

Żywy kot, martwy kot

Stworzona sto lat temu teoria kwantów całkowicie odmieniła obraz świata. Skaziła klarowny determinizm fizyki klasycznej fundamentalną przypadkowością, naraziła na szwank zdrowy rozsądek fizyków. Przy całej swej dziwaczności mechanika kwantowa jest obecnie wiedzą jak najbardziej praktyczną – objaśnia działanie tranzystora, reaktora, lasera.

Stanisław Mrówczyński

14 grudnia 1900 r. Max Planck, występując na posiedzeniu Niemieckiego Towarzystwa Fizycznego, przedstawił swoje wieloletnie dociekania nad promieniowaniem nagrzanego ciała. Planck znalazł formułę, która doskonale opisywała wyniki pomiarów, lecz u jej podstaw leżało przypuszczenie, że promieniowanie emitowane jest nie w sposób ciągły, lecz niewielkimi porcjami – kwantami. Zrazu nikt, łącznie z pomysłodawcą, nie zrozumiał doniosłości chwili, nie przeczuł nadciągającej rewolucji. Przyjęcie niczym nie uzasadnionego założenia nie było efektem chwilowej iluminacji, nagłego olśnienia. Było raczej swoistym aktem rozpacz, wyrazem bezradności wobec zagadki banalnego, jak można by sądzić, zjawiska. Poszukiwanie absolutu zawsze mi się wydawało najpiękniejszym powołaniem uczonego – pisał w swej autobiografii Max Planck. Formułowanie dziwacznych hipotez, jak ta o porcjach energii, w oczywisty sposób kłóciło się z jego naukowym credo. Twórca rewolucyjnej koncepcji strawił przeto wiele następnych lat na bezowocnych próbach wyrugowania kwantów z fizyki.

Einstein jako jeden z pierwszych dostrzegł w idei Plancka coś więcej niż matematyczny trick i zaprzęgnął ją do objaśnienia tzw. efektu fotoelektrycznego. Zjawisko to polega na przepływie prądu elektrycznego między dwiema zamkniętymi w próżni i utrzymywanymi pod napięciem elektrodami, jeśli na ujemną skierować światło o dostatecznie wysokiej częstotliwości. Einstein nadał kwantom światła status realnych fizycznych obiektów, przyjąwszy, że zderzając się z elektronami, które są nośnikami prądu, przekazują im swoją energię i umożliwiają przelot między elektrodami. Einsteinowi przeto zawdzięczamy koncepcję fotonu – cząstki światła. Fotony ujawniły całą paradoksalność kwantowej rzeczywistości – światło jest bowiem jednocześnie falą i rojem cząstek, chociaż atrybuty fal i cząstek zdają się nie mieć nic ze sobą wspólnego.

Drugim, obok badań nad własnościami promieniowania, obszarem, gdzie kształtowały się idee teorii kwantów, była rodząca się fizyka atomu. Jeszcze w końcu XIX wieku rzecznicy atomowej struktury materii stanowili niedużą zakrzyżaną przez oponentów mniejszość. Ponieważ atomów nie można było zaobserwować, sądzono więc powszechnie, że są one jedynie tworam i umysłu, pomocnymi przy opisie niektórych zjawisk takich jak reakcje chemiczne. Koncepcja atomu zyskała solidne podstawy dopiero po ukazaniu się w 1905 r. prac objaśniających naturę ruchu Browna – widocznego pod mikroskopem chaotycznego, nieustannego ruchu drobiny zanurzonej w cieczy. Einstein i Marian Smoluchowski wykazali, że ruch drobiny jest efektem zderzeń z otaczającymi ją atomami cieczy. W 1911 r. Ernest Rutherford zaproponował planetarny model atomu, w którym lekkie elektrony obiegają ciężkie jądro, niby planety Słońce. Model był niezwykle pociągający, lecz zupełnie sprzeczny z naukami klasycznej elektrodynamiki. Ta orzekała, że elektron krążąc wokół jądra szybko wypromieniowuje swoją energię i spada na jądro. Innymi słowy atomy nie mogą być trwałe. Niels Bohr zasugerował, że w atomie mogą istnieć pewne stabilne orbity, promieniowanie zaś emitowane jest tylko wtedy, gdy elektron przechodzi z jednej takiej orbity na drugą. Wykorzystując ideę kwantów, Bohr wyliczył częstość tego promieniowania i... zdarzył się cud. Formuła, którą – wedle standardów nauk dedukcyjnych – można uznać za wziętą z sufitu, doskonale zgadzała się z wynikami precyzyjnych pomiarów.

Kombinując pomysły Plancka, Einsteina, Bohra z prawami fizyki klasycznej potrafiiono opisać coraz więcej zjawisk. Jednak nie można powiedzieć, że je rozumiano. Pozostawało zupełną zagadką, co ze spuścizny Izaaka Newtona należy zachować, co zaś odrzucić. Kolejne odkrycia pogłębiały jeszcze zamieszanie. Einstein dostrzegł, że światło może zachowywać się jak zbiór cząstek, Louis de Broglie zaś stwierdził, że ruchowi każdej cząstki towarzyszy fala. Werner Heisenberg sformułował tzw. zasadę nieoznaczoności, która ustanowiła swoiste granice poznawalności kwantowego świata. Pewne wielkości, które charakteryzują obiekt mikroskopowy, np. prędkość i położenie, nie mogą być jednocześnie określone z dowolnie dużą dokładnością. Im lepiej znamy pozycję cząstki, tym mniej wiemy o jej lokalizacji. Nie wynika to jednak z niedoskonałości przyrządów pomiarowych, lecz z samej natury rzeczy.

W końcu lat 20. z gąszczu wątpliwych hipotez i niejasnych reguł zaczęła się wyłaniać matematycznie spójna teoria zwana mechaniką kwantową, rządząca się własnymi, odmiennymi od newtonowskich, zasadami. Kluczową rolę w jej kształtowaniu odegrali Erwin Schrodinger i wspomniany już Heisenberg, którzy sformułowali całkiem odmiennie, a jednak równoważne wersje tej teorii. Max Born dopełnił dzieła, podając probabilistyczną interpretację teorii kwantów. W odróżnieniu od mechaniki klasycznej, która jednoznacznie określa wielkości charakteryzujące układ, mechanika kwantowa pozwala jedynie wyznaczyć prawdopodobieństwa wystąpienia odpowiednich ich wartości. „Kwantowy” odpowiednik klasycznego zdania: „elektron znajduje się w punkcie A”, brzmi więc: „elektron przebywa

w A z prawdopodobieństwem p". Świat fizyki klasycznej jest ściśle deterministyczny, przyszłość zapisana jest w przeszłości, a ewolucja to nierozzerwalny łańcuch przyczyn i skutków. Mechanika kwantowa zburzyła ten obraz, wprowadzając fundamentalną nieprzewidywalność procesów fizycznych, które ze swej natury mają charakter losowy. Boga – planistę doskonałego, który, zadekretowawszy prawa fizyki i warunki początkowe, określił przyszłość świata w najdrobniejszych detalach, zastąpił Bóg – rzucający kości przed podjęciem każdej decyzji.

Wraz z powstaniem mechaniki kwantowej kłopoty fizyków bynajmniej się nie skończyły. Ustalone zostały reguły, wedle których należy prowadzić obliczenia i porównywać je z wynikami doświadczeń. Natomiast wyobrażenia o kwantowej rzeczywistości okazały się terenem nie kończących się sporów. Wciąż powraca w nich dualizm korpuskularno-falowy, sprawiający, że kwantowy obiekt raz jawi się cząstką, kiedy indziej zaś falą. Jak współistnieć mogą te wykluczające się wzajemnie właściwości, kiedy następuje przeistoczenie się fali w cząstkę czy cząstki w falę? Fizycy skupieni wokół Nielsa Bohra wypracowali, pod wyraźnym wpływem pozytywistycznej filozofii, tzw. kopenhaską interpretację kwantów, która, kładąc nacisk na logiczną strukturę teorii i możliwość jej weryfikacji przez doświadczenie, właściwie neguje sens stawiania takich pytań. Zadaniem fizyki jest – jak twierdzą pozytywiści – analiza doświadczeń i konfrontowanie ich z przewidywaniami teorii. Spekulacje o kwantowej rzeczywistości są nieuprawnione. Pojęcia, jakimi operujemy, ukształtowane zostały przez obserwacje otaczającego nas makroskopowego świata i zawodzą przy opisie atomów. Dualizm korpuskularno-falowy jest właśnie efektem owej nieadekwatności pojęć. Kopenhaska interpretacja nie tylko zakwestionowała możliwość opisania obiektywnej kwantowej rzeczywistości, zakwestionowała samo jej istnienie. Stan układu bowiem nie jest w pełni określony dopóty, dopóki nie wykonamy odpowiedniego pomiaru. Na skutek pomiaru zaś stan układu ulega nieodwracalnej zmianie. Podmiot poznający wpływa przeto na przedmiot poznawany, więc wyniki pomiarów konstytuują jedyną obiektywną rzeczywistość.

W ciągu przeszło 70 lat mechanika kwantowa została poddana najróżniejszym testom. Za każdym razem wyniki doświadczeń zgadzały się z teorią; nie udało się zaobserwować żadnych odstępstw. Kopenhaska interpretacja jest akceptowana przez większość fizyków, jednak pytania o kwantową rzeczywistość wciąż powracają. Wielu twórców teorii kwantów, wśród nich Einstein, Schrodinger, de Broglie, nie zaakceptowało jej ostatecznej postaci, odrzucało pozytywistyczne podejście Bohra. Einstein wierzył, że mechanika kwantowa jest teorią niepełną, a jej probabilistyczny charakter jest właśnie tego przejawem. Bóg nie gra w kości, wielokrotnie powtarzał. Schrodinger traktował jako absurd twierdzenie, że dopiero pomiar określa stan układu. Przedstawił słynne rozumowanie o kocie, mające wykazać nedorzeczność jeśli nie mechaniki kwantowej, to przynajmniej jej kopenhaskiej interpretacji.

W szczelnym pomieszczeniu zamykamy kota, pojemnik z trującym gazem, trochę radioaktywnej substancji oraz licznik Geigera-Mullera. Jeśli nastąpi radioaktywny rozpad i licznik go zarejestruje, zostanie uruchomiony mechanizm, który uwolni truciznę. Kot zginie. Jeśli rozpad nie będzie miał miejsca, zwierzę będzie cieszył się życiem. Promieniotwórczość jest zjawiskiem kwantowym, więc możemy określić tylko prawdopodobieństwo zajścia rozpadu; z tym samym też prawdopodobieństwem kot zostanie otruty. Zgodnie z regułami kopenhaskiej interpretacji do momentu przeprowadzenia pomiaru, tzn. stwierdzenia co dzieje się ze skazańcem, jego stan jest fundamentalnie nieokreślony – kot jest jednocześnie żywy i martwy. Fizycy mówią o mieszanym stanie żywego i martwego kota. Dopiero pomiar rozstrzygnie jego losy. Występowanie mieszaniny, superpozycji stanów jest zjawiskiem powszechnym w świecie mikroskopowych obiektów, kłóci się jednak ze zdrowym rozsądkiem, gdy dotyczyć ma makroobiektów. Dotychczas nie udało się przeprowadzić eksperymentu z kotem, który byłby żywy i martwy zarazem. W tym roku wykonano jednak finezyjne doświadczenie, które odpowiada bardzo podobnej sytuacji. W obwodach elektrycznych prąd płynie w jedną albo w drugą stronę. Operując jednak polem magnetycznym fizycy wprowadzili maleńki nadprzewodzący obwód w stan, w którym prąd elektryczny przepływał w obie strony jednocześnie. Kot więc był żywy i martwy zarazem!

Mechanika kwantowa odmieniła obraz fizycznego świata, lecz jej wpływ nie ograniczał się bynajmniej do kwestii czysto poznawczych. Teoria kwantów pozwoliła opisać atomy, wyjaśnić, dlaczego atomy tworzą cząsteczki i w efekcie zrozumieć naturę wiązań chemicznych. Powstanie bomby atomowej nie byłoby możliwe, gdyby dzięki mechanice kwantowej fizycy nie poznali budowy jądra atomowego. W 1911 r. Einstein zastosował ideę kwantów, aby opisać ciepło właściwe kryształów. Wkrótce okazało się, że praktycznie wszelkie własności ciał stałych determinowane są kwantowymi zachowaniami tworzących je atomów, jonów, elektronów. Dzięki mechanice kwantowej zrozumiano, co dzieje się w półprzewodnikach, możliwym stał się wynalazek tranzystora. Niezwykły rozwój przemysłu elektronicznego, cała informatyczna rewolucja, którą obecnie przeżywamy, jest w istocie konsekwencją tego wynalazku. Mechanika kwantowa z jej naruszającymi zdrowy rozsądek zasadami włada więc światem, również tym najbliższym, otaczającym nas.

Autor jest fizykiem, pracuje w Instytucie Problemów Jądrowych w Warszawie oraz w Akademii Świętokrzyskiej w Kielcach.