

KWANTOWA TELEPORTACJA

Fantastyczne marzenie o przesyłaniu przedmiotów z jednego miejsca na drugie zostało zrealizowane, choć na razie tylko dla cząstek światła

Anton Zeilinger

Nieustraszonego badacza wchodzi do specjalnej komory, błyskają światła, coś dziwnie szumi i nasi bohaterowie znikają, by pojawić się na odległej planecie – oto typowa scena z filmowych i telewizyjnych opowieści science fiction. Podróżowanie do bardzo odległych miejsc bez konieczności pokonywania niezliczonych kilometrów jakimś wehikułem, w którym serwują kiepskie posiłki z kartoników, to marzenie. Choć teleportacja dużych przedmiotów lub ludzi nadal pozostaje w sferze fantazji, kwantowa teleportacja fotonów – cząstek światła – jest już laboratoryjną rzeczywistością.

Kwantowa teleportacja wykorzystuje najbardziej podstawowe i dziwne własności mechaniki kwantowej – działu fizyki, który powstał w pierwszym ćwierćwieczu XX wieku, aby wyjaśnić procesy zachodzące w pojedynczych atomach. Od samego początku teoretycy zdawali sobie sprawę, że fizyka kwantowa prowadzi do wielu nowych zjawisk, niekiedy sprzecznych ze zdrowym rozsądkiem. Osiągnięcia techniczne ostatniego dwudziestopięcioletnia umożliwiły badaczom przeprowadzenie wielu eksperymentów, które nie tylko ujawniły podstawowe, czasami dziwne, aspekty mechaniki kwantowej, ale również – jak w przypadku teleportacji – pozwoliły uzyskać początkowo niewyobrażalne wyniki.

W historiach przedstawianych w filmach i książkach fantastycznonaukowych teleportacja często pozwala na dokonywanie błyskawicznych przemieszczeń naruszających ograniczenie szybkości, wprowadzone przez Einsteina. Ten genialny uczony wydedukował ze swojej teorii względności, że nic nie może poruszać się szybciej od światła

[patrz: Raymond Y. Chiao, Paul G. Kwiat i Aephraim M. Steinberg, „Szybciej niż światło?”; *Świat Nauki*, październik 1993]. Teleportacja jest też mniej uciążliwa niż większość zwykłych sposobów podróżowania. Podobno Gene Roddenberry, twórca *Star Trek*, wymyślił „transportującą wiązkę”, aby zaoszczędzić sobie wydatków związanych z symulacjami lądowań i startów na dziwnych planetach.

Procedura teleportacji spotykana w fantastyce naukowej zależy od inwencji autora, ale ogólnie polega na tym, że pewne urządzenie skanuje oryginalny obiekt, który ma być teleportowany, żeby uzyskać pełną informację niezbędną do jego opisania. Nadajnik przekazuje ją następnie do stacji odbiorczej, która na tej podstawie odtwarza oryginał. Czasami do stacji odbiorczej przekazywany jest również materiał, z którego zbudowano oryginał, jako pewnego rodzaju „energię”; w niektórych zaś przypadkach replikę tworzy się z atomów i cząsteczek znajdujących się już na stacji odbiorczej.

Taki sposób teleportacji jest sprzeczny z podstawowymi prawami mechaniki kwantowej. Zasada nieoznaczoności Heisenberga mówi, że nie można jednocześnie znać położenia i pędu cząstki. A zatem nie da się dokonać dokładnego skanu obiektu, który ma być teleportowany, gdyż prędkość lub położenie każdego z jego atomów mogą być określone tylko z pewną dokładnością. Zasada nieoznaczoności Heisenberga odnosi się i do innych par róż-

nych wielkości, co uniemożliwia dokładny pomiar stanu kwantowego obiektu. Tymczasem takie pomiary byłyby niezbędne do pełnego opisu obiektu, który by teleportowano. (W *Star Trek* „kompensator Heisenberga” w jakiś niezwykły sposób pokonuje te trudności.)

W roku 1993 zespół fizyków uporał się z tym stereotypowym poglądem, gdy odkrył sposób na wykorzystanie mechaniki kwantowej do teleportacji. Członkowie tego zespołu: Charles H. Bennett z IBM; Gilles Brassard, Claude Crépeau i Richard Josza z University of Montreal, Asher Peres z Politechniki Technion w Izraelu i William K. Wootters z Williams College, wykazali, że dziwną, ale podstawową własność mechaniki kwantowej – splątanie – można wykorzystać do obejścia ograniczeń nakładanych przez zasadę nieoznaczoności Heisenberga, nie naruszając jej przy tym.

Splątanie

Jest rok 2100. Znajomy, który lubi bawić się fizyką i różnymi sztuczkami, przyniósł kilka par kości do gry. Możesz rzucić kolejno każdą parę, ale tylko raz. Ostrożnie rzucasz pierwszą parę, pamiętając o zawodzie, jaki cię spotkał podczas ostatniego Bożego Narodzenia z czarną mikrodziurą: dwie trójki. Rzucając następną parę – dwie szóstki. Kolejną – dwie jedynki. To niesamowite, zawsze wyrzucasz dublety!

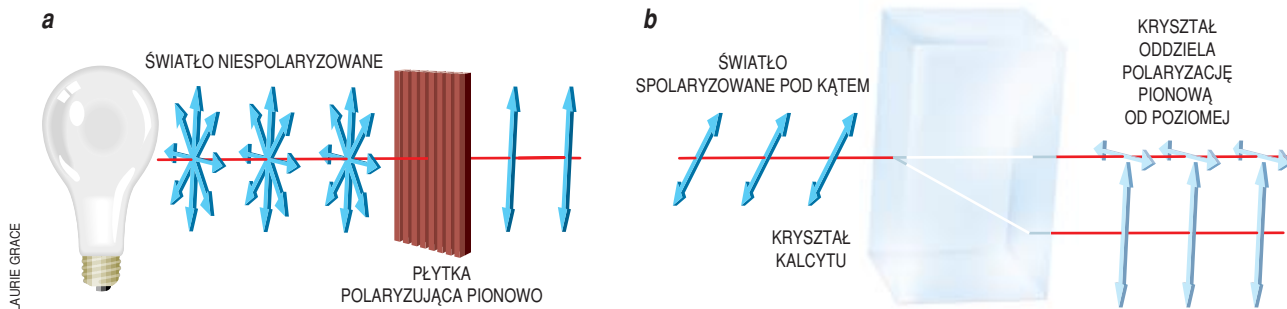
Kości w tej opowieści zachowują się, jakby były cząstkami splątanymi kwantowo. Rzucając każdą oddzielnie, otrzy-

DO TERMINALU TELEPORTOWEGO Grand Central Station w Nowym Jorku przybyszą podróżni. Choć teleportowanie dużych ciał, nie mówiąc już o żywych organizmach, nigdy nie będzie możliwe w praktyce (oczywiście poza historiami science fiction), wykazano, że można teleportować proste stany kwantowe.

< Teleport Exit
< Baggage
< Hover Cabs
< Skyway
< Rentals

QUANTUM TRANSPORT ANALYZER





ŚWIATŁO NIESPOLARYZOWANE składa się z fotonów spolaryzowanych we wszystkich kierunkach (a). W strumieniu światła spolaryzowanego pole elektryczne wszystkich fotonów drga wzdłuż tego samego kierunku. Kryształ kalcytu (b) rozszczepia wiązkę światła na dwie i grupuje fotony spolaryzowane w kierunku osi kryształu w jedną wiązkę, a spolaryzowane w kierunku prostopadłym w drugą. Fotony spolaryzowane pod innym kątem przechodzą w stan superpozycji, polegający na tym, że są w pewnym sensie w obu wiązkach jednocześnie. Każdy taki foton może zostać wykryty w jednej lub drugiej wiązce z prawdopodobieństwem zależnym od kąta. Z uważa się na to, że w grę wchodzi tylko prawdopodobieństwa, ustalenie nieznannej polaryzacji pojedynczego fotonu jest niemożliwe.

mujesz jak zwykle przypadkowe wyniki. Kości nie są więc oszukane, ale rzucając jedną, a następnie jej splątanego partnera, zawsze otrzymujesz ten sam wynik. Takie zachowanie realnych splątanych cząstek zostało już zademonstrowane i podjęto nad nim intensywne badania. W typowym doświadczeniu pary atomów, jonów lub fotonów zastępują kości, a takie własności jak polaryzacja odgrywają rolę różnych ścianek kości.

Rozpatrzmy dwa fotony, których polaryzacje są splątane i przypadkowe, choć identyczne. Strumień światła, a nawet pojedyncze fotony reprezentują drgania pola elektrycznego. Polaryzacja to uporządkowane drgania w pewnym wyróżnionym kierunku [ilustracja powyżej]. Przypuśćmy, że Alicja ma jeden ze splątanych fotonów, a Broniek jego partnera. Gdy Alicja mierzy polaryzację swojego fotonu, aby sprawdzić, czy jest ona pozioma czy też pionowa, każda z tych możliwości jest równie prawdopodobna. To samo dotyczy fotonu Bronka, ale splątanie zapewnia, że wynik jego po-

miarów będzie taki sam jak Alicji. Gdy tylko okaże się, że jej foton jest spolaryzowany pionowo, będzie wiedziała, że foton Bronka też ma taką samą polaryzację. Zanim Alicja tego nie zmierzy, żaden z fotonów nie będzie miał określonej polaryzacji; stan splątania oznacza, że pomiary Alicji i Bronka dają takie same polaryzacje.

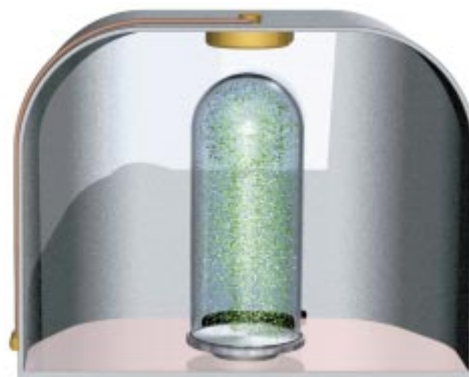
Dodatkową zadziwiającą własnością tego procesu jest to, że nie ma znaczenia, jak bardzo Alicja i Broniek są od siebie oddaleni. Wynik pomiaru będzie zawsze taki sam, jeśli tylko fotony pozostają kwantowo splątane. Nawet jeśli Alicja znajduje się na Alfa Centauri, a Broniek na Ziemi, wyniki ich pomiarów będą identyczne, gdy uda im się je porównać. Wydaje się, że foton Bronka jest w jakiś niezwykle sposób natychmiast zmieniany w wyniku pomiaru dokonanego przez Alicję, i odwrotnie.

Można próbować wyjaśnić zjawisko splątania, wyobrażając sobie, że każda z cząstek zaopatrzona jest w pewne zakodowane instrukcje. Niewykluczone,

że gdy splątujemy dwie cząstki, dokonujemy synchronizacji pewnego ukrytego mechanizmu, który determinuje wynik przyszłego pomiaru. To tłumaczyłoby tajemniczy wpływ pomiaru wykonywanego przez Alicję na cząstkę Bronka. W latach sześćdziesiątych irlandzki fizyk John Bell wykazał, że w pewnych sytuacjach takie wyjaśnienie kwantowego splątania poprzez „ukryte zmienne” prowadziłoby do innych wyników niż w standardowej mechanice kwantowej. Eksperymenty potwierdziły przewidywania mechaniki kwantowej. Okazało się, że ukryte zmienne nie mogą istnieć.

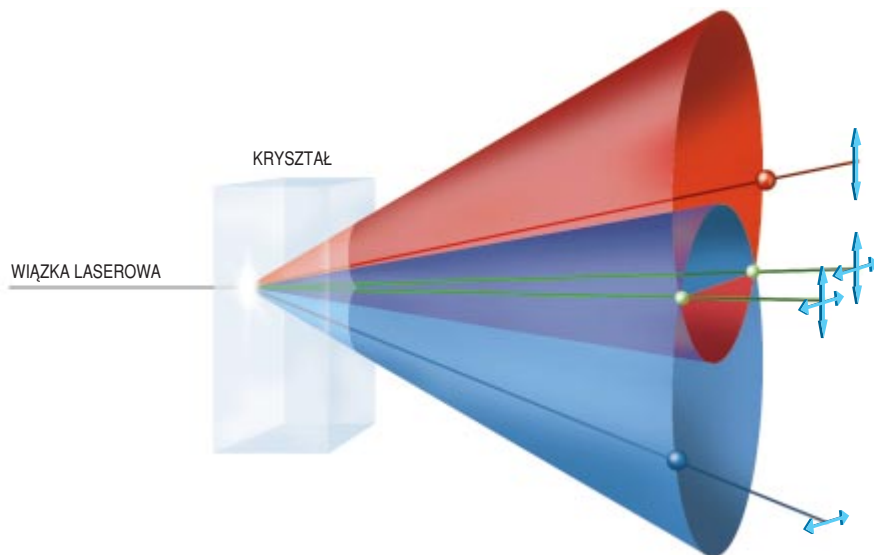
Austriacki fizyk Erwin Schrödinger, jeden ze współtwórców mechaniki kwantowej, nazwał splątanie jej „zasadniczą własnością”. Splątanie jest zwykle nazywane efektem EPR, a splątane pary cząstek – parami EPR, na cześć Einsteina, Borysa Podolskiego i Nathana Rosena, którzy w 1935 roku analizowali zjawisko splątania odległych cząstek. Einstein mówił o nim jako o „tajemni-

PRZYGOTOWANIE DO KWANTOWEJ TELEPORTACJI...



KWANTOWA TELEPORTACJA CZŁOWIEKA (niemożliwa w praktyce, ale dobra jako przykład pobudzający wyobraźnię) rozpoczynałaby się od umieszczenia go w komorze skanującej (z lewej) i napełnienia

sąsiedniej komory jakimiś cząstkami o takiej samej ogólnej masie (zielony). Zostały one wcześniej kwantowo splątane ze swoimi partnerami znajdującymi się w odległej komorze odbiorczej (z prawej).



LAURIE GRACE (z lewej); P. G. KWIAT i M. RECK (Instytut Fizyki Doświadczalnej, Uniwersytet Wiedeński) (z prawej)

PARY SPLĄTANYCH FOTONÓW powstają, gdy wiązka lasera przechodzi na przykład przez kryształ beta boranu baru. W tym kryształe od czasu do czasu ultrafioletowy foton przemienia się w dwa fotony o mniejszej energii; jeden z nich jest spolaryzowany pionowo (na czerwonym stożku), a drugi poziomo (na niebieskim stożku). Jeśli te fotony na dodatek poruszają się wzdłuż linii przecięcia stożków (zielony), to żaden z nich nie ma określonej polaryzacji, ale ich względne polaryzacje są komplementarne; fotony zostają wówczas splątane. Kolorowy obraz (z prawej) jest zdjęciem takiego zmienionego światła. Kolory nie odpowiadają kolorom światła.

czym działaniu na odległość”. Gdyby próbowano wyjaśnić te wyniki za pomocą sygnałów przesyłanych między fotonami, to sygnały powinny się poruszać z prędkością większą od prędkości światła. Oczywiście, byli tacy, którzy rozważali, czy efektu tego nie dałoby się wykorzystać do przekazywania informacji z prędkością większą od prędkości światła.

Niestety, prawa kwantowe na to nie pozwalają. Każdy lokalny pomiar wykonany na pojedynczym izolowanym fotonie daje zupełnie przypadkowy wynik i dlatego nie może przetransmitować informacji z daleka. Nie mówi on nic więcej niż to, jakie będzie prawdopodobieństwo wyników pomiarów wykonanych gdzieś daleko, w zależności od tego, co

było tam mierzone. Niemniej jednak można sprytnie wykorzystać splątanie do kwantowej teleportacji.

Tajemnica splątanych fotonów

Alicja i Broniek mają zamiar teleportować foton. Przygotowując się do tego przedsięwzięcia, dzielą się splątaną parą pomocniczych fotonów (A i B). Alicji przypada foton A, a Bronkowi B. Nie dokonując na nich żadnych pomiarów, każde przechowuje swój foton, nie zakłócając ich delikatnego stanu splątania [górna ilustracja na następnej stronie].

W odpowiednim czasie Alicja otrzymuje trzeci foton, nazwijmy go fotonem X, który zamierza teleportować do Bron-

ka. Wprowadzi nie wie, w jakim stanie znajduje się foton X, ale chciałaby, żeby Broniek miał foton o tej samej polaryzacji. Nie może po prostu zmierzyć polaryzacji tego fotonu i przesłać wyniku pomiaru. Na ogół bowiem rezultat nie będzie identyczny z początkowym stanem fotonu. Na tym właśnie polega ograniczenie wynikające z zasady nieoznaczoności Heisenberga.

Aby teleportować foton X, Alicja dokonuje pomiaru wspólnej własności fotonów X i A, nie wyznaczając jednak ich indywidualnych polaryzacji. Może się na przykład okazać, że polaryzacje fotonów są wzajemnie prostopadłe, to jednak nie pozwala na określenie polaryzacji któregośkolwiek z nich z osobna. Jednoczesny pomiar polaryzacji foto-

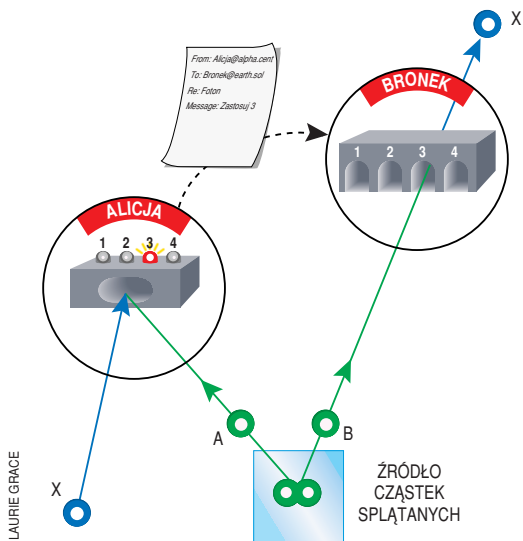
...POMIARY KWANTOWE...



WSPÓLNY POMIAR stanu tych cząstek i wszystkich cząstek teleportowanego śmiałka (z lewej) zmienia ich stan w przypadkowy stan kwantowy, wytwarzając jednocześnie bardzo dużo przy-

padkowych, ale ważnych danych – dwa bity na każdy stan elementarny. Pomiar ten natychmiast zmienia stan kwantowy cząstek znajdujących się w komorze odbiorczej.

DAVID PIERSTEIN



IDEALNY PROCES KWANTOWEJ TELEPORTACJI polega na tym, że Alicja-nadawca i Bronka-odbiorca dzielą się parą splątanych cząstek A i B (zielony). Alicja ma dodatkowo cząstkę znajdującą się w nieznanym stanie kwantowym X (niebieski). Alicja dokonuje pomiaru stanu Bella na cząstkach A i X, uzyskując jeden z czterech możliwych wyników. Następnie w tradycyjny sposób informuje Bronka o wyniku swojego pomiaru. W zależności od rezultatu uzyskanego przez Alicję Bronka albo nie zmienia stanu swojej cząstki (1), albo go obraca (2, 3, 4). W każdym przypadku uzyskuje dokładną kopię cząstki X.

nów A i X nosi nazwę pomiaru stanu Bella. Pomiar dokonany przez Alicję jest związany z subtelnym efektem: powoduje on jednoczesne skorelowanie fotonu Bronka z rezultatem jej pomiaru i wyjściowym (początkowym) stanem fotonu X. W rzeczywistości foton Bronka znajduje się teraz albo dokładnie w takim samym stanie, w jakim znajduje się foton X, albo w stanie zmodyfikowanym w prosty sposób.

Aby zakończyć proces teleportacji, Alicja musi przekazać Bronkowi wiadomość w tradycyjny sposób, na przykład

zatelefonować do niego lub wysłać list. Po otrzymaniu tej wiadomości Bronka może zmienić swój foton B w taki sposób, by stał się dokładną repliką wyjściowego fotonu X. W jaki sposób Bronka musi zmienić swój foton, zależy od wyniku pomiaru Alicji. Są tylko cztery możliwości, odpowiadające czterem związkom kwantowym między jej fotonami A i X. Typowa transformacja, jaką musi wykonać Bronka polega na obrocie polaryzacji fotonu o 90° , co można osiągnąć, przepuszczając go przez kryształ o odpowiednich własnościach optycznych.

Przypadek zadecyduje, którą z tych czterech możliwości uzyska Alicja i nie będzie to zależało od wyjściowego stanu fotonu X. Dlatego Bronka nie wie, co powinien zrobić ze swoim fotonem, zanim nie otrzyma wiadomości o wyniku pomiaru Alicji. Można powiedzieć, że foton Bronka chwilowo zawiera całą informację o fotonie Alicji, przekazaną dzięki mechanice kwantowej. Jednak aby wykorzystać tę informację, Bronka musi czekać na wiadomość przesłaną w zwykły sposób – złożoną z dwóch bitów i przekazaną z prędkością nie większą od prędkości światła.

Sceptycy będą pewnie rozczarowani, że teleportowany został jedynie stan polaryzacji fotonu, lub ogólniej, jego stan kwantowy, a nie sam foton. Ponieważ jednak stan kwantowy fotonu w pełni go identyfikuje, teleportowanie jego stanu jest całkowicie równoważne z tele-

portowaniem samej cząstki [ramka na stronie 31].

Zauważmy, że kwantowa teleportacja nie powoduje pojawienia się dwóch kopii fotonu X. Klasyczną informację można kopiować dowolną liczbę razy, natomiast kopiowanie informacji kwantowej nie jest możliwe. Wynika to z twierdzenia o zakazie klonowania, udowodnionego w roku 1982 przez Woottersa i Wojciecha H. Żurka z Los Alamos National Laboratory. (Gdybyśmy mogli klonować stan kwantowy, można by wykorzystywać kłony do naruszania zasady Heisenberga.) Pomiar dokonany przez Alicję splątuje jej foton A z fotonem X, przy czym foton X zapomina, w jakim stanie się początkowo znajdował. Jako składnik splątanej pary nie ma swojego własnego stanu polaryzacji. A zatem Alicja całkowicie traci możliwość uzyskania informacji o początkowym stanie fotonu X.

Omijamy Heisenberga

Co więcej, informacja o stanie fotonu X została przekazana do Bronka w taki sposób, że ani Alicja, ani on sam nie dowiedzą się, jaki to był stan. Wynik pomiaru Alicji, całkowicie przypadkowy, nic im nie mówi o tym stanie. Dzięki temu proces ten omija zasadę Heisenberga, która uniemożliwia pełne określenie stanu kwantowego cząstki, ale nie zabrania teleportowania pełnego stanu, jeśli tylko nie staramy się stwierdzić, jaki to stan.

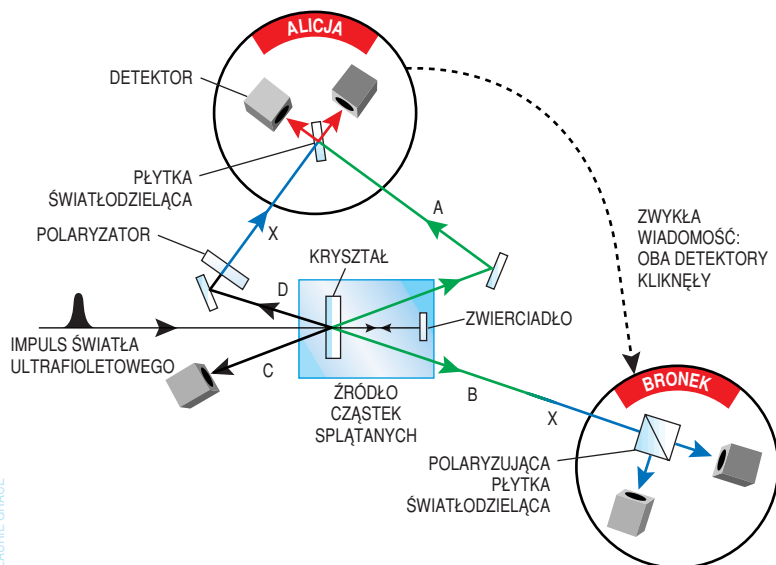
Teleportowana informacja kwantowa nie jest materialnie przekazywana od Alicji do Bronka. Materialnie zostaje jedynie dostarczona wiadomość o wyniku pomiaru wykonanego przez Alicję, dzięki czemu Bronka wie, jak ma zmienić swój foton, ale informacja ta nie mówi o stanie fotonu X.

...PRZEKAZYWANIE PRZYPADKOWYCH DANYCH...



WYNIKI POMIARÓW muszą zostać przekazane do komory odbiorczej w tradycyjny sposób. Szybkość tego procesu nie może prze-

kraczać prędkości światła, co uniemożliwia teleportowanie z prędkością większą od prędkości światła.



DOŚWIADCZENIE INSRBUCKIE zaczyna się od impulsu ultrafioletowego światła laserowego, który przebiegając przez kryształ, wytwarza splątaną parę fotonów A i B, kierowanych odpowiednio do Alicji i Bronka. Impuls odbity z powrotem do kryształu wytwarza dwa dodatkowe fotony C i D. Polaryzator przygotowuje foton D w odpowiednim stanie X. Foton C trafia do detektora, potwierdzając w ten sposób, że foton X został wysłany do Alicji. Korzystając z płytki światłodzielącej, Alicja łączy fotony A i X [górny rysunek na następnej stronie]. Jeżeli oba detektory Alicji zarejestrują foton (co zdarza się w 25% przypadków), teleportacja udaje się i Alicja w zwykły sposób informuje o tym Bronka, który używając polaryzującej płytki światłodzielącej z kryształu kalcytu, sprawdza, że jego foton uzyskał taką samą polaryzację jak foton X.

W jednym przypadku na cztery Alicji dopisuje szczęście, okazuje się, że związek między fotonem A i X jest taki sam jak między A i B i foton Bronka natychmiast staje się identyczną repliką jej fotonu. Można sądzić, że informacja ta została natychmiast przekazana, naruszając ograniczenie prędkości Einsteina. Tej dziwnej własności nie da się jednak wykorzystać do przekazywania informacji, gdyż Bronka nie może wiedzieć, że jego foton jest kopią fotonu Alicji. Dowie się o tym dopiero po otrzymaniu od Alicji wiadomości o wynikach jej pomiaru stanu Bella, która zostanie prze-

kazana w tradycyjny sposób. Przypuścimy, że Bronka stara się odgadnąć wynik pomiaru Alicji i wówczas teleportacja będzie natychmiastowa. Niestety, w 75% przypadków pomyli się, a nawet gdy poprawnie odgadnie wynik, nie będzie wiedział, że mu się udało. Jeśli przygotuje foton zgodnie ze swoim przypuszczeniem co do wyniku pomiaru Alicji, wyniki będą takie same, jakby wybierał fotony z wiązki o przypadkowej polaryzacji. W ten sposób teoria względności Einsteina triumfuje – nawet za pomocą tego tajemniczego natychmiastowego działania na odległość

w mechanice kwantowej nie można przesyłać informacji z prędkością większą od prędkości światła.

Budowanie teleportera

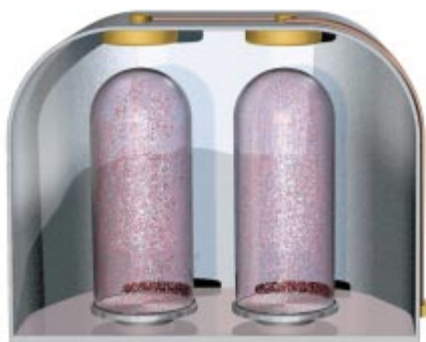
Mogłoby się wydawać, że przedstawiony teoretyczny model pozwala łatwo zbudować teleporter. Niestety, wiąże się to nadal z ogromnymi trudnościami eksperymentalnymi. Splątane pary fotonów rutynowo wytwarza się już od 10 lat, ale nigdy wcześniej nie udało się wykonać pomiaru stanu Bella na dwóch niezależnych fotonach.

Efektywną metodą wytwarzania splątanej pary fotonów jest spontaniczna parametryczna konwersja: pojedynczy foton z silnej wiązki laserowej biegnący w specjalnym kryształku może niekiedy przemienić się w dwa nowe fotony, które są splątane w taki sposób, że podczas pomiaru zawsze będą miały przeciwne polaryzacje [górna ilustracja na stronie 27].

Znacznie trudniej splatać dwa niezależne fotony, które już istnieją, a to jest niezbędne do przeprowadzenia pomiaru stanu Bella. Te dwa fotony (A i X) muszą jakoś stracić swoje cechy. W roku 1997 moja grupa (Dik Bouwmeester, Jian-Wei Pan, Klaus Mattle, Manfred Eibl i Harald Weinfurter), wówczas z Universität Innsbruck, do przeprowadzenia eksperymentu teleportacyjnego zastosowała pewne szczególne rozwiązanie tego problemu [ilustracja z lewej].

W naszym doświadczeniu krótki impuls światła ultrafioletowego z lasera przechodzi przez kryształ i wytwarza splątane fotony A i B. Jeden z nich zostaje przesłany Alicji, a drugi Bronkowi. Zwierciadło kieruje impuls światła ultrafioletowego z powrotem do kryształku, gdzie może powstać inna para fotonów C i D. (Te fotony też będą splątane,

...REKONSTRUKCJA PODRÓŻNIKA



ODBIORNIK REKONSTRUUJE PODRÓŻNIKA, dokładnie odtwarzając stan kwantowy każdej jego cząstki przez dopasowanie sta-



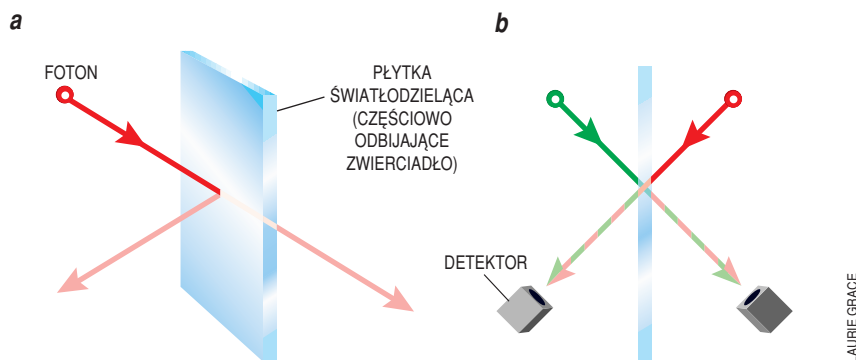
nu partnerskich cząstek zgodnie z przypadkowymi danymi pomiarów, przesłanymi z komory skaningowej.

ale my ich nie wykorzystujemy). Foton C trafia do detektora, który sygnalizuje, że foton D jest przygotowany do teleportowania. Foton D przechodzi przez polaryzator, który można dowolnie zorientować. Otrzymujemy w ten sposób foton X, który będzie teleportowany, i przesyłamy go Alicji. Po przejściu przez polaryzator foton X staje się niezależnym fotonem i nie jest już z niczym splątany. Choć znamy jego polaryzację, gdyż wiemy, jak został ustawiony polaryzator, Alicja tego nie wie. Wykorzystujemy ten sam impuls światła ultrafioletowego i dzięki temu mamy pewność, że Alicja otrzymała fotony A i X w tym samym czasie.

Teraz stajemy przed problemem pomiaru stanu Bella. Aby tego dokonać, Alicja łączy dwa swoje fotony (A i X), korzystając z półprzepuszczalnej płytki pokrytej bardzo cienką warstwą odbijającą, która sprawia, że padający na nią foton ma 50% szans, by przejść przez nią lub zostać odbity. W języku kwantowym stan tego fotonu staje się superpozycją tych dwóch możliwości [ilustracja z prawej].

Przypuśćmy, że do zwierciadła docierają jednocześnie dwa fotony, po jednym z każdej strony; przy czym ich tor są tak dobrane, by tor odbitego fotonu pokrywał się z kierunkiem przepuszczanego i odwrotnie. Detektor znajduje się w pewnej odległości od zwierciadła na końcu każdego toru. Zwykle te dwa fotony odbiłyby się od zwierciadła niezależnie i z prawdopodobieństwem 50% zostałyby zarejestrowane przez każdy z detektorów. Jeśli jednak te fotony są nierozróżnialne i jednocześnie docierają do zwierciadła, to zachodzi kwantowa interferencja: niektóre stany kwantowe znoszą się i nie pojawiają się wcale, a inne są wzmacniane i występują częściej. Gdy fotony ulegają takiej interferencji, mają jedynie 25% szans na dotarcie do obu detektorów. Co więcej, sytuacja taka odpowiada pomiarowi jednego z czterech możliwych stanów Bella tych dwóch fotonów – to przypadek, który wcześniej nazwaliśmy szczęśliwym. W pozostałych 75% przypadków te dwa fotony trafiają do jednego detektora, co odpowiada innym trzem stanom Bella, ale niestety nie można ich rozróżnić.

Gdy dwa detektory Alicji jednocześnie zarejestrują po jednym fotonie, foton Bronka natychmiast staje się repliką oryginalnego fotonu X. Sprawdził, że nastąpiła teleportacja, pokazując, że polaryzacja fotonu Bronka jest taka sama jak ta, którą nadaliśmy fotonowi X. Nasz eksperyment nie był doskonały, poprawną polaryzację zarejestrowaliśmy w 80% sytuacji (dla przypadkowych fotonów



PŁYTKA ŚWIATŁODZIELĄCA, czyli lustro półprzepuszczalne (a), odbija połowę padającego na nią światła, a drugą połowę przepuszcza. Pojedynczy foton ma taką samą szansę, aby zostać odbity, co przepuszczony. Jeśli w tej samej chwili dwa identyczne fotony trafiają na płytkę z przeciwnych stron (b) to odbita i przepuszczona część interferuje ze sobą i fotony tracą swą tożsamość. W 25% przypadków zarejestrujemy po jednym fotonie w każdym detektorze i nie uda się wówczas stwierdzić, czy oba zostały odbite, czy przepuszczone. Można określić jedynie ich względną własność – to, że trafiły do różnych detektorów.

byłoby to 50%). Powtarzaliśmy to doświadczenie wielokrotnie, zmieniając polaryzację na pionową, horyzontalną, liniową nachyloną pod kątem 45°, a nawet na tzw. polaryzację kołową

Najtrudniejszym aspektem naszego sposobu pomiaru stanu Bella jest konieczność uczynienia fotonów A i X nierozróżnialnymi. Nawet czas przybycia fotonów może być wykorzystany do ich rozróżnienia. Wymazanie tej informacji jest więc niezbędne. W naszym doświadczeniu skorzystaliśmy ze sprytnego wybiegu zaproponowanego przez Marka Żukowskiego z Uniwersytetu Gdańskiego. Fotony musiały przejść przez filtry przepuszczające światło o bardzo wąskim zakresie długości fali. To sprawia, że długość fali fotonu staje się bardzo dokładnie określona i zgodnie z zasadą Heisenberga rozmywa foton w czasie.

Zupełnie niezwykła sytuacja powstaje, gdy teleportowany foton jest sam splątany z jakimś innym fotonem, a zatem nie ma określonej polaryzacji. W 1998 roku nasza innsbrucka grupa zrealizowała eksperymentalnie taki scenariusz. Alicja otrzymała foton D bezpośrednio (polaryzator został usunięty). A zatem fotony D i C pozostały splątane. Wykazaliśmy, że udana teleportacja prowadzi do splątania fotonów B z C. Oznacza to, że pierwotne splątanie z C zostało przekazane od D do B.

Przejażdżka na barana

Nasze doświadczenie jednoznacznie pokazało, że teleportacja jest możliwa, ale mało prawdopodobna. Ponieważ potrafimy identyfikować tylko jeden stan Bella, możemy teleportować foton Alicji zaledwie w 25% przypadków, gdy dwa jej detektory zadziałają jednocześnie. Nie istnieje pełny analizator sta-

nów Bella dla niezależnych fotonów lub dla dwóch niezależnie wytworzonych kwantowych cząstek i dotychczas nie ma doświadczalnie sprawdzonego sposobu na zwiększenie efektywności naszej metody do 100%.

W roku 1994 Sandu Popescu, wówczas z University of Cambridge, zaproponował sposób obejścia tych trudności. Zasugerował, aby stan do teleportacji był stanem kwantowym przenoszonym na barana przez pomocniczy foton Alicji. W roku 1997 grupa kierowana przez Franseco De Martiniego z Università „La Sapienza” w Rzymie sprawdziła tę możliwość.

Pomocnicze fotony A i B miały splątane położenia. Foton A mógł się znajdować w dwóch różnych częściach aparatury Alicji, tak jakby przeszedł przez płytkę półprzepuszczalną. Te możliwości były splątane z podobnie rozdzielonym fotonem A. Stan, który miał być teleportowany, foton A niósł w postaci swojej polaryzacji. Ze względu na to, że foton A odgrywa podwójną rolę, rozróżnienie wszystkich czterech stanów Bella staje się standardowym pomiarem wykonanym na pojedynczej cząstce: rejestracją fotonu w jednym z dwóch możliwych miejsc, z jedną z dwóch możliwych polaryzacji. Słabość takiego pomysłu polega na tym, że gdyby Alicja dostała do teleportacji inny foton o nieznanym stanie X, musiałaby w jakiś sposób przenieść ten stan na polaryzację fotonu A, a tego nikt nie potrafi zrobić.

Polaryzacja fotonu – własność, która była teleportowana w doświadczeniach przeprowadzonych w Innsbrucku i Rzymie – jest własnością dyskretną, tzn. każdy stan polaryzacji można przedstawić jako superpozycję dokładnie dwóch stanów, takich jak polaryzacja pionowa i pozioma. Pole elektromagnetyczne

związane ze światłem ma także cechy o naturze ciągłej, co jest równoważne z superpozycją nieskończonej ilości wielofotonowych stanów elementarnych (tzw. bazowych). Światło na przykład może być „ściśnięte”, co oznacza, że jedna z jego ciągłych własności jest bardzo precyzyjnie określona, a druga zgodnie z zasadą Heisenberga bardzo rozmyta. Innym przykładem są tzw. stany koherentne emitowane przez lasery. W 1998 roku grupa Jeffreya Kimble'a z California Institute of Technology użyła stanu ściśniętego, odpowiednio go transformując, do generacji stanu splątanego ciągłych własności dwóch wiązek pola świetlnego, który następnie został zastosowany do teleportacji stanu koherentnego pochodzącego z trzeciej wiązki. W ten sposób wykazała możliwość teleportowania ciągłych własności.

Warto zauważyć, że choć te wszystkie doświadczenia są tak niezwykle, daleko jeszcze do teleportowania dużego obiektu. Przeszkodę stanowią dwa zasadnicze problemy: po pierwsze, trzeba spłatać parę takich samych obiektów, po drugie, obiekt, który ma być teleportowany, i splątana para muszą być odpowiednio odizolowane od otoczenia. Jeśli jakaś informacja przedostanie się do lub z otoczenia dzięki przypadkowemu oddziaływaniu, stan kwantowy obiektu ulegnie degradacji – proces ten nazywa się dekoherencją. Trudno sobie wyobrazić, jak można uzyskać taki całkowicie odizolowany stan dla dużego ciała, które w dodatku oddycha i promieniuje ciepło. Któż jednak wie, jak szybki będzie postęp w przyszłości?

Z pewnością już obecnie da się wykorzystać istniejące technologie do teleportowania prostych stanów, takich jak stan fotonów w naszym doświadczeniu, na odległość kilku kilometrów, a być może nawet dalej – do satelitów. Technologia teleportacji stanów atomów też jest już w zasięgu ręki – grupa kierowana przez Serge'a Haroche'a z École Normale Supérieure w Paryżu splątała stany atomów. Splątanie cząsteczek, a następnie ich teleportację prawdopodobnie uda się zrealizować w ciągu najbliższych 10 lat. Co będzie dalej – tego dziś nikt nie wie.

Poważniejsze zastosowanie teleportacji przewiduje się w kwantowym przetwarzaniu danych, gdzie zwykle pojęcie bitów (0, 1) jest uogólniane do bitów kwantowych, czyli qubitów, które mogą istnieć jako superpozycje i splątania 0 i 1. Teleportację da się też wykorzystać do przekazywania informacji kwantowej między procesorami kwantowymi. Kwantowe teleportery mogą stać się podstawowymi składnikami komputerów kwantowych

KĄCIK SCEPTYKÓW

AUTOR ODPOWIADA NA NAJCZĘŚCIEJ ZADAWANE PYTANIA NA TEMAT TELEPORTACJI

Czy nazywanie tego teleportacją to nie przesada? Przecież teleportowany jest tylko stan kwantowy, a nie rzeczywisty obiekt. To pytanie pociąga za sobą następne, jeszcze głębsze – co rozumiemy przez identyczne obiekty. Skąd wiemy, że jakiś przedmiot, na przykład samochód, który znajdujemy rano w naszym garażu, jest tym samym, który wstawiliśmy tam jakiś czas temu? Ponieważ ma takie same własności i cechy. Fizyka kwantowa wzmacnia ten pogląd: cząstki tego samego typu znajdujące się w tym samym stanie kwantowym są z zasady nierozróżnialne. Gdyby ktoś mógł zmienić wszystkie atomy żelaza w samochodzie na atomy żelaza z bryły żelaza lub bryły rudy żelaza i dokładnie odtworzyć ich stan, to końcowy wynik byłby aż do najdrobniejszych szczegółów identyczny z wyjściowym samochodem. Identyczność nie może oznaczać więcej niż bycie tym samym ze względu na wszystkie własności.

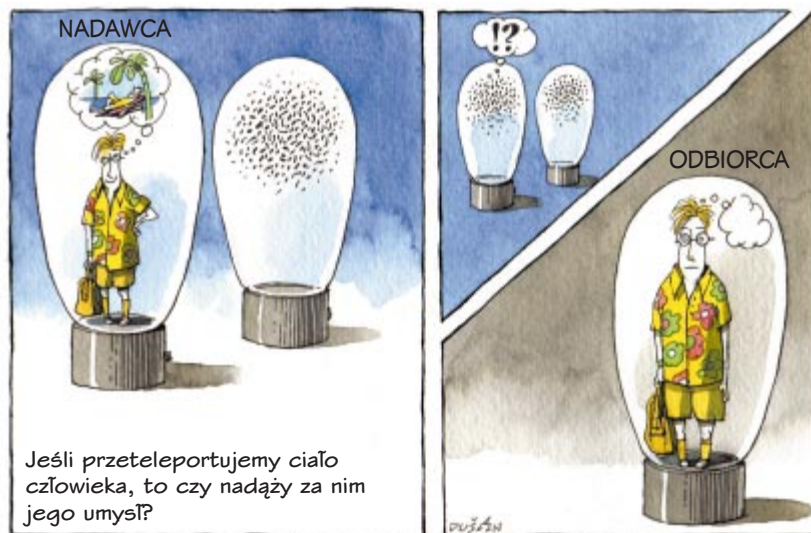
Czy zatem nie chodzi raczej o „kwantowy faks”? Faks tworzy kopię, którą łatwo można odróżnić od oryginału, natomiast teleportowany obiekt jest z zasady nieodróżnialny. Co więcej, w procesie kwantowej teleportacji oryginał musi zostać zniszczony.

Czy można mieć nadzieję na teleportowanie złożonych obiektów? Niestety, na drodze do zrealizowania tego stoi wiele poważnych przeszkód. Po pierwsze, obiekt powinien się znajdować w czystym stanie kwantowym, a takie stany są bardzo nietrwałe. Fotony słabo oddziałują z powietrzem i dlatego nasze eksperymenty można przeprowadzać w naturalnych warunkach, ale doświadczenia z atomami i większymi obiektami trzeba już wykonywać w próżni, aby wyeliminować zderzenia z cząsteczkami gazu. Po drugie, im większy obiekt, tym łatwiej jest zaburzyć jego stan kwantowy. Stan małego pyłku mógłby zostać zniszczony nawet przez promieniowanie cieplne ścian przyrządu. Z tego właśnie powodu w życiu codziennym zwykle nie zauważa się efektów kwantowych.

Interferencję kwantową, efekt znacznie prostszy do uzyskania niż splątanie lub teleportacja, udało się zrealizować dla fullerenów – molekularnych „piłek” utworzonych z 60 atomów węgla. Te badania będą kontynuowane z coraz większymi obiektami, być może nawet z małymi wirusami, ale nie należy oczekiwać, że się to uda ze zwykłą piłką.

Innym problemem jest pomiar stanu Bella. Co mogłoby oznaczać dokonanie pomiaru stanu Bella dla wirusa składającego się z 10^7 atomów? W jaki sposób moglibyśmy uzyskać 10^8 bitów informacji wygenerowanych przez taki pomiar? Dla obiektu o masie kilku gramów te liczby są astronomiczne – co najmniej 10^{24} bitów danych.

Czy teleportowanie człowieka wymaga kwantowej dokładności? Aby być tą samą osobą, nie trzeba pozostawać dokładnie w tym samym stanie kwantowym. Nasz stan zmieniamy cały czas i mimo to jesteśmy tą samą osobą – przynajmniej tak nam się wydaje. Identyczne bliźnięta lub biologiczne klony nie są tymi samymi osobnikami, gdyż mają inne wspomnienia. Czy zasada nieoznaczoności Heisenberga uniemożliwia dostatecznie dokładną replikację osoby, aby sądziła, że jest identyczna z oryginałem? Kto wie? To intrygujące, że kwantowe twierdzenie o niemożliwości klonowania zabrania nam stworzenia dokładnej repliki człowieka.



DUSAN PETRIC

KWANTOWE PRZYGODY ALICJI I BRONKA



Na Alfa-Centauri...

Nieustraszona Alicja odkrywa stabilne kryształy einsteinu. Jej rywalka, wiedźmowata Zośka, też je zauważa. Alicja i jej partner Bronek (na Ziemi) są w lepszej sytuacji, bo mają KWANTOWE KOMPUTERY I TELEPORTERY. Alicja przeprowadza pewne kwantowe obliczenia...



...i teleportuje wynik – qubity danych – do Bronka. Mają szczęście: teleportacja przebiega bez zakłóceń.



Za pomocą wiązki laserowej Alicja przekazuje Bronkowi, że jego qubity zawierają ściśle dane. Także Zośka informuje laserowo swego wspólnika Jurka o odkryciu kryształów.



Zanim wiązka laserowa dotrze na Ziemię, Bronek wykorzystuje swoje qubity do kwantowych symulacji rozwoju gospodarczego.

4 LATA PÓŹNIEJ



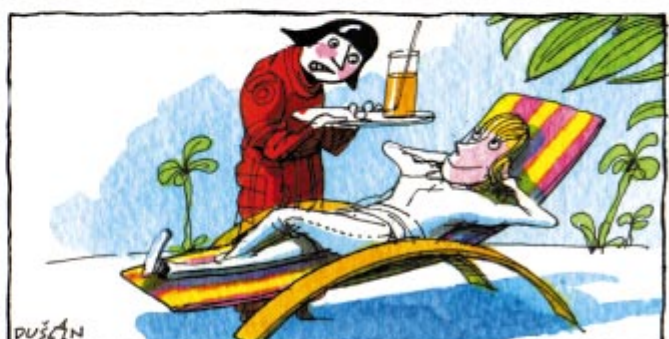
Bronek otrzymuje wiadomość od Alicji, że jego qubity są dokładną repliką jej qubitów!



Jurek też dostaje wiadomość od Zośki, ale dopiero teraz może rozpocząć symulacje komputerowe.

GALAKTYCZNA GIEŁDA	
EINSTEIN	1,000,000,000
TRILIT	7,458,040
OMIKRONY	5,821,110
RUBID	5,114,200
TRIPOLIMERO	2,941,000
AZOT	1,119,360
TORANT	741,900

Bronek i Alicja inwestują wszystkie oszczędności w sprzedaż einsteinu i to znacznie wcześniej niż inni. Czy im się uda, zależy od szczęścia – mają jedną szansę na cztery qubity...



...ale by stać się bogatym, wystarczy, żeby szczęście dopisało tylko raz. Jurek i Zośka zmieniają zawód i zaczynają pracować w niekwantowych usługach. KONIEC

[ramka z prawej]. Komiks na sąsiedniej stronie przedstawia niezwykle sytuację, gdy wykorzystanie teleportacji i kwantowego przetwarzania danych może się niekiedy opłacić, tak jakby możliwe było otrzymanie teleportowanej wiadomości natychmiast, bez czekania na przysłanie jej w tradycyjny sposób.

Mechanika kwantowa jest jedną z najbardziej niezwykłych teorii dotychczas odkrytych. Problemy, które wynikają z powodu jej sprzeczności z naszą intuicją, sprawiły, że Einstein bardzo ją krytykował. Nalegał, by fizyka starała się uchwycić taką rzeczywistość, jaka istnieje, niezależnie od możliwości jej obserwowania. Zdawał sobie jednak sprawę z wielkich dylematów, które napotykały, gdy staramy się przypisać taką niezależną fizyczną rzeczywistość indywidualnym elementom splątanej pary. Jego wielki partner, duński fizyk Niels Bohr, nalegał, aby rozpatrywać cały układ – w przypadku splątanej pary wspólny układ obu cząstek. Postulat Einsteina o istnieniu niezależnego, realnego stanu każdej cząstki traci sens w przypadku splątanego układu kwantowego.

Kwantowa teleportacja jest bezpośrednim następstwem sytuacji rozważanych przez Einsteina i Bohra. Analizując te doświadczenia, popadamy w wiele różnych kłopotów, gdy zapytujemy, jakie są realne własności indywidualnych cząstek w splątanej parze. Trzeba wówczas bardzo dokładnie wyjaśnić, co to znaczy „mieć” określoną polaryzację. Nie da się uniknąć wniosku, że można mówić tylko o wynikach pewnych pomiarów uzyskanych podczas eksperymentów. W naszych pomiarach polaryzacji kliknięcie detektora pozwala nam wyobrazić sobie foton, który „miał” określoną polaryzację w momencie dokonywania pomiaru. Trzeba jednak zawsze pamiętać, że to tylko wyobrażenie. Jest ono dopuszczalne, gdy mówimy o danym doświadczeniu, ale powinniśmy być bardzo ostrożni, wykorzystując je w innych sytuacjach.

Podobnie jak Bohr uważam, że możemy zrozumieć mechanikę kwantową, jeśli uświadomimy sobie, iż nauka nie opisuje, czym jest przyroda, raczej stwierdza, co możemy o niej powiedzieć. Na tym polega znaczenie fundamentalnych eksperymentów, takich jak teleportacja, ponieważ pomagają one głębiej zrozumieć nasz zagadkowy kwantowy świat.

Tłumaczył
Marek Demiański

KOMPUTERY KWANTOWE

Prawdopodobnie najbardziej realnym zastosowaniem kwantowej teleportacji, poza czysto fizycznymi badaniami, są kwantowe metody obliczeniowe. Zwycięży komputer operuje na bitach, które mają określone wartości 0 lub 1; kwantowy korzysta z bitów kwantowych, czyli qubitów [patrz: Neil Gershenfeld i Isaac L. Chuang, „Molekularne komputery kwantowe”; *Świat Nauki*, sierpień 1998]. Qubity mogą być w kwantowej superpozycji 0 i 1, tak jak foton w superpozycji polaryzacji poziomej i pionowej. Teleportując jeden foton, przesyłamy jeden qubit.

Superponowanie liczb może się wydawać dziwne, ale jak mawiał zmarły niedawno Rolf Landauer z IBM: „Gdy będąc małymi dziećmi, nauczyliśmy się liczyć na lepkich palcach, nie wiedzieliśmy nic o mechanice kwantowej i superpozycji. Nabraliśmy złych doświadczeń intuicyjnych. Myśleliśmy, że informacja jest klasyczna. Uważaliśmy, że możemy trzymać trzy palce, a następnie cztery. Nie zdaliśmy sobie sprawy, że może istnieć superpozycja obu tych możliwości.”

Kwantowy komputer może wykonywać operacje na superpozycjach wielu różnych sygnałów wejściowych jednocześnie. Na przykład – wykonywać jakiś algorytm jednocześnie na milionie sygnałów wejściowych, wykorzystując tylko tyle



samo qubitów co konwencjonalny komputer bitów realizujący ten sam algorytm jeden raz na pojedynczym sygnale wejściowym. Teoretycy udowodnili, że algorytmy wykonywane na kwantowych komputerach mogą rozwiązać niektóre problemy szybciej (tzn. w mniejszej liczbie kroków) niż jakikolwiek znany algorytm na klasycznym komputerze. Do takich problemów należy wyszukiwanie czegoś w bazie danych i rozkładanie na czynniki dużych liczb, co ma duże znaczenie w łamaniu kodów.

Dotychczas udało się zbudować jedynie najprostsze elementy kwantowego komputera: bramki logiczne, które mogą przetwarzać jeden lub dwa

qubity. Skonstruowanie nawet najprostszego kwantowego komputera to ciągle sprawa odległej przyszłości. Najważniejsze jest niezawodne przekazywanie kwantowych danych między różnymi bramkami logicznymi lub procesorami, zarówno wewnątrz kwantowego komputera, jak i w kwantowej sieci. Kwantowa teleportacja jest jedną z możliwości.

Poza tym Daniel Gottesman z Microsoftu i Isaac L. Chuang z IBM udowodnili ostatnio, że kwantowy komputer ogólnego zastosowania można zbudować z kilku podstawowych elementów: splątanych cząstek, kwantowych teleporterów i bramek, które przetwarzają sukcesywnie pojedyncze qubity. Jest to ważny rezultat, gdyż bramki dla pojedynczych qubitów są mniej technologicznie wymagające od bramek na dwa qubity. Aby z teleportera utworzyć bramkę na dwa qubity, trzeba teleportować dwa qubity z wejścia bramki na jej wyjście, korzystając z odpowiednio zmodyfikowanych splątanych par. Splątane pary są modyfikowane w taki sposób, aby na wyjściu bramki pojawiały się odpowiednio przetworzone qubity. Trudności związane z wykonaniem dowolnej operacji logiki kwantowej na dwóch nieznanach qubitach sprowadzają się do wytwarzania specyficznych stanów splątanych i ich teleportowania. Trzeba pamiętać, że pełen pomiar stanu Bella niezbędny do teleportowania ze stuprocentową efektywnością jest w istocie pewnym rodzajem przetwarzania dwóch qubitów.

LAURIE GRACE

Informacje o autorze

ANTON ZEILINGER pracuje w Instytucie Fizyki Doświadczalnej na Uniwersytecie w Wiedniu, dokąd „teleportował się” w 1999 roku po dziewięciu latach pracy na Uniwersytecie w Innsbrucku. Uważa się za szczęściarza, gdyż może zgłębiać zagadki i paradoksy mechaniki kwantowej, które wciągnęły go do fizyki niemal 40 lat temu. W nielicznych wolnych chwilach Zeilinger „oddziałuje” z muzyką klasyczną i jazzem (nie tylko słucha ale i gra!), kolekcjonuje stare mapy i uwielbia jeździć na nartach.

Literatura uzupełniająca

QUANTUM INFORMATION AND COMPUTATION. Charles H. Bennett; *Physics Today*, vol. 48, nr 10, s. 24-31, X/1995.
EXPERIMENTAL QUANTUM TELEPORTATION. D. Bouwmeester, J. W. Pan, K. Mattle, M. Eibl, H. Weinfurter i A. Zeilinger; *Nature*, vol. 390, s. 575-579, 11 XII 1997.
QUANTUM INFORMATION. Wyd. specjalne *Physics World*, vol. 11, nr 3, III/1998.
QUANTUM THEORY: WEIRD AND WONDERFUL. A. J. Leggett; *Physics World*, vol. 12, nr 12, s. 73-77, XII 1999.
Więcej informacji o teleportacji i podobnych eksperymentach można znaleźć na stronie WWW: www.quantum.at