

Upiorne oddziaływanie na odległość

Tadeusz Pabjan

Centrum Kopernika Badań Interdyscyplinarnych, Kraków

Spooky action at a distance

Abstract: One of the most extraordinary features of quantum objects is their nonlocality, which is also described by such terms as nonseparability or quantum entanglement. This feature means that quantum objects do not seem to possess any spatiotemporal localization and, regardless of their remoteness, they act as they were single indivisible entities, in which the information between the particular constituents of the system is transmitted immediately. The primary purpose of the paper is to bring closer and to explain this notion – especially in the historical context of the dispute about interpretation of quantum mechanics as well as of the Bell theorem of 1964.

Jedną z najbardziej niezwykłych własności obiektów kwantowych jest ich nielokalność, określana również mianem nieseparowalności lub splątania kwantowego. Własność ta decyduje o tym, że obiekty kwantowe wydają się nie posiadać czasoprzestrzennej lokalizacji i niezależnie od dzielących je odległości, zachowują się tak, jak gdyby stanowiły jedną niepodzielną całość, w której informacja pomiędzy poszczególnymi elementami układu przekazywana jest w sposób natychmiastowy. Podstawowym celem artykułu jest przybliżenie i wyjaśnienie tego pojęcia – przede wszystkim w historycznym kontekście sporu o interpretację mechaniki kwantowej oraz twierdzenia Bella z roku 1964.

Jednym z filarów fizyki klasycznej jest zasada lokalności (lokalnej przyczynowości), zgodnie z którą oddzielone przestrzennie obiekty nie mogą oddziaływać na siebie inaczej, jak tylko za pośrednictwem innych obiektów lub pola, będącego przekaźnikiem sygnału fizycznego. Natychmiastowe i bezpośrednie oddziaływanie możliwe jest tylko wtedy, gdy obiekty są w tym samym punkcie przestrzeni¹, w każdym zaś innym przypadku sygnał fizyczny – nawet jeśli porusza się z maksymalną możliwą prędkością, to znaczy z prędkością światła – potrzebuje czasu, by pokonać przestrzeń, oddzielającą te obiekty. To właśnie ta zasada decyduje o tym, że w fizyce klasycznej oddzielonych przestrzennie obiektów nie traktuje się jako jedną i tę samą rzecz, ale jako osobne i niezależne fragmenty rzeczywistości fizycznej.

Zasada lokalności nie obowiązuje – lub przynajmniej obowiązuje w znacznie ograniczonym zakresie – w mechanice kwantowej, w związku z czym mówi się o kwantowej nielokalności (nonlocality), nieseparowalności (nonseparability) lub splątaniu (entanglement) obiektów kwantowych. Pierwszy z tych terminów zwraca uwagę na to, że

świat kwantowy nie respektuje zasady lokalności; drugi i trzeci – podkreślają aspekt wewnętrznej zależności, jaka ma miejsce pomiędzy oddzielnymi przestrzennie obiektami kwantowymi. Na oznaczenie tego fenomenu stosuje się również inne nazwy, które w taki czy inny sposób nawiązują do tego, że obiekty kwantowe wydają się nie posiadać czasoprzestrzennej lokalizacji i niezależnie od dzielących je odległości, zachowują się tak, jak gdyby stanowiły jedną niepodzielną całość, w której informacja pomiędzy poszczególnymi elementami układu przekazywana jest w sposób natychmiastowy.

Za klasyczny odpowiednik nielokalności kwantowej można uznać tak zwane „oddziaływanie na odległość”, które występowało we wczesnych teoriach grawitacji i elektromagnetyzmu, i które zostało ostatecznie wykluczone z fizyki przez postulaty szczególnej teorii względności. Przyjmuje się, że nielokalność kwantowa nie jest sprzeczna z teorią względności, ponieważ na poziomie makroskopowym własność ta nie przejawia się jako natychmiastowe oddziaływanie o charakterze kauzalnym, ale przyjmuje postać korelacji kwantowych, których

¹Jest to pewna idealizacja, ponieważ nawet dwa stykające się ze sobą przedmioty nigdy nie znajdują się dokładnie w tym samym punkcie przestrzeni.

nie można wykorzystać do przesyłania sygnału fizycznego z prędkością większą od prędkości światła². Świadomość tego, czym w rzeczywistości jest nielokalność kwantowa, i w jaki sposób należy interpretować ten fenomen, nie pojawiła się od razu w gotowej postaci. Idea ta zrodziła się razem z formalizmem mechaniki kwantowej w połowie lat dwudziestych XX w., a następnie przez długi czas dojrzewała w dyskusjach o poprawnej interpretacji tej teorii [2]. Momentem przełomowym okazał się rok 1964, w którym pojawiło się twierdzenie Bella, umożliwiające testowanie empiryczne nielokalności kwantowej.

1. Spór o interpretację mechaniki kwantowej

Problem nielokalności, ukrytej w standardowej interpretacji mechaniki kwantowej, jako pierwszy zauważył Einstein. Aby ukazać, na czym polega trudność, związana z tym fenomenem, podczas V Konferencji Solvaya w Brukseli (1927) odwołał się on do przykładu redukcji funkcji falowej pojedynczej cząstki. Zgodnie z interpretacją Bohra, pomiar, dokonywany na tego typu układzie, powoduje natychmiastową zmianę fali prawdopodobieństwa cząstki w całej przestrzeni. Redukcja funkcji falowej i znalezienie cząstki w określonym miejscu oznacza, że w tym samym momencie prawdopodobieństwo znalezienia tej cząstki we wszystkich innych, dowolnie odległych, miejscach przestrzeni, natychmiast spada do zera. Tego typu „upiorne oddziaływanie na odległość” ([3], s. 158) było w ocenie Einsteina sprzeczne z teorią względności, ponieważ łamało zasadę lokalnej przyczynowości. Nielokalność mechaniki kwantowej w interpretacji kopenhaskiej była dla Einsteina namacalnym dowodem na to, że teoria ta jest albo błędna, albo niepełna. Kiedy na początku lat trzydziestych twórca teorii względności przekonał się, że pierwsza z tych możliwości nie jest słuszna³, stał się zdeklarowanym zwolennikiem teorii lokalnych zmiennych ukrytych, zgodnie z którą mechanikę kwantową należy uzupełnić o parametry, które uczynią z niej teorię w pełni lokalną, realistyczną i deterministyczną.

Jedno z pierwszych sformułowań teorii zmiennych ukrytych zaproponował jeszcze w 1927 r. Louis de Broglie, wprowadzając pojęcie „fali pilotującej”. Chociaż Einstein

poparł teorię de Broglie’a, to jednak uczynił to bez specjalnego przekonania, ponieważ wiedział, że koncepcja ta zakłada oddziaływanie o charakterze nielokalnym⁴. W teorii tej opis funkcji falowej w przypadku układów dwu lub więcej cząstek elementarnych domaga się zastosowania wielowymiarowej przestrzeni konfiguracyjnej, w której cząstki, pomimo dzielących je odległości, mogą oddziaływać na siebie w sposób natychmiastowy [6]. Sceptycyzm Einsteina oraz krytyka przedstawicieli szkoły kopenhaskiej sprawiły, że de Broglie zrezygnował z dalszych badań nad „falą pilotującą”. Dwie dekady później koncepcję tę na nowo odkrył i rozwinął David Bohm [7]. Wbrew twierdzeniu von Neumanna z roku 1932, ogłaszającemu niemożliwość uzupełnienia formalizmu mechaniki kwantowej o zmienne ukryte, sformułował on kolejną teorię, w której występują tego typu zmienne, utożsamiając „falę pilotującą” de Broglie’a z funkcją falową w przestrzeni konfiguracyjnej. Również i w tej teorii występują oddziaływania nielokalne: poszczególne części układu kwantowego mogą w sposób natychmiastowy wpływać na zachowanie jego innych części⁵.

2. Paradoks EPR

Tymczasem światło dzienne ujrzała słynna praca Einsteina, Podolsky’ego i Rosena [9]. Eksperyment EPR dotyczy zachowania dwóch skorelowanych cząstek, które na skutek wcześniejszego oddziaływania ze sobą pozostają w stanie „splątanych”. Splątanie kwantowe na poziomie makroskopowym przejawia się w postaci następującej korelacji: pomiar położenia (lub pędu) jednej cząstki daje natychmiastową informację o położeniu (lub pędzie) drugiej cząstki, która przed momentem pomiaru nie posiada ani jednoznacznie określonego położenia, ani pędu. Eksperyment EPR nie miał dowodzić nielokalności, ale niepełności mechaniki kwantowej w jej standardowym sformułowaniu. Co prawda, autorzy artykułu rozważali również scenariusz nielokalny, w którym „fizyczna rzeczywistość [drugiego układu] zależy od procesu pomiaru, przeprowadzanego na pierwszym układzie”, ale uznali, że taką ewentualność – chociaż nie jest logicznie niemożliwa – można z góry wykluczyć, ponieważ „żadna rozsądna defi-

²Warto zauważyć, że właśnie do tego argumentu odwoływali się zwolennicy standardowej interpretacji mechaniki kwantowej, gdy Einstein zarzucał im niezgodność ich koncepcji z teorią względności: „[Wykonanie pomiaru] położenia odbitej paczki [falowej] powoduje pewien rodzaj oddziaływania (redukcja paczki falowej) w odległym punkcie, zajmowanym przez emitowaną paczkę; widać, że to oddziaływanie propaguje się z prędkością większą od prędkości światła. Jednakże oczywistym jest, że ten rodzaj oddziaływania nie może zostać wykorzystany do przekazywania sygnałów, a zatem nie pozostaje on w konflikcie z postulatami teorii względności” [1]. Analiza Heisenberga dotyczy pojedynczej cząstki, której funkcja falowa rozdziela się na dwie paczki falowe – transmitowaną i odbitą.

³O tym, że Einstein pogodził się z wewnętrzną niesprzecznością mechaniki kwantowej, może świadczyć następujący cytat: „The entire mathematical formalism [of quantum mechanics] will probably have to be contained, in the form of logical inferences, in every useful future theory” ([4], s. 667).

⁴Einstein przez pewien czas sam zajmował się teorią podobną do koncepcji de Broglie’a, ale zarzucił ją, gdy odkrył, że występują w niej oddziaływania nielokalne [5].

⁵Na temat nielokalnego charakteru teorii de Broglie’a–Bohma John Bell wypowiada następującą uwagę: „Could it be that this strange non-locality is a peculiarity of the very particular de Broglie–Bohm construction of the classical sector, and could be removed by a more clever construction? I think not. It now seems that the non-locality is deeply rooted in quantum mechanics itself and will persist in any completion” ([8], s. 132).

nicja rzeczywistości nie może na to zezwalać” ([9], s. 780). Dokładna analiza rozumowania EPR pozwala się jednak przekonać, że argument zawarty w artykule Einsteina, Podolsky’ego i Rosena w rzeczywistości przemawia za nielokalnością mechaniki kwantowej⁶. Chociaż wniosek ten nie był zamierzony przez autorów artykułu, to jednak Einstein, w jednej ze swoich późniejszych publikacji, przyznał, że zupełność mechaniki kwantowej faktycznie domaga się odrzucenia zasady lokalności: „Staje się oczywiste, że paradoks [EPR] zmusza nas do zarzucenia jednego z następujących dwóch stwierdzeń: (1) opis za pomocą funkcji ψ jest zupełny; (2) rzeczywiste stany przestrzennie oddzielonych obiektów są od siebie niezależne” ([4], s. 681). Jak widać, Einstein był świadom, że nielokalna teoria zmiennych ukrytych jest jedyną alternatywą dla standardowej interpretacji mechaniki kwantowej, chociaż wiele wskazuje na to, że nigdy do końca nie pogodził się z tym faktem. W swojej autobiografii z roku 1946 napisał, że zarówno kopenhaska interpretacja mechaniki kwantowej, odmawiająca realności obiektom kwantowym przed momentem pomiaru, jak i nielokalna teoria zmiennych ukrytych wydają się mu „w równym stopniu nie do zaakceptowania” ([4], s. 85).

3. Twierdzenie Bella

Możliwość ostatecznego rozstrzygnięcia sporu o nielokalność mechaniki kwantowej pojawiła się w roku 1964. Irlandzki fizyk, John Bell, sformułował wtedy twierdzenie [11], w którym wykazał, że przewidywania mechaniki kwantowej różnią się od przewidywań każdej teorii zmiennych ukrytych, w której zakłada się lokalność (oddziaływania fizyczne rozchodzą się ze skończoną prędkością) i realizm (parametry obiektów kwantowych mają wartości niezależne od procesu pomiaru). Założenie lokalnego realizmu prowadzi do mierzalnych efektów, które zostały ujęte w tzw. nierówności Bella. Mechanika kwantowa nie spełnia tej nierówności; jest ona natomiast zachowana przez każdą lokalną i realistyczną teorię. Twierdzenie Bella głosi zatem, że albo mechanika kwantowa nie jest poprawną teorią, albo nie jest słuszne założenie lokalnego realizmu. Oryginalna nierówność Bella oparta jest na zaproponowanym przez Bohma scenariuszu doświadczenia EPR, w którym zamiast cząstek o skorelowanych pędach i położeniach, wykorzystuje się cząstki o skorelowanych spinach. Eksperymentalna weryfikacja twierdzenia Bella domagała się pewnej modyfikacji nierówności, której dokonali w roku 1969 Clauser, Horne, Shimony i Holt [12]. Udoskonaloną nierówność Bella (nierówność CHSH) po raz pierwszy poddali eksperymentalnym testom Freedman i Clauser w roku 1972, zaś rozstrzygające eksperymenty przeprowadziła na początku lat osiemdziesiątych grupa Alaina Aspecta [13]. W doświadczeniach, powtarzanych odtąd wielokrotnie w wielu niezależnych ośrodkach ba-

dawczych, stwierdzono łamanie nierówności Bella. Wynik ten potwierdza poprawność standardowego sformułowania mechaniki kwantowej i falsyfikuje każdą teorię zmiennych ukrytych, opartą na założeniu lokalnego realizmu.

Łamanie nierówności Bella traktuje się powszechnie jako mocny argument, lub wręcz jako dowód na to, że świat kwantowy jest nielokalny. Dwa podstawowe założenia, jakie przyjmuje się przy wyprowadzaniu nierówności Bella, to realizm i lokalność, co oznacza, że przynajmniej jedno z tych założeń nie jest poprawne. Rezygnacja z lokalności na rzecz realizmu wydaje się najniższą ceną, jaką należy zapłacić, by zachować zgodność teorii z doświadczeniem. Wiele wskazuje na to, że jest to jedyne możliwe rozwiązanie, ponieważ sytuacja odwrotna – odrzucenie realizmu i zachowanie lokalności – nie rozwiązuje trudności interpretacyjnych i nie wyjaśnia korelacji, rejestrowanych w doświadczeniach EPR [14]. Korelacje kwantowe, w odróżnieniu od tych, które występują w świecie makroskopowym, są „lokalnie niewyjaśnialne” ([8], s. 153).

Twierdzenie Bella z roku 1964 i eksperymenty potwierdzające łamanie nierówności Bella rozpoczynają nowy rozdział w historii mechaniki kwantowej, nie bez powodu określany mianem ery „eksperymentalnej metafizyki” [15–17]. Nielokalność, mająca dotychczas status dyskusyjnej i nieweryfikowalnej hipotezy, stała się częścią naukowego paradygmatu i w istotny sposób zmieniła nie tylko naukowy, ale i filozoficzny obraz świata. Otrzymane wyniki to jednakże dopiero początek drogi, prowadzącej do pełnego zrozumienia tego, czym w rzeczywistości jest nielokalność. Wiele pytań nadal pozostaje bez odpowiedzi. W szczególności, nierozstrzygniętym problemem jest to, w jakim zakresie nielokalność kwantowa przejawia się w skali makroskopowej. Jeśli Wszechświat na poziomie fundamentalnym zbudowany jest z obiektów kwantowych, to należy oczekiwać, że ich kwantowe własności mają przynajmniej pośredni wpływ na to, w jaki sposób funkcjonuje rzeczywistość fizyczna na poziomie makroskopowym. Badania nad tym zagadnieniem ciągle trwają i wiele wskazuje na to, że w niedługim czasie pozwolą one lepiej poznać naturę nielokalności kwantowej i wyjaśnić związek tego fenomenu z fizyką świata makroskopowego.

Literatura

- [1] W. Heisenberg, *The Physical Principles of Quantum Mechanics* (The University of Chicago Press, Chicago 1930).
- [2] T. Pabjan, *Filozofia Nauki* **60**, 79 (2007).
- [3] A. Einstein, *The Born–Einstein Letters*, red. M. Born (Macmillan, London 1971).
- [4] A. Einstein, w: *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, red. P.A. Schilpp (Tudor, New York 1949).
- [5] D.W. Beuseek, *Stud. Hist. Phil. Mod. Phys.* **27**, 437 (1997).
- [6] H.M. Wiseman, arXiv: quant-ph/0509061v3.

⁶Jedną z przesłanek rozumowania EPR jest założenie lokalności, drugą – poprawność kwantowo-mechanicznego opisu splątanych cząstek. Opuszczając drugą przesłankę jako tę, która jest oczywista, argument EPR można wyrazić w postaci następującej implikacji: lokalność pociąga za sobą niezupełność mechaniki kwantowej. Zdanie to jest jednakże równoważne innej implikacji: zupełność mechaniki kwantowej implikuje jej nielokalność [10].

