



Fizyka kwantowa dzisiaj i tutaj

Kazimierz Rządowski

Centrum Fizyki Teoretycznej PAN, Warszawa

W 1900 roku poglądy fizyków na budowę materii zaczęły się gwałtownie zmieniać. Te wielkie zmiany zainicjował niemiecki fizyk Max Planck, jeśli wierzyć większości jego biografów, w pewnym stopniu wbrew swoim przekonaniom. Dzięki pracom Plancka fizycy uznali, że światło, traktowane dotąd jako standardowy przykład fali, jest pochłaniane i wysyłane przez materię w porcjach, których energia zależy od częstości światła, czyli, odwołując się do potocznego języka, jego barwy. Tak do fizyki weszło pojęcie kwantu energii. Tę elementarną porcję energii wkrótce nazwano fotonem, a do jego ugruntowania walcie przyczyniły się prace Alberta Einsteina i doświadczenia Amerykanina Arthura Comptona. W dwadzieścia pięć lat po odkryciu Plancka, dzięki wysiłkowi wielu fizyków, z których należy tu wymienić przynajmniej Francuza Louis de Broglie'a, Austriaka Erwina Schrödingera, Niemca Wernera Heisenberga, Duńczyka Nielsa Bohra i Anglika Paula Diraca, sformułowano teorię kwantową w wersji, której uczymy do dziś. Wymieniając te nazwiska wraz z narodowością, pragnę podkreślić, jak bardzo międzynarodowa była nauka już w początkach XX wieku.

Co w mechanice kwantowej było najbardziej rewolucyjne? Zapewne wszyscy specjaliści się zgodzą: podstawowa teoria przybrała postać teorii probabilistycznej. Pojawiła się statystyka. Mechanika kwantowa zastępowała mechanikę klasyczną. W tej starej, znakomicie rozwiniętej teorii dostatecznie dokładna wiedza o położeniach i prędkościach ciał w pewnej chwili czasu oraz o działających na te ciała siłach pozwala z dowolnie wielką dokładnością wyliczyć położenia i prędkości tych ciał w chwilach późniejszych.

Oczywiście opis statystyczny był użyteczny także w świecie klasycznym. I to nie tylko w fizyce, na przykład do opisu własności termodynamicznych gazów. Wybór sensownej strategii gier hazardowych wymaga często wiedzy (czasem tylko intuicyjnej) z zakresu rachunku prawdopodobieństwa. Rozumieją to doskonale na przykład brydżyści. Wyniki socjologicznych sondaży opinii publicznej, przeprowadzanych przez specjalistów od badania preferencji politycznych oraz preferencji konsumenckich dużej liczby ludzi, przedstawia się także w syntetycznej formie statystycznej. Dowiadujemy się, jaki ułamek populacji zamierza głosować na przykład na partię X (sprawdziłem, takiej partii na szczęście już nie ma). Stąd oczywiście nie wynika, czy na tę partię będzie głosował pan Kowalski. Nie wynika, ale jeśli znamy pana Kowalskiego, to zawsze możemy go spytać, na kogo

będzie głosował. Podobnie w rozgrywce brydżowej: gdybyśmy znali karty przeciwników, rachunek prawdopodobieństwa stałby się zbędny.

Rola statystyki w mechanice kwantowej jest dużo głębsza. W tej teorii szereg własności pojedynczego elektronu, atomu czy cząsteczki (odpowiedników wyborcy Kowalskiego) pozostaje jedynie „statystycznie” przewidywalnych, tak jak statystycznie przewidywalne jest zachowanie całego zespołu takich cząstek. Nie sposób z pewnością odpowiedzieć na pytanie dotyczące pojedynczego elektronu czy atomu. W zasadzie można „zapytać” pojedynczą cząstkę kwantową o interesującą nas wartość, na przykład prędkości. Coś „odpowie”, ale teoria mówi, że z tej odpowiedzi można tylko wnosić, że **po** pomiarze wartość prędkości jest taka, jaką zmierzono. Co było **przed** pomiarem, pozostaje w pewnej mierze niepewne. Posłużmy się znów naszym przykładem sondażu wyborczego: zapewne bywa i tak, że Kowalski uświadamia sobie swoje wyborcze preferencje dopiero w chwili odpowiadania na pytanie ankietera. Mechanika kwantowa zmusza nas do rezygnacji z tego ambitnego rozumienia przyczynowości: jeśli dostatecznie wiele wiemy o stanie układu w danej chwili, to możemy dokładnie przewidzieć jego przyszłość. Ta i kilka innych zadziwiających cech fizyki kwantowej stały się przedmiotem dyskusji i polemik najwybitniejszych fizyków XX wieku. W dyskusjach tych często współtwórcy teorii kwantów występowali w roli jej krytyków. Niektórzy „ojcowie” mechaniki kwantowej zważyli w swoje „potomstwo”. W bezwzględnej poprawności teorii wątpił Albert Einstein. Krytykował na przykład jej cechy probabilistyczne. Ten wielki fizyk miał także dużą umiejętność wyrażania swoich poglądów w lapidarny i zrozumiały dla niespecjalistów sposób. Powątpiewając w podstawowy charakter praw mechaniki kwantowej, mówił, że przecież „Bóg nie gra w kości”.

Ale mechanika kwantowa ma wiele innych zadziwiających własności. Na jedną z nich zwrócił także uwagę Einstein. Chodzi o tajemniczą **korelację** występującą w pewnych przypadkach **między odległymi podukładami**, na przykład dwoma fotonami emitowanymi przez atom w dwóch przeciwnych kierunkach. Wyniki pomiarów dokonywanych na odległych od siebie fotonach powiązane są tak, że mimo znacznej odległości, fotony zdają się „informować” wzajem o typie czekającego na każdy z nich detektora. Skorelowanie wyników odległych pomiarów nie wymaga w dodatku żadnego upływu czasu. Znów Einstein: to jest „upiorne działanie na odległość”. Bardzo tajemnicze, choć jak dziś wiemy, nie można tego zjawiska, zwanego kwantowym „splątaniem” (szkoda, że w polskiej terminologii nie przyjęło się „splęcenie”), wykorzystać do natychmiastowego przekazywania informacji. Dziś przeciwne twierdzenie znaleźć można tylko u nierzetelnych popularyzatorów.

I jeszcze jedna tajemnica: dualizm falowo-korpuskularny. Zachowanie elektronu czasem łatwiej zrozumieć wyobrażając sobie, że to mała kuleczka, a czasem, że to fala przypominająca kręgi rozchodzące się na powierzchni jeziora,

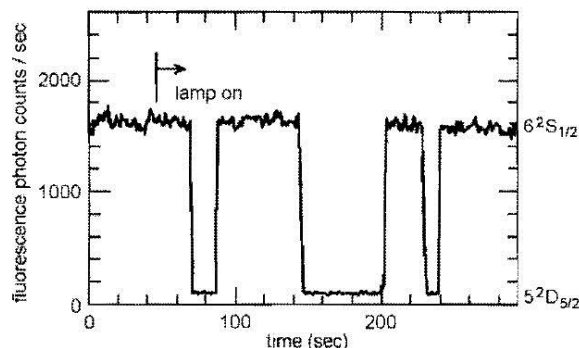
do którego wrzucono kamień. To samo ze światłem i jego elementarną porcją, czyli fotonem. Na kategoryczne pytanie klasycznego fizyka, czy elektron to w końcu cząstka, czy fala, fizyk kwantowy może udzielić tylko wymijającej odpowiedzi: i to, i to.

Przez dziesięciolecia fizycy z wielkim pożytkiem wykorzystywali mechanikę kwantową. Znakomicie opisuje ona wielkie bogactwo zjawisk dotyczących jąder atomowych, atomów, cząsteczek, gazów, cieczy i ciał stałych. To dzięki fizyce kwantowej powstały tranzystory i lasery. Bez nich nie byłoby komputerów osobistych ani odtwarzaczy dysków kompaktowych, zegarków elektronicznych ani systemów nawigacji satelitarnej. Fizyka kwantowa dosłownie odmieniła życie każdego z nas. Fizycy przyzwyczaili się do mechaniki kwantowej. Wielu przestało dostrzegać jej paradoksy. Aby sobie o nich przypomnieć, wystarczy jednak na wykładach mieć dociekliwych studentów. A tych, na szczęście, nie brakuje.

Tymczasem w ostatnich dwudziestu latach o paradoksalnych własnościach mechaniki kwantowej było znów głośno. Tym razem za sprawą postępu fizyki doświadczalnej. W największej mierze dotyczy to dziedziny zwanej optyką kwantową.

Wymienię tu tylko **kilka z tych wspaniałych doświadczeń**. Na początku lat osiemdziesiątych, w serii spektakularnych doświadczeń, z których pierwsze dostatecznie precyzyjne zostało przeprowadzone we Francji przez Alaina Aspecta i jego współpracowników, wykazano, że dostrzeżone przez Einsteina „upierne działanie na odległość” rzeczywiście ma miejsce. Co więcej, **doświadczalnie** wykazano, że mechaniki kwantowej nie daje się zastąpić żadną koncepcyjnie prostszą teorią. Wykazano, że nie ma żadnych tak zwanych parametrów ukrytych. Posługując się analogią brydżową: nie ma do podejrzenia żadnych kart, których znajomość pozwoliłaby wyeliminować z rozgrywki prawdopodobieństwa.

W jaskrawym świetle stało też zagadnienie ograniczonej przewidywalności przyszłości. Wielu fizyków twierdziło, że możliwe w mechanice kwantowej dokładne przewidywanie wartości średnich i innych cech statystycznych wielkich zespołów cząstek jest w pewnej mierze optymalnie dostosowane do doświadczeń, jakie daje się przeprowadzać. Rzeczywiście, do niedawna w doświadczeniach występowały zawsze miliony elektronów, atomów czy cząsteczek. Jednak rozwinięcie skutecznych metod pułapkowania i spowalniania najpierw cząstek naładowanych, takich jak elektrony oraz jony, a potem także obojętnych atomów, zmieniło sytuację. Pojedynczy elektron czy jon zawieszony w pułapce elektromagnetycznej można w sposób ciągły obserwować przez długi czas. Taki jon, odpowiednio oświetlany, dokonuje przypadkowych przeskoków pomiędzy różnymi stanami kwantowymi, a doświadczalnik (pierwszym był Hans Dehmelt – Niemiec pracujący w USA) może to śledzić. Zarejestrowane losy takiego jonu w szczegółach nie są do przewidzenia przez żadną teorię fizyczną! Ograniczenie naszych możliwości jest tu oczywiste.



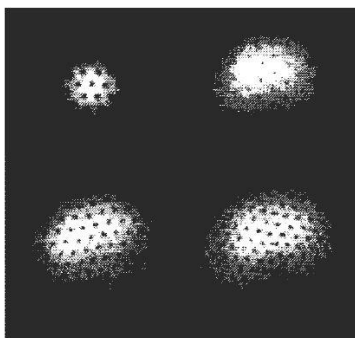
Rys. 1. Zapis Dehmelta zależności od czasu sygnału fluorescencji pojedynczego jonu w pułapce, wykazujący przeskoki kwantowe. Nie można przewidzieć, kiedy nastąpi przeskok

Zacząłem ten artykuł od Plancka i fotonu. Od lat nikt nie wątpi w istnienie fotonu, ale do niedawna nikt nie umiał na żądanie wytworzyć dokładnie jednego albo dokładnie dwóch fotonów. Teraz, a jest to osiągnięcie sprzed dwóch zaledwie lat, można, choć nadal nie jest to łatwe. Pomocna stała się konstrukcja doskonałych, wykonanych z nadprzewodzącego niobu wnęk rezonansowych oraz rozwinięcie laserowych metod przygotowania atomów w ściśle określonych, wysoko wzbudzonych stanach kwantowych, zwanych stanami Rydberga. Te pionierskie doświadczenia wykonano w Garching, w Niemczech, oraz w Paryżu.

Przypomniałem o kontraście pomiędzy światem klasycznym i kwantowym. Niezwykle ciekawe jest penetrowanie obszaru przejściowego, bo należy się spodziewać, że jest tu płynne przejście. Zwykle sądzi się, że odpowiednio duże cząsteczki organiczne zaczynają przejawiać własności klasyczne. W ostatnich latach granice wielkości obiektów zachowujących się kwantowo dramatycznie przesunęło otrzymanie kondensatów Bosego-Einsteina. W ubiegłym roku przyznano za to Nagrodę Nobla. Dziś 10 milionów atomów sodu można wprowadzić w stan, w którym cała ta kropla zachowuje się jak fala. Przejawia ona własności kwantowe, jest świetnie izolowana od otoczenia i poddaje się przeróżnym subtelnym doświadczeniom.

Obecnie przemysłne doświadczenia z pojedynczymi fotonami, kilkoma jonami, pojedynczymi atomami i kondensatami pozwalają mówić o powstaniu inżynierii stanów kwantowych. Z jej rozwojem wiąże się także nadzieje na bezpośrednie zastosowania praktyczne. Do najważniejszych należą: kwantowe sterowanie reakcjami chemicznymi, konstrukcja coraz dokładniejszych wzorców czasu, kwantowa kryptografia. Mechanika kwantowa ze swoim ograniczeniem przewidywalności obiecuje doskonałe, nie do złamania szyfrowanie informacji. A wreszcie najbardziej rewelacyjne, choć na razie hipotetyczne: mechanika kwantowa

stwarza szansę na konstrukcję komputerów kwantowych, które w pewnych przypadkach powinny być wielokrotnie szybsze od konwencjonalnych. W dziesiątkach laboratoriów we wszystkich rozwiniętych krajach prowadzi się prace, które można zaliczyć do inżynierii kwantowej.



Rys. 2. Siatki wirów w kondensacie Bosego-Einsteina z laboratorium Ketterlego w MIT

A co w Polsce? Teoretycy, jak zwykle, jakoś sobie radzą. Nam wystarczą dobre komputery, dostęp do literatury (coraz łatwiejszy dzięki Internetowi), swoboda kontaktów ze światem, udział w międzynarodowych sieciach naukowych, konferencjach i sympozjach. Natomiast doświadczenie, serce fizyki, cierpi na wieloletnie niedofinansowanie. Wielu młodych, świetnie u nas wykształconych fizyków od lat wybierało emigrację. Mam jednak dobrą wiadomość. Po dwóch latach starań 10 i 11 maja otwarto w Toruniu Krajowe Laboratorium Fizyki Atomowej, Molekularnej i Optycznej. Dyrektorem laboratorium został profesor Uniwersytetu Toruńskiego Stanisław Chwirot. Pierwsze programy doświadczalne realizować będą zespoły naukowe pod kierunkiem prof. Ewy Stachowskiej z Politechniki Poznańskiej (budowa pułapki jonowej dla kilku jonów), prof. Wojciecha Gawlika z Uniwersytetu Jagiellońskiego (budowa pułapek na atomy obojętne przygotowanie warunków uzyskania kondensatu Bosego-Einsteina) oraz prof. Czesława Radzewicza z Uniwersytetu Warszawskiego (uzyskanie źródła splątanych par fotonów). Nad całością czuwa Rada Naukowa, na której czele stoi prof. Tomasz Dohnalik z Uniwersytetu Jagiellońskiego.

Artykuł jest poszerzoną wersją artykułu drukowanego w *Rzeczpospolitej*, nr 105 (6182) z 7 maja 2002.