

Tadeusz PABJAN

Centrum Kopernika Badań Interdyscyplinarnych
Kraków

DAVIDA BOHMA TEORIA ZMIENNYCH UKRYTYCH

W niektórych publikacjach, dotyczących twierdzenia Bella, można spotkać się z opinią, że twierdzenie to pozwala w sposób ostateczny rozstrzygnąć spór pomiędzy standardowym sformułowaniem mechaniki kwantowej i teorią zmiennych ukrytych. Łamanie nierówności Bella potwierdza — zgodnie z tym poglądem — poprawność standardowej mechaniki kwantowej i dyskwalifikuje każdą teorię, która postuluje uzupełnienie tej teorii o zmienne ukryte. Taka interpretacja twierdzenia Bella nie jest jednakże ścisła: łamanie nierówności Bella dowodzi jedynie, że niepoprawne są lokalne teorie zmiennych ukrytych; wynik ten nie falsyfikuje jednakże teorii nielokalnych. Przykładem tego typu teorii jest mechanika kwantowa w interpretacji Davida Bohma. Fizyk ten przez wiele lat rozwijał i uzupełniał swoją oryginalną teorię z roku 1952, chociaż zasadnicze elementy jego interpretacji nigdy nie uległy istotnej zmianie. W niniejszym artykule przedstawiona zostanie ogólna charakterystyka tej koncepcji i sformułowane zostaną argumenty za tym, że teoria ta stanowi poważną i atrakcyjną alternatywę dla standardowego sformułowania mechaniki kwantowej.

1. KULISY SFORMUŁOWANIA TEORII

Dosyć często zdarza się, że światopogląd naukowca lub wyznawana przez niego filozofia w istotny sposób wpływają na ostateczny kształt teorii naukowej, nad którą pracuje. Prawdopodobnie tę potwierdza historia Davida Bohma (1917–1992). Gdy po II wojnie światowej rozpoczął swoją karierę naukową, był przekonany marksistą i jak każdy wyznawca tego typu filozofii, głęboko wierzył, że świat przyrody jest deterministyczny¹. Nic dziwnego, że standardowe sformułowanie mechaniki kwantowej, w którym indeterminizm jest podstawową i nieusuwalną własnością fizycznej rzeczywistości, wydawało się mu rozwiązaniem niesatysfakcjonującym. Sukcesy mechaniki kwantowej stanowiły jednakże istotny argument za tym, że teoria ta jest poprawna. Próbując przekonać siebie samego do tego, że jest to teoria „filozoficznie akceptowalna”², Bohm w roku 1951 opublikował podręcznik do mechaniki kwantowej³, podkreślając w nim szczególnie problem interpretacji tej teorii. Podręcznik został bardzo dobrze oceniony przez środowisko naukowe. Wiele wskazywało na to, że próba przekonania samego siebie zakończyła się sukcesem. Okazało się jednakże, iż książkę Bohma i jego zainteresowanie problemem interpretacji mechaniki kwantowej zauważył również Einstein, który postanowił podzielić się z Bohmem własnymi wątpliwościami co do zupełności tej teorii. Po spotkaniu z Einsteinem Bohm na nowo nabrał przekonania, że standardowe sformułowanie mechaniki kwantowej nie jest słuszne⁴, i rozpoczął poszukiwania nowej interpretacji teorii kwantów, która umożliwiłaby realistyczny opis zjawisk kwantowych.

¹Por. M. Gell-Mann, *Kwark i jaguar*, Wydawnictwo CIS, Warszawa 1996, s. 235.

²Tamże.

³D. Bohm, *Quantum Theory*, Prentice Hall, New York 1951.

⁴Einstein był pod wrażeniem książki Bohma; po jej przeczytaniu sam zaproponował spotkanie jej autorowi. Kilka dni później przebieg spotkania Bohm w następujący sposób zrelacjonował Gell-Mannowi: „Przekonał mnie. Jestem znów w tym samym miejscu, co przed napisaniem książki”; M. Gell-Mann, dz. cyt., s. 235.

Owoce tych poszukiwań stał się artykuł z roku 1952⁵, w którym Bohm — wbrew twierdzeniu von Neumanna, głoszącemu, że formalizmu mechaniki kwantowej nie można uzupełnić o ukryte parametry — przedstawił własną teorię zmiennych ukrytych, w której występują oddziaływania nielokalne. Teoria ta nie była oryginalnym pomysłem Bohma, ale opracowaną na nowo koncepcją Luisa de Broglie'a⁶ (z tej racji nazywa się ją również teorią de Broglie'a-Bohma), który przejął się nią interesować po tym, jak w roku 1927 spotkała się ona z ostrą krytyką obozu kopenhaskiego⁷. Chociaż z eksperymentalnego punktu widzenia teoria Bohma była równoważna standardowemu sformułowaniu mechaniki kwantowej, została ona zignorowana przez świat naukowy. Sytuacja ta nie zmieniła się nawet wtedy, gdy w roku 1966 John Bell wykazał, że twierdzenie von Neumanna, chociaż poprawne pod względem formalnym, oparte jest na nieuzasadnionych fizycznie założeniach, dotyczących ukrytych parametrów — co oznaczało, że nie jest słuszny jeden z podstawowych argumentów, formułowanych przeciwko teorii zmiennych ukrytych.

W roku 1964 pojawiło się twierdzenie Bella, a kilkanaście lat później przeprowadzono pierwsze doświadczenia typu EPR, potwierdzające łamanie nierówności Bella. Co istotne, w eksperymentach wykorzystano oryginalny pomysł Bohma, by w przypadku cząstek, pozostających w stanie splątanych, badać korelacje ich spinów, a nie położenia i pędów. Wyniki, otrzymane przez grupę Aspecta, falsyfikowały jedynie lokalne teorie zmiennych ukrytych, a zatem nielokalna teoria Bohma nie została w tym przypadku przekreślona; co więcej, nielokalność tej interpretacji stała się — w świetle twierdzenia Bella —

⁵D. Bohm, „A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of 'Hidden' Variables”, *Physical Review* 85 (1952), s. 166–193.

⁶L. de Broglie, *Tentative d'interprétation causale et non-linéaire de la mécanique ondulatoire*, Gauthier-Villars, Paris 1956.

⁷John Bell wypowiada na ten temat następującą uwagę: „De Broglie przedstawił taką teorię w 1927 roku, ale został wyśmiany. Wydaje mi się to dość haniebne, bo nikt nie obalił jego argumentów, po prostu go zakrzyczeli”; *Duch w atomie*, P.C.W. Davies, J.R. Brown (red.), Wydawnictwo CIS, Warszawa 1996, s. 75.

istotnym argumentem przemawiającym na jej korzyść. Nie zmieniło to jednak prawie wcale nastawienia fizyków do interpretacji Bohma.

Przez kilka ostatnich lat swego życia Bohm współpracował z Basilem Hiley'em, a ich wspólne poszukiwania alternatywnej interpretacji mechaniki kwantowej zaowocowały wydaną już po śmierci Bohma książką *The Undivided Universe: An Ontological Interpretation of Quantum Theory*⁸. Mechanika kwantowa w tej interpretacji jest teorią nielokalną, deterministyczną i realistyczną, a jej zasadniczym elementem jest „potencjał kwantowy”.

2. KWANTOWY POTENCJAŁ I JEGO WŁASNOŚCI

Jednym z bardziej kontrowersyjnych aspektów kopenhaskiej interpretacji mechaniki kwantowej jest to, że interpretacja ta odrzuca koncepcję wyjaśniania świata przyrody. Pojęcie naukowego wyjaśniania jest pojęciem wieloznacznym i mało precyzyjnym. Niezależnie jednak od przyjmowanej koncepcji wyjaśniania można się zgodzić z tym, że wyjaśnianie nie jest jedynie prostym opisem danego zjawiska, ale sprowadza się do zidentyfikowania procesów, które za tym zjawiskiem się kryją. Jeśli chodzi o przedstawicieli szkoły kopenhaskiej, to głosili oni, że w świecie kwantowym tego typu identyfikacja nie jest możliwa. Według Bohra, matematyczny formalizm mechaniki kwantowej ma służyć jedynie jako narzędzie, umożliwiające opis zjawisk świata kwantowego, które nie dają żadnych podstaw do dywagacji na temat tego, co się za tymi zjawiskami kryje. Tego typu podejście jest konsekwencją założenia, zgodnie z którym rzeczywistość sama w sobie nie tylko jest niepoznawalna, ale wręcz jest całkowicie nieokreślona. Podstawowy zarzut, jaki Bohm kierował pod adresem kopenhaskiej interpretacji, dotyczył właśnie tego zagadnienia. Zdaniem Bohma, interpretacja ta w rzeczywistości „niczego nie wyjaśnia, a tylko dostarcza wzorów, pozwalających przewidzieć pewne wyniki. Ja — deklarował

⁸D. Bohm, B. Hiley, *The Undivided Universe: An Ontological Interpretation of Quantum Theory*, Routledge, London 1993.

Bohm — próbuję podać wyjaśnienie”⁹. Wydaje się, że Bohm rozumie wyjaśnienie w zasugerowany powyżej sposób: jako coś, co różni się zasadniczo od samego opisu określonego zjawiska¹⁰. Co istotne, wyjaśnienie nie oznacza tu jedynie prostej zgodności z klasyczną intuicją, ponieważ rozwiązanie zaproponowane przez Bohma zakłada obecność nielokalnych korelacji pomiędzy obiektami kwantowymi.

„Wyjaśnienie” Bohma przedstawia się następująco: z każdą cząstką kwantową, opisywaną równaniem Schrödingera, cały czas pozostaje stowarzyszona fala pilotująca, która nie jest jedynie — jak było w przypadku funkcji falowej w interpretacji Bohra — obiektem czysto matematycznym, ale polem fizycznym, istniejącym tak samo realnie, jak cząstka, z którą fala jest stowarzyszona¹¹. Fala pilotująca jest wypadkową klasycznych potencjałów cząstki i tak zwanego potencjału kwantowego, a jej podstawowe zadanie polega na tym, że decyduje ona o ruchu cząstki — „popycha” ją do tych obszarów przestrzeni, w których prawdopodobieństwo znalezienia cząstki, określone przez kwadrat modułu funkcji falowej, jest największe.

Interpretacja Bohma jest realistyczna, ponieważ w teorii tej cząstka kwantowa posiada cały czas — to znaczy również przed momentem pomiaru — dokładnie określone położenie i prędkość, co pozwala mówić już nie o gęstości prawdopodobieństwa położenia cząstki, ale o trajektorii jej ruchu. Co prawda, zasada nieoznaczoności uniemoż-

⁹D. Bohm, *Duch w atomie*; dz. cyt., s. 151. „Mechanika kwantowa powiada [...], że natura jest niepoznawalna, że można tylko rozwiązywać równania, wykonywać pomiary i porównywać wyniki”; tamże, s. 155.

¹⁰Bohm zapytany o to, czy doświadczenie z dwoma szczelinami można *wyjaśnić* jako skutek interferencji pomiędzy falami, odpowiedział: „To nie jest wyjaśnienie, a tylko opis. Gdyby powiedział pan, że w tym doświadczeniu mamy do czynienia z falą, wówczas byłoby to jakieś wyjaśnienie. Ponieważ jednak elektrony nadlatują jako cząstki, to nie jest to żadne wyjaśnienie. To tylko metaforyczny sposób mówienia”; tamże, s. 151.

¹¹“We have effectively been led to the to regard the wave function of an individual electron as a mathematical representation of an objectively real field. This field exerts a force on the particle in a way that is analogous to, but not identical with, the way in which an electromagnetic field exerts a force on a charge, and a meson field exerts a force on a nucleon”; D. Bohm, “A Suggested Interpretation...”, art. cyt., s. 170.

liwia dokonanie precyzyjnego pomiaru tych wielkości, ale niemożliwość ta nie wynika już z wewnętrznej, fundamentalnej nieokreśloności układu przed momentem pomiaru, ale bierze się stąd, iż pomiar prowadzi zawsze do zaburzenia fali pilotującej, przez co to informacja o tych wielkościach ulega nieodwracalnemu zniszczeniu¹². W koncepcji Bohma rolę obserwabli odgrywa trajektoria cząstki, chociaż pojęcie to jest tu rozumiane inaczej, niż w mechanice klasycznej, w której do wyznaczenia trajektorii obiektu konieczna jest znajomość położenia i prędkości. W mechanice Bohma trajektoria jest definiowana jedynie poprzez położenie cząstki, ponieważ jej prędkość nie jest niezależną zmienną, ale jest określona przez fazę funkcji falowej w równaniu Schrödingera. To właśnie z tego względu położenie cząstki jest w tej interpretacji traktowane jako „ukryty” parametr układu.

Możliwość dokładnego wytyczenia trajektorii cząstki umożliwia zatem całkowicie deterministyczny opis układu kwantowego: „Podobnie jak pole elektromagnetyczne spełnia równania Maxwella, tak samo pole [fali pilotującej] spełnia równanie Schrödingera. W obydwu przypadkach całkowite określenie pól w danej chwili dla wszystkich punktów przestrzeni, determinuje wartość tych pól dla wszystkich innych chwil. W obydwu przypadkach, jeśli znamy funkcje pola, możemy obliczyć siłę, działającą na cząstkę, a jeśli dodatkowo znamy początkową pozycję i pęd cząstki, możemy wyliczyć jej całą trajektorię”¹³. Determinizm tego rozwiązania¹⁴ odpowiada za to, że mechanika Bohma nazywana jest również kauzalną interpretacją mechaniki kwantowej.

¹²“Particles always had a distinct position and velocity, but any effort to measure these properties percisely would destroy infromation about them by physically altering the pilot wave”; J. Horgan, “The Last Words of a Quantum Heretic”, *New Scientist*, 27 II 1993, s. 38.

¹³D. Bohm, “A Suggested Interpretation...”, art. cyt. s. 170.

¹⁴Bohm i Hiley uważają jednakże, że wszechświat nie jest całkowicie deterministyczny: “So ultimately our overall world view is neither absolutely deterministic nor absolutely indeterministic. Rather it implies that these two extremes are abstractions which constitute different views or aspects of the overall set of appearances. Which view is appropriate in a given case will depend both on the unknown totality and on our particular mode of contact with it”; D. Bohm, B.J. Hiley, *The Undivided Universe*, Routledge, London 1993, s. 324.

Najważniejszym elementem mechaniki Bohma, odpowiedzialnym za nieklasyczne (np. nielokalne) zachowanie cząstki, jest potencjał kwantowy. Wielkość ta występuje w jednym z równań mechaniki Bohma, ma wymiar energii i wyraża działanie fali pilotującej na stowarzyszoną z nią cząstkę¹⁵. Co istotne, wpływ potencjału na cząstkę nie zależy od jego wielkości, ale jedynie od postaci. Oznacza to, że potencjał kwantowy nie maleje — jak to ma miejsce w przypadku klasycznego potencjału — wraz ze wzrostem odległości, a zatem może wpływać na trajektorię cząstki niezależnie od tego, jak daleko znajduje się ona od miejsca, w którym określone czynniki powodują zmianę potencjału. Charakterystyczną własnością potencjału kwantowego jest to, że zależy on od całościowej (holistycznej) struktury układu, w którym porusza się cząstka: zawiera on informacje o ewentualnych obserwatorach, aparaturze pomiarowej, przeszkodach, które może napotkać na swojej drodze cząstka i wszystkich innych obiektach, które tworzą dany układ kwantowy. Obszar przestrzeni, o którym informacja zawarta jest w kwantowym potencjale cząstki, w zasadzie jest obszarem nieograniczonym. Ta własność kwantowego potencjału uzasadnia nielokalny charakter tej wielkości i sprawia, że obiekty kwantowe w interpretacji Bohma w rzeczywistości są nieseparowalne: każda cząstka porusza się w sposób zależny od innych cząstek i od tego, w jaki sposób skonfigurowany jest cały układ. Za nielokalne zachowanie cząstek odpowiada w tym przypadku to, że fala pilotująca propaguje się nie w zwyczajnej, trójwymiarowej przestrzeni, ale w wielowymiarowej przestrzeni konfiguracyjnej¹⁶. W teorii tej istnieje więc „wyraźny kauzalny mechanizm, który powoduje, że układ jednej części aparatu pomiarowego wpływa

¹⁵Na ten temat, por. D. Bohm, „A Suggested Interpretation...”, art. cyt., ss. 170–172. Por. też: „Zakładamy teraz, że pole ψ [fala pilotująca] i ciało są powiązane w tym sensie, że pole ψ wywiera na ciało nowego rodzaju ‘kwantowomechaniczną’ siłę, która objawia się wyraźnie dopiero w obszarze atomowym. [...] Zakładamy również, że ciało może wywierać odwrotnie oddziaływanie na pole ψ , lecz to odwrotne oddziaływanie w obszarze kwantowomechanicznym jest dostatecznie małe, aby mogło być zaniedbane”; D. Bohm, *Przyczynowość i przypadek w fizyce współczesnej*, Książka i wiedza, Warszawa 1961, s. 192.

¹⁶Por. J.S. Bell, *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge 2004, ss. 10–11, 115.

na wynik otrzymywany w innej, odległej, części”¹⁷. Wiele wskazuje na to, że to właśnie ta cecha interpretacji Bohma sprawiła, że Einstein — gorący zwolennik teorii lokalnych zmiennych ukrytych — odniósł się krytycznie do koncepcji potencjału kwantowego.

Kwantowa nielokalność na poziomie makroskopowym przejawia się w postaci korelacji, które świadczą o tym, że pomiędzy oddzielnymi przestrzennie obiektami istnieje wyraźny związek. Bohm podkreśla, że nie należy w tym przypadku mówić o fizycznym sygnale, ponieważ to sugeruje możliwość natychmiastowej wymiany informacji i prowadzi do sprzeczności z teorią względności: „tu chodzi o mniej określony związek, dlatego wolę mówić o połączeniu. Istnieje połączenie, które sprawia, że to, co dzieje się z jedną cząstką, wpływa na drugą”¹⁸. Koncepcja kwantowego potencjału wyjaśnia istnienie nielokalnych korelacji pomiędzy odległymi zdarzeniami bez pogwałcenia postulatów szczególnej teorii względności — idea ta nie prowadzi do żadnych paradoksów przyczynowych, ponieważ statystyczne wyniki eksperymentów, w których występują oddziaływania nielocalne, są niezmiennicze ze względu na transformacje Lorentza¹⁹. W interpretacji Bohma nielokalność jest zatem jednym z najistotniejszych aspektów mechaniki kwantowej, którego z tej teorii nie da się w żaden sposób wyeliminować²⁰. Zdaniem Bella, to właśnie ta cecha interpretacji Bohma dał początek nowej erze badań nad problemem kwantowej nielokalności²¹.

¹⁷Tamże, s. 11.

¹⁸D. Bohm, *Duch w atomie*, dz. cyt., s. 154.

¹⁹Por. tamże, ss. 165–167.

²⁰Por. D. Bohm, B. Hiley, “On the Intuitive Understanding of Nonlocality as Implied by Quantum Theory”, *Foundations of Physics*, 5 (1975), ss. 93–109.

²¹“Indeed it was the explicit representation of quantum nonlocality in that picture which started a new wave of investigation in this area”; J.S. Bell, *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics*, dz. cyt., s. 167.

3. ZALETY INTERPRETACJI BOHMA

Zagadnieniem, które pozwala w prosty sposób zaprezentować wszystkie zalety koncepcji potencjału kwantowego, jest problem interpretacji eksperymentu z dwoma szczelinami²². W eksperymencie tym przez przesłonę z podwójną szczeliną przepuszcza się wiązkę złożoną z pojedynczych cząstek (np. elektronów). Na ekranie, umieszczonym za przesłoną, pojawia się wzór interferencyjny — zupełnie tak, jak gdyby przez szczeliny przesłony przedostawały się nie korpuskuły, ale dwie fale, które interferują ze sobą po przejściu przez przesłonę. W swoim artykule z roku 1952 Bohm zauważa, że „w świetle standardowej interpretacji mechaniki kwantowej zrozumienie mechanizmu, odpowiedzialnego za powstanie wzoru interferencyjnego jest bardzo trudne [...]. Jeśli przyjmie się, że elektron będzie się zachowywał całkowicie jak klasyczna cząstka, to zjawiska tego nie można w ogóle wyjaśnić”²³. Powstawanie wzoru interferencyjnego daje się jednakże łatwo wyjaśnić, jeśli uwzględni się obecność stowarzyszonego z cząstkami potencjału kwantowego. Okazuje się, że dokładny rachunek potencjału pozwala otrzymać obraz interferencyjny bez rezygnacji z pojęcia trajektorii cząstki. Według Bohma, każda z cząstek podąża precyzyjnie określoną drogą, a obraz interferencyjny powstaje dlatego, że potencjał kwantowy cząstki zawiera informację o całym układzie, w którym ma miejsce eksperyment, a w szczególności — o tym, która ze szczelin jest odsłonięta. Co istotne, statystyczny rozkład cząstek na ekranie, wyznaczony za pomocą potencjału kwantowego, zgadza się całkowicie z gęstością prawdopodobieństwa ich lokalizacji, określoną przez kwadrat modułu funkcji falowej²⁴. „W obrazie

²²Na ten temat, por. F. Selleri, *Wielkie spory w fizyce kwantowej*, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk 1999, ss. 78–82.

²³D. Bohm, “A Suggested Interpretation...”, art. cyt., s. 173.

²⁴Zob. C. Philippidis, C. Dewdney, B. Hiley, “Quantum interference and the quantum potential”, *Nuovo Cimento*, 52B (1079), ss. 15–28. “The approach through the quantum potential retains a pointlike particle, and each particle in the original ensemble follows a well defined trajectory which passes through one or the other of the slits. This ensemble produces the required interference pattern and, at the same

[Bohma] fala zawsze przechodzi przez obydwie szczeliny (jak to jest w naturze fali), a cząstka przechodzi przez tylko jedną szczelinę (jak to jest w naturze cząstek). Cząstka jest w tym przypadku pilotowana przez falę do miejsc, w których $|\psi|^2$ jest duże i utrzymywana z daleka od miejsc, w których $|\psi|^2$ jest małe. W taki sposób każda cząstka wnosi swój wkład do wzoru interferencyjnego na ekranie”²⁵.

W jaki sposób potencjał kwantowy wpływa na trajektorię cząstki? Dobrą analogią, wykorzystywaną przez Bohma i jego zwolenników, jest porównanie cząstki, zanurzonej w polu kwantowym, do statku, kierowanego falami radaru. „Naszym zdaniem — przekonuje Hiley — potencjał kwantowy powstaje z fal przypominających fale radaru. Kwantowy potencjał niesie informacje o otoczeniu, które docierają do elektronu. Elektron następnie zmienia swój ruch w taki sposób, aby powstał obraz, który obserwujemy na ekranie”²⁶. Potencjał kwantowy nie działa zatem w taki sposób, jak każde inne pole, znane z fizyki klasycznej — np. pole elektromagnetyczne — które generuje określoną, klasyczną siłę, i „popycha” cząstkę, tak samo, jak fala na wodzie, popychająca statek²⁷. Potencjał kwantowy dostarcza jedynie informacji, które wyzwalają natychmiastową reakcję cząstki²⁸. W tym względzie koncepcja fali pilotującej Bohma i jego współpracowników różni się od pierwotnego pomysłu de Broglie’a, który interpretował tę wielkość

time, shows that the final position of the particle on the screen allows us to deduce through which slit it actually passes. Thus it is possible to retain the trajectory concept and, at the same time, account for the interference. There is no longer a mystery as to how a single particle passing through one slit ‘knows’ the other slit is open. The information is carried by the quantum potential, so that we no longer have a conceptual difficulty in understanding the results obtained in very low intensity interference experiments”; tamże.

²⁵J.S. Bell, *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics*, dz. cyt., s. 112.

²⁶B. Hiley, *Duch w atomie*, dz. cyt., s. 162.

²⁷„To pole falowe wyzwała reakcje elektronu. Pole zostaje przetłumaczone na kwantowy potencjał, który wchodzi do równania ruchu elektronu. Poprzez to równanie potencjał kwantowy generuje siłę poruszającą elektron, przy czym źródłem energii jest własna aktywność elektronu”; B. Hiley, tamże, ss. 163–164.

²⁸Z tego powodu Bohm określał potencjał kwantowy mianem „aktywnej informacji”; zob. tamże, s. 152.

właśnie jako rodzaj fali mechanicznej, która przekazuje cząstce energię i w taki sposób wpływa na jej ruch.

Koncepcja kwantowego potencjału umożliwia wyjaśnienie kilku innych problemów, które nie znajdują satysfakcjonującego rozwiązania w ramach standardowej interpretacji mechaniki kwantowej. Jednym z tego typu zagadnień jest problem bariery potencjału, związany z wyjaśnieniem mechanizmu, odpowiedzialnego za tak zwany efekt tune-lowy²⁹. Potencjał kwantowy cząstki, która napotyka na swojej drodze „barierę”, podlega — zgodnie z koncepcją Bohma — gwałtownym fluktuacjom, przybierając w niektórych punktach przestrzeni wartości ujemne. Wartości te mogą w pewnych okolicznościach kompensować odpychanie dodatniej bariery potencjału, co w rezultacie generuje taką trajektorię cząstki, dzięki której znajdzie się ona po drugiej stronie bariery³⁰.

Inną trudnością, którą pozwala w zadowalający sposób wyjaśnić koncepcja potencjału kwantowego, jest problem pomiaru. Zgodnie z interpretacją standardową, funkcja falowa zawiera pełną informację o stanie układu kwantowego. Liniowość równania Schrödingera powoduje jednakże, iż stan układu zmienia się w niefizyczną superpozycję wielu (lub nawet nieskończenie wielu) stanów, odpowiadających każdemu z możliwych do zarejestrowania wyników. Tym, co powoduje kolaps funkcji falowej, jest pomiar, który sprawia, że tylko jeden z możliwych wyników (dotyczących np. lokalizacji cząstki) zyskuje fizyczną realność. Na problem pomiaru składa się kilka powiązanych ze sobą trudności: najpierw, mechanika kwantowa w żaden sposób nie określa granicy pomiędzy obiektem kwantowym, który podlega pomiarowi, i makroskopowym aparatem pomiarowym, należącym do świata fizyki klasycznej. Brak tego kryterium powoduje, że — w celu zachowania spójności interpretacji — należy przyjąć, iż w niektórych przypadkach w stanie superpozycji mogą istnieć również obiekty makroskopowe (np. kot Schrödingera). Nie wiadomo również, co tak

²⁹Zob. D. Bohm, „A Suggested Interpretation...”, art. cyt., s. 178.

³⁰Por. F. Selleri, *Quantum Paradoxes and Physical Reality*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 1990, ss. 126–127.

naprawdę odpowiada za redukcję funkcji falowej i jaki mechanizm sprawia, że z całego spektrum możliwości układ wybiera tylko jeden wynik, rejestrowany w momencie pomiaru. Koncepcja kwantowego potencjału pozwala uwolnić się od tych trudności: „nie wymaga ona niejasnego podziału świata na ‘układ’ i ‘aparatus pomiarowy’, ani też na to, co stanowi ‘pomiar’ i co go nie stanowi”³¹. W interpretacji Bohma cząstka cały czas — również przed momentem pomiaru — istnieje realnie tylko w jednym miejscu przestrzeni, ponieważ jej potencjał kwantowy nie otrzymuje wkładu od fal odpowiadających wszystkim pozostałym stanom układu, które w standardowej interpretacji należy uwzględniać jako możliwe wyniki pomiaru. Są to bowiem fale „puste” i niesiona przez nie informacja jest „nieaktywna”³². W interpretacji tej znika również konieczność odwoływania się do tajemniczego „kolapsu” funkcji falowej: funkcja nie musi tu ulegać redukcji, aby cząstka mogła uzyskać fizyczną realność, ponieważ przez cały czas cząstka jest związana z falą i ma jednoznacznie określone parametry.

Osobnym zagadnieniem, które łączy się z problemem interpretacji mechaniki kwantowej, i któremu Bohm poświęcił ostatnie lata swojego życia, jest koncepcja ukrytego porządku³³. Idea ta stanowi rozwinięcie wcześniejszych poglądów Bohma na temat możliwości wyjaśnienia pozornie przypadkowego charakteru zjawisk kwantowych za pomocą procesów deterministycznych, ale zawiera również pewne elementy wschodniej filozofii, a nawet wschodniego mistycyzmu. Na fundamentalnym, kwantowym poziomie fizycznej rzeczywistości istnieje — zgodnie z tą koncepcją — ukryty (zwiniony) porządek, który jest opisywany przez matematyczny formalizm mechaniki kwantowej³⁴.

³¹J.S. Bell, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, dz. cyt., s. 111.

³²„Informacja w ‘pustym’ pakiecie falowym nie odgrywa już żadnej roli, ponieważ w trakcie pomiaru nieodwracalny proces wprowadza stochastyczne, czyli przypadkowe zaburzenia, które niszczą informację zawartą w potencjale kwantowym fali. [...] Informacja nie jest już aktywna”; B. Hiley, *Duch w atomie*, dz. cyt., ss. 170–171.

³³D. Bohm, *Ukryty porządek*, Wydawnictwo Pusty Obłok, Warszawa 1988.

³⁴Główną ideę tej koncepcji można zilustrować następującym przykładem: jeśli na złożonej kartce papieru zostanie zapisany dowolny wzór, to po rozwinięciu kartki ukaze się zupełnie inny, nowy układ linii. „Mechanika kwantowa sugeruje, że w taki

Prawa tej teorii pozwalają stwierdzić, że „ukryty porządek jest szczególnie odpowiedni dla zrozumienia niepodzielnej całości, pozostającej w płynnym ruchu, ponieważ w porządku tym całość istnienia jest ‘zwinęta’ w każdym obszarze przestrzeni (i czasu). Tak więc, jakkolwiek składnik lub aspekt wyodrębniamy w myśli, to zawiera on całość i jest wewnętrznie związany z całością, z której został wyabstrahowany. Całość przenika więc wszystko [...]. Oddziaływania pomiędzy różnymi bytami (na przykład elektronami) tworzą pojedynczą strukturę niepodzielnych powiązań, a cały wszechświat musi być pojmowany jako niepodzielna całość”³⁵. Jak widać, koncepcja ukrytego porządku ma już niewiele wspólnego ze ścisłością wcześniejszych teorii Davida Bohma.

* * *

Pewnym fenomenem jest to, że teoria fali pilotującej została niemal całkowicie zignorowana przez świat naukowy — pomimo tego, że przewidywania tej teorii zgadzają się z przewidywaniami standardowej mechaniki kwantowej, a w wielu aspektach przewyższa ona interpretację kopenhaską elegancją i prostotą pojęć oraz brakiem arbitralnych założeń (w przypadku interpretacji standardowej założenia — dotyczące pomiaru i redukcji funkcji falowej — są konstytutywnym elementem całej teorii). Penrose zauważa, że na rzecz interpretacji Bohma „zdecydowanie przemawia fakt, że jest ona klarowna z ontologicznego punktu widzenia”³⁶. Podobnie Bell, który nigdy nie ukrywał swojej fascynacji teorią zmiennych ukrytych Bohma, w jednym z artykułów wyraża swoją ocenę tej koncepcji w następujący, zwięzły sposób: „Dlaczego obraz pilotującej fali jest ignorowany w podręcznikach? Czyż nie powinno się go uczyć, nie jako jedynej możliwości, ale jako przeciwwagi do tego, co obecnie się uznaje? I w celu pokazania,

właśnie sposób rzeczywistość zjawisk wyłania się z głębszego poziomu, na którym istnieje w zwinętej postaci”; D. Bohm, *Duch w atomie*, dz. cyt., s. 145.

³⁵D. Bohm, *Ukryty porządek*, dz. cyt., s. 185, 188.

³⁶R. Penrose, *Droga do rzeczywistości*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2004, s. 759. Penrose wskazuje jednakże na pewne słabości tej interpretacji; zob. tamże, ss. 758–759; 779–780.

że niejasność, subiektywizm i indeterminizm nie są na nas wymuszane przez eksperymentalne fakty, lecz stanowią przedmiot świadome dokonanego wyboru?”³⁷.

Niewielkie zainteresowanie fizyków teorią fali pilotującej być może wynika z tego, że zarówno interpretacja Bohma, jak i standardowa interpretacja mechaniki kwantowej prowadzą do tych samych przewidywań empirycznych. Pozostawanie w zgodności z teorią, wyznaczającą standard w fizyce kwantowej, przemawia na korzyść koncepcji fali pilotującej, ale dla większości fizyków argument ten nie wystarcza do tego, by zarzucić dotychczasową interpretację mechaniki kwantowej. Jak na razie nie zaproponowano żadnego doświadczenia, które umożliwiłoby jednoznaczne rozstrzygnięcie sporu pomiędzy zwolennikami obydwu interpretacji³⁸. Nie jest wykluczone, że problemu tego w ogóle nie da się rozstrzygnąć na drodze eksperymentalnej. Jeśli się pamięta, że prawdziwą stawką sporu jest tu realizm i determinizm, to trudno się nie zgodzić z tym, że w rzeczywistości jest to problem natury filozoficznej.

Dyskusja nad poprawną interpretacją mechaniki kwantowej ciągle trwa. Niezależnie od tego, czy teoria Bohma rzeczywiście jest, czy nie jest, godnym konkurentem standardowej mechaniki kwantowej, o teorii tej nie należy w tej dyskusji zapominać choćby z tego powodu, że stanowi ona wymowny przykład na to, że matematyczny formalizm mechaniki kwantowej jest strukturą na tyle bogatą, że dopuszcza różne — niekiedy nawet krańcowo różne — interpretacje. Jeśli koncepcja Bohma rzeczywiście jest empirycznie równoważna standardowej mechanice kwantowej, to nic nie stoi na przeszkodzie, aby uznać, że obydwie te teorie stanowią jedynie dwie różne matematyczne repre-

³⁷J. Bell, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, dz. cyt., s. 160.

³⁸Co prawda, przeprowadzono tego typu doświadczenia (G Brida, E. Cagliero, G. Falzetta, M. Genovese, M. Gramegna, C. Novero, “Experimental Realization of a First Test of de Broglie-Bohm Theory”, *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 35/ 22 (2002), ss. 4751–4756), jednakże okazało się, że założenia, w oparciu o które uzyskano wyniki, były błędne; zob. W. Struyve, W. DeBaere, *Quantum theorem theory: Reconsideration of Foundations*, Växjö University Press, Växjö 2001, s. 355.

zentacje tej samej, abstrakcyjnej struktury, opisywanej formalizmem mechaniki kwantowej. Poprzestawanie tylko na jednej wybranej reprezentacji grozi błędem pochopnego wyciągania wniosków, które zdają się wynikać z tej struktury w sposób konieczny, a które w rzeczywistości są jedynie elementem jednej z jej reprezentacji. Nie ulega wątpliwości, że jest to doniosłe przesłanie tego rozdziału, który w historii mechaniki kwantowej zapisał Dawid Bohm.

SUMMARY

DAVID BOHM'S THEORY OF HIDDEN VARIABLES

One of the most important interpretative problems of quantum mechanics concerns the so called hidden variables. Sometimes it is said that the Bell's theorem falsifies theories of such variables, but in fact, it falsifies only local ones. This paper deals with David Bohm's interpretation of quantum mechanics, which is a kind of nonlocal hidden variable theory. This theory delivers a full deterministic and realistic description of quantum phenomena and predicts the same results as standard quantum mechanics. It is argued that this interpretation is still worth being investigated, because it remains in the full agreement with the mathematical formalism of this theory and it surpasses the standard interpretation as far as simplicity and lack of arbitrary assumptions are concerned.