

Splątanie kwantowe to chyba najbardziej tajemnicze zjawisko znane współczesnej fizyce. Jeśli ktoś zapytałby mnie, czy w fizyce jest coś, co uznałbym za „prawdziwe czary”, to właśnie splątanie wymieniłbym w pierwszej kolejności. Jest to zjawisko, które nie ma żadnej, nawet najmniejszej, analogii w świecie obiektów dużych i tym samym jego obrazowe zrozumienie jest wręcz niemożliwe. Każdy, kto choć raz usłyszy o splątaniu kwantowym, już nigdy nie będzie tak samo patrzył na zjawiska zachodzące w przyrodzie.

Poznanie natury splątania kwantowego to jak przekroczenie Rubikonu – zdarza się tylko raz w życiu i odwrotu już nie ma. Proszę tylko nie odkładać tekstu w połowie, mówiąc „niemożliwe”, ale doczytać go do samego końca. Bo splątanie kwantowe jest nie tylko teoretyczną dywagacją, ale przede wszystkim obserwacyjnym faktem.



Tomasz Sowiński jest fizykiem na Wydziale Biologii i Nauk o Środowisku UKSW i w Centrum Fizyki Teoretycznej PAN. W 2005 roku skończył studia na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

w zakresie fizyki teoretycznej, a trzy lata później uzyskał tam stopień naukowy doktora. Od lat zajmuje się popularyzacją nauk przyrodniczych. W roku 2008 otrzymał tytuł Mistrza Popularyzacji Nauki „Złoty Umysł” w konkursie Prezesa Polskiej Akademii Nauk.

z poprzednim, to jego zachowanie jest nieprzewidywalne. Nikt, nawet najlepszy fizyk, nie potrafi powiedzieć, co stanie się z konkretnym fotonem. I choć już to mówiłem wiele razy, jednak podkreślę to jeszcze raz. Otóż fakt, że nie możemy przewidzieć, jak zachowa się konkretny foton przechodzący przez polaryzator, nie jest wynikiem naszej ułomności, niezdolności wykonania dokładnego pomiaru, ale jest spowodowane fundamentalnymi prawami mikroświata. To one sprawiają, że tej wiedzy nigdy nie możemy osiągnąć. Jest ona po prostu nam niedostępna.

Tomasz Sowiński

Poplątane fotony

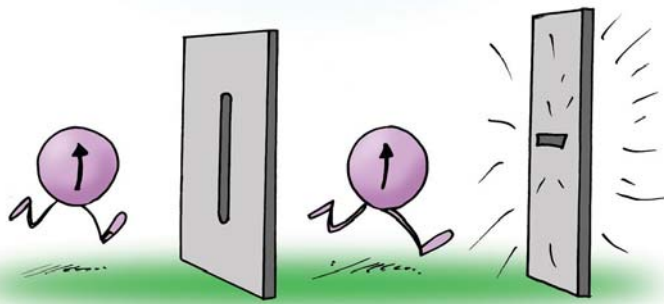
NIEDOSTĘPNOŚĆ INFORMACJI KWANTOWEJ

Aby dobrze zrozumieć, czym jest owo kwantowe splątanie, najlepiej chyba zacząć od korzeni, tzn. od podstaw mechaniki kwantowej. Do tej pory zajmowaliśmy się jedynie zjawiskami kwantowymi, które dotyczyły pojedynczych realizacji jakiegoś doświadczenia. Gdy mówiliśmy o fotonach przechodzących przez polaryzatory, to choć fotonów tych było bardzo dużo, tak naprawdę w danym momencie zajmowaliśmy się tylko jednym z nich. Wszystkie inne traktowaliśmy jak powtórzenie tego samego eksperymentu z pojedynczym fotonem – jako kolejną realizację jednego doświadczenia. Już wtedy poznaliśmy pierwszą tajemnicę mikroświata – jego nieprzewidywalność. Najdobitniej jest to widoczne w szczegółowo opisanym przez nas procesie przechodzenia fotonu przez płytkę światłodzielną (MT 09/2009) albo przez polaryzator (MT 10/2009). Jak pamiętamy to, czy foton skośnie spolaryzowany przejdzie przez pionowo ustawiony polaryzator, czy też zostanie pochłonięty, jest dziełem czystego przypadku. Wiemy tylko, że jeśli powtórzymy ten eksperyment bardzo, bardzo dużo razy, to połowa takich fotonów przechodzi, a druga połowa nie. Choć każdy z kolejnych fotonów jest identyczny



Splątanie kwantowe tajemnicze zjawisko w fizyce

Jeśli ktoś zastanawiał się kiedyś, czym w istocie różni się fizyka obiektów małych od obiektów dużych, to tak naprawdę fundamentalna różnica jest właśnie w tym stwierdzeniu. W makroświecie jak czegoś nie wiemy, to na pewno jest to wina naszych niedoskonałych przyrządów pomiarowych lub naszej



Trywialne sytuacje kwantowe

nieumiejętności wykonania dokładniejszego pomiaru. W mikroświecie, oprócz tej trywialnej możliwości, może to być również wynik tego, że nie wszystko jest dostępne naszym, nawet najdoskonalszym, pomiarem. Pomiar bowiem nie jest dla układu kwantowego aktem obojętnym i na zawsze zmienia jego stan. To sprawia, że jego powtórzenie traci jakiegokolwiek sens, bo nie dotyczy już sytuacji, która była w kręgu naszego zainteresowania (MT 03/2010).

TRYWIALNE SYTUACJE KWANTOWE

Zanim przejdę do szczegółowego omówienia zjawiska splątania kwantowego i jego konsekwencji, chciałbym wrócić do jeszcze jednej rzeczy, która będzie nam bardzo przydatna. Jak uważny Czytelnik zapewne dobrze pamięta, zdarzają się takie sytuacje, w których dokładny pomiar stanu kwantowego jest jednak możliwy. Jeśli bowiem wiemy, że foton jest spolaryzowany na pewno w jednym z dwóch prostopadłych do siebie kierunków, to możemy jednym pomiarem dokładnie rozstrzygnąć, jaki jest jego stan.

Wystarczy w tym celu ustawić na jego drodze polaryzator z osią ustawioną w jednym z tych dwóch kierunków. Jeśli foton przejdzie przez taki polaryzator, bez wątplenia oznacza to w takiej sytuacji, że ma on polaryzację równoległą do osi polaryzatora. Jeśli zostanie pochłonięty, to na pewno polaryzację miał prostopadłą do tego kierunku. Podkreślam jednak jeszcze raz, że z taką sytuacją mamy do czynienia, gdy NA PEWNO wiemy, że polaryzacja fotonu jest jedną z dwóch do siebie prostopadłych. Jest to zatem sytuacja bardzo wyjątkowa. W ogólności takiej wiedzy nie mamy, a nadlatujący foton ma polaryzację zupełnie nam nieznaną.

Jeśli mamy do czynienia z takim bardzo szczególnym przypadkiem, wtedy opis fotonu jest praktycznie całkowicie logiczny i powiedziałbym „klasyczny”. W zachowaniu fotonu nie ma ani krzty losowości i wszystko jest zdeterminowane od samego początku. To bardzo ważne, aby pamiętać, że choć mikroświat jest bardzo tajemniczy i zazwyczaj niedostępny, jednak czasami otwiera się naszemu poznaniu bez żadnej tajemnicy. Właśnie tak jak w tej sytuacji.

Jeśli mamy do czynienia z takim bardzo szczególnym przypadkiem, wtedy opis fotonu jest praktycznie całkowicie logiczny i powiedziałbym „klasyczny”. W zachowaniu fotonu nie ma ani krzty losowości i wszystko jest zdeterminowane od samego początku. To bardzo ważne, aby pamiętać, że choć mikroświat jest bardzo tajemniczy i zazwyczaj niedostępny, jednak czasami otwiera się naszemu poznaniu bez żadnej tajemnicy. Właśnie tak jak w tej sytuacji.

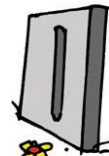
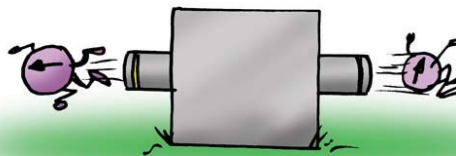
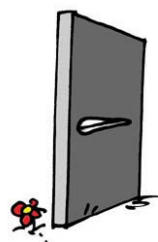
ZŁOŻONE UKŁADY KWANTOWE

O tym bardzo szczególnym przypadku, w którym wszystko jest wiadome, mówię nie bez powodu. Bo właśnie splątanie, które jest dzisiejszym naszym

tematem, jest dość silnie związane z taką sytuacją. Ale zaczniemy od początku. W sytuacji, gdy mamy jeden foton, możliwości są tylko dwie: albo mamy tę szczególną wiedzę o polaryzacji fotonu i wtedy jego zachowanie jest zdeterminowane, albo foton ma całkowicie losową polaryzację i wtedy żaden pomiar nie jest w stanie nas przekonać, jaka ona na pewno jest. W tej drugiej sytuacji wiedza o polaryzacji fotonu jest całkowicie poza naszym zasięgiem.

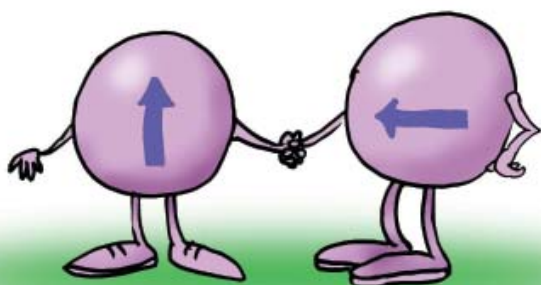
Tak jest w przypadku pojedynczego fotonu. Ale zastanówmy się teraz, czy sytuacja się zmieni, jeśli będziemy rozważać układy kwantowe złożone z więcej niż jednego fotonu, np. z dwóch. Wtedy jest dużo więcej możliwości. Oto może się okazać, że polaryzacja każdego z tych dwóch fotonów jest całkowicie losowa i niezależna od polaryzacji drugiego fotonu. Z taką właśnie sytuacją mieliśmy do czynienia wcześniej – do polaryzatora nadlatywały kolejne, identyczne fotony, a zachowanie każdego z nich nie było w żaden sposób skorelowane z zachowaniem pozostałych. Prawa mechaniki kwantowej nie pozwalały nam przewidzieć zachowania każdego z fotonów osobno, ale statystycznie wiedzieliśmy, jak się one będą zachowywały na polaryzatorze.

Jednak taka sytuacja nie jest jedyną możliwą. Możemy sobie przecież wyobrazić sytuację, w której nadlatujące fotony są, tak jak poprzednio, dla nas całkowicie losowo spolaryzowane, ale dodatkowo są ze sobą skorelowane. Na przykład mogą być tak wyprodukowane, że zawsze mają polaryzacje prostopadłe



Mamy maszynę, która wypuszcza dwa fotony w przeciwnych kierunkach

(albo równoległe) do siebie. Aby dokładnie zrozumieć, co w takiej sytuacji się dzieje, wyobraźmy sobie, że mamy maszynę, która w pewnej chwili wypuszcza dwa fotony w przeciwnych kierunkach. Maszyna ta ma taką własność, że wypuszcza fotony, których polaryzacje są do siebie zawsze dokładnie prostopadłe. Nie wiemy jednak, w jakim kierunku będą one spolaryzowane przy danej realizacji. Są to zatem fotony spolaryzowane zupełnie losowo, jeśli patrzymy na każdy z nich osobno, ale ich polaryzacje są silnie ze sobą skorelowane, jeśli patrzymy na oba fotony równocześnie. To oznacza, że jeśli ustawimy polaryzator na drodze któregośkolwiek z tych fotonów, to zupełnie nie możemy przewidzieć, czy przejdzie on na drugą stronę, czy zostanie pochłonięty. Pomiar na pojedynczym fotonie niczym się bowiem nie różni od sytuacji już nam znanych. Jeśli jednak ustawimy polaryzatory (z osiami polaryzacji w tym samym kierunku) na drodze każdego z nich, to pomiary te będą ze sobą silnie związane. Jeśli jeden z fotonów przez polaryzator przejdzie, to drugi na pewno na swoim



„fotony o dokładnie prostopadłych polaryzacjach”

polaryzatorze zostanie pochłonięty i odwrotnie – jeśli jeden zostanie pochłonięty, to drugi na pewno przejdzie. Właśnie w takiej sytuacji, gdy informacja o zachowaniu układu kwantowego złożonego z mniejszych podukładów jest większa niż informacja o każdym z tych podukładów osobno, mówimy że te podukłady są ze sobą kwantowo splątane.

PARADOKS EINSTEINA-PODOLSKY’EGO-ROSENA

Jeśli wciąż nie widzisz, Drogi Czytelniku, w splątaniu fotonów nic niezwykłego, to teraz przyszedł czas uruchomić wyobraźnię i przeprowadzić eksperyment myślowy. Oto założmy, że fotony wyemitowane przez naszą maszynę produkującą je w stanie splątaniem odleciały od tej maszyny na bardzo duże odległości, np. na dwa przeciwległe krańce naszej Galaktyki. Każdy z tych fotonów jest zupełnie losowy. Jeśli zatem znajdzie się jakiś fizyk na jednym z końców Galaktyki, który będzie chciał zmierzyć, jaka jest polaryzacja znajdującego się tam fotonu, to za bardzo



Paradoks Einsteina-Podolsky'ego-Rosena

nie będzie wiedział, co ma zrobić. Jeśli ustawi w jakimś kierunku swój polaryzator, to praktycznie nie będzie w stanie powiedzieć, czy foton na drugą stronę przejdzie, czy zostanie pochłonięty. Zdecyduje o tym przypadek, działając w duchu praw mechaniki kwantowej. Całkowicie analogicznie będzie wyglądała sprawa dla innego fizyka po drugiej stronie Galaktyki.

Polaryzacja jego fotonu jest również całkowicie nie do poznania i zostanie w pewien sposób określona dopiero w momencie przechodzenia fotonu przez polaryzator. Wcześniej nie będzie nic o niej wiadomo. Niemniej jednak, jeśli jeden z tych fizyków zrobiłby swój pomiar, to natychmiast zachowanie drugiego fotonu na polaryzatorze po drugiej stronie Galaktyki zostanie całkowicie zdeterminowane. Wygląda to tak, jakby w momencie pomiaru na jednym fotonie ten drugi dostał natychmiastową informację, jak ma się zachować na swoim polaryzatorze. Od momentu wykonania pomiaru na jednym z fotonów, drugi zbliżając się do polaryzatora, już nic nie losuje, ale zachowuje się tak, aby uczynić zadość ważniejszej zasadzie: „fotony mają zawsze polaryzacje do siebie prostopadłe”. Krótko mówiąc, wygląda to tak, jakby informacja o pomiarze na jednym fotonie natychmiast, szybciej niż światło, dotarła do drugiego fotonu!!

Taka możliwość oczywiście nie mogła się podobać Albertowi Einsteinowi – twórcy teorii względności, której jedną z konsekwencji jest zasada, że informacja nie może być przesyłana z prędkością większą niż prędkość światła. Dlatego w roku 1935 wraz ze swoimi współpracownikami z Princeton – Podolskym i Rosenem – opublikowali artykuł, w którym przedstawili swój głęboki sprzeciw, konkludując, że mechanika kwantowa dopuszczająca porozumiewanie się cząstek na odległość szybciej niż z prędkością światła nie może być ostatecznie słuszną teorią. Przykład, który podali, był bardzo podobny do naszego przykładu z fotonami i przeszedł do kanonu najstojniejszych paradoksów fizyki jako PARADOKS EPR (Einsteina-Podolsky'ego-Rosena).

GŁĘBOKA TAJEMNICA MIKROŚWIATA

Warto w tym miejscu może zauważyć, że zachowanie takich fotonów jest jeszcze bardziej tajemnicze, niż wydaje się na pierwszy rzut oka. Otóż można byłoby sądzić, że rozwiązanie paradoksu jest bardzo proste. Przecież może być tak, że fotony od samego początku mają dobrze określone (wzajemnie prostopadłe) polaryzacje, a jedynie brak dostatecznych metod badawczych nie pozwala nam ich poznać. Nie ma więc mowy o przesyłaniu jakiegokolwiek sygnału w momencie wykonywania pomiaru – jest on całkowicie zdeterminowany tymi „ukrytymi” parametrami (o parametrach ukrytych już wspominaliśmy w MT 06/2009). Niestety takie rozumowanie nie jest dobre, bo przecież w rzeczywistości ustawienie polaryzatorów jest całkowicie dowolne. To sprawia, że idąc tym tropem, bardzo trudno jest wyjaśnić zachowanie rozdzielonych przestrzennie, ale splątanych fotonów, które padają na polaryzatory o skośnie ustawionych osiach. Gdyby bowiem za całą dynamikę odpowiedzialne były tylko te ukryte zmienne, to fotony w takiej sytuacji niezależnie od siebie losowałyby, czy przejść przez swój polaryzator, czy nie. I każdy z nich miałby taką samą szansę na przejście na drugą stronę jak i na pochłonięcie. Mogłoby się zatem zdarzyć, że oba fotony przeszły przez polaryzatory albo oba zostałyby pochłonięte. Czegoś takiego jednak nie obserwujemy. Jeśli dwa fotony są w stanie splątanim prostopadłych do siebie polaryzacji, to w wyniku eksperymentu zawsze będzie tak, że jeden z fotonów



Głęboka tajemnica mikroświata

przejdzie przez swój polaryzator, a drugi zostanie pochłonięty. Nie wiadomo oczywiście, który co zrobi, ale wiadomo, że zachowują się dokładnie odwrotnie! Sprawa zatem nie rozstrzyga się na poziomie lokalnym (w miejscu, gdzie znajdują się dane fotony), ale na poziomie globalnym – zachowanie jednego fotonu jest silnie powiązane z zachowaniem fotonu drugiego.

NIELOKALNA NATURA MIKROŚWIATA

Z paradoksem EPR bardzo często jest związane niezbyt zręczne nieporozumienie, które wynika z błędnej interpretacji słów Einsteina. Bardzo często mówi się, że dochodzi do ponadświatowej komunikacji pomiędzy fotonami i co za tym idzie, informacja jest przesyłana w sposób gwałcący teorię względności. W tym miejscu trzeba jasno powiedzieć, że to zupełne poplątanie pojęć. Po pierwsze: informacja nie jest tutaj w żaden sposób przesyłana. Powiedziałbym raczej, że jest ona zdelokalizowana. Informacja o tym układzie dwóch fotonów to nie jest suma informacji o każdym z tych fotonów osobno. Jest to coś więcej – coś, co opisuje ten układ jako całość i jest niepodzielne na dwie rozłączne części. Mówiąc językiem mechaniki kwantowej: informacja o tym układzie to nie tylko informacja o położeniu dwóch odległych od siebie fotonów i ich polaryzacjach, ale cała funkcja falowa tego układu, która znajduje się jakby w całej dostępnej przestrzeni. W związku z tym pod wpływem pomiaru na jednym z fotonów nie ulega zmianie tylko informacja o tym fotonie, ale ulega zmianie informacja o całym układzie. W tym sensie nie powinno nas dziwić, że drugi foton po wykonaniu pomiaru na pierwszym będzie zachowywał się inaczej niż przed wykonaniem tego pomiaru. Jest tak dlatego, że zmianie uległa cała informacja – układ jest teraz jakby w innym stanie. I to właśnie budziło sprzeciw Einsteina – mechanika kwantowa nie jest teorią opisującą zjawiska przyrod-

nicze w sposób lokalny, ale w sposób globalny. Po drugie: nawet gdyby coś w rodzaju informacji było przesyłane, to nie można tego wykorzystać do przesłania prawdziwej informacji. Osoba wykonująca pomiar na fotonie nie ma bowiem żadnego wpływu na wynik doświadczenia. Ona jedynie ustawia polaryzator, a to, czy foton przejdzie, czy nie, zupełnie od niej nie zależy. To sprawia, że drugi foton zachowujący się dokładnie przeciwnie do pierwszego nie może dostarczyć drugiej osobie żadnej informacji od osoby pierwszej. Ta pierwsza bowiem nie ma żadnego sposobu na jej zakodowanie.

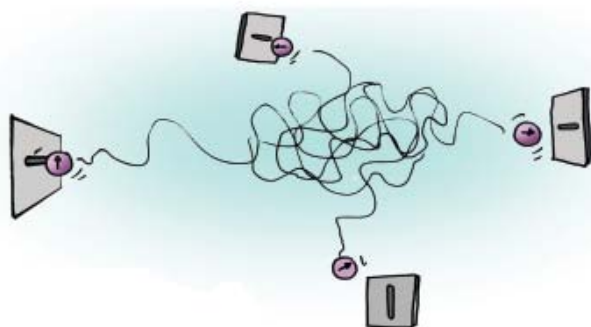
DOWODY EKSPERYMENTALNE

Istnienie splątania kwantowego, a tym samym nielokalnej natury praw mikroświata, zostało wielokrotnie potwierdzone w wielu eksperymentach. Najznakomitsze z nich opierają się na tzw. łamaniu nierówności Bella. Okazuje się, że jeśli założymy, tak jak chciał Einstein, że prawdziwa teoria opisująca zachowanie się fotonów w przedstawionym eksperymencie jest lokalna i obiektywna, tzn. na wynik eksperymentu nie ma wpływu wynik eksperymentu dziejącego się po drugiej stronie Galaktyki, a jedynie jakaś wewnętrzna własność fotonu, której jeszcze nie udało nam się odkryć, to istnieją pewne FUNDAMENTALNE ograniczenia na korelacje pomiędzy pomiarami przeprowadzanymi na obu fotonach równocześnie. Matematycznie jest to wyrażone przez pewne nierówności, które muszą być spełnione, jeśli tylko teoria jest teorią lokalną i obiektywną. Okazuje się, że istnieją takie sytuacje eksperymentalne, w których bez żadnych wątpliwości nierówności te nie są spełnione. To oznacza, że (przynajmniej w tych sytuacjach) żadna lokalna i obiektywna teoria fizyczna nie będzie dobrze opisywała takich eksperymentów.



Dowody eksperymentalne, łamanie nierówności Bella

Okazuje się jednak, że dobrze znamy teorię fizyczną, która nie tylko te wszystkie sytuacje doskonale opisuje, ale wręcz przewiduje takie zachowanie. Mowa tu oczywiście o mechanice kwantowej – nielokalnej teorii fizycznej opisującej zachowanie się obiektów małych. Nie bez powodu mówię tu o przewidywaniu zjawisk. Splątanie kwantowe zostało bowiem najpierw przewidziane w ramach mechaniki kwantowej, a dopiero później potwierdzono eksperymentalnie jego istnienie. Do dziś nie udało się przeprowadzić żadnego eksperymentu, którego przebieg nie byłby zgodny z opisem kwantowomechanicznym. Lekcja jest jedna: na zachowanie cząstki kwantowej może mieć wpływ również to, co dzieje się z innymi cząstkami z nią splątanymi. Nawet jeśli dzieli je bardzo duża odległość. ●



Na zachowanie cząstki kwantowej może mieć wpływ również to co dzieje się z innymi cząstkami