

**Henry Pierce Stapp**

***Interpretacja Kopenhaska\****

Artykuł stanowi próbę przedstawienia spójnego opisu logicznej istoty kopenhaskiej interpretacji teorii kwantów. Jego głównym stwierdzeniem jest to, że teoria kwantów jest fundamentalnie pragmatyczna, niemniej jednak kompletna. Zasadnicza trudność w rozumieniu teorii kwantów związana jest z faktem, że jej kompletność jest niezgodna z zewnętrznym istnieniem kontinuum czasoprzestrzennego fizyki klasycznej.

**I. WPROWADZENIE**

W późnych latach dwudziestych, grupa naukowców z Bohrem i Heisenbergiem na czele, wysunęła koncepcję przyrody radykalnie różniącą się od tej, która rozwinięta została przez ich poprzedników. Nowa koncepcja, wyrosła z trudu podjętego w celu zrozumienia wyraźnie irracjonalnego zachowania przyrody w dziedzinie zjawisk kwantowych, nie była po prostu nowym katalogiem elementarnych bytów (*realities*) czasoprzestrzennych i ich sposobów działania. Samą jej istotą było właśnie odrzucenie przekonania, że przyroda może zostać zrozumiana w kategoriach elementarnych czasoprzestrzennych bytów. Zgodnie z nowym poglądem, kompletnego opisu przyrody na poziomie atomowym dostarczać miały funkcje prawdopodobieństwa, które odnosiły się do nie do podstawowych mikroskopowych bytów czasoprzestrzennych, lecz raczej do makroskopowych obiektów doświadczenia zmysłowego. Ta teoretyczna struktura nie schodziła w dół, w celu zakotwiczenia się w fundamentalnych

---

\* Reprinted with permission from Henry Pierce Stapp, *The Copenhagen Interpretation*, "American Journal of Physics", 40, 1098 (1972). Copyright 1972, American Association of Physics Teachers.

mikroskopowych bytach czasoprzestrzennych. Wręcz przeciwnie, zawróciła i zakotwiczyła się w konkretnych zmysłowych realiach (*realities*) tworzących podstawę życia społecznego.

Ta radykalna koncepcja, zwana interpretacją kopenhaską, choć początkowo spotkała się z ostrą krytyką, to jednak w latach trzydziestych stała się ortodoksyjną interpretacją teorii kwantów, uznawaną przez prawie wszystkie podręczniki oraz badaczy na co dzień zajmujących się tym obszarem zjawisk.

W ostatnich latach krytyka interpretacji kopenhaskiej nasiliła się znacznie, co być może częściowo stanowi reakcję na poważne techniczne trudności dręczące obecnie teorię kwantów na poziomie fundamentalnym. Zakres stawianych zarzutów rozciąga się od stwierdzenia, że jest ona wielkim logicznym mętlikiem, do stwierdzenia, że przy całym swym radykalizmie nie jest ona bynajmniej koniecznie potrzebna, a więc należy ją odrzucić. Praca [Popper, Bunge 1967] zawiera nieprzebiegającą w słowach krytykę interpretacji kopenhaskiej. Praca [Ballentine 1970] jest artykułem przeglądowym, który, choć jest bardziej umiarkowanie sformułowany, stanowczo odrzuca jednak interpretację kopenhaską. Praca [Bastin 1970] jest zestawieniem ostatnich artykułów, z zakresu literatury fizycznej, w którym przedstawiono rozmaite poglądy na tę kwestię.

W artykułach tych uderzająca jest rozbieżność w samej kwestii rozumienia interpretacji kopenhaskiej uwidoczniła podczas obalania jej koncepcji. Na przykład obraz interpretacji kopenhaskiej przedstawiony w pracy [Popper, Bunge 1967] różni się mocno od jej przedstawienia przez czynnych zawodowo fizyków w pracach [Ballentine 1970] i [Bastin 1970]. Zresztą także i te dwie ostatnie prace nie prezentują jakiegoś jednolitego obrazu.

Nietrudno znaleźć powód tych rozbieżności. Podręcznikowe omówienia interpretacji kopenhaskiej prześlizgują się z reguły nad jej subtelnościami. Czytelników odsyła się po bliższe wyjaśnienia do prac Bohra [Bohr 1934; 1958; 1963] i Heisenberga [Heisenberg 1930]. Ale także tam trudno je znaleźć. Prace Bohra są nadzwyczaj wymijające. Rzadko udaje się z nich dowiedzieć tego, czego by się chciało. Oplatają one interpretację kopenhaską siecią słów, nie mówiąc jednak wprost czym ona jest. Prace

Heisenberga są bardziej bezpośrednie. Ale jego sposób wystawiania się sugeruje raczej interpretację subiektywną, która zdaje się stać w sprzeczności z widocznymi intencjami Bohra. Być może dobrze podsumował tę sytuację von Weizsäcker, który uznając interpretację Kopenhaską za poprawną i niezbędną, mówi, że musi „dodać, że interpretacja ta, w mojej opinii, nigdy nie została w pełni wyjaśniona. Wymaga interpretacji i to będzie jej jedyną obroną. [von Weizsäcker 1970]”.

Von Weizsäcker ma niewątpliwie rację. Jest historycznym faktem, że prace Bohra i Heisenberga nie dostarczyły klarownego i jednoznacznego obrazu podstawowej logicznej struktury ich stanowisk. Pozostawiły one wrażenia różniące się znacznie w zależności od czytelnika. Z tego powodu z pewnością potrzebne jest wyjaśnienie interpretacji kopenhaskiej. Moim celem jest jego przedstawienie. Dokładniej mówiąc, moim celem jest przedstawienie klarownego wytłumaczenia logicznej istoty interpretacji kopenhaskiej. Należy odróżnić ową logiczną istotę od niejednorodnego zbioru opinii i poglądów, które obecnie same stanowią interpretację kopenhaską. Ta logiczna istota jest, jak sądzę, stanowiskiem całkowicie racjonalnym i spójnym.

Plan niniejszego artykułu jest następujący. Na początku teorię kwantów opisano z punktu widzenia rzeczywistej praktyki. Potem, dla kontrastu, rozważono kilka interpretacji nie-kopenhaskich. Następnie, dla wprowadzenia tła, przedstawiono niektóre idee filozoficzne Williama Jamesa. Po czym, przedyskutowano pragmatyczny charakter interpretacji kopenhaskiej ze szczególnym zwróceniem uwagi na niezgodność (*incompatibility*) kompletności (*completeness*) teorii kwantów z zewnętrznym istnieniem kontinuum czasoprzestrzennego fizyki klasycznej. W końcu zbadano kwestię kompletności teorii kwantów.

## II. PRAKTYCZNE WYTŁUMACZENIE TEORII KWANTÓW

Teoria kwantów jest procedurą, dzięki której naukowcy przewidują prawdopodobieństwa, że określonego rodzaju (*of specified kinds*) pomiary dostarczą określonego rodzaju wyników w określonego rodzaju sytuacjach. Stosowana jest w

okolicznościach, które można opisać stwierdzeniem, że pewien układ fizyczny jest najpierw przygotowywany w określony sposób (*specified manner*) a potem badany w określony sposób. O badaniu tym, zwanym pomiarem, można ponadto powiedzieć, że dostarczy ono albo nie dostarczy różnych możliwych określonych wyników.

Procedura ta wygląda następująco: specyfikacje (*specifications*)  $A$ , dotyczące sposobu przygotowania układu fizycznego, są najpierw przepisywane do postaci funkcji falowej  $\Psi_A(x)$ . Zestaw zmiennych  $x$  charakteryzuje przygotowywany układ fizyczny. Zestaw ten nazywa się stopniami swobody przygotowanego układu (*prepared system*). Opis specyfikacji  $A$  jest formułowany w języku zrozumiałym dla inżyniera lub technika laboratoryjnego. Sposób, w który te operacyjne specyfikacje  $A$  tłumaczy się na język odpowiadający funkcji falowej  $\Psi_A(x)$ , zostanie omówiony później.

Podobnie, specyfikacje  $B$  dotyczące późniejszych pomiarów i ich możliwego wyniku formułuje się w języku, który pozwala odpowiednio przeszkolonemu technikowi przygotować pomiar określonego rodzaju i ustalić, czy jego wynik będzie wynikiem określonego rodzaju. Te specyfikacje  $B$ , dotyczące pomiaru i jego wyniku, są przepisywane do postaci funkcji falowej  $\Psi_B(y)$ , gdzie  $y$  jest zestawem zmiennych zwanych stopniami swobody układu poddanego pomiarowi (*measured system*).

Następnie, zgodnie z pewnymi teoretycznymi zasadami, konstruuje się funkcję transformacji  $U(x;y)$ . Funkcja ta zależy od rodzaju przygotowanego układu oraz od rodzaju układu poddanego pomiarowi, ale nie zależy od poszczególnych funkcji falowych  $\Psi_A(x)$  i  $\Psi_B(y)$ . Obliczona zostaje „amplituda przejścia” („*transition amplitude*”):

$$\langle A | B \rangle \equiv \int \Psi_A(x) U(x; y) \Psi_B^*(y) dx dy .$$

Przewidywane prawdopodobieństwo, że pomiar wykonany w sposób określony przez  $B$  dostarczy wyniku określonego przez  $B$ , jeśli przygotowanie zostało wykonane w sposób określony przez  $A$ , wynosi:

$$P(A, B) = |\langle A | B \rangle|^2 .$$

Fizyk doświadczalny rozpozna, mam nadzieję, w tym wytłumaczeniu opis sposobu, w jaki używa teorii kwantów. Najpierw transformuje on swoją informację o przygotowaniu układu na początkową funkcję falową. Potem wykonuje na niej jakieś

przekształcenia liniowe, obliczone być może z równania Schrödingera, a być może z macierzy  $S$ , które konwertują początkową funkcję falową na końcową funkcję falową. Ta końcowa funkcja falowa, która określona jest na stopniach swobody układu poddanego pomiarowi, jest potem przekształcana w funkcję falową odpowiadającą możliwemu wynikowi. Daje to amplitudę przejścia, która mnożona jest przez swoje sprzężenie zespolone, w celu uzyskania przewidywanego prawdopodobieństwo przejścia.

W bardziej zaawansowanych obliczeniach zamiast  $\Psi_A(x)$  i  $\Psi_B(y)$  można użyć, do reprezentacji przygotowanego układu i możliwego wyniku, macierzy gęstości  $\rho_A(x';x'')$  i  $\rho_B(y';y'')$ . Dzięki temu przygotowania i pomiary będą odpowiadać stanom mieszanym. Ale to uogólnienie można także uzyskać po prostu przez wykonanie klasycznego uśrednienia różnych  $\Psi_A(x)$  i  $\Psi_B(y)$ .

Powyższe wytłumaczenie opisuje, jak teorii kwantów używa się w praktyce. Istotną sprawą jest to, że uwaga skupiona jest na jakimś układzie, który jest najpierw przygotowywany w określony sposób a później badany w określony sposób. Teoria kwantów jest procedurą służącą do liczenia przewidywanego prawdopodobieństwa, że określony typ badania dostarczy jakichś określonych wyników. To przewidywane prawdopodobieństwo jest przewidywaną granicą względnej częstotliwości występowania określonego wyniku, w miarę jak liczba przygotowywanych i badanych układów zmierza do nieskończoności.

Funkcje falowe użyte w tych obliczeniach są funkcjami zestawu zmiennych charakterystycznych dla przygotowanych i poddanych pomiarom układów. Układy te są często mikroskopowe i nie są bezpośrednio obserwowalne. Funkcje falowe urządzeń przygotowujących i dokonujących pomiaru nie są uwzględniane w obliczeniach. Urządzenia te opisywane są operacyjnie. Są opisywane w kategoriach rzeczy, które mogą być rozpoznane i/lub wykorzystane przez techników. Opisy te odnoszą się do makroskopowych własności przygotowujących i dokonujących pomiaru urządzeń.

Kluczowe pytanie brzmi: jak określa się transformacje  $A \rightarrow \Psi_A$  i  $B \rightarrow \Psi_B$ . Transformacje te stanowią przepisanie proceduralnych opisów sposobu, w jaki technicy przygotowują obiekty makroskopowe i rozpoznają makroskopowe

odpowiedzi, do postaci matematycznych funkcji określonych na stopniach swobody (mikroskopowego) układu przygotowanego i poddanego pomiarowi. Problem konstrukcji tego odwzorowania jest słynnym „problemem pomiaru” w teorii kwantów.

Problem pomiaru był badany przez von Neumanna [von Neumann 1955]. Zaczął on od pomysłu, że powinno się opisać wspólny układ, złożony z początkowego układu oraz początkowych urządzeń pomiarowych, w kategoriach kwantowomechanicznej funkcji falowej i użyć samej teorii kwantów do obliczenia potrzebnych odwzorowań. Program ten nigdy nie został w praktyce zrealizowany. Jedną z trudności jest to, że obecne urządzenia makroskopowe są tak skomplikowane, że jakościowe obliczenia znajdują się poza zasięgiem obecnych możliwości. Drugim problemem jest to, że obliczenia takie mogą w każdym razie dostarczyć tylko połączeń między funkcjami falowymi  $\phi$  urządzeń przygotowujących i dokonujących pomiarów a funkcjami falowymi  $\Psi$  początkowego układu. Pozostanie problem znalezienia odwzorowań  $A \rightarrow \phi_A$  i  $B \rightarrow \phi_B$ .

Przybliżenie von Neumanna nie jest tym, które zostało przyjęte w rzeczywistej praktyce; nikt dotąd nie dał jakościowo precyzyjnego teoretycznego opisu urządzenia pomiarowego. Stąd tym, czym eksperymenciści zajmują się w praktyce, jest *kalibrowanie* (*calibrate*) ich urządzeń.

W związku z tym, trzeba zauważyć, że jeśli dokona się  $N_A$  różnych wyborów  $A$  i  $N_B$  różnych wyborów  $B$ , to wtedy mamy tylko  $N_A + N_B$  nieznanymi funkcjami  $\Psi_A$  i  $\Psi_B$ , ale  $N_A \times N_B$  doświadczalnie możliwych do określenia wielkości  $|\langle A|B \rangle|^2$ . Przy użyciu tej przekładni, razem z wiarygodnymi założeniami o gładkości (*smoothness*), możliwe jest przygotowanie katalogu odpowiedniości między tym, co fizycy doświadczalni robią i widzą a funkcjami falowymi układów przygotowanych i poddanych pomiarowi. Jest on zbiorem zgromadzonej wiedzy empirycznej, która przerzuca most między operacyjnymi specyfikacjami  $A$  i  $B$  a ich matematycznymi obrazami  $\Psi_A$  i  $\Psi_B$ .

Powyższy opis tego, jak teoria kwantów jest używana w praktyce, zostanie wykorzystany do wytłumaczenia interpretacji kopenhaskiej. Przed opisem samej interpretacji podam, dla kontrastu, opis kilku innych przybliżeń.

### III. KILKA INNYCH PRZYBLIŻEŃ

#### A. Przybliżenie absolutnej funkcji falowej (The *Absolute- $\Psi$* Approach)

Przejrzysta analiza procesu pomiaru, dokonana przez von Neumanna, jest obecnie źródłem wielu zmartwień w kwestii interpretacji teorii kwantów. Podstawową budzącą niepokój sprawę można zilustrować prostym przykładem.

Założmy, że cząstka właśnie przeszła przez jedną z dwu szczelin. I założmy, że za każdą ze szczelin umieszczony jest wydajny w 100% licznik; tak więc widząc, który licznik „się zapala”<sup>1</sup>, ludzki obserwator może określić, przez którą szczelinę cząstka przeszła.

Założmy, że początkowo cząstka jest reprezentowana przez funkcję falową, która przypisuje równe prawdopodobieństwo częściom związanym z obiema szczelinami. Rozważmy teoretyczną kwantową analizę procesu pomiaru, w którym zarówno cząstka, jak oba liczniki są reprezentowane przez funkcje falowe.

Z zasady superpozycji (tj. liniowości) wynika bezpośrednio i natychmiast, że funkcja falowa całego układu będzie, siłą rzeczy, składać się po pomiarze z superpozycji dwóch wyrazów. Pierwszy wyraz reprezentować będzie sytuację, w której: (1) cząstka przeszła przez pierwszy licznik, (2) pierwszy licznik się zapalił i (3) drugi licznik się nie zapalił. Drugi wyraz reprezentować będzie sytuację, w której: (1) cząstka przeszła przez drugi licznik, (2) drugi licznik się zapalił i (3) pierwszy licznik się nie zapalił. Te dwa wyrazy ewoluują z dwóch wyrazów w funkcji falowej cząstki początkowej. Obecność obu wyrazów jest bezpośrednią i nieuchronną konsekwencją zasady superpozycji, która gwarantuje, że suma jakichkolwiek dwóch rozwiązań równania jest innym rozwiązaniem.

---

<sup>4</sup> W oryginale: „ (...) by seeing which counter fires a human observer can determine through which slit the particle passed.”. Przez “zapalenie się” licznika należy tu chyba rozumieć włączenie się jakiejś lampki kontrolnej, która informuje prowadzącego eksperyment o tym, że to urządzenie pomiarowe zarejestrowało badaną cząstkę (przyp. tłum.).

Należy teraz zauważyć, że liczniki są makroskopowymi obiektami i że funkcja falowa musi koniecznie zawierać sumę dwóch wyrazów, z których jeden odpowiada zapaleniu się pierwszego licznika oraz nie zapaleniu się drugiego, a drugi z nich odpowiada zapaleniu się drugiego licznika oraz nie zapaleniu się pierwszego. Stąd funkcja falowa, siłą rzeczy, odpowiada sumie dwóch logicznie wykluczających się *makroskopowych* możliwości.

Aby udratyzować tę sytuację, założmy, że obserwator ludzki będzie teraz patrzeć na liczniki i biegać w górę lub w dół po schodach, w zależności od tego, który z widzianych przez niego liczników się zapali. Zatem funkcja falowa całego układu – cząstki plus liczników plus ludzkiego obserwatora – będzie składać się ostatecznie z sumy dwóch wyrazów. Jeden wyraz będzie odpowiadać wbieganiu ludzkiego obserwatora po schodach w górę, a drugi – zbieganiu tego samego ludzkiego obserwatora po schodach w dół. Oba wyrazy muszą koniecznie być obecne w funkcji falowej, po prostu ze względu na zasadę superpozycji.

Konieczne rozwinięcie się funkcji falowej w sumę części odpowiadających wykluczającym się *makroskopowym* możliwościom, trzeba jednak jakoś uzgodnić z faktami empirycznymi. Ludzki obserwator nie biegnie i w górę i w dół po schodach. Biegnie on w jednym lub drugim kierunku, ale nie w obydwu. Dlatego funkcja falowa musi zredukować się (*collapse*) do formy, która odpowiada temu, co rzeczywiście się dzieje. Ale takie przekształcenie jest zdecydowanie niezgodne z zasadą superpozycji.

To pogwałcenie zasady superpozycji martwi niektórych myślicieli. Wigner [Wigner 1963] nazywa istnienie dwóch sposobów zmiany funkcji falowej – tj. gładkiej przyczynowej (*causal*) ewolucji i gwałtownych (*fitful*) statystycznych skoków związanych z pomiarami – dziwnym dualizmem i twierdzi, że probabilistyczne zachowanie jest niemalże diametralnie przeciwstawne temu, czego można by się spodziewać po zwykłym eksperymencie. On i Ludwig [Ludwig 1961] rozważają możliwość, że aby uzyskać spójną teorię pomiarów, należy być może zmodyfikować teorię kwantów dodając w jej opisie makroskopowym efekt nieliniowy. Wigner [Wigner 1962, 284] rozważa nawet możliwość, że nieliniowość ta może być związana z działaniem umysłu na materię.



Jeszcze bardziej radykalną propozycję wysunął Everett [Everett 1957], a poparli ją Wheeler [Wheeler 1957] i Bryce DeWitt [DeWitt 1970]. Zgodnie z tą propozycją, ludzki obserwator biegnie po schodach w obu kierunkach, w górę i w dół, w tym samym czasie. Kiedy ludzki obserwator widzi zapalający się licznik, rozpada się na (*breaks into*) dwie oddzielne wersje (*editions*) siebie samego, z których jedna biegnie w górę, podczas gdy druga zbiega w dół. Jednakże części funkcji falowej odpowiadające tym dwu różnym możliwościom poruszają się w kierunku różnych obszarów wielocząstkowej przestrzeni konfiguracyjnej i, co za tym idzie, nie interferują ze sobą. Dlatego jedna wersja nigdy nie będzie świadoma istnienia drugiej. W ten sposób można ocalić ich istnienie bez pogwałcenia zasady superpozycji.

Propozycja ta jest, jak uważam, nierozsądna. Iloczyn funkcji falowej i jej sprzężenia zespolonego ma matematyczne własności funkcji prawdopodobieństwa. Funkcje prawdopodobieństwa układów złożonych są naturalnie zdefiniowane na iloczynie przestrzeni indywidualnych układów składowych; to ta własność pozwala różnym logicznie alternatywnym możliwościom przypisać różne wagi statystyczne. Rozkład funkcji falowej na części odpowiadające różnym logicznie częściom alternatywy jest więc zupełnie naturalny. W opisanym przykładzie – z początkową specyfikacją, jaka została tam opisana – istnieje skończone prawdopodobieństwo, że obserwator będzie wbiegać w górę po schodach i skończone prawdopodobieństwo, że będzie on zbiegać w dół. Stąd funkcja falowa koniecznie musi mieć obie części. Jeśli zredukuje się do jednej lub do drugiej części, nie będzie już opisywać poprawnie prawdopodobieństw odpowiadających początkowym specyfikacjom.

Oczywiście, jeśli początkowe specyfikacje zostaną zamienione na nowe, która będą zawierać wymóg, że obserwator wbiega po schodach w górę a nie w dół, to wtedy początkowa funkcja falowa zostanie naturalnie zastąpiona nową, zupełnie tak, jak by było w klasycznej teorii statystycznej.

Krótko mówiąc, matematyczne własności funkcji falowych zupełnie pasują do opisu ewolucji *prawdopodobieństw* faktycznych (*actual*) rzeczy, a nie samych faktycznych rzeczy. Pomysł, że opisują one również ewolucję samych faktycznych rzeczy prowadzi do metafizycznych potworności (*metaphysical monstrosities*). Może

dałoby się je zaakceptować, gdyby były koniecznymi konsekwencjami niezbitej logiki. Ale trudno tak powiedzieć o tym przypadku. U samych podstaw propozycji Everetta leży przesłanka, że zasada superpozycji nie może nagle zawieść. Przesłanka jest rozsądna. Ale naturalna i rozsądna konkluzja, jaką należy z niej wyciągnąć jest taka, że funkcje falowe opisują ewolucję *prawdopodobieństw* faktycznych rzeczy – nie ewolucję samych faktycznych rzeczy. Dlatego, że matematyczna forma i własności funkcji falowej, włączając w to słusznie jej (zgodny z zasadą superpozycji) rozwój, są zupełnie zgodne z założeniem, że jest to funkcja prawdopodobieństwa. Dodanie metafizycznego założenia, że funkcja falowa reprezentuje ewolucję nie tylko prawdopodobieństw faktycznych rzeczy, ale także samych faktycznych rzeczy, jest nierozsądne, gdyż czyni się to w celu zachowania zasady superpozycji, chociaż wcale nie jest ona zagrożona nawet, gdy się go nie wprowadzi.

Propozycje Everetta, a także Wignera i Ludwiga, są następstwem pewnej tendencji do przypisywania funkcji falowej jakości absolutności, która wykracza poza to, co zwykle i naturalnie jest łączone z funkcją prawdopodobieństwa. Być może tendencję tę można odnaleźć w tym, co Rosenfeld [Rosenfeld 1968] nazywa „radikalną różnicą w koncepcji (nawiązując do von Neumanna) (...)” w porównaniu z pomysłami Bohra. Zastosowanie przez von Neumanna teorii kwantów do samego procesu pomiaru, w połączeniu z potraktowaniem jako paralelne dwóch bardzo różniących się sposobów rozwoju funkcji falowej – tj. gładkiej dynamicznej ewolucji i nagłych zmian związanych z pomiarem – skłania się do przywołania obrazu jakiejś absolutnej funkcji falowej rozwijającej się w czasie pod wpływem dwóch różnych dynamicznych mechanizmów. Naukowiec z krwi i kości, zmieniający funkcję falową, której używa, kiedy otrzymuje więcej informacji, zostaje zastąpiony nowym dynamicznym mechanizmem. Wynikający stąd obraz jest istotnie dziwny.

Interpretacja kopenhaska jednoznacznie odrzuca koncepcję absolutnej funkcji falowej reprezentującej świat sam w sobie (*the world itself*). Funkcje falowe, podobnie jak odpowiadające im w fizyce klasycznej funkcje prawdopodobieństwa, związane są z badaniem przez naukowców układów zamkniętych (*finite systems*). Urządzenia, za pomocą których przygotowywane a potem badane są takie układy, uważa się za części

zwykłego świata fizyki klasycznej. Ich czasoprzestrzenne rozmieszczenie jest interpretowane przez naukowców jako informacja o przygotowanych i zbadanych układach. Tylko te układy reprezentowane są przez funkcje falowe. Uwzględnione prawdopodobieństwa są prawdopodobieństwami określonych odpowiedzi urządzeń pomiarowych w określonych warunkach.

Nowej dostępnej naukowcowi informacji można użyć na dwa sposoby. Można ją uważać za informację o odpowiedzi urządzeń dokonujących pomiaru na badanie układu. W tym przypadku, obiektem zainteresowania jest prawdopodobieństwo tej odpowiedzi. Z drugiej strony, nowa informacja może także być uważana za część specyfikacji nowego przygotowania. Funkcja falowa, która reprezentuje tę nową specyfikację, będzie naturalnie różna od funkcji falowej, która reprezentuje początkową specyfikację. Nikt nie spodziewa się utrzymania zasady superpozycji przy zmianie funkcji falowej związanej ze zmianą specyfikacji.

Ten pragmatyczny opis zostanie przeciwstawiony opisom, które usiłują spoglądać na to, co znajduje się „za kulisami” („*behind the scenes*”) i mówią nam, co się „dzieje naprawdę”. Takie nałożone (*superimposed*) obrazy mogą być określone jako metafizyczne dodatki, jeśli tylko nie mają one weryfikowalnych (*testable*) konsekwencji. Pragmatyczna interpretacja ignoruje wszystkie takie metafizyczne dodatki.

Zarysowane w tym rozdziale ostre rozróżnienie między prawdopodobieństwami a faktycznymi rzeczami, do których się one odnoszą, nie powinno być odebrane jako akceptacja interpretacji realnych cząstek (*real-particle interpretation*), która zostanie opisana poniżej.

## **B. Interpretacja cząstek realnych**

Według interpretacji realnych cząstek, istnieją realne cząstki, przez które rozumie się maleńkie zlokalizowane obiekty, zaburzenia, osobliwości lub inne rzeczy, które pozostają niezienne, jak na cząstki przystało – nie rozchodzą się jak fale. Zgodnie z tą interpretacją, funkcje prawdopodobieństwa teorii kwantów opisują,

zgodnie z ich istotą, prawdopodobieństwo, że realna cząstka jest w takim-a-takim obszarze. Interpretacji realnych cząstek broni Popper w pracy [Rosenfeld 1968] oraz Ballentine'a w pracy [Ballentine 1970].

Przeświadczenie o istnieniu realnych cząstek zostało przywrócone po wykazaniu przez Bohma [Bohm 1952], że istnienie cząstek punktowych można uzgodnić z nierelatywistyczną teorią Schrödingera. Cena, jaką trzeba zapłacić za to osiągnięcie jest następująca: wszystkie cząstki w (modelowym) wszechświecie są natychmiastowo i mocno ze sobą połączone. To, co się dzieje z jakąkolwiek cząstką we wszechświecie, natychmiast i gwałtownie wpływa na każdą inną cząstkę.

W takim razie nie jest jasne, czy powinniśmy wciąż używać terminu „cząstka”. Dlatego, że całkowity zbiór „cząstek” we wszechświecie Bohma działa jak jeden zespolony byt (*entity*). Nasze zwykłe pojęcie (*idea*) cząstki jest abstrakcją z doświadczania obiektów makroskopowych i zwykle niesie ze sobą, jako część pojęcia lokalizacji, myśl (*idea*), że zlokalizowany byt jest bytem niezależnym, w tym sensie, że zależy od innych rzeczy we wszechświecie tylko za pośrednictwem różnych „dynamicznych” efektów. Te dynamiczne efekty charakteryzuje się przez pewne podleganie (*certain respect*) rozdzieleniom czasoprzestrzennym. W szczególności, są one „przyczynowe” („*causal*”). Jeśli połączenia między cząstkami radykalnie wykraczają poza nasze pojęcie przyczynowych dynamicznych relacji, to trafność słowa „cząstka” można zakwestionować.

Ostatnio Bell [Bell 1964] wykazał, że statystyczne przewidywania teorii kwantów są zdecydowanie niezgodne z istnieniem podstawowej (*underlying*) rzeczywistości, której przestrzennie rozdzielone cząstki są niezależnymi bytami (*realities*) połączonymi tylko przyczynowymi dynamicznymi relacjami. Przestrzennie rozdzielone cząstki podstawowej rzeczywistości muszą być połączone w sposób, który całkowicie wykracza poza obszar przyczynowych dynamicznych połączeń. Przestrzennie rozdzielone cząstki takiej podstawowej rzeczywistości nie są niezależnymi bytami, w zwykłym znaczeniu.

Twierdzenie Bella nie wyklucza kategorycznie interpretacji realnych cząstek, jeśli byłoby się skłonny przyjąć te hiperdynamiczne połączenia (*hyperdynamical*

*connections*). Ale to umocniłoby opinię, że dynamiczna teoria, opierająca się na takim realnym byciu (*real entity*), nie miałaby weryfikowalnych dynamicznych konsekwencji. A to ze względu na to, że silna zależność indywidualnych zjawisk tu na Ziemi od subtelnych szczegółów wydarzeń, które mają miejsce w całym wszechświecie, faktycznie wyklucza jakikolwiek zwykły rodzaj testu takiej teorii.

#### IV. PRAGMATYCZNA KONCEPCJA PRAWDY

Aby przygotować umysł na interpretację kopenhaską, dobrze jest przywołać niektóre koncepcje (*ideas*) Williama Jamesa [James 1970]<sup>2</sup>. James uzasadniał dość obszernie, jak na tak oczywistą koncepcję, co rozumie on przez to, że myśl (*idea*) jest prawdziwa. Koncepcję tę można wyrazić krótko: myśl jest prawdziwa, jeśli jest użyteczna (*if it works*).

Propozycja Jamesa została początkowo, jak można się spodziewać, wyszydzone i wyśmiana przez większość filozofów. A to dlatego, że większość ludzi łatwo zauważa dużą różnicę między tym, czy myśl jest prawdziwa a tym, czy jest użyteczna. Mimo to, James stanowczo bronił swej koncepcji, twierdząc, że został źle zrozumiany przez krytyków.

Warto spróbować spojrzeć na sprawę z punktu widzenia Jamesa.

James akceptuje oczywiście twierdzenie, że prawdziwość myśli oznacza jej zgodność z rzeczywistością. Nasuwają się tu jednak pytania: czym jest „rzeczywistość” (*reality*), z którą prawdziwa myśl jest zgodna, oraz czym jest relacja „zgodności z rzeczywistością” (*agreement with reality*), ze względu na którą myśl staje się prawdziwa?

Wszystkie ludzkie myśli (*ideas*) znajdują się z definicji w dziedzinie doświadczenia (*realm of experience*). Tymczasem, rzeczywistość ma, jak się zwykle uważa, części leżące poza tą dziedziną. Stąd powstaje pytanie: jak myśl, znajdująca się wewnątrz dziedziny doświadczenia, może być zgodna z czymś znajdującym się na

---

<sup>2</sup> To odwołanie się do Jamesa nie znaczy, że koncepcje przedstawione w tym rozdziale są dokładnie tymi Jamesa lub całkowicie tymi Jamesa. Niezliczeni filozofowie mówili podobne rzeczy.

zewnątrz? Jak pojmuje się relację między myślą z jednej strony a czymś tak fundamentalnie innego rodzaju? Jaka jest strukturalna forma połączenia między myślą a pozadoświadczeniową rzeczywistością, które nazywa się „zgodnością”? Jak można pojąć taką relację za pomocą myśli, które są zawsze zamknięte w dziedzinie doświadczenia?

Pogląd Jamesa, jak sądzę, opiera się w całej rozciągłości na tym, że relacja między myślą a czymś innym może być pojęta tylko wtedy, gdy to coś innego jest także myślą. Myśli są na zawsze zamknięte w dziedzinie myśli. Mogą one „poznać” („*know*”) lub „zgadzać się” („*agree*”) tylko z innymi myślami. Dla skończonego umysłu nie jest możliwe pojęcie czy wytłumaczenie zgodności między myślą a czymś, co leży poza dziedziną doświadczenia.

Jeśli więc chcielibyśmy wiedzieć, co to znaczy, że myśl, zgadza się z rzeczywistością, musielibyśmy najpierw zaakceptować fakt, że rzeczywistość ta znajduje się w dziedzinie doświadczenia.

Ten punkt widzenia nie jest jednak zgodny ze zwykłym pojęciem (*idea*) prawdy. Pewne z naszych myśli są myślami o tym, co znajduje się poza dziedziną doświadczenia. Na przykład, mogę mieć myśl, że świat składa się z maleńkich obiektów zwanych cząstkami. Według zwykłego poglądu na prawdę, myśl ta jest prawdziwa lub fałszywa zgodnie z tym, czy rzeczywiście (*really*) jest tak, że świat składa się z takich cząstek, czy też tak nie jest. Prawdziwość myśli zależy od tego, czy pozostaje ona w zgodności z czymś, co leży poza dziedziną doświadczenia.

Dalej, pojęcie (*notion*) „zgodności” zdaje się sugerować jakiś rodzaj podobieństwa czy przystawania (*congruence*) rzeczy, które pozostają w zgodności. Ale rzeczy, które są podobne lub przystające są na ogół rzeczami tego samego rodzaju. Dwa trójkąty mogą być podobne lub przystające, ponieważ są one rzeczami tego samego rodzaju – relacja, która tkwi w istocie (*inhere*) jednego może być odwzorowana (*mapped*) w bezpośredni i prosty sposób na relację, która tkwi w istocie drugiego.

Jednak myśli i zewnętrzne byty (*realities*) są przypuszczalnie bardzo różnymi rodzajami rzeczy. Nasze myśli są ściśle związane z pewnym kompleksem: makroskopowymi, biologicznymi bytami (*entities*) – naszymi mózgami; a strukturalne

formy, które mogą tkwić w istocie naszych myśli, jak można się naturalnie spodziewać, zależą od strukturalnych form naszych mózgów. Z kolei zewnętrzne byty mogą się strukturalnie bardzo różnić od ludzkich myśli. Tak więc nie ma *apriorycznego* powodu, by spodziewać się, że relacje, które stanowią lub charakteryzują istotę (*essence*) zewnętrznej rzeczywistości (*reality*), mogłyby zostać odwzorowane, w jakikolwiek prosty czy bezpośredni sposób, na świat ludzkich myśli. Zatem, jeśli nie istnieje takie odwzorowanie, to całe pojęcie (*idea*) „zgodności” między myślami a zewnętrznymi bytami staje się niejasne.

Jedynym świadectwem, przemawiającym za możliwością ustalenia dokładnej odpowiedniości ludzkich myśli i istot (*essences*) zewnętrznych bytów, jest powodzenie (*success*) we wprowadzaniu porządku do naszego fizycznego doświadczenia. Mimo to, powodzenie myśli (*ideas*) na tym polu nie zapewnia dokładnej odpowiedniości naszych pojęć (*ideas*) i zewnętrznych bytów.

Niemniej jednak, pytanie czy myśli „zgadzają się” („agree”) z zewnętrznymi istotami (*essences*) nie ma praktycznego znaczenia. Ważne jest właśnie powodzenie pojęcia (*idea*) – jeśli pojęcia są skuteczne (*successful*) we wprowadzaniu porządku do naszego doświadczenia, to są użyteczne, nawet jeśli nie „zgadzają się”, w jakiś absolutny sposób, z zewnętrznymi istotami. Co więcej, jeśli są skuteczne we wprowadzaniu porządku do naszego doświadczenia, to „zgadzają się” przynajmniej z tymi aspektami naszego doświadczenia, które z powodzeniem porządkują. Dalej, to tylko zgodność z aspektami naszego doświadczenia może rzeczywiście zostać pojęta przez człowieka. To, co nie jest myślą, jest ze swej natury niepojmowalne i takie też są relacje między tym czymś, a innymi rzeczami. Prowadzi to do pragmatycznego punktu widzenia: pojęcia muszą być oceniane raczej za ich skuteczność i użyteczność w świecie myśli i doświadczenia, niż na podstawie jakichś w swej istocie niepojmowalnych „zgodności” z nie-myślami (*nonideas*).

Znaczenie tego punktu widzenia dla nauki polega na tym, że neguje on pomysł, że celem nauki jest konstrukcja mentalnego i matematycznego obrazu świata samego w sobie (*the world itself*). Zgodnie z tym pragmatycznym punktem widzenia, właściwym celem jest zwiększanie obszaru naszego doświadczenia i jego

porządkowanie. Naukowa teoria powinna być oceniana ze względu na to, jak dobrze służy rozszerzeniu zakresu naszego doświadczenia i zaprowadzaniu w nim porządku (*reduce to order*). Nie wymaga to dostarczenia mentalnego czy matematycznego obrazu świata samego w sobie, ponieważ strukturalna forma świata samego w sobie może być taka, że nie da się umieścić jej w prostej odpowiedniości z rodzajami struktur, które mogą być formowane przez nasze procesy mentalne.

James został oskarżony o subiektywizm – o zaprzeczanie istnieniu obiektywnej prawdy. Broniąc się przed tym zarzutem, który odebrał jako oszczerstwo, wprowadził interesującą ontologię składającą się z trzech obiektów: (1) pojęć prywatnych (*private concepts*), (2) obiektów zmysłowych (*sense objects*), (3) bytów nadzmysłowych (*hypersensible realities*). Pojęcia prywatne są doświadczeniami subiektywnymi. Obiekty zmysłowe są publicznymi (*public*) bytami zmysłowymi, tj. zmysłowymi bytami, które są niezależne od jednostki. Byty nadzmysłowe są bytami, które istnieją niezależnie od wszystkich ludzkich istot myślących [tamże, 239]<sup>3</sup>.

O bytach nadzmysłowych mówi James tylko nie wprost, jako że dostrzega, że nasza wiedza o takich rzeczach jest zawsze niepewna; a poza tym, że nie możemy nawet pomyśleć o takich rzeczach bez zastępowania ich mentalnymi substytutami, którym brakuje sprecyzowanych cech tego, co zastępują, mianowicie własności istnienia niezależnie od wszystkich ludzkich istot myślących.

Ciekawym pomysłem Jamesa są obiekty zmysłowe. Są one bytami zmysłowymi i dlatego należą do dziedziny doświadczenia. Mimo to, są publiczne: niezależne od jakiegokolwiek jednostki. Krótko mówiąc, są obiektywnymi doświadczeniami. Tymczasem potocznie uważa się, że doświadczenie jest osobiste i subiektywne, a nie publiczne i obiektywne.

---

<sup>6</sup> Odnośny cytat w polskim przekładzie (James, W. (2000), *Znaczenie prawdy*, przeł. Michał Szczubiałka, Warszawa: Wydawnictwo KR, s.191) brzmi: „Naszym życiem poznawczym włada zatem swego rodzaju triumwirat: jak nasze pojęcia prywatne reprezentują realności zmysłowe, do których nas prowadzą i które są niezależnymi od jednostki realiami publicznymi, tak i owe realia zmysłowe mogą reprezentować realności pewnego porządku nadzmysłowego, elektrycy, tworzywo umysłu, Boga i co tam jeszcze – coś, co istnieje niezależnie od ludzkich umysłów” (przyp. tłum.).



Pomysł doświadczanych obiektów zmysłowych, rozumianych jako publiczne czy obiektywne byty, przewija się w pracach Jamesa. Doświadczenie „tygrys” może pojawiać się w mentalnych historiach wielu różnych jednostek. „To biurko” jest czymś, co ja mogę chwycić i czym mogę potrząsnąć, ale także ty możesz je chwycić i nim potrząsnąć. O tym biurku pisze James: „Jedziemy więc na jednym wózku; możemy zamienić się miejscami; i tak jak wy ręczycie za moje biurko, ja mogę ręczyć za wasze. Owo zaczerpnięte z potocznego doświadczenia społecznego realności niezależnej ode mnie i od was legło u podstaw pragmatystycznej definicji prawdy. [tamże, 217]<sup>4</sup>”.

Słowa te należy, jak sądzę, zestawić ze słowami Bohra o klasycznych pojęciach jako o podstawach komunikacji między naukowcami. W obu przypadkach uwaga jest skupiona na konkretnie doświadczanych bytach zmysłowych – takich jak potrząśnięcie biurkiem – jako fundamencie społecznej rzeczywistości. Z tego punktu widzenia, obiektywny świat nie jest w zasadzie zbudowany z takich zwiewnych abstrakcji jak elektrony i protony czy „przestrzeń”. Przeciwnie, oparty jest on na konkretnych realiach (*realities*) zmysłowych społecznego doświadczenia, takich jak bryła betonu trzymana w rękach, miecz wykuty przez kowala, licznik Geigera przygotowany zgodnie ze specyfikacjami przez techników laboratoryjnych i umieszczony w określonym miejscu przez fizyków doświadczalnych.

Ta krótka dygresja filozoficzna wprowadza tło dla interpretacji kopenhaskiej – w zasadzie przesuwając nas do filozoficznej perspektywy, podobnej do tej Williama Jamesa.

## V. PRAGMATYCZNY CHARAKTER INTERPRETACJI KOPENHASKIEJ

Logiczną istotę (*essence*) interpretacji kopenhaskiej można streścić w dwóch następujących stwierdzeniach:

- (1) teoretyczny formalizm kwantów powinien być interpretowany *pragmatycznie*;
- (2) teoria kwantów dostarcza kompletnego (*complete*) naukowego wytłumaczenia zjawisk atomowych.

---

<sup>7</sup> tamże, s. 173 (przyp. tłum.)

W punkcie (1) stwierdza się, że teoria kwantów jest *fundamentalnie* (*fundamentally*) procedurą opisaną w praktycznym wy tłumaczeniu teorii kwantów wyłożonym w Rozdziale II. Centralnym problemem interpretacji kopenhaskiej jest pogodzenie tego stwierdzenia ze stwierdzeniem, że jest ona zupełna, tj. pogodzenie stwierdzeń (1) i (2). Problem ten jest dyskutowany w Rozdziale VII.

Celem tego rozdziału jest udokumentowanie punktu (1) przy użyciu słów Bohra. Trzeba definitywnie ustalić tę sprawę, gdyż krytycy często myślą interpretację kopenhaską, która jest z zasady pragmatyczna, z diametralnie przeciwstawną jej interpretacją absolutnej funkcji falowej, opisaną w Rozdziale III. Następnie, szczególnie uwaga poświęcona zostanie możliwemu konfliktowi pragmatycznego punktu widzenia: (i) z elementem realizmu w nastawieniu Bohra do makroskopowego świata oraz (ii) z jakimkolwiek zaangażowaniem w (*commitment to*) fundamentalne stochastyczne lub statystyczne elementy samej przyrody.

Poniższe cytaty z Bohra są zaczerpnięte z jego trzech głównych prac [Bohr 1934; 1958; 1963]: (I.) *Teoria atomowa i opis przyrody*; (II.) *Fizyka atomowa a wiedza ludzka*; (III.) *Eseje 1958-1962 o fizyce atomowej i ludzkiej wiedzy*<sup>5</sup>.

Już początkowe słowa pierwszej książki Bohra wyznaczają pragmatyczną orientację interpretacji kopenhaskiej: „Zadaniem nauki jest zarówno rozszerzenie zakresu naszego doświadczenia jak i zaprowadzenie w nim porządku (*reduce it to order*) (...) (I.1).”; „W fizyce (...) nasz problem polega na koordynacji naszego doświadczenia zewnętrznego świata (...) (I.1)”; „W naszym opisie przyrody celem nie jest ukazanie prawdziwej istoty (*essence*) zjawiska, lecz tylko znalezienie, o ile to tylko możliwe, relacji między wielorakimi aspektami naszego doświadczenia (I.18).”.

---

<sup>5</sup> Spośród cytowanych przez autora dzieł Bohra jedynie drugie ukazało się w polskim przekładzie. Cytaty oznaczone symbolem „II” (zachowano oryginalne oznaczenia autora wraz z numeracją stron odnoszącą się do oryginalnego wydania dzieła w języku angielskim [Bohr 1958]) przytoczono za polskim tłumaczeniem: Bohr, N. (1963), *Fizyka atomowa a wiedza ludzka*, przeł. W. Staszewski, S. Szpikowski, A. Teske, Warszawa: PWN. Fragmenty pozostałych wymienionych tu dzieł Bohra ([Bohr 1934] i [Bohr 1963] oznaczone odpowiednio: „I” i „III”) cytowane są w przekładzie zaproponowanym przez autora tłumaczenia niniejszego artykułu (przyp. tłum.).

To oddanie nauki pragmatycznemu punktowi widzenia przewija się we wszystkich pracach Bohra. Później łączy je on z kluczowym problemem komunikacji: „Celem nauki jest powiększanie i uporządkowanie danych doświadczenia, toteż każda analiza warunków ludzkiego poznania musi z konieczności opierać się na rozważeniu charakteru i zasięgu naszych środków porozumiewania się. (II.88)”; „W związku z tym należy sobie dobrze uprzytomnić, że w każdym sprawozdaniu z doświadczenia fizycznego musimy opisywać zarówno warunki eksperymentalne, jak i obserwacje przy pomocy takich samych sposobów porozumiewania się, jakie używane są w fizyce klasycznej. (II.88)”; „Decydującą sprawą jest dostrzeżenie, że opis eksperymentalnego przygotowania i zapis obserwacji muszą być wyłożone prostym językiem, odpowiednio dopracowanym dzięki użyciu zwyczajnego słownictwa. Jest to prosty logiczny wymóg, jako że słowem ‘eksperyment’ możemy opisywać tylko procedurę, dzięki której jesteśmy w stanie komunikować innym, co zrobiliśmy i czego się nauczyliśmy. (III.3)”; „(...) musimy przede wszystkim uznać, że również wówczas, gdy zjawiska wykraczają poza zakres klasycznej fizyki, opis urządzeń eksperymentalnych i wyniki obserwacji muszą być podane w prostym zrozumiałym języku, odpowiednio uzupełnionym techniczno-fizyczną terminologią. Jest to jasne i logiczne żądanie, ponieważ samo słowo „doświadczenie” odnosi się do sytuacji, w której możemy powiedzieć innym, czegośmy dokonali i czegośmy się nauczyli. (II.72)”.

Oddanie Bohra pragmatycznej interpretacji formalizmu kwantowomechanicznego jest jednoznaczne: „(...) właściwa interpretacja symbolicznego formalizmu kwantowomechanicznego daje tylko przewidywania zdeterminowanego lub statystycznego charakteru, dotyczące indywidualnych zjawisk, które występują w warunkach określonych pojęciami fizyki klasycznej. (II.64)”; „(...) nowy formalizm nie pozwala na modelową interpretację zjawisk, jaką stosowano dawniej, ale zmierza wprost do ustanowienia zależności pomiędzy obserwacjami dokonywanymi w ściśle określonych warunkach. (II.71)”; „Formalizm mechaniki kwantowej, którego jedynym celem jest jednolite ujęcie obserwacji dokonywanych w warunkach opisanych przy pomocy prostych pojęć fizycznych, (...). (II.90)”; „Mówiąc ściśle, matematyczny formalizm kwantowej mechaniki i elektrodynamiki oferuje

jedynie zasady obliczeń w dedukcji oczekiwań dotyczących obserwacji uzyskanych w dobrze zdefiniowanych warunkach eksperymentalnych, określonych (*specified*) przez pojęcia fizyki klasycznej. (III.60)”.

W pismach Bohra milcząco przyjęta jest myśl, że zewnętrzny świat istnieje i że nasze fizyczne doświadczenia są po części spowodowane przez przebieg zewnętrznych zdarzeń. Jest to całkiem zgodne z pragmatyzmem: James uznaje istnienie nadzmysłowych bytów. Jednak Bohr nie podziela myśli, że makroskopowy świat jest rzeczywiście tym, czym miałby być według naszych naiwnych wyobrażeń. Uwaga jest tu skupiona na *opisach* naszych fizycznych doświadczeń i wymogu, żeby zapewniały one jednoznaczną komunikację i obiektywność. Odnosząc się do doświadczalnych uzgodnień i obserwacji mówi on: „Opis zjawisk atomowych ma pod tym względem całkowicie obiektywny charakter, w tym znaczeniu, że nie czyni się jawnego odniesienia do jakiegokolwiek indywidualnego obserwatora więc, odpowiednio uwzględniając wymogi relatywistyczne, nie wprowadza się dwuznaczności w przekazywaniu informacji. Jeżeli chodzi o wszystkie te sprawy, problem obserwacji fizyki kwantowej w żaden sposób nie różni się od przybliżenia fizyki klasycznej. (III.3)”. Bohr najbardziej, jak sądzę, zbliża się do uznania poglądu, że makroskopowy świat jest tak naprawdę tym, czym wydaje się być, w zdaniu: „Rezygnacja z obrazowego przedstawienia dotyczy wyłącznie stanu obiektów atomowych, natomiast podstawa opisu warunków doświadczalnych nie uległa zmianie i swobodny wybór tych warunków jest w pełni zachowany. (II.90)”. Przyznaje się tu teorii kwantów, jak sądzę, raczej trafność klasycznego *opisu* warunków doświadczalnych niż *fundamentalną* trafność klasycznych pojęć na poziomie makroskopowym. Stanowisko to pozostaje w całkowitej zgodności z pragmatyzmem.

Jeżeli chodzi o nieredukowalny (*irreducible*) statystyczny element teorii kwantów, Bohr był na początku ambiwalentny. Początkowe przyjęcie pomysłu fundamentalnego elementu losowości czy indeterminizmu ze strony przyrody sugerowałoby zdanie: „(...) zostaliśmy zmuszeni (...), aby liczyć się z wolnym wyborem ze strony przyrody między różnymi możliwościami, do których mogą być zastosowane

tylko interpretacje probabilistyczne. (I.4)”. Jednak szybko precyzuje on tę myśl (I.19) i mówi później na konferencji Solvaya:

(...) wynikła interesująca dyskusja na temat, jak należy mówić o występowaniu zjawisk, które można tylko statystycznie przewidywać. Chodziło o to, czy do wydarzeń indywidualnych należy stosować terminologię proponowaną przez Diraca, według której „przyroda” dokonywa wyboru, czy też, jak sugerował Heisenberg, należy powiedzieć, że mamy tu do czynienia z wyborem ze strony „obserwatora” budującego instrumenty pomiarowe i odczytującego ich wskazania. Jednakże każda taka terminologia budzi wątpliwości. Trudno przecież przypisać przyrodzie wolę w zwykłym sensie tego słowa; jest też z pewnością niemożliwe, by obserwator wpływał na wydarzenia mogące nastąpić w warunkach, które był obrał. Według mego zdania jest tylko jedno wyjście z sytuacji: uznać, że w tej dziedzinie doświadczenia mamy do czynienia z indywidualnymi zjawiskami i że nasze możliwości posługiwania się przyrządami pomiarowymi pozwalają nam tylko na wybór między różnymi komplementarnymi rodzajami zjawisk, będących przedmiotem naszych badań. (II.51)

Później mówi on: „Fakt, że na ogół ten sam układ eksperymentalny może dostarczyć różniących się wyników, jest czasami obrazowo przedstawiany jako „wybór przyrody” między takimi możliwościami. Nie trzeba podkreślać, że takie wyrażenie nie ma sugerować jakiejś personifikacji przyrody; wskazuje po prostu na niemożliwość ustalenia w tradycyjny sposób reguł przebiegu niepodzielnego zjawiska. Tutaj logiczne ujęcie nie może wyjść poza podanie względnych prawdopodobieństw występowania indywidualnych zjawisk w danych warunkach doświadczalnych. (II.73)”; „Wobec tego, że w danych warunkach eksperymentalnych mogą zachodzić różne indywidualne procesy kwantowe, zależności te mają z konieczności charakter statystyczny. (II.71)”; „Sam fakt, że powtórzenie tego samego eksperymentu, zdefiniowanego w opisany sposób, dostarcza ogólnie rzecz biorąc różnych zapisów dotyczących obiektu, daje bezpośrednio do zrozumienia, że wyczerpujące wytłumaczenie doświadczenia w tym obszarze musi być wyrażone prawami statystyki (III.4)”; „Fakt, że w jednym i tym samym dobrze zdefiniowanym eksperymentalnym przygotowaniu otrzymujemy z reguły zapisy różnych indywidualnych procesów, czyni niezbędnym ucieknięcie się do statystycznego wytłumaczenia zjawisk kwantowych. (III.25)”. Stwierdzenia te wskazują

na odwrócenie się Bohra od obrazowych poglądów o tkwiącym w samej przyrodzie elemencie losowym i przyjęcie pragmatycznego w istocie nastawienia do statystycznego charakteru przewidywań kwantowomechanicznych.

Warto zauważyć, że pogląd Bohra o komplementarności jest zupełnie pragmatyczny: pojęcia (*ideas*) powinny być osądzone ze względu na ich użyteczność; pojęcia fizyki powinny być osądzone ze względu na ich skuteczność w porządkowaniu fizycznych doświadczeń, a nie ze względu na zgodność (*accuracy*) z tym, co, jak można wierzyć, odzwierciedlają – istotą (*essence*) zewnętrznej rzeczywistości. Użycie komplementarnych pojęć w komplementarnych sytuacjach jest naturalną cechą towarzyszącą pragmatycznemu myśleniu.

## VI. CZASOPRZESTRZEŃ I KOMPLETNOŚĆ TEORII KWANTÓW

Pomimo, że teoria względności rzuciła cień wątpliwości na nasze poglądy na temat przestrzeni i czasu, to nadal utrzymuje się pogląd, że fizyczne przedmioty zajmują obszary czasoprzestrzeni, które mogą być podzielone na drobniejsze części. Jako podstawowe założenie fizyki klasycznej przyjęto, że klasyczne pojęcie kontinuum czasoprzestrzennego jest odpowiednią podstawą dla fundamentalnych teorii fizycznych.

Ważne jest zdanie sobie sprawy z tego, że teoria kwantów nic by na tym nie zyskała, gdyby uważana była za opis jakości lub własności przyrody zlokalizowanych w punkcie czy też w nieskończenie małych obszarach kontinuum czasoprzestrzennego. Z jednej strony, opisy eksperymentalnych przygotowań i obserwacji są zasadniczo operacyjnymi opisami tego, co technicy mogą zobaczyć i zrobić. Nie są one, ściśle mówiąc, opisami zewnętrznych rzeczy samych w sobie (*things in themselves*). Co więcej, nie są one opisami *mikroskopowych* jakości lub własności. Z drugiej strony, funkcje falowe są jedynie abstrakcyjnymi symbolicznymi narzędziami. Nie opisują one jakości lub własności przyrody, zlokalizowanych w punktach czy nieskończenie małych obszarach kontinuum czasoprzestrzennego. Fakt nagłej (*abrupt*) zmiany funkcji falowej w jakimś obszarze czasoprzestrzeni podczas dokonywania pomiaru sprawia, że interpretowanie jej w powyższy sposób w tym samym czasie w innym oddalonym

obszarze byłoby nierozsądne. Funkcje falowe teorii kwantów należy interpretować jako symboliczne narzędzia, których naukowcy używają, aby dokonywać przewidywań o tym, co zaobserwują w określonych warunkach. Jak mówi Bohr: „W podejściu do problemów atomowych najkorzystniej jest przeprowadzać rzeczywiste obliczenia za pomocą funkcji stanu Schrödingera, z której można, przy użyciu sprecyzowanych operacji matematycznych, wydedukować statystyczne prawa rządzące obserwacjami osiągalnymi w określonych warunkach. Trzeba jednak zdać sobie sprawę, że dokonujemy tego za pomocą czysto symbolicznych procedur, których jednoznaczne fizyczne interpretacje wymagają ostatecznie odniesienia do całego przygotowania eksperymentalnego (III.5)”; „W rzeczywistości mechanika falowa, tak samo jak teoria macierzowa, stanowi symboliczną transkrypcję problemu ruchu klasycznej mechaniki, zaadaptowaną do wymagań teorii kwantów, i należy ją tylko zinterpretować przez jawne użycie postulatów kwantowych (I.75)”.

Fakt, że teoria kwantów nie zawiera niczego, co interpretuje się jako opis jakości zlokalizowanych w punkcie wiecznie istniejącego kontinuum czasoprzestrzennego, może być rozumiane jako dowód jej niekompletności. Jednak tak naprawdę, wszystko, co wiemy o kontinuum czasoprzestrzennym sprowadza się do tego, że jest ono pojęciem, które jest użytecznym w organizowaniu doświadczenia zmysłowego. Ludzki wysiłek mający na celu zrozumienie świata w kategoriach pojęć zewnętrznej rzeczywistości, tkwiącej w (*inhering in*) kontinuum czasoprzestrzennym, osiągnął kulminację w klasycznej teorii pola. Teoria ta, jakkolwiek zadowolająca w domenie zjawisk makroskopowych, zawiodła przy próbie dostarczenia zadowolającego wytłumaczenia mikroskopowych źródeł pola. Einstein spędził większość swojego naukowego życia na bezskutecznym wysiłku, próbując uczynić te pojęcia użytecznymi na poziomie mikroskopowym [Einstein 1951, 675]. Odrzucenie klasycznej teorii na korzyść teorii kwantowej stanowi w istocie odrzucenie idei, że zewnętrzna rzeczywistość zawiera się czy tkwi w kontinuum czasoprzestrzennym. Świadczy to o zdaniu sobie sprawy, że „przestrzeń”, tak jak kolor, znajduje się w umyśle obserwatora.

Jeśli zaakceptuje się klasyczne pojęcie kontinuum czasoprzestrzennego, to teoria kwantów nie może być uważana za kompletną; tj. jeśli zaakceptuje się, że trwałe

(*persisting*) obiekty przyrody, z ich różnymi częściami definitywnie zlokalizowanymi w określonych miejscach, dosłownie znajdują się (*reside*) w kontinuum czasoprzestrzennym, to, ze względu na naturalne i normalne znaczenia tych słów w tej konstrukcji pojęciowej, należy wymagać, aby kompletne naukowe wytłumaczenie zjawisk atomowych opisywało wszystko, czymkolwiek by to było, jako zlokalizowane w punktach lub nieskończenie małych obszarach tego kontinuum. Teoria kwantów tego nie czyni, i stąd twierdzenie o kompletności byłoby nadużyciem językowym.

W pragmatycznej konstrukcji twierdzenie o kompletności ma inne naturalne znaczenie. Naturalnym znaczeniem stwierdzenia, że teoria kwantów jest wystarczająca jako kompletne naukowe wytłumaczenie zjawisk atomowych jest następujące: żadna teoretyczna konstrukcja nie może dostarczyć eksperymentalnie weryfikowalnych przewidywań dotyczących zjawisk atomowych, które nie mogłyby zostać zaczerpnięte z kwantowego teoretycznego opisu. Takie jest praktyczne czy też pragmatyczne znaczenie naukowej kompletności w tym kontekście.

## VII. CAŁKOWITOŚĆ I KOMPLETNOŚĆ

Drugim istotnym składnikiem interpretacji kopenhaskiej jest stwierdzenie, że teoria kwantów dostarcza kompletnego naukowego wytłumaczenia zjawisk atomowych. W trwającym ponad trzydzieści lat okresie czasu, w którym publikowano książki Bohra [Bohr 1934; 1958; 1963], autor oszlifował i dopracował swoje poglądy na ten temat. Jego końcowe i, jak sądzę, najlepsze podsumowanie jest następujące:

Element całkowitości, symbolizowany przez kwant działania i zupełnie obcy zasadom fizyki klasycznej, pociąga za sobą (...) konsekwencję taką, że w badaniu procesów kwantowych jakiegokolwiek eksperymentalne zapytanie implikuje interakcję między obiektem atomowym a narzędziami pomiarowymi; która to [interakcja], chociaż istotna w charakteryzacji zjawiska, umyka oddzielnemu wytłumaczeniu, jeśli eksperyment ma służyć swojemu celowi dostarczania jednoznacznych odpowiedzi na nasze pytania. Jest to, w rzeczy samej, uznanie tej sytuacji, która czyni koniecznym uciekanie się do statystycznego sposobu opisu, jeśli chodzi o oczekiwania zdarzenia się



indywidualnych zjawisk kwantowych w jednym i tym samym eksperymencie przygotowaniu (III.60).

Stwierdzenie to jest wzmocnione i może być wyjaśnione przez wcześniejsze stwierdzenie:

Istotną nową cechą w analizie zjawisk kwantowych jest (...) wprowadzenie fundamentalnego rozróżnienia między aparaturą pomiarową a obiektami, które są poddane badaniu. Jest to bezpośrednią konsekwencją potrzeby wytłumaczenia funkcji instrumentów pomiarowych w czysto klasycznych kategoriach, wykluczając w zasadzie jakikolwiek wzgląd na kwant działania. Ze swej strony, kwantowe cechy zjawisk są ujawniane w informacji o obiektach atomowych otrzymanej z obserwacji. Podczas gdy w obrębie fizyki klasycznej interakcja między obiektem a aparaturą może być zaniedbana lub, gdy to konieczne, skompensowana, to w fizyce kwantowej interakcja ta tworzy w ten sposób nieodłączną część zjawiska. Zatem jednoznaczne wytłumaczenie odpowiedniego zjawiska kwantowego musi w zasadzie zawierać opis wszystkich mających znaczenie cech przygotowania eksperymentalnego (III.3).

Podstawową kwestią w tym zagadnieniu jest fakt, że dobrze zdefiniowane obiektywne specyfikacje dotyczące całego zjawiska nie są wystarczająco restrykcyjne, aby jednoznacznie określić przebieg indywidualnego procesu; mimo to nie jest możliwe dalsze jego rozbitcie z powodu nieodłącznej całkowitości procesu symbolizowanej przez kwant działania.

Ten sposób wywodzenia potrzeby statystycznego wytłumaczenia zjawisk atomowych z elementu całkowitości, symbolizowanego przez kwant działania, wydaje się być wyjściem poza pragmatyczną konstrukcję, jako że odnosi się ona do urządzenia pomiarowego, obiektu atomowego i ich interakcji. Nie jest też od razu jasne, jak można uzgodnić oddzielną identyfikację tych trzech rzeczy i „niemożliwość nakreślenia ostrej linii granicznej między zachowaniem się przedmiotów atomowych, a ich wzajemnym oddziaływaniem z przyrządem pomiarowym, użytym do określenia warunków, w których wchodzące w grę zjawiska występują (II.39)“.

W związku z tym, ważne jest zdanie sobie sprawy z tego, że „obiekt atomowy” i „instrumenty pomiarowe” są, w konstrukcji myślenia kwantowego, *idealizacjami*

użytych przez naukowców w celu wprowadzenia porządku do doświadczenia człowieka w dziedzinie zjawisk atomowych. Sprawa ta jest rozwinięta przez autora w pracy [Stapp 1971]. Słowa Bohra podkreślają, że te oddzielne idealizacje zostają nierozzerwalnie związane przez myślenie kwantowe w sposób, który jest zupełnie obcy klasycznemu myśleniu. Idealizacja „instrumentu pomiarowego” jest pojęciowym bytem (*conceptual entity*) użytym w opisie eksperymentalnych specyfikacji; idealizacja „obiektu atomowego” jest pojęciowym bytem reprezentowanym przez funkcję falową. Są one nierozzerwalnie związane w teorii kwantów dlatego, że specyfikacje (opisane w kategoriach instrumentów pomiarowych) zostają odwzorowane na funkcje falowe związane z obiektami atomowymi: obiekt atomowy reprezentowany przez funkcję falową nie ma w teorii kwantów znaczenia innego niż jego połączenie z doświadczeniem, sformułowane w kategoriach specyfikacji, które odnoszą się do instrumentów pomiarowych.

Bohr był najwyraźniej przekonany, że jest w zjawiskach atomowych element *całkowitości* (*wholeness*) – związany z kwantem działania i zupełnie obcy zasadom fizyki klasycznej – który ogranicza użyteczność klasycznych idealizacji instrumentów pomiarowych i obiektów atomowych jako oddzielnych, oddziałujących bytów; i że wynikająca stąd nierozdzielność obiektów atomowych od całego zjawiska czyni statystyczny opis nieuniknionym.

Ten sposób pogodzenia pragmatycznego charakteru teorii kwantów z twierdzeniem o kompletności wydaje się racjonalny i spójny. Jest oczywiście oparty na samym myśleniu kwantowym; jest więc istotnie czynnikiem samouzgadniającym (*self-consistency consideration*). Zasadność myślenia kwantowomechanicznego jako całość musi oczywiście zostać osądzona na podstawie jej skuteczności; obejmuje to jej spójność i samouzgodnienie.

Kwestia kompletności teorii kwantów była przedmiotem dyskusji między Bohrem [Bohr 1935; Einstein 1951, 201] a Einsteinem [Einstein 1951, 665]. Kontrargumenty Einsteina sprowadzają się do następujących zastrzeżeń: (1) nie zostało udowodnione, że zwykłe (*usual*) pojęcie rzeczywistości jest niemożliwe (*unworkable*); (2) teoria kwantów nie czyni „zrozumiałym” („*intelligible*”) tego, co jest czuciowo

(*sensorily*) dane; i (3) jeśli istnieje bardziej kompletny, możliwy do pomyślenia opis przyrody, to sformułowanie uniwersalnych praw powinno uwzględniać ich użycie.

Twierdzenie Bella [Bell 1964; 1970]<sup>6</sup> zadaje druzgocący cios stanowisku Einsteina. Dlatego, że udowadnia, iż zwyczajne (*ordinary*) pojęcie rzeczywistości jest niezgodne ze statystycznymi przewidywaniami teorii kwantów. Przewidywania te był widocznie Einstein skłonny zaakceptować. Stanowisko Einsteina opiera się całkowicie na przesłance, że doświadczenie zmysłowe może być zrozumiane w kategoriach koncepcji jakiejś zewnętrznej rzeczywistości, której przestrzennie oddzielone części są niezależnymi bytami (*realities*) w tym znaczeniu, że zależą one od siebie nawzajem tylko poprzez połączenia, które podlegają (*respect*) oddzieleniu czasoprzestrzennemu w zwykły sposób: natychmiastowe połączenia są wykluczone. Ale istnienie takiej rzeczywistości, leżącej poza światem obserwowanych zdarzeń, jest dokładnie tym, czego niemożliwość udowadnia twierdzenie Bella.

Drugie zastrzeżenie Einsteina, dotyczące tego, czy teoria kwantów czyni zrozumiałym to, co jest dane czuciowo, zostanie omówione w następnym rozdziale.

Trzecie zastrzeżenie Einsteina podnosi dwie zasadnicze kwestie. Po pierwsze: czy kompletny opis przyrody jest do pomyślenia. Czy ludzkie myśli (*ideas*), które są prawdopodobnie ograniczone przez strukturalne formy ludzkich mózgów, i które są przypuszczalnie przystosowane do problemu przeżycia człowieka, mogą w pełni poznać czy pojąć ostateczną istotę (*ultimate essences*)? A nawet jeśli mogą, [to po drugie:] jaka jest rola w przyrodzie uniwersalnych praw? Czy cała przyroda jest rządzona przez jakiś skończony (*closed*) zestaw formuł matematycznych? Taka jest jedna z możliwości. Druga, całkiem zgodna z obecną wiedzą, jest taka, że pewne aspekty przyrody wpasowują się (*adhere*) w skończone matematyczne formy, ale pełnia (*fullness*) przyrody wykracza (*transcends*) poza jakąkolwiek z takich form.

---

<sup>6</sup> Zobacz też: [Stapp 1971]

### VIII. TEORIA KWANTÓW I RZECZYWISTOŚĆ OBIEKTYWNA

Interpretacja kopenhaska jest często krytykowana z racji jej subiektywności, tj. zajmowania się raczej wiedzą obserwatora rzeczy, niż samymi rzeczami. Zarzut ten wynika głównie z częstego używania przez Heisenberga słowa „wiedza” i „obserwator”. Jako że teoria kwantów jest zasadniczo procedurą, za pomocą której naukowcy czynią przewidywania, zupełnie stosowne jest to, że odnosi się ona do wiedzy obserwatora. Dlatego że ludzcy obserwatorzy grają decydującą rolę w przygotowywaniu eksperymentów i zapisywaniu ich wyników.

Sformułowanie Heisenberga, interpretowane w powierzchowny sposób, może być i było źródłem znaczącego zamieszania. Może więc lepiej jest mówić bezpośrednio w kategoriach konkretnych ludzkich realiów (*social realities*), takich jak ustawienie (*dispositions*) instrumentów pomiarowych, itd.; w kategoriach, w których opisywane są przygotowania, pomiary i wyniki. Ten rodzaj terminologii był preferowany przez Bohra, który użył wyrażenia „klasyczne pojęcia” (*„classical concepts”*) dla oznaczenia opisów w kategoriach konkretnej ludzkiej rzeczywistości (*social actualities*).

Jednak terminologia Bohra, choć ewidentnie obiektywna, nasuwa wątpliwość: jak teoria kwantów może być spójnie zbudowana na podłożu zawierającym pojęcia, które są fundamentalnie niezgodne z pojęciami kwantowymi.

Być może najbardziej satysfakcjonującym terminem są „specyfikacje” (*„specifications”*). Specyfikacje są tym, czego zarówno architekci jak budowniczcy i mechanicy czy operatorzy maszyn używają, aby komunikować sobie nawzajem warunki konkretnej ludzkiej rzeczywistości czy też realiów, które łączą ich życia. Trudno wymienić pojęcie teoretyczne o bardziej obiektywnym znaczeniu. Specyfikacje są opisane w technicznym żargonie, który jest rozszerzeniem codziennego języka. Język ten może wchłaniać pojęcia z fizyki klasycznej. Lecz fakt ten w żaden sposób nie implikuje słuszności tych pojęć poza dziedziną, w której są używane przez techników.

W celu zobiektywizowania, na ile to możliwe, naszych opisów specyfikacji dotyczących przygotowań i pomiarów możemy wyrazić je w kategoriach „obiektywnych” wielkości fizyki klasycznej. Znaczenie tych „obiektywnych” wielkości jest dla nas związane z faktem, że możemy je sobie wyobrazić jako cechy zewnętrznego świata, który istnieje niezależnie od naszych percepcji. Sformułowanie specyfikacji w kategoriach tych klasycznych wielkości pozwala, przynajmniej na pierwszy rzut oka, wyeliminować ludzkiego obserwatora z kwantowego teoretycznego opisu przyrody: obserwator nie musi być jawnie wprowadzony do opisu teorii kwantów, ponieważ połączenie między jego wiedzą a tymi klasycznymi wielkościami zostaje wtedy przesunięte do innych domen nauki, takich jak fizyka klasyczna, biologia, psychologia itd.

Jednak ta eliminacja obserwatora jest po prostu semantyczną sztuczką. Kiedy zdamy sobie sprawę, że pojęciowa struktura fizyki klasycznej jest zasadniczo wynalazkiem umysłu, użytecznym w organizowaniu i kodyfikowaniu doświadczenia, to wiedza obserwatora wyłoni się w końcu jako fundamentalna rzeczywistość, na której cała struktura spoczywa. Wyrażenia „wiedza obserwatora”, „klasyczny opis”, czy „specyfikacje” są tylko różnymi sposobami podsumowania w jednym wyrażeniu całego tego ciągu myśli, który następuje po rozpoznaniu ograniczonej domeny słuszności klasycznych pojęć.

Bohr przytacza niektóre pojęcia biologii czy psychologii jako inne przykłady pojęć, które są użyteczne w pewnych ograniczonych domenach. I zauważa, że czyniono powtarzające się próby unifikacji całej ludzkiej wiedzy na bazie tej czy innej spośród tych pojęciowych konstrukcji<sup>7</sup>. Takie próby są naturalną konsekwencją punktu widzenia „absolutystów” (*absolutists*), którzy utrzymują, że myśli człowieka mogą uchwycić lub poznać absolutną istotę (*absolute essences*). Pragmatysta (*pragmatist*), traktujący pojęcia (*concepts*) człowieka po prostu jako narzędzia do zrozumienia (*comprehension*) doświadczenia, i zapewniający, że ludzkie myśli (*ideas*), które są więziami w dziedzinie ludzkiego doświadczenia, nie mogą „poznać” niczego poza

---

<sup>7</sup> Interesujące i bardzo przystępne wytłumaczenie czterech głównych struktur pojęciowych, które zostały wysunięte jako podstawa ogólnych koncepcji świata, znaleźć można w pracy: [Pepper 1966].

innymi ludzkimi myślami, nie byłby optymistą w kwestii perspektywy całkowitego sukcesu w tak śmiałych przedsięwzięciach. Dla niego postęp w ludzkim rozumieniu wyrażałby się raczej w rozroście sieci splecionych ze sobą komplementarnych spostrzeżeń (*understandings*) dotyczących różnych aspektów pełni przyrody.

Taki punkt widzenia, choć odrzucający obietnicę końcowego całkowitego oświecenia (*illumination*) związanego z ostateczną istotą przyrody, oferuje jednak perspektywę trwających bez końca ludzkich poszukiwań przynoszących wciąż nowe ważne prawdy. Te zaś można nazwać końcowymi w tym znaczeniu, że chwytają one lub rzucają światło na jakiś aspekt przyrody taki, jakim jest on wyjawiony ludzkiemu doświadczeniu. I może nie ustawać nadzieja, że człowiek będzie coraz wyraźniej postrzegać, poprzez swoją rosnącą mozaikę komplementarnych poglądów, ogólną formę przenikającej obecności (*pervading presence*). Jednak od tej przenikającej obecności nie można oczekiwać czy wymagać, aby była mieszkańcem trójwymiarowej przestrzeni naiwnej intuicji, czy też aby mogła być opisana całkowicie w kategoriach wielkości związanych z punktami czterowymiarowego kontinuum czasoprzestrzennego.

#### **Dodatek A: uzupełnienie filozoficzne**

Kilka spośród poruszonych przeze mnie kwestii natury filozoficznej zostało poddanych krytyce. W poniższym uzupełnieniu zawarte są moje odpowiedzi.

*Pytanie 1:* Jak można pogodzić przyznawanie przez Jamesa i Bohra obiektom zmysłowym charakteru publicznego z doktryną radykalnego empiryzmu – zgodnością myśli jedynie z innymi myślami? Russell pokazuje w swojej *Analizie materii* trudności związane z dokonaniem takiego uzgodnienia.

*Odpowiedź:* Argumenty Russella nie obalają koncepcji Jamesa i Bohra rozumianych tak, jak je opisałem. Sądzę, że obaj wymienieni autorzy chętnie przyznaliby, że doświadczenia człowieka nie stanowią prawdopodobnie całej rzeczywistości; są prawdopodobnie zaledwie jej częścią, połączoną z resztą tej całości przez jakąś relację typu przyczynowego (*causal-type connection*). Kwestią sporną nie

jest tu faktyczne istnienie świata „na zewnątrz”, lecz raczej pytanie o to, czym jest owo połączenie między światem „na zewnątrz” a naszymi myślami o nim.

Russell w gruncie rzeczy przekonuje, że w oparciu o strukturę naszego doświadczenia możemy czynić wiarygodne wnioski i konstruować rozsądne pojęcie zewnętrznego świata. James twierdziłby uparcie, że cała ta struktura nie jest niczym innym niż strukturą abstrakcyjnych idei nadbudowanych nad naszymi wspólnymi (*common*) doświadczeniami; oraz że leżący poza doświadczeniem świat, który może w jakiś sposób „powodować” nasze wspólne doświadczenia, w najmniejszym stopniu nie wchodzi nigdy w skład tej struktury.

James najwyraźniej uważa, że jego pojęcie stołu jest podobne do twojego i mojego. Ogólnie, myśli poszczególnych osób związane z obiektami zmysłowymi nie są identyczne, jednak są wystarczająco podobne, aby utworzyć z nich podstawę efektywnej komunikacji społecznej. Zatem istnieje w tym znaczeniu dziedzina publicznych czy też podzielanych (*shared*) doświadczeń, które tworzą podstawę międzyludzkiej komunikacji. Dziedzina ta stanowi podstawowy zbiór danych dla nauki. Celem nauki jest stworzenie konstrukcji pojęciowej, która połączy owe wspólne, publiczne czy podzielane doświadczenia w sposób, który odzwierciedla rozmaite aspekty empirycznych połączeń istniejących między nimi. Stąd zupełnie oczywistym jest to, że cała struktura nauki jest całkowicie ograniczona do świata pojęć.

Russell prawdopodobnie by się z tym zgodził. Jednak przekonywałby, że mimo to możemy czynić wiarygodne wnioski na temat świata w oparciu o strukturę doświadczenia. Ale jego racjonalistyczne nastawienie wymaga od niego, jak sądzę, przyznania, że nasze myśli *mogłyby* nie być zdolne do pełnego pojęcia rzeczywistości, która jest przyczyną naszego doświadczenia. A jeśli świadectwo nauki wskazuje, że właśnie ta możliwość jest realizowana przez przyrodę, to sądzę, że jego racjonalistyczne podejście, w oparciu o wiarygodne wnioski wyciągnięte z dostępnych świadectw, wymagałoby od niego przyznania, że możliwość ta posiada duże „prawdopodobieństwo” bycia poprawną.

Chociaż argumenty Russella nie obalają stanowiska Jamesa rozumianego tak, jak je opisałem, występuje tu zdecydowana różnica orientacji. Russell wyrusza na

poszukiwania *pewności* w odniesieniu do zewnętrznego świata, ale zadowala się wytlumaczeniem, któremu przypisuje „prawdopodobieństwo”. James uznaje poszukiwanie pewności w odniesieniu do zewnętrznego świata jako całkowicie błędnie ukierunkowane. Pewność w takiej kwestii jest najwyraźniej nieosiągalna. Naprawdę rozsądnym planem działania jest przyznanie w punkcie wyjścia, że naszym celem jest stworzenie konstrukcji pojęciowej, użytecznej w organizacji naszego doświadczenia i kierowaniu naszym życiem, i odłożenie całego tego mglistego pytania o połączenie myśli z nie-myślami oraz równie mglistego pytania o „prawdopodobieństwo”, że pewien system pojęć daje nam prawdziwy czy właściwy obraz świata samego w sobie (*the world itself*).

W każdym razie, twierdzenie, że *potrafimy* czynić właściwe wnioski na temat świata samego w sobie, można uznać za wiarygodne jedynie w tym znaczeniu, że jesteśmy w stanie skonstruować obraz świata samego w sobie, który będzie prawdziwie adekwatny. Obecnie obraz taki nie istnieje. A trudności w konstruowaniu naukowego poglądu na świat sam w sobie są dokładnie tymi, które zauważał sam Russell; są nimi mianowicie: uwzględnienie zjawisk kwantowych i nieskończenie małych interwałów czasoprzestrzennych. To właśnie te trudności zmuszają nas do powrotu na stanowisko Jamesa.

Krótko mówiąc, stanowisko Bohra i Jamesa rozumiane tak, jak je opisałem, nie jest zaprzeczeniem przyczynowej teorii percepcji. Jest po prostu zaleceniem, żebyśmy postrzegali naukę nie jako poszukiwania metafizycznego zrozumienia tego, co znajduje się poza światem myśli, lecz raczej jako wynalazek ludzkiego umysłu, skonstruowany przez człowieka w celu włączenia do świata ludzkich pojęć abstrakcyjnych strukturalnych form, które chwytają pewne aspekty empirycznej struktury ludzkiego doświadczenia. W realizacji tego przedsięwzięcia ważną klasą danych są te doświadczenia, które są wspólne różnym ludzkim obserwatorom, takie jak nasze wspólne czy podzielane doświadczenia dotyczące stołów, przy których wszyscy zasiadamy. Poziomem doświadczenia, na którym te wspólne doświadczenia są do siebie najbardziej podobne, jest poziom, na którym okrągły stół jest doświadczany jako okrągły stół, a nie jako owalny dwuwymiarowy widzialny wzór, który zależy od tego, w



którym miejscu kto siedzi, czy zestaw dotykowych odczuć, które zależą od tego, gdzie czyja ręka spoczywa. W nauce potrzebujemy „obiektywnych” opisów doświadczanego świata. Potrzebujemy opisów, które nie zależą od tego, kim jest osoba, która ma dane doświadczenie. Operacyjne specyfikacje spełniają to wymaganie. Są one opisem możliwych ludzkich doświadczeń, który nie odnosi się jawnie do żadnej szczególnej osoby. Pozwalają nam one tworzyć naukę, która jest całkiem obiektywna, a przy tym dobrze zakorzeniona w dziedzinie myśli i doświadczeń.

*Pytanie 2:* W artykule autora [Stapp 1971] na temat opartej na teorii macierzy  $S$  interpretacji teorii kwantów przyznano, że pragmatyczna interpretacja teorii kwantów pozostawia bez odpowiedzi głębokie metafizyczne pytania o naturę samego świata. Zauważono też, że widoczna nieobecność bytów nie poddających się analizie w teorii kwantów sugeruje „sieciovą” strukturę przyrody, która nieco przypomina strukturę przedstawioną przez Whiteheada. Czy nieobecność podobnych uwag w niniejszej pracy sygnalizuje odwołanie wcześniejszych poglądów?

*Odpowiedź:* Celem niniejszej pracy jest opisanie interpretacji kopenhaskiej. Dokładniej, celem jest opisanie, w jaki sposób autor rozumie istotę wspólnej płaszczyzny poglądów Bohra i Heisenberga w kwestii interpretacji teorii kwantów. Własne poglądy autora są dopracowaniem jego rozumienia interpretacji kopenhaskiej i zostały wyłożone w artykule na temat macierzy  $S$ .

#### **Dodatek B: Korespondencja z Heisenbergiem i z Rosenfeldem**

Wysuwane dotąd poglądy, które odpowiadać miały interpretacji kopenhaskiej, różnią się znacznie między sobą. Stąd powstaje pytanie, czy w moim opisie udało mi się uchwycić istotę interpretacji kopenhaskiej taką, jak ją rozumieli Bohr i Heisenberg. Aby rzucić światło na tę kwestię, zwróciłem się do Heisenberga z zapytaniem, czy opis przedstawiony w pierwszej wersji tego artykułu wydawał się mu zasadniczo zgodny z poglądami jego i Bohra, czy też wydawał mu się różnić pod jakimkolwiek ważnym względem.

Heisenberg odpowiedział:

Dziękuję za Pański list oraz za Pański artykuł na temat interpretacji kopenhaskiej. Sądzę, że Pański tekst jest zasadniczo adekwatnym opisem interpretacji kopenhaskiej; oraz, że prawdopodobnie wie Pan, że Niels Bohr był bardzo zainteresowany koncepcjami Williama Jamesa. Chciałbym jednak odnieść się do jednego fragmentu, w którym zdaje się Pan opisywać interpretację kopenhaską zbyt rygorystycznie. Na stronie 35. pyta Pan: „Czy jakkolwiek teoretyczna konstrukcja może nam dostarczyć weryfikowalnych przewidywań dotyczących zjawisk fizycznych, które nie mogłyby zostać zaczerpnięte z kwantowego teoretycznego opisu przyrody?” oraz stwierdza Pan, że zgodnie z interpretacją kopenhaską taka konstrukcja nie jest możliwa. Wątpię, czy jest to poprawne np. w związku z kwestiami biologicznymi. Logicznie rzecz biorąc, wydaje się możliwe, że różnicy między dwoma następującymi zdaniami: „Komórka jest żywa.” i „Komórka jest martwa.” nie da się zastąpić kwantowomechanicznym stwierdzeniem o stanie (oczywiście, stanie mieszanym) układu. Interpretacja kopenhaska nie zależy od decyzji w tej kwestii. Stwierdza ona jedynie, że dodanie parametrów w sensie fizyki klasycznej byłoby bezużyteczne.

Poza tym, kluczowe znaczenie może mieć fakt, że język interpretacji kopenhaskiej jest w pewnym stopniu ogólnikowy; i wątpię, czy próba uniknięcia tej ogólnikowości może go uczynić przejrzystszym.

Artykuł został przeredagowany tak, aby było absolutnie jasne, że twierdzenie o kompletności teorii kwantów odnosi się wyłącznie do zjawisk atomowych. Usunięto pewną część materiału, która była zbędna, i dodano obecne Podrozdziały V i VII wraz z obszernymi cytatami z prac Bohra. Komentarz Heisenberga do poprawionej wersji był następujący:

Dziękuję za przesłanie mi nowej wersji Pańskiego artykułu na temat interpretacji kopenhaskiej. Zdecydowanie ulepszyły go obszerne cytaty z Bohra; cały Pański artykuł stał się po tych zmianach bardziej zwięzły i zrozumiały. Chciałbym nadmienić jedną kwestię, nie w celu krytykowania sformułowania Pańskiego artykułu, lecz w celu nakłonienia Pana do dokładniejszego zbadania pewnego szczególnego zagadnienia, które skądinąd jest bardzo głębokim i starym filozoficznym problemem. Kiedy pisze Pan o myślach (zwłaszcza w Rozdziale IV), pisze Pan zawsze o ludzkich myślach (*human ideas*); powstaje pytanie: czy owe myśli „istnieją” poza ludzkim umysłem czy tylko w

ludzkim umyśle? Innymi słowy: czy myśli te istniały w czasach, gdy nie istniał jeszcze na świecie żaden ludzki umysł.

Załączam angielskie tłumaczenie jednego z moich wykładów, w którym próbowałem opisać filozofię Platona w związku z tym zagadnieniem. Angielskie tłumaczenie dokonane zostało przez amerykańskiego filozofa, który, jak sądzę, używa filozoficznej nomenklatury poprawnie. Być może dałoby się połączyć tę platońską koncepcję z pragmatyzmem poprzez stwierdzenie: „wygodnie” jest rozważać myśli (*ideas*) jako istniejące nawet poza ludzkim umysłem, gdyż w przeciwnym razie byłoby trudno mówić o świecie zanim istniały ludzkie umysły. Jednak widzi Pan, że w tym miejscu zawsze dochodzimy do kwestii ograniczeń języka: pojęć takich jak „istnienie”, „bycie”, „myśl” („*idea*”) itd. Uważam, że wciąż ma Pan zbyt duże zaufanie do języka, ale do wniosków na ten temat dojdzie Pan zapewne sam.

Odpowiedziałem:

W związku z kwestią nie-ludzkich myśli, nie wydaje mi się prawdopodobne, żeby ludzkie myśli mogły pochodzić z wszechświata pozbawionego idealnych (*idealike*) jakości. Stąd skłonny jestem przychylić się do poglądu, że świadomość w jakiejś formie musi być fundamentalną jakością wszechświata. ... [Jednakże] trudno jest dostrzec w pismach Bohra jakiegokolwiek odniesienie do Platońskich idei. W rzeczy samej, Bohr dokłada starań, aby uniknąć jakiegokolwiek ontologicznego zaangażowania: skupia się raczej na pytaniu, jak naukowcy mają radzić sobie z ograniczoną zasadnością ich klasycznych intuicji.

Z uwagi na niechęć Bohra (przynajmniej w pismach) do spekulacji na temat ostatecznej istoty (*ultimate essences*), wydawało mi się, że rozważania w tej materii nie powinny być uważane za właściwą część interpretacji kopenhaskiej. Gdyby interpretacja kopenhaska miała być uważana za ogólny pogląd o świecie, który pokrywa się z pełnym poglądem na świat zarówno Pańskim jak i Bohra, to obawiam się, że interpretacja kopenhaska mogłaby nie istnieć; dlatego że nie jest jasne (przynajmniej uwzględniając Pańskie dotychczasowe pisma), czy Pan i Bohr całkowicie się zgadzacie we wszystkich ontologicznych i metafizycznych kwestiach. Co więcej, w Pańskiej książce *Fizyka a Filozofia* omawia Pan wiele spośród tych głębokich filozoficznych kwestii, a jednak znajduje się tam osobny rozdział zatytułowany „Interpretacja kopenhaska”. Sugeruje to, że „Interpretację kopenhaską” należy traktować w oddzielny sposób. Zinterpretowałem ją nie jako kompletny, ogólny pogląd na świat, wspólny dla Bohra i

dla Pana, lecz raczej jako istotną *wspólną płaszczyznę* dla Pana i Bohra w tej konkretnej kwestii: jak należy interpretować teorię kwantów.

Moje praktyczne czy pragmatyczne wytłumaczenie teorii kwantów bazuje na Pańskim wytłumaczeniu przedstawionym w rozdziale „Interpretacja Kopenhaska”. To konkretne wytłumaczenie jest zupełnie zgodne z wybranymi wypowiedziami Bohra, o czym świadczą cytaty z Bohra w moim Podrozdziale V. Zatem, sądzę, że rzeczą poprawną i odpowiednią jest uważać pragmatyczną interpretację formalizmu za integralną część interpretacji kopenhaskiej. Również nasza rozmowa w Monachium utwierdziła mnie w przekonaniu o skłanianiu się przez Pana do poglądu, że teoria kwantów dostarcza kompletnego opisu zjawisk atomowych; a pogląd ten zdaje się być zupełnie zgodnym z poglądem Bohra. Jest więc też, jak sądzę, rzeczą poprawną i odpowiednią uważać ten pogląd za istotną część interpretacji kopenhaskiej. Jednak z uwagi na milczenie Bohra w kwestii Platońskich idei, wstrzymywałbym się przed włączeniem rozważań na ten temat do mojego wytłumaczenia „logicznej istoty interpretacji kopenhaskiej”. Nie oznacza to jednak sugestii, że interpretacja kopenhaska zabrania dalszych poszukiwań wyczerpującego poglądu na świat. Pokazuje to jedynie, że sama interpretacja kopenhaska nie jest moim zdaniem kompletnym ogólnym poglądem na świat: jest tylko częścią ogólnego poglądu na świat – częścią ustalającą odpowiednie podejście do teorii kwantów. W końcowym fragmencie mojego artykułu zazaczyłem, że interpretacja kopenhaska nie kończy ludzkich poszukiwań wyczerpującego poglądu na świat. Raczej znacząco posuwa je naprzód.

#### Heisenberg odpowiedział:

Dziękuję za Pana list. Proszę mi pozwolić pokrótce odpowiedzieć na istotne kwestie. Zgadzam się w zupełności z Pańskim poglądem, że interpretacja kopenhaska nie jest sama kompletnym ogólnym poglądem na świat. Nigdy takim poglądem być nie miała. Zgadzam się także z Panem, że Bohr i ja prawdopodobnie nie patrzyliśmy na Platońskie idee z dokładnie tego samego punktu widzenia, a zatem nie ma powodu, dla którego miałby Pan bardziej wnikać w zagadnienie Platońskich idei w Pańskim artykule. Wciąż jednak mam jedno zastrzeżenie związane z Pańskim artykułem, o którym to wspomniałem w swoim ostatnim liście. Uważam, że ma Pan zbyt dużą pewność w kwestii możliwości języka. Sądzę, że postawa związana z interpretacją kopenhaską nie jest zgodna z filozofią Wittgensteina wyłożoną w *Traktacie*. Być może jest zgodna z filozofią zawartą w późniejszych pismach Wittgensteina. Jak Pan zapewne wie, Bertrand Russell lubił *Traktat* Wittgensteina, jednak nie zgadzał się z późniejszymi

pismami, dlatego też nigdy nie mogłem dojść do porozumienia z Russellem w tych filozoficznych kwestiach.

Odpowiedziałem:

Dziękuję za Pański niezwykle pouczający list. Wcześniej nie doceniałem w pełni Pańskiej uwagi, którą można, jak teraz rozumiem, wyrazić następująco: uważa Pan, że uznanie niedoskonałości języka jest ważnym elementem podejścia leżącego u źródeł interpretacji kopenhaskiej. Moje wytłumaczenie interpretacji kopenhaskiej nie zawiera opisu tego jej aspektu, który istotnie niejako kłóci się z jej zakładaną przejrzystością (...) [a przecież] naukowcy muszą dążyć do przejrzystości i wzajemnego zrozumienia, jako że bez tego dążenia nie uda się osiągnąć tego, co jest osiągalne. (...)

Pańskie słowa na temat podjętych w naszej korespondencji zagadnień byłyby z pewnością niezwykle cenne dla czytelników mojego artykułu. A jakiegokolwiek parafrazowanie, jakiego mógłbym dokonać, zmniejszyłoby tę wartość. Zatem, za Pana zgodą, chciałbym zamieścić w dodatku do mojego artykułu pełną zawartość Pańskich listów (poza osobistymi wstępami i zakończeniami) wraz z pewnymi łączącymi fragmentami z moich własnych listów. Załączyłem kopię proponowanych dodatków, poza Pana odpowiedzią na obecny list.

Heisenberg odpowiedział: „Dziękuję za Pański list. Popieram Pański pomysł opublikowania moich listów w dodatku do Pańskiego artykułu.”.

Poprosiłem również Rosenfelda – bliskiego znajomego i współpracownika Bohra, a także pierwszego obrońcę jego poglądów – o wydanie opinii, w jakim stopniu udało mi się w moim opisie uchwycić istotę interpretacji kopenhaskiej takiej, jaką rozumiał ją Bohr.

Rosenfeld wyraził pełną zgodę z moim wytłumaczeniem oraz dał serdeczną aprobatę. Co więcej, wypowiedział się na temat stosunku Bohra do filozofii Jamesa. Załączam jego uwagi ze względu na ich znaczenie z historycznego punktu widzenia:

Być może zainteresuje Pana to, że kilka razy próbowałem nakłonić Bohra do otwartego przyznania, że jego podejście ma wiele wspólnego z podejściem Jamesa, jednak stanowczo tego odmawiał – nie dlatego, że się z nim nie zgadzał, lecz dlatego, że bardzo przejmował się możliwością przyklejenia mu etykiety. Rzeczywiście, jak mógł

Pan zauważyć, niektórzy filozofowie trudnią się odnajdywaniem śladów domniemanego wpływu różnych filozofów na Bohra. Jeśli chodzi o Williama Jamesa, jestem przekonany, że słyszał Bohr o nim jedynie od swojego przyjaciela, psychologa Rubina, oraz ode mnie w latach 30. Wyraził wtedy entuzjastyczne poparcie dla podejścia Jamesa, które w jego odczuciu było zbliżone do jego własnego; jednak faktem, jak sądzę bardzo istotnym, jest to, że James i Bohr rozwijali pragmatyczną epistemologię niezależnie od siebie.

Być może byłoby wskazane dodać gdzieś w Pańskim artykule jakąś tego rodzaju uwagę, aby uniknąć dalszych nieporozumień. Tak naprawdę, ja sam w artykułach, jakie pisałem o komplementarności, nigdy jawnie nie odnosiłem pragmatycznego aspektu myślenia Bohra do filozofii Jamesa, właśnie dlatego, żeby uniknąć takich nieporozumień.

Dalej pisał:

Zauważyłem z Pańskich dalszych listów z nowymi stronami tytułowymi, że waha się Pan z doborem najlepszego tytułu Pańskiego eseju. Nie mam zdecydowanie określonego poglądu na ten temat, ale przychyliłbym się do wyboru tytułu z 31. marca („Teoria kwantowa, pragmatyzm i natura czasoprzestrzeni”), z tego powodu, że nie zawiera on zwrotu „interpretacja kopenhaska”, którego to wcale w Kopenhadze nie lubimy. Rzeczywiście, zwrot ten został wymyślony i jest używany przez ludzi, którzy mają zamiar zasugerować, że mogą być inne interpretacje równania Schrödingera, mianowicie niejasne ich własne. Co więcej, jak sam Pan wskazuje, ci sami ludzie używają tego określenia w najdziwniejszych wypaczeniach sytuacji. Być może, mógłby Pan uniknąć tej semantycznej trudności gdyby, po uprzednim wskazaniu na czym ta trudność polega, napisał Pan, że wykorzystał zwrot „interpretacja kopenhaska” w precyzyjnie sformułowanym sensie, w którym jest ona rozumiana przez wszystkich fizyków poprawnie używających mechaniki kwantowej. Z pewnością jest to definicja pragmatyczna.

*Przetoczył Adam Śliwiński<sup>8</sup>*

---

<sup>3</sup> Autor przekładu pragnie złożyć serdeczne podziękowania dr. Jerzemu Kierulowi za pomoc w redakcji tekstu. Odpowiedzialność za ewentualne uchybienia ponosi autor przekładu (przyp. tłum.).

## BIBLIOGRAFIA

- Ballentine, L.E. (1970), [w:] „Rev. Mod. Phys.” **42**, 358 (1970).
- Bastin, E. (red.) (1970), *Quantum Theory and Beyond*, Cambridge, Eng.: Cambridge U. P.
- Bell, J. S. (1964), [w:] Physics (N. Y.) **1**, 195 i Varenna Lectures, Preprint Ref. TH.1220-CERN, Aug. 1970.
- Bohm, D. (1952), [w:] „Phys. Rev.” **85**, 166, 180 (1952).
- Bohr, N. (1934), (I.) *Atomic Theory and the Description of Nature*, Cambridge, Eng: Cambridge U. P.
- Bohr, N. (1935), [w:] „Phys. Rev.” **48**, 696 (1935).
- Bohr, N. (1958), (II.) *Atomic Physics and Human Knowledge*, New York: Wiley.
- Bohr, N. (1963), (III.) *Essays 1958/1962 on Atomic Physics and Human Knowledge*, New York: Wiley.
- DeWitt, B. (1970), [w:] „Phys. Today” **23**, 30 (Sept. 1970).
- Einstein, A. (1951), [w:] Schlipp, P. A. (red.), *Albert Einstein, Philosopher-Physicist*, New York: Tudor.
- Everett III, H. (1957), [w:] „Rev. Mod. Phys.”, **29B**, 463 (1957).
- Heisenberg, W. (1930), *The Physical Principles of the Quantum Theory*, New York: Dover i (1955), [w:] Pauli, W. (red.), *Niels Bohr and the Development of Physics*, New York: McGraw-Hill i (1958), *Physics and Philosophy*, New York: Harper and Row i (1958), [w:] „Daedalus” **87**, 95
- James, W. (1970), *The Meaning of Truth*, Ann Arbor, Mich.: Univ. Michigan.
- Ludwig, G. (1961), [w:] *Werner Heisenberg und der Physik unserer Zeit*, Braunschweig: Friedrich Vieweg.
- Pepper, S. C. (1966), *World Hypothesis*, Berkeley, Calif.: U. of California Press.
- Popper, K. R.; Bunge, M. (1967), [w:] Bunge, M. (red.) *Quantum Theory and Reality*, New York: Springer.
- Rosenfeld, L. (1968), [w:] „Nucl. Phys.” **A108**, 241 (1968).
- Stapp, H. P. (1971), [w:] „Phys. Rev.” **D3**, 1303 (1971).

von Neumann, J. (1955), *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton, N. J.: Princeton, U. P.

von Weizsäcker, C. F. (1970), [w:] Bastin, E. (red.) (1970), *Quantum Theory and Beyond*, Cambridge, Eng.: Cambridge U. P.

Wheeler, J. A. (1957), [w:] „Rev. Mod. Phys.” **29**, 463 (1957).

Wigner, E. (1962), [w:] Good, I. J (red.), *The Scientist Speculates*, New York, Basic Books.

Wigner, E. (1963), [w:] „Amer. J. Phys.” **31**, 6 (1963).