnego, jest niesamowicie czasochłonne dla klasycznych superkomputerów. Wynika to z pewnych matematycznych właściwości, o które oparty jest algorytm RSA. Jednym z kroków do wygenerowania pary kluczy (publicznego — do szyfrowania wiadomości, oraz prywatnego — do odszyfrowywania wiadomości) jest pomnożenie przez siebie dwóch dużych liczb pierwszych.



Aby odszyfrować klucz publiczny, niezbędne jest odwrócenie tego procesu, czyli tak zwana faktoryzacja, która dla klasycznych komputerów jest niezwykle trudnym zadaniem. Przykładowo, do złamania 2048-bitowego klucza, zwykły klasyczny komputer potrzebowałby trylionów lat.

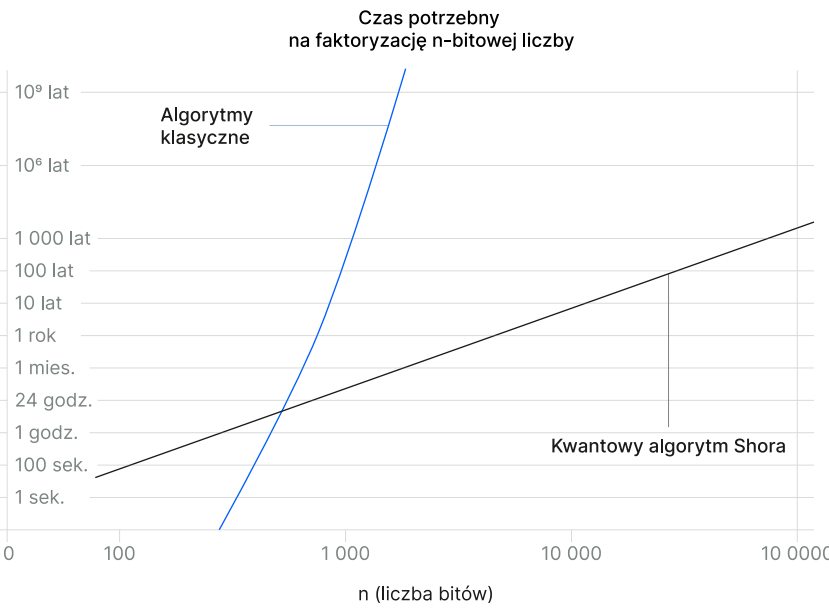
```
from qmlauncher import *

qc = QiskitBackend('ibm_kingston')

ql = QLauncher(15, Shor(), qc)

result = ql.run()
```

Okazuje się jednak, że przy pomocy pewnych matematycznych twierdzeń dotyczących mnożenia wywodzących się z teorii liczb, jesteśmy w stanie tak zmodyfikować problem faktoryzacji, aby wprowadzić do niego cykliczność. Zauważył to amerykański naukowiec Peter Shor w 1994 roku [3]. Shor opracował algorytm wykorzystujący kwantową transformatę Fouriera i zawartą w niej negatywną interferencję fal do znalezienia częstotliwości wspomnianej cykliczności, co w konsekwencji prowadzi do rozwiązania problemu. O ile na ten moment nie stwarza to niebezpieczeństwa dla obecnie używanych systemów zabezpieczających ze względu na niewielką moc dostępnych komputerów kwantowych, o tyle już dzisiaj niezbędne jest podejmowanie działań przygotowujących świat cyfrowy na moment, w którym komputery kwantowe będą na tyle zaawansowane, aby być w stanie łamać zabezpieczenia internetowe.



POTENCJALNE RYZYKA

- Kradzież tożsamości
- Deszyfrowanie poufnych danych
- Odkodowanie kluczy prywatnych
- Złamanie szyfrowania RSA



Krytycznym przypadkiem użycia pozostaje zdolność komputerów kwantowych do złamania szyfrowania RSA. W dniu 4 maja 2022 r. Kancelaria Prezydenta Stanów Zjednoczonych opublikowało memorandum NSM-10 wymagające przejścia wrażliwych krajowych systemów na kryptografię odporną na kwantowe obliczenia [17]. Stany Zjednoczone to pierwszy kraj, który podjął systemowe działania zabezpieczające przed potencjalnym zagrożeniem związanym z niepożądanym wykorzystaniem komputerów kwantowych.

Kwantowa komunikacja

Jednym z największych zagrożeń dla naszego cyfrowego świata jest podatność komunikacji elektronicznej na zagrożenia i luki bezpieczeństwa. Hakerzy wymyślają sposoby na kradzież naszych tożsamości, środków finansowych i prywatnych danych. **Kryptografia** to gałąź wiedzy zajmująca się zabezpieczaniem informacji przed niepożądanym dostępem. Kryptografia pozwala nam na wymianę informacji na duże odległości, ale pozostaje nadal tajna przed niezamierzonymi podsłuchiwcami. Większość nowoczesnych metod kryptograficznych opiera się na dobrze znanych problemach matematycznych takich jak **faktoryzacja**, które są trudne do rozwiązania przez klasyczne superkomputery. Możliwość pojawienia się w przyszłości komputerów kwantowych odpornych na błędy i szумы wymaga od nas ponownego przeanalizowania sposobu, w jaki zabezpieczamy nasze systemy informatyczne.

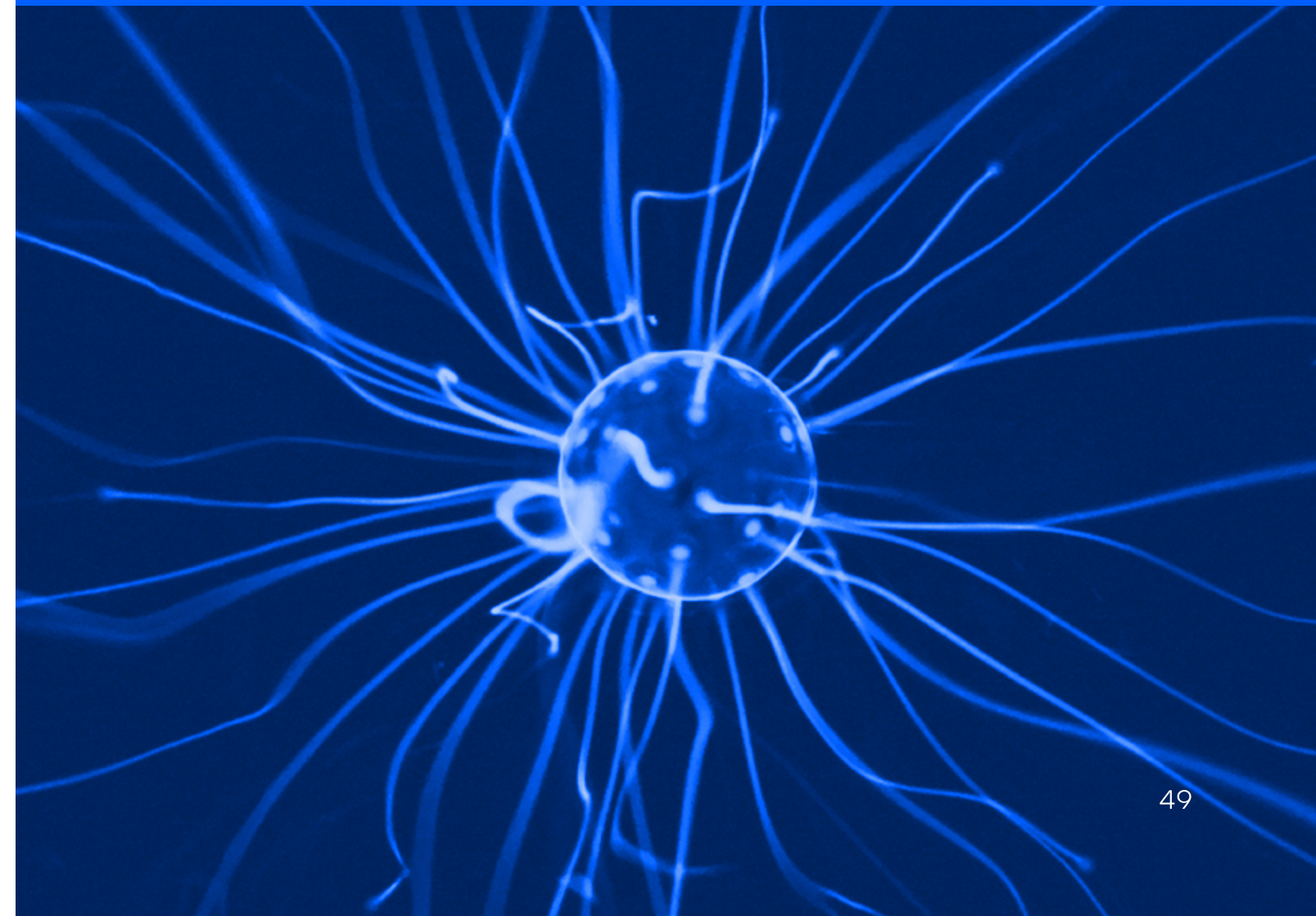
W ogólnym ujęciu komunikacja kwantowa polega na kodowaniu i przesyłaniu wiadomości wykorzystując różne konfiguracje cząstek subatomowych i ich parametry fizyczne. W pełnej konfiguracji komunikacji kwantowej przesyłamy kubity zamiast klasycznych bitów. Aktualnie w metodach komunikacji tego typu wykorzystuje się transmisję fotonów i ich zakodowanych stanów kwantowych. Takie podejście i sama koncepcja komunikacji kwantowej umożliwiają zupełnie nowe podejście do idei komunikacji oraz jest to sposób na przesyłanie kubitów między infrastrukturą obliczeń kwantowych co umożliwia skalowanie takiej infrastruktury obliczeń. Realizacja koncepcji komunikacji kwantowej wymaga opracowania między innymi kluczowych metod efektywnego generowania par splątanych fotonów, ich dystrybucji na większe odległości co wymaga opracowania tzw. regeneratorów kwantowych. Kluczowym elementem takiego regeneratora jest tzw. pamięć kwantowa. Komunikacja kwantowa oferuje potencjalnie wiele nowych aplikacji, ale jednym z głównych i pierwszych proponowanych takich zastosowań jest wspomniana bezpieczna transmisja danych gdzie wykorzystując zasady badane przez mechanikę kwantową oferujemy integralność przesyłanego sygnału, danych i usług. Jedną z proponowanych takich metod jest tzw. kwantowa dystrybucja klucza.



Technologia QKD wykorzystywana jest do zabezpieczania informacji przesyłanej łączami sieci komputerowych na coraz większych odległościach. W ramach sieci naukowej PIONIER udało się zestawić i zabezpieczyć połączenie QKD na odcinku ponad 300 km pomiędzy Poznaniem i Warszawą w maju 2022 roku.

Kwantowa dystrybucja klucza QKD (ang. Quantum Key Distribution) jest nową formą kryptografii opartej na zasadach mechaniki kwantowej i utrzymuje nasze informacje całkowicie bezpieczne, nawet przed atakiem komputera kwantowego. Głównym zadaniem QKD jest stworzenie współdzielonego tajnego klucza pomiędzy dwoma stronami, który jest doskonale zabezpieczony. W najprostszej wersji jedna strona wysyła kubity w określonych stanach kwantowych do drugiej strony, która je obserwuje lub mierzy. Osoba próbująca podsłuchać musi również dokonać pomiaru tych kubitów, co jak wiemy pozostawia wykrywalny ślad. Wynika to z zasad mechaniki kwantowej, która mówi, że nie można dokonać pomiaru stanu kwantowego bez jego zakłócenia. Jeśli kubity zostały zaburzone, obie strony wiedzą, że należy zrezygnować z wymiany i usunąć klucz. W przeciwnym razie strony

mogą użyć klucza do wymiany bezpiecznej komunikacji. Warto zaznaczyć, iż już dziś rozwija się również dziedzina nauki zajmująca się algorytmami kryptograficznymi, które mają być odporne na złamanie za pomocą komputerów kwantowych – kryptografia postkwantowa. **Kryptografia postkwantowa** jest podejściem komplementarnym do QKD i skupia się na rozwijaniu nowych klasycznych metod kryptograficznych opartych na problemach matematycznych, które uważa się za trudne do rozwiązania nawet dla komputerów kwantowych. Na szczęście równoległe do rozwoju kwantowych komputerów, pojawiają się też kwantowe szyfry (np. szyfr Vernama) oraz protokoły kryptograficzne (np. BB-84), których odporność na różnego rodzaju ataki jest zagwarantowana przez kwantowe własności cząstek.



Recepta na masywne wolumeny danych

Algorytm Grovera

Omówiona na wstępie raportu analogia przeszukiwania księgozbioru jest przykładem wykorzystania jednego z najbardziej znanych algorytmów kwantowych, czyli algorytmu Grovera wymyślonego w 1996 przez Lova Grovera. Oryginalnie, algorytm Grovera został przedstawiony jako algorytm kwantowy znajdujący konkretny element z nieuporządkowanej bazy danych w czasie kwadratowo szybszym niż inne klasyczne algorytmy. Bazą danych może być dowolny zbiór elementów, np. wcześniej wspomniany księgozbiór, a jej nieuporządkowanie mówi nam tyle, że przykładowo, nie jest ona w żaden sposób posortowana, a więc nie możemy użyć żadnej strategii, która pozwalałaby nam na szybsze znalezienie elementu. Znalezienie konkretnego elementu oznacza, że potrafimy ten element rozpoznać i — jeśli go zobaczymy — jednoznacznie potwierdzić, że właśnie o ten element nam chodziło. Kwadratowe przyspieszenie oznacza tutaj, że przykładowo na rozwiązanie, zamiast 100 sekund będzie-

my czekać zaledwie 10 sekund, ale już dla większych zbiorów danych np. zamiast 1 000 000 sekund, już tylko 1000 sekund, itd.

Algorytm Grovera znajduje zastosowanie nie tylko w problemie przeszukiwania nieuporządkowanej bazy danych, ale również w każdym innym problemie, w którym potrafimy na podstawie każdego elementu stwierdzić, czy jest on elementem przez nas szukanym. Z tego powodu, do przykładów wykorzystania algorytmu Grovera możemy zaliczyć również wyszukiwanie średniej, mediany czy też wartości maksymalnej ze zbioru liczb. Algorytm ten może być też wykorzystany do szybszego znajdowania rozwiązania wielu obliczeniowo trudnych problemów takich jak np. znalezienie dopuszczalnego rozwiązania przyporządkowania poszczególnych składów pociągów do zaplanowanych połączeń kolejowych.

```
from qlauncher import *

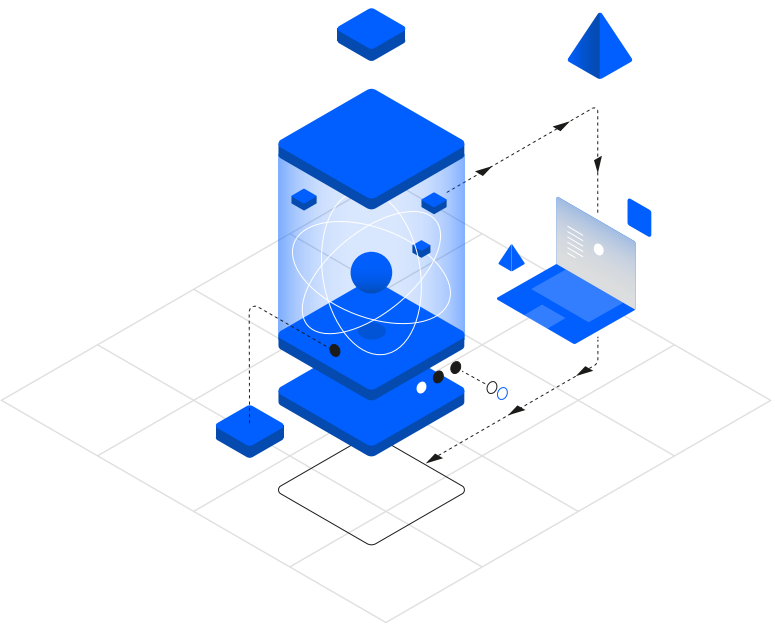
qc = QiskitBackend('ibm_kingston')

p = DB_search.from_preset('default')

ql = QLauncher(p, Grover(), qc)

result = ql.run()
```

Symulacje kwantowe



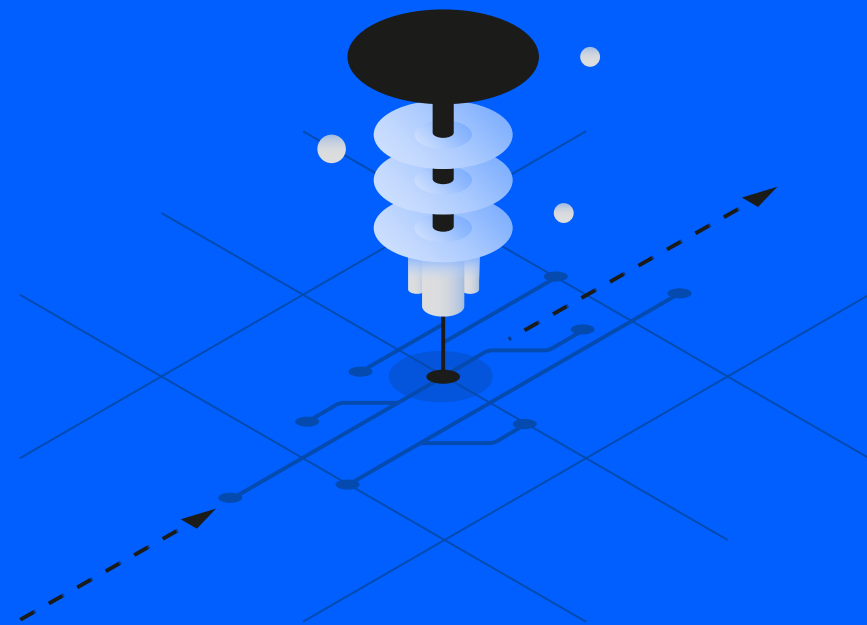
Modelowanie złożonych zjawisk i procesów znanych w chemii, biologii, farmacji czy biomedycynie, gdzie przy pewnej skali czasowo-przestrzennej należy uwzględnić już wpływ mechaniki kwantowej stanowi ogromne wyzwanie dla klasycznych superkomputerów. Przez wiele ostatnich dekad próbowano modelować różne zjawiska kwantowe z wykorzystaniem klasycznych superkomputerów i bardzo kosztowych obliczeniowo symulacji komputerowych. Już wspomniany Richard Feynman wykazał, że w praktyce musimy w klasycznych obliczeniach stosować szereg przybliżeń, uproszczeń oraz ograniczeń, które z kolei ograniczają nam dokładność obliczeń z jaką dany model odpowiada rzeczywistości.

Naturalnym rozwiązaniem tego problemu wydaje się być wykorzystanie kontrolowanego układu kwantowego, który po odpowiednim przygotowaniu jest w stanie odtworzyć wszystkie zjawiska występujące w rzeczywistym badanym układzie bez użycia przybliżeń. Idea ta od początków informatyki kwantowej stanowi najbardziej obiecujący obszar, w którym nowy paradygmat obliczeń może zyskać przewagę nad klasycznym i wnieść przy tym nieoceniony wkład do nauki i przemysłu. Wyniki uzyskane w laboratorium mogą być weryfikowane i uzupełniane przy użyciu symulacji komputerowych, które dostarczają z kolei informacji prowadzących do kolejnych odkryć.



Zasadniczym ograniczeniem powszechnie stosowanych klasycznych modeli jest konieczność stosowania pewnych przybliżeń i uproszczeń, które pozwalają utrzymać się w granicach klasycznej mocy obliczeniowej superkomputera. W przypadku komputerów kwantowych, przynajmniej w teorii, są one w stanie modelować rzeczywiste zjawiska kwantowe bez korzystania z jakichkolwiek przybliżeń i uproszczeń.

1.3



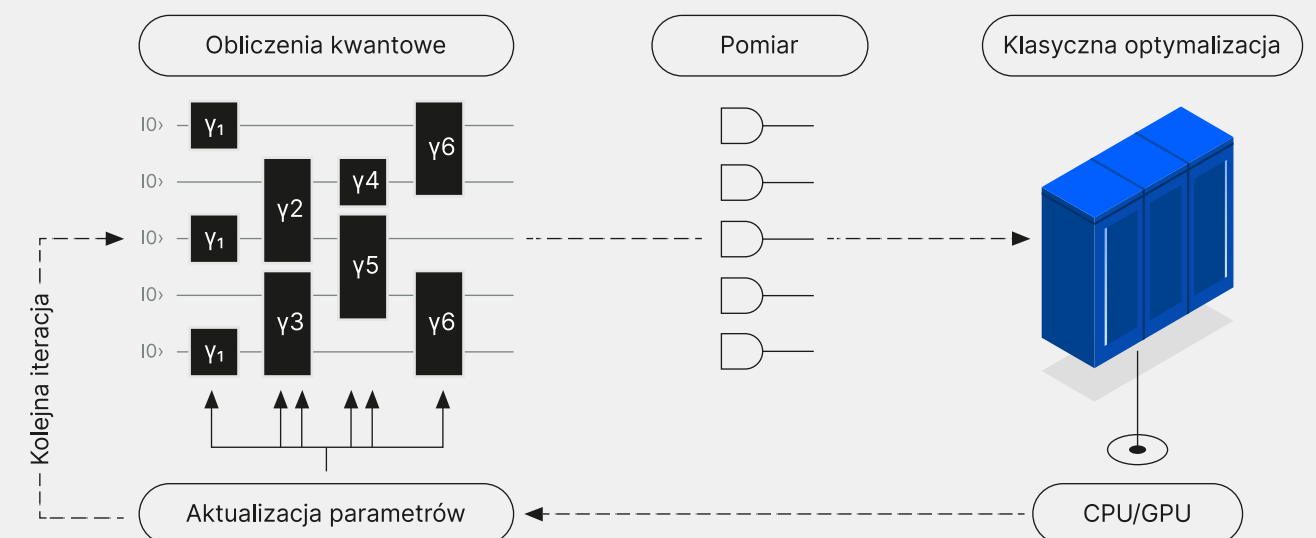
Czy to jest realne?

Pierwsze komputery kwantowe

Jesteśmy na początku drogi rozwoju komputerów kwantowych i ich zastosowań. Pierwsze teoretyczne modele komputera kwantowego zaczęły powstawać dopiero w latach osiemdziesiątych ubiegłego stulecia.

Na bazie tych prac powstały znane algorytmy kwantowe, takie jak algorytm Shora czy algorytm Grovera, które musiały jednak jeszcze wiele lat poczekać na swoją fizyczną realizację. Dopiero w 1998 roku udało się skonstruować pierwszy 2-kubitowy komputer kwantowy, który potrafił utrzymać swój stan na zaledwie kilka nanosekund [4]. Komputer ten oparty był o technologię magnetycznego rezonansu jądrowego, a jego zakres dostępnych operacji był mocno ograniczony. Rok później ukazały się pierwsze projekty komputerów wykorzystujących kwantowe wyżarzanie. Dopiero w 2003 roku po raz pierwszy udało się

zaprezentować rzeczywiste działanie bramki CNOT, która jest kluczową operacją potrzebną do splątania kubitów. W 2007 roku świat obiegła informacja o zbudowaniu komputera 28-kubitowego w architekturze kwantowego wyżarzania, a w 2009 roku naukowcom udało się stworzyć pierwszy uniwersalny 2-kubitowy komputer kwantowy. Uniwersalność komputera kwantowego polega na tym, że — tak samo jak komputer klasyczny — jest on w stanie wykonać dowolne obliczenia. Każda operacja na tym komputerze miała średnio 10% szansy na to, że się nie powiedzie. W 2011 roku firma D-Wave jako pierwsza udostępniła komercyjny dostęp do komputera kwantowego specjalizującego się w rozwiązywaniu problemów kombinatorycznych, a w 2016 roku firma IBM udostępniła zdalny dostęp do 5-kubitowej maszyny kwantowej.





Obecnie jesteśmy świadkami ery **NISQ** (ang. **Noisy Intermediate-Scale Quantum**), czyli ery komputerów kwantowych o stosunkowo **małej liczbie kubitów**, które ze względu na swoje niedoskonałości nie są w stanie z dużą dokładnością przetwarzać skomplikowanych obwodów. Pierwszą niedoskonałością są wszelkiego rodzaju **błędy i szumy**, np. wynikające z niedokładności operacji na kubitach, niedokładności podczas ich pomiarów i odczytów, niechcianej interakcji między kubitami oraz **krótkim czasem utrzymania koherencji stanu kwantowego**. Dodatkowo, w praktyce występują rzadkie połączenie kubitów między sobą, co sprawia, że splątanie między dwoma kubitami często bywa problematyczne, zwłaszcza jeśli są one fizycznie daleko od siebie. Trzeba wtedy wykonywać skomplikowaną operację zamiany kubitów tak, aby znalazły się blisko siebie — dopiero wtedy możliwe jest ich splątanie i wykorzystanie do kwantowych obliczeń.

Wspomniane ograniczenia związane z niedoskonałościami powodują, że dostępne komputery kwantowe nie nadają się jeszcze do powszechnego rozwiązywania problemów dużej skali. Istnieje jednak silna potrzeba użytkowa oraz potrzeba eksperymentowania z dostępnymi obecnie komputerami kwantowymi. Porównując jakość komputerów kwantowych na przestrzeni ostatnich 5 lat, możemy zauważyć znaczący postęp i rozwój. Przykładowo, między latami 2017 i 2022 firmie IBM udało się trzydziestokrotnie polepszyć jakość splątania kubitów. W 2017 roku jedna na 100 operacji splątania kończyła się niepowodzeniem, a obecnie jest to zaledwie jedna na 3000.

To wszystko sprawia, że obecnie konieczne jest projektowanie i korzystanie z **algorytmów hybrydowych**. W algorytmach tego typu część obliczeń jest wykonywana przez komputer kwantowy, podczas gdy pozostałe obliczenia przeprowadza komputer klasyczny. Wśród algorytmów hybrydowych często mamy do czynienia z przetwarzaniem opartym o pętlę zwrotną, w której wynik części kwantowej zależy od specjalnych parametrów dostosowywanych i optymalizowanych przez komputer klasyczny. Optymalizowanie tych parametrów często jest same w sobie trudnym problemem, więc preferowane jest wykorzystywanie w tym celu superkomputerów i technologii HPC (ang. High Performance Computing).

Fotoniczne komputery kwantowe



W grudniu 2023 roku w Poznańskim Centrum Superkomputerowo-Sieciowym uruchomiono pierwsze w Polsce fotoniczne komputery kwantowe. Instalacja dwóch jednostek ORCA PT-1 stanowiła ważny kamień milowy dla krajowego rozwoju technologii kwantowych, wprowadzając do ekosystemu zaawansowane maszyny wykorzystujące zjawiska mechaniki kwantowej w technologii fotonicznej.

Komputery ORCA PT-1 bazują na paradygmacie próbkowania bozonów (ang. Boson Sampling), jednej z fundamentalnych form obliczeń kwantowych opartych na interferencji fotonów. Maszyny te realizują zadania polegające na próbkowaniu rozkładów fotonów przechodzących przez układy optyczne, co pozwala rozwiązywać wybrane trudne problemy obliczeniowe, które mogą być wręcz niewykonalne dla klasycznych superkomputerów. W odróżnieniu od uniwersalnych komputerów kwantowych bazujących na kubitach i bramkach logicznych, ORCA PT-1 operuje na kwantowych modach optycznych, zwracając zmienne całkowitoliczbowe, wykorzystując właściwości splątanych i interferujących fotonów.

Główne zastosowania komputerów ORCA PT-1 obejmują

problemy optymalizacji kombinatorycznej oraz zadania uczenia maszynowego, szczególnie w kontekście przetwarzania dużych przestrzeni rozwiązań i analizy złożonych wzorców. Szczególny nacisk kładziony jest na eksperymenty dotyczące modeli hybrydowych, w których wyniki obliczeń kwantowych są integrowane z klasycznymi algorytmami sieci neuronowych.

Komputery ORCA PT-1 zostały w pełni zintegrowane z istniejącą w PCSS infrastrukturą HPC, tworząc hybrydowy ekosystem obliczeniowy, w którym procesy kwantowe i klasyczne mogą współpracować w ramach wspólnych zadań. Wyniki generowane przez maszyny kwantowe mogą być natychmiastowo przetwarzane przez wysokowydajne klastry GPU, umożliwiając m.in. trenowanie i walidację kwantowo-klasycznych modeli uczenia maszynowego.

Wprowadzenie ORCA PT-1 stanowi istotny krok w kierunku budowy kompetencji związanych z rzeczywistymi systemami fotonicznymi, rozwijając możliwości badań nad algorytmami kwantowego próbkowania, optymalizacją oraz nowymi formami hybrydowej sztucznej inteligencji.

PT-1



Komputer kwantowy

PIAST-Q

PIAST-Q to zaawansowany komputer kwantowy EuroHPC, zlokalizowany w Poznańskim Centrum Superkomputerowo-Sieciowym (PCSS) Został on dostarczony przez firmę Alpine Quantum Technologies (AQT) z Innsbrucku w Austrii w czerwcu 2025 r. W systemie tym pola elektromagnetyczne precyzyjnie więżą naładowane atomy, którymi manipuluje się za pomocą laserów o wysokiej precyzji. Taka architektura pozwala na wykonywanie operacji kwantowych o wyjątkowej dokładności przy zachowaniu długiego czasu koherencji. Nowy system oferuje szereg unikalnych funkcji atrakcyjnych dla użytkowników końcowych, w tym kubity o wysokiej wierności, uniwersalne bramki kwantowe oraz pełną łączność typu „każdy z każdym”. Dzięki tym parametrom PIAST-Q bardzo dobrze nadaje się do obsługi zastosowań hybrydowych oraz zaawansowanych testów porównawczych w obszarach takich jak optymalizacja kwantowa, chemia kwantowa, inżynieria materiałowa czy kwantowe uczenie maszynowe.

Konstrukcja urządzenia wyróżnia się innowacyjną modułowością i łatwością w rozbudowie. Całość została zaprojektowana tak, aby mieścić się w dwóch standardowych 19-calowych szafach serwerowych, co pozwala na łatwą integrację z istniejącą infrastrukturą centrów danych. Co istotne, PIAST-Q pracuje w temperaturze pokojowej i zużywa mniej niż 2 kW energii elektrycznej. Eliminuje to konieczność stosowania specjalistycznych systemów chłodzenia kriogenicznego lub rozbudowanej infrastruktury energetycznej. EuroHPC JU zamówiło osiem komputerów kwantowych zlokalizowanych w całej Europie, a PIAST-Q jest pierwszym z tych systemów. Wdrożenie tych maszyn ma na celu zapewnienie europejskim użytkownikom końcowym zróżnicowanego i uzupełniającego się portfolio modalności obliczeń kwantowych, obejmującego obecnie sześć różnych technologii, w tym analogowych symulatorach kwantowych – opartych na neutralnych atomach, uwięzionych jonach, obwodach nadprzewodzących i fotonice do systemów adiabatycznych, umożliwiających wykonywanie procedur wyżarzania. Takie podejście stawia Europę na czele tej nowej dziedziny.



Całkowity koszt zakupu PIAST-Q wynosi 12,28 mln EUR. EuroHPC JU finansuje 50% kosztów, a pozostałe 50% jest finansowane przez Ministerstwo Cyfryzacji oraz Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. PCSS przewodzi konsorcjum EuroQCS-Poland, które składa się dodatkowo z dwóch polskich partnerów, Centrum Fizyki Teoretycznej Polskiej Akademii Nauk i Creotech Instruments S.A. oraz jednego partnera akademickiego – Uniwersytetu Łódzkiego.



Błędy w obliczeniach kwantowych

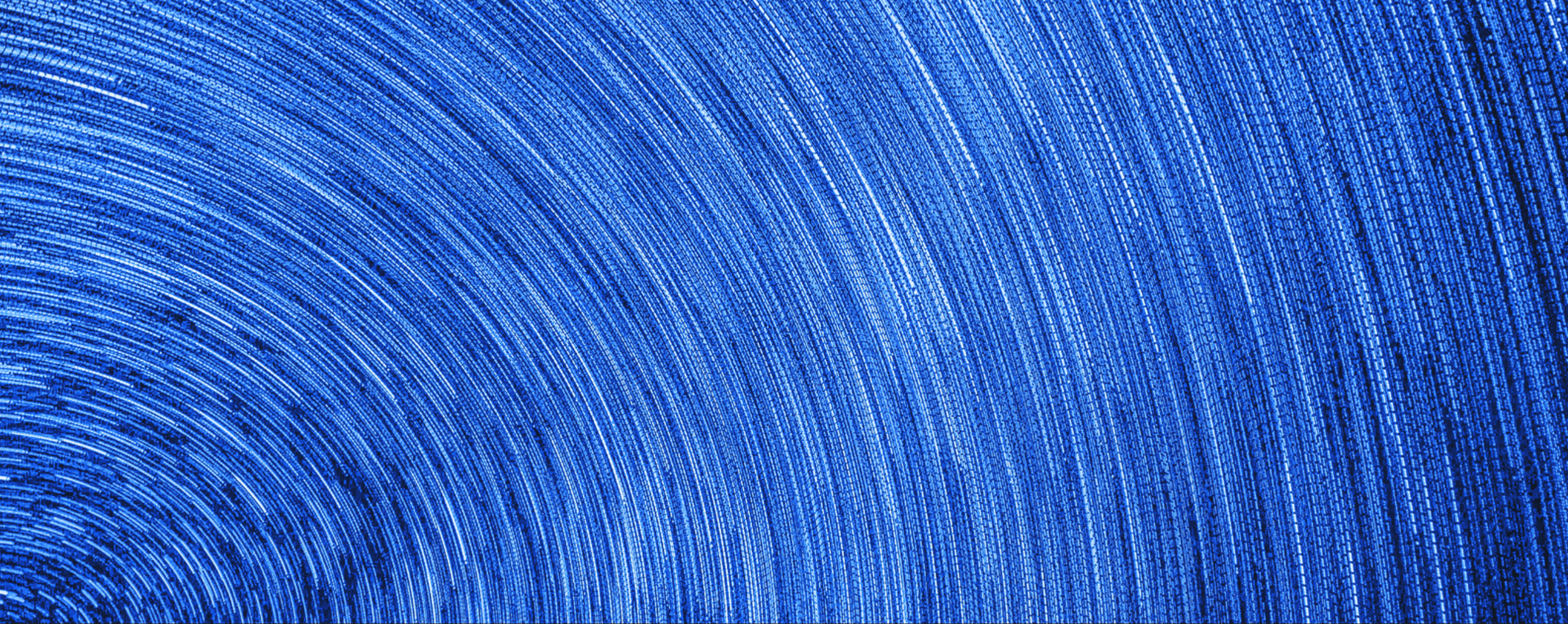
Ze względu, że kubity przyjmują dowolną wartość pomiędzy 0 a 1, wykorzystanie ich do obliczeń przywodzi na myśl ideę komputerów analogowych, które nie znalazły szerszego zastosowania właśnie z powodu dużej wrażliwości na błędy. Warto jednak zwrócić uwagę na zasadniczą różnicę między tymi podejściami. Dowiedziono, że obliczenia kwantowe mogą zostać uodpornione na działanie błędów i niedokładności, jeżeli współczynnik błędów nie przekracza pewnego stałego progu. Oznacza to, że wówczas możliwe jest w teorii poprawianie błędów szybciej, niż się one pojawiają. Idea ta jest kluczowa z perspektywy dalszego i długofalowego rozwoju komputerów kwantowych.

W ogólności metody kwantowej korekcji błędów opierają się na kodowaniu stanu jednego logicznego kubitów za pomocą splątanego stanu wielu fizycznych kubitów. Pozwala to w efekcie na wykonanie pomiarów umożliwiających wykrycie rodzaju błędu, bez wpływania na stan logicznego kubitów. Najlepsze znane metody wymagają jednak bardzo dużej liczby nadmiarowych kubitów, co uniemożliwia ich praktyczne wykorzystanie w dostępnych aktualnie komputerach kwantowych składających się z relatywnie małej liczby kubitów. Nie oznacza to jednak, że poziom błędów nie może zostać znacząco ograniczony w inny sposób. Zwiększenie dokładności obliczeń na maszynach kwantowych obarczonych różnymi błędami jest bardzo ciekawym zagadnieniem mitygacji błędów. Zarówno od strony badawczej, jak i wdrożeniowej, wiele zespołów badawczych na całym świecie, w tym w Polsce, opracowuje nowe rozwiązania, które mogą znaleźć praktyczne zastosowania. Aktualnie dostępne metody **mitygacji błędów**, w połączeniu z dalszym postępem w zakresie jakości bramek kwantowych, mogą w niedalekiej przyszłości doprowadzić do stopniowego poprawiania się możliwych do uzyskania wyników, bez konieczności czekania na wdrożenie kosztownej **korekcji błędów**.

Obecne możliwości i architektury

TECHNOLOGIA	PRODUCENT	ZALETY	WADY
NADPRZEWODZĄCE KUBITY	IBM, Rigetti, Google, IQM	Uniwersalny model obliczeń, duża stabilność większej liczby kubitów, sprawdzone komponenty	Praca w ekstremalnie niskiej temperaturze, Ograniczone możliwości połączeń
FOTONIKA	ORCA Computing, Xanadu, Quandella, Quix	Praca w temperaturze pokojowej, łatwość w skalowaniu architektury dla dużej liczby modów	Mała liczba kubitów, Brak uniwersalności
KWANTOWE WYŻARZANIE	D-Wave, NEC	Duża liczba kubitów, możliwość gęstego połączenia kubitów	Praca w ekstremalnie niskiej temperaturze, Brak uniwersalności
PULAPKI JONOWE	Quantinuum, AQT, IonQ	Uniwersalny model obliczeń, praca w temperaturze pokojowej, możliwość gęstego połączenia kubitów	Mała stabilność większej liczby kubitów
NEUTRALNE ATOMY	Pasqal, QuEra, Atom Computing, ColdQuanta	Uniwersalny model obliczeń, praca w temperaturze pokojowej	Mała stabilność większej liczby kubitów

Tab. 1. Zestawienie wybranych architektur komputerów kwantowych



Polski węzeł obliczeń kwantowych

02

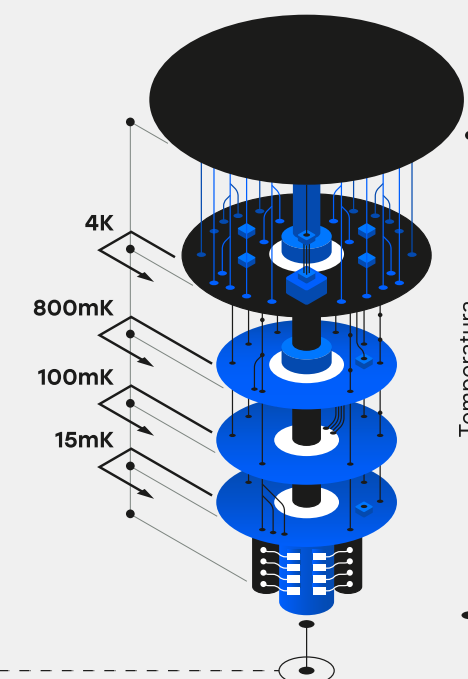
Sieć IBM Quantum Network

Sieć IBM Quantum Network ma na celu optymalne wykorzystanie potencjału komputerów kwantowych i zastosowania ich do rozwiązania eksperymentalnych problemów. Krajowe instytucje zrzeszone w ramach tej sieci mają dostęp do najbardziej zaawansowanych i najnowocześniejszych systemów kwantowych IBM Quantum. Ekosystem ten jest systematycznie rozwijany przez firmę IBM od wielu lat. Użytkownicy z Polski mają dostęp do ponad 150-kubitowych komputerów kwantowych IBM Heron r2 oraz Heron r3. W listopadzie 2025 roku zaprezentowany został 120 kubitowy procesor klasy Nighthawk, pozwalający na wykonanie o 30 procent bardziej złożonych obwodów kwantowych w porównaniu do dotychczasowych możliwości. Przedstawiono również eksperymentalny procesor Loon, zawierający wszystkie kluczowe komponenty niezbędne do kwantowych obliczeń odpornych na błędy.



W ramach inicjatywy polskiego węzła obliczeń kwantowych uruchomiony został dostęp do sieci fizycznych komputerów kwantowych IBM Q

<https://quantum.psn.pl>



Kroki milowe w latach 2022-2025



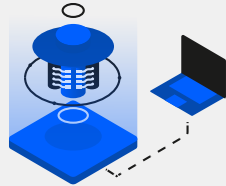
2021.12.01

Rozpoczęcie prac przygotowawczych.



2022.02.04

Podpisanie umowy IBM Q System Hub Access and Software/Technology License Agreement.



2022.02.28

Kwantowa platforma i kwantowy węzeł (QuantumHub PL) ze zdalnym, współdzielonym dostępem do zasobów komputera kwantowego IBM.



2022.04.30

Wyniki pierwszych eksperymentów użytkowników.



2022.06.30

Rozbudowa bibliotek programistycznych i narzędzi cyfrowych dla obliczeń kwantowych.



2022.11.30

Raport roczny oraz podsumowanie pierwszej fazy działalności polskiego węzła obliczeń kwantowych.



2022.12.05

Dołączenie Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu do IBM QIC w PCSS.



2023.05.10

Podpisanie listu intencyjnego o współpracy w dziedzinie technologii kwantowych między PCSS a Uniwersytetem Wileńskim.



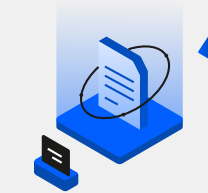
2023.05.28

Hackaton kwantowy QL Future.



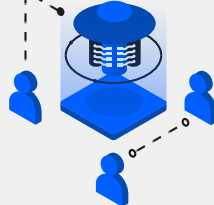
2023.12.07

Instalacja dwóch systemów fotonicznych ORCA Computing



2024.07.10

Podpisanie umowy na instalację komputera kwantowego EuroQCS-Poland



2024.10.07

Rozpoczęcie projektu rozwoju kompetencji w zakresie inżynierii kwantowej



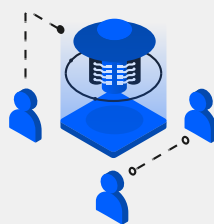
2024.11.18

Uruchomienie środowiska kwantowo-klasycznego do obliczeń rozproszonych na systemach ORCA Computing



2025.06.23

Inauguracja instalacji komputera kwantowego PIAST-Q



2025.11.01

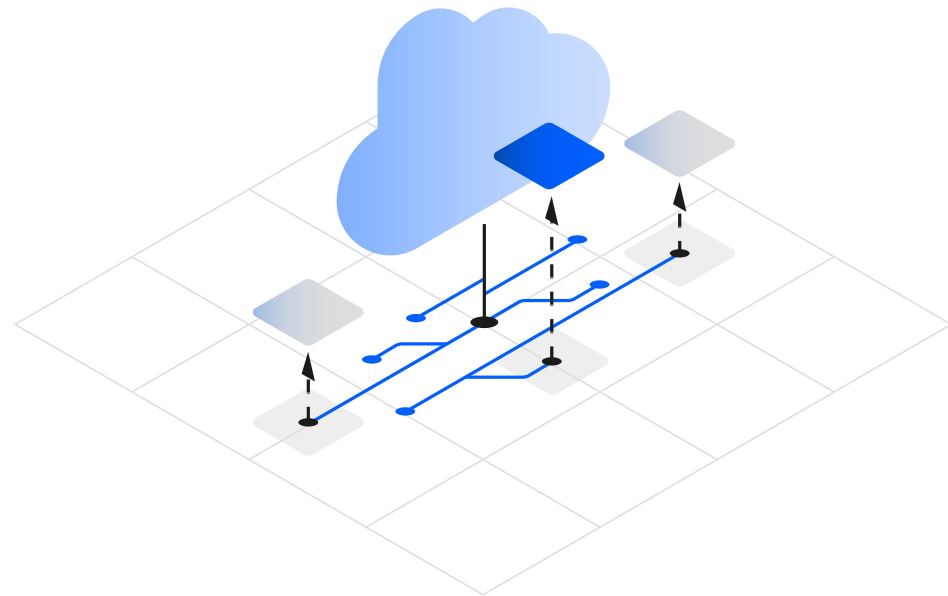
Rozpoczęcie projektu QEC4QEA budującego Centrum Doskonałości Kwantowej

Kwantowe centrum innowacji **IBM** **Quantum** w Polsce

Minister Cyfryzacji na podstawie Decyzji Nr DRI.ZPI.7220.10.2021 z dnia 30 grudnia 2021 Prezesa Rady Ministrów powierzył Instytutowi Chemii Bio-organicznej PAN Poznańskiemu Centrum Superkomputerowo-Sieciowemu realizację projektu "Wsparcie podmiotów realizujących zadania publiczne w sferze innowacji cyfrowych na rzecz nauki i społeczeństwa informacyjnego, poprzez zapewnienie dostępu do e-infrastruktury wykorzystującej obliczenia kwantowe, w tym dostęp do węzła IBM Q-HUB". W efekcie realizacji powierzonego zadania powołano w Poznańskim Centrum Superkomputerowo-Sieciowym pierwszy w Europie Centralnej – Polski Węzeł Obliczeń Kwantowych w ramach globalnej sieci IBM Quantum Network. Kontynuacja dostępu i dalsze zadania realizowane były w ramach projektu „Rozwój kompetencji cyfrowych w zakresie inżynierii kwantowej w latach 2024-2025”.

Rozwój kompetencji w zakresie technologii kwantowych opisano w Rozdziale 3, w którym przedstawiono koncepcję siedmiosemestralnego kierunku studiów inżynierskich oraz system kursów realizowany w ramach platformy Quantum Academy. Kompetencje te stanowią zaplecze dla działań prowadzonych w ramach IBM Quantum Network, skupiającej globalną społeczność firm, start-upów, instytucji akademickich i laboratoriów badawczych rozwijających obliczenia kwantowe oraz ich praktyczne zastosowania. W ramach tej sieci Polskie Centrum Innowacji Kwantowej zapewnia krajowym użytkownikom naukowym wsparcie i zdalny dostęp do różnych architektur komputerów kwantowych IBM Quantum, a rezultaty eksperymentalnych obliczeń zrealizowanych z ich wykorzystaniem przedstawiono w Rozdziale 4.

Źródło: Obwód kwadratowy IBM czterech kubitów



Dzięki rozbudowanym zasobom superkomputerowym ośrodek udostępnia również klasyczne zasoby superkomputerowe, które umożliwiają użytkownikom uruchomienie symulacji działania komputerów kwantowych, ale dla relatywnie małej i ograniczonej liczby kubitów. Koordynator Polskiego Węzła Obliczeń Kwantowych, Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe ICHB PAN dysponuje odpowiednio wykwalifikowaną kadrą ekspercką z wieloletnim doświadczeniem w zakresie rozwoju, budowy i wdrażania rozwiązań infrastrukturalno-usługowych dla wysokowydajnych obliczeń na rzecz nauki i społeczeństwa informacyjnego. Realizując od ponad dwóch dekad projekty B+R z obszaru technologii informacyjno-komunikacyjnych, w tym nauk obliczeniowych o wysokiej wydajności (technologie HPC) z wykorzystaniem potencjału superkomputerów, ośrodek posiada również odpowiednie zaplecze organizacyjno-techniczne do wsparcia rozwoju nowej generacji hybrydowych algorytmów kwantowych wykorzystujących jednocześnie potencjał oraz moc obliczeniową klasycznych i kwantowych komputerów.

Misją Polskiego Węzła Obliczeń Kwantowych jest również rozwijanie i rozpowszechnianie wiedzy na temat aktualnego stanu zaawansowania komputerów kwantowych wśród partnerów, do których należą ośrodki badawcze, uniwersytety oraz w najbliższej przyszłości przedsiębiorstwa zainteresowane wykorzystaniem technologii kwantowych w różnych przełomowych zastosowaniach. Podnoszenie umiejętności użytkowników zainteresowanych technologiami kwantowymi, w tym prowadzenie warsztatów, konferencji, szkoleń i kursów, to kolejny istotny obszar działalności Polskiego Węzła Obliczeń Kwantowych.



Zapewnienie dostępu oraz stosownego wsparcia wielu zespołom eksperckim i użytkownikom w Polsce w ramach Polskiego Węzła Obliczeń Kwantowych już na obecnym etapie pozwala rozpocząć projektowanie i testy różnych algorytmów kwantowych oraz rozpocząć już dziś rozwój oprogramowania wykorzystującego nowy paradygmat obliczeń kwantowych.



W ramach działalności edukacyjnej i popularyzatorskiej PCSS zorganizował we współpracy z IBM kwantowy hackaton QL Future. Podczas wydarzenia zespoły miały za zadanie zaproponować innowacyjną ideę lub rozwiązanie technologiczne w obszarach: człowiek, planeta, klimat. Jednym z głównych założeń było zachęcenie do udziału i wspólnej nauki jak najszerszego grona zainteresowanych, zarówno osoby znające już podstawy informatyki kwantowej jak i tych, którzy nie mieli jeszcze okazji zetknąć się z tą tematyką.

vement of diagnostic

al
analysis

power capacity

g databases

potential to eliminat

at earlier stage



Dostępne bramkowe komputery kwantowe

W ramach Polskiego Węzła Obliczeń Kwantowych użytkownicy mają dostęp do różnych programowalnych bramkowych komputerów kwantowych firmy IBM. Dostępne są maszyny klasy Eagle oraz systemy generacji Heron o najwyższych parametrach jakościowych.

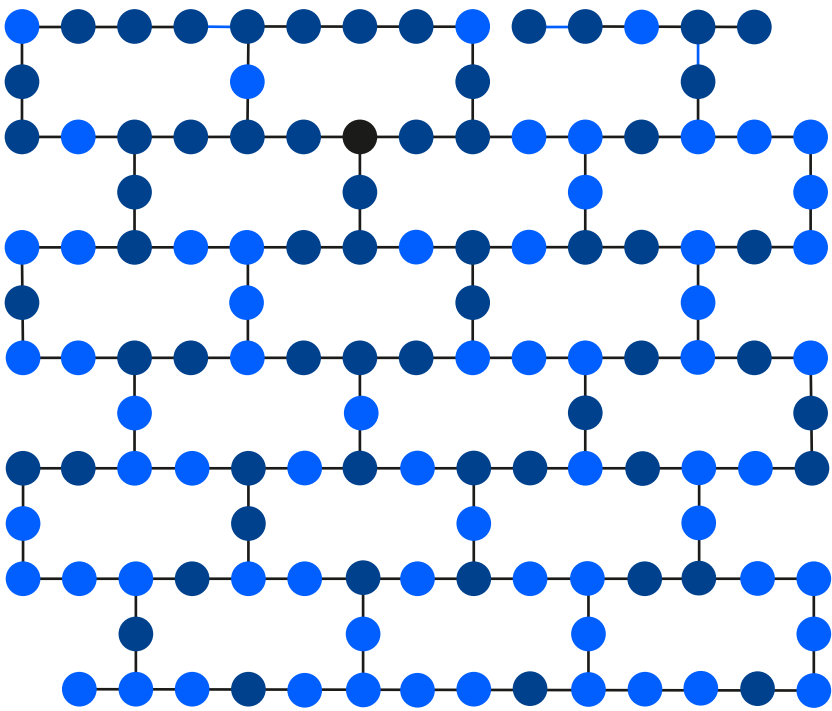
ibm_miami Processor type Nighthawk r1 Qubits 2Q error (median/layered) CLOPS 120 2.96E-3/6.38E-3 24K	ibm_boston Processor type Heron r3 Qubits 2Q error (median/layered) CLOPS 156 1.16E-3/2.04E-3 340K	ibm_kingston Processor type Heron r2 Qubits 2Q error (median/layered) CLOPS 156 1.82E-3/3.08E-3 340K
ibm_aachen Processor type Heron r2 Qubits 2Q error (median/layered) CLOPS 156 2.04E-3/7.08E-3 330K	ibm_pittsburgh Processor type Heron r3 Qubits 2Q error (median/layered) CLOPS 156 1.47E-3/2.59E-3 330K	ibm_marrakesh Processor type Heron r2 Qubits 2Q error (median/layered) CLOPS 156 2.41E-3/3.77E-3 300K
ibm_fez Processor type Heron r2 Qubits 2Q error (median/layered) CLOPS 156 2.63E-3/4.85E-3 320K	ibm_torino Processor type Heron r1 Qubits 2Q error (median/layered) CLOPS 133 2.57E-3/6.53E-3 290K	ibm_brussels Processor type Eagle r3 Qubits 2Q error (median/layered) CLOPS 127 9.60E-3/3.74E-2 250K
ibm_strasbourg Processor type Eagle r3 Qubits 2Q error (median/layered) CLOPS 127 9.38E-3/3.06E-2 250K		

*Stan na styczeń 2025r.

```
from qiskit_ibm_runtime import QiskitRuntimeService

service = QiskitRuntimeService()

backend = service.backend("ibm_miami")
```



Rys. 1 Topologia połączeń pomiędzy kubitami 127-kubitowego procesora IBM Eagle w komputerze kwantowym IBM Q

Topologia połączeń kubitów w architekturach procesorów Eagle oraz Falcon opiera się na heksagonalnej strukturze heavy-hex, w której nie wszystkie kubity są ze sobą połączone. Taka metoda połączeń wymaga transpilacji logicznej obwodów, jednak znacznie redukuje szумы na bramkach kwantowych i umożliwia uzyskanie dokładniejszych odczytów.

Pełne wsparcie dla użytkowników

Od momentu powołania Polskiego Węzła Obliczeń Kwantowych oferowane jest użytkownikom wsparcie techniczne oraz merytoryczne w zakresie przeprowadzanych eksperymentów na zdalnej infrastrukturze komputerów kwantowych IBM Quantum. Powołany krajowy zespół wsparcia wraz z zespołami firmy IBM tworzącymi pakiety **otwartego oprogramowania narzędziowego Qiskit** jest w stanie w skuteczny sposób pomóc użytkownikom w zarówno projektowaniu, implementacji i testowym uruchomieniu algorytmów kwantowych. Pełne wsparcie dla użytkowników oferowane jest również na etapie eksperymentów obliczeniowych na różnych komputerach kwantowych IBM Quantum wraz z niezbędną pomocą na etapie weryfikacji i analizy uzyskanych wyników.

W ramach Polskiego Węzła Obliczeń Kwantowych dostępnych jest też szereg narzędzi administracyjnych pozwalających na monitorowanie stanu wykorzystania przez użytkowników zasobów komputerów kwantowych, w tym monitorowana jest liczba uruchomień obwodów na komputerach kwantowych IBM Quantum, średni czas oczekiwania zadań obliczeniowych i czas wykorzystania komputerów kwantowych IBM Quantum.

Ponadto, użytkownicy mają również zapewniony stały dostęp do symulatorów komputerów kwantowych uruchomionych na klasycznej architekturze superkomputera, dzięki czemu możliwa jest weryfikacja wyników ich eksperymentów zarówno przy użyciu idealnych, jak i zaszumionych symulacji obliczeń kwantowych.



W trakcie dwóch lat funkcjonowania Polskiego Węzła Obliczeń Kwantowych wykonano ponad 62 tys. zadań obliczeniowych na różnych komputerach kwantowych IBM Quantum.



W okresie alokacji dostępu do komputerów kwantowych IBM Quantum w roku 2025 krajowi użytkownicy wykorzystali dodatkowo ponad **123 godzin**.

Przykładowe statystyki wykorzystania zasobów IBM Quantum przez krajowych użytkowników w okresie 2022-2025.

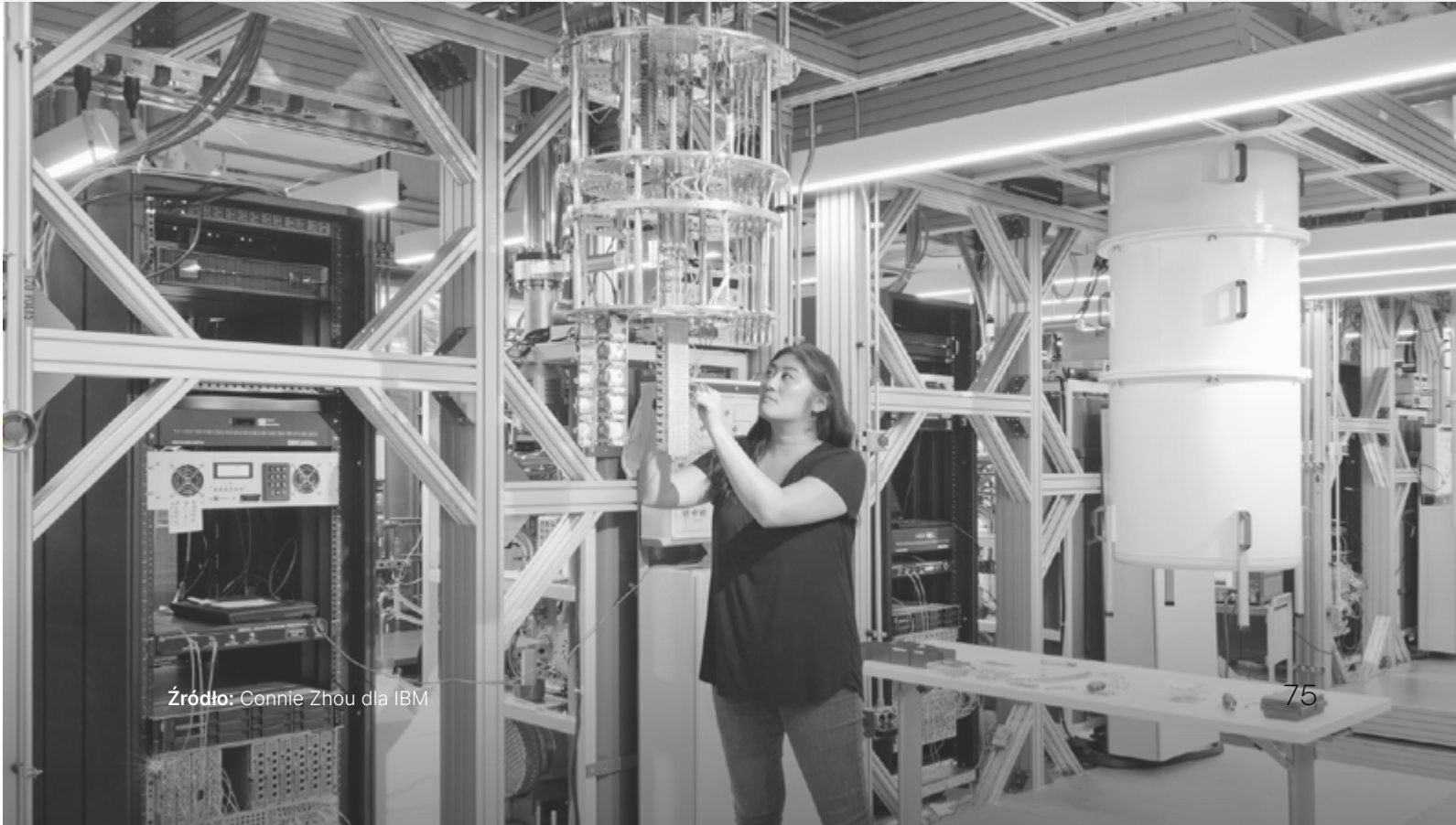
Name
ibm-q-psnc 
Poznan Supercomputer and Networking Center

Wykorzystanie procesorów kwantowych
41d 10h 27m 5s

Łączna liczba zadań
45,520

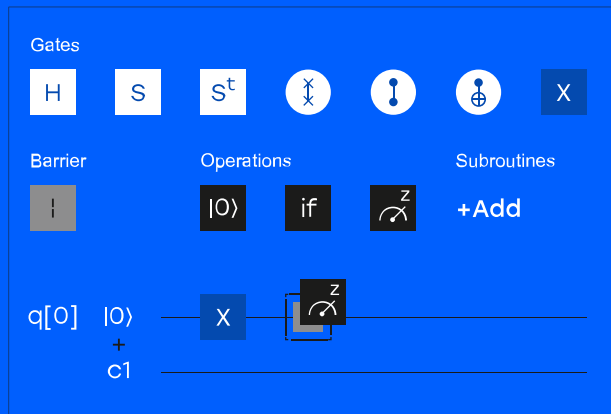
Średni czas oczekiwania w kolejce
1h 31m 49s

Łączny czas wykorzystywania zasobów komputerów kwantowych IBM Quantum, liczba zakończonych zadań i średni czas oczekiwania.



Źródło: Connie Zhou dla IBM

Programowanie „przeciągnij i upuść”



Programowanie wysokopoziomowe w języku Python i Jupyter Notebook

```
from qiskit import QuantumCircuit
from qiskit_aer import Aer

qc = QuantumCircuit(2,2)

qc.h(0)
qc.cx(0,1)
qc.measure_all()

backend = Aer.get_backend('aer_simulator')
result = backend.run(qc).result()
counts = result.get_counts(qc)
```

Programowanie komputerów kwantowych

Od strony technicznej i procesu wytwarzania oprogramowania, użytkownik zainteresowany obliczeniami kwantowymi musi w pierwszej kolejności skupić się na odpowiednim zaprojektowaniu obwodów za pomocą podstawowych bramek kwantowych. Przypomina to dobrze znany proces z programowania elektroniki, w którym układy projektuje się łącząc ze sobą bramki logiczne w coraz to bardziej zaawansowane funkcjonalnie układy cyfrowe. Aktualnie istnieje wiele różnych narzędzi i bibliotek programistycznych wspierających użytkownika w rozwoju oprogramowania. Najbardziej zaawansowanym, a jednocześnie bardzo intuicyjnym i przyjaznym narzędziem jest graficzny interfejs użytkownika udostępniany w powiązaniu z bezpośrednim dostępem do różnych zasobów komputerów kwantowych IBM Quantum.

Graficzny interfejs użytkownika wspiera również tryb “przeciągnij i upuść”, pozwalając w szczególności mało doświadczonym użytkownikom nie tylko szybko skonstruować dowolny obwód kwantowy, ale także sprawdzić jak poszczególne bramki kwantowe wpływają na cały proces zmieniania stanów kubitów podczas przeprowadzanych obliczeń kwantowych. W ogólności kod algorytmu kwantowego może być zapisany przez użytkownika w wysokopoziomowym języku programowania Python, który w formie skryptu lub popularnego interaktywnego środowiska Jupyter Notebook może być uruchamiany z poziomu dowolnej przeglądarki internetowej użytkownika.

Dostępne narzędzia pozwalają na korzystanie z wysokopoziomowego języka do programowania komputerów kwantowych, jednak wciąż konieczna jest ścisła kontrola nad wykonywanymi obwodami kwantowymi. Wynika to przede wszystkim z szumów i błędów z jakimi mierzymy się w przypadku dostępnych komputerów kwantowych w erze NISQ. W celu uzyskania lepszych wyników obliczeń kwantowych, przed uruchomieniem każdego obwodu użytkownik nadal powinien sprawdzić szczegółowe charakterystyki kubitów dostępnych w danym komputerze kwantowym, w szczególności uwzględnić parametry techniczne kubitów oraz sposób połączenia pomiędzy kubitami. Aktualnie opracowywane są rozwiązania sprzętowo-programowe, które mają ułatwić użytkownikom komputerów kwantowych odpowiedni dobór konkretnego komputera kwantowego oraz sposobu przeniesienia zadanego problemu na topologię urządzenia kwantowego. Jest to przykład kolejnej programowalnej warstwy abstrakcyjnej

w stosie oprogramowania komputera kwantowego, która pozwoli użytkownikom i programistom skupić się na samym projektowaniu algorytmów kwantowych i badaniu ich zastosowań. We współpracy z inżynierami IBM Quantum, zespół PCSS pracował również nad integracją oraz scenariuszem wykorzystania obliczeń kwantowych w środowisku MATLAB. MATLAB, jako narzędzie do prowadzenia obliczeń naukowych i inżynierskich gromadzi rozległą społeczność, wśród której są także osoby zainteresowane tematyką informatyki kwantowej. W związku z tym tego typu oprogramowanie umożliwiające dostęp do symulatorów i maszyn kwantowych IBM otwiera możliwości dotarcia do nowych użytkowników. W ramach wykonanych prac, podczas wydarzenia IBM Quantum Summit 2023 zaprezentowano rozwiązanie Proof of Concept problemu optymalnego przydziału samolotów do lotów.

Klasyczne obliczenia z lat 50-tych	Współczesne obliczenia	Kwantowe obliczenia
Algorytmy	Algorytmy	Algorytmy
	Języki wysokiego poziomu	
	Kompilator	Kwantowe języki wysokiego poziomu
	System Operacyjny	Kompilatory
	Architektura	Optymalizacja
	Bloki sprzętowe:bramki, rejestry	Kody korekcji błędów
		...
Język assemblera	Obwody VLSI	
Lampy elektronowe, układy przekaźnikowe	Tranzystory półprzewodnikowe	Implementacje kubitów

Perspektywy w ramach kwantowego hubu

01.

**Zwiększanie wydajności
obliczeń kwantowych
oraz pozyskiwanie
nowych użytkowników
i instytucji**

02.

**Praktyczne wsparcie
rozwoju kompetencji
i edukacja**

03.

**Eksperymenty
obliczeniowe
złożonych algorytmów
kwantowych
w różnych
zastosowaniach**

W ramach działalności Polskiego Węzła Obliczeń Kwantowych uruchomiono portal dostępowy do kwantowej platformy i kwantowego węzła ze zdalnym, współdzielonym dostępem do różnych zasobów komputera kwantowego IBM Quantum wspierający procesy projektowania, uruchamiania i monitorowania obliczeń kwantowych. Dodatkowo, opracowano i wdrożono wirtualne środowisko badawczo-eksperymentalne i edukacyjne dla użytkowników zainteresowanych rozwojem swoich kompetencji w zakresie technologii kwantowych z wykorzystaniem klasycznych zasobów superkomputerowych ułatwiające testy i rozwój podstawowych algorytmów kwantowych. We współpracy z użytkownikami powstały również dodatkowe narzędzia pozwalające na wykonywanie zaawansowanych obliczeń kwantowych z wykorzystaniem metod QAOA [13] i VQE [16], czyli specjalistycznych algorytmów przeznaczonych do rozwiązywania problemów kombinatorycznych i symulowania układów fizycznych.

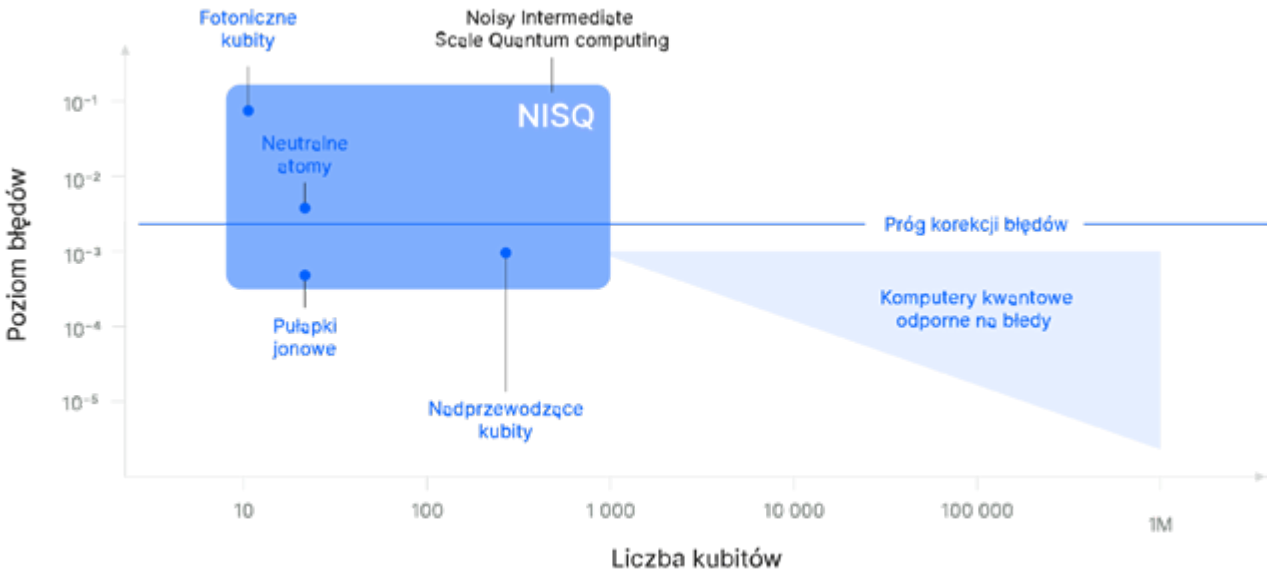


Ważną aktywnością Polskiego Węzła Obliczeń Kwantowych było opracowanie materiałów edukacyjnych oraz szkolenia dla pracowników naukowych, studentów i użytkowników Centrów Komputerów Dużej Mocy. Zorganizowano wsparcie w ramach międzynarodowego w ramach międzynarodowych warsztatów Workshop on Quantum Computing and Communication w ramach konferencji Parallel Processing and Applied Mathematics. Przeprowadzono również cykl seminariów oraz spotkań z użytkownikami poświęconych zagadnieniom obliczeń kwantowych oraz ograniczeń i możliwości wykorzystania aktualnie dostępnych komputerów kwantowych, a także zorganizowano skierowany do studentów hackaton QL Future.

Droga do kwantowego rozwoju

Dynamiczne tempo rozwoju komputerów kwantowych pozwala wierzyć, że ich praktyczne zastosowanie będzie możliwe w najbliższych latach. Plan rozwoju technologii kwantowych przedstawiony przez firmę IBM zakłada sukcesywne zwiększanie jakości i liczby kubitów, wytwarzanych w technologii nadprzewodzących kubitów, ponad tysiąca już w roku 2025. Następnie zakłada się udostępnianie komputerów kwantowych z coraz mniejszym poziomem błędów i szumów, składających się z tysięcy, kubitów oraz zdolnych wykonać coraz większą liczbę operacji w ramach jednego obwodu, w przyszłości nawet do miliarda, dzięki kwantowej korekcji błędów. Plany rozwoju komputerów kwantowych w kolejnych latach w oparciu o inne technologie kwantowe, w tym pułapki jonowe, fotoniczne kubyty czy neutralne atomy są również obiecujące. Zdefiniowana przez IBM metryka wydajności komputerów kwantowych - Quantum Volume, uwzględniająca liczbę kubitów w procesorach kwantowych, a także ich jakość i dokładność pozwala na zdefiniowanie nowej zależności na wzrost możliwości komputerów kwantowych w czasie [6], koniec ery gdzie domi-

W celu dalszej poprawy wydajności i utrzymania tempa skalowania komputerów kwantowych wszystko wskazuje na to, że konieczne będzie łączenie procesorów kwantowych w większe systemy przy pomocy łączu klasycznych i kwantowych. Umożliwi to wykorzystanie znacznie większej liczby kubitów, a docelowo ma doprowadzić do zbudowania systemu zdolnego do korekcji błędów.



nowało prawo Moore’a, jest swojego rodzaju początkiem ery NISQ i kolejnych etapów rozwoju technologii klasyczno-kwantowych wykorzystywanych do obliczeń i symulacji. Na przełomie dwóch lat działalności Polskiego Węzła Obliczeń Kwantowych udało się znacząco poprawić jakość i zwiększyć możliwości obsługi większej liczby użytkowników. Dzięki wprowadzeniu

nowych abstrakcyjnych obiektów Qiskit Primitives możliwe jest bardziej wydajne wykonywanie algorytmów kwantowych. W czasie działalności Węzła udało się znacząco poprawić jakość i zwiększyć możliwości obsługi większej liczby krajowych użytkowników.

2024

Crossbill
408 kubitów

Zwiększenie dokładności Qiskit Runtime za pomocą skalowanej mitygacji błędów

2025

Flamingo
1,386+ kubitów

Demonstracja skalowania z modułowymi połączeniami

2026

Loon

Demonstracja skalowania za pomocą nielokalnych c-couplerów

Kookaburra

Demonstracja kompletnego modułu łączącego jednostkę przetwarzania logicznego z pamięcią kwantową

2027

Cockatoo

Demonstracja splątania modułów przy użyciu uniwersalnego repeatera

2028

Starling

Demonstracja pracy wielu modułów oraz destylacji stanów magicznych

2029

200-kubitowe komputery kwantowe odporne na błędy, sto milionów bramek

2033+

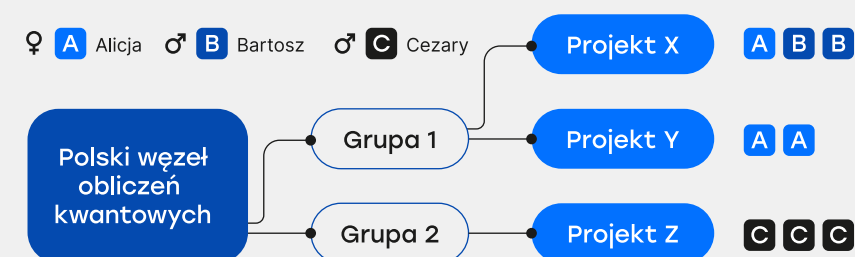
2000-kubitowe komputery kwantowe odporne na błędy, miliard bramek

Administracja i zarządzanie obliczeniami kwantowymi

Rdzeniem dynamicznej struktury administracji i zarządzania obliczeniami kwantowymi jest Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe ICHB PAN, które oddelegowuje stosowne uprawnienia dla polskich instytucji naukowych i ich użytkowników dostępu do komputera kwantowego.

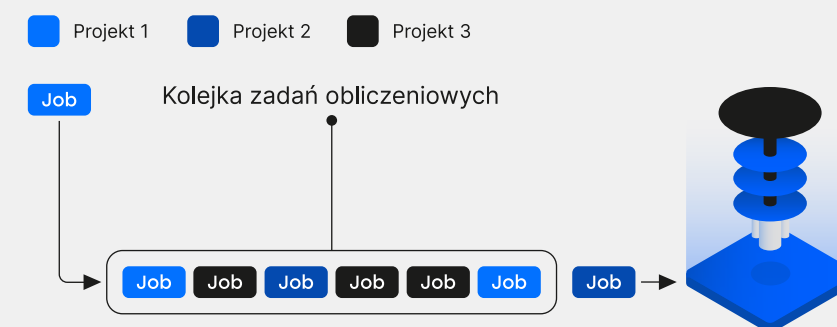
Kwantowe zadania obliczeniowe

Do polskiego węzła obliczeń kwantowych przypisywane są grupy oraz projekty. Użytkownicy pracujący w ramach projektu mogą zlecać zadania obliczeniowe korzystając z alokacji przydzielonej konkretnej kombinacji grupy i projektu.



System kolejkowy

Obsługa i szeregowanie zadań do wykonania na komputerze kwantowym opiera się na dynamicznym systemie kolejkowym zapewniającym sprawiedliwy podział zasobów między różne grupy, projekty i ich użytkowników.





Kluczowe kompetencje i zagadnienia

03

Wprowadzenie

Czytając kolejne strony raportu, w wielu miejscach dostrzegamy, jak nową dziedziną jest informatyka kwantowa oraz jak wiele pozostaje jeszcze do odkrycia. W przeciwieństwie do klasycznych rozwiązań informatycznych, które coraz głębiej przenikają codzienne życie, technologie kwantowe pozostają słabo rozpowszechnione. Z tego powodu informatyka kwantowa może budzić opór nawet wśród pasjonatów nowych technik.

Wbrew powszechnemu przekonaniu, nie trzeba jednak spędzić wielu godzin na studiowaniu matematyki i fizyki, by korzystać z tego, co oferuje paradygmat obliczeń kwantowych. Proces nauki informatyki kwantowej pozwala na stopniowe przyswajanie niezbędnych zagadnień. Już podstawowa znajomość algebry liniowej i liczb zespolonych umożliwia konstruowanie prostych obwodów kwantowych oraz korzystanie z najprostszych algorytmów. Co więcej, w miarę potrzeby można stopniowo poszerzać swoją wiedzę, aby stosować bardziej zaawansowane techniki.

Dużym ułatwieniem w nauce informatyki kwantowej oraz jej wykorzystaniu jest rosnąca liczba materiałów przeznaczonych do samodzielnej nauki. Niestety, pewną dodatkową barierą może być fakt, że większość dostępnych zasobów publikowana jest w języku angielskim. Z tego względu, w ramach działań na rzecz poszerzania kompetencji w zakresie technologii kwantowych, w PCSS opracowano zestaw polskojęzycznych kursów przygotowanych dla osób na różnym poziomie zaawansowania. Dla uczestników początkujących, posiadających wiedzę ze szkoły średniej, dostępne są kursy podstawowe, które pozwalają zdobyć certyfikat potwierdzający nabyte kompetencje*. Dla osób bardziej zaawansowanych przygotowano moduły umożliwiające poznawanie bardziej złożonych zagadnień informatyki kwantowej.

Kluczowymi działami wiedzy, których opanowanie na podstawowym poziomie jest wymagane, aby stosunkowo swobodnie poruszać się w obszarze obliczeń kwantowych, są podstawy matematyki, w szczególności algebra liniowa, podstawy mechaniki kwantowej, a także podstawy konstruowania obwodów kwantowych, omówienie działania podstawowych algorytmów kwantowych oraz kwantowych symulatorów. Ważne jest również odpowiednie zaprezentowanie tych treści, tak aby osoba angażująca się w pogłębianie wiedzy miała poczucie, że dobrze zrozumiała materiał. Na kolejnych stronach raportu omówimy wszystkie główne działy niezbędnej wiedzy i umiejętności potrzebnych do zaczenia swojej drogi w zakresie informatyki kwantowej oraz wskażemy dalsze drogi rozwoju.

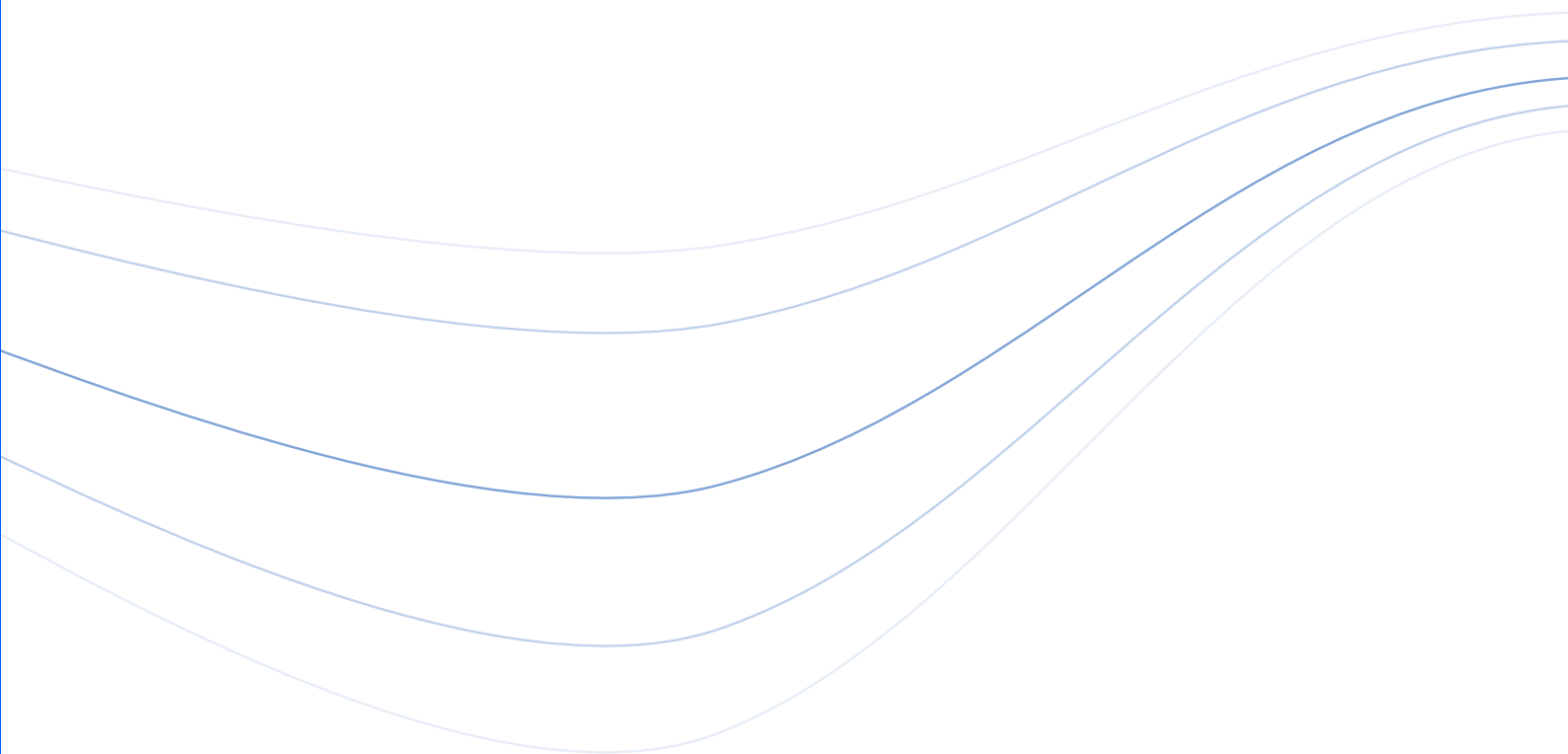
* <https://kwalifikacje.gov.pl/zrk2/kwalifikacja/13990>



3.1

Programowanie komputerów kwantowych

Kwalifikacja cząstkowa na poziomie piątym Polskiej
Ramy Kwalifikacji i europejskich ram kwalifikacji

- 
- 01.** PODSTAWY MATEMATYCZNE
 - 02.** PODSTAWY INFORMATYKI KWANTOWEJ
 - 03.** OBLICZENIA KWANTOWE
 - 04.** WYKORZYSTANIE ALGORYTMÓW KWANTOWYCH



Podstawy matematyczne

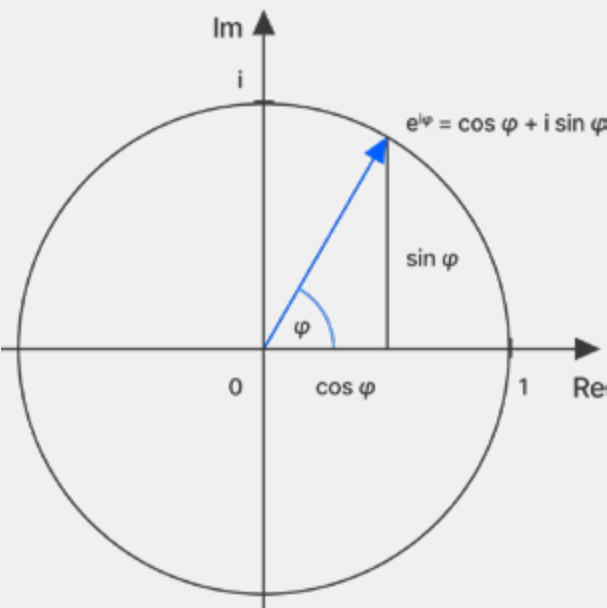
Podczas gdy klasyczna informatyka wywodzi się z logiki i teorii obliczeń, a jej fizyczna realizacja opiera się na budowie układów złożonych z tranzystorów i bramek logicznych, informatyka kwantowa korzysta z fundamentalnych praw mechaniki kwantowej. Nie oznacza to jednak jedynie adaptacji istniejących zjawisk. Równie istotne jest odkrywanie nowych metod ich wykorzystania do obliczeń oraz rozwój narzędzi pozwalających na ich praktyczne zastosowanie. Językiem opisu fizyki kwantowej, wynikającym wprost z jej liniowej natury, jest algebra liniowa. Naturalną konsekwencją tego faktu jest stosowanie algebry liniowej również w informatyce kwantowej. Niezbędna jest zatem znajomość podstawowych zasad tych narzędzi matematycznych, dzięki którym można opisywać kwantowe obliczenia i algorytmy.



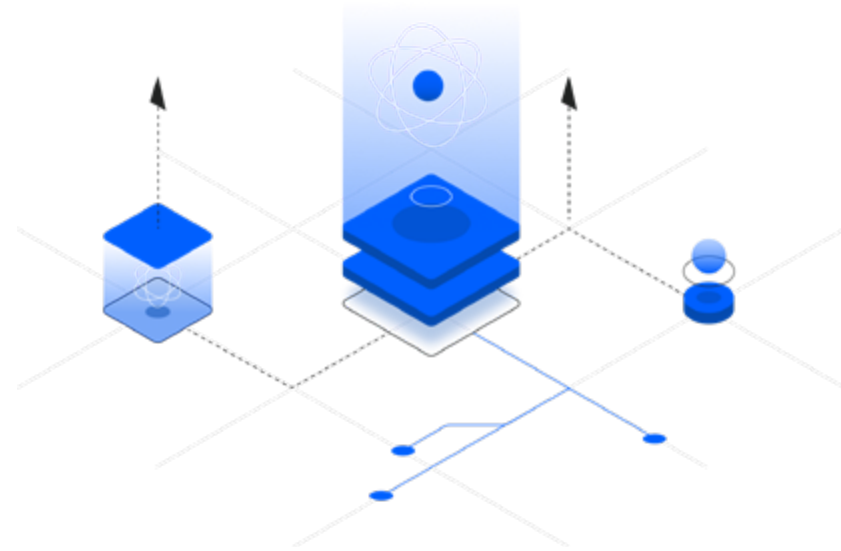
Przejdź do kursu
Podstawy algebry liniowej.



W przygotowanych materiałach wprowadzających podstawy matematyczne znalazły się treści omawiające liczby zespolone, w szczególności ich interpretację geometryczną, mnożenie oraz moduł. Ważną umiejętnością jest tutaj biegłe posługiwanie się wzorem Eulera, gdyż jest to zapis często pojawiający się w informatyce kwantowej.



Elementem, który odróżnia podejście do nauki algebry liniowej w informatyce kwantowej od innych dziedzin, jest potrzeba głębszego jej zrozumienia pod kątem abstrakcyjnych bytów, takich jak przestrzenie wektorowe i operatory liniowe. Same umiejętności manualne, na przykład mnożenie macierzy, nie wystarczają do zrozumienia konsekwencji pomiaru kubitów w różnych bazach czy ewolucji stanów kwantowych. Mimo to, dzięki bezpośredniemu powiązaniu informatyki kwantowej z algebrą liniową, bardzo szybko można zauważyć, w jaki sposób teoretyczne aspekty przekładają się na praktyczne zastosowania.



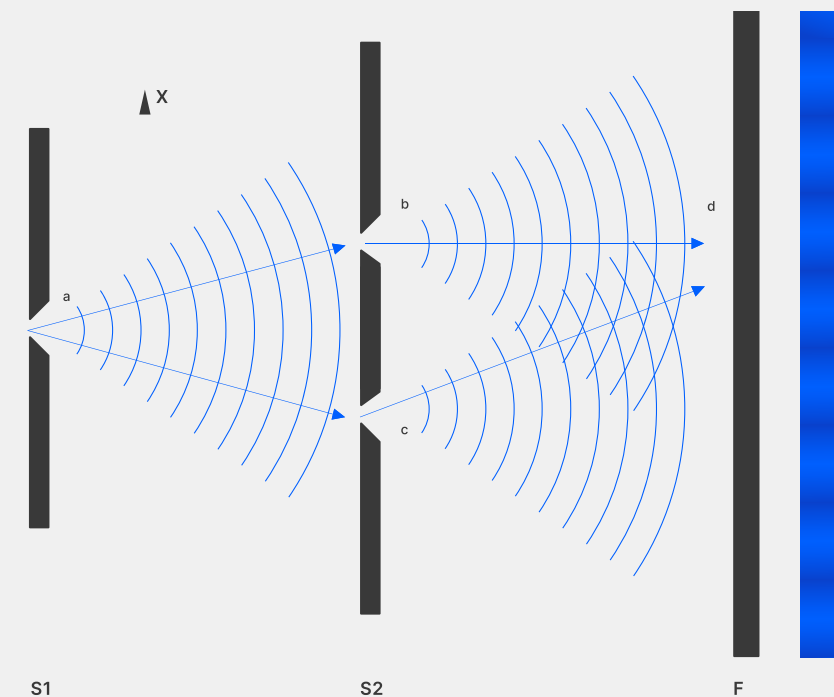
Podstawy informatyki kwantowej

Znajomość podstaw matematycznych otwiera drogę do zrozumienia obliczeń kwantowych. Przed rozpoczęciem nauki informatyki kwantowej warto jednak przynajmniej pobieżnie zapoznać się z eksperymentami, które doprowadziły do rozwoju mechaniki kwantowej, oraz z tym, czym mechanika kwantowa różni się na poziomie fizycznym od mechaniki klasycznej.

Jednym z kluczowych eksperymentów jest doświadczenie z dwiema szczelinami, znane jako eksperyment Younga, które ukazuje zjawisko interferencji, a w przypadku pojedynczych fotonów — superpozycję oraz wpływ pomiaru na stan kwantowy. Podobnie warto wyrobić sobie intuicję, czym na poziomie pojedynczych cząstek jest splątanie oraz tunelowanie kwantowe.

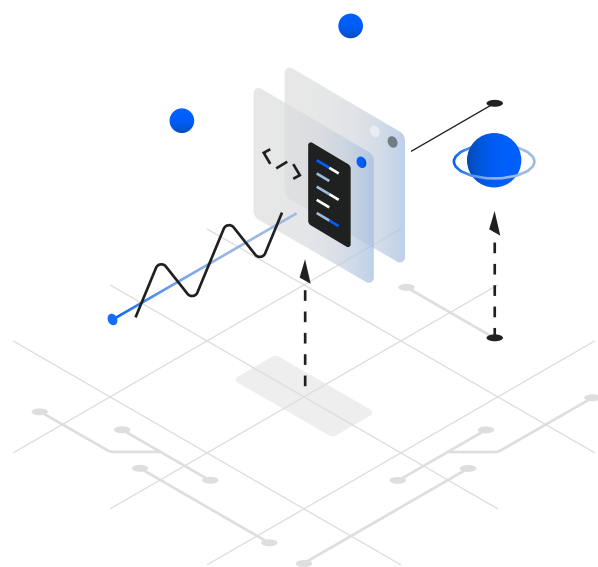


Przejdź do kursu
Mechanika kwantowa.



Mechanika kwantowa wprowadza również nową notację i definiuje podstawowe operacje, z którymi należy się zaznajomić. Po pierwsze, pozwala to sformalizować rozumienie podstawowych zjawisk kwantowych, a po drugie — umożliwia interpretację zapisu, w którym przedstawiane są algorytmy kwantowe.

Dysponując niezbędnym aparatem matematycznym oraz mając wyrobioną intuicję dotyczącą mechaniki kwantowej, można przejść do prawdopodobnie najbardziej ekscytującej części — nauki samej informatyki kwantowej. Począwszy od wprowadzenia sfery Blocha, poznaje się pierwsze operacje na kubitach, realizowane za pomocą bramek kwantowych, które umieszczone są na poziomych liniach symbolizujących zmianę stanów kwantowych w czasie, czyli na tzw. obwodzie kwantowym. Dużą wartością jest przedstawianie wszystkich operacji zarówno w ujęciu matematycznym, jak i w postaci obwodów kwantowych, zwłaszcza z wykorzystaniem graficznych narzędzi do konstruowania interaktywnych układów.



Obliczenia kwantowe

W pewnym momencie budowanie i analizowanie obwodów kwantowych wyłącznie przy użyciu kartki papieru oraz podstawowych narzędzi matematycznych staje się niewystarczające. Niezbędne stają się wtedy bardziej wyspecjalizowane narzędzia do symulacji obwodów kwantowych.

Warto poświęcić chwilę na zapoznanie się z interfejsami umożliwiającymi graficzną konstrukcję obwodów kwantowych. Pozwalają one na interaktywne eksperymentowanie z różnymi wariantami układów, co może rozwiązać ewentualne wątpliwości i przyspieszyć proces nauki.

Interaktywne interfejsy graficzne nie są jednak dostosowane do większych algorytmów wykorzystujących wiele kubitów lub licznych powtórzeń da-



Przejdź do kursu
Biblioteka programistyczna Qiskit.



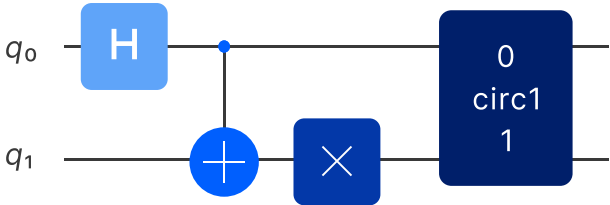
```
# Tworzenie dwóch obwodów

circ1 = QuantumCircuit(2, name='circ1')
circ1.h(0)
circ1.cx(0, 1)

circ2 = QuantumCircuit(2)
circ2.x(1)

# Łączenie obwodów

circ_combined = circ1.compose(circ2)
circ_combined.append(circ1, [0, 1])
```



nej części obwodu. Nie oferują również pełnych możliwości symulacji, w tym próbkowania obwodów kwantowych. Z tego powodu kluczowym narzędziem stają się środowiska programistyczne, które umożliwiają programowanie komputerów kwantowych przy użyciu popularnych języków programowania. Wprowadzenie do jednego z takich środowisk — biblioteki Qiskit, pozwalającej na programowanie komputerów kwantowych w języku Python — zostało przedstawione w jednym z opracowanych kursów.

Obecne komputery kwantowe często wymagają dość złożonego procesu uruchamiania. Dlatego osoby zainteresowane informatyką kwantową powinny zapoznać się z takimi zagadnieniami, jak transpilacja obwodów kwantowych oraz metody parametryzacji uruchomień. Ponadto współczesne komputery kwantowe nie są odporne na błędy i szumy, dlatego przyszli adepci kursów z informatyki kwantowej powinni również zdobyć wiedzę na temat technik minimalizacji ich wpływu na jakość obliczeń.



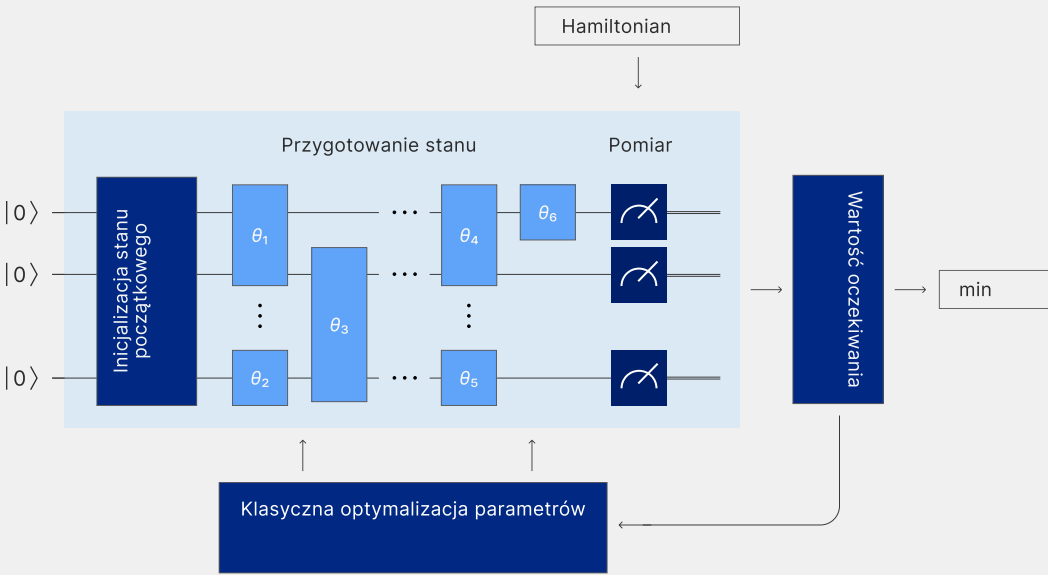
Wykorzystanie algorytmów kwantowych

Informatyka kwantowa nie wyszłaby poza uniwersyteckie laboratoria, gdyby nie była użyteczna w codziennym świecie – w przemyśle, biznesie, finansach czy bezpieczeństwie. Istnieje wiele algorytmów kwantowych wykazujących wyraźną przewagę nad klasycznymi w różnych dziedzinach.

Warto jednak zachować ostrożność i nie budować nadmiernych oczekiwań, obiecując więcej, niż obecne i przyszłe komputery kwantowe będą w stanie zrealizować. Może to przynieść odwrotny skutek – utratę zaufania inwestorów rozczarowanych niezrealizowanymi obietnicami.



Przejdź do kursu
Zastosowania algorytmów kwantowych.

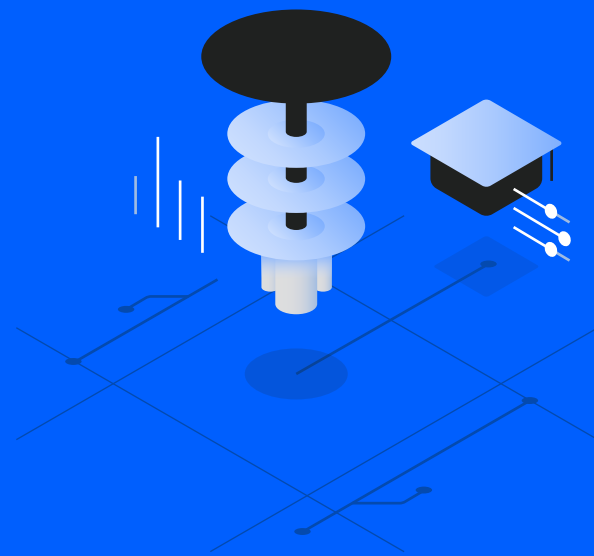


Aby realistycznie ocenić potencjał komputerów kwantowych, kluczowe jest zrozumienie ich rzeczywistych możliwości. Narzędzia do tego dostarcza kwantowa teoria złożoności obliczeniowej, której podstawy omawiane są w opracowanych kursach.

Podstawową wiedzę z informatyki kwantowej warto uzupełnić znajomością kluczowych algorytmów. Należą do nich algorytm Grovera, zapewniający kwadratowe przyspieszenie w przeszukiwaniu, algorytm Shora, umożliwiający efektywne rozkładanie dużych liczb na czynniki pierwsze, oraz algorytm VQE, wykorzystywany w zaawansowanych symulacjach chemicznych.

Na podstawowym poziomie nie jest jednak konieczne szczegółowe poznanie implementacji algorytmów, ponieważ pełne zrozumienie każdego z nich wymaga co najmniej kilku godzin pracy. Warto natomiast orientować się, do czego służy dany algorytm oraz jak dostosowywać jego parametry, aby wprowadzić ewentualne drobne modyfikacje w jego działaniu.

3.2



Programy kształcenia dla szkół wyższych

Swoją drogę z technologiami kwantowymi wiele osób zaczyna głównie na wyższych latach studiów fizycznych, informatycznych lub matematycznych. Jest to zwykle efekt połączenia indywidualnych zainteresowań z wiedzą zdobywaną w toku studiów. W Polsce brakuje jednak możliwości dalszego kształcenia talentów chcących rozwijać się w obszarze technologii kwantowych. W rezultacie osoby te są zmuszone uczyć się samodzielnie, wybierać studia za granicą lub rezygnować z dalszego pogłębiania tych zainteresowań. Zjawisko to z roku na rok staje się coraz bardziej widoczne, co skłania coraz więcej uczelni do analizowania możliwości wprowadzania kwantowych ścieżek kształcenia w ramach istniejących kierunków lub tworzenia odrębnych programów o tematyce kwantowej.

Wychodząc naprzeciw narastającym potrzebom, w ostatnim roku w PCSS zaprojektowano i przedstawiono propozycję studiów inżynierskich – kierunku Informatyka Kwantowa, łączącego podstawy informatyki, matematyki i fizyki z zagadnieniami algorytmów i technologii kwantowych. Równocześnie opracowano propozycje ścieżek kształcenia dla czternastu kierunków studiów, które integrują technologie kwantowe z poszczególnymi kierunkami i pozwalają studentom rozwijać zainteresowania oraz przygotowywać się do pracy z technologiami kwantowymi w dalszej karierze zawodowej.



Ramowy program kształcenia dla kierunku Informatyka kwantowa

Ramowy program kształcenia dla kierunku Informatyka Kwantowa został zaprojektowany jako siedmiosemestralne studia inżynierskie, prowadzące od klasycznych podstaw informatyki, matematyki i fizyki do zagadnień obliczeń kwantowych i ich zastosowań. Program zakłada stopniowe wprowadzanie treści kwantowych, tak aby nowe pojęcia i narzędzia były osadzone na znanych fundamentach i umożliwiały systematyczne budowanie kompetencji.

Struktura programu ma charakter modułowy. Po wspólnym trzynie przedmiotów obowiązkowych studenci uzyskują coraz większą swobodę w wyborze dalszej ścieżki kształcenia. W kolejnych semestrach rośnie udział przedmiotów obieralnych oraz zajęć projektowych, które pozwalają rozwijać indywidualne zainteresowania,

pracować zespołowo oraz przygotowywać się do realizacji pracy dyplomowej. Przykładowo, wybór matematyki finansowej pozwala zgłębiać zastosowania obliczeń kwantowych w ekonomii, łącząc wiedzę teoretyczną z praktyką oraz umiejętnością współpracy w zespole.



W bloku informatycznym realizowane są zagadnienia związane z:

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none">• CYBERBEZPIECZEŃSTWEM• TEORIĄ INFORMACJI• GRAFIKĄ KOMPUTEROWĄ | <ul style="list-style-type: none">• GŁĘBOKIMI SIECIAMI NEURONOWYMI• PRZETWARZANIEM JĘZYKA NATURALNEGO |
| <p>blok informatyki kwantowe może obejmować:</p> | |
| <ul style="list-style-type: none">• ALGORYTMY KWANTOWE I ICH ZASTOSOWANIA• TEORIĘ INFORMACJI KWANTOWEJ• KWANTOWE CYBERBEZPIECZEŃSTWO• KWANTOWĄ SZTUCZNĄ INTELIGENCJĘ | <ul style="list-style-type: none">• ZASTOSOWANIA W FINANSACH,• ARCHITEKTURY PROCESORÓW KWANTOWYCH• KWANTOWE INTERFEJSY I SYSTEMY HPC |

Informatyka kwantowa

podział semestralny

01

Wprowadzenie w kluczowe zagadnienia matematyki, fizyki i informatyki, przygotowujące do bardziej zaawansowanych tematów.

Mechanika ogólna

Analiza matematyczna 1

Wstęp do zaawansowanej matematyki

3x Blok informatyczny 1

Wychowanie fizyczne

Język angielski

02

Rozwijanie zagadnień matematycznych i fizycznych, wprowadzenie do bazowych obszarów informatyki.

Blok fizyczny

Analiza matematyczna 2

Algebra liniowa

Matematyka dyskretna

2x Blok informatyczny 2

Wychowanie fizyczne

Język angielski

03

Wprowadzenie wybranych zagadnień fizycznych oraz kontynuacja rozwoju z bazowych obszarów informatycznych.

2X Blok fizyczny

Rachunek prawdopodobieństwa

Blok matematyczny

2X Blok informatyczny 2

Język angielski

04

Wprowadzenie pierwszych przedmiotów kwantowych, możliwość wyboru dodatkowych zagadnień matematycznych.

Fizyka kwantowa

Podstawy informatyki kwantowej

2X Blok matematyczny

2X Blok informatyczny 2

Język angielski

Blok informatyczny 1 (podstawowy)

- Wprowadzenie do informatyki • Podstawy programowania w języku C++ • Podstawy programowania w języku • Narzędzia informatyki

Blok informatyczny 2 (średnio-zaawansowany)

- Systemy operacyjne • Sieci komputerowe • Bazy danych • Programowanie obiektowe • Systemy wbudowane • Aplikacje internetowe • Inżynieria oprogramowania • Przetwarzanie współbieżne i rozproszone • Sztuczna inteligencja • Optymalizacja kombinatoryczna

Blok fizyczny

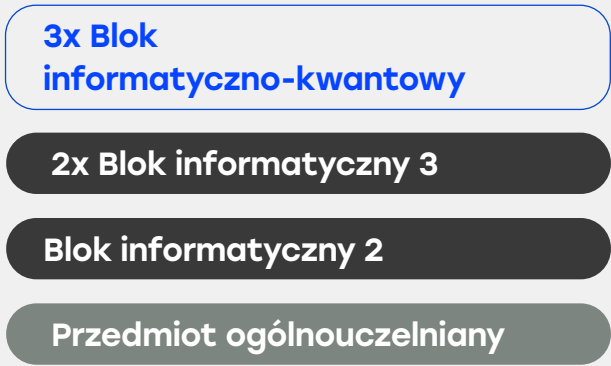
- Elektromagnetyzm • Optyka • Fizyka atomowa • Fizyka ciała stałego • Termodynamika i fizyka statystyczna

Blok matematyczny

- Teoria grup • Matematyka finansowa • Kryptografia matematyczna • Teoria grafów • Równania różniczkowe i cząstkowe

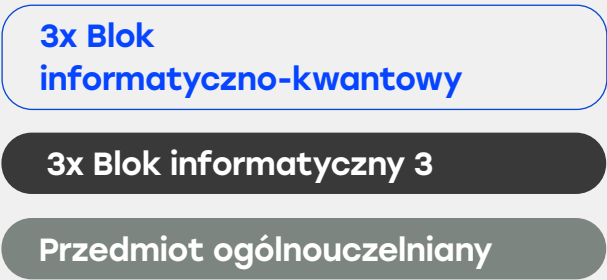
05

Wprowadzenie zaawansowanych przedmiotów informatyki kwantowej, rozwijanie zaawansowanych technik informatycznych.



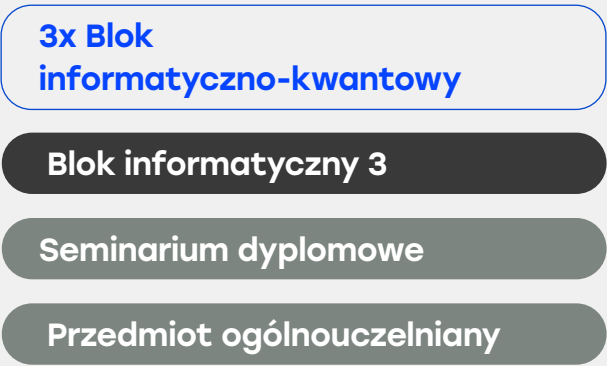
06

Rozwój kompetencji w inżynierii kwantowej, pogłębianie zaawansowanych technik informatycznych, przygotowanie do praktyk.



07

Realizacja pracy inżynierskiej oraz doskonalenie zaawansowanych kompetencji informatycznych i kwantowych.



Blok informatyczny 3
(zaawansowany)

- Systemy chmurowe • Głębokie sieci neuronowe
- Przetwarzanie języka naturalnego • Uczenie maszynowe • Cyberbezpieczeństwo • Teoria informacji • Grafika komputerowa

Blok informatyczno-kwantowy

- Algorytmy kwantowe i ich zastosowania
- Teoria informacji kwantowej • Kwantowe cyberbezpieczeństwo • Kwantowa sztuczna inteligencja • Informatyka kwantowa w finansach • Architektury procesorów kwantowych • Kwantowe interfejsy i systemy HPC

Programy kształcenia dla kierunków dziedzinowych

Rozwój technologii kwantowych sprawia, że coraz więcej uczelni wyższych rozważa wprowadzenie elementów technik kwantowych również na specjalistycznych kierunkach studiów. Naturalnie rodzi to pewne trudności, ponieważ na kierunkach nieinformatycznych studenci często nie mają odpowiednich narzędzi matematyczno-informatycznych, niezbędnych do zdobycia biegłości w technologiach kwantowych. Równocześnie trzeba uważać, żeby nie przeladować studentów materiałem, którego nie będą w stanie przerobić. Biorąc to pod uwagę, w Poznańskim Centrum Superkomputerowo-Sieciowym opracowaliśmy więc programy kształcenia dla kierunków dziedzinowych. Umożliwiają one studentom innych obszarów niż informatyka rozwijanie kompetencji kwantowych równoległe z wiedzą specjalistyczną, niezależnie od poziomu wcześniejszego przygotowania.

Ścieżki kształcenia obejmują czternaście kierunków, pogrupowanych w cztery obszary. Obejmują one obszar informatyczny, w ramach którego realizowane są informatyka, bioinformatyka i sztuczna inteligencja, obszar ekonomiczny, obejmujący informatykę i ekonometrię, finanse i rachunkowość oraz analitykę danych ekonomicznych, a także obszar dziedzinowych kierunków inżynierskich oraz obszar techniczny. Do kierunków inżynierskich należą biotechnologia, chemia medyczna, technologia chemiczna i inżynieria materiałowa, natomiast obszar techniczny obejmuje fizykę techniczną, informatykę techniczną, elektrotechnikę oraz elektronikę i telekomunikację.



Ścieżki kształcenia obejmują czternaście kierunków, pogrupowanych w cztery obszary:

- **INFORMATYCZNY**
obejmujący informatykę, bioinformatykę i sztuczną inteligencję
- **EKONOMICZNY**
w tym informatykę i ekonometrię, finanse i rachunkowość oraz analitykę danych ekonomicznych
- **DZIEDZINOWE KIERUNKI INŻYNIERYJNE**
biotechnologia, chemia medyczna, technologia chemiczna i inżynieria materiałowa
- **TECHNICZNY**
obejmujący fizykę techniczną, informatykę techniczną, elektrotechnikę oraz elektronikę i telekomunikację

Programy przewidują elastyczną strukturę zajęć. Dla większości kierunków przygotowaliśmy osobne propozycje dla studiów pierwszego i drugiego stopnia. Na studiach pierwszego stopnia określono sugerowaną kolejność realizacji przedmiotów, zwykle obejmującą od dwóch do trzech kwantowych przedmiotów dziedzinowych, realizowanych zwykle na trzech ostatnich semestrach studiów. Na studiach drugiego stopnia student, który nie realizował ścieżki podstawowej na studiach pierwszego stopnia, może ją uzupełnić. Studenci, którzy mieli możliwość wcześniejszego zaznajomienia się z technologiami kwantowymi, mogą wybrać jeden lub dwa bardziej zaawansowane przedmioty obieralne, łączące technologie kwantowe z ich dziedziną kształcenia.

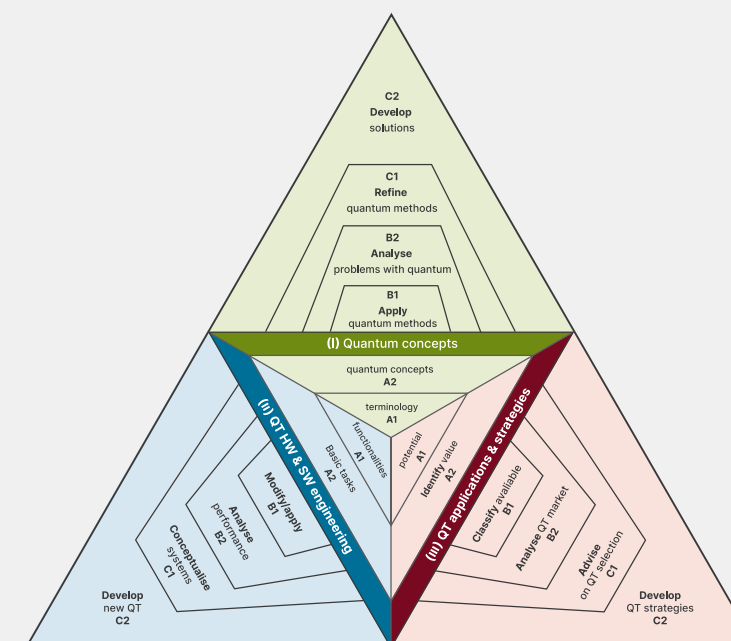
3.3



Kwantowa Akademia



Szczegółowość oceny kompetencji wspiera trójkąt biegłości, który wizualizuje sześć poziomów biegłości (A1–C2) dla ich trzech możliwych obszarów. Obszary biegłości porządkują kompetencje związane z technologiami kwantowymi w trzech kategoriach: (I) pojęć kwantowych, (II) inżynierii sprzętu i oprogramowania kwantowego oraz (III) strategii oraz zastosowań technologii kwantowych. Wszystkie trzy przedstawione obszary są niezależne od konkretnej technologii kwantowej.



W odpowiedzi na rosnącą potrzebę poszerzania kompetencji w szkołach średnich i uczelniach wyższych powstała na terenie PCSS Akademia Kwantowa – przestrzeń dla przyszłych ekspertów technologii kwantowych. Jest to inicjatywa edukacyjna, która została stworzona z myślą o wszystkich, którzy chcą zdobywać i rozwijać umiejętności w obszarze technologii kwantowych. Akademia umożliwia rozwój kompetencji na wszystkich poziomach zaawansowania od A1 do C2, określonych w dokumencie European Competence Framework for Quantum Technologies (QCF4QT). Osoby zainteresowane mogą poszerzać swoją wiedzę zarówno za pomocą prostych kursów wprowadzających jak i rozbudowanych ścieżek obejmujących wiele modułów.

Kwantowa Akademia oferuje bogaty zestaw interaktywnych narzędzi, które wspierają naukę oraz umożliwiają eksperymentowanie i weryfikowanie zdobytych umiejętności. Uczestnicy mają dostęp do interaktywnego, graficznego konstruktora obwodów kwantowych, środowiska Jupyter Notebook pozwalającego programować komputery kwantowe bezpośrednio z poziomu przeglądarki, a każdy kurs jest wyposażony w animacje, grafiki i quizy, co znacząco wzbogaca proces nauki.



Obecnie
dostępne kursy
pokrywają
następujące
tematy:

A1

- Mechanika kwantowa
- Graficzne obwody kwantowe
- Transpilacja obwodów kwantowych
- Zastosowania algorytmów kwantowych

A2

- Symulatory komputerów kwantowych
- Obliczenia kwantowe
- Biblioteka programistyczna Qiskit
- Podstawy algebry liniowej
- Parametry i błędy kubitów
- Złożoność algorytmów kwantowych
- Algorytm Grovera
- Algorytm Deutscha i Deutscha-Jozsy
- Algorytm Bernsteina-Vaziraniego
- Podstawy kryptografii kwantowej
- Protokół BB84
- Protokół B92
- Kwantowa komunikacja: stan wiedzy i zastosowania

B1

- Technologie kwantowe w neurobiologii
- Protokół E91
- Błądzenie kwantowe
- Kwantowe sztuczne sieci neuronowe
- Kwantowe uczenie maszynowe

B2

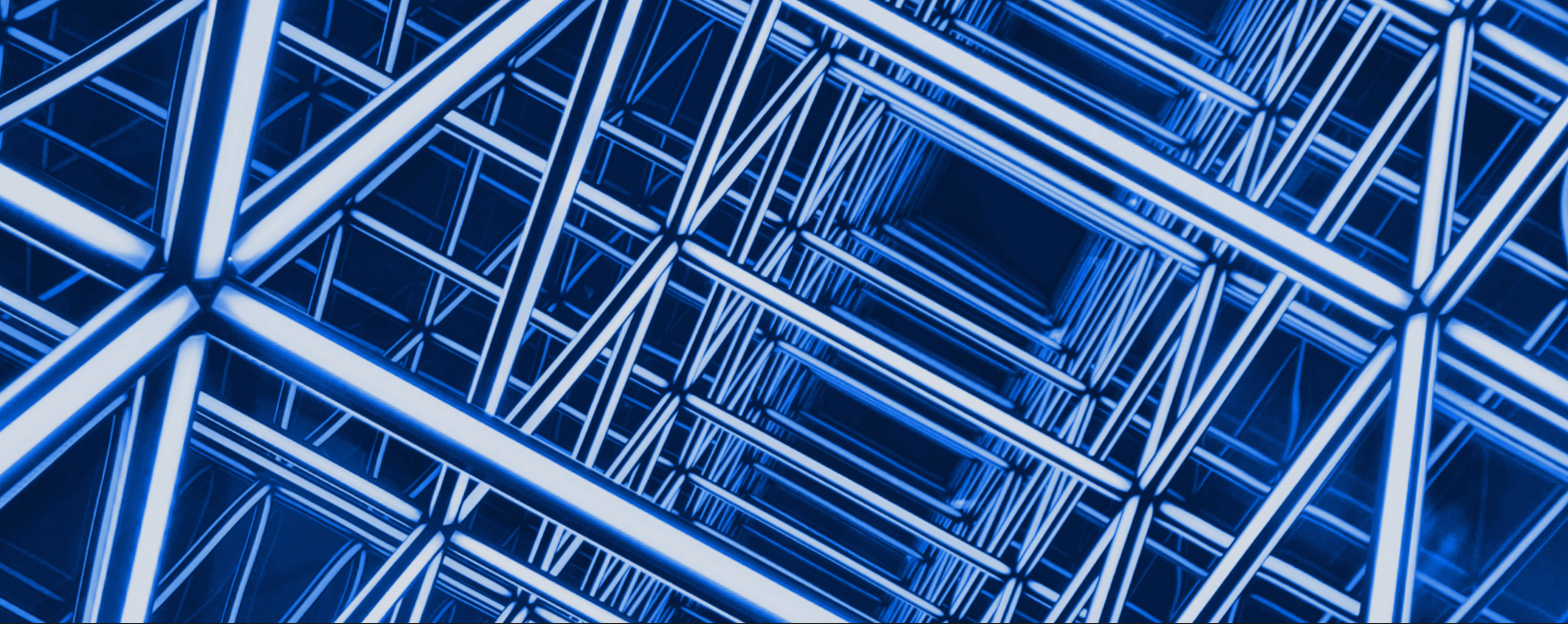
- Kwantowa transformata Fouriera
- Kwantowa estymacja fazy
- Algorytm Shora
- Kwantowe Monte Carlo
- Podstawy dynamiki kwantowej
- Podstawy optyki kwantowej
- Praktyczne aspekty optyki kwantowej
- Podstawy fizyki ciała stałego
- Kody korekcji błędów I
- Wybrane metody mitygacji błędów
- Pułapki jonowe I: podstawy fizyczne pułapek jonowych
- Kubity fotoniczne I: podstawy platform fotonicznych dla obliczeń kwantowych

C1

- Nadprzewodzące kubity I: od podstaw fizycznych do praktycznych implementacji
- Nadprzewodzące kubity II: operacje na kubitach
- Nadprzewodzące kubity III: pomiar stanów kubitów
- Pułapki jonowe II: od atomu do kubit
- Pułapki jonowe III: kontrola i manipulacja stanami kwantowymi
- Pułapki jonowe IV: kontrola i manipulacja kubitami jonowymi
- Kubity fotoniczne IV: implementacja algorytmów i zastosowania
- Pozostałe architektury komputerów kwantowych
- Kody korekcji błędów II

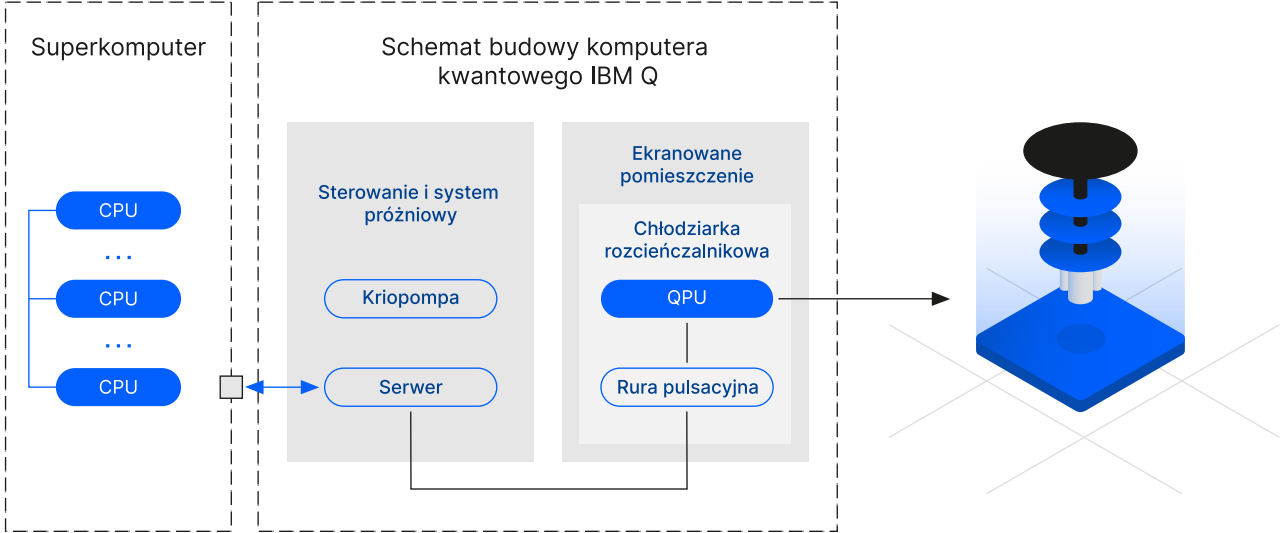
C2

- Pułapki jonowe IV: kontrola i manipulacja kubitami jonowymi
- Kubity fotoniczne II: generacja i kontrola stanów fotonicznych
- Kubity fotoniczne III: architektury fotonicznych procesorów kwantowych



Zastosowania

04



Polski Węzeł Obliczeń Kwantowych nie tylko pośredniczy w dostępie do komputerów kwantowych IBM Quantum, ale także aktywnie nawiązuje współpracę z ekspertami oraz naukowcami z wielu ośrodków i przedsiębiorstw. Głównym zadaniem jest wsparcie różnych aktywności nad wykorzystaniem obliczeń kwantowych do rozwiązywania trudnych problemów z wielu różnych dziedzin nauki i przemysłu. Kwantowe metody obliczeniowe badane są zarówno pod kątem teoretycznym, jak i w kontekście możliwości uruchomienia ich na dostępnych zasobach. Dużo uwagi poświęcane jest również metodom mającym rozwiązać problemy samych komputerów kwantowych, a co za tym idzie przybliżyć moment, w którym osiągnięcie kwantowej przewagi stanie się możliwe. W kolejnych sekcjach podsumowane zostaną obszary zastosowań, które analizowane były w pierwszym okresie działalności Polskiego Węzła Obliczeń Kwantowych we współpracy z licznymi partnerami i eksperymentalnymi użytkownikami.

Eksperymentalne obliczenia kwantowe krajowych użytkowników

Aby przygotować się na nadchodzącą drugą rewolucję kwantową oraz zidentyfikować potencjalne obszary zastosowań komputerów kwantowych potrzebna jest strategiczna wizja budowy ekosystemu kwantowego w Polsce poprzez ścisłe i cykliczne interakcje pomiędzy czterema podstawowymi komponentami:

- badania i rozwój w zakresie możliwości oraz ograniczeń obliczeń kwantowych wykorzystywanych do budowy algorytmów kwantowych, aplikacji i usług wykorzystujących hybrydową klasyczno-kwantową moc obliczeniową;
- ramy kwalifikacyjne i kompetencje kluczowe z obszaru technologii kwantowych na poziomie studiów wyższych, studiów doktoranckich i kursów podyplomowych;
- aktywną współpracę z przedstawicielami różnych branż i sektorów gospodarczych, w tym innowacyjnych polskich podmiotów i start-upów;
- zagwarantowanie infrastruktury dostępu do komputerów kwantowych i obliczeń w oparciu o różne technologie kwantowe.

Polski Węzeł Obliczeń Kwantowych w roku 2022 podjął szereg działań wpisujących się w powyższe strategiczne założenia, w szczególności w pierwszej kolejności zabezpieczył i zapewnił użytkownikom dostęp do komputerów kwantowych. Bardzo ważnym zadaniem było również nawiązywanie bliższej oraz bezpośredniej współpracy z użytkownikami. Kluczowa była również wymiana doświadczeń z wieloma krajowymi ośrodkami naukowo-badawczymi. Tym samym, w pierwszej kolejności wsparte zostały działania wcześniej już podejmowane przez wiele polskich zespołów eksperckich w zakresie modelowania, charakterystyki i budowy algorytmów kwantowych w oparciu o eksperymenty wykorzystujące najbardziej zaawansowane programowalne komputery kwantowe IBM Q.

Dostępny komputerom kwantowym jeszcze brakuje możliwości rozwiązywania wielu trudnych i złożonych problemów w praktycznych zastosowaniach. Warto podkreślić, iż nie jest to powód do tego, aby nie wspierać różnych podejmowanych działań, które weryfikują wydajność oraz stopień zaawansowania algorytmów kwantowych zarówno od strony teoretycznej [8], jak i aplikacyjnej [9].

Szukając potencjalnych pierwszych zastosowań, w okresie od lutego do listopada 2022 roku w ramach Polskiego Węzła Obliczeń Kwantowych podjęto działania niezbędne do zidentyfikowania polskich zespołów eksperckich zainteresowanych dostępem i wsparciem w rozwoju kwantowych obliczeń z wykorzystaniem rzeczywistej infrastruktury komputerów kwantowych. Na bazie tych aktywności zidentyfikowanych zostało kilka obszarów, które wraz z rozwojem komputerów kwantowych mogą znaleźć praktyczne zastosowania w różnych dziedzinach nauki i gospodarki, w tym:

Mitygacja i korekcja błędów w komputerach kwantowych

Fizyka, Centrum Fizyki Teoretycznej PAN

Algorytmy kwantowe w optymalizacji kombinatorycznej i ich zastosowania w problemach szeregowania zadań

Informatyka, Politechnika Poznańska

Algorytmy kwantowego uczenia maszynowego

Fizyka, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza

Metody badania wydajności komputerów kwantowych

Informatyka, Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej PAN

Algorytmy kwantowe w pozytonowej tomografii emisyjnej

Fizyka Jądrowa, Narodowe Centrum Badań Jądrowych

Badania podstawowe, badania wydajności komputerów kwantowych

Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego UW

Edukacja, algorytmy związane z cyberbezpieczeństwem

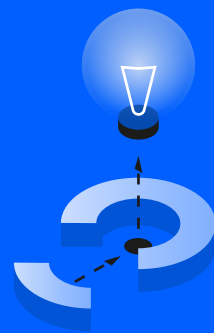
Wojskowa Akademia Techniczna



Ponadto, zidentyfikowano jednostki naukowe funkcjonujące jako Centra Komputerów Dużej Mocy zainteresowane przystąpieniem oraz wsparciem użytkowników w ramach Polskiego Węzła Obliczeń Kwantowych:

- **AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA**
Cyfronet
- **POLITECHNIKA WROCŁAWSKA**
WCSS
- **POLITECHNIKA GDAŃSKA**
CI TASK
- **UNIWERSYTET WARSZAWSKI**
ICM

W ramach dodatkowych aktywności promujących technologie kwantowe, w tym potencjał obliczeń i komputerów kwantowych, zidentyfikowano również inne jednostki naukowo-badawcze oraz przedsiębiorstwa zainteresowane bliższą współpracą z Polskim Węzłem Obliczeń Kwantowych w kolejnym roku jego działalności w następujących dziedzinach:



LOTNICTWO I TRANSPORT:

Algorytmy kwantowe
w problemach zarządzania
logistyką, transportem
i przestrzenią powietrzną

BANKOWOŚĆ I FINANSE:

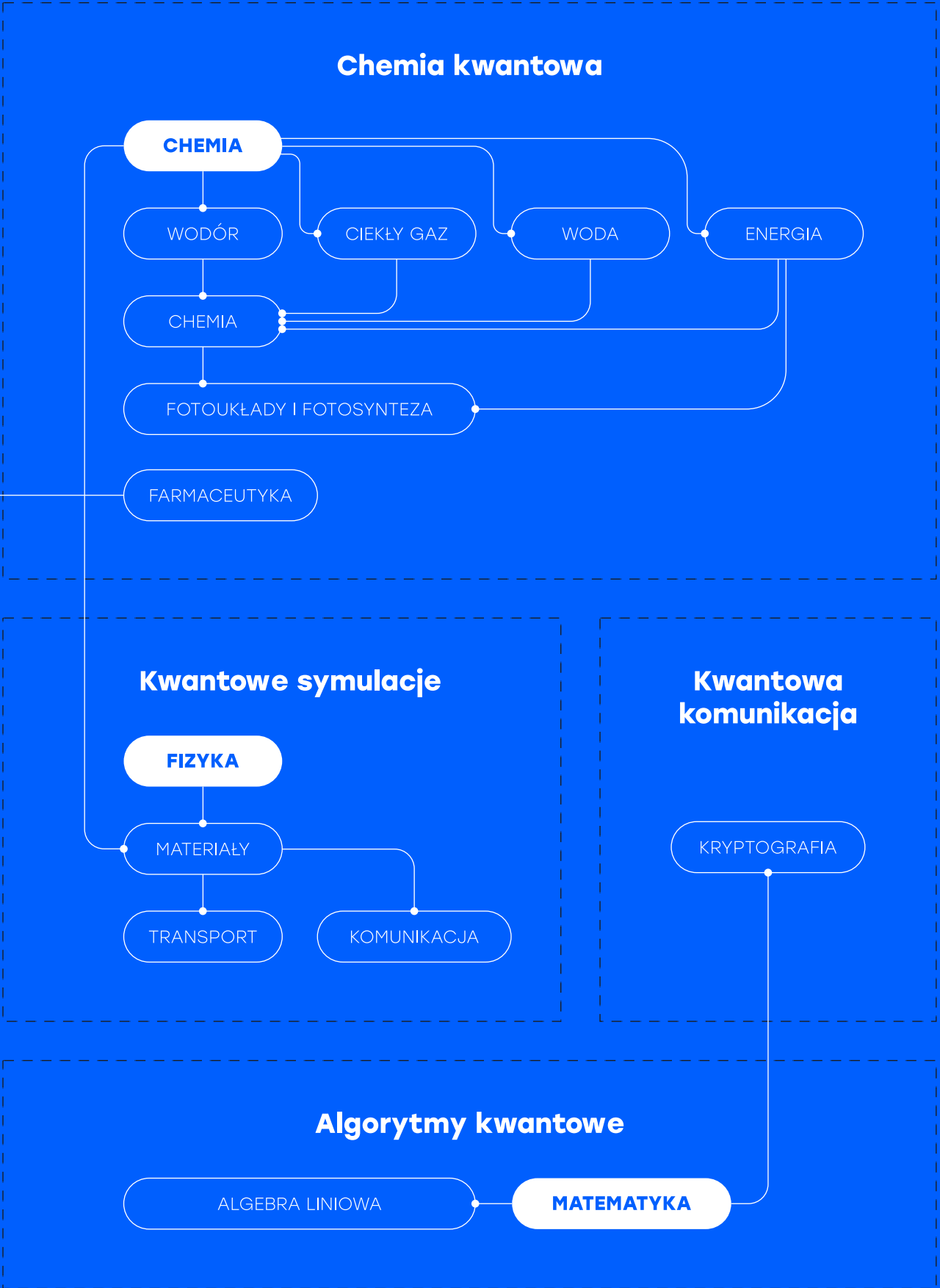
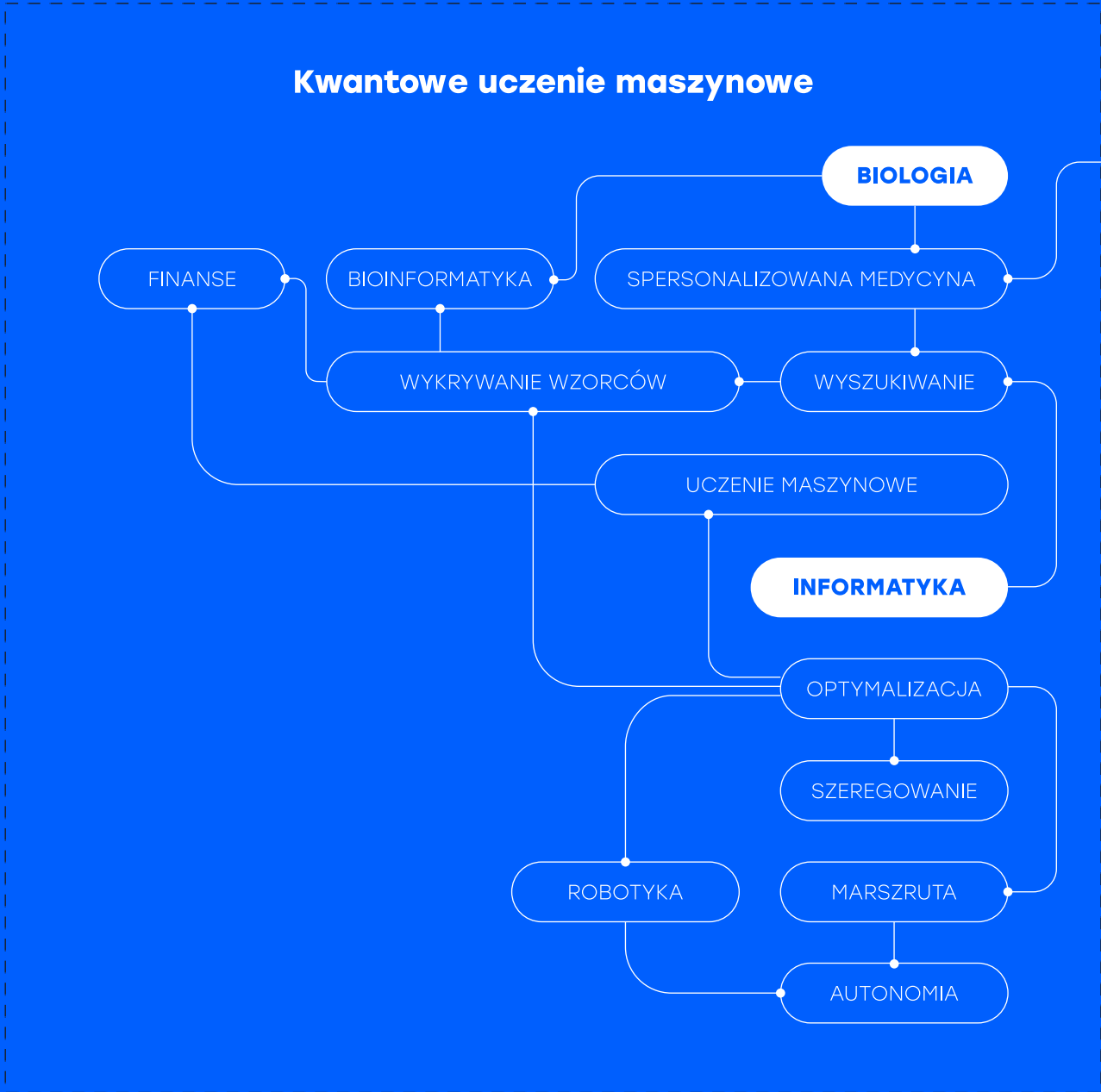
Kwantowa wycena opcji,
poprawa modeli finansowych
i wykorzystanie kwantowej
matematyki finansowej

OBRONNOŚĆ I SEKTOR KOSMICZNY:

Weryfikacja dokładności
i jakości algorytmów
kwantowych



Zastosowanie obliczeń kwantowych



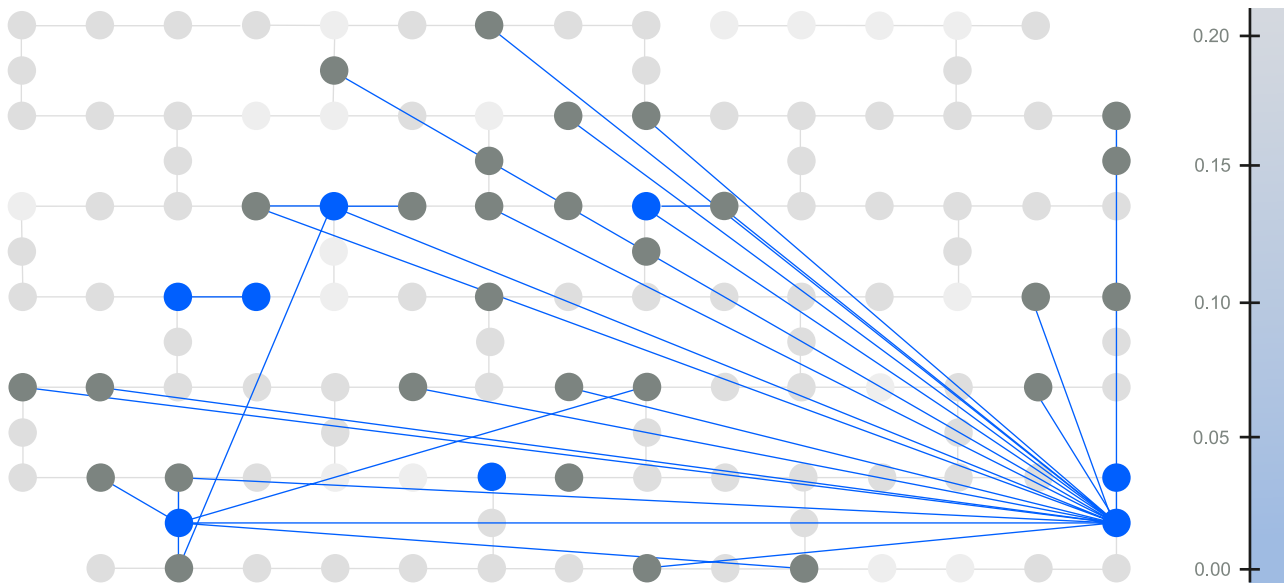
Ograniczanie i korekcja błędów w komputerach kwantowych NISQ

Tak jak już zaznaczyliśmy w poprzednich częściach raportu, obliczenia wykonywane na dostępnych komputerach kwantowych IBM Quantum w trwającej obecnie erze NISQ są podatne na błędy. Dzieje się tak, ponieważ obecna technologia potrzebna do korekcji błędów kwantowych nie została jeszcze opracowana. Błędy w komputerach kwantowych pochodzą z kilku źródeł. Niektóre są spowodowane niedoskonałościami w implementacji bramek kwantowych, które są podstawowymi elementami składowymi układów kwantowych (tak jak w przypadku bramek logicznych w klasycznych układach cyfrowych). Kolejnym źródłem błędów jest pomiar końcowego stanu kwantowego urządzenia. Pomiary są integralną częścią przetwarzania informacji kwantowej, ponieważ każdy algorytm kwantowy kończy się pomiarem. Pomiary są także ważnym etapem pośrednim procedur korekcji błędów kwantowych.

Do tej pory większość analiz nie uwzględniała możliwości występowania skorelowanych błędów odczytu (określanych niekiedy jako cross-talk). Wykrywanie i charakteryzacja korelacji błędów pomiarowych jest trudnym zadaniem, ponieważ złożoność generycznych modeli szumu opisujących korelacje skaluje się wykładniczo z liczbą kubitów. Oznacza to, że charakterystyka skorelowanych błędów pomiarowych w obecnie dostępnych urządzeniach, takich jak np. dostępny w ramach Polskiego Węzła Obliczeń Kwantowych 127 kubitowy komputer IBM Washington, nie może być wykonana przy użyciu standardowych metod kwantowej tomografii detektorów.



Wstępne badania niektórych komputerów kwantowych NISQ wykazały, że wielkość błędów odczytu pojedynczego kubitów jest rzędu dwóch bramek kubitowych. Oznacza to, że błędy odczytu są dość znaczne i nie można ich lekceważyć. Ponadto charakterystyka błędów pomiaru może być wykorzystana w metodach mitygacji (ograniczania) błędów do poprawy jakości wyników.



Celem badań Centrum Fizyki Teoretycznej PAN było opracowanie i przetestowanie efektywnej metody charakteryzacji skorelowanych błędów odczytu. Metoda ta jest rozszerzeniem standardowej tomografii detektorów kwantowych, która pozwala uzyskiwać dane w zrównoleglony sposób. Wyniki eksperymentalne uzyskane przez wykonanie odpowiedniego zbioru obwodów kwantowych pozwalają na rekonstrukcję zredukowanych (tj. działających tylko na podzbiór kubitów) operatorów pomiaru, które są wykonywane na urządzeniu kwantowym. W ten sposób można zweryfikować wiele aspektów błędów pomiarowych. Po pierwsze, struktura zredukowanych operatorów pomiarowych pozwala ilościowo scharakteryzować siłę korelacji w błędach pomiarowych między kubitami w urządzeniu. Co ciekawe, cross-talk okazuje się występować nawet między kubitami, które są fizycznie daleko od siebie na urządzeniu. Po drugie, opracowane techniki umożliwiły charakteryzację błędów koherentnych. Wstępne wyniki pokazują, że występu-

ją one w zredukowanych operatorach pomiarowych opisujących pomiar na odpowiednio dużej liczbie kubitów. Ponadto, wiele aktualnych badań koncentruje się na tzw. stochastycznych modelach szumu błędów pomiarowych, w których relacja pomiędzy idealnymi operatorami pomiaru a operatorami realizowanymi na urządzeniu jest określona przez macierz stochastyczną. Opracowana przez Centrum Fizyki Teoretycznej PAN metoda pozwala zrekonstruować taką macierz dla klasy modeli lokalnych błędów pomiaru, w której korelacje w błędach pomiarowych ograniczone są do grup kubitów, tzw. klastrów. W ramach eksperymentów wykazano, że techniki mitygacji błędów kwantowych korzystające z charakteryzacji błędów pomiarowych dokonanych zaproponowaną metodą mogą przynieść znaczną poprawę szacowania energii Hamiltonianów wielociałowych [10]. Jest to ważne zagadnienie w algorytmach kwantowych istotnych dla zastosowań praktycznych, takich jak optymalizacja kombinatoryczna lub chemia kwantowa.



Optymalizacja kombinatoryczna

Jednym z głównych obszarów zastosowań obliczeń kwantowych są wspomniane już w przykładzie sprzedawcy trudne obliczeniowo problemy optymalizacji kombinatorycznej. Do problemów kombinatorycznych należy wiele znanych w informatyce problemów, w tym problem komiwojażera, problem plecakowy, problem kolorowania mapy czy różne odmiany szeregowania zadań w procesach produkcyjnych i systemach komputerowych. Wiele z opracowanych klasycznych algorytmów rozwiązujących problemy kombinatoryczne znajduje zastosowania do rozwiązywania odpowiednio zamodelowanych problemów oraz procesów w nauce i gospodarce. Znalazienie rozwiązania optymalnego dla wspomnianych problemów kombinatorycznych jest krótko mówiąc obliczeniowo trudne, a dla dużych instancji tych problemów wręcz niemożliwe w skończonym czasie z wykorzystaniem klasycznych komputerów. W ogólności problemy kombinatoryczne dzieli się na dwie klasy: problemy decyzyjne – rozwiązaniem jest poszukiwanie odpowiedzi „tak” lub „nie” dla wybranej instancji problemu oraz problemy przeszukiwania, w których poszukuje się optymalnego rozwiązania oceniając je zgodnie z przyjętą funkcją celu.



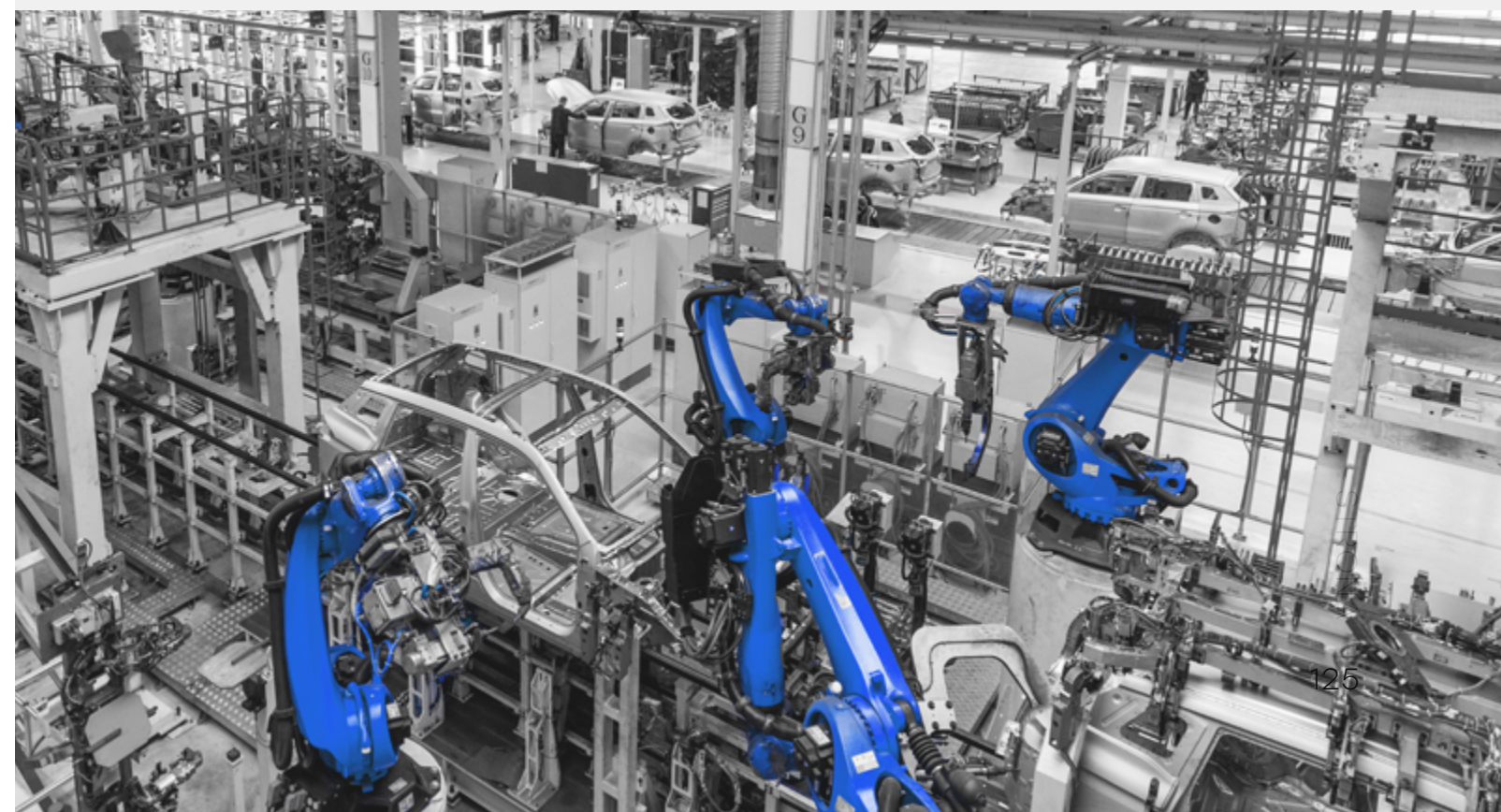
Praktycznymi problemami, które mają kluczowe znaczenie dla przedsiębiorstw wytwarzających złożone produkty przy użyciu zarówno wielofunkcyjnych, jak i wyspecjalizowanych maszyn i taśm montażowych są problemy szeregowania. Z problemami szeregowania możemy się zetknąć przy okazji praktycznie każdego procesu produkcyjnego składającego się z co najmniej kilku kroków. Przykładami zastosowań jest produkcja elektroniki precyzyjnej, produkcja części i podzespołów lub procesy technologiczne obróbki materiałów.

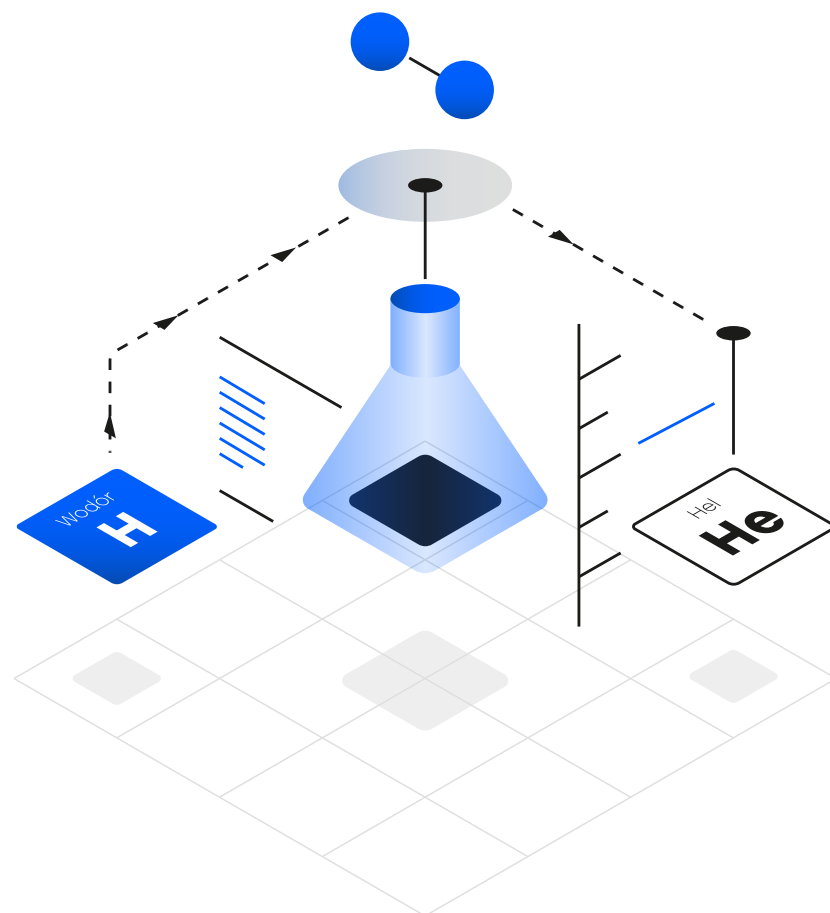
W praktyce, w wielu problemach optymalizacji kombinatorycznej poszukuje się rozwiązań o najlepszej wartości funkcji celu spośród wszystkich dopuszczalnych rozwiązań. Liczba dopuszczalnych rozwiązań zależy bardzo silnie od instancji danego problemu. Niestety w praktyce są to najczęściej problemy, gdzie skala wymaganych klasycznych obliczeń rośnie znacznie szybciej niż wielkość instancji problemu. Okazuje się jednak, że klasyczne problemy optymalizacji kombinatorycznej można przekształcić do postaci, w których funkcje celu odpowiadają poziomom energii Hamiltonianów, czyli operatorów znanych nam dobrze z mechaniki kwantowej [11][12][13].

Wiele ze wspomnianych problemów optymalizacji kombinatorycznej może w naturalny i klasyczny sposób być modelowane w oparciu o teorię grafów. Teoria grafów z pozoru może wydawać się czysto teoretycznym zagadnieniem interesującym jedynie matematyków oraz informatyków teoretycznych, jednak również i tutaj możemy znaleźć szereg potencjalnych zastosowań obliczeń kwantowych. Przykładowo, problem znalezienia maksymalnej kliki w grafie, czyli takiego podgrafu, w którym wszystkie wierzchołki są ze sobą

wzajemnie połączone, występuje często w ekonomii, widzeniu komputerowym, chemii czy biologii. Zarówno problem znalezienia maksymalnej kliki w grafie jak i problem znalezienia maksymalnego cięcia (czyli takiego podziału grafu na dwa podgrafy, aby po obcięciu krawędzi liczba krawędzi łączących różne podgrafy była jak największa) występuje bardzo często podczas projektowania i produkcji układów scalonych. Rozwiązanie tego typu trudnych problemów może zredukować koszty ich wytworzenia oraz poprawić ich wydajność.

W Poznańskim Centrum Superkomputerowo-Sieciowym ICHB PAN w ramach eksperymentów wydajnościowych komputerów kwantowych IBM Q badano między innymi zależności między energią a maksymalnym czasem wykonania wszystkich zadań w testowych instancjach wybranych problemów szeregowania. Ponadto, w ramach współpracy z zespołem Politechniki Poznańskiej opracowano i eksperymentalnie zweryfikowano algorytmy kwantowe w problemach optymalizacji kombinatorycznej oraz klasycznych problemach szeregowania zadań.





Chemia kwantowa

Za sprawą zaawansowanych metod obliczeniowych implementowanych na superkomputerach, możliwe stało się badanie złożonych układów chemicznych poza laboratorium, a więc w sposób najczęściej tańszy i szybszy. Dokonania i postępy w tej dziedzinie umożliwiły wykonywanie symulacji, pozwalających na przewidywanie jak prawdziwe cząsteczki chemiczne zachowują się w określonych warunkach. Chemia obliczeniowa jest powszechnie stosowana w procesie projektowania nowych leków czy materiałów. Do przykładowych właściwości, które można uzyskać na podstawie klasycznego modelowania numerycznego, należą struktura cząsteczki, energie oddziaływań międzycząsteczkowych i energia całkowita cząsteczki. Symulowanie cząsteczek wykonywane jest

na podstawie zasad mechaniki kwantowej. Dokładne wyniki można jednak uzyskać tylko dla najprostszych układów, gdyż modelowanie większych cząsteczek wymagałoby ogromnych, niemożliwych do uzyskania mocy obliczeniowych, o których wspominał prawie cztery dekady temu Richard Feynman [14]. W związku z tym nieuniknione jest stosowanie wielu uproszczeń prowadzących do klasycznych obliczeń łatwiejszych do wykonania, lecz nieodzownie obciążonych pewnymi niedokładnościami. W przypadkach wysoce złożonych układów poziom tych przybliżeń uniemożliwia praktyczne wykorzystanie uzyskanych wyników z klasycznych symulacji. Odpowiedzią na problem symulowania złożonych cząsteczek chemicznych mogą być komputery kwantowe. Algorytmy o największym

potencjałe, podobnie jak w przypadku innych dziedzin, są jednak wciąż poza zasięgiem konstruowanych obecnie komputerów kwantowych w erze NISQ. Dlatego tak ważne jest obecnie badanie i udoskonalanie metod hybrydowych łączących potencjał klasycznych i kwantowych komputerów. Takie podejścia mogą pozwolić w praktyce na uzyskanie kwantowej przewagi wcześniej niż zbudowanie pełnoskalowego komputera kwantowego odpornego na błędy. Do czołowych przedstawicieli takiego podejścia należy szeroko analizowany przez badaczy hybrydowy algorytm VQE (ang. Variational Quantum Eigensolver).

W ramach współpracy z Uniwersytetem im. Adama Mickiewicza przeprowadzono szereg eksperymentów z wykorzystaniem komputerów kwantowych IBM Q symulując właściwości fizyczne i chemiczne cząsteczek takich jak H_2 , LiH oraz atomów wodoru i helu. Obliczenia miały na celu zbadanie możliwości praktycznego wykorzystania zarówno samego algorytmu VQE jak i dostępnych komputerów kwantowych IBM Q. Sporo uwagi poświęcono kluczowej trudności, z jaką wiąże się stosowanie VQE do obliczania własności badanego układu, czyli tzw. problemowi pomiarów (ang. measurement problem). Wiąże się on z niekorzystnym skalowaniem liczby koniecznych do wykonania pomiarów względem zadanej dokładności końcowego wyniku. Zastosowane w eksperymentach techniki pozwoliły na znaczne ograniczenie wpływu tego problemu i poprawienie skalowania obliczeń kwantowych.

PROF. JACEK KOMASA, WYDZIAŁ CHEMII UAM

„Prowadzone obecnie prace badawcze w dziedzinie chemii kwantowej koncentrują się na znalezieniu algorytmów pozwalających skutecznie wykorzystać możliwości komputera kwantowego do odtworzenia wyników dobrze znanych z obliczeń klasycznych. Obserwując obecny trend w usuwaniu ograniczeń technicznych w komputerach kwantowych można przypuszczać, iż w niedługiej perspektywie czasowej obliczenia wykonywane przy pomocy takich komputerów przewyższą swoją efektywnością obliczenia klasyczne. Obecna sytuacja przypomina tę z lat 80, kiedy to dostępna moc obliczeniowa ówczesnych komputerów istotnie ograniczała możliwości predykcyjne teorii kwantowej.





Sztuczna **inteligencja** i **uczenie** maszynowe

Uczenie maszynowe to gałąź informatyki i sztucznej inteligencji, obejmująca algorytmy pozwalające maszynom samodzielnie uczyć się wykonywania różnych zadań na podstawie danych. Sztandarowymi przykładami użycia uczenia maszynowego są np. sterowanie autonomicznymi samochodami, programowanie samodzielnych robotów, rozpoznawanie mowy czy klasyfikacja i generacja dźwięku oraz obrazu. Wiele klasycznych algorytmów uczenia maszynowego, takich jak np. głębokie sieci neuronowe, wykorzystują różnego rodzaju obliczenia oparte o podstawowe operacje matematyczne. Dla prostszych zastosowań liczba neuronów w modelu nie jest duża, jednak wraz ze wzrostem

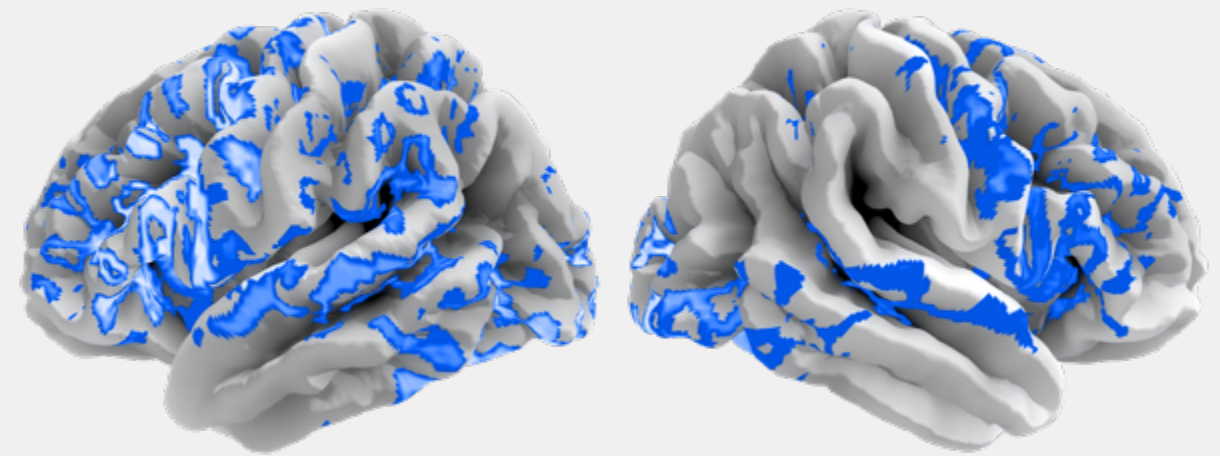
skomplikowania problemu liczba jednostek obliczeniowych wzrasta do ogromnych rozmiarów, a trenowanie ich wymaga coraz więcej czasu. Bardzo szybko rosną też rozmiary zbiorów danych treningowych, będących wejściem algorytmu uczącego. W związku z tym, trenowanie dużych modeli staje się coraz trudniejsze, nawet wykorzystując i masywnie zrównoleglając klasyczne obliczenia na superkomputerach oraz korzystając z zaawansowanych technologii HPC, w tym wydajnych akceleratorów graficznych GPU.

Komputery kwantowe odpowiadają na ten problem, umożliwiając transformację problemu do wielowymiarowej

przestrzeni Hilberta poprzez zastosowanie kwantowej reprezentacji danych. Umożliwia to oszczędność jednostek obliczeniowych i daje większe możliwości w odnajdowaniu korelacji w zbiorach danych, przez co uczenie może przebiegać szybciej, a wyniki działania algorytmu mogą być dokładniejsze. Jako jeden z głównych eksperymentów dla przetestowania możliwości wykorzystania programowalnych komputerów kwantowych IBM Q wykorzystano i przetestowano kwantową wersję algorytmu maszyny wektorów wspierających QSVM (ang. Quantum-enhanced Support Vector Machine). Algorytm polega na znalezieniu korelacji między zmiennymi w zbiorze uczącym i znalezienia jego transformacji umożliwiających poprawną klasyfikację. Dzięki możliwości zastosowania kwantowej przestrzeni rozwiązań, wykorzystującej splątanie między kubitami, możliwe było znalezienie korelacji w wielowymiarowej przestrzeni Hilberta.



Pierwsze eksperymenty na komputerach kwantowych IBM Q przeprowadzono na referencyjnym zbiorze obrazów MNIST, składającym się z obrazów ręcznie pisanych cyfr o rozmiarze 28x28 pikseli. Algorytm QSVM nauczył się poprawnie wykrywać konkretne cyfry na podstawie uśrednionej jasności pikseli z kwadratowych obszarów na obrazie.



Uczenie Maszynowe

Innym fundamentalnym zastosowaniem dającym przewagę w uruchamianiu kwantowych algorytmów uczenia maszynowego jest ich zdolność do uczenia się pojęć o naturze kwantowej, co jest w praktyce nieosiągalne dla klasycznych maszyn. Z wykorzystaniem dostępu do komputerów kwantowych przez zespół z Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza przeprowadzone zostały eksperymenty z generatywnymi modelami stanów kwantowych QGAN (ang. Quantum Generative Adversarial Network) oraz QCGN (ang. Quantum counterpart of Generative Adversarial Network).

Generatywne uczenie przeciwstawne jest jednym z najbardziej ekscytujących przełomów w uczeniu maszynowym. Znajduje ono zastosowanie w różnych

wymagających zadaniach np. takich jak generowanie obrazów i filmów. Niedawno kwantowa wersja takiego uczenia została teoretycznie zaproponowana i wskazano iż ma potencjał wykazania wykładniczej przewagi nad swoim klasycznym odpowiednikiem. W badaniach zaproponowano nowe podejście do kwantowego uczenia przeciwstawnego wykorzystujące osiągnięcia teoretyczne w zakresie rozróżnialności stanów kwantowych.

Przeprowadzono szereg eksperymentów dzięki dostępowi i użyciu rzeczywistych zasumionych procesorów kwantowych IBM Q. Udało się zademonstrować w ten sposób poprawność działania nowego podejścia w przypadku małej liczby kubitów. Praktyczne zasto-

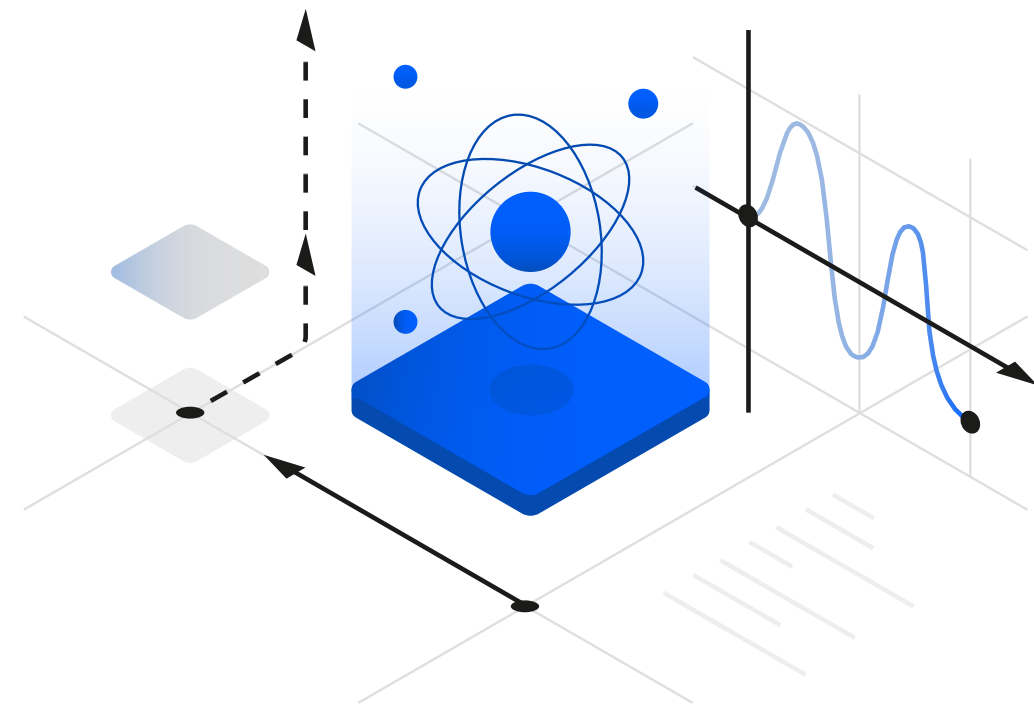
sowanie takiego podejścia wymaga jednak więcej prac badawczych związanych z użyciem mechanizmów ograniczania szumów.

Badania niehermitowskiej mechaniki kwantowej są obiecującym obszarem nauki z zakresu mechaniki kwantowej opisującej układy otwarte, tj. takie, gdzie pojawiają się szumy. W przypadku próby kompensacji strat w układzie może dojść do sytuacji, gdzie początkowo różne dozwolone kwantowo poziomy energetyczne staną się nierozróżnialne. Takie konfiguracje związane są z tzw. punktami wyjątkowymi. Zakłada się, że badania takich punktów pozwolą na opracowanie metod kwantowo ulepszonej detekcji procesów fizycznych oraz metod zabezpieczania przed szumem procesów kwantowych. Ma to kluczowe znaczenie dla opracowania nowych sensorów kwantowych oraz dla opracowania nowych metod walki z szumem w procesorach kwantowych. W przeprowadzonych badaniach zespół z Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza opracował metodę wykrywania punktów wyjątkowych w układzie procesorów kwantowych IBM Q.



Zidentyfikowane zostały parametry, dla których obserwacja takich punktów jest możliwa. Opracowanie mechanizmu wykorzystującego punkty wyjątkowe w praktycznych zastosowaniach wymaga dalszych prac badawczych, w tym dostępu do nowych generacji komputerów kwantowych.

Fizyka wysokich energii i badania jądrowe



Spodziewany wzrost liczby zachorowań, połączony z kosztami ekonomicznych terapii nowotworowych powoduje, że problem ten staje się jednym z podstawowych wyzwań z którymi współczesne społeczeństwa muszą się zmierzyć. W tym kontekście niezwykle istotny jest dalszy rozwój nowych medycznych technik diagnostycznych, które pozwolą na wykrycie choroby na wczesnym etapie, co jest jednym z kluczowych czynników skutecznej terapii onkologicznej. Obecnie w diagnostyce szeroko wykorzystuje się nieinwazyjne techniki obrazowania medycznego takie jak Tomografia Komputerowa (ang. Computed Tomography CT), Rezonans Magnetyczny (ang. Magnetic Resonance

Imaging MRI) oraz Pozytonowa Tomografia Emisyjna (ang. Positron Emission Tomography PET), które pozwalają na stworzenie obrazów organów lub całego ciała pacjenta. W ostatnich latach wraz z badaniami nad nową generacją skanerów PET, w szczególności obejmujących całe ciało pacjenta (ang. Total-body PET), pojawiły się propozycje opracowania technik, które dostarczyłyby dodatkowych informacji o zmianach chorobowych, rozszerzając klasyczną informację dostarczaną przez obraz pacjenta. Narodowe Centrum Badań Jądrowych (NCBJ) w ramach prac badawczych przeprowadziło testy z wykorzystaniem symulatorów i rzeczywistych komputerów kwantowych.

PROF. WOJCIECH WIŚLICKI, NCBJ

W NCBJ przewiduje się rozwój kilku pól zastosowań technologii obliczeń kwantowych, od analiz danych eksperymentalnych, poprzez zaawansowane algorytmy rekonstrukcji obrazów, aż po obliczenia znajdujące zastosowania w obliczeniach reaktorowych i środowiskowych.

Dla każdego z nich przeprowadzono testy: n-kubitowego generatora liczb losowych (w celu sprawdzenia odchylenia maszyny rzeczywistej od modelu teoretycznego), algorytmu Deutsch-Jozsy, algorytmu Bernsteina-Vaziraniego, algorytmu Simona, kwantowej transformacji Fouriera, algorytmu Shora, algorytmu Grovera i kwantowego przetwarzania obrazu. Wykonano również testy komunikacji klastra superkomputera oraz symulacje splątania kwantowego dla układu dwóch fotonów z rozpadu parapositronium podczas rozproszenia Comptonowskiego z wykorzystaniem obecnych w bibliotece narzędziowej Qiskit operatorów Krausa.

NCBJ planuje dalsze prace nad symulacjami i analizami danych eksperymentalnych z detektora J-PET, działającego w oparciu o splątane kwantowo pary i trójki fotonów z anihilacji elektronowo-pozytonowej. Jest to dojrzała tematyka, uprawiana w NCBJ od dekady, w której spodziewane jest znaczne przyspieszenie rekonstrukcji obrazów przy użyciu algorytmów kwantowych. Drugim jest przewidywane zastosowanie algorytmów kwantowych do rekonstrukcji kaskad elektromagnetycznych w kalorymetrze elektromagnetycznym, służącym do detekcji cząstek o wysokich energiach w eksperymencie LHCb w CERNie. Jest to również zaawansowana tematyka, związana z silnym zaangażowaniem NCBJ w te konkretne badania doświadczalne. Trzecim obszarem są badania strukturalne na Europejskim Laserze na Swobodnych Elektronach XFEL, gdzie NCBJ wnosi istotny wkład w obszarze inżynierii IT i metodach numerycznych. Rekonstrukcje obrazów cząsteczek mogą być skutecznie przenoszone na zasoby kwantowe, a efektywne przyspieszenie ich wykonywania zależy od stopnia dekomponowalności problemu. Czwartym obszarem jest obliczeniowa dynamika płynów (CFD), ze szczegółowymi polami zastosowań w obliczeniach reaktorowych i obliczeniach środowiskowych. Zagadnieniami tymi zajmuje się specjalizowany zakład w Departamencie Badań Układów Złożonych w NCBJ.



Sektor finansowy

Ważnym polem zastosowania różnego typu optymalizacji i obliczeń wielkoskalowych jest sektor finansowy. Optymalizacja portfela inwestycyjnego pod względem maksymalizacji zysku z inwestycji czy minimalizacji ryzyka jest istotną częścią operacji wielu instytucji na całym świecie, w tym w szczególności instytucji finansowych, banków, domów maklerskich itd. Dotychczas optymalizacja uwzględniała złożone kryteria i zmienne wejściowe była zadaniem bardzo trudnym dla klasycznych komputerów, dlatego często do rozwiązania tego problemu wykorzystuje się heurystyki, lub algorytmy uczenia maszynowego oparte na danych historycznych. Dzięki możliwości równoległego przeszukiwania przestrzeni rozwiązań przez komputer kwantowy możliwe jest znajdowanie optymalnych

strategii inwestycji i prowadzenie efektywnych symulacji zachowań rynków różnego rodzaju aktywów. Wielokryterialna optymalizacja zarówno w zakresie ilości zmiennych decyzyjnych, jak i różnorodności funkcji celu jest możliwa dzięki zagregowaniu wszystkich parametrów do funkcji energii, optymalizowanej przez algorytm kwantowy. Przykładem konkretnych zastosowań komputerów kwantowych może być kwantowy model wyceny opcji, w którym wypłata zależy od średniej ceny aktywa bazowego w pewnym w pewnym okresie czasowym w przeciwieństwie do standardowych opcji (amerykańskich i europejskich), w których wypłata zależy od ceny aktywa bazowego w określonym momencie (zapadalności) [15].



W ramach współpracy z instytucjami finansowymi zbadano możliwości wykonania eksperymentów z wykorzystaniem referencyjnych i testowych danych finansowych. Zostały wykonane wstępne testy możliwości użycia komputerów kwantowych, do prostego zadania optymalizacji portfela finansowego. Rozwój infrastruktury kwantowej wkrótce może dać możliwość rozszerzenia tych przykładów o dodatkowe parametry wejściowe i kryteria optymalizacyjne, uwzględniając nowe ryzyka związane ze zmianami klimatycznymi ocenianych inwestycji, co umożliwi wykorzystanie ich w nowych zastosowaniach.



Inne zastosowania



Kolejnym ważnym obszarem potencjalnych zastosowań komputerów kwantowych IBM Q, w tym zastosowania wspomnianych kwantowych algorytmów uczenia maszynowego, były eksperymenty z analizą danych medycznych przeprowadzone przez Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe ICHB PAN. Zgromadzone referencyjne dane bioobrazowe pozyskiwane są najczęściej przy pomocy skanera Rezonansu Magnetycznego podczas gdy osoby badane wykonują zadania mentalne dotyczące, np. funkcji językowych mózgu czy zdolności motorycznych. Celem pozyskiwania tego typu danych jest lepsze zrozumienie skomplikowanych procesów zachodzących w korze mózgowej podczas wykonywania pozornie łat-

wych, wykonywanych „automatycznie”, codziennych czynności. Eksperyment z analizą wyników z Funkcjonalnego Rezonansu Magnetycznego (fMRI) przy pomocy komputera kwantowego może wykazać, że modele kwantowe są lepszą reprezentacją złożonych procesów zachodzących w mózgu niż klasyczne modele statystyczne. Będzie to miało bezpośredni wpływ na dokładność modeli funkcji mózgowych i może przyczynić się, np. do lepszej diagnostyki zaburzeń działania centralnego układu nerwowego w przypadku schorzeń takich jak afazja i apraksja (zaburzenia mowy i funkcji motorycznych, występujące najczęściej w następstwie udaru), a także choroby Alzheimera, choroby Parkinsona, depresji czy schizofrenii.

Dodatkowo, Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej PAN opracował narzędzie o nazwie PyQBench służące do testowania bramkowych komputerów kwantowych, w tym udostępnionych zasobów IBM Q, na podstawie ich zdolności do rozróżniania pomiędzy dwoma pomiarami von Neumanna w różnych bazach. Opracowane narzędzie pozwala na uruchomienie benchmarków wykorzystujących rozróżnianie między pomiarem w bazie obliczeniowej a pomiarem w bazie definiowanej przez sparametryzowaną rodzinę Fouriera. Użytkownik może wybierać, czy eksperyment zostanie przeprowadzony przy pomocy postselekcji czy alternatywnej metody „sumy prostej” oraz kontrolować różne aspekty przeprowadzanego eksperymentu, takie jak liczba próbek używanych w samplowaniu, indeksy kubitów, zakresy kąta dla sparametryzowanej rodziny Fouriera. Jeżeli użytkownik chce użyć pomiaru w innej bazie, może wykorzystać PyQBench jako bibliotekę programistyczną. Ten tryb użycia wymaga większego nakładu pracy, ale pozwala na rozszerzenie parametrów eksperymentu. Warto wspomnieć, że w przypadku zasobów komputerów kwantowych udostępniających informacje o kalibracji kubitów, PyQBench wspiera mitygację błędów metodą matrix-free measurement mitigation. W ramach zagwarantowanego dostępu do zasobów IBM Q wykonano szereg eksperymentów na podstawie benchmarku rozróżniania pomiarów von Neumanna.



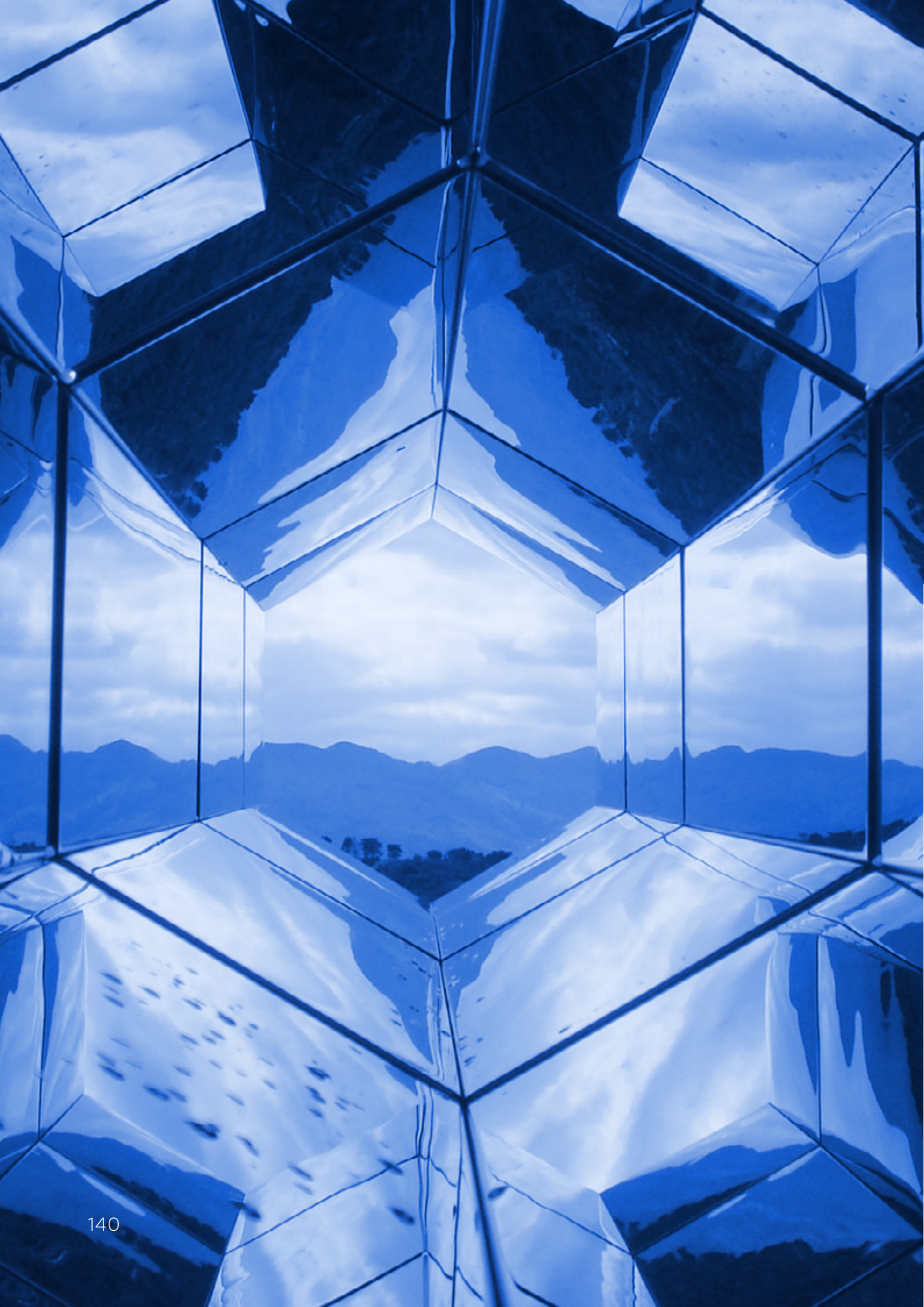
Eksperyment z analizą wyników z Funkcjonalnego Rezonansu Magnetycznego (fMRI) przy pomocy komputera kwantowego może wykazać, że modele kwantowe są lepszą reprezentacją złożonych procesów zachodzących w mózgu niż klasyczne modele statystyczne.



OBSZARY POTENCJALNYCH ZASTOSOWAŃ	MATERIAŁOZNAW- STWO I BIOLOGIA	ZŁOŻONE SYSTEMY I PROBLEMY	ISTNIEJĄCA TECHNOLOGIA I BADANIA
BRANŻE	Energia, żywność i rolnictwo, produkcja, chemia, medycyna.	Finanse, transport i logistyka, branże o złożonych produktach (lotnictwo, motoryzacja itp.).	Branże z intensywnym wykorzystaniem technologii AI, blockchain i HPC, przemysł energetyczny i materiałowy, komunikacja.
PRZYKŁADY UŻYCIA OBLICZEŃ KWANTOWYCH	Odkrywanie i projektowanie nowych cząsteczek i materiałów, wpływające na wiele dziedzin: rozwój zaawansowanych materiałów, projektowanie leków, uprawy i nawozy, zielone katalizatory wodoru, baterie, chemia.	Zarządzanie i optymalizacja skomplikowanych systemów z dużą liczbą zmiennych lub niewiadomych, od wysoce złożonych problemów szeregowania zadań, logistyki i łańcucha dostaw, do modelowania portfeli finansowych i profili ryzyka.	Wpływ na istniejące technologie, w tym AI i blockchain, a także nowe metody obliczeniowe dla nauki.
SPOŁECZNE I ŚRODOWISKOWE WPŁYWY	Zmniejszenie zużycia energii, wydajne materiały i procesy, bardziej wytrzymałe i przyjazne naturze gatunki roślin, przyspieszone odkrywanie reakcji, medycyna spersonalizowana.	Zmniejszenie zużycia energii i emisji w całej globalnej sieci, obiegowe modele biznesowe.	Możliwość łamania obecnej kryptografii, zastosowanie potencjalnie silniejszej kryptografii z większym poziomem prywatności i bezpieczeństwa. Przyspieszenie eksploracji w podstawowych badaniach naukowych.

OBSZARY POTENCJALNYCH ZASTOSOWAŃ	MATERIAŁOZNAW- STWO I BIOLOGIA	ZŁOŻONE SYSTEMY I PROBLEMY	ISTNIEJĄCA TECH- NOLOGIA I BADANIA
ILUSTRACYJNE PRZYKŁADY	Molekuły z odpowiednimi atributami do sekwestracji węgla. Bardziej naturalnie odporne ziarna, aby poprawić produkcję żywności, przy jednoczesnym unikaniu monokultur.	Optymalizacja transportu i logistyki przynosząca środowiskowe i ekonomiczne korzyści. Poprawa oceny kredytowej klientów w czasie rzeczywistym.	Możliwość przyspieszenia procesów trenowania algorytmów uczenia maszynowego. Złamanie RSA i szyfrowanie kryptowalut. Przyczynianie się do naszego fundamentalnego zrozumienia kwantowego.
ZASADNICZE PROBLEMY KWANTOWE	Symulacja kwantowa, optymalizacja kombinatoryczna, algebra liniowa i faktoryzacja liczb pierwszych.		

Tab. 2. Źródło: World Economic Forum, Global Future Council on Quantum Computing [7].



Podsumowanie i wnioski

Wszystkie omówione w raporcie zagadnienia oraz przykładowe zastosowania pokazują, że wejście w erę technologii kwantowych jest nie tylko interesującym kierunkiem badań naukowych, ale wręcz koniecznym krokiem, aby zapewnić bezpieczeństwo w sieci i poradzić sobie z coraz trudniejszy-

mi problemami oraz większymi wolumenami danych przetwarzanych przez klasyczne komputery. Raport jest też próbą odpowiedzi na wiele zadawanych przez użytkowników fundamentalnych pytań związanych z technologiami, komputerami i obliczeniami kwantowymi.

Raport odpowiada na pytania:

- ➔ Czy możemy zastąpić tranzystory i wykorzystać efekty kwantowe do obliczeń i symulacji?
- ➔ Czy komputer kwantowy to tylko nowa, bardziej wydajna generacja superkomputerów?
- ➔ Czy i jakie komputery kwantowe są dostępne dla krajowych użytkowników?
- ➔ Jaki jest paradygmat programowania komputera kwantowego?
- ➔ Jakie są główne bariery technologiczne w istniejących i przyszłych komputerach kwantowych?
- ➔ Co i w jakim stopniu może potencjalnie ograniczyć zakres praktycznych zastosowań komputerów kwantowych?
- ➔ Do rozwiązywania jakich problemów mogą być wykorzystane w pierwszej kolejności komputery kwantowe?
- ➔ Jakie umiejętności są nam potrzebne, aby rozpocząć eksperymenty z komputerami kwantowymi?

PCSS | Poznańskie Centrum
Superkomputerowo-Sieciowe



Referencje

1. A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen. (1935) Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? A Phys. Rev. 47, 777. <https://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.47.777>
2. J. S. Bell. (1964) On the Einstein Podolsky Rosen paradox., Physics Physique Fizika 1, 195. <https://doi.org/10.1103/PhysicsPhysiqueFizika.1.195>
3. Shor, P.W. (1997) Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer. SIAM Journal on Computing, 26, 1484-1509. <https://doi.org/10.1137/S0097539795293172>
4. Chuang, Isaac L.; Gershenfeld, Neil; Kubinec, Mark (1998). "Experimental Implementation of Fast Quantum Searching". Physical Review Letters. 80 (15): 3408-3411. Bibcode:-1998PhRvL..80.3408C. doi:10.1103/PhysRevLett.80.3408. S2CID 13891055
5. IBM Quantum-centric supercomputing: The next wave of computing. <https://research.ibm.com/blog/next-wave-quantum-centric-supercomputing>
6. Cross, Andrew W.; Bishop, Lev S.; Sheldon, Sarah; Nation, Paul D.; Gambetta, Jay M. (2019). "Validating quantum computers using randomized model circuits". Phys. Rev. A. 100 (3): 032328. arXiv:1811.12926
7. World Economic Forum - State of Quantum Computing: Building a Quantum Economy, https://www3.weforum.org/docs/WEF_State_of_Quantum_Computing_2022.pdf
8. Application-Oriented Performance Benchmarks for Quantum Computing. Lubinski, T., Johri, S., Varosy, P., Coleman, J., Zhao, L., Necaie, J., Baldwin, C.H., Mayer, K.H., & Proctor, T.J. (2021). <https://arxiv.org/abs/2110.03137>
9. Quantum Algorithm Zoo, <https://quantumalgorithmzoo.org/>
10. McNulty, D., Maciejewski, F.B., & Oszmaniec, M. (2022). Estimating Quantum Hamiltonians via Joint Measurements of Noisy Non-Commuting Observables. <https://arxiv.org/abs/2206.08912>
11. Kadowaki, T., & Nishimori, H. (1998) Quantum annealing in the transverse Ising model. Physical Review E, 58, 5355-5363. <https://arxiv.org/abs/cond-mat/9804280>
12. Lucas, Andrew. (2014) Ising formulations of many NP problems. <https://arxiv.org/abs/1302.5843>
13. Farhi, Edward et al. (2014) A Quantum Approximate Optimization Algorithm. arXiv: Quantum Physics <https://arxiv.org/abs/1411.4028>
14. Feynman, R.P. Simulating physics with computers. (1982) Int J Theor Phys 21, 467-488 <https://doi.org/10.1007/BF02650179>
15. Pracht, Rafał and Ryterski, Adam and Plewa, Julia and Stefaniak, Marek, FX Asian Option Pricing Using Quantum Computers (2022). <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4137397>
16. Peruzzo, A., McClean, J., Shadbolt, P. et al. (2014) A variational eigenvalue solver on a photonic quantum processor. Nat Commun 5, 4213. <https://doi.org/10.1038/ncomms5213>
17. National Security Agency/Central Security Service, President Biden Signs Memo to Combat Quantum Computing Threat [Press release], 4 May 2022, <https://www.nsa.gov/Press-Room/News-Highlights/Article/Article/3020175/president-bidensigns-memo-to-combat-quantum-computing-threat/>

Przypisy i źródła

Str. 1, 17

Okladka IBM Quantum Dilution Refrigerator, <https://flic.kr/p/23R2fqS>

Str. 6

Nejc Soklič dla Unsplash, <https://unsplash.com/photos/wO42Rmamef8>

Str. 14

Zdjęcia autorstwa (od góry) [Peter Lyons, Royal Society uploader, Jaqueline Godany], licencja CC.

Str. 18

Zdjęcia autorstwa (od góry) [Uniwersytet Kalifornijski w Berkeley, Christian Ursilva, Karen Zhou], licencja CC

Str. 24

Christopher Burns dla Unsplash, <https://unsplash.com/photos/Kj2SaNHG-hg>

Str. 29

Fot. Maciej Rutkowski (Biblioteka zdjęć PCSS)

Str. 35

John Stewart Bell, https://pl.wikipedia.org/wiki/John_Stewart_Bell

Str. 41

Quantum Computer Interior, <https://flic.kr/p/SrvZqe>

Str. 49

Karlis Reimanis dla Unsplash, <https://unsplash.com/photos/Y31Z6Mf7rys>

Str. 54

Fot. Maciej Rutkowski (Biblioteka zdjęć PCSS)

Str. 57

Fot. Maciej Rutkowski (Biblioteka zdjęć PCSS)

Str. 59

Fot. Maciej Rutkowski (Biblioteka zdjęć PCSS)

Str. 62

Derek Thomson, https://unsplash.com/photos/NqJYQ3m_rVA

Str. 64

Dan Cristian Pădureț dla Unsplash, <https://unsplash.com/photos/h3kuhYUCE9A>

Str. 68

Obwód kwadratowy IBM czterech kubitów, <https://flic.kr/p/roqFwu>

Str. 71

Fot. Maciej Rutkowski (Biblioteka zdjęć PCSS)

Str. 74

Naukowiec IBM Quantum dr Maika Takita w Centrum Badawczym Thomasa J Watsona IBM Quantum Lab, <https://flic.kr/p/2kRq6pU>

Str. 79

Fot. Maciej Rutkowski (Biblioteka zdjęć PCSS)

Str. 82

Fot. Maciej Rutkowski (Biblioteka zdjęć PCSS)

Str. 87

IBM Quantum Composer, <https://flic.kr/p/GGdJyp>

Str. 112

H Liu, <https://unsplash.com/photos/bv8xNCs2AvE>

Str. 114

IBM Quantum Osprey Processor, <https://flic.kr/p/2nX9Kpe>

Str. 119

IBM Quantum Lab, <https://flic.kr/p/2kRpFVS>

Str. 125

usertrmk, Linia Do Produkcji Samochodów, https://pl.freepik.com/darmowe-zdjecie/panoramiczna-linia-do-produkcji-samochodow-do-spawania-karoserii-nowoczesna-montownia-samochodow_26149998.htm

Str. 127

Misael Moreno, <https://unsplash.com/photos/fN6K30xtiKE>

Str. 130

engin akyurt, <https://unsplash.com/photos/KUeJcc4YUug>

Str. 135

Nick Chong, https://unsplash.com/photos/N__BnvQ_w18

Str. 137

Cristiano Firmani, <https://unsplash.com/photos/tmTidmplLWw>

Str. 140

drmakete lab, <https://unsplash.com/photos/hsg538WrP0Y>

Str. 142

Fot. Maciej Rutkowski (Biblioteka zdjęć PCSS)

Opracowanie raportu w zespole PCSS

Kierownik projektu
i redakcja:

dr hab. inż. Krzysztof Kurowski

Opisy
merytoryczne:

Artur Binczewski
Cezary Mazurek
Tomasz Pecyna
Tomasz Piontek
Piotr Rydlichowski
Mateusz Słysz
Marek Subocz
Konrad Wojciechowski

Skład i grafiki:

Diana Kruger
Mateusz Barancewicz
Robert Wielgocki

Podziękowania za
współpracę:

Mateusz Bała
Filip Maciejewski
Krzysztof Matysiak
Łukasz Paweł
Arkadiusz Piwoński
Patrycja Tulewicz
Kamil Wereszyński

