

Tadeusz Pabjan

Krótką historia nielokalności

Historia nauki potwierdza następującą prawidłowość: każda teoria fizyczna, która na pewnym etapie rozwoju myśli ludzkiej zostaje włączona do korpusu wiedzy naukowej, z upływem czasu wzbudza coraz mniej kontrowersji, a jej interpretacje — jeśli nawet początkowo znacznie się różnią — z biegiem lat zaczynają się pokrywać, określając jedno wspólne stanowisko, pod którym gotowi są podpisać się wszyscy lub niemal wszyscy uczeni danej dziedziny wiedzy. Mechanika kwantowa stanowi wyjątek od tej reguły. Chociaż teoria ta jest doskonale potwierdzona empirycznie, to jednak — pomimo upływu niemal stu lat od momentu jej sformułowania — interpretacyjne spory wokół tej dziedziny, przesunięte w znacznej mierze na teren filozofii, zamiast cichnąć, zdają się z każdym dniem przybierać na sile. Jednym z zasadniczych czynników, które obecnie napędzają tę dyskusję, jest sformułowane w 1964 roku tak zwane Twierdzenie Bella. Doniosłość tego twierdzenia zasadza się na tym, iż pozwala ono na empiryczną weryfikację pewnych tez, które dotychczas stanowiły jedynie przedmiot filozoficznych analiz. W szczególności, z Twierdzeniem Bella związane są dwa istotne pojęcia, które — ze względu na swój „nieempiryczny” charakter — wzbudzają najwięcej interpretacyjnych kontrowersji. Te pojęcia to realizm i lokalność.¹

Realizm — najogólniej rzecz ujmując — sprowadza się do założenia o obiektywnym, to znaczy niezależnym od aktu obserwacji, istnieniu rzeczywistości fizycz-

¹ Na temat pozostałych założeń, jakie przyjmuje się przy wyprowadzaniu nierówności Bella, por. np. A. G. Valdebro, *Assumptions Underlying Bell's Inequalities*, „European Journal of Physics”, 23 (2002), s. 569-577.

nej,² lokalność zaś — również w najbardziej podstawowym znaczeniu tego słowa — oznacza niemożność natychmiastowego oddziaływania pomiędzy oddzielonymi przestrzennie zdarzeniami. Przeprowadzone przez Alaina Aspecta i innych fizyków doświadczenia dowodzą (naruszenie tzw. nierówności Bella), że założenia realizmu i lokalności nie mogą być jednocześnie prawdziwe — ich połączenie prowadzi do sprzeczności z mechaniką kwantową. Które z pojęć należy odrzucić? Rezygnacja z realizmu otwiera drogę dla stanowisk skrajnie subiektywistycznych (jak np. solipsyzm), które jednakże z wielu różnych względów nie znajdują większego uznania ani w filozofii, ani tym bardziej na terenie nauki. Mniejszym złem wydaje się rezygnacja z lokalności — to znaczy przyjęcie nielokalności, oznaczającej — znowu upraszczając sprawę — natychmiastowe oddziaływania o charakterze przyczynowym pomiędzy odległymi obiektami. Twierdzenie Bella (a dokładniej, jego doświadczalna weryfikację, wyrażającą się w stwierdzonym empirycznie łamaniu nierówności Bella) powszechnie interpretuje się więc jako argument (niekiedy nawet — jako dowód) za tym, że mechanika kwantowa jest nielokalna. Ponieważ zaś mechanika kwantowa jest teorią w pewnym sensie fundamentalną, dlatego nielokalność tej teorii przenosi się w niektórych jej interpretacjach na całą fizyczną rzeczywistość, zakładając — zapewne nie bez racji — że prawa mechaniki kwantowej dotyczą wszystkich bez wyjątku (również makroskopowych) obiektów tej rzeczywistości, ponieważ na najgłębszym poziomie wszystkie one zbudowane są z obiektów kwantowych. W ten sposób nielokalność staje się jednym z najważniejszych pojęć, wokół których ogniskuje się współczesna dyskusja nad poprawną interpretacją mechaniki kwantowej i zarazem nad ostateczną naturą fizycznej rzeczywistości.

W jaki sposób zrodziła się idea nielokalności w fizyce? W jaki sposób i pod wpływem jakich czynników idea ta ewoluowała? Znalezienie przynajmniej przybliżonych odpowiedzi na te pytania stanowi zasadniczy cel niniejszego artykułu. Podobnie jak w przypadku wielu innych pojęć, wokół których w ciągu wieków toczyły się istotne spory filozoficzne, tak i tutaj podstawowym źródłem informacji o całym zagadnieniu będzie historia nauki. Chociaż początków samego pojęcia nielokalności można się doszukiwać już w starożytności, to jednak istotny wpływ na dalszy rozwój nauki miały dopiero poglądy Izaaka Newtona. Niniejsze opracowanie rozpocznie się od analizy jego teorii, a zakończy — na bezpośrednich poprzednikach Johna Bella, o którym bez przesady można powiedzieć, że rozpoczyna on zupełnie nowy rozdział

² Istnieje kilka odmiennych „wersji” realizmu. Analizując Twierdzenie Bella, T. Norsen wyróżnia: realizm naiwny (przekonanie, że wszystkie subiektywnie doświadczane własności obiektów fizycznych mają swoje identyczne odpowiedniki w świecie zewnętrznym), realizm naukowy (zgodnie z którym naukowe teorie dostarczają literalnie prawdziwego opisu świata fizycznego), realizm perceptualny (zgodnie z którym percepcja wrażeń jest źródłem pewnej informacji o świecie fizycznym) oraz realizm metafizyczny (przekonanie o realnym istnieniu zewnętrznego świata). Zdaniem autora, realizm, którego dotyczy Twierdzenie Bella, to realizm metafizyczny; por. T. Norsen, *Against 'Realism'*, „Foundations of Physics”, 37/3 (2007), s. 311-340. Zdaniem autora, realizm, którego dotyczy Twierdzenie Bella, to realizm metafizyczny.

w historii fizyki; rozdział, w którym nielokalność przestaje być hipotezą i staje się częścią naukowego paradygmatu.

1. GRAWITACYJNE ODDZIAŁYWANIE NA ODLEGŁOŚĆ

Podstawową trudnością, do jakiej prowadzi przyjęcie założenia o nielokalnym charakterze praw przyrody, jest to, że tego typu koncepcja przekreśla uświęconą wielowiekową tradycją zasadę lokalnej kauzalności (przyczynowości). Zasadę tę w sposób formalny określiła dopiero szczególna teoria względności, ale intuicja wyrażająca tę zasadę funkcjonowała w fizyce od samego początku; co więcej, na długo przed powstaniem fizyki jako nauki intuicja ta obecna była w zdroworozsądkowym podejściu do świata. Zgodnie z tą intuicją, wszystko, co dzieje się w określonym miejscu przestrzeni (skutek), jest powodowane przez czynniki (przyczyny), które działają w tym właśnie miejscu, a nie gdzie indziej.³ Oczywiście, czynniki, które znajdują się „gdzie indziej”, mogą być przyczynami zdarzenia „tutaj”, ale nie może się to odbywać „natychmiast”, ponieważ przyczyny potrzebują czasu, aby w jakiś sposób „dotrzeć” do zdarzenia, będącego skutkiem. Szczególna teoria względności doprecyzowała powyższą intuicję postulując, że maksymalną prędkością transmisji sygnału fizycznego (pomiędzy przyczyną i skutkiem) jest prędkość światła. W języku geometrii Minkowskiego kauzalność lokalna oznacza, że oddziaływania przyczynowe mogą zachodzić jedynie pomiędzy zdarzeniami, połączonymi krzywą czasopodobną lub zerową — co gwarantuje, że prędkość sygnału fizycznego pomiędzy przyczyną a skutkiem nie przekroczy prędkości światła. Przekroczenie tej prędkości oznacza, że zdarzenia są połączone krzywą przestrzennopodobną i że zachodzą pomiędzy nimi oddziaływania o charakterze nielokalnym.

Pierwszą teorią, która musiała stawić czoła problemowi oddziaływań nielokalnych, była fizyka Newtona. Zgodnie z teorią powszechnej grawitacji, pomiędzy ciałami niebieskimi zachodzą określone związki kauzalne: siła grawitacji Słońca jest na przykład przyczyną tego, że planety poruszają się po swych eliptycznych orbitach. Z punktu widzenia analizowanego zagadnienia rzeczą zasadniczą jest odpowiedź na pytanie, czy oddziaływania kauzalne pomiędzy ciałami niebieskimi propagują się w systemie Newtona „natychmiastowo”, czy nie. Jeśli tak — to znaczy, że grawitacja jest w tej koncepcji przykładem oddziaływania nielokalnego. Chociaż ten aspekt całego zagadnienia (czasowa zależność przyczyny od skutku) nie występuje w dyskusji

³ Einstein wyraża powyższą intuicję w następujący sposób: „If one asks what, irrespective of quantum mechanics, is characteristic of the world of ideas of physics, one is first of all struck by the following: the concepts of physics relate to a real outside world (...). It is further characteristic of these physical objects that they are thought of as arranged in a space-time continuum. An essential aspect of this arrangement of things in physics is that they lay claim, at a certain time, to an existence independent of one another, provided these objects ‘are situated in different parts of space’”; [w:] *The Born-Einstein Letters*, M. Born (ed.), London 1971, Macmillan, s. 168.

między Newtonem a współczesnymi mu komentatorami, to jednak wszystko wskazuje na to, że Newtonowskie „oddziaływanie na odległość” pojmowane było od samego początku jako oddziaływanie natychmiastowe, a więc nielokalne. Nic dziwnego, że grawitacja przekazywana właśnie w taki sposób — natychmiastowo, na odległość i bez pośrednictwa jakiegokolwiek ośrodka — wydawała się dla współczesnych Newtonowi czymś niefizycznym, dziwnym, a nawet niemożliwym. Sam Newton nie ukrywał, że oddziaływanie na odległość stanowi zagadkę również dla niego:

„Że jedno ciało może oddziaływać na odległość na inne ciało poprzez próżnię, bez pośrednictwa czegokolwiek innego; i że działanie i siła mogą być przekazywane od jednego ciała do drugiego — jest dla mnie tak wielkim nonsensem (*Absurdity*), że wydaje się mi, iż żaden człowiek, posiadający odpowiednie wykształcenie filozoficzne, nigdy się z tym nie zgodzi.”⁴

Dosadność, z jaką Newton wyraża swoją ocenę oddziaływania na odległość, może świadczyć o tym, że nielokalność grawitacji była dla autora *Principiów* istotnym problemem interpretacyjnym. W rzeczywistości bowiem żywił on „metafizyczną wiarę w lokalną kauzalność”.⁵ Chociaż jego teoria wyraźnie sugerowała, że w przyrodzie występują oddziaływania nielokalne, to jednak Newton miał świadomość, że prawo odwrotnych kwadratów nie daje ostatecznego i pełnego wyjaśnienia samego zjawiska grawitacji. Jego teoria pozwalała co prawda poprawnie opisywać i przewidywać trajektorie planet, pozostających pod wpływem grawitacji Słońca; nie dawała jednakże wyjaśnienia, czym sama w sobie jest grawitacja. Wszystko wskazuje na to, że Newton był przekonany o istnieniu innej, fundamentalnej teorii, która dostarczy ostatecznego wyjaśnienia mechanizmu, odpowiedzialnego za oddziaływania przyczynowe przekazywane za pomocą sił grawitacyjnych i że w tym wyjaśnieniu zachowana zostanie zasada lokalnej kauzalności. Należy się domyślać, że sam wytrwale szukał takiej teorii,⁶ a jego słynna deklaracja, dotycząca „niewymyślenia hipotez” na temat natury grawitacji, świadczy jedynie o tym, że sam nie znalazł żadnego satysfakcjonującego rozwiązania.⁷

Jak widać, „oddziaływanie na odległość” nie było dla autora *Principiów* oddziaływaniem nielokalnym we współczesnym rozumieniu tego słowa. Nie zmienia to jednak faktu, że teoria Newtona właśnie w taki sposób jest obecnie rozumiana; autorzy podręczników fizyki nie wspominają o rozterkach Newtona, dotyczących jego

⁴ Z listu Newtona do Bentley’ a z roku 1693, cyt. za: M. Lange, *An Introduction to the Philosophy of Physics: Locality, Fields, Energy, and Mass*, Malden 2002, Blackwell, s. 94.

⁵ T. Norsen, *J. S. Bell’s Concept of Local Causality*, arXiv:quant-ph/0707.0401v1, 3 VII 2007.

⁶ Por. M. Heller, J. Życiński, *Wszechświat — maszyna czy myśl?*, Kraków 1988, PTT, s. 93-94.

⁷ W liście do Richarda Bentley’ a z roku 1693 Newton pisał: „You sometime speak of gravity as essential and inherent to Matter. Pray, do not ascribe that notion to me; for the cause of gravity is what I do not pretend to know, and therefore would take more time to consider it”; cyt. za: M. B. Hesse, *Forces and Fields: The Concept of Action as a Distance in the History of Physics*, New York 2005, Dover Publications, s. 150.

własnej interpretacji zjawiska grawitacji i poprzestają na stwierdzeniu, że oddziaływanie grawitacyjne propaguje się w jego teorii natychmiastowo, a więc jest przykładem oddziaływania nielokalnego.⁸

Ostateczne wyjaśnienie natury grawitacji sformułowane zostało dopiero w ramach ogólnej teorii względności, jednakże usunięcie zasadniczej niespójności pomiędzy Newtonowskim oddziaływaniem grawitacyjnym i ideą lokalnej kauzalności stało się możliwe znacznie wcześniej — za sprawą wprowadzonej przez Michaela Faradaya i Jamesa Maxwella koncepcji pola. Teoria Faradaya i Maxwella zastąpiła wcześniejszy, Coulombowski opis zjawisk elektromagnetycznych w kategoriach natychmiastowego oddziaływania na odległość. Była to, chronologicznie rzecz ujmując, druga — po koncepcji Newtona — teoria, w której skutki propagowały się w przestrzeni natychmiastowo.⁹ Oczywiście, taka forma natychmiastowej komunikacji z fizycznego punktu widzenia wydawała się — podobnie jak w przypadku teorii powszechnej grawitacji — rozwiązaniem bądź co bądź podejrzanym. Zastosowanie idei pola pozwoliło uporać się z kłopotliwą nielokalnością. Pole (grawitacyjne — w przypadku teorii Newtona, elektromagnetyczne — w przypadku teorii Maxwella) przejęło rolę fizycznego ośrodka, dzięki któremu oddziaływanie kauzalne mogło propagować się lokalnie, to znaczy z miejsca do miejsca, a nie na odległość, jak było w teorii Newtona. Ideę lokalnie kauzalnego oddziaływania poprzez pole fizyczne oddaje trafnie następujący komentarz Einsteina:

Staranne studium fenomenów elektromagnetycznych spowodowało, że uznaliśmy oddziaływanie na odległość jako proces niemożliwy bez obecności pewnego rodzaju pośredniczącego ośrodka. Jeśli na przykład magnes przyciąga kawałek żelaza, nie możemy zadowolić się uznaniem, że magnes oddziałuje na żelazo bezpośrednio przez pustą przestrzeń, ale powinniśmy wyobrazić sobie — tak jak to czynił Faraday — że magnes wytwarza w otaczającej go przestrzeni coś fizycznie realnego, coś, co nazywamy ‘polem magnetycznym’. Owo pole magnetyczne oddziałuje na kawałek metalu w taki sposób, że ten zaczyna poruszać się w stronę magnesu. (...) Efekty grawitacyjne mogą być również wyjaśnione w podobny sposób. Oddziaływanie ziemi na kamień odbywa się w sposób pośredni. Ziemia wytwarza w swoim otoczeniu pole grawitacyjne, które z kolei oddziałuje na kamień, powodując jego ruch.¹⁰

Brakującego ogniwa w łańcuchu wyjaśniającym lokalny charakter przyczynowania za pośrednictwem pola (np. grawitacyjnego) dostarczyła szczególna teoria względności. Ustalenie maksymalnej prędkości propagacji sygnału fizycznego (prędkość światła) umożliwiło rozróżnienie obszarów czasoprzestrzeni dostępnych i nie-

⁸ Właśnie w taki sposób rozumiał koncepcję Newtona Einstein: „The success of the Faraday-Maxwell interpretation of electromagnetic action at a distance resulted in physicists becoming convinced that there are no such things as instantaneous action at a distance (not involving an intermediary medium) of the type of Newton’s law of gravitation”; A. Einstein, *Relativity: The Special and General Theory*, 2006, Penguin Classics, s. 47.

⁹ Na ten temat, por. J. Narlikar, *Struktura Wszechświata*, Warszawa 1985, PWN, s. 276-279. Autor analizuje m.in. koncepcję tzw. opóźnionego oddziaływania na odległość Wheelera-Feynmana.

¹⁰ A. Einstein, *Relativity: The Special and General Theory*; dz. cyt., s. 60.

dostępnych oddziaływaniom kauzalnym. Dzięki temu stało się możliwe formalne sprecyzowanie warunków koniecznych do tego, aby określona teoria była teorią lokalnie kauzalną: oddziaływania przyczynowe w takiej teorii muszą się propagować z prędkością równą lub mniejszą od prędkości światła. Warunek ten jest równoważny wykluczeniu takich przypadków, jak natychmiastowe oddziaływanie na odległość, przyczynowanie dokonujące się z prędkością większą od prędkości światła i przyczynowanie w odwróconym kierunku temporalnym (w przeszłość). Powyższe warunki wyraża się krótko stwierdzając, że każda teoria lokalnie kauzalna musi być zgodna ze szczególną teorią względności.

2. PROBLEM NIELOKALNOŚCI W SPORACH O INTERPRETACJĘ MECHANIKI KWANTOWEJ

Szczególna teoria względności doprecyzowała koncepcję lokalnej kauzalności i — co ważniejsze — zapewniła jej solidne teoretyczne podstawy. Niestety, szczęście nie trwało długo. Już w kilkanaście lat po sformułowaniu STW na arenie nauki pojawiła się nowa teoria — mechanika kwantowa — która ujawniła, że na najgłębszym, kwantowym poziomie fizycznej rzeczywistości występują zabronione przez teorię względności oddziaływania o charakterze nielokalnym. Pod koniec lat 20. XX wieku Werner Heisenberg i Niels Bohr sformułowali oficjalne stanowisko, znane odąd jako standardowa (kopenhaska) interpretacja mechaniki kwantowej. Zgodnie z tą interpretacją dowolny układ kwantowy nie istnieje niezależnie od obserwatora (lub przyrządu pomiarowego); przed dokonaniem pomiaru istnieje jedynie funkcja falowa i prawdopodobieństwa uzyskania określonych wyników pomiaru, konkretne zaś wartości parametrów pojawiają się dopiero po dokonaniu pomiaru i są wynikiem oddziaływania przyrządu pomiarowego z układem kwantowym. Oznacza to, że podczas dokonywania pomiaru następuje redukcja funkcji falowej i cały układ kwantowy w tym samym momencie „przeskakuje” do określonego stanu, będącego wynikiem pomiaru.

Okazuje się, że przyjęcie koncepcji kwantowego „skoku”, dokonującego się w momencie pomiaru, prowadzi do konfliktu z podstawowym założeniem STW i sugeruje wyraźnie, że kopenhaska interpretacja mechaniki kwantowej zakłada kauzalne oddziaływania o charakterze nielokalnym. Nie jest więc rzeczą dziwną, że jako pierwszy zagrożenie to zauważył i wyraźnie wyartykułował Einstein. W październiku 1927 roku na V Konferencji Solvay’a w Brukseli zilustrował on nielokalność wynikającą z kopenhaskiej interpretacji, odwołując się do przykładu redukcji funkcji falowej pojedynczej cząstki.¹¹ Funkcja falowa, jako obiekt matematyczny, nie jest ograniczona czasem ani przestrzenią, pomiar zaś — zaobserwowanie cząstki — dokonany przez obserwatora w jednym miejscu powoduje, zgodnie z interpretacją

¹¹ Por. D. Wick, *The Infamous Boundary: Seven Decades of Controversy in Quantum Physics*, Birkhauser, Boston 1995.

Bohra i Heisenberga, natychmiastową zmianę (redukcję) funkcji w całej przestrzeni. Redukcja funkcji dokonuje się natychmiast, aby żaden inny obserwator nie mógł zarejestrować tej samej cząstki w innym, dowolnie odległym miejscu. Tego mechanizmu nie można wyjaśnić inaczej, jak tylko „upiornym oddziaływaniem na odległość”¹², które Einstein zdecydowanie odrzucał:

Ale na tym jednym przypuszczeniu powinniśmy, moim zdaniem, opierać się bez żadnej wątpliwości: rzeczywista, faktyczna sytuacja układu S_2 jest niezależna od tego, co dzieje się z układem S_1 , który jest przestrzennie oddzielony od S_2 .¹³

Nielokalność związana z kopenhaską interpretacją mechaniki kwantowej nie była jedynym, ale z pewnością jednym z głównych powodów, dla których Einstein do końca swego życia był zdeklarowanym przeciwnikiem tej interpretacji i opowiadał się za interpretacją w kategoriach zmiennych ukrytych.¹⁴

Teoria zmiennych ukrytych (lub lokalnych zmiennych ukrytych) występuje w wielu różnych wersjach i sformułowaniach, ale jej podstawowa idea jest stosunkowo prosta: funkcja falowa nie stanowi — zgodnie z tą interpretacją — pełnego i ostatecznego opisu układu kwantowego; istnieją jeszcze dodatkowe, nieznanne dotychczas i niekontrolowane parametry (zmienne ukryte), które powodują, że zachowanie obiektu kwantowego jest w pełni deterministyczne i — co istotne — niezależne od aktu pomiaru, dokonywanego przez obserwatora. W odniesieniu do przywołanego powyżej przykładu z pojedynczą cząstką teoria zmiennych ukrytych stwierdza, że cząstka przez cały czas posiada określone położenie, pomiar zaś polega jedynie na stwierdzeniu faktu obecności (lub nieobecności) cząstki w określonym miejscu i wnioskowaniu o tym, że nie ma jej (lub jest) w innym położeniu.

Jedną z pierwszych wersji teorii zmiennych ukrytych zaproponował w tym samym, 1927 roku, Louis de Broglie, wprowadzając pojęcie „fali pilotującej”.¹⁵ W koncepcji de Broglie’a cząstka zachowuje się klasycznie i posiada cały czas określone położenie, ale towarzyszy jej nieustannie fala, która „pilotuje” cząstkę do tego miejsca przestrzeni, w którym istnieje największa amplituda fali. Einstein odwołał się do pomysłu de Broglie’a, gdy na konferencji Solvay’a formułował swoje zastrzeżenia pod adresem nielokalnego charakteru oddziaływań w kopenhaskiej interpretacji mechaniki kwantowej:

Sądzę, że ta trudność (oddziaływanie na odległość) nie zostanie przewyżczona tak długo, jak długo opis całego procesu w terminach fali Schrödingera nie zostanie uzupełniony szczegóło-

¹² A. Einstein, [w:] *The Born-Einstein Letters*, M. Born (ed.), dz. cyt., s. 158.

¹³ A. Einstein, „Autobiographical Notes”, [w:] *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, P. A. Schilpp (ed.), New York 1949, Tudor, s. 85.

¹⁴ Por. J. Bell, *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics*, Cambridge 1993, Cambridge University Press, wyd. I, s. 89-91; por. też T. Norsen, *Einstein’s Boxes*, „American Journal of Physics”, 73/2 (2005), s. 164-176.

¹⁵ L. de Broglie, *Non-linear Wave Mechanics: A Causal Interpretation*, Amsterdam 1960, Elsevier.

wym określeniem lokalizacji cząstki podczas jej propagacji. Myślę, że Pan de Broglie postępuje słusznie, idąc w tym kierunku. Sądzę, że jeśli operuje się jedynie falami Schrödingera, [kopenhaska] interpretacja $|\psi|^2$ pozostaje w sprzeczności z postulatami teorii względności.¹⁶

Jak widać, Einstein w zasadzie poparł ideę de Broglie'a, chociaż bez specjalnego entuzjazmu. Dlaczego? Zdaniem Wisemana,¹⁷ Einstein wiedział, że koncepcja „fali pilotującej” również zakłada oddziaływanie o charakterze nielokalnym, chociaż nielokalność tej ostatniej teorii nie jest tak wyraźna, jak nielokalność mechaniki kwantowej w interpretacji Bohra-Heisenberga, ponieważ nie ujawnia się ona w układach z pojedynczymi obiektami kwantowymi. Gdy w grę wchodzi więcej niż jedna cząstka, funkcja falowa układu domaga się wielowymiarowej przestrzeni konfiguracyjnej, a w takiej przestrzeni — zgodnie z teorią de Broglie'a — położenie jednej cząstki może w sposób nielokalny wpływać na trajektorię innej cząstki, nawet jeśli obydwie one bezpośrednio nie oddziałują ze sobą. Einstein wiedział o kłopotach z lokalną kauzalnością interpretacji de Broglie'a, ponieważ sam, na pewnym etapie własnych poszukiwań, zajmował się podobną koncepcją, dopóki nie odkrył, że prowadzi ona do wniosków sprzecznych z STW.¹⁸ Brak entuzjazmu w ocenie teorii „fali pilotującej” wynikał zatem z przekonania, że jakiegokolwiek rozwiązanie oparte o opis funkcji falowej w wielowymiarowej przestrzeni konfiguracyjnej z konieczności prowadzi do łamania zasady lokalnej kauzalności.¹⁹ Ocena Einsteina oraz zrozumiałe krytycyzm zwolenników interpretacji kopenhaskiej spowodowały, że de Broglie nigdy więcej nie powrócił do badań nad „falą pilotującą”. Koncepcję tę na nowo odkrył i opracował w latach 50. XX w. David Bohm.

Jeśli chodzi o przedstawicieli i zwolenników kopenhaskiej interpretacji mechaniki kwantowej, to mieli oni świadomość, że ich teoria domaga się przyjęcia pewnej formy nielokalnej kauzalności i że z tego powodu pozostaje ona w sprzeczności z teorią Einsteina. Przywoływano jednakże następujący argument: kwantowa nieoznaczoność nie pozwala na przesyłanie żadnych informacji z prędkością większą niż prędkość światła, co oznacza, że sprzeczność z teorią względności jest pozorna. Oto odnośny komentarz Heisenberga:

[Wykonanie pomiaru] położenia odbitej paczki [falowej] powoduje pewien rodzaj oddziaływania (redukcja paczki falowej) w odległym punkcie, zajmowanym przez emitowaną paczkę; wiadać, 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.²⁰

¹⁶ M. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, New York 1974, John Wiley and Sons.

¹⁷ Zob. H. M. Wiseman, *From Einstein's Theorem to Bell's Theorem: A History of Quantum Nonlocality*, arXiv: quant-ph/0509061v3, 8 II 2006, s. 4.

¹⁸ Por. D. W. Belousek, *Einstein's 1927 unpublished hidden-variable theory: its background, context and significance*, „Studies in the History and Philosophy of Modern Physics”, 27 (1997), s. 437-461.

¹⁹ Por. H. M. Wiseman, art. cyt., s. 4.

²⁰ W. Heisenberg, *The Physical Principles of Quantum Mechanics*, Chicago 1930, The Univer-

Nie ulega wątpliwości, że interpretacja Heisenberga różni się od wniosków, jakie na temat niesprzeczności oddziaływań nielokalnych z teorią względności wyciągał Einstein. Istotnym argumentem, który — jak się wydaje — powinien zakończyć dyskusję nad tym zagadnieniem, był fakt, że to właśnie Einstein był autorem postulatów teorii względności, o interpretację których toczył się spór! Można się domyślać, że poglądy Heisenberga musiały być powodem niemałej irytacji Einsteina — Heisenberg najwyraźniej sugerował, że twórca teorii względności niepoprawnie interpretuje swoje własne postulaty, w szczególności zaś postulat maksymalnej i nieprzekraczalnej prędkości przesyłania sygnałów fizycznych (prędkości światła). W teorii Einsteina „z fizycznego punktu widzenia prędkość światła odgrywa rolę prędkości nieskończenie dużej”.²¹ Nic dziwnego, że zaproponowana przez Heisenberga analiza oddziaływań, które propagują się z prędkością większą od prędkości światła, była dla Einsteina przykładem „bezsensownych rozważań”.²²

Warto zauważyć, że analizowany spór dotyczy subtelnej różnicy pomiędzy oddziaływaniem o charakterze kauzalnym (przyczynowym), a tym, co w mechanice kwantowej zwykło się nazywać korelacją pomiędzy oddalonymi obiektami. Oddziaływania kauzalne oznaczają, że jedno zdarzenie może *wpływać* na inne, oddalone przestrzennie zdarzenie (w przypadku oddziaływań nielokalnych wpływ jest natychmiastowy), podczas gdy w przypadku korelacji nie istnieje bezpośrednie oddziaływanie kauzalne; pojawia się jedynie określona *informacja* na temat odległego obiektu. W świecie makroskopowym bardzo często zachodzą korelacje, które są oczywiste i nie budzą żadnego zdumienia (np. wyjęcie z jednej kieszeni płaszcza prawej rękawiczki daje natychmiastową informację o tym, że w drugiej kieszeni pozostała lewa rękawiczka), natomiast podstawowy problem z kwantowymi korelacjami jest taki, że są one „lokalnie niewyjaśnialne”,²³ i że pojawienie się informacji w przypadku tego typu korelacji nosi wszelkie znamiona natychmiastowego oddziaływania kauzalnego (choć w rzeczywistości korelacje te nie pozwalają na przesyłanie żadnych fizycznych sygnałów pomiędzy odległymi obiektami). Dyskusja nad problemem nielokalności jest w związku z tym w znacznej mierze dyskusją na temat tego, czy korelacje kwantowe są, czy nie są, jakąś formą oddziaływania kauzalnego. Stosunkowo łatwo pomylić obydwa pojęcia, tak jak uczynił to np. Max Born, kiedy pisał:

Zasadnicza różnica pomiędzy Einsteinem i mną kryje się w aksjomacie stwierdzającym, że zdarzenia, które mają miejsce w różnych punktach A i B są od siebie niezależne, w takim sensie, że obserwacja zdarzeń w B nie może nam powiedzieć niczego o tym, co się dzieje w A .²⁴

sity of Chicago Press. Analiza Heisenberga dotyczy pojedynczej cząstki, której funkcja falowa rozdziela się na dwie (transmitowaną i odbitą) paczki falowe.

²¹ A. Einstein, *O elektrodynamice ciał w ruchu*, [w:] *5 prac, które zmieniły oblicze fizyki*, P. Amsterdamski (tłum.), Warszawa 2005, WUW, s. 135.

²² Tamże.

²³ Zob. J. Bell, dz. cyt., wyd. I, s. 153.

²⁴ M. Born, dz. cyt., s. 176.

Bell podkreśla, że w tym przypadku nie można sobie wyobrazić większego nieporozumienia: Einstein nie wątpił w to, że odległe zdarzenia mogą być odpowiednio skorelowane (czyli że obserwacja jednego zdarzenia może dostarczyć informacji o innym zdarzeniu); tym, co budziło jego opór, była jedynie idea natychmiastowego oddziaływania przyczynowego pomiędzy tymi zdarzeniami.²⁵

Do historii nauki przeszły wieloletnie dyskusje Einsteina z przedstawicielami kopenhaskiej interpretacji mechaniki kwantowej, zwłaszcza zaś z Bohrem i Heisenbergiem. Początkowo Einstein próbował wykazać niespójność tej interpretacji, podając w wątpliwość słuszność zasady nieoznaczoności. Ulubioną metodą Einsteina były, jak zwykle, eksperymenty myślowe, w których wykazywał on, że — w odniesieniu do zasady nieoznaczoności — w pewnych okolicznościach możliwe jest jednoczesne i dokładne wyznaczenie położenia i pędu cząstki. Każdy z przykładów, które Einstein dobierał ze szczególną starannością, okazywał się jednakże chybiony; Bohr za każdym razem wychodził zwycięsko z dyskusji, dowodząc, że zasada nieoznaczoności w każdym przypadku pozostaje słuszna.²⁶ Po roku 1931 Einstein zmienił taktykę: zamiast dowodzić niespójności mechaniki kwantowej (wiele wskazuje na to, że pogodził się z tym, iż jest to teoria wewnętrznie niesprzeczna²⁷), stał się adwokatem wspomnianej już teorii zmiennych ukrytych, zgodnie z którą mechanika kwantowa jest teorią niezupełną.²⁸ Najbardziej znanym doświadczeniem myślowym, które miało wykazać niezupełność tej teorii, był eksperyment, który przeszedł do historii pod nazwą paradoksu EPR.

²⁵ Por. J. Bell, dz. cyt., wyd. I, s. 144.

²⁶ Dyskusja pomiędzy Einsteinem i Bohrem trwała kilka lat; w roku 1927, w czasie konferencji Solvay'a, naocznym świadkiem tej debaty był Heisenberg, który wspomina: „Dyskusje zwykle zaczynały się już wczesnym rankiem od tego, że Einstein przy śniadaniu przedstawiał nam nowy myślowy eksperyment... Naturalnie natychmiast zaczynaliśmy go analizować... Z reguły już wieczorem, w czasie wspólnej kolacji, Niels Bohr z powrotem wykazywał Einsteinowi, że również i ta najnowsza jego konstrukcja nie może zachwiać związkiem nieokreśloności. Einsteina ogarniał niepokój, ale następnego ranka przed śniadaniem miał gotowy jeszcze jeden myślowy eksperyment... bardziej złożony od poprzedniego, ale tym razem, jak sądził, niezbitnie demonstrujący całą bezpodstawność zasady nieoznaczoności. Wieczorem okazywało się, że i ta próba nie była szczęśliwsza od poprzednich”; D. Danin, *Rewolucja kwantowa*, Warszawa 1990, Wiedza Powszechna, s. 201.

²⁷ Może o tym świadczyć następująca wypowiedź Einsteina: „The entire mathematical formalism [of quantum mechanics] will probably have to be contained, in the form of logical inferences, in every useful future theory”; A. Einstein, *Reply to Criticisms*, [w:] *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, P. A. Schilpp (ed.), dz. cyt., s. 667.

²⁸ W niniejszym opracowaniu słowo „niezupełna” w odniesieniu do mechaniki kwantowej oznaczać będzie „niekompletna”, to znaczy taka, którą należy uzupełnić — np. za pomocą zmiennych ukrytych.

3. PARADOKS EPR

Doświadczenie Einsteina, Podolsky'ego i Rosena²⁹ dotyczy zachowania dwóch skorelowanych i oddzielonych przestrzenie cząstek S_1 i S_2 . Cząstki te na skutek wcześniejszego oddziaływania ze sobą pozostają w stanie „splątany” i charakteryzują się tym, że — zgodnie z interpretacją kopenhaską — pomiar położenia cząstki S_1 pozwala z dowolną dokładnością wnioskować o położeniu cząstki S_2 ; ta sama zasada dotyczy pędu cząstek. Kluczowe znaczenie dla całego argumentu ma wprowadzona we wstępie artykułu EPR definicja „elementu fizycznej rzeczywistości”. Brzmi ona następująco:

Jeśli, bez jakiegokolwiek zaburzenia układu można przewidzieć z pewnością (to jest z prawdopodobieństwem równym jedności) wartość fizycznej wielkości, wtedy istnieje element fizycznej rzeczywistości, odpowiadający tej fizycznej wielkości.³⁰

Aby określoną teorię fizyczną można było uznać za teorię zupełną, każdy element fizycznej rzeczywistości musi — zgodnie z argumentacją EPR — mieć swój odpowiednik w tej teorii. W jaki sposób można zidentyfikować „elementy rzeczywistości”? Okazuje się, że do tego celu można wykorzystać korelacje istniejące pomiędzy cząstkami będącymi w stanie splątany. Przez pomiar położenia S_1 obserwator może uzyskać informację na temat położenia S_2 . Jednakże warunek lokalności, ukryty w zacytowanej powyżej definicji, domaga się, by tego typu pomiar „w jakikolwiek sposób nie zaburzył” cząstki S_2 . A zatem, zgodnie z podanym kryterium, położenie S_2 jest elementem fizycznej rzeczywistości. Ta sama argumentacja zastosowana do pędu cząstki S_2 pozwala stwierdzić, że on też podpada pod tę samą kategorię (czyli jest elementem fizycznej rzeczywistości). Oznacza to, że zarówno położenie, jak i pęd tej samej cząstki są określone jednocześnie ze skończoną dokładnością. Tymczasem mechanika kwantowa w swym standardowym sformułowaniu przypisuje każdej z tych wielkości — na podstawie zasady Heisenberga — dowolnie wielką nieokreśloność, co prowadzi do wniosku, że teoria ta jest niezupełna.³¹

Einstein, Podolsky i Rosen rozważali również scenariusz nielokalny, w którym „fizyczna rzeczywistość [drugiego układu] zależy od procesu pomiaru, przeprowadzanego na pierwszym układzie”. Chociaż taka ewentualność nie została przez EPR wykluczona jako logicznie niemożliwa, to jednak nielokalna kauzalność, zakładana

²⁹ Zob. A. Einstein, P. Podolsky, N. Rosen, *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*, „Physical Review” 47 (1935), s. 777-780. Warto zaznaczyć, że w ciągu ostatnich 20 lat artykuł ten był najczęściej cytowaną publikacją Einsteina; zob. S. Redner, *Citation Statistic from 100 Years of Physical Review*, „Physics Today” 56/8 (2005), s. 49-54.

³⁰ A. Einstein, P. Podolsky, N. Rosen, art. cyt., s. 777.

³¹ Por. V. Singh, *Hidden variables, Non Contextuality and Einstein-Locality in Quantum Mechanics*, arXiv:quant-ph/0507182v2, 25 VII 2005, s. 21-23.

w tego typu scenariuszu, wydawała się warunkiem trudnym do przyjęcia: „Żadna rozsądna definicja rzeczywistości nie może na to zezwalać”.³²

Panuje powszechne przekonanie, że argument EPR nie miał — w zamyśle autorów — dowodzić nielokalności mechaniki kwantowej, ale jej niezupełności. Powyższa analiza pokazuje, że nielokalność pojawia się jedynie na marginesie argumentu EPR i nie jest brana pod uwagę przez jego autorów jako poważna ewentualność. Tymczasem John Bell, autor bodaj najślynniejszego twierdzenia dotyczącego interpretacji mechaniki kwantowej, stwierdza coś wręcz przeciwnego: „Einstein, Podolsky i Rosen w 1935 roku wskazali na fakt, że zwyczajna mechanika kwantowa nie jest lokalnie kauzalna”.³³ Podobne wnioski można spotkać w innych opracowaniach.³⁴ Żeby zrozumieć, dlaczego Bell i inni dopatrują się w artykule EPR argumentu za nielokalnością mechaniki kwantowej, wystarczy nieznacznie przeformułować sam argument, jak czyni to np. Travis Norsen.³⁵

Analiza tego autora przedstawia się następująco: jedną z przesłanek rozumowania EPR jest założenie lokalności (lokalna kauzalność), zgodnie z którym, jeśli dwa układy są dostatecznie oddalone, to pomiar dokonywany na jednym układzie nie może „w żaden sposób zaburzyć”, ani w inny sposób wpłynąć, na stan drugiego układu. Drugą przesłanką jest poprawność kwantowo-mechanicznego opisu korelacji cząstek splątanych. Zmieniając kolejność przesłanek, argumentację EPR można przedstawić w następujący sposób: jeżeli

(A) predykcje mechaniki kwantowej są poprawne

i jeśli

(B) zachowane ma być kryterium lokalności

to wówczas wniosek stwierdzający, że

(C) mechanika kwantowa jest teorią zupełną

nie może być słuszny. Opuszczając przesłankę (A), która jest oczywista (ponieważ jest dobrze potwierdzona eksperymentalnie), argument EPR można zapisać w postaci implikacji:

$$(B) \rightarrow \sim (C)$$

która oznacza, że lokalność pociąga za sobą niezupełność (teorii). Powyższe zdanie jest jednakże równoważne zdaniu:

³² A. Einstein, P. Podolsky, N. Rosen, art. cyt., s. 780.

³³ J.S. Bell, dz. cyt., wyd. II (2004), s. 24.

³⁴ Por. np.: „EPR demonstrated, however, that the issue is not the disturbance, but the non-separability (entanglement) of the quantum system over in principle unlimited spatial distances”; C. Kiefer, *On the interpretation of quantum theory — from Copenhagen to the present day*; arXiv:quant-ph/0210152v1, 22 X 2002, s. 2.

³⁵ Zob. T. Norsen, *EPR and Bell Locality*, arXiv:quant-ph/0408105v3, 31 I 2005.

$$(C) \rightarrow \sim (B)$$

zgodnie z którym zupełność implikuje nielokalność, oraz zdaniu:

$$\sim (B) \text{ lub } \sim (C)$$

zgodnie z którym zupełność i lokalność nie mogą być zarazem prawdziwe. To ostatnie sformułowanie argumentu EPR pokrywa się z wnioskiem, sformułowanym przez Einsteina w jednej z późniejszych jego publikacji:

Staje się oczywiste, że paradoks [EPR] zmusza nas do zarzucenia jednego z następujących dwóch stwierżeń: (1) opis za pomocą funkcji ψ jest zupełny; (2) rzeczywiste stany przestrzenie oddzielonych obiektów są od siebie niezależne.³⁶

W świetle powyższej analizy widać wyraźnie, że wniosek Bella jest całkowicie poprawny: argument EPR okazuje się w rzeczywistości argumentem za nielokalnością mechaniki kwantowej w jej standardowym sformułowaniu. Oczywiście, taka interpretacja nie była zamierzona przez Einsteina, Podolsky'ego i Rosena, jednakże przyjmowane w punkcie wyjścia założenie o zupełności mechaniki kwantowej faktycznie prowadzi do wniosku o nielokalności tej teorii.

Czy rzeczywiście? W tym samym, 1935 roku, słynną odpowiedź na argument EPR sformułował Niels Bohr.³⁷ Przez długi czas uważano, że odpowiedź Bohra przeważała szalę sporu na korzyść interpretacji kopenhaskiej; co więcej, argumentację zawartą w odpowiedzi ukazywano jako szczyt ścisłości, przy którym argument EPR „rozpada się na kawałki”.³⁸ W rzeczywistości było inaczej: „odpowiedź Bohra stanowiła grzęzawisko i nawet jego [Bohra] zwolennicy mieli trudności w wyłowieniu z niej jasnego przesłania”.³⁹ Faktycznie, nawet we współczesnych opracowaniach trudno znaleźć jednoznaczną interpretację odpowiedzi Bohra. Podkreśla się, że znaczna część jego artykułu jest nie na temat: Bohr nie odnosi się do przypadku analizowanego przez EPR, ale po raz kolejny dowodzi spójności mechaniki kwantowej (choć argument EPR wcale tej spójności nie podważa) i broni zasad nieoznaczoności i komplementarności. Z rzeczy istotnych, Bohr wskazuje na „zasadniczą niejasność” w sformułowaniu przez EPR kryterium fizycznej rzeczywistości,

³⁶ A. Einstein, *Reply to Criticisms*, dz. cyt., s. 681.

³⁷ Zob. N. Bohr, *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*, „Physical Review” 48 (1935), s. 696-702.

³⁸ „Problem Einsteina został [w artykule Bohra] przedstawiony w nowym kontekście, a jego rozwiązanie przeformułowane z taką precyzją, że widoczna stała się słabość rozumowania [krytyków interpretacji kopenhaskiej], cały zaś ich argument, pozornie doskonały, rozpadł się na kawałki”; L. Rosenfeld, *Niels Bohr in the thirties*, [w:] *Niels Bohr: His life and times as seen by friends and colleagues*, S. Rozental (ed.), Amsterdam 1964, North Holland, s. 114-136.

³⁹ H. M. Wiseman, art. cyt., s. 7. Autor przytacza wymowną ciekawostkę: kiedy odpowiedź Bohra została przedrukowana w roku 1983 w kompendium J. A. Wheelera i W. H. Zurka (*Quantum Theory and Measurement*, Princeton, New Jersey), nikt przed publikacją nie zauważył, że strony tekstu Bohra zostały wydrukowane w zmienionej kolejności.

podważając tym samym centralne dla argumentu pojęcie lokalności.⁴⁰ W artykule Bohra pojawia się również nowe sformułowanie samego paradoksu, w którym po raz kolejny wyartykułowana zostaje zasada nielokalnej kauzalności:

W doświadczeniu [EPR] pojedynczy pomiar położenia lub pędu jednej z cząstek powoduje automatycznie określenie odpowiednio położenia lub pędu drugiej cząstki z żądaną dokładnością (...) [nawet jeśli] nie ma mowy o mechanicznym zaburzeniu układu.⁴¹

Artykuł Bohra nie zakończył dyskusji nad interpretacją formalizmu mechaniki kwantowej i — w szczególności — nad problemem postawionym przez Einsteina, Podolsky'ego i Rosena. Dyskusja trwała nadal, a do ataku na kopenhaską interpretację mechaniki kwantowej tym razem przystąpił Erwin Schrödinger.⁴²

4. KONTROWERSJE WOKÓŁ POJĘCIA NIELOKALNOŚCI PRZED ROKIEM 1964

W odróżnieniu od Einsteina, który podważał zupełność interpretacji kopenhaskiej, Schrödinger wątpił w jej poprawność, a jego szczególny opór budził proponowany przez Bohra i Heisenberga opis przestrzennie oddzielonych układów.⁴³ Schrödinger przyczynił się znacząco do rozwoju dyskusji nad nielokalnością zawartą w kopenhaskiej interpretacji fenomenu EPR: wprowadził pojęcie stanów splątanych (*entangled*), na oznaczenie zaś fenomenu polegającego na natychmiastowej „komunikacji” pomiędzy odległymi układami ukuł termin „sterowanie” (*steering, driving*). Zwrócił również uwagę na zasadniczy dla poprawnej interpretacji mechaniki kwantowej problem pomiaru (paradoks z kotem w roli głównej) i wskazywał na fakt, że proponowany przez interpretację kopenhaską podział świata na część klasyczną i kwantową jest arbitralny i wysoce niesatysfakcjonujący.⁴⁴

Jak to już było powiedziane, jednym z głównych postulatów przeciwników standardowej interpretacji mechaniki kwantowej było uzupełnienie formalizmu tej teorii o dodatkowe parametry (zmienne ukryte), które uczyniłyby z mechaniki kwantowej teorię w pełni deterministyczną i zarazem rozwiązałyby problemy z nielokalnością i pomiarem. W międzyczasie, to znaczy w roku 1932, w sukurs Bohrowi i jego zwolennikom nieoczekiwanie przyszedł John von Neumann. Opublikował on twierdzenie, które miało wykazać niemożność uzupełnienia formalizmu mechaniki kwantowej o zmienne

⁴⁰ Por. J. Bell, dz. cyt., wyd. I, s. 155-156. Autor przyznaje, że sformułowania Bohra i jego argumenty są dla niego „całkowicie niezrozumiałe”.

⁴¹ N. Bohr, *Can quantum-mechanical description...*, art. cyt.

⁴² Zob. E. Schrödinger, *The present situation in quantum mechanics*, „*Neturwissenschaften*”, 23 (1935), s. 823-881; tenże, *Discussion of Probability Relations Between Separated Systems*, „*Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*”, 31 (1935), s. 553-563.

⁴³ E. Schrödinger, *Probability Relations Between Separated Systems*, „*Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*”, 32 (1936), s. 446-452.

⁴⁴ Por. H. M. Wiseman, art. cyt., s. 8.

ukryte.⁴⁵ Dowód tego twierdzenia, chociaż poprawny pod względem formalnym, oparty był na nieuzasadnionych założeniach, dotyczących natury zmiennych ukrytych, co dyskwalifikowało dowód jako taki. I chociaż kilku autorów w latach 30. XX w. dostrzegło tę zasadniczą ułomność rozumowania von Neumanna, to dopiero gruntowna krytyka przeprowadzona przez Bella w 1966 roku pozwoliła obiektywnie ocenić wartość samego dowodu i wskazać jego błędy. Aż do tego roku wspomniany dowód, wsparty ogromnym autorytetem von Neumanna jako matematyka, skutecznie blokował proces poszukiwania nowych teorii zmiennych ukrytych.⁴⁶

Po II wojnie światowej stanowisko w sporze o kwantową nieoznaczoność jeszcze raz zabrał Albert Einstein. Problem nielokalnych oddziaływań, które wydają się sprzeczne z postulatami szczególnej teorii względności, najwyraźniej nie dawał Einsteinowi spokoju. W roku 1946 napisał on naukową autobiografię, w której nie zabrakło dywagacji na temat nielokalnych oddziaływań w mechanice kwantowej.⁴⁷ W publikacji tej twórca teorii względności nadal jawi się jako zwolennik teorii zmiennych ukrytych; zaznacza jednakże uczciwie, iż zmienne ukryte nie stanowią jedyne­go możliwego rozwiązania problemu niezupełności mechaniki kwantowej; alternatywnym wyjściem jest przyjęcie oddziaływania o charakterze nielokalnym:

Można uciec od tego wniosku [że statystyczna teoria kwantowa⁴⁸ jest niezupełna] zakładając, że pomiar S_1 (telepatycznie) zmienia rzeczywistą sytuację S_2 , albo zaprzeczając niezależnym rzeczywistym sytuacjom jako takim w stosunku do obiektów które są przestrzennie oddzielone od siebie. Obydwie możliwości wydają się mi w równym stopniu nie do zaakceptowania.⁴⁹

Jak widać, w argumentacji Einsteina pojawia się nowa przesłanka, której nie było w poprzednich analizach, w szczególności zaś — w artykule EPR z roku 1935: niezależne i realne istnienie odległych obiektów. Einstein stawia ją obok dwóch innych założeń — lokalności oraz zupełności statystycznej mechaniki kwantowej, stwierdzając, że jedna z tych trzech przesłanek musi być błędna.⁵⁰ Powyższy wnio-

⁴⁵ Zob. J. von Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, Princeton 1955; pierwsze wydanie tej książki (w języku niemieckim) miało miejsce w roku 1932 (Springer, Berlin).

⁴⁶ Na ten temat, por. V. Singh, art. cyt., s. 7-12.

⁴⁷ A. Einstein, *Autobiographical Notes*, [w:] *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, P. A. Schilpp (ed.), dz. cyt., s. 1-94.

⁴⁸ Przez „statystyczną teorię kwantową” Einstein rozumiał taką wersję mechaniki kwantowej, w której funkcji falowej nie nadaje się żadnej interpretacji i poprzestaje się na opisie prawdopodobieństw określonych zdarzeń.

⁴⁹ Tamże, s. 85.

⁵⁰ Wiseman proponuje, by przeformułowaną w powyższy sposób wypowiedź nazwać „twierdzeniem Einsteina o realizmie-lokalności-zupełności”; zob. H. M. Wiseman, art. cyt., s. 9-10. Autor sugeruje, że Einstein interpretował statystyczną mechanikę kwantową w sposób skrajnie subiektywistyczny, zakładając jedynie istnienie pojedynczego obserwatora A (i zaprzeczając realnemu istnieniu odległego obserwatora B). W takiej interpretacji funkcja ψ wyraża jedynie stan wiedzy obserwatora A o świecie kwantowym; w szczególności zaś stan jego wiedzy o obserwatorze B .

sek stanowi intuicyjne sformułowanie tego, co precyzyjne zostanie później ujęte w Twierdzeniu Bella.

Powyżej zostało powiedziane, że tzw. dowód von Neumanna skutecznie zahamował (aż do połowy lat 60. XX w.) jakiegokolwiek poszukiwania teorii zmiennych ukrytych. Jeśli chodzi o ścisłość, to istnieje przynajmniej jedna teoria, która podważa powyższy wniosek: w roku 1952 David Bohm opublikował swoją własną interpretację mechaniki kwantowej, opartą na koncepcji zmiennych ukrytych.⁵¹ Co prawda, większość fizyków uznała, że teoria ta musi być błędna (ponieważ jest sprzeczna z dowodem von Neumanna, mającym podówczas status naukowego dogmatu); koncepcję Bohma warto jednakże przypomnieć ze względu na jej nielokalny charakter. Koncepcja ta nie stanowiła oryginalnej, nowej teorii zmiennych ukrytych; Bohm jedynie na nowo odkrył i rozwinął zarzucone przez de Broglie'a pojęcie fali pilotującej, utożsamiając ją z funkcją falową w przestrzeni konfiguracyjnej. Rozwiązanie to oznacza, że układ opisywany w taki sposób będzie się zachowywał w sposób nielokalny.⁵² Niewykluczone, że to właśnie nielokalność ukryta w teorii Bohma sprawiła, że również sam Einstein — gorący zwolennik zasady lokalnej kausalności — odniósł się krytycznie do tej koncepcji.⁵³

Istotny wkład Bohma w dyskusję na temat kwantowej nielokalności polega na zaproponowaniu uproszczonej wersji doświadczenia EPR: zamiast dwóch cząstek, skorelowanych co do położenia i pędu, scenariusz EPR-Bohm przewidywał dwie cząstki o skorelowanych spinach. Jak niebawem się okazało, zasadniczą zaletą tej innowacji było to, że umożliwiła ona eksperymentalne badanie korelacji mających miejsce w doświadczeniach EPR. Obecnie wiadomo, że wyniki tych doświadczeń potwierdzają wnioski, które Bohm mógł uzasadniać jedynie teoretycznie:

Zdarzenia oddzielone przestrzennie, które nie mogą być powiązane oddziaływaniami, są skorelowane w sposób niemożliwy do szczegółowego przyczynowego wyjaśnienia za pomocą przesyłania sygnałów z prędkością mniejszą od prędkości światła.⁵⁴

Bohm podkreśla, że tego typu nielocalne oddziaływania powodują bezpośredni konflikt z teorią względności Einsteina, dlatego ich wyjaśnienie będzie wymagać teorii opartej na „radikalnie nowym pojęciu porządku, miary i struktury”.⁵⁵ W szczególności, nowa teoria powinna zarzucić arbitralny i nieuzasadniony podział na ‘in-

⁵¹ Zob. D. Bohm, *A suggested interpretation of the quantum theory in terms of 'hidden' variables*, „Physical Review”, 85 (1952), s. 166-193.

⁵² Na temat koncepcji Bohma–de Broglie'a i jej nielocalnego charakteru, por. np. J. Bell, dz. cyt., wyd. I, s. 111-115; 127-132. „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”; tamże, s. 132.

⁵³ Por. H. M. Wiseman, art. cyt., s. 8. Na ten temat por. również: A. Whitaker, *Einstein, Bohr and the Quantum Dilemma*, Cambridge 1996, Cambridge University Press.

⁵⁴ D. Bohm, *Ukryty porządek*, Warszawa 1988, Wydawnictwo Pusty Obłok, s. 143.

⁵⁵ Tamże, s. 152.

strument obserwacyjny’ i ‘obiekt obserwowany’ i traktować rzeczywistość fizyczną jako jedną, niepodzielną całość.

* * *

Twierdzenie Bella z roku 1964 otwiera ostatni — i zarazem całkowicie inny od poprzednich — rozdział w historii kwantowej nielokalności. Całkowicie inny od poprzednich — ponieważ nielokalność, będąca zasadniczym przedmiotem dotychczasowej kontrowersji, w tym rozdziale zaczyna mieć zupełnie odmienny status: nie jest już hipotezą, stawianą na równi z innymi, mniej lub bardziej prawdopodobnymi, możliwościami, ale staje się potwierdzonym empirycznie faktem, z którym musi się liczyć każda inna teoria naukowa. Owszem, w rozdziale tym miejsce poprzedniej kontrowersji zajmują inne, ale tym razem kontrowersje mają już zupełnie inny charakter: dyskusja toczy się nie na temat tego, czy nielokalność jest przypisana do fizycznej rzeczywistości, ale — jak należy interpretować to, że *jest* przypisana. Ogromna liczba publikacji na temat samego twierdzenia Bella oraz jego naukowych i filozoficznych konsekwencji wymownie świadczy o tym, że — z jednej strony — zagadnienie to nie posiada prostej i jednoznacznej interpretacji⁵⁶, z drugiej zaś — że ma ono zasadnicze znaczenie zarówno dla współczesnej nauki, jak i dla filozofii.

W niniejszym artykule z konieczności przedstawione zostały krótko jedynie najbardziej istotne epizody, dotyczące ewolucji pojęcia nielokalności; dokładne omówienie wszystkich autorów, którzy przyczynili się do rozwoju tego pojęcia, i szczegółowe przeanalizowanie ich dzieł, nie jest możliwe w tego typu opracowaniu. Z tego samego powodu pominięto wiele interesujących zagadnień, które bezpośrednio łączą się z pojęciem nielokalności — np. problem determinizmu i realizmu.

Przeprowadzone analizy nie wyczerpują problemu nielokalności, ukrytej w pracach mechaniki kwantowej, ale z pewnością pokazują złożoność całego zagadnienia. Swoją głęboką wymowę posiada fakt, że po kilkudziesięciu latach intensywnych poszukiwań i zażartych sporów kilku pokoleń naukowców udało się ustalić jedynie tyle, że „upiorne oddziaływanie na odległość” rzeczywiście ma miejsce; nadal jednakże nie wiadomo ani jaki jest mechanizm, który powoduje tego typu oddziaływanie, ani jaki jest zakres jego obowiązywania. Jeśli świat makroskopowy stosuje się do reguł mechaniki kwantowej (a należy zakładać, że przynajmniej w pewnym zakresie tak się dzieje, ponieważ na najbardziej podstawowym poziomie świat ten zbudowany jest z obiektów kwantowych), to znaczy, że kwantowa nielokalność powinna się przejawiać również na poziomie makroskopowym. Jak na razie nie wiadomo jed-

⁵⁶ Wypada zaznaczyć, że niektórzy fizycy interpretują twierdzenie Bella nie jako argument za tym, że nielokalność jest podstawową i nieodłączną właściwością całego świata przyrody, ale jedynie jako dowód tego, że nie można sformułować lokalnej teorii zmiennych ukrytych, która mogłaby zastąpić mechanikę kwantową w jej standardowym sformułowaniu. Krytykę tego ostatniego poglądu przeprowadza T. Norsen w artykule: *Bell Locality and the Nonlocal Character of Nature*, „Foundations of Physics Letters”, 19/7 (2006), s. 633-655.

nakże, w jaki sposób pogodzić tę niezwykłą własność świata kwantowego z postulatami mechaniki klasycznej oraz teorii względności — które to teorie określają podstawowe reguły funkcjonowania fizycznej rzeczywistości na tym poziomie. Wydaje się, że potrzebna jest całkowicie nowa teoria, zbudowana w oparciu o pojęcia zupełnie odmienne od przyjmowanych dotychczas zdroworozsądkowych koncepcji; teoria, która będzie stanowić swego rodzaju hybrydę nielokalnej mechaniki kwantowej i teorii Einsteina. Być może, kryterium to zostanie spełnione przez poszukiwaną od lat kwantową teorię grawitacji. Należy mieć nadzieję, że ta nowa teoria będzie posiadać naturalną, a może nawet oczywistą interpretację, która — w przeciwieństwie do obecnej interpretacji mechaniki kwantowej — nie stanie się przedmiotem ciągnących się przez kilka pokoleń naukowo-filozoficznych sporów.