

Kwanty

które liczą

Nie tylko sprzęt komputerowy decyduje o szybkości obliczeń. Równie istotny – a często nawet istotniejszy – jest dobry algorytm. Jeśli chcemy, aby komputer kwantowy działał szybciej niż zwykły, musimy nauczyć się budować nowe algorytmy, skonstruowane według niezwykłych reguł mechaniki kwantowej.

▶ PAWEŁ HORODECKI
▶ KAROL ŻYCKOWSKI

NAWET NAJLEPSZY KOMPUTER nie będzie użyteczny bez oprogramowania. Dobry program sprawia, że dzięki komputerowi możemy szybko rozwiązać wiele skomplikowanych problemów obliczeniowych. Aby zaprogramować dowolne obliczenie, takie jak przeszukiwanie bazy danych czy analiza danych graficznych, niezbędny jest jednak odpowiedni *algorytm*. Pod pojęciem algorytmu rozumiemy pewien schemat uporządkowanych czynności, koniecznych do wykonania danego zadania. Komputery, które stoją dziś na naszych biurkach, wykorzystują algorytmy klasyczne, bazujące na prawach fizyki klasycznej. Obecnie nabieramy coraz większej pewności, że do konstruowania efektywnych algorytmów obliczeniowych można używać również praw mechaniki kwantowej.

Zanim przejdziemy do opisu algorytmów wykorzystujących efekty kwantowe, najpierw należałoby odpowiedzieć na pytanie, czy teoria kwantowa w ogóle pozwala na stworzenie algorytmów, które – zastosowane na (jeszcze nieistniejącym!) komputerze kwantowym – pozwolą rozwiązać konkretny problem obliczeniowy szybciej niż najlepszy algorytm klasyczny? Aby przedyskutować to zagadnienie, potrzebujemy garści informacji na temat sposobu działania komputerów, zarówno klasycznych, jak i kwantowych.

Problemy obliczeniowe mają różny stopień trudności. Intuicyjnie czujemy, że trudniej jest pomnożyć przez siebie dwie liczby stycyfrowe niż dwie liczby jednocyfrowe. Mając dany tylko rezultat mnożenia – na przykład liczbę dwustycyrową K – jeszcze trudniej będzie rozwiązać problem jej faktoryzacji, czyli znaleźć zestaw wszystkich par liczb (p, q) , których iloczyn $p \cdot q$ wynosi K . Aby ilościowo opisać stopień „trudności” problemu, wprowadza się pojęcie jego *złożoności obliczeniowej*, która wskazuje, jak zasoby komputera, niezbędne do realizacji optymalnego algorytmu (czas obliczeń, użyta pamięć), rosną wraz z liczbą danych wejściowych.

Od bitu do kubitu

Komputer osobisty, używany przez nas w momencie pisania tego tekstu, pozwala przetwarzać informację zapisaną poprzez ciąg bitów. Jeden *bit* to jednostka binarna (*binary unit*), której wartość wynosi 0 lub 1. Fizycznie jeden bit możemy zrealizować jako obwód elektryczny, który jest lub nie jest podłączony do źródła prądu. Zakładamy, że jeśli napięcie w obwodzie jest mniejsze niż 0,2 V, to przechowuje on wartość 0, a gdy jest większe niż 0,5 V, wówczas zawiera 1. Nie mamy zatem kłopotów z interpretacją wartości bitu odczytanej z takiego obwodu.



Znacznie upraszczając problem, klasyczny komputer możemy sobie wyobrażać jako zbiór N takich obwodów. Jeżeli $N = 2$, to liczba wszystkich możliwych stanów układu wynosi cztery: (00, 01, 10, 11). Zauważmy, że zwiększając liczbę obwodów o jeden, liczbę możliwych stanów zwiększamy dwukrotnie. Dla dowolnie dużego N liczba wszystkich możliwych stanów urządzenia wyniesie $2 \cdot 2 \cdot \dots \cdot 2 = 2^N$. Każdy klasyczny algorytm sprowadza się zatem do wczytania danych wejściowych, ich przetwarzania w ramach dostępnego zbioru 2^N stanów urządzenia oraz wyprowadzenia wyniku obliczeń.

Trochę zera, trochę jedynki

W kwantowej teorii przetwarzania informacji rolę bitu odgrywa kubit (*qubit*, *quantum bit*). O ile klasyczny bit może znaleźć się jedynie w dwóch położeniach, które obrazowo przedstawiamy za pomocą strzałki skierowanej albo w górę, albo w dół, o tyle kubit możemy sobie wyobrazić jako strzałkę zajmującą dowolne położenie na zwykłej sferze, zwanej *sferą Blocha* (rys. 1). Jeżeli klasycznie dostępne położenia strzałki oznaczamy symbolami $|0\rangle$ (bit równy 0) oraz $|1\rangle$ (bit równy 1), to każdy stan kwantowy kubit można wówczas zapisać jako pewne złożenie tych dwóch stanów:

$$a|0\rangle + b|1\rangle \quad (1)$$

Liczby a i b są związane z prawdopodobieństwem wystąpienia każdego ze stanów. Nie są to jednak bezpośrednie wartości prawdopodobieństwa, gdyż a i b muszą być tak dobrane, aby to nie one same, lecz kwadraty ich wartości bezwzględnych sumowały się do jedynki, jak musi mieć to miejsce w przypadku sumowania prawdopodobieństw wystąpienia stanów jednego układu. Przykładowo, możliwe są dwa następujące stany (ich oznaczenia rozróżnimy wprowadzając symbole $+$ i $-$):

$$|\psi_+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$$

oraz

$$|\psi_-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$$

bo $(\frac{1}{\sqrt{2}})^2 + (\frac{1}{\sqrt{2}})^2 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$.

Zauważmy, że stany $|0\rangle$ oraz $|1\rangle$ wykluczają się wzajemnie (np. opisują stan pojedynczego fotonu, który może być spolaryzowany albo w kierunku poziomym, albo w kierunku pionowym). Pomimo to teoria kwantowa dopuszcza istnienie takich stanów jak $|\psi_+\rangle$, który matematycy nazywają *kombinacją liniową* stanów $|0\rangle$, $|1\rangle$, a fizycy *superpozycją* wykluczających się stanów.

Zaznaczmy, że stany $|\psi_+\rangle$ i $|\psi_-\rangle$ nie są zwykłą mieszaniną stanów $|0\rangle$ i $|1\rangle$. Taka mieszanina, reprezentowana przez punkt w środku sfery Blocha, nie wykazuje efektów interferencji kwantowej charakteryzujących superpozycję stanów $|0\rangle$ i $|1\rangle$. Wykonanie pomiaru cząstki kwantowej, znajdującej się w stanie superpozycji np. $|\psi_+\rangle$ sprawi, że z prawdopodobieństwem $1/2$ znajdzie się ona w stanie $|0\rangle$, a z prawdopodobieństwem $1/2$ w stanie $|1\rangle$. Należy tu jednak wyraźnie podkreślić, że zgodnie z mechaniką kwantową, przed dokonaniem pomiaru cząstka *nie jest* w żadnym ze stanów $|0\rangle$ i $|1\rangle$, tylko w owym „niezdecydowanym” stanie $|\psi_+\rangle$. Istnienie stanów opisywanych przez teorię jako superpozycje zostało potwierdzone doświadczalnie, są więc one realnym elementem kwantowego świata.

Przestrzeń dozwolonych stanów jest zatem w teorii kwantowej znacznie bogatsza niż w teorii klasycznej. Poza stanami $|0\rangle$ i $|1\rangle$, mającymi odpowiedniki klasyczne, kubit może znajdować się w jednym z nieskończonej rodziny dość oryginalnych stanów pośrednich $a|0\rangle + b|1\rangle$. Podobnie wygląda porównanie układów N bitów i N kubitów. O ile układ klasyczny przyjmuje tylko jedną z 2^N możliwości, o tyle układ kwantowy może znajdować się w jednym ze stanów odpowiadających konfiguracjom klasycznym (np. $|0\rangle|0\rangle\dots|0\rangle$ lub $|0\rangle|0\rangle\dots|1\rangle$) albo może znaleźć się w dowolnej superpozycji stanów klasycznych.

Cecha ta jest niezwykle ważna: układy kwantowe „symulujące” binarne układy klasyczne mogą znajdować się nie tylko w intuicyjnie dla nas zrozumiałych stanach zeropodobnych, ale także w stanach superpozycji (stanach „niezdecydowanych”), które kodują jednocześnie obie możliwości (0 i 1).

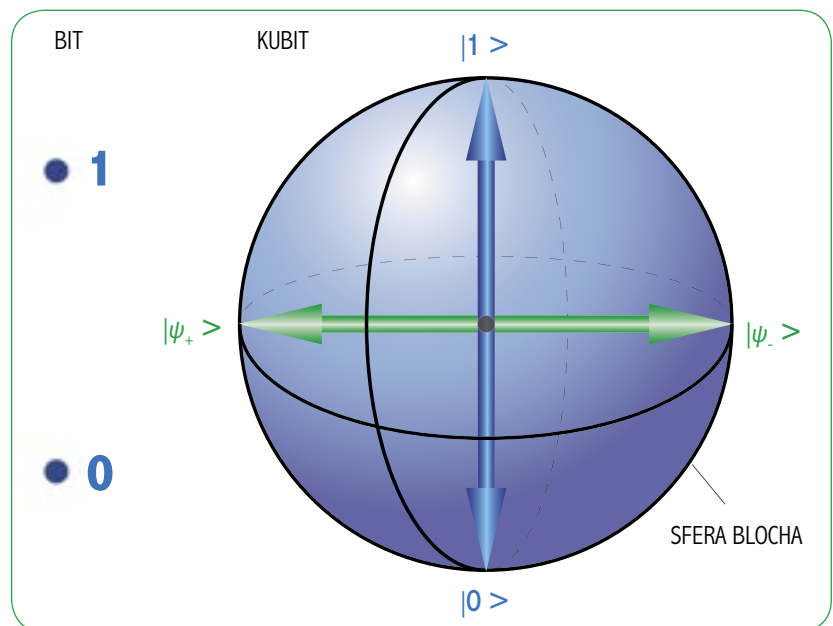
Struktura algorytmu

Każdy algorytm wykonywany na komputerze klasycznym można zapisać jako pewną sekwencję elementarnych bramek logicznych, np. NOT, AND, OR, XOR; niektóre z nich przedstawił na rys. 2. Liczba różnych bramek elementarnych nie jest duża, lecz liczba sposobów, na jakie można je ułożyć, jest dla długich algorytmów ogromna. Zauważmy, że niektóre bramki są odwracalne (np. bramka C-NOT), co oznacza, że istnieje dla nich bramka odwrotna, przekształcająca dane wyjściowe z powrotem w dane wyjściowe. Z drugiej strony istnieją bramki nieodwracalne, takie jak klasyczna bramka AND, która ma dwa wejścia, a tylko jedno wyjście.

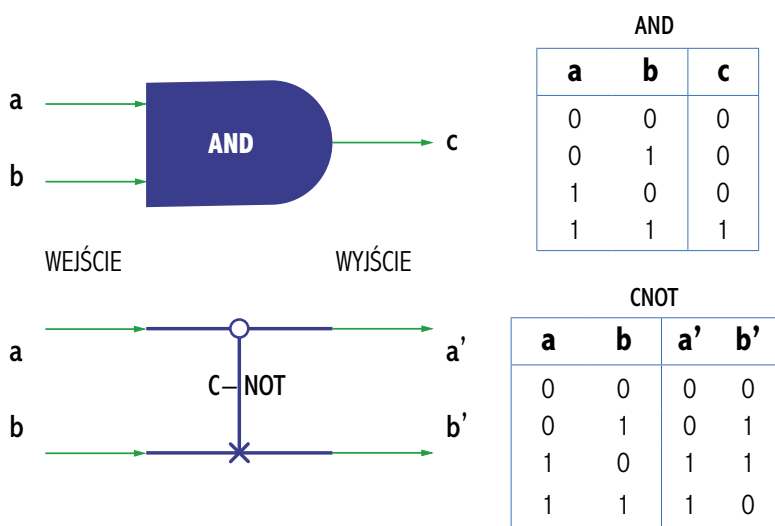
Założmy, że zadziałanie każdej bramki wymaga tej samej ilości czasu; dla wygody przyjmijmy, że ilość ta odpowiada pewnej jednostce. Każdy algorytm podzielmy teraz na kroki elementarne, czyli zbiory bramek operujących na różnych bitach, które to zbiory można wykonać równocześnie. Przy takich założeniach zrealizowanie każdego kroku algorytmu wymaga tylko jednej jednostki czasu (rys. 3).

Niech m oznacza liczbę kroków potrzebną do wykonania algorytmu, który przetwarza n danych wejściowych. ▣

Rys. 1. Bit klasyczny może znajdować się tylko w dwóch stanach (po lewej). Bit kwantowy (kubit) w stanie superpozycji.



Rys. 2. Nieodwracalna bramka AND oraz odwracalna bramka CONTROLLED-NOT (C-NOT) z tabelkami podającymi wartości logiczne wejścia/wyjścia.



algorytmów kwantowych, których struktura wygląda przecież podobnie: klasyczne dane wejściowe zapisujemy w układzie n kubitów, na tym układzie wykonujemy ciąg operacji kwantowych, a następnie – wskutek pomiaru kwantowego – otrzymujemy informację klasyczną, czyli ciąg bitów. Sekwencję kwantowych operacji można podzielić na elementarne bramki kwantowe, odpowiedniki bramek klasycznych. Jeden krok algorytmu składa się z bramek kwantowych realizowanych równocześnie na różnych kubitach. Zależność liczby niezbędnych kroków m od liczby danych wejściowych n odzwierciedla szybkość algorytmu kwantowego.

Zanim porównamy szybkości algorytmów klasycznych i kwantowych, porównajmy ich części składowe. Elementarnych bramek kwantowych jest więcej niż bramek klasycznych. Podobnie jak stany kwantowe, bramki kwantowe zależą od ciągłych (a nie dyskretnych) parametrów, odpowiedników liczb a i b z naszej definicji superpozycji. Ten fakt jest istotną zaletą: dzięki niemu przy konstruowaniu algorytmu kwantowego mamy do wyboru więcej „klocków składowych” niż w przypadku klasycznym. Rozważmy przykładowo obrót kubitów o kąt 90° wokół osi leżącej na równiku sfery Blocha. Taka operacja wykonana dwukrotnie wymieni z sobą oba bieguny sfery (stany $|0\rangle$ i $|1\rangle$), zatem efekt działania takiego złożenia odpowiada klasycznej bramce NOT. A to oznacza, że bramka obrotu o kąt 90° nie ma klasycznego

Rys. 3. Ogólny schemat algorytmów klasycznych (po lewej) i kwantowych (po prawej).

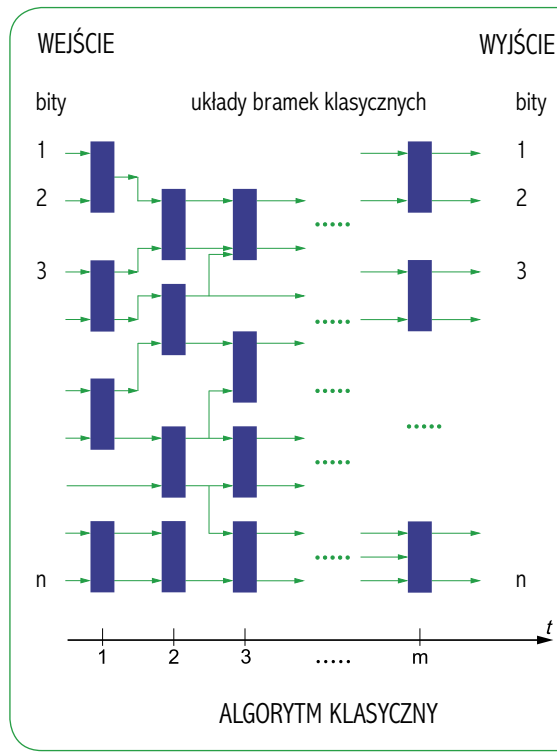
odpowiednika; nazywamy ją bramką SQRT_NOT (pierwiastek z NOT) – rys 4.

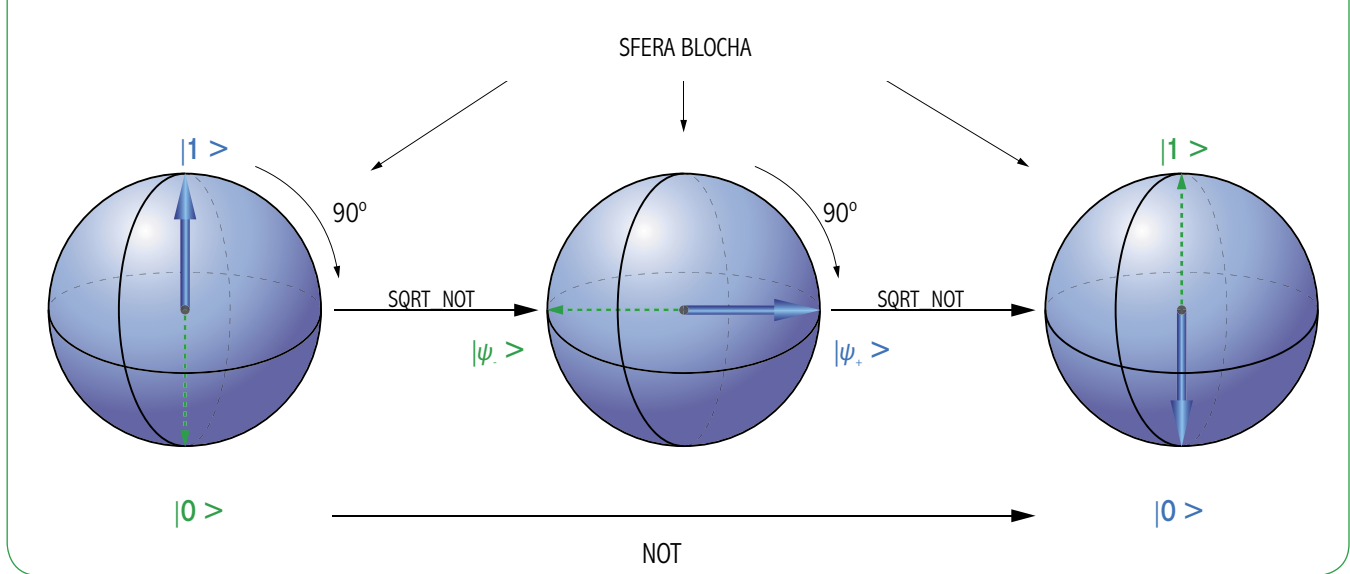
Wszystkie bramki kwantowe są odwracalne, w przeciwieństwie do bramek klasycznych. Dlatego też nie istnieje kwantowy odpowiednik bramki AND, natomiast łatwo skonstruować kwantową bramkę CNOT (kontrolowana bramka NOT), która jest odwracalna. Skoro działanie każdej kwantowej bramki można odwrócić, wykonując bramkę odwrotną, to i wszystkie algorytmy kwantowe (wyłączmy ostatnią fazę, czyli pomiar kubitów, kiedy to niszczywszy superpozycję) są odwracalne. Czy to nie powoduje, że algorytmy kwantowe mogą być wolniejsze od klasycznych, które przecież bywają nieodwracalne?

Na szczęście tak nie jest. Amerykański fizyk Charles Bennett z laboratorium IBM w stanie Nowy Jork (jeden z ojców teorii komunikacji kwantowej) pokazał już w roku 1973, że każdy algorytm klasyczny daje się zamienić na mający szybkość tego samego rzędu algorytm złożony z klasycznych bramek odwracalnych. Ponieważ wszystkie odwracalne bramki klasyczne mają swoje odpowiedniki kwantowe, przeto każdy algorytm klasyczny można zamienić na odwracalny kwantowy, nie tracąc na szybkości. Zatem algorytmy złożone z bramek kwantowych i wykonywane na kubitach są nie gorsze od algorytmów klasycznych.

Czas na przyspieszenie

Czy algorytmy kwantowe mogą jednak być szybsze od algorytmów klasycznych? Kluczową różnicą pomiędzy nimi jest tak zwany *kwantowy paralelizm*. Pojedynczy kubit może znaleźć się w „niezdecydowanym” stanie superpozycji stanów logicznych $|0\rangle$, $|1\rangle$ zapisanym we wzorze (1). Jeżeli każdy z n kubitów wprowadzimy w taką superpozycję, to otrzymamy stan, w którym na równych prawach pojawiają się równocześnie wszystkie możliwe stany logiczne układu klasycznego. Jeden taki stan kwantowy jest więc kombinacją 2^n stanów, które na komputerze klasycznym





wykluczają się wzajemnie. Na takiej superpozycji można wykonywać zadany ciąg bramek kwantowych, co prowadzi do niewytłumaczalnej klasycznie swoistej równoległości przetwarzania wszystkich alternatyw równocześnie i w rezultacie do przyspieszenia obliczeń.

Za prekursora idei obliczeń kwantowych uznaje się współtwórcę elektrodynamiki kwantowej Richarda Feynmana, który w 1982 roku zaproponował, aby własności pewnych układów fizycznych badać przez ich symulację przy użyciu prostszych układów. Pierwsze algorytmy kwantowe, skonstruowane w tym czasie w kontekście kwantowych symulacji, dotyczą bezpośrednio problemów fizycznych i mają niewiele wspólnego z obliczeniami prowadzonymi za pomocą komputerów.

Podstawy teorii algorytmów kwantowych opracował w roku 1985 David Deutsch z Oksfordu. Jako przykład podał pierwszy algorytm kwantowy, znajdujący odpowiedź na pewne pytanie dwa razy szybciej niż algorytm klasyczny. Nieco później Deutsch we współpracy z Richardem Jozsą skonstruował algorytm, który pozwalał na wykładnicze przyspieszenie obliczeń: rozwiązywał pewien pro-

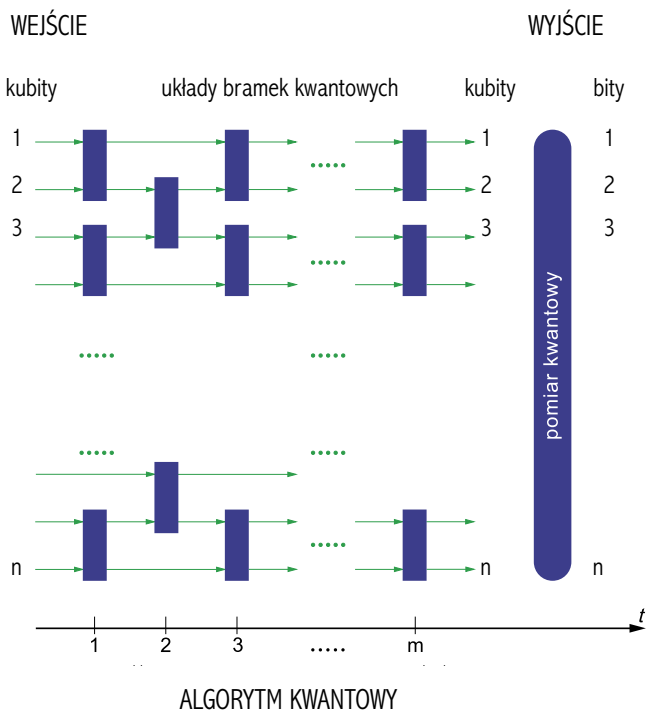
blem w czasie wielomianowym, podczas gdy jego klasyczny odpowiednik miał charakter wykładniczy. Algorytm Deutcha-Jozsy dotyczył jednak dość abstrakcyjnego problemu (odróżnienia funkcji stałej na dyskretnym zbiorze punktów od funkcji zrównoważonej), dlatego wzbudził uznanie niezbyt szerokiego kręgu specjalistów.

Prawdziwy przełom w teorii obliczeń kwantowych nastąpił w roku 1994, gdy amerykański informatyk Peter Shor, pracujący w Laboratoriach Bella, przedstawił kwantowy algorytm faktoryzacji liczb. Mając dane dwie liczby pierwsze, nietrudno jest obliczyć ich iloczyn: $K = p \cdot q$. Zadanie odwrotne, polegające na znalezieniu dzielników p oraz q dużej liczby naturalnej K , jest znacznie bardziej skomplikowane. Matematycy zajmujący się teorią liczb znają wiele rozwiązań tego problemu, ale nawet najlepsze znane algorytmy klasyczne są nieefektywne, gdyż liczba kroków koniecznych do uzyskania wyniku rośnie wykładniczo z liczbą cyfr rozkładanej liczby K . Tymczasem kwantowy algorytm Shora jest efektywny, gdyż liczba jego kroków rośnie jak trzecia potęga liczby cyfr badanego iloczynu.

Ostatnia faza algorytmu Shora polega na wykonaniu kwantowego pomiaru, którego rezultat nie jest deterministyczny. Jednokrotne wykonanie algorytmu tylko z pewnym prawdopodobieństwem pozwala znaleźć szukane dzielniki (taki algorytm nazywamy probabilistycznym). Prawdopodobieństwo otrzymania poprawnego wyniku jest jednak na tyle duże, że dla dużych liczb K wielokrotne powtarzanie algorytmu dostarczy poszukiwanych dzielników p i q w czasie znacznie krótszym niż czas realizacji najlepszych algorytmów klasycznych.

Zagadnienie faktoryzacji dużych liczb naturalnych, składających się przykładowo z 200 cyfr, odgrywa zasadniczą rolę w protokołach szyfrowania informacji. Jeden z bardziej znanych protokołów szyfrujących (protokół RSA z kluczem publicznym) bazuje właśnie na fakcie, że nie jest znany żaden efektywny algorytm, który z zadanego iloczynu dwóch liczb pierwszych potrafiłby szybko odgadnąć oba mnożniki. Dlatego też ogłoszenie algorytmu Shora, który rozwiązuje problem faktoryzacji i potencjalnie mógłby być użyty do łamania szyfru RSA, spowodowało gwałtowny wzrost zainteresowania teorią obliczeń kwantowych.

Rys. 4. Bramka klasyczna NOT może być złożona z dwóch kwantowych bramek SQRT_NOT, niemających odpowiednika klasycznego.

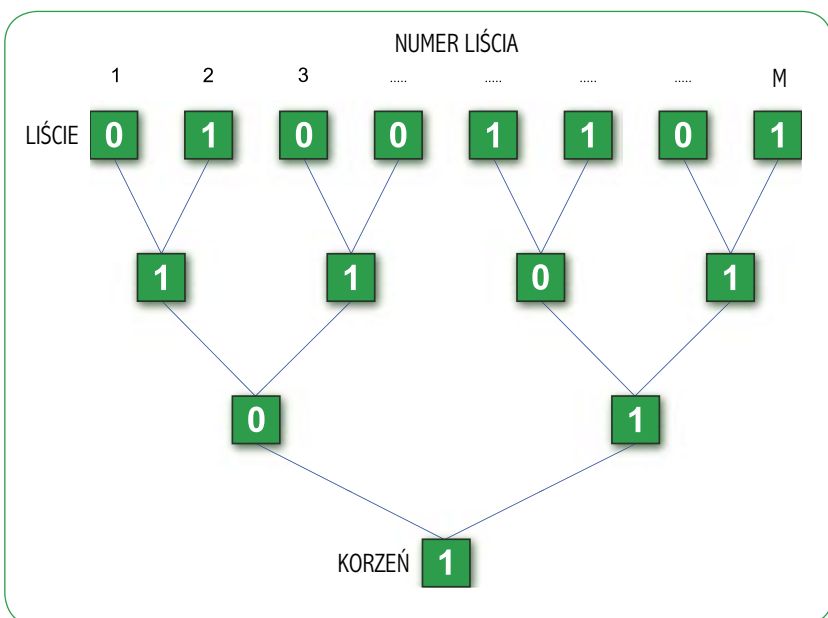


W 1997 roku Lov Grover przedstawił kwantowy algorytm przeszukiwania bazy danych składającej się z M elementów w celu znalezienia w niej elementu wyróżnionego. Jest to problem podobny do „odwrotnego” przeszukiwania książki telefonicznej. W książce zawierającej M danych chcemy znaleźć nazwisko posiadacza danego numeru. O ile liczba kroków niezbędna do rozwiązania problemu za pomocą algorytmu klasycznego jest rzędu M , o tyle kwantowy algorytm Grovera potrzebuje jedynie około $M^{1/2}$ kroków, a więc pozwala na kwadratowe przyspieszenie czasu realizacji programu.

Z kwadratem, czyli szybciej

W ciągu ostatniej dekady zbadano wiele wariantów algorytmów Shora i Grovera oraz opracowano wiele ich uogólnień. Jednakże w tym okresie w dziedzinie algorytmów kwantowych nie dokonano przełomowych odkryć. Wszystkie algorytmy kwantowe znane do końca 2006 roku charakteryzowały się dość podobną strukturą.

Rys. 5. Klasyczny graf drzewiasty z wartościami zadanymi funkcją NAND (wynik jest równy 0, gdy na wejściu mamy dwie jedynki, 1 – w pozostałych przypadkach).



Przyspieszenie uzyskane przy zastosowaniu algorytmów kwantowych jest konsekwencją wykorzystania nieklasycznych bramek kwantowych oraz użycia stanów superpozycji, które nie mają odpowiedników klasycznych. W szczególności w algorytmie Shora wykorzystywano tzw. kwantowe stany splątane, które charakteryzują się niezwykle silnymi korelacjami między poszczególnymi kubitami.

Istotny postęp w teorii algorytmów kwantowych odnotowano dopiero w minionym roku. Rozwiązany problem dotyczył badania własności tzw. grafów drzewiastych, stosowanych w teorii gier strategicznych, takich jak szachy czy go. Zespół amerykańskich uczonych z MIT – Edward Farhi, Jeffrey Goldstone oraz Sam Gutmann – podał kwantowy algorytm obliczania wartości korzenia drzewa binarnego, którego M liściom na najwyższym piętrze grafu przypisano wartości logiczne, a wartości w węzłach są liczone za pomocą operacji NAND (rys. 5). Problem polega na zminimalizowaniu liczby bitów liści,

które należy sprawdzić, aby poznać wartość bitu przypisanego do korzenia grafu. Podczas gdy liczba bitów koniecznych do sprawdzenia w najlepszym znanym algorytmie klasycznym rośnie z liczbą liści jak $M^{0.753}$, w nowym algorytmie kwantowym liczba ta zachowuje się jak $M^{0.5}$. Co ważniejsze, nowy algorytm jest oparty na innej koncepcji niż algorytmy znane poprzednio (odwołuje się do kwantowej wersji tzw. błędzenia przypadkowego wędrugę zadanego grafu).

Pomimo skonstruowania nowej rodziny algorytmów kwantowych eksperci są w zasadzie zgodni, że algorytmy kwantowe mają przewagę nad klasycznymi tylko przy rozwiązywaniu bardzo specyficznych problemów. Co więcej, analizując konkretny problem obliczeniowy, trudno stwierdzić, czy w danym przypadku istnieje szansa otrzymania algorytmu kwantowego, który będzie potrzebował mniej kroków niż najlepsze algorytmy klasyczne.

Kwantowa przyszłość informatyki?

Odkrycie algorytmów kwantowych ma duży wpływ na rozwój informatyki, matematyki i fizyki. Jednakże algorytmy kwantowe zdobędą decydujące znaczenie dopiero wtedy, gdy zostanie zbudowany kwantowy komputer, na którym będzie można je wykonywać. Konstrukcja kwantowego komputera nie jest łatwa, ponieważ stany superpozycji kwantowej otrzymane w doświadczeniu ulegają szybkiemu zniszczeniu w wyniku zakłóceń zewnętrznych. Na razie fizycy potrafią w warunkach laboratoryjnych zbudować poszczególne bramki kwantowe, a stosując algorytm Shora, udało się za pomocą prototypowego minikomputera kwantowego rozłożyć na czynniki pierwsze liczbę 15 (wynikiem były, oczywiście, liczby 3 i 5). Aby otrzymać rezultaty o znaczeniu praktycznym, należałoby skonstruować układ liczący 200 kubitów, na który dałoby się oddziaływać w sposób selektywny, a jednocześnie chronić go od oddziaływania z otoczeniem.

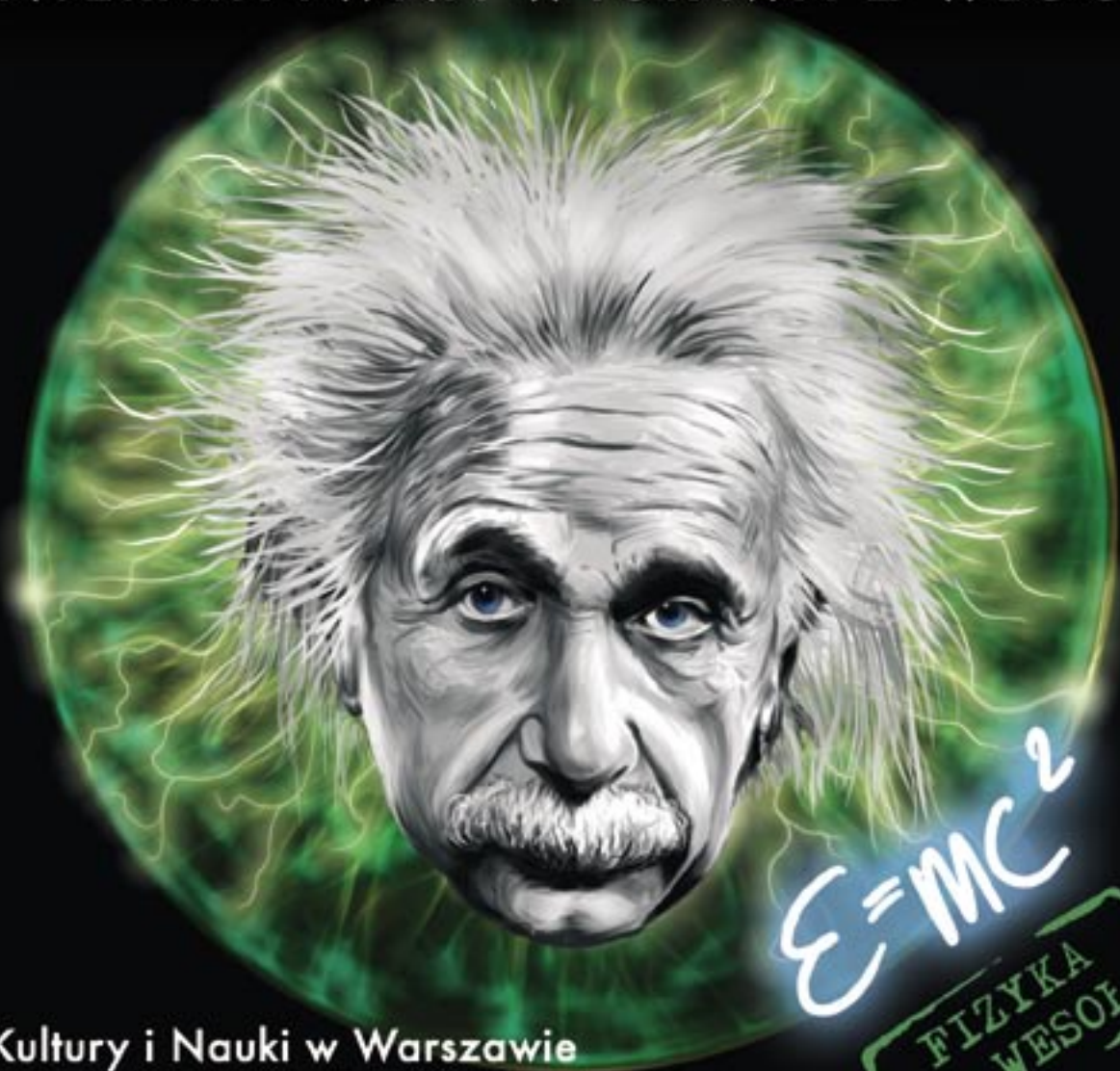
Dziś trudno wyrokować, czy do roku 2020 zostanie zbudowany użyteczny komputer kwantowy, na którym będzie można wykonać algorytm kwantowy w czasie krótszym niż ten potrzebny do obliczeń klasycznych. Z drugiej strony dotychczasowy postęp technologiczny pozwala przypuszczać, że w tym czasie powstaną nowe realizacje bramek kwantowych, co przybliży powstanie komputera kwantowego. Dlatego jesteśmy przekonani, że warto pracować nad algorytmami kwantowymi. Na razie wśród autorów takich algorytmów trudno znaleźć nazwiska polskie, choć mamy już spore osiągnięcia w innych dziedzinach teorii przetwarzania informacji kwantowej. Ponieważ jednak w roku 2007 przy Uniwersytecie Gdańskim powstało Krajowe Centrum Informatyki Kwantowej, można mieć nadzieję, że także u nas powstaną nowatorskie algorytmy kwantowe.

DR H.AB. PAWEŁ HORODECKI pracuje na Wydziale Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Gdańskiej, specjalizuje się w kwantowej teorii informacji i podstawach mechaniki kwantowej, współodkrywca splątania związanej (bound entanglement).

PROF. DR H.AB. KAROL ŻYCZKOWSKI pracuje w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego i Centrum Fizyki Teoretycznej PAN, specjalizuje się w teorii układów nieliniowych, klasycznym i kwantowym chaosie, informacji kwantowej oraz teorii glosowań.

ZABAWY Z EINSTEINEM

INTERAKTYWNA WYSTAWA Z WŁOCH



$E=mc^2$

FIZYKA
NA WESOŁO

Pałac Kultury i Nauki w Warszawie
9.10.2007 – 15.09.2008
godz. 9.00 - 18.00



PKO BANK POLSKI

KONTAKT
KONKURSY I WYKONANIA


museo tridentino
di scienze naturali
Trento - Italy



Pałac Kultury i Nauki Warszawa


POLSKIE
TOWARZYSTWO
UBEZPIECZEN

TVP 3
WARSZAWA

gazeta
WARSZAWA

wiedza i życie

 WP.PL

ZET

tel./fax 022 656 74 28-29

www.kontakt.gda.pl

biuro@kontakt.gda.pl