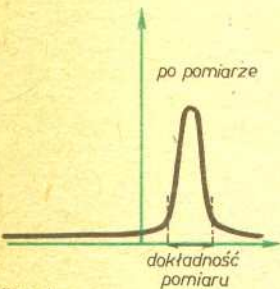
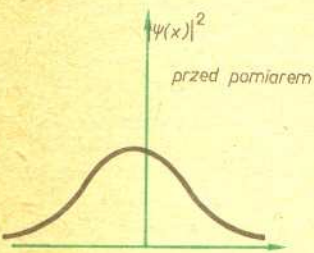


Mechanika kwantowa, paradoks Einsteina-Podolsky'ego-Rosena i komunikacja z szybkością nadświetlną (I)

Dr Włodzisław DUCH



Rys. 1

Był październik 1927 roku. W Brukseli, na piątym kongresie finansowanym przez belgijskiego przemysłowca Ernesta Solvaya, zebrało się ponad trzydziestu najlepszych fizyków świata. Byli wśród nich: Einstein, Bohr, de Broglie, Planck, Heisenberg, Born, Lorentz, Pauli, Schrödinger... Była też jedna kobieta — Maria Skłodowska-Curie. Uczestnicy kongresu mieli o czym dyskutować: w ostatnich dwóch latach de Broglie wysunął hipotezę dualizmu korpuskularno-falowego wszystkich cząstek, która szybko uzyskała potwierdzenie doświadczalne, Schrödinger podał swoje równanie falowe, zaledwie parę miesięcy przed tym kongresem Heisenberg odkrył zasadę nieoznaczoności, Born utożsamiał funkcję występującą w równaniu Schrödingera z amplitudą prawdopodobieństwa, a Bohr sformułował zasadę komplementarności. Podwaliny nowego obrazu świata były już widoczne w całej pełni.

Szczytowym punktem kongresu była ogólna dyskusja. Hendrik Lorentz, wyraziwszy swoje niezadowolenie z odrzucenia przez większość obecnych klasycznego determinizmu, poprosił Nielsa Bohra o omówienie podstaw nowej fizyki mikroświata. Albert Einstein nie słyszał nigdy przedtem idei Bohra na temat komplementarności i roli przyrządów pomiarowych w interpretacji wyników doświadczeń. Przez jakiś czas nie brał więc udziału w dyskusji, jaka rozgorzała po referacie Bohra. Dyskusja skupiła się głównie na zagadnieniu pomiaru położenia cząstki. Mechanika kwantowa opisuje położenie i inne cechy cząstki za pomocą pewnej funkcji, zwanej funkcją falową albo funkcją „psi”, gdyż najczęściej oznacza się ją grecką literą Ψ . Otóż kłopot polega na tym, że funkcja ta nie określa dokładnie, gdzie dana cząstka się znajduje, pozwala jedynie stwierdzić z jakim prawdopodobieństwem można ją w danym miejscu znaleźć. Jednakże w chwili pomiaru — na przykład padając na kliszę — cząstka zajmuje dobrze określone położenie, a więc opisująca ją funkcja falowa musi ulec gwałtownej zmianie: zamiast być funkcją rozmytą w znacznym obszarze przestrzeni staje się funkcją skupioną w jednym miejscu. Fizyków niepokoiło to, że zmiana funkcji falowej opisywana przez równanie Schrödingera jest zmianą stopniową, ciągłą, podczas gdy zmiana w wyniku pomiaru jest gwałtowna, nieciągła. Samego Schrödingera niepokoiło to do tego stopnia, że wykrzyknął w czasie dyskusji do Bohra: „Jeśli musimy trzymać się tych przeklętych kwantowych skoków, żałuję, że się w ogóle w to wdałem!”

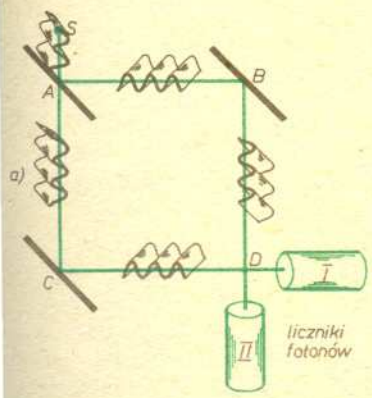
Dyskusja toczyła się wokół zagadnienia pomiaru, kiedy głos zabrał Einstein. Z właściwą sobie skromnością stwierdził na początku: „Muszę przeprosić, że nie wnikałem głęboko w mechanikę kwantową. Pomimo tego chciałbym zrobić kilka uwag ogólnych”.

To właśnie kolaps funkcji falowej był głównym tematem jego wystąpienia. Jeśli jest to proces natychmiastowy, wówczas nie zgadza się z postulatami teorii względności: procesy fizyczne nie mogą zachodzić z szybkością większą od

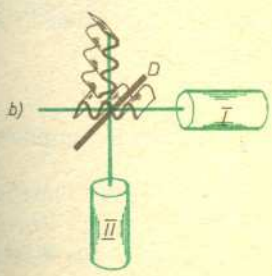
Rozwiązanie zadania M 414. Przypuśćmy że a_1, a_2, a_3, \dots jest takim ciągiem liczb naturalnych, że $a_{n+1} = \frac{2a_n a_{n+2}}{a_n + a_{n+2}}$.
Wówczas $\frac{1}{a_{n+1}} = \frac{1}{a_n} + \frac{1}{a_{n+2}}$, a więc ciąg odwrotności $\frac{1}{a_1}, \frac{1}{a_2}, \frac{1}{a_3}, \dots$ tworzy postęp arytmetyczny. Nieskończony ciąg arytmetyczny o niezerowej różnicy jest nieograniczony, a ponieważ $0 < \frac{1}{a_1} < 1$, ciąg a_1, a_2, a_3, \dots musi być stały.



Rozwiązanie zadania M 412. Przyjmujemy, że sześcián $n \times n \times n$ spełnia warunki zadania. Dla każdego sześciánu a (o krawędzi 1) istnieje taki ciąg sześciánów tego samego koloru $a_1 = a, a_2, \dots, a_m$, że sześcián a_1 jest sąsiadem a_2 (mają wspólną ścianę) oraz a_m jest sąsiadem a_1 . (Wybieramy kolejno, począwszy od a_1 , różne sześciány tak, by każdy sąsiedował z poprzednim; procedura ta musi się zakończyć, a ostatni sześcián będzie sąsiadem pierwszego.) Liczba m musi być parzysta — tyle samo razy musieliśmy posunąć się w lewo co w prawo; podobnie z górá i dołem oraz z przodem i tyłem. Różne „cykle” sześciánów jednakowego koloru są rozłączne, czyli liczba sześciánów, a więc i liczba n muszą być parzyste. Z drugiej strony dla dowolnego parzystego n istnieje sześcián o żądanych własnościach. W pierwszej warstwie układamy szachownicę z prostopadłościanów $2 \times 2 \times 1$, a każda następna warstwa jest „negatywem” poprzedniej.



A, D — lustra półprzezpuszczalne
B, C — lustra zwykłe
S — źródło fotonów



Rys. 2

szybkości światła. Einstein doszedł do wniosku, że mechanika kwantowa nie daje zupełnego opisu indywidualnych zdarzeń w mikroświecie. Powinien istnieć głębszy, ukryty porządek natury, gdzie wszystko zachodzi w sposób ściśle deterministyczny. Funkcja falowa i związane z nią prawdopodobieństwo pozwala na poprawny opis średniego wyniku dużej liczby pomiarów. Jeśli tak, zasada nieoznaczoności Heisenberga nie powinna stanowić ostatecznego ograniczenia dokładności pomiarów. Właśnie na zasadzie nieoznaczoności skupił Einstein swoje wysiłki, by wykazać wewnętrzną sprzeczność mechaniki kwantowej rozumianej jako opis indywidualnych zjawisk. Jego głównym oponentem był Niels Bohr, który twierdził, że opis rzeczywistości wynikający z mechaniki kwantowej jest już najpełniejszym z możliwych, że niemożliwa jest głębsza analiza indywidualnych zjawisk. Dyskusje Einsteina z Bohrem, rozpoczęte na piątym Kongresie Solvayowskim w 1927 roku, trwały aż do śmierci Einsteina w 1955 roku.

Swoje zarzuty sformułował Einstein chyba najjaśniej w pracy napisanej wspólnie z Borysem Podolskim i Natanem Rosenem w 1935 roku. Artykuł nosi znamienity tytuł: „Czy kwantowomechaniczny opis rzeczywistości fizycznej może uchodzić za kompletny?” Wydawało się, że artykuł ten udowodnił niezbitcie, iż na pytanie zawarte w jego artykule odpowiedzieć należy przecząco. Argumentacja autorów opierała się na następującym, ostrożnym kryterium rzeczywistości fizycznej: „Jeśli nie zakłócając wcale układu można przewidzieć w sposób zupełnie pewny, tj. z prawdopodobieństwem równym jedności, wartości wielkości fizycznej, to istnieje element mający rzeczywistość fizyczną odpowiadający tej wielkości”. Innymi słowy, jeśli można określić dokładnie np. pęd i położenie cząstki bez zaburzenia jej ruchu, to obie te wielkości muszą być w każdej chwili dobrze określone dla obiektów mikroświata (czyli są „elementami rzeczywistości fizycznej”). Powinna więc istnieć teoria, która zezwala na dokładny opis, bez ograniczeń narzuconych przez wynikającą z formalizmu mechaniki kwantowej zasadę nieoznaczoności. Jak jednak określić dokładnie położenie i pęd cząstki wcale jej nie zaburzając? Wszystkie poprzednie próby Einsteina, by wykazać, że jest to możliwe w jednym eksperymencie, spełzyły na niczym. Einstein, Podolski i Rosen obeszli tę trudność w bardzo prosty sposób: wyjaśnili najpierw, co mechanika kwantowa orzeka o stanie układu składającego się z dwóch części, oddziaływających na siebie przez pewien czas, a później rozdzielonych, a następnie wykazali, że korzystając z zasad zachowania można wyznaczyć wartości pewnych wielkości, których ustalenie nie jest możliwe przy pomiarach na jednej z tych części, dokonując pomiarów na części drugiej. Zgodnie z przyjętym przez nich kryterium rzeczywistości fizycznej przyznać trzeba, że wielkości te są określone i odpowiada im pewna rzeczywistość, której mechanika kwantowa nie opisuje w pełni!

W tym momencie musimy zrobić dłuższą dygresję: jak można sobie wyobrazić sytuację przeciwną, np. położenie cząstki jako wielkość nieokreśloną? Nie chodzi tu przecież o nieokreślenie, jakie wynika z niepewności, braku informacji co do rzeczywistego położenia, lecz o prawdziwą nieokreśloność rzeczywistości. Wyobrazić to sobie jest bardzo trudno, gdyż w świecie dostępnym naszym zmysłom nic takiego nie obserwujemy. Przyroda zachowuje się jednak w zupełnie dla nas paradoksalny sposób. Najlepszą ilustracją jest tu doświadczenie, o którym Einstein niejednokrotnie dyskutował z Bohrem. Spójrzmy na rysunek 2. Mamy tu źródło światła S przedstawionego w postaci fali padającej na półprzezpuszczalne lustro A: połowa światła odbija się i padając na lustro B dochodzi do punktu D, połowa zaś przechodzi i po odbiciu od lustro C również dochodzi do punktu D. Zmniejszmy teraz natężenie światła tak, by do punktu D dochodziły tylko pojedyncze fotony. Możemy się o tym przekonać ustawiając za punktem D liczniki fotonów. Zauważamy wówczas, że raz licznik pierwszy, a raz drugi zarejestruje jakiś impuls. Możemy więc powiedzieć, że foton przebiegł drogę ACD przed dotarciem do pierwszego licznika i drogę ABD przed zarejestrowaniem przez licznik drugi. Dotychczas nie ma w tym nic tajemniczego. Pamiętajmy jednak, że światło ma również własności falowe.. Ustawmy w punkcie D półprzezpuszczalne lustro w taki sposób, by w kierunku CD zachodziła interferencja konstruktywna (wzmocnienie), a w kierunku BD — destruktywna (osłabienie). Jedynie licznik pierwszy rejestruje teraz impulsy. Impulsy pojawiają się pojedynczo, lecz do interferencji konieczne są przecież dwa ciągi falowe. W jaki sposób pojedynczy foton może interferować sam ze sobą? Mechanika kwantowa daje tu odpowiedź sprzeczną z intuicją i poczuciem realizmu: foton jest w potencjalny sposób obecny wszędzie! Gdyby fotony w dalszym ciągu



poruszały się po określonym torze, musiałyby być rejestrowane przez oba liczniki. Wystarczy wyjąć lustro C , by licznik II znowu rejestrował impulsy. Wystarczy wyjąć lustro D , by impulsy rejestrowały oba liczniki. Niezależnie od mechaniki kwantowej i jej interpretacji pozostaje faktem, że fotonowi ani innym cząstkom w doświadczeniach tego typu nie da się przypisać żadnego toru. Nie wynika to z naszej niewiedzy — nieoznaczoność położenia jest rzeczywistością! Włożenie dodatkowego lustra zmienia warunki eksperymentu i nie pozwala nam już powiedzieć, że foton porusza się wzdłuż określonej drogi. Wyjmując lustro „zmuszamy” więc fotony do wybrania określonego toru, zmieniamy sytuację fizyczną w całym, dowolnie dużym obszarze $ABCD$! Co za absurd! Brak tu zarówno realizmu (wybór położenia lustra „tworzy” rzeczywistość), jak i lokalności (jest to wpływ natychmiastowy).

Jeszcze bardziej absurdalny wynik otrzymujemy rozważając doświadczenie, w którym dokonujemy „opóźnionego wyboru”, jak nazywa to znakomity fizyk amerykański John Wheeler. Wyobraźmy sobie mianowicie, że nasze źródło światła wysyła pojedyncze fotony w regularnych, dość długich odstępach czasu, a lustra ustawione są w dość dużej odległości od siebie. Możemy więc łatwo wyliczyć, kiedy foton przebiegnie już prawie całą drogę i w ostatnim momencie dokonać wyboru — włożyć lustro czy nie. Możemy więc „stworzyć” przez akt pomiaru foton, który przebiegł określoną drogę, lub foton, któremu żadnej drogi przypisać się nie da.



Przyroda okazała się więc dziwniejsza, niż byliśmy skłonni to sobie wyobrazić. Trudności w zrozumieniu fizyki mikroświata spowodowały, że Einstein w opublikowanym w 1936 roku artykule „Fizyka i Rzeczywistość” wyraził swoje stanowisko wobec poglądu, że mechanika kwantowa stosuje się do opisu indywidualnych zdarzeń, w następujący sposób: „Pogląd ten jest logicznie możliwy i wolny od sprzeczności; sprzeciwia się jednak tak zdecydowanie mojemu naukowemu instynktowi, że nie mogę zaniechać szukania bardziej kompletnego sposobu pojmowania”. Wszystko wskazuje jednak na to, że mechanika kwantowa stosuje się do pojedynczych zdarzeń. Wykonane w ostatnich latach piękne doświadczenia, w których pojedynczy neutron interferuje sam ze sobą, stanowią kolejne potwierdzenie słuszności przewidywań mechaniki kwantowej.

Obrona Bohra przed wnioskami, wynikającymi z pracy Einsteina, Podolsky’ego i Rosena, opierała się na zasadzie komplementarności. Bohr stwierdził, że „dopiero wzajemne wyłączenie się jakichkolwiek dwóch sposobów eksperymentalnego postępowania umożliwiających jednoznaczne określenie komplementarnych wielkości fizycznych stwarza miejsce dla nowych praw fizycznych, których współistnienie na pierwszy rzut oka mogłoby się wydawać niezgodne z podstawami nauki”. Nie należy się więc przejmować możliwością wyznaczenia położenia i pędu cząstki bez zaburzania układu, skoro jest to niemożliwe w jednym doświadczeniu. Większość fizyków uznała jednak, że tym razem Bohr nie wyjaśnił problemu do końca. Chociaż pojawiło się na ten temat wiele ciekawych prac, żadna z nich nie zadowoliła w pełni Einsteina. Na kilka lat przed śmiercią pisał on: „Jednego, w mojej opinii, powinniśmy trzymać się mocno. Rzeczywista sytuacja systemu S_2 nie zależy od tego, co robi się z systemem S_1 , który jest od niego przestrzennie oddzielony. A jednak, zależnie od pomiaru, jaki robię na S_1 , dostaję różne Ψ_2 dla drugiego podsystemu. Jednakże prawdziwa sytuacja w S_2 musi być niezależna od tego, co dzieje się w S_1 . Dla tej samej rzeczywistej sytuacji S_2 można znaleźć, zależnie od swojego wyboru (pomiaru na S_1) różne funkcje Ψ_2 . Można uciec od tej konkluzji jedynie zakładając, że pomiar na S_1 zmienia (telepatycznie) prawdziwą sytuację w S_2 lub też zaprzeczając temu, że przestrzennie oddzielone podsystemy posiadają niezależną rzeczywistość. Obie możliwości wydają mi się całkowicie nie do przyjęcia”.



Poglądy Schrödingera były całkiem inne. Parę miesięcy po opublikowaniu pracy Einsteina, Podolsky’ego i Rosena udowodnił on, że opis dowolnych dwóch układów, które przez jakiś czas ze sobą oddziaływały, wymaga w ramach mechaniki kwantowej traktowania ich jako jednej całości. Mechanika kwantowa jest teorią holistyczną (od greckiego *holos* = cały), a więc traktującą całość jako coś więcej niż tylko sumę części, nawet jeśli te części już ze sobą nie oddziałują.