

Kriostat komputera IBM System One

Źródło: <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/quantum-decade>

Trudna sztuka okiełznanania kwantów

Gdyby historię komputerów kwantowych porównać do historii lotnictwa, jesteśmy na etapie lotu braci Wright, którym w 1903 r. podczas trwającego 12 sekund lotu udało się pokonać odległość niecałych 37 metrów. Czy nawet wtedy, gdy doczekamy dojrzałości technologii, będzie to „samolot” wyłącznie do zadań specjalnych?

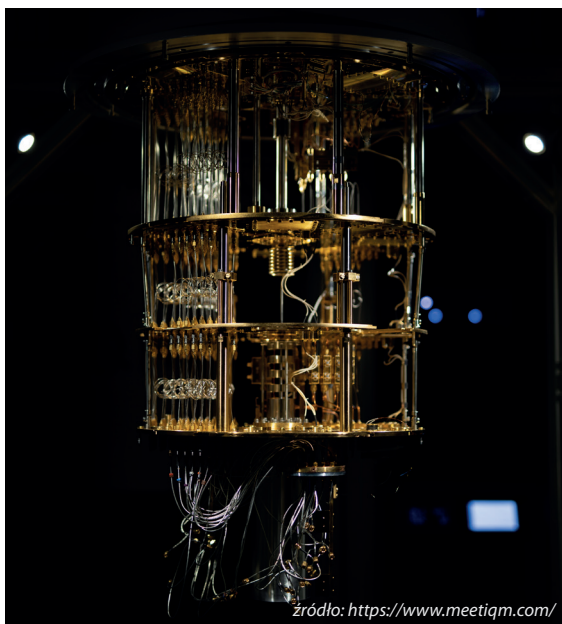


Tomasz Kulisiewicz

sekretarz Sektorowej Rady ds. Kompetencji – Informatyka

Zdjęcia komputerów kwantowych wśród niespecjalistów budzą co najmniej zdziwienie. Od prawie trzech dekad wszyscy się przyzwyczaili, że komputer to albo niewielki i coraz bardziej płaski prostopadłościan na biurku, albo robocza stacja biurowa, ostatnio zwykle schowana pod monitorem. Stosunkowo niewielu zwykłych użytkowników pakietów biurowych miało okazję do obejrzenia dziesiątek metrów bieżących 19-calowych szaf tworzących superkomputery czy serwery w centrach danych. One również już na pierwszy rzut oka wyglądają jak komputery, choć raczej takie, które czekają na klientów na półkach magazynu.

Tymczasem na zdjęciach komputerów kwantowych widzimy jakieś dziwne urządzenia, wyglądające na skomplikowaną aparaturę chemiczną. Weteranom pełnej lub częściowej prohibicji przypominają zestawy do pędzenia bimbru. Ich główna część, pełniąca funkcję procesora – by odnieść to do „normalnych” komputerów – w niektórych rozwiązaniach przypomina wielki ozdobny kandelabr zbudowany ze złotych drutów poprzekładanych złotymi tarczami – zresztą utarło się już określenie „chandelier” (kandelabr).



Kandelabr fińskiego komputera IQM

Pojawiają się elektryzujące laików doniesienia medialne o uruchomieniu kolejnego komputera kwantowego, ale na razie nie ma mowy o żadnej choćby seryjnej produkcji, o masowej nie wspominając, bo wszystkie istniejące i działające urządzenia to konstrukcje prototypowe.

Zarówno widok tych urządzeń, jak i możliwości i obszary ich zastosowań są ściśle związane z istotą obliczeń kwantowych. W tym wydaniu „Domeny” publikujemy już szósty odcinek obszernego przewodnika prof. Marka Perkowskiego, który przedstawia metodykę prowadzenia obliczeń kwantowych w środowisku hybrydowym – komputera kla-

sycznego i komputera kwantowego. Obszernie omawia architekturę logiczną kwantowych bramek, ale robi to w sposób „neutralny technologicznie”, z założenia nie wdając się w rozważania na temat sprzętowej realizacji tych bramek.

We wstępie do swojego przewodnika (Biuletyn PTI 2/2021) prof. Perkowski zauważa, że programowanie komputera kwantowego jest podobne do programowania układów logicznych FPGA, ale podkreśla różnicę: „podczas gdy bramki w komputerze klasycznym umieszczone są w przestrzeni i połączone fizycznymi przewodami, to w komputerze kwantowym wirtualne bramki realizowane są w czasie jako skorelowane zmiany stanów kubitów, wywołwane przez sekwencyjne impulsy płynące z komputera klasycznego. Realizacja fizyczna jest więc inna, ale model matematyczny służący do projektowania i programowania jest bardzo podobny”.

Obliczenia równoległe a kwantowe

Odnosząc się do klasycznej architektury Neumanna i bardzo upraszczając, można powiedzieć, że komputery kwantowe zamiast w kolejnych taktach pracy układów liczyć „wszystko po kolei”, liczą jakby wszystkie warianty na raz w jednym cyklu. W jednym z artykułów popularyzatorskich użyto dowcipnego porównania tych dwóch modeli obliczeniowych: wyobraźmy sobie mysz, która chce się dostać przez labirynt do kawałka sera umieszczonego na wyjściu. W klasycznym modelu obliczeniowym mysz biega po kolejnych gałęziach labiryntu, wraca do rozgałęzień, jeśli poprzednia ścieżka zakończyła się ślepo, aż wreszcie po licznych próbach dotrze do sera. Tymczasem myszka stosująca model kwantowy wylicza w nim wszystkie ścieżki naraz i od razu wybiera tę z nich, z którą związane jest największe prawdopodobieństwo najszybszego dotarcia do sera.

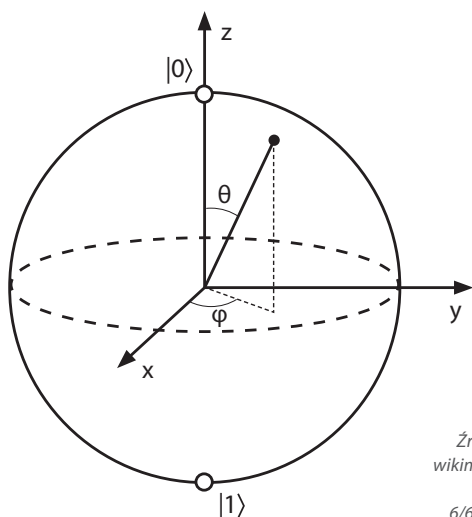
” *Nie mylmy modelu obliczeń kwantowych ani z wątkami obliczeniowymi w procesorach o wielu rdzeniach, ani z techniką obliczeń masowo równoległych stosowaną od lat na superkomputerach.*

Niezależnie od tego, ile tysięcy czy nawet milionów procesorów systemu superkomputerowego wykonuje równoległe obliczenia w poszczególnych wątkach czy w rozległej sieci połączonych ze sobą superkomputerów, to jednak w każdym z tych licznych procesorów działania wykonywane są sekwencyjnie w kolejnych cyklach pracy. W przetwarzaniu masywnie równoległym należy najpierw podzielić zadanie obliczeniowe na wątki, w których da się prowadzić obliczenia równoległe, minimalizując liczbę sytuacji, w których jakiś wątek musi czekać na wynik obliczeń innego wątku. Na końcu należy rezultaty obliczeń w poszczególnych wątkach połączyć w jedno rozwiązanie. Oznacza to oczywiście

pojawianie się „narzutu administracyjnego” na czas obliczeniowy, kiedy to system nie zajmuje się efektywnym liczeniem, tylko zarządzaniem poszczególnymi wątkami, rozkładaniem na nie zadań (co robione jest już na etapie kompilacji) i składaniem wyników. Źródłem „narzutu” jest także konieczność dzielenia się przez poszczególne wątki zasobami wspólnymi (m.in. pamięcią operacyjną), dochodzi też czas potrzebny do komunikacji między poszczególnymi sprzętowymi i programowymi elementami architektury obliczeniowej. Im więcej tych elementów (dla uproszczenia powiedzmy: im więcej procesorów pracujących równolegle), tym więcej czasu zajmuje komunikacja między nimi. Wszystkimi elementami tej układanki trzeba odpowiednio zarządzać – co oczywiście pochłania część mocy obliczeniowych i innych zasobów. Niestety, problemu nie rozwiązuje dodawanie kolejnych procesorów. Zgodnie z prawem Amdahla, każdy dodany procesor zwiększa moc obliczeniową systemu o coraz mniejszą ilość użytecznej mocy obliczeniowej w porównaniu do poprzedniego procesora dodanego. Przy zwiększaniu liczby procesorów do nieskończoności przepustowość (moc obliczeniowa) systemu zmierza ku granicy $1/(1-P)$, gdzie P jest udziałem tych części obliczenia, które można zrównoleglić, zaś $(1-P)$ – proporcją tych części, które nadal trzeba przetwarzać szeregowo.

Wydawać by się więc mogło, że model obliczeniowy, w którym wylicza się „na raz” wszystkie możliwe rozwiązania jest idealny – gdyby nie kilka problemów, wynikających przede wszystkim z samej istoty zjawisk kwantowych.

Realizacja obliczeń kwantowych



Źródło: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/6b/Bloch_sphere.svg/220px-Bloch_sphere.svg.png

Wizualizacja pojedynczego kubitu – sfera Blocha
Biegun północny reprezentuje stan $|0\rangle$, biegun południowy stan $|1\rangle$. Powierzchnia sfery reprezentuje wszystkie czyste stany dwuwymiarowego układu kwantowego, wewnątrz odpowiada wszystkim stanom mieszanym.

Podstawowym pojęciem dla komputerów klasycznych jest bit – najmniejsza ilość informacji potrzebna do określenia, który z dwóch równie prawdopodobnych stanów (0 czy 1) przyjął układ. Jego odpowiednikiem dla komputerów kwantowych jest kubit – najmniejsza i niepodzielna jednostka informacji kwantowej.

W odróżnieniu od bitu kubit może znajdować się w dowolnej superpozycji dwóch stanów kwantowych. Jako model fizyczny kubitu najczęściej wymienia się elektron o spinie $1/2$, polaryzację pojedynczego fotonu czy ładunek półprzewodnikowej kropki kwantowej.

Z punktu widzenia klasycznej informatyki zaskakującą cechą obliczeń kwantowych jest coś, co moglibyśmy nazwać niszczeniem całego obliczenia poprzez pobieranie wyniku. Na tzw. zdrowy rozsądek (który trzeba porzucić w dziedzinie mechaniki kwantowej) obliczeniowe układy kwantowe zachowują się „nieprzewidywalnie” – jeśli nic z nimi nie robimy, to wykazują superpozycję stanów. Superpozycję niszczy, odczytując stany na wyjściach bramek/układów.

Obok superpozycji stanów układy kwantowe wykazują jeszcze jedną niezwykle ważną właściwość: kwantowe splątanie, także zresztą kłócące się ze zdrowym rozsądkiem. Otóż dwa kwantowo splątane układy przekazują sobie wzajemnie informację o swoich stanach natychmiast, bez żadnego upływu czasu potrzebnego w „zwykłych” komputerach na komunikację między poszczególnymi elementami – rejestrami maszyny, komórkami pamięci itp. To przekazywanie stanów zupełnie nie zależy od odległości między splątanymi układami: jeden układ zawsze „wie”, w jakim stanie jest ten drugi układ. Niezwykłą cechą splątania jest to, iż stan splątanych układów kwantowych zawiera więcej informacji niż każdy z nich oddzielnie. Na przykład pomiar polaryzacji dwóch splątanych fotonów z użyciem dwóch odległych od siebie, ale identycznie ustawionych polaryzatorów, zawsze da w wyniku dwie przeciwne polaryzacje. Natomiast polaryzacje każdego z nich osobno są zupełnie przypadkowe. Splątana para fotonów jako układ ma określoną własność wspólną (przeciwne polaryzacje), ale stan pojedynczego fotonu (pod układu) jest nieokreślony – wynik pomiaru polaryzacji dla pojedynczego fotonu jest przypadkowy.

” **Niezwykłego zjawiska natychmiastowego oddziaływania między splątanymi układami na dowolną odległość – choćby drugiego końca świata – jakby z nieskończoną prędkością (co jest sprzeczne z teorią względności) nie chciał przyjąć do wiadomości nawet taki geniusz, jak Albert Einstein, który nazwał je „upiornym działaniem na odległość”.**

Podobnie jak superpozycja, splątanie też jest niszczone poprzez obserwację stanów. Układy kwantowe realizują też teleportację – przesyłanie stanów układów kwantowych bez ich rejestrowania. Niestety, teleportacja działa tylko w mikroszwiecie i bardzo odległe teleportacje, wykonywane przy użyciu Transportera znanego fanom serialu "Star Trek", są w zasadzie niemożliwe. W świecie atomowym jest to jednak właściwość bardzo istotna, bo za pomocą teleportacji możliwe jest np. przenoszenie stanu z układu, w którym zachodzi szybka dekoherencja, na układ bardziej stabilny.

Choć pierwsze prace dotyczące obliczeń kwantowych ukazały się jeszcze na przełomie lat 70. i 80. XX w. (m.in. prace Rosjan – R. P. Popławskiego z 1975 r. i J. I. Manina z 1980 r.), to za rzeczywisty początek uważana jest konferencja na temat fizyki i obliczeń, która odbyła się na MIT w 1981 r. i zgromadziła ówczesną czołówkę uczonych zajmujących się tymi zagadnieniami. To na niej noblista Richard Feynman, twórca relatywistycznej elektrodynamiki kwantowej, rzucił sławne zdanie (w wolnym przekładzie): „Do cholery, natura nie jest klasyczna, więc jeśli chcesz symulować naturę, lepiej zrób to przy użyciu mechaniki kwantowej – i na Boga: to jest naprawdę wspaniały problem, choćby dlatego, że nie wygląda na łatwy” <https://www.wisdom.weizmann.ac.il/~naor/COURSE/feynman-simulating.pdf>.

Historycznie pierwsze realizacje urządzeń kwantowych, których zresztą nie można nazwać komputerami, korzystały z układów molekularnych. W 1996 r. N. Gershenfeld, L. Chuang i M. Kubinec¹ do uzyskania stanów kwantowych wykorzystali chloroform (CHCl₃). Kubitami były spiny jąder atomu wodoru i węgla w próbówce zawierającej 1020 cząsteczek chloroformu, umieszczonej w polu magnetycznym, które ustawiało spiny jąder wodoru i chloru. Układ „programowano” impulsami radiowymi. Badacze zaimplementowali w nim algorytm Grovera wyszukujący element w zbiorze czteroelementowym. Koszt tego eksperymentu wyniósł ok. 1 mln USD, co mogłoby się wydawać kwotą wysoką, gdyby chodziło tylko o praktyczny zysk z tak prostego działania bazodanowego.

W 2000 r. David DiVincenzo opublikował warunki, które musi spełniać urządzenie, by można było je nazwać komputerem kwantowym.

Joanna Wiśniewska w opracowaniu opublikowanym w Biuletynie Instytutu Systemów Informatycznych Wydziału Cybernetyki WAT (http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BWA0-0041-0036?q=bwmeta1.element.baztech-volume-1508-4183-biuletyn_instytutu_systemow_informatycznych-2008-nr_1;7&qt=CHILDREN-STATELESS) omawia zbliżoną implementa-



Kryteria DiVincenzo w skrócie²

1. Odpowiednio zdefiniowany kubit – dwa stany kwantowe oddzielone od pozostałych stanów układu.
2. Określenie możliwości wpisywania informacji w kubit – czyli możliwości uzyskania dowolnej superpozycji dwóch stanów kubitów za pomocą pola zewnętrznego, makroskopowo regulowanego.
3. Możliwość skalowania kubitów do urządzenia wielokubitowego.
4. Zaprojektowanie i zaimplementowanie podstawowej operacji dwukubitowej, na której można by oprzeć wykonanie dowolnej kwantowej operacji logicznej. Konieczne jest opanowanie techniki włączania i wyłączania oddziaływania kubitów w sposób precyzyjny, w bardzo krótkich odstępach czasu – sterowanie splątaniem dwóch kubitów.
5. Zapewnienie stosunku rzędów czasu potrzebnego na wykonanie elementarnych operacji logicznych i czasu dekoherencji na poziomie nie mniejszym niż 6.
6. Zapewnienie możliwości oddziaływania dużej liczby kubitów albo bezpośrednio albo przez kubit pośredniczący (np. foton) w celu skalowania komputera i implementacji korekty błędów.
7. Zapewnienie możliwości odczytu informacji na wyjściu.
8. Zapewnienie możliwości resetowania całego układu.

cję wykorzystującą zjawisko jądrowego rezonansu magnetycznego. W najprostszej proponowanej realizacji urządzenie składałoby się z magnesu ze szczeliną, w której umieszczona jest rurka czy próbówka z płynem o znanym składzie i strukturze. Kubitami w takim układzie byłyby momenty protonów w jądrach atomów tworzących molekuły płynu. Proces obliczeniowy polegałby na działaniu na rurkę odpowiednio dobranymi impulsami elektromagnetycznymi z cewki nadawczej. Pobudzenie impulsami powodowałoby odchylenie się spinów jąder atomowych. Po ustaniu pobudzenia układu

¹ DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.80.3408>

² Na podstawie: http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-86cc79e3-528f-49df-9e05-ae6d-87357c3d/c/gruber_ZNPSLOZ_74_2014.pdf

impulsem układ emitowałby echo (tzw. sygnał swobodnej relaksacji) odbierane cewką odbiorczą. Odpowiednia interpretacja byłaby rozwiązaniem zadania obliczeniowego.

Realne konstrukcje platform sprzętowych, na których można uzyskać kubity, z grubsza dzielimy na platformy korzystające z elementów z obszaru fizyki ciała stałego – np. z układów transmon (linii transmisyjnych działających w warunkach nadprzewodnictwa), wakansów azotowych (NV) w diamencie (odpowiednio pobudzanych defektów sieci krystalicznej), półprzewodnikowych kropek kwantowych, kwantowych tranzystorów polowych (QFET) lub tranzystorów polowych ze studnią kwantową (QWFET), wykorzystujących zjawisko tunelowania kwantowego – oraz platformy tworzone z „elementów niematerialnych”, np. z fotonów, jonów schwytych w pułapki czy efektów magnetycznego rezonansu jądrowego. W obu podstawowych typach rozwiązań rzecz polega na tym, by elementy tworzące kubity znalazły się w stanach kwantowych. Na przykład w rozwiązaniach z NV w diamencie wykorzystuje się fakt, że wakans może być w stanie z spinem do góry, na dół lub w superpozycji tych stanów. Stanem spinowym wakansu – a więc stanem kubitów – da się sterować przy użyciu laserowych sygnałów świetlnych lub wiązek mikrofalowych. Układ wielu kubitów tworzy rejestr kwantowy. Podobnie jak w bramkach komputerów „klasycznych”, ważną operacją jest odczytanie stanu danego rejestru kwantowego zbudowanego z bramek, czyli pomiar stanu. Z istoty mechaniki kwantowej wynika, że pomiar stanu rejestru kwantowego powoduje bezpowrotne utracenie przechowywanego w rejestrze stanu kwantowej koherencji – superpozycji możliwych wartości. Ważną cechą rozwiązań kwantowych jest to, iż liniowy wzrost liczby kubitów w rejestrze kwantowym daje wykładniczy wzrost wymiarów przestrzeni stanów rejestru. W rezultacie n-kubitowy rejestr kwantowy może zawierać jednocześnie superpozycję 2^n możliwych wartości.

Korzyści i narzut

Jeśli przetwarzanie równoległe wymaga liczby węzłów z procesorami proporcjonalnej do liczby zagadnień N obliczanych równoległe, to liczba kubitów wymaganych do wykonania tych obliczeń jest proporcjonalna do $\log N$. Wydawałoby się, że komputery kwantowe mogą wykonywać obliczenia w czasie niemal zerowym. Jednak w wyniku „klasycznego” przetwarzania równoległego dostajemy bezpośrednio wyniki obliczeń. Tymczasem wynikiem obliczeń kwantowych (czyli pomiaru) jest rozkład prawdopodobieństwa na pewnym zbiorze i na współpracującym komputerze klasycznym trzeba wykonać kolejne operacje, określające jakość i prawdopodobieństwa otrzymywanych wyników – co także zajmuje czas i wiąże zasoby. Mimo deterministycznego działania poszczególnych bramek kwantowych niejako z definicji kubity działają probabilistycznie – to samo obliczenie powtórzone dwa razy za każdym razem może dać inny wynik z powodu losowości procesu pomiaru.

W zasadzie już tylko technicznym – ale za to bardzo poważnym – problemem jest dekoherencja, czyli rozpadanie się superpozycji i splątania pod wpływem czynników zewnętrznych. Główny wysiłek konstruktorów kwantowych komputerów idzie w kierunku utrzymania jak najdłużej stanu kwantowego i odizolowania go od wpływów zewnętrznych. Pełna izolacja uniemożliwiłaby jednak odczytanie wyników obliczeń, co byłoby bezsensowne. Utrzymanie stanu splątania przez milisekundy jest uważane za duże osiągnięcie. W obliczeniach kwantowych trzeba stosować kwantową korekcję błędów w celu „odfiltrowania” błędów spowodowanych dekoherencją, szumem przechowywanych informacji kwantowych, błędami działania bramek kwantowych czy błędnymi pomiarami. Dla szybszego poszukiwania najlepszych rozwiązań wykorzystywane jest zjawisko interferencji znane z optyki. Interferencja w obliczeniach kwantowych pomaga wygaszać rozwiązania gorsze i wzmacniać te uważane za najlepsze.

W platformach zbudowanych z elementów „materialnych” stosuje się schładzanie kwantowego procesora do temperatur jak najbliższych zera absolutnego – przeważnie jest to chłodzenie układów ciekłym helem. W takich temperaturach pojawia się zjawisko nadprzewodnictwa – w układzie w stanie nadprzewodnictwa raz wzbudzony prąd bez żadnego oporu krążyłby sobie do nieskończoności. Gdyby nie spory nakład energii na chłodzenie kwantowego procesora do temperatur rzędu milikelwinów, a więc poniżej $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$, to taki komputer byłby idealnym przykładem Green IT, bo nie zużywałby prądu. Dla porównania można przytoczyć pobór mocy największych superkomputerów ze światowej listy Top 500: numer 1 na liście, Frontier HPE Cray EX235a, ma pobór mocy ponad 21 MW, nr 2 – Supercomputer Fugaku, potrzebuje niemal 30 MW. Do zasilenia superkomputerów z pierwszej dziesiątki na liście (łącznie ponad 108 MW) potrzebne byłoby 15% planowanej mocy gazowo-parowego bloku elektrowni Ostrołęka 2 (jeśli taka powstanie na miejscu dwóch zburzonych kominów swej niedoszłej poprzedniczki).

Klasyczne wsparcie kwantowej supremacji

Na razie informatyka kwantowa nie odsyła na śmietnik historii „klasycznych” komputerów – co więcej, odgrywają one kluczową rolę w obliczeniach kwantowych. System kwantowy składa się bowiem z komputera „klasycznego” (który realizuje przygotowanie algorytmu i danych, sterowanie kwantowym procesem obliczeniowym, przetwarzanie wyników i obsługę użytkownika) oraz z komputera kwantowego, w którym tworzone są kubity.

Przyzwyczajeni do wszechstronnych zastosowań „klasycznych” komputerów – od pisania listu do cioci przez obliczenia epidemiologiczne i tworzenie prognoz meteorologicznych po modelowanie struktur białkowych – zwykli

użytkownicy informatyki nie zawsze zdają sobie sprawę z tego, że (przynajmniej na razie) komputery kwantowe potrafią prowadzić obliczenia dotyczące tylko bardzo specyficznych problemów przy użyciu bardzo specyficznych algorytmów. W tej stosunkowo wąskiej klasie problemów obliczeniowych oczekiwane jest (zwłaszcza przez działy PR firm zajmujących się komputerami kwantowymi) osiągnięcie przez kwantowe maszyny *quantum supremacy* – „kwantowej supremacji” nad komputerami klasycznymi.

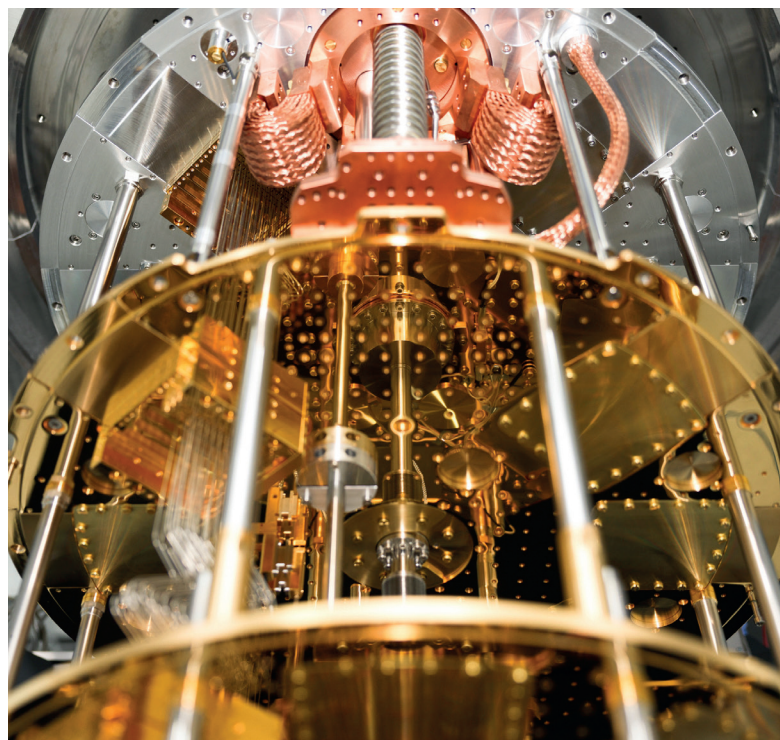
Pojęcie kwantowej przewagi sformułował w 2012 r. John Preskill, fizyk z Caltechu. Mielibyśmy z nią do czynienia wtedy, gdy komputer kwantowy wykonałby coś, czego nie potrafi zrobić komputer klasyczny lub czego nie da się zasymulować na klasycznym komputerze. Kilku czołowych producentów stara się wykazać, że ich urządzenia potrafią przeprowadzić obliczenia wykładniczo szybciej niż komputery „klasyczne”.

Komputery kanadyjskiej D-Wave System, w tym najnowszy Advantage 5 generacji, właściwie nie są komputerami kwantowymi w ścisłym znaczeniu tego terminu. Ze względu na model działania są tzw. kwantowymi wyżarzaczami, działającymi z wykorzystaniem kwantowego wyżarzania (*quantum annealing*) – adiabatycznych obliczeń kwantowych, w których powoli zmienia się wybrany parametr układu, aby przez cały czas był on opisywany przez stan o najniższej chwilowej energii (http://www.deltami.edu.pl/temat/informatyka/algorytmy/2017/11/25/Kwantowe_wyjarzanie/). Parametrem tym w urządzeniach D-Wave jest pole magnetyczne o stopniowo zmniejszonym natężeniu. W stanie końcowym pole magnetyczne staje się zaniedbywalne, układ osiąga szukaną konfigurację, którą można podać pomiarowi. „Adiabatyckość” procesu wskazuje na to, że nie zachodzi transfer ciepła do otoczenia ani z otoczenia.

Advantage działa z ponad 5 tys. kubitów, dla każdego z nich jest 15 połączeń (*couplers*). Firma nie podaje jednak żadnych danych na temat czasów przetwarzania czy innych parametrów, z wyjątkiem porównań do Advantage 2000Q poprzedniej generacji. Swojej sieci partnerskiej oraz uczelniom D-Wave Systems udostępnia chmurową platformę Leap, umożliwiającą prowadzenie w hybrydowym modelu obliczeń (z wykorzystaniem hybrydowych solverów) maksymalnie z 1 milionem zmiennych i 100 tys. ograniczeń oraz zestaw otwartoźródłowego oprogramowania SDK Ocean.

W październiku 2019 r. specjaliści Google’a pochwalili się, że jeden z ich procesorów o dźwięcznej nazwie *Sycamore* (po naszymu klon jawor), korzystając z 53 kubitów (oryginalnie było ich 54, ale jeden nie chciał działać), wyprodukował w ciągu 200 sekund tyle liczb losowych, że ich generowanie na superkomputerze *Summit* z jego 2,4 mln rdzeni procesorowych – aktualnie nr 4 na światowej Top 500 – zajęłoby 10 tys. lat. Pojawiły się głosy, że było to osiągnięcie na miarę pierwszego lotu maszyny latającej braci Wright. Specjaliści z IBM (dziełem tej firmy jest Summit) podważali jednak ten rezultat, twierdząc, że Summit ze swoimi 280 petabajtami pamięci jest zdolny do przeprowadzenia takiego obliczenia w skończonym czasie kilku dni, a więc na razie nie ma mowy o żadnej supremacji.

Można ironizować, że porównanie do lotu braci Wright jest trafne – bezpośrednia praktyczna przydatność tamtego lotu była mniej więcej taka sama, jak dziś błyskawiczne wygenerowanie olbrzymiej ilości liczb losowych. Są jednak zagadnienia, w których oczekujemy od komputerów kwantowych bardzo wiele: wyszukiwanie w nieuporządkowanym zbiorze, znajdowanie dzielników liczby, rozwiązywanie wielkiej liczby układów równań liniowych, przeszukiwanie wielkich zbiorów w celu sprawdzenia, czy znajduje się w nich szukany element, rozwiązania dla kryptografii, takie jak kwantowa dystrybucja klucza czy gęste kodowanie wykorzystujące stany splątane do bezpiecznego przesyłania informacji.



Źródło: <https://quantum.baidu.com/>

Qian Shi – chiński komputer kwantowy zespołu Baidu Research

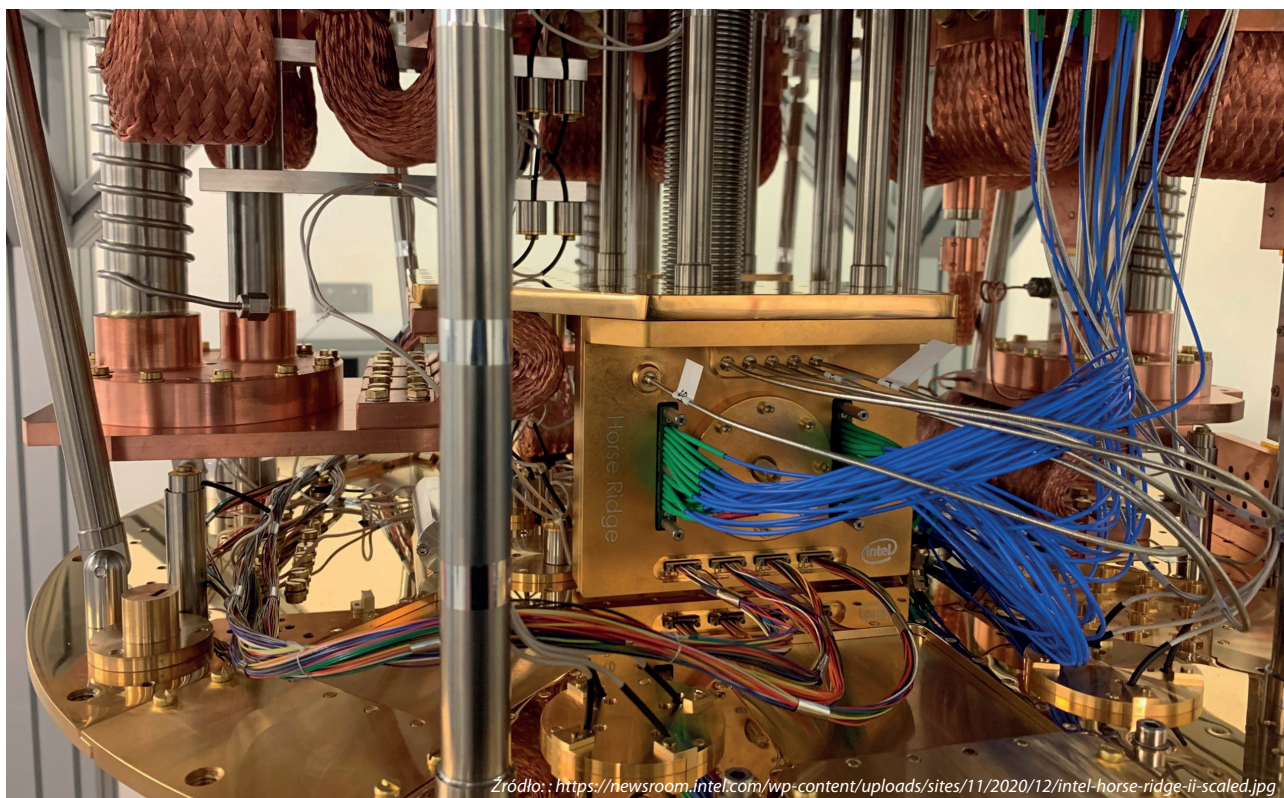
Światowa czołówka komputerów kwantowych

Komputerami i oprogramowaniem kwantowym zajmują się intensywnie m.in. Intel (komputer Tangle Lake – 49 kubitów, układ Horse Ridge II), Google (procesory Foxtail, Bristlecone i Sycamore), Rigetti Computing (procesor Aspen-M-2), fiński spin-off IQM i wielka chińska grupa Baidu (komputer Qian Shi). Usługi chmury kwantowej oferuje m.in. Amazon (AWS Amazon Braket), Xanadu Quantum Technologies, Microsoft (Azure Quantum), holenderski Qutech (platforma Quantum Inspire). W budowę, wykorzystywanie oraz udostępnianie komputerów kwantowych bardzo mocno zaangażował się IBM. Prace badawcze prowadzone są w IBM Q Quantum Computation Center. Już na początku 2019 r. firma zaprezentowała swój pierwszy komercyjny komputer kwantowy IBM Q System One, pracujący na układzie realizującym 20 kubitów. Rozwiązanie IBM korzysta z tzw. nadprzewodnikowych złączy Josepha, wykorzystujących zjawisko tunelowania par Coopera³ między dwoma nadprzewodnikami na gra-

nicy nadprzewodnik–izolator–nadprzewodnik. Układy schładzane są do temperatury 20 mK (-273,13 °C), co pozwala na stabilną pracę układu przez ok. 100 mikrosekund. Superpozycja stanów i splątanie inicjowane jest impulsami mikrofalowymi (od 10 do 100 nsek) z częstotliwością ok. 5 GHz.

W ramach swojej sieci partnerskiej IBM Quantum Network firma umożliwi licznym partnerom naukowym i komercyjnym dostęp do komputerów kwantowych serii Falcon (27- i 127-kubitowych) i do dedykowanej chmury obliczeniowej, udostępni oprogramowanie realizujące algorytmy, w tym platformę usług Qiskit Runtime bazującą na otwartoźródłowym SDK Qiskit napisanym w Pythonie.

W lutym 2022 r. do sieci IBM Quantum Network dołączyło Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe (PCSS).



Zródło: <https://newsroom.intel.com/wp-content/uploads/sites/11/2020/12/intel-horse-ridge-ii-scaled.jpg>

Kwantowy procesor Horse Ridge II Intela

³ Pary Coopera to pary związanych elektronów przenoszące prąd elektryczny w nadprzewodnikach. Elektrony tworzące parę Coopera są opisywane przez funkcje falowe z przeciwnymi wektorami falowymi.