

W pogoni za zdrowym rozsądkiem

Mechanika kwantowa jest teorią, która doskonale zgadza się z wynikami doświadczeń, ale zrozumienie jej samej w sobie stawia pewne trudności natury koncepcyjnej. Podstawowe jej założenia wydają się przeczyć zdrowemu rozsądkowi. Wygląda jednak na to, że należy raczej zrewidować nasze pojęcie zdrowego rozsądku, a teorię zostawić na razie w spokoju. Ten numer *Delty* jest właśnie zaproszeniem do wspólnej zabawy w zrozumienie niezrozumiałego.

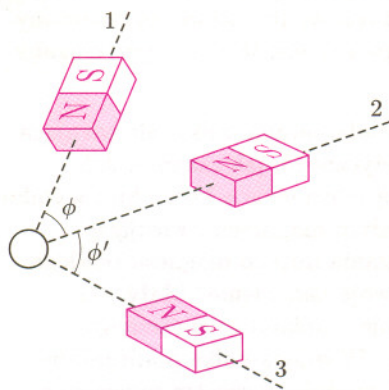
Pozornym paradoksom teorii – wynikającym z pewnych schematów myślowych opartych na codziennym doświadczeniu – poświęcone są pierwsze trzy artykuły. Konkretnym przykładem, gdzie nie stosuje się nasza zdroworozsądkowa zerojedynkowa logika (zakładająca, że prawdziwe jest albo TAK, albo NIE), może być komputer kwantowy. Z założenia jest on oparty na logice kwantowej (choć wyniki daje klasyczne), gdzie istnieje coś pośredniego między TAK a NIE. Omówione wcześniej paradoksy przekładają się na język schematów logicznych, co może w inny sposób przybliżyć logikę wielowartościową.

Co każdy elektron wiedzieć powinien?

Przemysław PANEK

Mechanika kwantowa nigdy nie podobała się Albertowi Einsteinowi. W okresie gdy powstawała, wielokrotnie starał się wykazać wewnętrzną sprzeczność tej teorii. Ważną próbą był eksperyment myślowy, nazwany potem od nazwisk jego twórców paradoksem Einsteina–Podolskiego–Rosena. Na podstawie jego prostszej wersji D. Greenberger, M. Horn i A. Zeilinger przedstawili w 1989 r. paradoks, zwany w skrócie paradoksem GHZ. Zanim go jednak poznamy, przyjrzyjmy się najpierw niektórym kwantowym własnościom elektronów.

W szkole uczymy się, że elektron to mała lekka cząstka, na rysunkach przedstawiana jako kulka. Ma on masę $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg i ujemny ładunek elektryczny $q_e = e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C. Jednak masa i ładunek to nie wszystko, co „posiada” elektron. Ma on także własność zwaną kwantowym momentem magnetycznym lub spinem. Jeżeli elektron znajduje się w niejednorodnym polu magnetycznym, to działa na niego siła, jak na mały magnes (oprócz siły Lorentza związanej z ruchem elektronu jako ładunku elektrycznego). Magnesy mogą się przyciągać lub odpychać. Jeżeli przypadkowy elektron znajdzie się w pobliżu jednego z biegunów magnesu, to mamy 50% szansy, że będzie on przyciągany i tyle samo, że odpychany. Przeprowadźmy eksperyment (niestety, nie wykonamy tego w domu). Do spoczywającego elektronu zbliżamy z góry magnes (rys. 1).



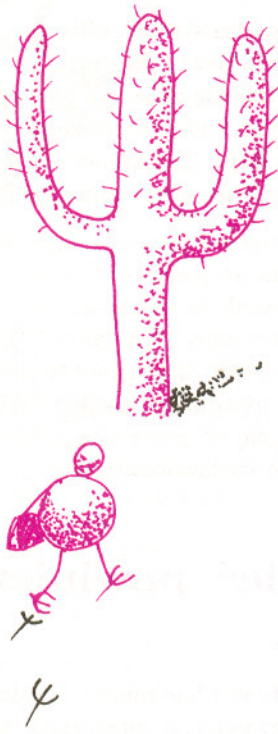
Rys. 1

Opis elektronu jako małej kulki (czy też punktu materialnego) nie jest całkiem poprawny. O elektronie można także myśleć jako o biegnącej fali, która np. ulega dyfrakcji i interferencji, przechodząc wokół przeszkód. Opis korpuskularny i falowy uzupełniają się, tzn. w niektórych sytuacjach ujawnia się falowa natura elektronów, a w innych – to, że są cząstkami.

W opisywanym eksperymencie dobrym przybliżeniem będzie opis korpuskularny. Rozmiary układu eksperymentalnego będą duże w stosunku do długości odpowiedniej fali elektronowej, a liczba elektronów – ustalona. Niekiedy może się nasuwać myślenie o obiektach kwantowych jako o jakiegoś rodzaju „falo-cząstkach”, które zachowują się w sposób będący połączeniem własności falowych i cząstkowych. Obraz taki może być jedynie przybliżeniem, prawdziwym w przypadku jednego samotnego elektronu lub elektronów niezależnych i wzajemnie nie oddziałujących. Ogólna sytuacja jest bardziej złożona, czego dostrzeżenie, miejmy nadzieję, ułatwia opisywany eksperyment. Zatem założmy na razie, że mamy do czynienia z małymi kulkami.

Elektrony mają ładunek elektryczny. Zatem, jeśli lecące elektrony umieścimy w polu elektrycznym lub magnetycznym, to będzie na nie działać siła Lorentza, odchylająca ich bieg. Elektrony w próżni mamy dostępne w kineskopie każdego telewizora lub monitora komputerowego. Odpowiednimi przyrządami można zobaczyć, że świecenie ekranu składa się z wielu małych rozbłysków pochodzących od pojedynczych elektronów. W jasnych obszarach jest ich więcej, w ciemnych – mniej. Siła każdego rozbłysku zależy jedynie od energii elektronów (np. od napięcia je przyspieszającego). Zbliży do ekranu magnes. Zauważymy lekkie przekrzywienie się obrazu, spowodowane działaniem siły Lorentza. W kolorowym kineskopie bardziej będą się rzucać w oczy zmiany kolorów, które także powoduje siła Lorentza i które można zrozumieć, znając zasadę działania takiego kineskopu. Nie należy przesadzić ze zbyt dużym magnesem, gdyż ekran się magnetyzuje i barwne plamy jakiś czas pozostają. Eksperyment ten ma jedynie przekonać Czytelnika o rzeczywistości opisywanych zjawisk, gdyż dalej nie będziemy omawiać wpływu siły Lorentza. Ponadto przyjmijmy, że elektrony poruszają się w próżni, w nieobecności pól grawitacyjnych i elektrycznych.

Powiedzmy, że zdarzyło się, iż elektron jest odpychany i zaczyna poruszać się do dołu. Odsuwamy teraz magnes i przysuwamy go z innego kierunku (nr 2), będącego pod kątem ϕ do poprzedniego. Prawdopodobieństwo, że elektron



Moglibyśmy spróbować założyć, że w mikroświecie także obowiązuje zasada zachowania momentu pędu. I faktycznie. Okazuje się, że dużo elektronów zmieniających jednocześnie i w taki sam sposób kierunek spinu może spowodować makroskopowe efekty. Właśnie tak, jakby elektron był małym wirującym obiektem o osi obrotu skierowanej zawsze zgodnie z kierunkiem jego „wewnętrzny magnesu” i nagle zmienił oś lub kierunek obrotu. Nie przywiązujemy się jednak zbyt mocno do tego modelu. Jeśli chodzi o nazwę „spin”, to oznacza ona moment pędu elektronu. Powszechnie określenia „spin” używa się także w odniesieniu do momentu magnetycznego (czyli opisanego obok zachowania się elektronu w polu magnetycznym), tak jak to uczyniliśmy.



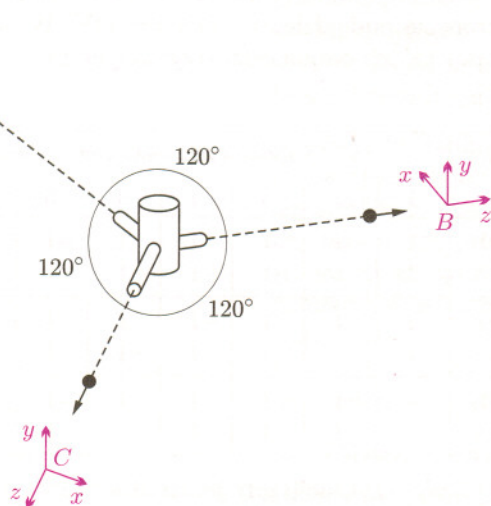
będzie ponownie odpychany, wynosi $P_-(\phi) = \cos^2(\frac{\phi}{2})$. Prawdopodobieństwo, że będzie przyciągany, wynosi $P_+(\phi) = \sin^2(\frac{\phi}{2})$. Indeksy „+” i „-” oznaczają odpowiednio przyciąganie lub odpychanie. W szczególności, jeżeli ponownie zbliżamy magnes z tej samej strony, czyli z góry, to będzie na pewno odpychany, jeśli z dołu, to przyciągany. Jeżeli elektron był za pierwszym razem przyciągany (do góry), to wzory należy naturalnie zamienić: $P_+(\phi) = \cos^2(\frac{\phi}{2})$, $P_-(\phi) = \sin^2(\frac{\phi}{2})$. Nie jest istotne, jaki biegun magnesu zbliżamy do elektronu, gdyż przebieg zjawiska będzie taki sam dla północnego i południowego, a nazwa to rzecz umowna. Istotne, abyśmy raz wybrawszy, zawsze używali tego samego bieguna. Odsuwamy magnes i zbliżamy go po raz trzeci, z kierunku nr 3, pod kątem ϕ' do ostatniego (drugiego) kierunku. Teraz elektron zupełnie zapomniał, co robił za pierwszym razem. Jeżeli za drugim razem był przyciągany, to prawdopodobieństwa przyciągania i odpychania za trzecim razem zależą jedynie od ϕ' i wynoszą $P_+(\phi') = \cos^2(\frac{\phi'}{2})$, $P_-(\phi') = \sin^2(\frac{\phi'}{2})$. Jeżeli był odpychany, to wzory zamieniamy miejscami. Możemy taką zabawę prowadzić w nieskończoność, wybierając dowolnie kierunki we wszystkich trzech wymiarach. Za każdym razem liczy się kierunek i wynik *ostatniego* „badania”. W szczególności, jeżeli będziemy zbliżać magnes na przemian z dwóch prostopadłych kierunków, to dostaniemy doskonały generator zdarzeń losowych. Za każdym razem mamy po 50% szansy na przyciąganie i odpychanie.

Co ciekawe, jeśli spowodujemy, że poruszony elektron wróci na swoje miejsce i nie zostanie w żaden sposób „podglądnięty” – czy był przyciągany czy odpychany – to pamiętany przez niego kierunek spinu nie zostanie zmieniony. Zupełnie jak gdyby nie był wykonany żaden pomiar. Przysuwanie magnesu i badanie, czy elektron jest przyciągany czy odpychany, nazywa się pomiarem składowej spinu wzdłuż wybranej osi. Jako wynik pomiaru mamy zawsze dwie możliwości: zwrot spinu jest zgodny ze zwrotem osi, wzdłuż której przysuwamy magnes, lub do niego przeciwny, zależnie od tego, czy elektron jest przyciągany czy odpychany.

Czasem elektron jest przedstawiany jako mała, naładowana kulka, ale wirująca. Istotnie, taka kulka byłaby źródłem pola magnetycznego, jak magnes. Jak widzieliśmy, elektron najwyraźniej niesie ze sobą informację o kierunku i wyniku ostatniego pomiaru. Być może jest on takim małym magnesem, wirującą kulką lub czymś jeszcze innym, co w czasie zbliżania dużego magnesu podlega pewnym przypadkowym oscylacjom i zmienia swoje ustawienie? Mały, ale „zwykły” magnesik ustawiałby się zawsze zgodnie z liniami zewnętrznego pola magnetycznego i byłby zawsze przyciągany. Wirująca kulka podlegałaby precesji. Natomiast elektron ustawia się czasem zgodnie, a czasem przeciwnie, co należałoby bliżej zbadać i zaproponować jakieś wyjaśnienie. Rzeczywistość, niestety, nie jest taka prosta i właśnie to jest przedmiotem tego artykułu.

Kolejnym pojęciem, z którym musimy się zapoznać, jest korelacja wyników pomiarów. Wyobraźmy sobie człowieka, który siedzi w pokoju w Warszawie i ma do dyspozycji dwa stosy kartek czarnych i białych. Bierze jedną kartkę białą, jedną czarną i wkłada je losowo do dwóch różnych kopert. Następnie koperty wysyła pocztą do dwóch przyjaciół mieszkających w różnych miastach, np. w Gdańsku i w Krakowie. Jeżeli jeden z nich znajdzie w kopercie białą kartkę, to drugi na pewno ma czarną. Każdy z nich wie, o co chodzi, więc zaglądając do swojej koperty, dowiaduje się zarazem, co jest w kopercie drugiej osoby. Oczywiście, nie ma między nimi żadnej wymiany informacji. Informacja w postaci kartek w kopertach jest wymieniana jedynie między każdym z nich a ich wspólnym znajomym z Warszawy. Ponadto wcześniej wszyscy musieli ustalić reguły zabawy. Jeżeli wynik jednego pomiaru, jakim jest tu obejrzenie zawartości koperty, mówi nam coś o wyniku innego pomiaru, to mówimy, że wyniki te są skorelowane. Tutaj powiemy, że skorelowane są wyniki badania kopert przez znajomych z Krakowa i Gdańska. To, co znajduje jeden z nich, nie jest przypadkowe w stosunku do tego, co znajduje drugi. Zamiast kartek czarnych i białych można wysyłać elektrony o określonych kierunkach spinu

(puryści powiedzą: kierunkach i zwrotach). Można przygotować dwa zestawy elektronów o spinach do góry i do dołu, np. przez wcześniejsze zbliżenie badającego magnesu z góry. Elektrony podzielimy na te przyciągane i te odpychane. Jeżeli będziemy je trzymać z dala od magnesów, to będą „pamiętać” kierunek swojego spinu. Potem można losowo rozsyłać do Gdańska i Krakowa pary elektronów o przeciwnych kierunkach spinu (jak na razie Poczta Polska nie oferuje takiej usługi, ale to drobiazg techniczny). Znajomi, którzy tam mieszkają, powinni wcześniej wiedzieć, że mają badać swoje elektrony w kierunku góra-dół, inaczej dostaną naprawdę przypadkowe wyniki.

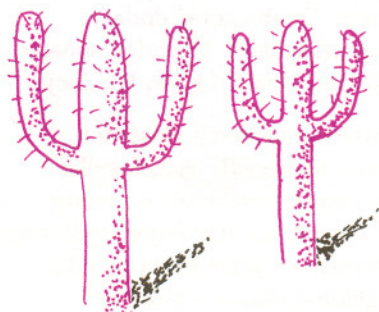


Rys. 2

Możemy teraz przejść do właściwego eksperymentu GHZ. Wyobraźmy sobie sytuację jak na rysunku 2. Trzy elektrony rozsyłane są do trzech obserwatorów. Obserwatorzy mogą być bardzo daleko, np. w różnych krańcach Galaktyki. Urządzenie (pośrodku) nie ma gotowych do wysłania elektronów o określonych spinach. Sytuację elektronów można porównać do trzech więźniów, którzy ustalają wspólne zeznania, a potem są rozłączeni i poddani osobnym przesłuchaniom. Urządzenie bierze trzy elektrony i robi im specjalne, kwantowe „pranie mózgu” tak, że ich zeznania po rozłączeniu są skorelowane w zdumiewający sposób. Urządzenie i obserwatorzy leżą w jednej płaszczyźnie. Niech każdy z obserwatorów ma układ współrzędnych, jak na rysunku. Każda z osi OZ leży w kierunku ruchu elektronu, osie OY są skierowane „do góry”, osie OX – stosownie dla zachowania

prawoskrętności układu. Obserwatorzy będą mierzyli spiny jedynie wzdłuż osi OY lub OX . Przyjmijmy, że badający magnes będzie przysuwany od strony dodatnich pólosi. Każdemu wynikowi pomiaru przypiszemy liczbę $+1$, jeśli elektron był przyciągany, i -1 , jeśli był odpychany. To głównie dla uproszczenia opisu. Zależności między „zeznaniem” elektronów (korelacje) są następujące. Niech jeden z obserwatorów (dowolny) zmierzy składową spinu swojego elektronu wzdłuż osi OX , a dwaj pozostali obserwatorzy wzdłuż osi OY . Wtedy, jeśli przemnożymy liczby odpowiadające wynikom tych trzech pomiarów, to zawsze dostaniemy $+1$, nigdy -1 . Inaczej mówiąc, albo wszystkie trzy elektrony były przyciągane, albo jeden przyciągany, a dwa odpychane. Wszystkie cztery sytuacje, w których iloczyn wyników jest $+1$, są równie prawdopodobne. Dzisiaj nie umiemy zrobić przyrządu, który by rozsyłał tak przygotowane elektrony, ale jest to jedynie problem techniczny. Żadne prawo natury tego nie zabrania.

Jakie są konsekwencje takiej korelacji? Jeżeli obserwatorzy B i C zmierzają spiny swoich elektronów wzdłuż osi OY , to będziemy wiedzieli, co *by było*, gdyby obserwator A zmierzył spin swojego elektronu wzdłuż osi OX . Jeśli chcielibyśmy wiedzieć, co dostałby A , robiąc pomiar wzdłuż OY , to B i C powinni zmierzyć spiny swoich elektronów – jeden wzdłuż OY , drugi w kierunku OX . Zatem A może w ogóle nie wyciągać swojego magnesu z szuflady, a mimo to możemy powiedzieć, co zrobiłby jego elektron. Nasuwa się myśl, że to podobnie, jak z kopertami. W jakiś sposób informacja o obu wynikach przyszłych pomiarów (wzdłuż osi OX lub OY) jest zapisana w elektronie na samym początku. Oczywiście, żaden elektron nie jest wyróżniony, tak samo musi być z dwoma pozostałymi. Urządzenie pośrodku zadbało, aby stany trzech rozbiegających się elektronów (informacje o wynikach przyszłych możliwych pomiarów) były uzgodnione. Hipoteza taka byłaby w pełnej zgodzie z wcześniejszymi podejrzeniami, że elektron jest swego rodzaju dziwnym magnesikiem. Może on „pamiętać” kierunek ostatniego pomiaru, ale repertuar jego zachowań, jak widać, może być czasem bogatszy. Przeanalizujemy dokładniej to przypuszczenie.



Twierdzimy zatem, że każdy elektron w tym eksperymencie niesie ze sobą informację, jak ma się zachować, gdy będziemy do niego przysuwać magnes z kierunku OX lub OY . Gdybyśmy znali wyniki przyszłych możliwych

pomiarów w kierunkach osi OY , to automatycznie znalazłbyśmy też możliwe wyniki w kierunkach OX . Musi być bowiem zachowana opisana na początku korelacja, którą nasi obserwatorzy mogą w każdej chwili i w dowolnej kombinacji zapragnąć sprawdzić. Są trzy elektrony, mierząc spin każdego z nich w kierunku OY mamy dwie możliwości, razem $2^3 = 8$ możliwości spełniających naszą korelację. Wszystkich możliwości, razem z tymi, które nie gwarantowałyby poprawnych korelacji, byłoby $2^6 = 64$. Nie będziemy badać każdego elektronu w kierunkach OX i OY . Widzieliśmy, że jeden pomiar zmienia coś w elektronie i wpływa na wyniki następnego pomiaru. Ale każda z cząstek ma gotową odpowiedź, jak ma się zachować w takiej lub innej sytuacji, zależnie od tego, z której strony ją podejmiemy – OX czy OY . W poniższej tabelce mamy możliwe zestawy takich odpowiedzi trzymanych przez elektrony w tajemnicy przed nami.



Obserwator	Spin mierzony wzdłuż osi	8 możliwych zestawów odpowiedzi							
		1	2	3	4	5	6	7	8
A	OY	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
	OX	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
B	OY	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
	OX	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
C	OY	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
	OX	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1

No dobrze, dotychczas mówiliśmy o sytuacji, gdy jeden obserwator mierzy w kierunku OX , a dwóch – OY . Wtedy sprawdzamy poprawność korelacji. A co będzie, jeśli obserwatorzy wybiorą kierunki do pomiarów w inny sposób?

Dostaną wyniki takie, jak w którejś z ośmiu kolumn tabeli (choć nie wiemy, z której). Pojedynczy elektron nie wie przecież, o co pytamy jego kamratów i czy sprawdzamy korelację (na co musi być zawsze przygotowany), czy robimy coś innego. Nie dajemy mu szansy na blef.

Spiny 3 elektronów mierzone jednocześnie wzdłuż osi OX	4 warianty możliwych wyników w prawdziwym pomiarze			
	1	2	3	4
A	-1	1	1	-1
B	1	-1	1	-1
C	1	1	-1	-1

Ciekawą własnością jest, że gdyby wszyscy obserwatorzy zmierzili składowe spinów swoich elektronów wzdłuż osi OX , to iloczyn przypisanych tym pomiarom liczb wyniósłby $+1$. Niezależnie, który z ośmiu wariantów akurat wybrała środkowa maszyna. A jeśli zmierzą? Tak się składa, że w rzeczywistym eksperymencie dostaną -1 . Dla większej jasności możliwe wyniki jednoczesnych pomiarów wzdłuż osi OX są zebrane w tabelce obok. Będą one zachodzić

z równymi prawdopodobieństwami. Skąd to wiemy? Jest to jeszcze jedna własność opisanej kwantowej korelacji elektronów. Nie wspominaliśmy o niej, aby nie wprowadzać zamieszania. Gdyby elektrony niosły „ze sobą” informację o wynikach pomiarów, to (jak wykazaliśmy) iloczyn musiałby być $+1$. Są one jednak cząstkami kwantowymi i korzystając z mechaniki kwantowej, można wykazać, że przy opisanej na wstępie korelacji iloczyn musi być -1 . Są to oczywiście rozważania teoretyczne, ale taki też będzie wynik eksperymentu, o czym wszyscy są przekonani. Trzeba tutaj dodać, że w opisanym doświadczeniu nie zachodzi przekaz informacji. W żaden sposób nie możemy z daleka wpłynąć na zachowanie elektronu. Jest to tylko korelacja.

Na zakończenie pewne uściślenie. Dokonujemy antropomorfizacji elektronu mówiąc, że „wie” on lub „dowiaduje” się, co ma zrobić. Jest to jednak tylko pewien skrót ułatwiający opis i myślenie. Jedyne, co jest pewne, to to, że my coś wiemy lub nie wiemy. My, którzy o tym mówimy, znamy działanie środkowej maszyny, wiemy, jakich pomiarów dokonują obserwatorzy, jakie mają wyniki, itp. Niemniej jednak rzeczywistość kwantowa wygląda ciekawie i wszyscy Czytelnicy są zaproszeni do jej dalszego poznawania.

Jaka jest alternatywa dla obalonej hipotezy? Jak dotychczas, nie ma dobrej. Najpowszechniej przyjęta jest taka, że w abstrakcyjnej, wielowymiarowej przestrzeni można określić pewną funkcję, wspólną dla wszystkich elektronów, opisującą, co mają one robić i z jakim prawdopodobieństwem. W trakcie pomiaru spinu jednego z elektronów funkcja nagle i skokowo przechodzi w inną. Odległy elektron „widzi” już inną funkcję i stosownie do tego wybiera kierunek spinu w polu magnetycznym. Jest to pomyślane tak sprytnie, że nie zachodzi przy tym przekaz informacji. Mechanika kwantowa mówi nam, jak zachowuje się ta abstrakcyjna funkcja i ostateczne przewidywania są całkowicie zgodne z doświadczeniem.