

Michał Dąbrowski
Wydział Fizyki

Kwantowy światłowód

Żyjemy w czasach, gdy na językach wszystkich, od laików czytających czasopisma popularnonaukowe, do poważnych naukowców uprawiających równie poważną naukę, jest komputer kwantowy. Chyba nie ulega żadnym wątpliwościom, że budowa takiego komputera jest możliwa. Oczywiście pojawiają się rozmaite problemy, w większości związane z trudnościami przy manipulacji kubitami kwantowego komputera. Ludzie skonstruowali rozmaite przykłady komputerów pracujących w oparciu o zasady mechaniki kwantowej – wśród najpopularniejszych można wymienić komputer złożony z łańcuszka połączonych ze sobą jonów, sterowanych zmianą pola magnetycznego, komputer na kropkach kwantowych, który korzysta z gromadzenia się ładunków ekscytonowych, czy też prace nad urządzeniem, w którym elementami są fotony – ich polaryzacją możemy sterować impulsami lasera. Dotychczas udało się za pomocą takich urządzeń dokonać faktoryzacji (rozkładu na czynniki pierwsze) liczby 15, co nie jest specjalnie trudne nawet dla ucznia pierwszej klasy szkoły podstawowej. Rozwiązaniem istniejących problemów z budową jednego superkomputera może być zastosowanie sieci wielu rozproszonych po świecie kwantowych komputerów. Każdy z nich pracowałby z osobna, połączony z innymi podobnymi urządzeniami siecią kwantowych linii przesyłowych, w analogii do istniejącej sieci światłowodowej, doskonale spełniającej swoje zadanie w przypadku klasycznych pecetów. Przypuśćmy, że marzenia naukowców ziściły się właśnie dzisiaj i zbudowano komputer, o rzędy wielkości przekraczający możliwości obliczeniowe współczesnych, klasycznych komputerów – komputer oparty na zasadzie „programowania rozproszonego”. Czy możemy zatem usiąść wygodnie na krześle (przed komputerem?), założyć ręce za głowę i rozwiązać trapiące ludzkość problemy?

Otóż odpowiedź, jak dla większości podobnych pytań brzmi oczywiście: nie, nie możemy sobie na to pozwolić! Natura stawia przed nami wymagania, wśród których nierzadko bywają poważne przeszkody, utrudniające postęp technologiczny. Jedną z takich przeszkód jest dekoherencja układów kwantowych. Potęgą, za którą kryją się możliwości drzemiące w kwantowym komputerze, jest efekt zwany splątaniem cząstek. Polega on na tym, że pomiar stanu jednej cząstki ze splątanej pary wpływa na stan drugiej cząstki (wbrew pozorom nie jest złamana szczególna teoria względności). Dekoherencja polega na stopniowym niszczeniu splątania, wraz z upływem czasu. Jako że właśnie splątanie sprawia, że zdolności obliczeniowe kwantowego komputera rosną wykładniczo wraz ze wzrostem liczby tworzących do kubitów (w przypadku komputera klasycznego jest to wzrost liniowy), bardzo zależy nam na utrzymaniu koherentnych stanów splątanych cząstek. Wyobraźmy sobie, że wykonaliśmy pierwszą część obliczeń na komputerze kwantowym zlokalizowanym na Wydziale Fizyki UW, zaś następnym etapem jest przesłanie wyniku do dalszych obliczeń na komputer zlokalizowany w Princeton. Musimy przesłać sygnał przez pół globu. Najlepiej nadają się do tego celu światłowody, z powodzeniem umieszczane pod powierzchnią oceanu. Zgodnie z prawami fizyki, sygnał zanika eksponencjalnie wraz z przebytą odległością. Obecnie do wzmacniania sygnału w światłowodach co kilkadziesiąt kilometrów umieszcza się stacje wzmacniające sygnał. Zasadnicze pytanie brzmi: jak wzmocnić sygnał kwantowy, który oprócz zwykłego zmniejszania się prawdopodobieństwa dotarcia do celu, zmniejsza również swój stopień splątania?

Rozwiązaniem problemu wydaje się być zastosowanie światłowodu kwantowego.

Urządzenie składa się w dwóch linii przesyłowych: jedną z nich przesyłane są stany splątane – naukowcy potrafią już przysyłać takie stany na odległość setek metrów. Drugą linię przesyłową stanowi zwykły światłowód, do którego wpuszczamy sygnał laserowy. Wydaje się całkowicie niejasne? Sprawę skomplikujemy jeszcze bardziej, stawiając co kilka kilometrów stacje wzmacniające, które oprócz standardowych urządzeń wzmacniających sygnał z lasera, zawierają również bańkę szklaną wypełnioną parami metali alkaicznych. Skonstruowaliśmy właśnie urządzenie, które z powodzeniem możemy nazwać kwantową pamięcią. Jak to, do licha, działa?

Przypuśćmy, że z komputera w Warszawie wysłaliśmy jeden kubit ze splątanej pary cząstek wraz z odpowiadającym mu impulsem laserowym. Całość wędruje światłowodami (klasycznym i kwantowym) wzdłuż linii przesyłowej, aż nadchodzi moment, gdy układ prawie utracił swoje splątanie i zaraz stanie się bezużyteczny, aby go dalej przysyłać. W tym momencie sygnał trafia na stację wzmacniającą. Sygnał laserowy oświetla gaz w komórce szklanej, przygotowując go do dalszego użycia (możemy sobie wyobrażać, że wszystkie atomy gazu w komórce mają po tym zabiegu identycznie ustawione spiny). W tym momencie splątana cząstka pada na komórkę z parami metali szlachetnych i w wyniku wzajemnego oddziaływania z układem jej stan jest kopiowany na kolejne pary atomów. Nasza pierwotna para splątana ulega zniszczeniu (zakaz klonowania w mechanice kwantowej), ale osiągnęliśmy zamierzony cel – mamy teraz kolejne pary splątane, które możemy przesłać do następnej stacji wzmacniającej. Jednocześnie z powstaniem nowych kubitów sygnał laserowy jest wzmacniany, dzięki czemu może zostać przesłany razem ze stanem splątanym i spowodować, że kolejne atomy w komórce z gazem ustawią się dokładnie tak samo, jak poprzednie. Dzięki zastosowanej procedurze wyniki naszych obliczeń docierają do Princeton, gdzie naukowcy wykorzystują je do dalszych obliczeń, coraz bardziej przybliżając nas do sytuacji, gdy rzeczywiście nie pozostanie nam do zrobienia nic więcej, jak tylko założyć ręce za głowę i czekać, aż kolejne problemy trapiące ludzkość zostaną rozwiązane.

Opisany tutaj protokół kwantowej komunikacji może nieco przypominać opowiadanie science-fiction. Jednak podobne urządzenia, oczywiście na mniejszą skalę i abstrahując od górnolotnych zastosowań, są przedmiotem badań zespołów zajmujących się doświadczalną optyką kwantową. Osobiście uważam, że zastosowanie kwantowego światłowodu ma przed sobą świetlaną przyszłość. Opisane urządzenie, sądząc po obecnym tempie rozwoju kryptografii kwantowej, będzie także służyć do bezpiecznego przesyłania informacji, czym zainteresowane są przede wszystkim banki, nie stroniące pieniędzy na badania w tym zakresie. W sytuacji gdy dekoherencja przeszkadza w budowie dużych, kwantowych superkomputerów (notabene wystarczyłby model składający się z kilkudziesięciu cząsteczek), nie pozostaje nic innego niż rozproszenie obliczeń i powstanie sieci na wzór dzisiejszego Ethernetu. Czyż jeszcze trzydzieści lat temu nie wydawało się pomysłem wręcz kuriozalnym, że może istnieć globalna sieć komputerów połączonych ze sobą, dzięki czemu nasze społeczeństwo jest niekiedy nazywane „informacyjnym”? Uważam, że za kilkadziesiąt lat projekt kwantowego światłowodu przez Atlantyk stanie się faktem, w czym udział może mieć pokolenie młodych przyszłych fizyków, na razie jeszcze studentów, zainteresowanych piękną dziedziną wiedzy, jaką jest optyka kwantowa i związana z nią kwantowa teoria informacji.