

Przywracanie życia kotu Schrödingera

Philip Yam, członek zespołu redakcyjnego *Scientific American*

Załuje, że miałem kiedyś cokolwiek wspólnego z teorią kwantową.” Tymi słowami, jak podają źródła, Erwin Schrödinger skarżył się koledze. Austriacki fizyk nie oplakiwał jednak losu swojego słynnego dziś kota, którego w 1935 roku pozornie zamknął w pudle wraz z buteleczką trucizny. Raczej komentował niezwykle implikacje mechaniki kwantowej – nauki, która zajmuje się elektronami, atomami, fotonami i innymi submikroskopowymi obiektami. Za pomocą swego kota Schrödinger próbował zilustrować następujący problem: zgodnie z mechaniką kwantową cząstki przeskakują z jednego punktu do drugiego, zajmują kilka miejsc naraz i wygląda na to, że przekazują sobie informacje z prędkością większą od prędkości światła. Dlaczego więc koty – albo ludzie, piłki czy planety – nie miałyby robić tego samego? W końcu są zbudowane z atomów. Tymczasem stosują się do deterministycznych, klasycznych praw wypracowanych przez Isaaca Newtona. Kiedy wreszcie świat kwantów ustąpi fizyce życia codziennego? „To jest jedno z pytań za 64 tysiące dolarów”¹ – mówi ze śmiechem David Pritchard z Massachusetts Institute of Technology.

Pritchard i inni eksperymetatorzy zaczęli zerkać na granicę między królestwem kwantów a fizyki klasycznej. W ubiegłym roku, stosując chłodzenie cząstek za pomocą światła laserowego czy też przepuszczając je przez specjalne wnęki rezonansowe, fizycy stworzyli kilka kotów Schrödingera, ale na bardzo małą skalę. Tymi „kotami” były pojedyncze elektrony i atomy tak przygotowane, by każdy z nich równocześnie znajdował się w dwóch miejscach, oraz pole elektromagnetyczne, które w tym samym czasie oscylowało na dwa różne sposoby. W ten sposób fizycy nie tylko pokazali, jak łatwo tajemniczość ustępuje normalności, lecz także w zdecydowany sposób dowiedli istnienia bariery w przypadku kwantowego liczenia

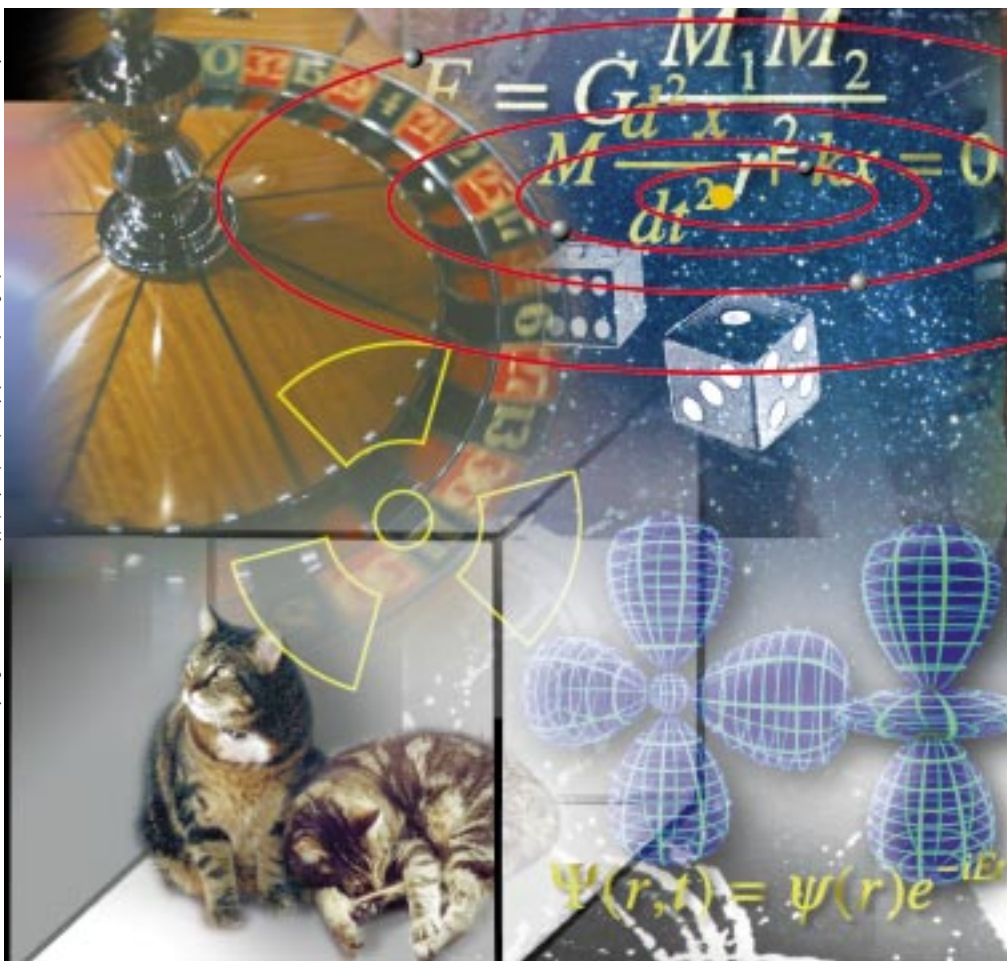
– techniki nadal w znacznej mierze spekulatywnej, za pomocą której kilku naukowców ma nadzieję rozwiązać problemy nieprawdopodobnie trudne dziś do rozwiązania.

Tajemnicza atmosfera otaczająca przejście między fizyką klasyczną i kwantową wynika z podstawowej cechy cząstek kwantowych – mogą one być falą i poruszać się ruchem falowym (i *vice versa*: światło może odbijać się tu i tam jak cząstka zwana fotonem). Jako takie mogą być opisane funkcją falową, którą Schrödinger wymyślił w 1926 ro-

ku. Funkcja falowa jest czymś w rodzaju kwantowego kwestionariusza osobowego, ponieważ zawiera wszystkie informacje o cząstce, które należy znać – łączy w sobie pełny zakres jej możliwych położenia i ruchów.

Mówiąc ściśle, funkcja falowa mówi nam, że cząstka znajduje się w tych wszystkich stanach równocześnie. Obserwacja jednak niezmiennie ujawnia tylko jeden z tych stanów. Celem eksperymentu myślowego Schrödingera jest pokazanie, jak, a nawet dlaczego po pomiarze otrzymuje się dany wynik. Po-

OBRAZ: KOMPUTEROWY: JEFF BRICE; „Funkcja Wignera talli materii atomowej po przejściu przez podwójną szczelinę”; Za zgodą MATTHIASA FREYBERGERA, Uniwersytet w Ulm



Najnowsze eksperymenty pokazują, w jaki sposób tajemniczy świat mechaniki kwantowej ustępuje pola fizyce życia codziennego

za kotem i trucizną w pudle jest też atom radioaktywny. W ciągu godziny atom ma równe szanse, że się rozpadnie lub że się nie rozpadnie; rozpad sprawi, że młotek rozbije buteleczkę i uwolni antykocie serum.

Zagadnienie pomiaru

Zgodnie z mechaniką kwantową nie obserwowany atom radioaktywny pozostaje w zabawnym stanie, w którym jest zarazem przed i po rozpadzie. Taki stan, który nazywa się superpozycją, jest

stanem, w jaki obiekty kwantowe stosunkowo łatwo popadają. Elektrony mogą jednocześnie zajmować kilka poziomów energetycznych, czyli orbitali; jak się okazuje, pojedynczy foton po przejściu przez płytkę światłodzielną podąża naraz dwiema ścieżkami. O cząstkach, które są w dobrze zdefiniowanym stanie superpozycji, mówimy, że są spójne (koherentne).

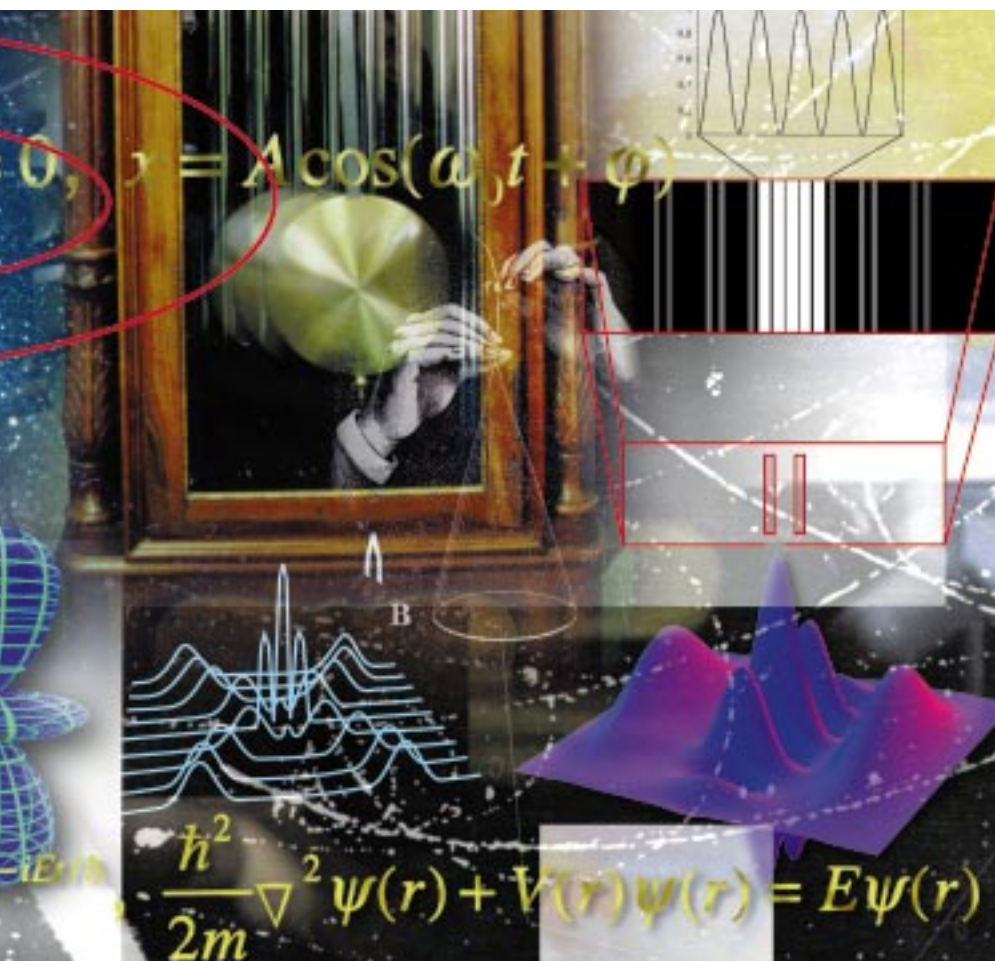
Co się jednak dzieje wtedy, kiedy obiekty kwantowe są sprzężone z obiektami makroskopowymi, choćby z kotem? Logika kwantowa zastosowana do

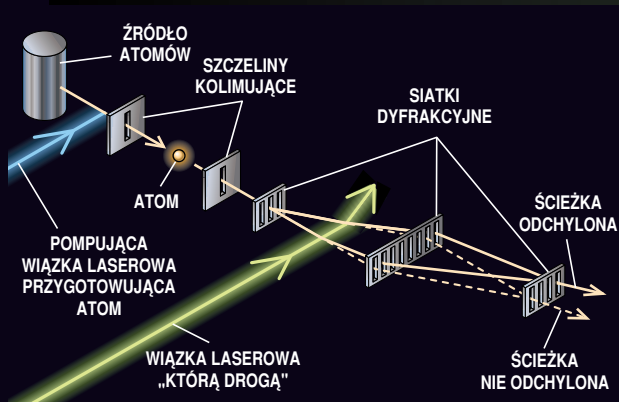
kota każe przyjąć, że również powinien on być w spójnej superpozycji stanów, pozostając jednocześnie martwy i żywy. Oczywiście jest to patentowana bzdura: nasze zmysły mówią nam, że koty są albo żywe, albo martwe i nie mogą być równocześnie w tych obu stanach lub w żadnym z nich. Mówiąc prozaicznie, kot jest w rzeczywistości urządzeniem pomiarowym, podobnie jak licznik Geigera czy woltomierz. Powstaje zatem pytanie, czy urządzenia pomiarowe zaprojektowane do wykrywania cząstek powinny wchodzić w ten sam nieokreślony stan, w jakim mogą się znaleźć owe cząstki.

Dla duńskiego fizyka Nielsa Bohra, twórcy teorii kwantowej (do którego Schrödinger skierował swój pełen żalu komentarz), nie ulegało kwestii, że pomiary muszą być przeprowadzane za pomocą aparatury klasycznej. W tym, co zwykle się nazywać typową lub kopenhaską interpretacją mechaniki kwantowej, Bohr postulował, że detektory makroskopowe nigdy nie osiągają rozmytego stanu superpozycji, ale nie wyjaśnił dokładnie dlaczego. „Pojęcie «klasyczny» chciał wprowadzić ręcznie – mówi Wojciech Żurek z Los Alamos National Laboratory. – Pomiary po prostu się robi.” Bohr uważał też, że granica między światem klasycznym i kwantowym może się przesuwac zależnie od tego, w jaki sposób przeprowadza się eksperyment. Poza tym rozmiary w zasadzie nie grają żadnej roli: superpozycje mogą się utrzymywać w skali znacznie większej od atomowej.

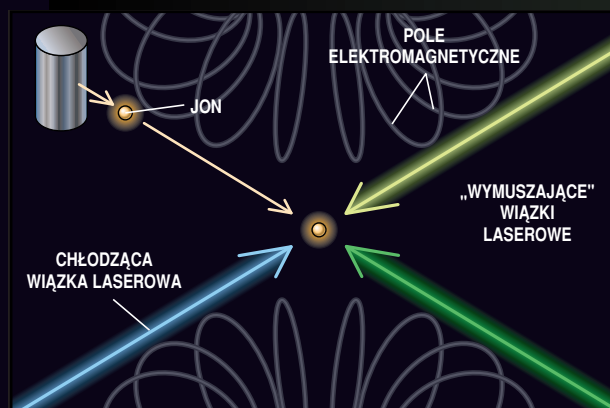
W listopadzie 1995 roku Pritchard z kolegami z MIT uściślili nieprecy-

STRUKTURA FIZYKI musi jakoś łączyć egzotykę mechaniki kwantowej – jej martwo-żywe koty, orbitale, oscylujące jony i fale materii – z bardziej intuicyjnymi odpowiednikami z zakresu fizyki klasycznej, a więc z prawdopodobieństwami, ruchami planetarnymi, bujającym się wahadłem i interferencją przechodzących przez podwójną szczelinę fal świetlnych.

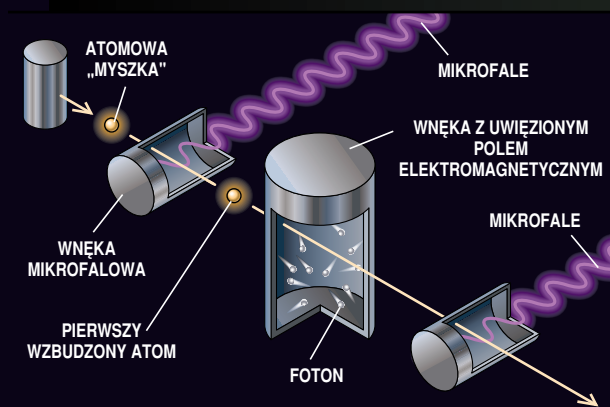




ROZMYCIE POMIARU KWANTOWEGO jest pokazane za pomocą wiązki atomów sodu, która się rozszczepia i ponownie łączy, dając obraz interferencyjny (tu niewidoczny). Światło lasera, rozpraszając się na atomie, ujawni, którą ścieżkę wybrał atom, i tym samym wyeliminuje interferencję. Jednak obraz interferencyjny, gdy zmieni się długości ścieżek, powróci, udowadniając w ten sposób, jak dalece układ kwantowy może zostać „splciony” z klasyczną aparaturą.



KOT SCHRÖDINGERA zrobiony z jonu berylu najpierw jest pułapowany za pomocą pola elektromagnetycznego, a następnie ochładzany laserem. „Wymuszające” wiązki laserowe przygotowują jon w superpozycji dwóch stanów spinowych. Te dwa stany są następnie delikatnie odsuwane od siebie, tak że jon przebywa naraz w dwóch miejscach.



EKSPERYMENT Z KOTEM I MYSZKĄ wykonano dla uwięzionego pola elektromagnetycznego (zamknięte fotony). Atom rubidu jest wzbudzany mikrofalami do superpozycji dwóch stanów. Podczas przejścia przez środek wnęki przekazuje swój superponowany stan pola elektromagnetycznemu. Drugi atom gra rolę „myszki”, która sprawdza ostateczny stan pola. (Druga wnęka mikrofalowa, taka sama jak pierwsza, umożliwia uzyskanie interferencji kwantowej i ma podstawowe znaczenie dla pomiarów.)

zyjne pojęcie pomiaru. Przepuścili wąski strumień atomów sodu przez interferometr, urządzenie, które oferuje cząstce dwie możliwe ścieżki do przebycia. Gdy ścieżki ponownie się łączą, każdy atom, który zachowuje się jak fala, „interferuje” sam ze sobą, dając na specjalnym ekranie układ jasnych i ciemnych prążków (tak samo jak w przypadku światła uginającego się na dwóch szczelinach). Korzystając z typowego sformułowania mechaniki kwantowej, mówimy, że atom porusza się jednocześnie po obu ścieżkach, czyli że cała droga atomu od źródła do ekranu jest superpozycją dwóch ścieżek, po których się porusza.

Następnie jedną ze ścieżek naukowcy oświetlili laserem. Ten zabieg zburzył układ prążków interferencyjnych, ponieważ rozproszenie fotonów światła lasera na atomie mogło wskazać, którą ścieżkę atom wybrał. (Reguły kwantowe nie pozwalają na współistnienie interferencji oraz informacji „którą drogą”².)

Pozornie wygląda to tak, jak gdyby rozproszenie światła było pomiarem, który niszczy spójność. Jednak naukowcy wykazali, że tę spójność można „odzyskać” – tzn. przywrócić prążki interferencyjne – poprzez zmniejszenie odległości między dwiema ścieżkami w interferometrze do kilku wielokrotności ćwierci długości fali światła laserowego. W takim wypadku nie można stwierdzić, na której ścieżce nastąpiło rozproszenie. „Faktycznie nie traci się spójności – wyjaśnia Pritchard. – Atom jest splciony z większym układem.” Oznacza to, że stan kwantowy atomu zostaje sprzężony z przyrządem pomiarowym, którym w tym przypadku jest foton.

Podobnie jak wiele wcześniejszych eksperymentów praca Pritcharda, będąca realizacją projektu sprzed wielu lat, który opracował zmarły w 1988 roku Richard Feynman, raczej pogłębia tajemnice leżące u podstaw fizyki kwantowej, niż je rozwiewa. Świadczy to o tym, że układ pomiarowy nie jest jednoznacznie zdefiniowany. Czy zatem w przypadku kota Schrödingera pomiarem jest podniesienie pokrywy pudła? A może pomiar następuje wtedy, gdy światło dociera do oka i jest przetwarzane w mózgu? Lub jest to elektrostatyczne iskrzenie kociego futerka?

Ostatni „wysyp” doświadczeń z kotem Schrödingera zaczyna dotyczyć tych właśnie problemów. Jednak nie wszyscy fizycy zgadzają się z tym, że obserwują prawdziwe koty kwantowe – kotki, jak je najczęściej nazywają – zależnie od tego, jak bardzo chcą być ory-

ginalni. W każdym razie wszystkie te próby zdecydowanie wskazują na to, że przejścia kwantowo-klasyczne, czasami nazywane zanikaniem funkcji falowej albo redukcją wektora stanu, ostatecznie zaczęły się przenosić z królestwa eksperymentów myślowych do świata rzeczywistych badań.

Tutaj kotku, kici, kici...

W 1991 roku Carlos Stroud i John Yeazell z University of Rochester prowadzili doświadczenia z tzw. atomami rydbergowskimi. Nazwa ta wywodzi się od szwedzkiego spektroskopisty Johanna Rydberga, który odkrył związek opisujący energię wiązania elektronu z jądrem.³ Normalnie elektrony krążą po orbitach w odległości od jądra mniejszej niż 1 nm; w atomach rydbergowskich orbita zewnętrznego elektronu rozdyma się do rozmiarów kilku tysięcy razy większych. To nadmuchiwanie atomu można osiągnąć między innymi krótkimi błyskami światła lasera, które właśnie powodują, że elektron jednocześnie zajmuje kilka zewnętrznych orbit. Superpozycja kilku stanów energetycznych fizycznie przejawia się w postaci „pakietu falowego”, który okrąży jądro w ogromnej (w skali atomowej) odległości, wynoszącej około 0.5 μm. Pakiet falowy reprezentuje prawdopodobieństwo znalezienia wzbudzonego elektronu.

Wzbudzając atomy potasu do stanów rydbergowskich, fizycy z Rochester zauważyli, że po kilku okrążeniach pakiet falowy się rozpada, by na nowo odżyć w postaci dwóch mniejszych pakietów zlokalizowanych po przeciwnych stronach ich wielkiej orbity. We wrześniu ub. r. Stroud ze swoim kolegą Michałem W. Noelem wykazali, że te dwa pakiety tworzą stan zwany kotem Schrödingera – jeden elektron w dwóch położeniach.

Elektron, bądź co bądź, jest z natury po prostu punktem. Jon (atom naładowany elektrycznie), który składa się z wielu cząstek elementarnych, plasuje się znacznie bliżej świata makroskopowego. W maju 1996 roku Chris Monroe i David J. Wineland wraz z kolegami z National Institute of Standards and Technology (NIST) w Boulder (Kolorado) stworzyli kota Schrödingera z jonu berylu. Najpierw pojedynczy jon spułapkowali za pomocą pól elektromagnetycznych, a następnie za pomocą wiązki laserowej stłumili jego drgania termiczne i skutkiem tego schłodzili go do temperatury w granicach milikelwina powyżej zera bezwzględne. Wówczas odpalili w niego dwie wiązki świa-



PISANIE NA ATOMIE teoretycznie jest możliwe. Elektron w stanie superpozycji 2500 poziomów energetycznych ma funkcję falową dostatecznie złożoną, by dało się zakodować wiadomość. Słowa zapisuje się, przyporządkowując barwy i ich nasycenia amplitudzie i fazie funkcji falowej.

MICHAEL NOEL, CARLOS STROUD, University of Rochester

tła laserowego, różniące się nieco częstotliwością, by manipulować jego spinem – wewnętrzną kwantową właściwością, charakteryzującą się dwoma ustawieniami w przestrzeni: w górę lub w dół. Za pomocą laserów naukowcy sprawili, że jon znalazł się w superpozycji stanów o ustawieniach spinu w górę i w dół.

Tyle na temat przygotowań; po tym nastąpiła część bardziej makroskopowa. Strojąc częstość światła dwóch laserów, zespół z NIST mógł stale zmieniać ustawienia spinów w przestrzeni, zarówno tego, który był skierowany w górę, jak i tego ustawionego w dół. Migawkowe zdjęcie pokazałoby jon w sytuacji, w której w jednym fizycznym położeniu spin jest ustawiony do góry i równocześnie w drugim położeniu – do dołu. Stany te były oddalone od siebie o 80 nm – w skali atomowej jest to ogromna odległość. „Zrobiliśmy tak, by jeden jon był w dwóch miejscach bardzo dalekich od siebie w porównaniu z rozmiarami jonu w stanie podstawowym” – powiedział Monroe.

W grudniu ub. r. Michel Brune, Serge Haroche i Jean-Michel Raimond wraz z kolegami z Ecole Normale Supérieure (ENS) w Paryżu poszli o krok do przodu. „Mogliśmy obserwować znikanie cech kwantowych” – wyjaśnia Haroche. Aby zobaczyć, jak zanika superpozycja, przechodząc od jednego lub drugiego ze stanów, na przeciwko swojego kota Schrödingera zawiesili w istocie kwantową myszkę, która sprawdzała, czy kot jest żywy, czy martwy.

Kotem było uwięzione pole elektromagnetyczne (pek fotonów mikrofaliowych we wnęce rezonansowej). Na-

ukowcy skierowali do wnętrza atomu rydbergowski wzbudzony do stanu będącego superpozycją dwóch różnych stanów energetycznych. Atom przekazał swój stan superponowany polu elektromagnetycznemu znajdującemu się we wnętrzu, przeprowadzając go w superpozycję stanów o dwóch różnych fazach lub różnych częstościach oscylacji. W ten sposób w przypadku różnych faz pole przypominało kota Schrödingera w jego dziwnej superpozycji życia i śmierci.

W roli myszki zespół z ENS użył drugiego atomu rydbergowskiego, który też został wprowadzony do wnętrza. Wówczas pole elektromagnetyczne przekazało mu informację o swoich superponowanych fazach. Fizycy porównali drugi atom z pierwszym, dzięki czemu uzyskali informację o superpozycji pola elektromagnetycznego.

Jednak znacznie bardziej interesująca była możliwość kontrolowania przez zespół naukowców głównych zmiennych i określenia, w jaki sposób stany spójne przechodzą w klasyczne. Zmieniając przedział czasu (od 30 do 250 μs) między wstrzyknięciem do wnętrza pierwszego i drugiego atomu, mogli zobaczyć, jak zanikanie superpozycji zmienia się w funkcji czasu. Natomiast zwiększając pole elektromagnetyczne (przez wprowadzenie do wnętrza większej liczby fotonów), mogli oglądać, jak wpływa to na przebieg zanikania. „Po raz pierwszy możemy obserwować stopniowe przechodzenie zachowania kwantowego w klasyczne” – mówi Haroche.

„To zapierający dech eksperyment – entuzjazmuje się Żurek. – Oglądanie kota Schrödingera jest zawsze zdumiewające, ale możliwość obserwowania go wtedy, kiedy jest zmuszony do dokonania wyboru między «żywym» i «martwym», obserwowanie po raz pierwszy, jak ulatnia się kwantowa tajemniczość, to rzeczywiście mistrzowski wyczyn.” Ponadto wyniki uzyskane w ENS zgodziły się z większością technicznych oczekiwań teoretyków. „Wyciągam z tego wniosek – zauważa Żurek – że proste równania, które piszemy, wydają się dobrym przybliżeniem.”

Strata spójności

Żurek jest czołowym orędownikiem teorii nazywanej dekoherencją, która jest oparta na idei, że ośrodek niszczy spójność kwantową. Sformułował ją w latach osiemdziesiątych (choć w części nawiązuje do Bohra i innych twórców teorii kwantowej) i od tamtej pory z różnymi współpracownikami bada jej konsekwencje.

Zajęcia dla kotów kwantowych

Ośrodek destabilizujący zasadniczo odnosi się do wszystkiego, na co stan układu kwantowego mógłby wpływać – i skutkiem tego mimowolnie go „mierzyć”: może to być pojedynczy foton, drgania molekuly, cząstki powietrza. W tej teorii ośrodek nie jest po prostu „szumem”; on działa jak przyrząd, który bezustannie monitoruje układ.

Eksperyment ENS wyjaśnia to zjawisko. „Układ ulega dekoherencji, ponieważ wycieka z niego informacja – zauważa Żurek. Kilka fotonów może uciec z wnęki rezonansowej i tym samym zdradzić całej reszcie świata stan pozostałych fotonów. – Tak więc w pewnym sensie kot Schrödingera ma kocięta, które wylażą na zewnątrz” – dodaje.

Gdy skorzystamy z pojęcia ośrodka, zdefiniowanie granicy kwantowo-klasycznej ma tę przewagę, że usuwa kilka tajemniczych aspektów teorii kwantowej, które propagowali niektórzy autorzy. Eliminuje jakąś specjalną potrzebę świadomości lub nowe siły fizyczne, które wpływają na rezultat klasyczny. Wyjaśnia to również, dlaczego rozmiar jako taki nie jest przyczyną dekoherencji: duże układy, na przykład prawdziwe żywe koty, nigdy nie mogłyby znaleźć się w stanie superpozycji, ponieważ wszystkie cząstki, z których składa się kociak, wpływają na ogromną liczbę parametrów ośrodka, co sprawia, że spójność nie jest możliwa. W przypadku jednogramowej kulki zawieszonej na wahadle i kilku rozsądnych założeń wyraży interferencyjne funkcji falowej układu w ciągu nanosekundy spadają do 2.7^{-1000} części wartości pierwotnej – to jest właściwie natychmiastowe zniknięcie kwantowej tajemniczości. „Stara intuicja, jak za czasów Bohra, jest znowu w cenie”, chociaż teraz istnieje fizyczny mechanizm, by skonkretyzować jej pełnomocnictwa – konkluduje Żurek.

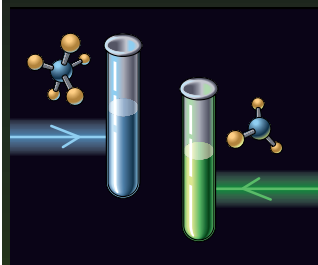
Niemniej jednak model dekoherencji Żurka w oczach niektórych fizyków jest wadliwy. „Moim zdaniem dekoherencja nie wybiera konkretnego wyniku – twierdzi Anthony J. Leggett z University of Illinois. – W prawdziwym życiu otrzymujemy określone rezultaty makroskopowe.”

Żurek argumentuje, że ośrodek faktycznie narzuca możliwości kwantowe, które realizują się w rzeczywistym świecie. Proces, który traktuje on jako superselekcję indukowaną przez ośrodek

Naukowcy zaproponowali i wykazali wiele technicznych możliwości wykorzystania splecionych i superponowanych stanów kwantowych, m.in. do liczenia kwantowego. Kilka innych projektów przedstawiamy poniżej:

Chemia kwantowa

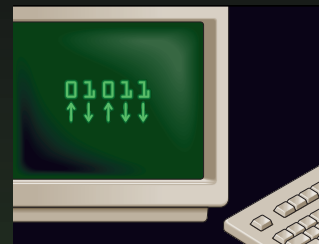
Stosując lasery, naukowcy mogą wprowadzić cząsteczki w stan superpozycji ścieżek reakcji, a następnie kontrolować przebieg procesu chemicznego, odpowiednio dopasowując stopień interferencji. W grudniu ub. r. w podobny sposób udało się rozdzielić izotopy.



Do mankamentów tej metody należy zaliczyć zbyt małą wydajność i trudności w kontrolowaniu fazowych charakterystyk promieniowania.

Kryptografia z kluczem kwantowym

Kryptografia z kluczem kwantowym ma znacznie lepsze perspektywy od kwantowego liczenia. Upoważnieni informatory tworzą wspólne klucze, wykorzystując polaryzację fotonów. Każda próba złamania kluczy byłaby natychmiast zauważona, ponieważ po prostu zniszczyłaby te stany fotonów. Zostało wykazane, że kwantowa kryptografia przesyłana światłowodami działa na odległość ponad kilku kilometrów.



(*einselection*) usuwa nierealistyczne stany kwantowe i zachowuje tylko te, które mogą przeciwstawić się rozpatrzeniu ich przez ośrodek i tym samym stać się klasycznymi. „Selekcji dokonuje ośrodek, nie potrafimy więc przewidzieć, która z dozwolonych możliwości okaże się rzeczywista” – zauważa Żurek.

Wyjaśnienie to niezbyt satysfakcjonuje. Podejście Żurka jest „bardzo pociągające. Pozwala obliczyć pewne rzeczy, zobaczyć jak znikają prążki interferencyjne, w miarę jak rośnie superpozycja – mówi Monroe. – Nadal jest w tym coś zabawnego. On przesuwa rzeczy pod dywanem, ale trudno powiedzieć, co to za dywan.” Problem polega na tym, że dekoherencja – a faktycznie każda teoria dotycząca przejścia kwantowo-klasycznego – z konieczności jest stworzona *ad hoc*. Superpozycje kwantowe muszą w jakiś sposób dawać rezultaty, które będą bardziej odpowiadały codziennemu poczuciu rzeczywistości. Prowadzi to do obwodu logicznego: rezultaty widoczne w świecie makroskopowym opuściły świat kwantów, ponieważ są jedne, jakie widzimy. Tego rodzaju rozwiązanie, zalecane przez kilku promiennych kosmologów, jest nieporęczną interpretacją, znaną jako teoria „wielu światów”, która utrzymuje, że wszystkie możliwości zawarowane w funkcji falowej faktycznie zachodzą. Kontynuują one swoją egzystencję w równoległych światach. Idea ta jest jednak nie-

sprawdzalna, ponieważ równoległe istniejące światy pozostają dla siebie na zawsze nieosiągalne.

Gruntowne przeróbki

Zdaniem Leggetta zagadnienia związane z dekoherencją i ideą wielu światów doprowadziły całkiem sporą mniejszość do poparcia poglądu zwanego teorią GRW. Pomysł został wysunięty w 1986 roku przez GianCarla Ghirardiego i Tullio Webera z Uniwersytetu w Triście oraz Alberta Rimini z Uniwersytetu w Pawii.

W schemacie GRW funkcja falowa cząstki rozsypuje się w czasie. Istnieje jednak małe prawdopodobieństwo, że rozsypująca się fala „uderzy” w tajemnicze „coś” znajdujące się w tle. Wówczas funkcja falowa zostanie nagle zlokalizowana. Poszczególne cząstki mają znikomą szansę takiego uderzenia, bo tylko jedną na 100 mln lat. W przypadku makroskopowego kota prawdopodobieństwo, że uderzy przynajmniej jedna z 10^{27} cząstek, z których się składa, jest duże. Może się to zdarzyć mniej więcej raz na każde 100 ps. Kot tak naprawdę nigdy nie miałby szansy znaleźć się w jakimkolwiek stanie superpozycji. Zatem nie ma potrzeby dekoherencji: makroskopowy stan kota wynika ze spontanicznych makroskopowych zaników funkcji falowej.

Ten model ma jednak kilka mankamentów. Przede wszystkim czynnik synchronizacji czasu, który wyzwała

Kwantowa teleportacja

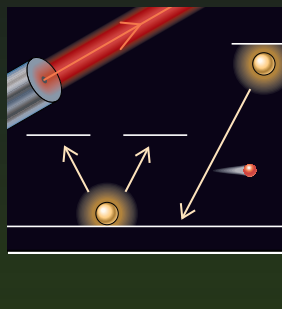


Ta idea ma mniej wspólnego z serialem *Star Trek* niż z rekonstrukcją zniszczonej informacji. Jej sednem jest efekt Einsteina, Podolskiego i Rosena, w którym wykazano,

że dwa fotony pozostają ze sobą związane niezależnie od tego, jak są oddalone, dopóki nie zostanie przeprowadzony pomiar (który oba momentalnie wprowadza w określony stan). Alicja bierze jeden foton EPR, a Bob drugi. Następnie Alicja mierzy swój foton EPR względem trzeciego fotonu. Bob natomiast może wykorzystać ten względny pomiar do odtworzenia nie-EPR-owskiego fotonu Alicji. Nie jest jednak jasne, czy Bob naprawdę zmaterializował foton, czy też może go sklonował. Naukowcy z Uniwersytetu w Innsbrucku, jak twierdzą, zademonstrowali to zjawisko, które można wykorzystać w kwantowej kryptografii.

Kwantowa optyka laserowa

Lasery zwykle wymagają inwersji populacji, czyli spełnienia warunku, aby atomy w stanie wzbudzonym przewyższały liczebnie te, które są w stanie podstawowym; wzbudzone atomy, przechodząc do stanu podstawowego, emitują fotony promieniowania laserowego. W 1995 roku badaczom udało się uniknąć warunku inwersji. Laserując bez inwersji, dwa sprzężone lasery oferują dwóm atomom w stanie podstawowym dwie ścieżki prowadzące do jednego wyższego poziomu energii. Interferencja tych ścieżek sprawia, że atomy w stanie podstawowym stają się niewidzialne, a zatem potrzeba mniej atomów w stanie wzbudzonym. Takie lasery nie wymagają dużo mocy i w zasadzie mogłyby pracować w pożądanym obszarze promieni X.



JARED SCHNEIDMAN DESIGN

gett, który jednak pozostaje zwolennikiem tych poczynań. – Stoję na stanowisku, że należy przeprowadzać doświadczenia, których celem jest sprawdzenie, czy mechanika kwantowa nadal obowiązuje.”

Coraz mniejsze tranzystory, które teraz już mają rozmiary nie większe od mikrometra, być może również prowadzą do poznania przemian kwantowo-klasycznych. W ciągu kilku lat mogą one osiągnąć rozmiary rzędu jednej dziesiątej nanometra i znaleźć się w krainie nazywanej niekiedy skalą mezoskopową. Da Hsuan Feng z Drexel University spekuluje, że mechanika kwantowa być może wcale nie prowadzi do mechaniki klasycznej; już raczej oba opisy wywodzą się z jeszcze nie odkrytych pojęć fizycznych pochodzących z obszaru leżącego między nimi.

uderzenie, jest zupełnie dowolny; ci, którzy stosują ten model, zwykle wybierają prowadzący do rozsądnych wyników. Ważniejsze jest jednak źródło tego wyzwania. „W zasadzie [jest to] rodzaj szumu ogólnego tła, który sam nie może być opisany przez mechanikę kwantową” – wyjaśnia Leggett. Szum nie jest wynikiem przypadkowych procesów zachodzących w środowisku; ma on wyraźny matematyczny posmak. Roger Penrose z University of Oxford w swojej książce *Shadows of the Mind* (Zaćmienia umysłu) dowodzi, że czynnikiem wyzwalającym może być grawitacja, która zgrabnie usuwałaby pewne trudności techniczne.

Jest jeszcze wiele innych, bardziej radykalnych projektów. Najbardziej znany został wysunięty przez nieżyjącego już Davida Bohma, który postulował, że „ukryte zmienne” podbudują mechanikę kwantową. Te zmienne – opisujące własności, które w pewnym sensie przypisują funkcjom falowym działanie rzeczywiste – wyeliminowałyby pojęcie superpozycji i przywróciły rzeczywistość deterministyczną. Podobnie jak idea wielu światów teoria Bohma nie daje się zweryfikować; ukryte zmienne z definicji pozostają ukryte.

Wobec takiego wyboru wielu fizyków opowiada się za dekoherencją (która najmniej rzeczy przyjmuje na wiarę), nie bacząc na to, że zawodzi w pełnym rozwiązaniu problemu pomiaru. „Dekoherencja pozwala wyjaśnić fizyczne aspekty tych zagadnień

– mówi Żurek; zawodzi jednak w przypadku zagadnień metafizycznych w rodzaju tego, w jaki sposób świadomy umysł przewiduje rezultat. – To jest niezrozumiałe, jeśli słusznie oczekujemy odpowiedzi na wszystkie pytania, przynajmniej dopóki nie poznamy powiązań między mózgiem i umysłem” – zamyśla się.

Większe superpozycje umożliwią zapewne naukowcom rozpoczęcie eliminowania pewnych teorii – na przykład GRW i dekoherencja przewidują różne skale superpozycji. „To, co chcielibyśmy zrobić, to przejść do układów bardziej złożonych i wpłatać coraz więcej cząstek” – mówi Haroche, i to więcej niż tylko te 10 uprzednio uwięzionych. Doświadczenia planowane przez NIST są szczególnie odpowiednie do tego, by je wykorzystać jako „monitory dekoherencji – utrzymuje Monroe. – Możemy symulować szum, który w sposób zamierzony sprawi, że superpozycja się rozpadnie.” Leggett zaproponował użycie sensorów zrobionych z nadprzewodzących pierścieni (nazywanych SQUID-ami⁴): byłoby możliwe przepuszczenie stosunkowo dużych prądów jednocześnie płynących w pierścieniu w przeciwnych kierunkach.

Mimo to ciągle jeszcze przed nami długa droga. „Nawet w najbardziej spektakularnych doświadczeniach pokazaliście superpozycję co najwyżej 5000 cząstek. To jeszcze daleko do 10²³ cząstek charakterystycznych dla świata makroskopowego” – mówi Leg-

Kwantowe liczenie

Nawet jeśli te eksperymenty nie pozwalają w pełni rozwiązać problemu pomiaru, dają znaczący wkład do gorącego tematu kwantowego liczenia. Klasyczny komputer jest zbudowany z tranzystorów, które przełączają się między 0 i 1. Natomiast w komputerze kwantowym „tranzystory” pozostają w superpozycji stanów 0 i 1 (nazywanej kwantowym bitem lub qubitem); obliczenia są prowadzone poprzez oddziaływanie między superponowanymi stanami, dopóki nie zostanie dokonany pomiar. Wówczas superpozycje zanikają i maszyna daje ostateczny wynik. Ale tylko teoretycznie, ponieważ jednocześnie mogła uzyskać wiele odpowiedzi. Komputer kwantowy potrafiłby w ciągu kilku sekund zrealizować takie zadania, jak na przykład rozkładanie na czynniki pierwsze wielkich liczb w celu łamania kodów, co maszynie klasycznej zajęłoby całe lata.

W grudniu 1995 roku naukowcom udało się stworzyć układy dwubitowe. Monroe z kolegami wykonali z jonu berylu element logiczny nazywany bramką kontrolną NOT. Jon został uwięziony i schłodzony do swojego najniższego stanu oscylacyjnego. Ten stan i pierwszy wzbudzony stan oscylacyjny stanowią jeden bit. Drugim bitem jest spin jednego z elektronów jonu. Impulsy laserowe mogą wprowadzić te bity w stan superpozycji i sterować drugim z nich zależnie od stanu pierwszego bitu. Inne warianty bramek sprzęgają dwa fo-

tony poprzez atom we wnęce rezonansowej lub transmitują splecioną parę fotonów przez sieć detektorów.

Jak dotąd zbudowanie użytecznego komputera kwantowego, wykorzystującego superpozycje tysięcy jonów i przeprowadzającego miliardy operacji, pozostaje wątpliwe. Na czym polega problem? Chodzi o zanik superpozycji. Bramki logiczne muszą być dostatecznie szybkie, by mogły wykonać pracę, zanim qubity stracą spójność. Korzystając z danych NIST uzyskanych w eksperymencie z bramką, Haroche i Raimond w sierpniowym numerze *Physics Today* z 1996 roku opublikowali oszacowania. Wynika z nich, że gdybyśmy założyli, iż prędkość bramki równa się 0.1 ms, i chcieli zakończyć sensowne obliczenia (w tym wypadku chodziło o rozłożenie na czynniki pierwsze liczby 200-cyfrowej), bity powinny pozostać w stanie superpozycji co najmniej przez rok.

Inni fizycy są mniej pesymistycznie nastawieni, ponieważ rozwiązaniem tego problemu mogą być kody poprawiające błędy (które są nieodzowne w obliczeniach klasycznych). „Dają instrukcje, jak naprawić uszkodzenie” – twierdzi David DiVincenzo z IBM Thomas J. Watson Research Center w Yorktown Heights w stanie Nowy Jork.

DiVincenzo zwraca ponadto uwagę na fakt, że nowa metoda liczenia kwantowego, wykorzystująca techniki magnetycznego rezonansu jądrowego (NMR), mogłaby wydłużyć czasy spójności do sekund lub więcej.

Wyobraźmy sobie, że ciecz – filiżanka kawy – jest umieszczona w polu magnetycznym; z powodu drgań termicznych i innych występujących sił tylko jedno na każdy milion jąder w cząsteczkach kofeiny ustawi się wzdłuż kierunku pola magnetycznego. Tymi wyróżnionymi jądrami można manipulować za pomocą fal radiowych w taki sposób, by ich spiny wprowadzić w superpozycję ustawień do góry i do dołu. Tym razem utrzymanie spójności jest łatwiejsze niż w przypadku innych metod, ponieważ superponowane spiny jądrowe są dobrze chronione przed ośrodkiem przez chaotycznie kotłujące się wokół nich cząsteczki, których obłędna szarpanina uśrednia się do zera. Licząca kofeina faktycznie siedzi w spokojnym oku cyklonu.

Ostatnio dwie grupy naukowców wykazały możliwość kwantowego liczenia metodą NMR, stosując wersję układu z czterema qubitami do obliczenia sumy 1 plus 1. Układy bardziej złożone, używające może nawet 10 qubitów, prawdopodobnie będą dostępne pod koniec roku.

Niedogodnością jest odczytywanie wyniku na wyjściu z układu. Z powodu niemożności detekcji poszczególnych spinów naukowcy muszą mierzyć spiny wszystkich cząsteczek – zarówno qubitów, jak i niequbitów. Złożone cząsteczki, mające wiele spinów, są zatem bardziej „zazsumione” od prostych cząsteczek. „Zapewne zrobią coś ładnego – mówi Monroe – ale po przekroczeniu około 10 bitów natrafiają na kłopoty natury podstawowej.” Wyjście uzyskane z 10 bitów stanowią tylko 0.001 tego, co się uzyskuje z pojedynczego bitu; dla 20 bitów sygnał na wyjściu zmniejsza się milion razy. Tak więc metoda NMR może nie wejść do wyróżnionego królestwa obliczeń, gdzie wymagane jest przynajmniej 50 bitów.

Kwantowe superpozycje mogą wszelako znaleźć zastosowanie gdzie indziej. Stroud proponuje gromadzenie danych w atomie, ponieważ elektron odpowiednio wzbudzony do stanu rydbergowskiego mógłby spójnie obsadzać 2500 różnych poziomów energetycznych. „Oznacza to, że funkcja falowa elektronu może być bardzo złożona i zawierać ogromnie dużo informacji” – wyjaśnia. Tę możliwość wykazał teoretycznie, pisząc na atomie OPTICS.

Przydatność kwantowej superpozycji, na przykład w szyfrowaniu, w chemii, a nawet w teleportacji⁵, została już dowiedziona. Dotychczas zamknięty w pudełku kot Schrödingera mógł jedynie wywołać w pole największe umysły filozoficzne. Teraz, jak się wydaje, znalazł dostatecznie wiele zastosowań technicznych, by nadal pozostawał tam, gdzie jest.

Tłumaczyła
Aleksandra Kopystyńska

Przypisy tłumaczki:

¹ Najwyższa stawka w bardzo popularnym w Stanach Zjednoczonych teleturmuje.

² To charakterystyczny zwrot fizyków, który po niemiecku brzmi – *welcher Weg*, po angielsku zaś – *which way*.

³ Warto zauważyć, że w 1889 roku Rydberg sformułował empiryczny wzór na długość fali dowolnej linii widmowej, w którym występuje stała niezależna od rodzaju atomu (nazwana później stałą Rydberga R) oraz inne stałe, zależne od pierwiastka i serii widmowej. W owym czasie budowa atomu nie była znana; elektron został odkryty w 1897 roku.

⁴ SQUID jest akronimem angielskiej nazwy urządzenia: Superconducting Quantum Interference Device [patrz: John Clarke, „Nadprzewodnikowe interferometry kwantowe”; *Świat Nauki*, październik 1994].

⁵ Mianem tym określa się przesyłanie (ciała) za pomocą telekinezy.

Literatura uzupełniająca

DECOHERENCE AND THE TRANSITION FROM QUANTUM TO CLASSICAL. Wojciech Żurek, *Physics Today*, vol. 44, nr 10, ss. 36-44, X/1991.
WHERE DOES THE WEIRDNESS GO? David Lindley; BasicBooks, 1996.
SCHRÖDINGER'S MACHINES. Gerard J. Milburn; W. H. Freeman and Co., 1997.