

Mechanika kwantowa, czyli teoria opisująca zjawiska zachodzące w mikroświecie, to najbardziej tajemnicza i zaskakująca konstrukcja logiczna, jaką wymyślili fizycy. I choć nawet obecnie jest dla wielu fizyków trudna do zaakceptowania z powodów zdroworozsądkowych, to stoi za nią jeden fundamentalny argument, którego do dziś nie udało się podważyć – EKSPERYMENT! To dlatego musimy się z mechaniką kwantową pogodzić i uznać za prawdziwą; niezależnie od tego, co uznajemy za zdroworozsądkowe. Dla fizyka zdrowy rozsądek to zgodność teorii z obserwowanymi zjawiskami.



Tomasz Sowiński jest asystentem w Centrum Fizyki Teoretycznej PAN. W 2005 roku skończył z wyróżnieniem 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.

Tomasz Sowiński

O ruchu, którego nie sposób poznać

prędkość, jaką miał ten samochód podczas przemieszczania się z A do B. Aby to zrobić, należy oczywiście podzielić drogę, jaka dzieli punkty A i B przez czas, w jakim samochód ją pokonał.

Chwila zastanowienia wystarczy, aby łatwo dojść do przekonania, że w powyższym, bardzo prostym przykładzie, drzemie bardzo fundamentalne idealistyczne założenie, które przyjmujemy bez weryfikacji doświadczalnej. Otóż zakładamy, że w każdej chwili ruchu pomiędzy punktami A i B samochód znajduje się gdzieś na drodze i jedzie z pewną prę-

O RUCHU I TRAJEKTORII

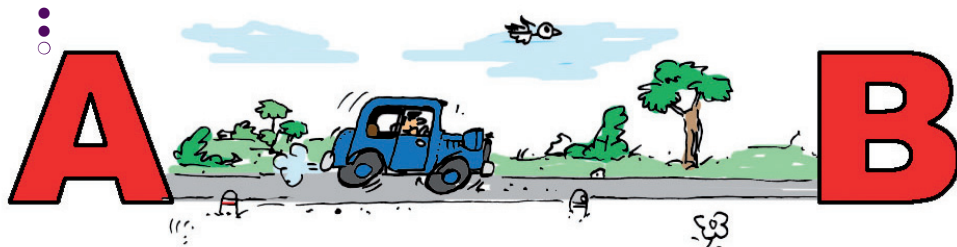
Nie będzie to odkryciem Ameryki, jeśli powiem, że ruch to bardzo powszechne zjawisko, z którym się stykamy na każdym kroku. Jest to przecież podstawowy przejaw tego, że wszystko wokół nas się zmienia. Poruszają się rośliny i zwierzęta, samochody i rowery, statki i latawce, woda w kranie i krew w krwiobiegu. Nawet temperatura i przepływ ciepła to nic innego jak nieuporządkowany ruch molekuł (MT 06/2008).

kością (ew. stoi, ale to też ruch, jedynie z prędkością równą 0). Tylko takie założenie pozwala bowiem nadać jakikolwiek sens pojęciu prędkości średniej. Gdyby bowiem samochód np. zniknął w miejscu A i pojawił się po pewnym czasie w miejscu B, to wyliczona przez nas prędkość średnia nie miałaby żadnego fizycznego znaczenia. Wyznaczając bardzo automatycznie prędkość średnią, założyliśmy zatem po cichu, że samochód jechał po drodze, tzn. w każdej chwili był gdzieś i miał jakąś prędkość.

Zauważmy, że punktem wyjścia naszego rozumowania była jednak sytuacja całkiem inna. Oto wcieliśmy tylko, że samochód na początku był w miejscu A (widzieliśmy go tam), a po pewnym czasie znalazł się w miejscu B (ktoś inny stwierdził taki fakt). I na tej podstawie wyciągnęliśmy wniosek bardzo nieuprawniony, że samochód poruszał się „płynnie” z A do B, tzn. w taki sposób, że w każdej chwili

był gdzieś na drodze łączącej te dwa punkty. Jak to zatem jest z tą prędkością?

Jest pewien bardzo istotny argument, który przekonuje nas, że nasze założenie o „płynnym” ruchu samochodu jest uprawnione. Możemy przecież zapytać kierowcę, jak było naprawdę! I kierowca bez



ruch to nic innego jak zmiana położenia obiektu w czasie

Najprościej mówiąc, ruch to nic innego jak zmiana położenia obiektu w czasie. Jeśli samochód w pewnej chwili jest w miejscu A, a po pewnym czasie jest w miejscu B, to mówimy, że poruszał się z miejsca A do miejsca B. Możemy nawet, czego uczą nas w szkole od najmłodszych lat, obliczyć średnią



kierowca w każdej chwili miał jakąś prędkość chwilową

żadnej wątpliwości potwierdzi, iż pokonywał kolejne odcinki drogi łączące punkty A i B i bez zawahania stwierdzi, że w każdej chwili był w jakimś punkcie drogi. Mało tego – będzie absolutnie przekonany, że pokonywał płynnie cały odcinek drogi, tzn. że w każdym dowolnie krótkim odcinku czasu pokonywał dowolnie małe odcinki drogi, więc w każdej chwili miał jakąś prędkość chwilową.

Warto zwrócić uwagę na fakt, że my sami również umiemy się poruszać i tym samym doskonale intuicyjnie rozumiemy, co to oznacza. Skoro zatem kierowca samochodu potwierdza, że poruszał się „płynnie” w takim samym sensie, w jakim my to rozumiemy, to należy uznać jego słowa za wystarczający dowód, że ruch samochodu był „płynny”. Wszystkie nasze życiowe doświadczenia przekonują nas, że tak musi być ze wszystkimi ruchami, jakie w przyrodzie istnieją i zatem naszą intuicję o ruchu przypisujemy do wszystkich ruchów, które obserwujemy. I już nie sprawdzamy za każdym razem, czy rzeczywiście ciało się poruszało „płynnie”, ale z góry zakładamy, że ruch pomiędzy punktami obserwacyjnymi właśnie taki był. Nawet jeśli tego nikt nie zarejestrował i nie potwierdził. Dokonujemy zatem pewnej idealizacji i, oczywiście całkiem słusznie, każdemu poruszającemu się ciału przypisujemy trajektorię – zbiór punktów układających się w linię ciągłą, które odwiedził poruszający się obiekt. W każdym punkcie tej krzywej rozważane przez nas ciało się kiedyś znajdowało i miało wtedy pewną prędkość. W każdej chwili swojego ruchu ciało było więc w jakimś konkretnym punkcie i miało jakąś konkretną prędkość. Nawet jeśli nie potrafimy ich dokładnie wyznaczyć eksperymentalnie, to wiemy, że te wielkości są obiektywne i istnieją. Gdybyśmy ulepszyli naszą aparaturę badawczą, to na pewno moglibyśmy je poznać.

A CO W MIKROŚWIECIE?

A jak ta sytuacja wygląda w mikroświecie? Czy jest tak samo? Może powiem od razu bez owijania w bawełnę. **Ruch ciała w mikroświecie jest diametralnie inny. Pojęcie trajektorii traci jakiegokolwiek sens, a położenie i prędkość tracą swoją obiektywną i konkretną wartość.** No dobrze... A teraz po-

w mikroświecie pojęcie trajektorii traci sens, a położenie i prędkość tracą swoją obiektywną i konkretną wartość.



woli to wytłumaczyć, bo tłumaczenia bardzo często spotykane w literaturze, głównie popularnonaukowej, bywają całkowicie niepoprawne. Wszystko dlatego, że cała sprawa odbywa się na dwóch poziomach, które są ze sobą kompletnie mieszane. Zatem po kolei... Dzisiaj rozważania na poziomie pierwszym.

JAK OKREŚLIĆ POŁOŻENIE?

Zacznijmy od pomiaru położenia. Aby zmierzyć położenie jakiegoś ciała, musimy coś zrobić, aby się dowiedzieć, gdzie ono jest. Jeśli nic nie

Witajcie w mikroświecie



rozważania na poziomie pierwszym

będziemy robić, to na pewno o położeniu ciała nic się nie dowiemy. Czy próbowałeś kiedyś, Drogi Czytelniku, znaleźć długopis w ciemnym pokoju? Wiesz, że długopis gdzieś w nim się znajduje, ale stojąc w drzwiach i nic nie robiąc, nie masz żadnych szans go znaleźć. Musisz coś zrobić! Możesz np. po omacku sprawdzić każdy centymetr pokoju, stukając rękoma we wszystko, co popadnie. Jeśli będziesz odpowiednio długo szukał i sprawdzał wszystkie miejsca po kolei, to na pewno w końcu długopis znajdziesz. Możesz też zapalić światło. Wtedy będzie się ono odbijało od wszystkich przedmiotów, które znajdują się w pokoju, a następnie trafiało do Twoich oczu. Jeśli światło odbije się od długopisu, to po prostu go zauważysz. Będziesz zatem wiedział, gdzie się znajduje. Jakąkolwiek metodę na znalezienie długopisu wymyślisz, to na

na pewno w jakiś sposób na niego zadziałasz. Albo uderzysz ręką, albo „uderzysz” światłem, albo jeszcze coś innego... Gdy wrócisz do progu pokoju i zgasisz światło, to znów nie będziesz wiedział, gdzie długopis się znajduje.

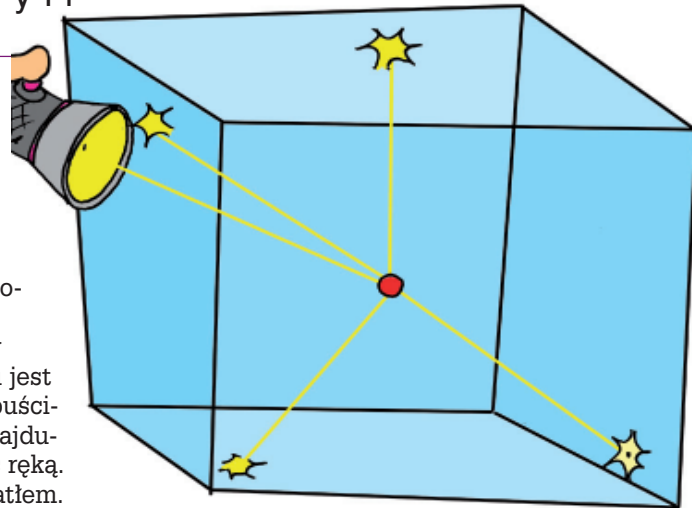
Ale skoro w momencie pomiaru, gdy go dokonywałeś, długopis był na stole i nic z nim się nie działo, to podejrzewasz, że ciągle tam jest – nawet gdy na niego nie patrzysz. I rzeczywiście, jak znów zapalisz światło, to długopis będzie tam, gdzie powinien, tam, gdzie był poprzednio.

Z pomiarem położenia ciał mikroskopowych jest bardzo podobnie. Aby je znaleźć, musimy jakoś na nie podziałać. Wyobraźmy sobie, że w pewnym specjalnym pojemniku jest jeden elektron. Wiemy o tym, bo go tam wpuściliśmy. Jak znaleźć miejsce, w którym się znajduje? Na pewno nie możemy w niego stuknąć ręką. Jest zbyt mały. Możemy np. poświecić światłem. Elektron, ponieważ ma ładunek elektryczny, będzie z tym światłem oddziaływał. W obrazie ziarnistym promieniowania można sobie wyobrazić, że fotony (kwanty światła) uderzają w elektron. To taki kwantowy bilard (MT 02/2007). Fotony rozpraszają się na elektronie w różnych kierunkach i my, mierząc z jakich kierunków przylatują, możemy określić, w którym miejscu był elektron w momencie zderzenia.

Jest tu jednak pewna subtelność związana z dualizmem falowo-korpuskularnym światła. Ten sam mechanizm pomiaru położenia musi dać się wytłumaczyć w języku fali. I rzeczywiście tak jest. Fala elektromagnetyczna to nic innego jak drgające pole magnetyczne i elektryczne. Oddziałuje ona zatem z elektronem mającym ładunek elektryczny. Fala rozprasza się na elektronie i my, mierząc jak to robi, możemy określić położenie elektronu.

Ze względu jednak na fakt, że fala ma pewną długość (kolor), określenie dokładnego położenia elektronu nie jest do końca możliwe. Wynika to z tego, że jakby już samo położenie fali nie jest do końca dobrze określone. Łatwo sobie wyobrazić, że bardzo trudno jest z dokładnością 1 mm doświadczalnie określić, gdzie znajduje się maksimum fali o długości 1 km. Taka fala na tak małych odległościach praktycznie się nie zmienia. Tym samym piekielnie trudno jest określić z taką dokładnością, gdzie znajduje się elektron, który z nią oddziałuje. Fala może zlokalizować elektron tylko z dokładnością taką, jaka jest mniej więcej jej długość. Fala kilometrowa na pewno nie może badać zjawisk na odległościach subatomowych. Wniosek stąd płynie zatem taki, że aby dobrze zlokalizować elektron, musimy używać jak najkrótszych fal elektromagnetycznych. Najlepiej takich, których długość jest wielokrotnie mniejsza niż rozmiary pudełka, w którym elektron się znajduje. Wtedy będziemy mogli obserwować wnętrze pudełka z dużą rozdzielczością.

Dlaczego wspominam tak szczegółowo o pomiarze położenia elektronu? Otóż teraz powinno już być jasne, dlaczego świat kwantowy jest zupełnie inny od światła makroskopowego. Jak pamiętamy (MT 04/2007), energia fotonu jest odwrotnie proporcjonalna do długości fali światła, którą niesie. Skoro zatem do pomiaru położenia elektronu potrzebujemy światła o bardzo małej długości fali, to tak naprawdę potrzebujemy fotonów o bardzo dużej energii. To z kolei oznacza, że elektron będzie



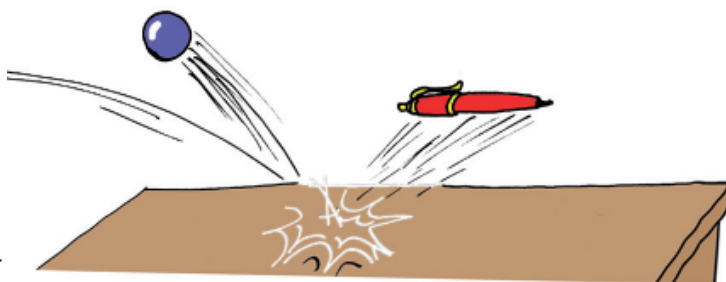
fotony rozpraszają się na elektronie w różnych kierunkach i mierząc z jakich kierunków przylatują możemy określić, w którym miejscu był elektron w momencie zderzenia

dość mocno uderzany przez wysokoenergetyczne fotony i zaraz po zderzeniu będzie się poruszał zupełnie inaczej, niż poruszał się do momentu pomiaru.

Zmierzymy zatem bardzo dokładnie jego położenie w chwili uderzenia, ale zupełnie nic nie będziemy mogli powiedzieć, gdzie znajduje się on już po pomiarze. To tak, jakbyśmy szukali długopisu w pokoju, rzucając w niego piłeczką kauczukową. Na podstawie odbicia piłeczki kauczukowej moglibyśmy wnioskować, od czego się odbiła. Jeśli odbiłaby się od długopisu, to moglibyśmy (przynajmniej teoretycznie) wykryć w jej ruchu ten fakt i tym samym określić położenie długopisu w momencie odbicia. Ale co się stało z tym długopisem już po odbiciu i gdzie on się teraz znajduje, nie mielibyśmy błędnego pojęcia.

A CO Z PRĘDKOŚCIĄ ELEKTRONU?

Z pomiarem prędkości elektronu jest dokładnie odwrotnie. Aby zmierzyć dokładnie jego prędkość, musimy uderzać w niego fotonami o bardzo małej energii. Tak, aby jak najmniej zaburzyć jego ruch, tzn. jak najmniej zmienić jego prędkość. Najprościej taki pomiar wyobrazić sobie w sytuacji uproszczonej, kiedy elektron porusza się w pewnym kierunku ze stałą prędkością. Wysyłamy naprzeciw niego foton, który



piłeczką wymierzymy bardzo dokładnie położenie długopisu w chwili uderzenia, ale zupełnie nic nie będziemy mogli powiedzieć gdzie znajduje się on już po pomiarze.

się od niego odbija i wraca do nas. Następnie wysyłamy drugi foton, który znów się odbija i wraca do nas. Mierząc różnicę czasu pomiędzy wysłaniem fotonów a ich otrzymaniem, możemy wyznaczyć miejsca, w których się znajdował w określonych chwilach. Możemy zatem wyliczyć jego prędkość, jaką miał, poruszając się pomiędzy tymi punktami. To taka metoda radarowa (tak właśnie mierzą prędkość samochodów policjanci z „suszarkami”). Jeśli fotony miały niską energię, to podczas zderzenia prędkość elektronu nie zmieniła się za bardzo i tym samym możemy ją poznać z dużą dokładnością. Jeśli fotony mają energię dużą, to trudno jest uwierzyć w prawdziwość uzyskanego wyniku, bo elektron podczas zderzenia znaczną część energii mógł otrzymać.

Skoro jednak do pomiaru prędkości potrzebujemy niskoenergetycznym fotonów, to oczywiście mamy problem z dokładnym określeniem położenia. Bo fotonom o niskiej energii odpowiada fala o bardzo dużej długości fali. Tym samym pomiar położenia, o którym wcześniej mówiliśmy, jest obciążony dużym błędem. Coś za coś!

MIKROSKOPOWY PROBLEM

Może jeszcze się nie zorientowałeś, Drogi Czytelniku, ale cały problem z pomiarem położenia i prędkości ciał mikroskopowych bierze się z tego, że ciała te są... mikroskopowe. Pomiaru ich położenia i prędkości możemy dokonywać tylko za pomocą innych obiektów mikroskopowych i tym samym podczas pomiaru nie możemy zaniedbać wpływu samego

do pomiaru stanu samochodu możemy użyć piłki



aktu pomiaru na jego wynik. W przypadku ciał makroskopowych tego problemu nie ma, bo zawsze do pomiaru ich położenia i prędkości możemy użyć czegoś mniejszego, co nie będzie zaburzało ich stanu. Do pomiaru stanu samochodu możemy użyć piłki koszykowej, do pomiaru stanu piłki koszykowej możemy użyć piłeczki pingpongowej, do pomiaru stanu piłeczki pingpongowej możemy użyć ziarna maku, itd... Zawsze możemy znaleźć obiekt mniejszy, którego wpływ na stan badanego ciała jest zaniedbywalny. A gdy wreszcie mamy do czynienia z naprawdę małymi obiektami makroskopowymi, takimi jak np. bakterie, możemy użyć do pomiaru ich stanu ciał mikro-

powych, które z samego założenia wpływu na ich ruch nie mają. To właśnie ta możliwość wykorzystania do badania ciał makroskopowych ciał z mikroświata jest fundamentalnie ważna, bo pozwala dowolnie dokładnie zbadać położenia i prędkości ciała z naszego świata.

W przypadku ciał mikroskopowych takiej możliwości nie mamy. Do ich badania musimy używać innych obiektów mikroskopowych, które z nimi oddziałują i to w sposób istotny. Problem wynika wprost z dualizmu korpuskularno-falowego wszelkich mikroobektów (pamiętajmy, że nie tylko fotonów, patrz MT 04/2007). W mikroświecie do dokładnego pomiaru położenia jesteśmy zmuszeni używać obiektów, które całkowicie psują dokładność w pomiarze prędkości. I odwrotnie – do pomiaru prędkości musimy używać obiektów, które psują dokładność pomiaru położenia.

CO Z TRAJEKTORIA

Z przedstawionych wyżej argumentów jasno wynika, że trajektoria elektronu, tak jak i każdego innego ciała z mikroświata, nie może być wyznaczona tak samo dobrze jak trajektoria makroobektów. Jest ona dużo bardziej niedoskonała. Jest albo bardzo niedokładna w położeniu, czyli nie jest linią, ale raczej całym paskiem, albo jest niedokładna w prędkości. Wtedy nie możemy punktowi na tej trajektorii przypisać konkretnej prędkości, jaką miał elektron w tym miejscu. To bardzo fundamentalna różnica pomiędzy trajektoriami klasycznymi, które możemy wyznaczyć z dowolnie dużą dokładnością, a trajektoriami obiektów kwantowych, które są takie „rozmyte” i niedokładne. Wygląda to zatem tak, jakby ruch obiektów kwantowych nie był do końca poznawalny, bo nie mamy żadnej możliwości badania tego ruchu bez jego zaburzania. W ruch obiektu jest jakby wpisana pewna nieoznaczoność, której nie jesteśmy w stanie przeskoczyć ze względu na brak możliwości eksperymentalnych. Z tego punktu widzenia jest to zatem problem braku odpowiednich narzędzi. Tak właśnie wygląda tłumaczenie na pierwszym poziomie: Nieoznaczoność ruchu obiektów kwantowych to wynik niemożliwości przeprowadzenia eksperymentu niezaburzającego jego stan. Z tego punktu widzenia możemy zatem przeprowadzić pewną idealizację. Oto istnieje pewna prawdziwa trajektoria elektronu (dokładnie taka sama jak dla obiektów klasycznych). Różnica polega jedynie tylko na tym, że nie możemy jej do końca poznać.

Niestety, a może właśnie na szczęście, tłumaczenie na pierwszym poziomie nie jest wystarczające. Oto istnieją fundamentalne argumenty doświadczalne przekonujące, że jeśli istnieje jakokolwiek trajektoria elektronu (nawet jeśli jej nie możemy poznać), to jest ona zupełnie inna niż ta klasyczna. Nie tylko lekko rozmyta i niedokładna. Może ona np. przebiegać wieloma ścieżkami jednocześnie. To oczywiście brzmi jak nonsens. Dlatego najlepiej jest zupełnie porzucić pojęcie trajektorii i uznać, że jej rozważanie dla obiektów kwantowych zupełnie nie ma sensu. Ale o tym już następnym razem... •