

# Michał Heller

---

## Johna Bella filozofia mechaniki kwantowej

---

*Studia Philosophiae Christianae* 30/2, 151-161

---

1994

Artykuł został zdigitalizowany i opracowany do udostępnienia w internecie przez **Muzeum Historii Polski** w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego. Artykuł jest umieszczony w kolekcji cyfrowej [bazhum.muzhp.pl](http://bazhum.muzhp.pl), gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.

MICHAŁ HELLER

## JOHNA BELLA FILOZOFIA MECHANIKI KWANTOWEJ

1. Wprowadzenie. 2. Nierówności Bella. 3. Teoria ukrytych parametrów. 4. Romantyczne i nieromantyczne filozofie mechaniki kwantowej. 5. Filozoficzne preferencje Bella. 6. Uwagi krytyczne.

### 1. WPROWADZENIE

John S. Bell zyskał sławę dzięki odkrytym przez siebie nierównościom, które potem zostały ochrzczone jego nazwiskiem. Nierówności te umożliwiły takie przeformułowanie myślowego eksperymentu Einsteina, Rosena i Podolskiego (EPR)<sup>1</sup>, że udało się to doświadczenie przeprowadzić w laboratorium<sup>2</sup>. Rezultaty przeprowadzonych doświadczeń wykazały, wbrew przekonaniom Einsteina, słuszność przewidywań mechaniki kwantowej. Obiekty kwantowe zachowują się „nielokalnie”. Funkcja falowa, przedstawiająca stan obiektu kwantowego, w jakiś sposób „wie” o zachowaniu się dwu cząstek, choćby były one odległe od siebie o miliony lat świetlnych; i to „wie” natychmiast, jakby informacja od jednej cząstki do drugiej była przekazywana z nieskończoną prędkością. To, co Einstein, Rosen i Podolski uważali za paradoks kompromitujący mechanikę kwantową, stało się prawdą doświadczalną. Nic dziwnego, że zagadnienia związane z nierównościami Bella (przede wszystkim zagadnienie nielokalności) od jakiegoś czasu są w centrum zainteresowań zarówno publikacji popularno-naukowych, jak i ściśle naukowych studiów<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> A. Einstein, N. Rosen, B. Podolsky, *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete*, Phys. Rev. 47, 1935, 777-780.

<sup>2</sup> O pierwszych eksperymentach doniesiono w pracach: A. Aspect, P. Grangier, G. Roger, *Experimental Tests of Realistic Local Theories Via Bell's Theorem*, Phys. Rev. 49, 1981, 460-463; A. Aspect, P. Grangier, G. Roger, *Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A. New Violation of Bell's Inequalities*, Phys. Rev. Letters 49, 1982, 91-94; A. Aspect, J. Dalibar, G. Roger, *Experimental Tests of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers*, Phys. Rev. Letters 49, 1982, 1804-1807.

<sup>3</sup> Próbką dyskusji, jakie toczą się wokół nierówności Bella, może być książka *Philosophical Consequences of Quantum Theory – Reflections on Bell's Theorem*, red.: J.T. Cushing, E. McMullin, University of Notre Dame Press, Notre Dame 1989.

Kilka lat temu (w 1987 r.) wydawnictwo Cambridge University Press przygotowało zbiór artykułów Bella poświęconych jego „filozofii mechaniki kwantowej”. Kolejne wznowienie książki Bella<sup>4</sup> stwarza dobrą okazję do bliższego przyjrzenia się poglądom tego myśliciela i uczonego oraz do poczynienia, w ich świetle, kilku uwag na temat problemu, nielokalności w mechanice kwantowej. Jak zobaczymy, jeszcze raz potwierdzi się prawda, że warto czytać oryginalne prace odkrywców. Bardzo często są one pojęciowo bardziej przejrzyste i z reguły po prostu mądrzejsze od późniejszych opracowań, komentarzy czy – po jakimś czasie – ujęć podręcznikowych.

## 2. NIERÓWNOŚCI

Oryginalna praca Bella, formułująca jego sławne nierówności, ukazała się w 1964 r. w czasopiśmie *Physics*<sup>5</sup>. Przyjrzyjmy się nieco bliżej jej treści.

Bell rozpoczyna swoją analizę od zwięzłego przypomnienia myślowego eksperymentu EPR w unowocześnionej wersji Bohma-Aharonowa<sup>6</sup>. Rozważmy parę cząstek o spinie połówkowym, które pozostawały uprzednio we wzajemnym oddziaływaniu. Cząstki te poruszają się swobodnie w przeciwnych kierunkach. Gdy są odpowiednio daleko od siebie, zostaje wykonany pomiar pewnej składowej spinu jednej z nich. Załóżmy, że wynikiem pomiaru jest  $+1$ . Wówczas natychmiast wiadomo, że wynik pomiaru tej samej składowej spinu na pewno da wynik  $-1$ . Jeżeli wziąć pod uwagę, że przed wykonaniem pomiaru żadna z cząstek nie miała określonego spinu, to wniosek o natychmiastowym przekazywaniu informacji od jednej cząstki do drugiej jest nieunikniony.

Einstein uważał ten wniosek za dowód niezupełności mechaniki kwantowej. Godząc się z Einsteinem, załóżmy, że istnieje ukryty parametr (lub zbiór ukrytych parametrów)  $\lambda$  uzupełniający informacje zawarte w funkcji falowej i że znany jest rozkład prawdopodobieństwa  $p(\lambda)$  dla parametru  $\lambda$ .

Napisanie wzoru na wartość oczekiwaną wyniku pomiaru spinu obydwu cząstek zarówno dla przykładu standardowej mechaniki kwantowej, jak i dla przykładu mechaniki kwantowej z ukrytym

---

<sup>4</sup> *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, 1933. W dalszym ciągu książki tę będę cytować skrótem SU.

<sup>5</sup> *On the Einstein-Rosen-Podolsky Paradox*, *Physics* 1, 1857, 1964, 195-200 (SU, ss. 14-21).

<sup>6</sup> D. Bohm. Y. Aharonov, *Discussion of Experimental Proof for the Paradox of Einstein, Podolsky, and Rosen*, *Phys. Rev.* 108. 1957. 1070-1076.

parametrem, jest prostym ćwiczeniem dla początkującego studenta tej dziedziny fizyki. Jeżeli mechanika kwantowa jest zupełna, obie wartości oczekiwane muszą być sobie równe. Zakładając taką równość, po elementarnych przekształceniach, dochodzi się do nierówności, która – przy założeniu słuszności mechaniki kwantowej – nie może być spełniona. Jest to jedna z postaci później znanych jako nierówność Bella.

Co więcej, Bell dowodzi (przez sprowadzenie do niedorzeczności), że wzór na wartość oczekiwaną, wyliczoną dla standardowej mechaniki kwantowej, nie może być dowolnie dobrze przybliżany przez odpowiedni wzór wyliczony dla mechaniki kwantowej z ukrytym parametrem.

W zakończeniu Bell formuluje wniosek: Teoria z dodatkowymi parametrami, ale wprowadzonymi tak, by nie zmieniać statystycznych przewidywań standardowej mechaniki kwantowej, „musi zawierać mechanizm, przy pomocy którego stan jednego instrumentu pomiarowego mógłby wpływać na odczyty drugiego, niezależnie od tego, jak daleko te instrumenty byłyby od siebie”<sup>7</sup>.

Nierówność Bella jest zwykle cytowana w literaturze w nieco odmiennej postaci, nadanej jej przez Clausera i współautorów<sup>8</sup>. Bell wprowadza tę postać w pracy *The Theory of Local Beables*<sup>9</sup> i potem chętnie się nią posługuje. Tę nową postać nierówności Bella uważa się za bardziej pogładową i zapewne tak jest, ale zwartość oryginalnej pracy Bella jest zaletą, za którą warto zapłacić nieco wyższą cenę.

### 3. TEORIA UKRYTYCH PARAMETRÓW

Warto zwrócić uwagę na fakt, jak wielką rolę w argumentacji Bella odgrywa teoria ukrytych parametrów. Znajduje się ona wśród założeń dowodu i jej dotyczy główny wniosek. Wniosek ten Bell powtarza wielokrotnie w różnych swoich pracach w wielu, ale nieistotnych, modyfikacjach. Brzmi on: nawet jeżeli przyjąć, że słuszna jest któraś wersja teorii ukrytych parametrów, to musi być ona nielokalna.

Bell przyznaje, że artykuły Bohma były dla niego rewelacją<sup>10</sup>. Temat ukrytych parametrów w ujęciu de Broglie-Bohma (BB) powraca prawie w każdym rozdziale. W ujęciu tym problem „fala czy cząstka” zostaje zastąpiony sformułowaniem „fala i cząstka”. Cząst-

<sup>7</sup> SU, s. 20.

<sup>8</sup> J.F. Clauser, M.A. Horne, A. Shimony, R.A. Holt, *Proposed Experiment to Test Local Hidden Variable Theories*, Phys. Rev. Letters 23, 1969, 880-883.

<sup>9</sup> SU, ss. 52-62.

<sup>10</sup> SU, s. 173.

ka zachowuje się klasycznie; pojęcie jej toru w przestrzeni i czasie zostaje w pełni zachowane. Fala jest rodzajem potencjalności, która skierowuje („pilotuje”) cząstkę w kierunku tych obszarów przestrzeni, w których amplituda fali jest największa.

Przewidywania empiryczne teorii BB są identyczne jak standardowej mechaniki kwantowej, ale jej przewagi pojęciowe są tak znaczne, że Bell dziwi się, iż teoria BB nie zyskała większego uznania. Na s. 160 książki Bella znajdujemy aż tak mocne sformułowanie: „Dlaczego obraz pilotującej fali jest ignorowany w podręcznikach? Czyż nie powinno się go uczyć, nie jako jedynej możliwości, ale jako przeciwwagi do tego, co się obecnie uznaje? I w celu pokazania, że niejasność, subiektywizm i indeterminizm nie są na nas wymuszane przez eksperymentalne fakty, lecz stanowią przedmiot świadomie dokonanego wyboru?”

Ale nie tylko utrzymanie klasycznego determinizmu Bell uważa za zaletę teorii BB. Jego zdaniem, jeszcze ważniejszą jej cechą jest zniesienie sztucznego podziału na (mikroskopowy) obiekt badany i (makroskopową) resztę świata, jakiego wymaga interpretacja standardowa. Nie jest rzeczą jasną, gdzie należy umieścić tę granicę. Czy oko, odczytujące położenie wskazówki na skali, należy do aparatu pomiarowego, który chcemy włączyć do kwantowego opisu? A jeżeli oko należy do aparatu pomiarowego, to czemu nie mózg badacza, dzięki któremu oko w ogóle widzi cokolwiek? I tak dalej. Czy zatem powinniśmy mówić o Wszczęświecie jako o jednym obiekcie kwantowym? Co wtedy znaczyłyby funkcja falowa Wszczęświata?<sup>11</sup>

Z zagadnieniem indeterminizmu wiąże się bodaj najtrudniejszy problem interpretacyjny mechaniki kwantowej – redukcja paczki falowej, nieciągły skok od deterministycznie ewoluującej (zgodnie z równaniem Schrödingera) funkcji falowej do jedynie statystycznie przewidywalnych wyników pomiarów. W teorii BB znika cały problem: funkcja falowa nie redukuje się do cząstki; cząstka od początku jest związana z falą. Niektórzy (Wigner, Wheeler) uważają, że za redukcję funkcji falowej odpowiedzialny jest akt obserwacji. Natychmiast powoduje to nowe problemy. Bell pisze: „Wydawałoby się, że teoria dotyczy wyłącznie 'wyników pomiarów' i nie ma nic wspólnego z czymkolwiek innym. Ale gdy 'układem' jest cały świat, gdzie należy szukać tego, kto mierzy? Raczej wewnątrz świata niż zewnątrz. Co kwalifikuje pewne podukłady do pełnienia roli mierzącego? Czy funkcja falowa świata, by dokonać skoku, oczekiwała

---

<sup>11</sup> O kłopotach interpretacyjnych w zastosowaniu mechaniki kwantowej do kosmologii por. art. *Quantum Mechanics for Cosmologists*, SU, ss. 117-138.

tysiące milionów lat, aż pojawi się żyjący jednokomórkowiec? A może musiała czekać nieco dłużej na bardziej wykwalifikowanego badacza... posiadającego doktorat z fizyki?<sup>12</sup>

I wreszcie pojęcie komplementarności. Bohr zrobił z niego filozofię mechaniki kwantowej. Ale naturalne pojęcie komplementarności jest inne. Jeżeli widzimy słonia z przodu, ma on dwie nogi i trąbę. Jeżeli widzimy słonia z tyłu, ma on dwie nogi i ogon. Jeżeli widzimy słonia z boku, ma on trąbę, dwie nogi i ogon. Te różne obrazy są komplementarne względem siebie. Słoń jest jednak jednym, całkiem klasycznym obiektem. Wedle Bohra obiekt kwantowy nie jest ani cząstką, ani falą, lecz czymś, co ujawnia komplementarne względem siebie aspekty falowe i korpuskularne. W tym sensie komplementarne to znaczy sprzeczne w stosunku do siebie. Bo coś nie może być cząstką i falą równocześnie. To właśnie w teorii BB cząstka i fala są komplementarne w naturalnym, nie filozoficznie przekształconym, znaczeniu<sup>13</sup>.

Czy zatem Bell opowiada się za teorią BB? Nie całkiem. Oto jego ocena: „Obraz 'pilotującej fali' jest niemal trywialnym pogodzeniem zjawisk kwantowych z klasycznym ideałem fizyki teoretycznej: zamknięty układ równań, których rozwiązania powinno się traktować serio, a nie kaleczyć je ('redukować'), gdy stają się kłopotliwe. Byłoby jednak niewłaściwym pozostawić czytelnika w przekonaniu, że dzięki obrazowi pilotującej fali teoria kwantowa pojawia się w dziennym świetle z przejrzystością kryształowej wody. Przejrzystość tego obrazu demaskuje przedziwną nielokalność kwantowej teorii”<sup>14</sup>. To właśnie wykazały nierówności Bella.

#### 4. ROMANTYCZNE I NIEROMANTYCZNE FILOZOFIE MECHANIKI KWANTOWEJ

John Bell dzieli znane interpretacje mechaniki kwantowej na romantyczne i nieromantyczne. Wyraz „romantyczny” ma w jego rozumieniu niewątpliwie pejoratywne znaczenie.

Nieromantycznym podejściem, zdaniem Bella, jest pragmatyzm, będący stanowiskiem większości „pracujących fizyków”. Gdy penetrujemy obszary odległe od naszego potocznego doświadczenia, czy to w kierunku bardzo wielkich czy też bardzo małych rozmiarów, nie mamy prawa oczekiwać, że nasze zwyczajne pojęcia, takie jak przestrzeń, czas, przyczynowość czy nawet spójność logiczna, będą nadal obowiązywać. Nie powinniśmy więc starać się wyrabiać sobie

<sup>12</sup> SU, s. 117.

<sup>13</sup> SU, s. 190.

<sup>14</sup> Por. SU, s. 194.

żadnego „obrazu” subatomowego świata. Powinniśmy cieszyć się, że nasze rachunki dają wyniki pozostające w bardzo dobrej zgodzie w doświadczeniu<sup>15</sup>.

Bohr dobudował romantyczną filozofię do tak rozumianego pragmatyzmu. Jego pojęcie komplementarności odegrało w tej filozofii kluczową rolę, rezygnację z obrazu podniosło do rangi zasady.

Uznanie odmienności świata mikroskopowego i świata makroskopowego może stać się punktem wyjścia nieromantycznego podejścia. Ale wówczas filozofię trzeba zastąpić solidną matematyką. Podział na świat kwantowy i świat klasyczny powinien pojawić się nie na mocy dekretu lecz na mocy wynikania z równań. Prawdopodobnie wynikanie to będzie następstwem nieliniowości, wprowadzonej do teorii. Istnieje kilka interesujących propozycji, w jaki sposób uzupełnić równanie Schrödingera o człony nieliniowe, ale dotychczas nie doprowadziły one do żadnego zasadniczego przełomu<sup>16</sup>.

I to podejście ma swój romantyczny odpowiednik. Owszem, istnieje podział na świat „liniowy” i „nieliniowy”, ale granicą między nimi jest granica pomiędzy „materią” i „duchem” (mind). Tu właśnie mówi się o roli świadomości w mechanice kwantowej. Najbardziej znanymi przedstawicielami tego stylu myślenia są E.P. Wigner i J.A. Wheeler. Bell dołącza tu bardzo krótki komentarz: „Niestety dotychczas nie udało się przedstawić tych idei w precyzyjnej postaci”<sup>17</sup>.

Interpretacja BB należy oczywiście, zdaniem Bella, do nieromantycznych filozofii. Jej romantycznym odpowiednikiem jest Everetta wieloświatowa interpretacja mechaniki kwantowej. Bell w wielu pracach dowodzi, że wartościowa składowa interpretacji Everetta pokrywa się w istocie z teorią BB. Sam pomysł, że w wyniku pomiaru kwantowego świat ulega podziałowi na tyle odrębnych gałęzi ile jest możliwych wyników pomiaru i w każdej z tych gałęzi jeden z możliwych wyników rzeczywiście się realizuje, stanowi tylko romantyczną dobudówkę, która niczego nie wnosi do fizycznej treści teorii<sup>18</sup>. Zdanie, jakie Bell wypowiedział pod adresem interpretacji wieloświatowej, stało się już przysłowiem: „Jeśliby tę teorię potraktować na serio, trudno by już było traktować na serio cokolwiek innego”<sup>19</sup>.

Sześć powyższych interpretacji mechaniki kwantowej Bell nazywa sześcioma światami. „W jakiej mierze są to światy fikcyjne? Są one jak fikcja literacka, ponieważ są wolnymi twórcami ludzkiego umysłu.

<sup>15</sup> SU, s. 188.

<sup>16</sup> SU, s. 190.

<sup>17</sup> SU, s. 191.

<sup>18</sup> Por. np. art. Bella: *The Measurement Theory of Everett and de Broglie's Pilot Wave*, SU, ss. 93-99.

<sup>19</sup> SU, s. 136.

Odkrywca w fizyce teoretycznej niekiedy od samego początku zdaje sobie sprawę, że jego praca jest fikcją. Ma to miejsce na przykład wtedy, gdy konstruuje on uproszczony świat, w którym przestrzeń ma tylko jeden lub dwa wymiary zamiast wymaganych trzech. Najczęściej jednak nie wiadomo, że praca dotyczy fikcji dopóki hipoteza nie okaże się fałszywą. Gdy fizyk-teoretyk traktuje sprawę poważnie, gdy nie bada świadomie uproszczonych modeli, tym różni się od powieściopisarza, iż sądzi, że jego historia może okazać się prawdziwą<sup>20</sup>.

### 5. FILOZOFICZNE PREFERENCJE BELLA

Przedstawiona powyżej ocena Johna Bella rozmaitych interpretacji mechaniki kwantowej wyraźnie ujawnia jego filozoficzne preferencje. Jak widzieliśmy, Bell bardzo chętnie widziałby powrót do pojęć klasycznych. Stąd jego sympatie dla teorii BB. Jeżeli godzi się on na odejście od pojęcia lokalności, to czyni to pod naciskiem udowodnionych przez siebie prawidłowości. Bell oczywiście zdaje sobie sprawę z tego, że odejście od pojęć klasycznych, wymuszone przez jego nierówności, jest odejściem radykalnym. Oto jego krótki komentarz: „Czy nie może być tak, że dziwna nielokalność okaże się tylko wyjątkową cechą bardzo wyjątkowej konstrukcji klasycznego sektora w teorii de Broglie-Bohma i zostanie usunięta przez bardziej pomysłową konstrukcję? Myślę, że nie. Wydaje się, że nielokalność jest głęboko zakorzeniona w kwantowej mechanice i przetrwa w każdym jej uzupełnieniu<sup>21</sup>”.

Tradycyjne skłonności Bella znajdują swój wyraz w używanej przez niego terminologii. W ortodoksyjnej interpretacji mechaniki kwantowej nobilitowany został termin „obserwabla”. Jak wiadomo, termin ten odnosi się do wszystkiego, co da się zmierzyć i ma dobrze określony sens w matematycznej strukturze teorii (obserwabla są reprezentowane przez operatory hermitowskie działające na przestrzeni Hilberta). Często podkreśla się, że nie ma sensu mówić o tym, czego się nie mierzy. Jako przeciwwagę takiej filozofii Bell wprowadza termin „byciabla” (inaczej trudno przełożyć nowotwór językowy wprowadzony przez Bella – beable). Z jednej strony Bell zaznacza, że termin ten należy uważać za skrót od maybe-able („byćmożabla”), co ma podkreślać przypuszczalny (tentative) charakter teorii fizycznych<sup>22</sup>. Z drugiej jednak strony Bell pisze: „Pojęcie

<sup>20</sup> SU, ss.194-195.

<sup>21</sup> SU, s.132.

<sup>22</sup> Stąd też Bell woli nie używać takich terminów jak „being”, „beer”, „existent”; por. SU, s. 174.



'obserwabi' jest matematycznie bardzo dobrze określone; identyfikuje się z 'hermitowskimi operatorami'. Ale fizycznie jest to raczej mgliste pojęcie. Nie jest łatwo precyzyjnie określić, jakim procesom fizycznym należy przypisać status 'obserwacji', a jakie należy zepchnąć do otchłani zięjącej pomiędzy kolejnymi obserwacjami. Można się więc spodziewać, że uda się osiągnąć wzrost ścisłości przez skoncentrowanie się na byciablach, które byłyby opisywane w języku klasycznym – w języku klasycznym, ponieważ 'one tam są'. Byciable muszą zawierać w sobie układy wyłączników i przycisków na doświadczalnych przyrządach, prądy płynące w cewkach i odczyty instrumentów. Obserwable muszą być w jakiś sposób zrobione z byciabli. Teoria lokalnych byciabli powinna zawierać algebrę lokalnych obserwabi i nadawać jej precyzyjny sens fizyczny<sup>23</sup>. A więc jednak „byciable” wyrażają realistyczne tendencje Bella. Niekiedy, dla podkreślenia związku ze słowem „być” (to be) pierwszą sylabę słowa „beable” pisze on kursywą.

Nie znaczy to jednak, że Bell nie docenia roli świadomości lub umysłu. Pisze on wyraźnie: „Gdy idzie o umysł (mind), jestem w pełni przekonany, że zajmuje on centralne miejsce w ostatecznej naturze rzeczywistości. Ale mam bardzo wiele wątpliwości co do tego, czy współczesna fizyka sięgnęła już tak głęboko, żeby ta idea mogła wkrótce stać się profesjonalnie owocną”<sup>24</sup>.

## 6. UWAGI KRYTYCZNE

Pora podjąć próbę krytycznego ustosunkowania się do propozycji Bella. Wartość jego nierówności i ich olbrzymi wpływ na sposób obecnego myślenia o mechanice kwantowej nie ulegają wątpliwości. Ten aspekt zagadnienia pozostawię na boku. Podejmę natomiast ryzyko uczynienia kilku uwag krytycznych dotyczących zarówno filozoficznych komentarzy Bella, jak i niektórych zagadnień interpretacyjnych mechaniki kwantowej w ogóle.

Interpretacyjne zagadnienia mechaniki kwantowej wyrastają z kłopotów powiązania precyzyjnej struktury matematycznej tej teorii z rzeczywistością świata subatomowego. Na przykład idea ukrytych parametrów narodziła się z chęci lepszego „dopasowania” matematycznej struktury teorii do rzeczywistości (o której zakłada się, że powinna być podobna do „klasycznej”). „Na styku” formalizmu matematycznego i rzeczywistości powstają niejasności i pojęciowe rozmycia, których dotychczas nie udało się uniknąć. Ażeby

<sup>23</sup> SU, s. 52.

<sup>24</sup> SU, s. 194.

zmniejszyć stopień trudności interpretacyjnych, warto zastosować następującą strategię.

Punktem wyjścia niech będzie matematyczna struktura teorii, w naszym przypadku matematyczna struktura mechaniki kwantowej. Zapomnijmy, że teoria ta ma ambicje „opisywać” czy „modelować” jakąkolwiek rzeczywistość i potraktujmy strukturę matematyczną jako „świat sam w sobie”, tzn. założmy, że struktura matematyczna dokładnie rekonstruuje pewien świat, *univers de discours* danej teorii. Mam tu na myśli coś bardzo zbliżonego do ontologii w sensie Quine’a. Myśliciel ten za ontologię danej teorii zaksjomatyzowanej uważał zbiór obiektów, i tylko tych obiektów, które stanowią zakres zmiennych kwantyfikowanych w danej teorii sformalizowanej<sup>25</sup>. Różnica między ujęciem Quine’a a moim polega tylko na tym, że nie ograniczam się wyłącznie do teorii sformalizowanych, lecz rozważam także dostatecznie jasno określone matematyczne struktury teorii fizycznych. W tym sensie świat (*univers de discours*) ortodoksyjnej mechaniki kwantowej jest różny od świata teorii BB. W pierwszym z tych światów istnieją (w sensie Quine’a) tylko funkcje falowe i obserwable, podczas gdy w drugim z nich istnieją również cząstki (pilotowane przez fale).

Odniesienie zinterpretowanej w powyższym sensie teorii do rzeczywistości empirycznej będzie dopiero drugim krokiem interpretacyjnym. Jeżeli wyniki doświadczeń potwierdzają przewidywania teorii, to można sądzić, że jej zrekonstruowana ontologia (w sensie Quine’a) z dobrym przybliżeniem odpowiada rzeczywistości.

Rozważmy teraz nieco dokładniej (quineowski) świat mechaniki kwantowej. Stany obiektów kwantowych są reprezentowane przez wektory w przestrzeni Hilberta; innymi słowy: w wektorze należącym do przestrzeni Hilberta zakodowana jest cała informacja o obiekcie kwantowym<sup>26</sup>. Wektory w przestrzeni Hilberta, tzw. wektory stanu, są tworami abstrakcyjnymi i nie należy ich sobie wyobrażać jako określonych na rzeczywistej przestrzeni.

Wielkości obserwowalne (obserwable), są reprezentowane przez operatory (hermitowskie) działające na przestrzeni Hilberta. Akt pomiaru danej wielkości obserwowalnej jest reprezentowany przez działanie danego operatora na odpowiedni wektor stanu. Wynik pomiaru daje zawsze jedną z wartości własnych danego operatora; jest nią jakaś liczba rzeczywista lub układ liczb rzeczywistych.

---

<sup>25</sup> W. Van Orman Quine, *Z punktu widzenia logiki*, PWN, Warszawa 1969, ss. 9-34; por. również mój art.: *Quine i Gödel – jeszcze o ontologicznych interpretacjach fizycznych teorii*, Tarnowskie Studia Teologiczne (w druku).

<sup>26</sup> Przez obiekt kwantowy należy tu rozumieć nie koniecznie pojedynczą cząstkę. Cząstki, które oddziaływały ze sobą mogą stanowić jeden obiekt kwantowy.

Załóżmy, że chcemy zmierzyć położenie cząstki. Formalnie rzecz biorąc, działamy operatorem położenia na wektor w przestrzeni Hilberta, reprezentujący stan cząstki. Jako wynik otrzymujemy liczby rzeczywiste będące wartościami własnymi operatora położenia. Fizycznie odpowiada to wykonaniu doświadczenia zmierzającego do zlokalizowania cząstki. W wyniku doświadczenia otrzymujemy trzy liczby rzeczywiste, które interpretujemy jako współrzędne cząstki. I tu powstaje pułapka interpretacyjna – rodzi się obraz cząstki, zajmującej jakieś miejsce w przestrzeni. Tymczasem formalizm mechaniki kwantowej mówi nam jedynie, że gdy wykonamy odpowiedni pomiar, to przyrząd wskaże nam trzy współrzędne w przestrzeni makroskopowej, w jakiej znajduje się zarówno przyrząd, jak i obserwator. To bowiem naprawdę reprezentują wartości własne operatora położenia. W formalizmie teorii nie ma niczego, co upoważniałoby do twierdzenia, że cząstka zajmuje jakieś miejsce w przestrzeni. Wektory stanu od samego początku są tworamii „nielokalnymi”, a więc nieumiejscowionymi w przestrzeni (choć w odpowiedniej reprezentacji wektory przestrzeni Hilberta mogą zależeć od współrzędnych przestrzennych).

Powstaje pytanie, czy również czas jest tylko pojęciem makroskopowym i czy obiekty kwantowe również nie istnieją w czasie? W mechanice kwantowej jest operator położenia, ale nie ma w niej „operatora czasu”. Mimo to, status pojęcia czasu w mechanice kwantowej jest odmienny od jego statusu w fizyce klasycznej. Wskazuje na to fakt, że w „obrazie Schrödingera” mechaniki kwantowej wektory stanu ewoluują w czasie (zgodnie z równaniem Schrödingera), podczas gdy operatory reprezentujące obserwable nie zależą od czasu; natomiast w „obrazie Heisenberga” obserwable ewoluują, ale wektory stanu są aczasowe. Wektory stanu odnoszą się oczywiście do mikroświata, obserwable natomiast są makroskopowe. Ponieważ obydwa obrazy są równoważne, czas w mechanice kwantowej można uważać bądź za wielkość mikroskopową (w obrazie Schrödingera), bądź za makroskopową (w obrazie Heisenberga), zależnie od wybranej wersji formalizmu. Mamy tu więc do czynienia ze swoistą komplementarnością czasu i operacji pomiarowych: jeżeli obserwable nie zależą od czasu, to obiekty kwantowe są uczasowione; jeżeli obserwable ewoluują w czasie, to obiekty kwantowe są aczasowe. Nie wolno wszakże zapominać, że mechanika kwantowa nie jest teorią relatywistyczną, nie dzieje się ona w niezmienniczej czasoprzestrzeni, lecz – jak widać z powyższej analizy – wprowadza odróżnienie czasu od trójwymiarowej przestrzeni. W tym sensie jest ona teorią niepełną. Chcąc zrobić kolejny krok w analizie statusu czasu i przestrzeni w kwantowym świecie, należało-

by zbadać matematyczną strukturę teorii pola. Wykracza to jednak poza ramy niniejszego studium.

Widzimy więc, że zaskoczenie nielokalnością mechaniki kwantowej, odkryte dzięki nierównościom Bella, jest raczej wynikiem naszych przyzwyczajęń myślowych, niż głębokim wniknięciem w strukturę tej teorii fizycznej. Wektor stanu zawiera wszelką dopuszczalną przez teorię informację o obiekcie kwantowym. Jeżeli tym obiektem kwantowym są dwie cząstki na przeciwległych krańcach Galaktyki, to wektor stanu „wie” o ich spinie natychmiast, gdy spin jednej z cząstek zostanie zmierzony. Wektor stanu nie jest związany ograniczeniami przestrzennymi. W tym sensie mechanika kwantowa jest od początku teorią nielokalną.

Oczywiście możemy dodać do mechaniki kwantowej ukryte parametry, ale czyniąc to, zmieniamy formalizm teorii, czyli tworzymy nową teorię o zupełnie nowej ontologii w sensie Quine'a. Powstaje pytanie, czy nowa teoria różni się od starej pod względem przewidywań empirycznych. Dotychczas nie udało się pokazać żadnych różnic pod tym względem pomiędzy ortodoksyjną mechaniką kwantową a teorią BB. Bell sympatyzuje z teorią BB, ale sprawa wyboru pomiędzy nimi pozostaje kwestią gustu. Brzytwa Ockhama przemawia za ortodoksyjną mechaniką kwantową, chęć utrzymania pojęć klasycznych – za teorią BB. Ale, jak pokazał Bell, w teorii ukrytych parametrów także trzeba zrezygnować z lokalności. Czy fizyka bez pojęcia lokalności będzie miała coś wspólnego z klasycznym obrazem świata?

Georgetown, wrzesień 1993.

## JOHN BELL'S PHILOSOPHY OF QUANTUM MECHANICS

### Summary

The proof of John Bell's inequality is briefly reviewed, and its connection with the hidden parameter theory is emphasised. Bell's assessment of various interpretations of quantum mechanics allows us to reconstruct his own philosophical predilections. It turns out that he fostered rather traditional views (he favoured de Broglie-Bohm interpretation) and only under the pressure of the theorem proved by himself switched to more revolutionary standpoint. Some critical remarks are made. It is argued that quantum mechanics is a non-local theory from the very beginning: vectors of Hilbert space do not live in the physical space-time; they naturally contain all physical information available about a quantum object even if this object consists of space-like separated „parts”.