

FILOZOFICZNE IMPLIKACJE ORTODOKSYJNEJ INTERPRETACJI TEORII KWANTÓW

1. Wstęp: Teoria kwantów i jej interpretacje

Do czasu sformułowania teorii kwantów (TK)¹ istniało przekonanie, że rzeczywistość jest otwarta dla naszego poznania i że poznanie polega tylko na biernym przyjmowaniu obrazów przedmiotów. Sądzono, że uogólniające działanie umysłu nie wnosi niczego nowego do treści przyjmowanej i że inny jest tylko sposób istnienia tej treści w umyśle. Niektóre jednak fakty z mikroświata wydają się domagać zmodyfikowania owego poglądu. Istnieje pewna naturalna granica naszego poznania indywidualnych przedmiotów, której w żaden sposób przekroczyć nie możemy. Stwierdzenie tego ograniczenia przybrało postać zasady nieoznaczoności. Wiąże się ją z nazwiskiem Heisenberga, który sformułował ją w 1927 r. Wyraża ona fakt, że nie można z dowolną dokładnością i jednocześnie zmierzyć własności komplementarnych, takich jak pęd i położenie mikroobiektu. Jeśli bowiem zastosujemy silne oświetlenie wiązką fotonów o krótkiej fali, np. wobec jakiegoś elektronu, aby zbadać, w jakim miejscu się on znajduje, ich energia spowoduje zmianę prędkości elektronu, a prędkość jest jednym z parametrów pędu. Jeśli zaś chcemy uniknąć tej zmiany i zadziałyśmy promieniami słabymi, tj. o długiej fali, wtedy uginają się one tak silnie, że obraz elektronu staje się nieostry: nie wiemy dokładnie, gdzie on się znajduje. W sumie, z im większą dokładnością wyznaczymy położenie mikroobiektu, z tym mniejszą dokładnością możemy określić jego pęd, i odwrotnie. Oznaczając przez Δq błąd pomiaru położenia, a przez Δp błąd pomiaru pędu, otrzymujemy równanie: $\Delta q \cdot \Delta p \geq h/4\pi$, gdzie h = stała Plancka. Innymi własnościami komplementarnymi są: aspekt falowy i korpuskularny cząstek, energia i czas pomiaru, wektor elektryczny i magnetyczny.

Słuszności samej zasady nieoznaczoności nikt nie kwestionuje, trudności pojawiają się w jej zrozumieniu. John Polkinghorn pisze: „Największym paradoksem teorii kwantów jest to, że po ponad 50 latach pomyślnego wykorzystywania jej technik, jej wyjaśnienie jest ciągle przedmiotem dyskusji. Wszyscy się zgadzamy co do tego, jak przeprowadzać rachunki, a nasze odpowiedzi pasują do doświadczeń jak rękawiczka, a jednak nie możemy się zgodzić wszyscy co do tego, o co właściwie tu chodzi”². Istnieją więc przynajmniej dwie interpretacje TK: ontologiczna i teoriopoznawcza.

a. Interpretacja ontologiczna

Odmawia ona obiektom mikroskopowym określoności, twierdząc, że panuje w nich rzeczywiście indeterminizm, to znaczy że nie mają one ani odrębnego ściśle określonego położenia, ani takiegoż określonego pędu. Znajdują się tylko w stanie kwantowym, który jest połączeniem umiejscowienia i prędkości. Dopiero ingerencja obserwatora uzbrojonego w instrument pomiarowy nadaje im określoność, wydobywając je z potencjalności, w ten sposób jednak, że im dokładniejszy jest pomiar jednego parametru, np. p, tym mniej dokładny jest pomiar q. „Mówienie o położeniu elektronu, który nie jest obserwowany, w ogóle nie ma sensu. [...] Konkretne położenie nadaje mu dopiero pomiar”³. W innym ujęciu

cząstki nie obserwowane i nie rejestrowane „mają nader specyficzny sposób istnienia, nieznan w świecie makroskopowym. Są one wtedy tylko zbiorami, a ściślej: liniowymi superpozycjami (LS) potencjalnych możliwości, stanów [...] do zaistnienia w momencie pomiaru, który „wybiera” jedną z możliwości i rejestruje ją w aparaturze pomiarowej”⁴.

Takiej interpretacji broni tzw. Szkoła kopenhaska, zwana też ortodoksyjną, powstała w 1930 r. Należą do niej: jej inicjator Niels Bohr, następnie W. Heisenberg, P. Jordan, F. Hoyle, R. Peierls, H. Reichenbach, W. Fock, D. Błochincew, E. Szpolski i wielu innych. W terminologii matematycznej interpretacja ta odwołuje się do równania fali Schrödingera:

$$i \frac{\hbar}{2\pi} \frac{\partial}{\partial t} \Psi(X_1, \dots, X_{3N}, t) = H\Psi(X_1, \dots, X_{3N}, t)$$

które służy do opisu zmian systemu w czasie. Jeśli znamy wartość fali prawdopodobieństwa w jakimś momencie czasu, to można przewidzieć zachowanie się systemu w innym czasie. Dokonując aktualnego pomiaru, otrzymujemy dokładne dane w jakimś aspekcie.

Przejście od prawdopodobieństwa do pewności nazwano redukcją paczki falowej (funkcji falowej). Redukcja ta implikuje wzajemne oddziaływanie mikroobektu z systemem makroskopowym, czyli z instrumentem pomiarowym. Pod wpływem tego oddziaływania następuje nieodwracalna zmiana w instrumencie i ta zmiana jest odpowiedzialna za redukcję funkcji falowej.

Innym aspektem indeterminizmu jest nieokreśloność w czasie. Atomy wypromieniowują co jakiś czas cząsteczki. Nie znamy prawa, które by wyznaczało termin tego zjawiska. Można obliczyć tylko czas połowicznego rozpadu jądra atomu. „Wędrownka elektronu z niższego na wyższy i odwrotnie, z wyższego na niższy poziom energetyczny nie podlega ścisłemu determinizmowi. Momentu, w którym nastąpi akt emisji, nie umiemy określić”⁵.

b. Interpretacja teoriopoznawcza

Wielu fizyków nie zgadza się jednak z interpretacją kopenhaską. Pierwsze wątpliwości wobec niej wysunął A. Einstein. Dołączyli się do niego: M. Planck, E. Schrödinger, De Broglie, J.P. Vigier, D. Bohm i B. Hiley. Przyznając, że istnieją granice bezpośredniego poznania na poziomie subatomowym, twierdzili jednak, że nie ma podstaw do odmawiania realności istnienia właściwości cząstek, takich jak pęd i położenie. Zachowaniem się cząstek rządzą ukryte parametry, czego przejawem są statystyczne prawidłowości. Einstein nie mógł się zgodzić z twierdzeniami ortodoksów, że ponieważ świat na poziomie subatomowym daje się ująć tylko na gruncie praw probabilistycznych, to musi być w swej istocie też probabilistyczny. Swój protest przeciwko Szkole kopenhaskiej ujął krótko: „Jestem przekonany, co do wszystkich zdarzeń, że On nie gra w kości” (*I am at all events convinced that He does not play dice*). W artykule napisanym w 1935 r. wraz z Borysem Podolskim i Natanem Rosenem zwrócił uwagę, że poglądy Szkoły kopenhaskiej dotyczące indeterminizmu są niezgodne z pewnymi faktami, które świadczą o ukrytych parametrach. Chodziło o pewien fizyczny system, tzw. singletowy, który rozpada się na 2 części nieraz dość znacznie oddalone od siebie, z których każda ma spin o momencie pędu $4/2\pi$. Ze względu na zachowanie momentu pędu całkowity moment pędu wynosi 0. Wobec tego, jeżeli eksperymentator zbada, że jedna z cząstek ma określony kierunek spinu, to może słusznie wnioskować bez specjalnego pomiaru, że druga cząstka ma spin przeciwny. Założenie realistyczne wskazywałoby na to, że jedna cząstka miała już wcześniej ten spin, o którym dowiedzieliśmy się przez dokonanie pomiaru na drugiej cząstce.

Okazało się jednak, że wniosek Einsteina był przedwczesny. Fizyk irlandzki John S. Bell, pracujący w CERN sformułował w 1964 r. teorem zwany później nierównością Bella.

Nierówność ta nadawała się do sprawdzenia, która z interpretacji jest słuszna. Jeśli wyniki eksperymentów będą zgodne z tą nierównością, Einstein ma rację, jeśli będą niezgodne, w rozumowaniu Einsteina jest jakiś błąd. Dla zobrazowania rozumowania J. S. Bella przeprowadźmy w wyobraźni takie doświadczenie:

Ustawiamy dwa ekrany z prostokątnymi otworami A i B.

Z wyrzutni W możemy wystrzeliwać w obydwu kierunkach płytki a i b. Płytki mogą się obracać wokół osi, jaką stanowi tor ich biegu. Poza otworami w ekranach znajdują się aparaty rejestrujące przejście lub nieprzejście płytki przez otwór.

Założmy, że po pierwszej serii wyrzutów mamy taki wynik:

I
 A 1 0 0 1 0 1 1 0 0 1 0 1 0 0 1
 B 1 0 0 1 0 1 1 0 0 1 0 1 0 0 1

Zgodność wyników spowodowana jest przez takie samo położenie obydwu płytek, które trafiają w otwory albo nie. Zmieńmy jednak położenie ekranu A o kąt α : Otrzymamy np. takie wyniki:

II
 A 1 0 1 1 0 1 1 1 0 0 1 0 0 0 0 1
 x x
 B 1 0 0 1 0 1 1 1 0 0 1 0 1 0 0 1

Zauważamy niezgodność w dwóch miejscach (oznaczenie x). Zmieńmy z kolei położenie ekranu B o kąt $-\alpha$:

III
 A 1 0 0 1 0 1 1 1 0 0 1 0 1 0 0 1
 x x
 B 1 0 0 1 0 0 1 1 0 1 1 0 1 0 0 1

Znów zauważamy niezgodność w dwóch miejscach (oznaczenie x). W czwartym doświadczeniu obracamy równocześnie oba ekrany o kąt odpowiednio: α i $-\alpha$:

IV
 A 1 0 1 1 0 1 1 1 0 0 1 0 0 0 0 1
 x x x x
 B 1 0 0 1 0 0 1 1 0 1 0 0 1 0 0 1

Niezgodność pojawiła się w czterech miejscach. Liczymy więc niezgodności w poszczególnych etapach doświadczenia; przy czym przez $N(\alpha)$ oznaczamy liczbę niezgodności przy skręceniu ekranu o kąt α . Było ich 2 w doświadczeniu II, 2 w doświadczeniu III, a 4 w doświadczeniu IV. Może się zdarzyć, że niektóre z niezgodności w doświadczeniach II i III występujące odpowiednio na tej samej pozycji w szeregu pomiarów na ekranie A i na ekranie B dadzą w sumie zgodność w doświadczeniu IV. Dlatego można napisać nierówność:

$$N(2\alpha) \leq 2N(\alpha)$$

Ta nierówność jest jednym ze sformułowań nierówności Bella.

Wynik uzyskany na podstawie doświadczenia z płytkami prostokątnymi można przenieść na inne podobne sytuacje, np. dla par elektronów, protonów czy fotonów wyrzucanych w przeciwne strony. Gdyby się okazało, że pary elektronów, protonów czy fotonów

rejestrowanych na aparaturze pomiarowej zachowują się zgodnie z teoremem Bella, to świadczyłyby to, że pomiar tylko informuje obserwatora o wartości rzeczywiście istniejącego spinu elektronów i protonów oraz o płaszczyźnie polaryzacji fotonów, istniejącej przed pomiarem, ale ich nie współtworzy, jak chciałaby Szkoła kopenhaska. Jeśli jednak nierówność Bella nie jest spełniona, wtedy wynik doświadczenia wypadłby na korzyść Szkoły kopenhaskiej, a przeciw interpretacji nieortodoksyjnej.

Otóż badania takie przy użyciu fotonów przeprowadzono w 1972 r. w kalifornijskim uniwersytecie Berkeley z wynikiem niezgodnym z nierównością Bella. Eksperymenty przeprowadzone w uniwersytecie Harwarda dały wynik zgodny. Doświadczenia we włoskim uniwersytecie w Katanii w r. 1974 dały również wynik zgodny. Gdy jednak w 1975 r. grupa fizyków z uniwersytetu Columbia przeprowadziła badania dużo dokładniejsze, ich wynik okazał się niezgodny z nierównością Bella. W r. 1976 trzy ośrodki: uniw. w Berkeley, uniw. w Teksas i Ośrodek Badań Jądrowych w Saclay (Francja) uzyskały wyniki niezgodne. Wreszcie w latach 1981-1984 Alain Aspect z grupą współpracowników z Instytutu Optyki Uniwersytetu w Orsay (Francja) przeprowadził nadzwyczaj precyzyjne badania z wynikiem niezgodnym z nierównością Bella⁶.

Wyniki te wskazują, że nie zachodzi któreś z założeń teoremu Bella. A jest ich przynajmniej 3:

1. Założenie realizmu filozoficznego,
2. Założenie korelacji negatywnej (rzut spinu na dowolną oś współrzędnych dwóch elektronów czy protonów po ich zderzeniu jest zawsze przeciwny),
3. Indukcja: Skoro dane zjawisko występuje w n przypadkach, to oczekujemy, że wystąpi ono także w $n+1$ przypadkach.

Zwolennicy Szkoły kopenhaskiej najchętniej rezygnują z założenia realizmu, wprowadzając a-realizm ontologiczny. Korelację negatywną uważają za eksperymentalnie udowodnioną; zasadę indukcji zaś za nieodzowną dla nauki.

Wielu innych autorów (Bernard d'Espagnat, Frank Laloë) uważa, że nierówność Bella zakłada: realizm, indukcję i lokalność (tzn. że cząstka jest niezależna od drugiej cząstki). Decydują się oni zakwestionować właśnie tę lokalność. Z niezachowania nierówności Bella wynikałoby więc, że cząstki pozornie niezależne zachowują się w doświadczeniach tak, jak gdyby, mimo oddalenia, stanowiły z sobą jedną całość. Przyjęcie takiej nierozdzielności prowadzi wprawdzie do nowych komplikacji, wydaje się mianowicie postulować oddziaływanie między obiektami zachodzące z nieskończoną prędkością, co jest sprzeczne z założeniem teorii względności Einsteina. Może jednak istnieją jakieś nieznanne dotąd oddziaływania typu niefalowego.

Prof. Wł. Kołos w cytowanym wyżej referacie wygłoszonym w Castel Gandolfo wyprowadził z tej nierozdzielności daleko idące wnioski o jedności Wszechświata. Pomieszał przy tym typy współzależności:

a) współzależność od obserwatora oraz b) współzależność cząstek w układzie. Za każdym razem przypisuje obserwatorowi ingerencję. W wypadku a) ingerencja polega na zawężeniu potencjalności funkcji falowej ψ ; w wypadku b) obserwator wsadza odległość (Może lepiej byłoby powiedzieć „rozdzielność” cząstek lub ich „niezależność”.) Ale przecież ingerencje te są różne:

Przy a) ingerencja jest fizyczna – przyrząd hamuje lub przyspiesza cząstkę, zmieniając częściowo jej pęd lub umiejscowienie;

przy b) jest to tylko sprawa wyobraźni.

Jeśli w przyszłości eksperymenty potwierdzą niezbicie, że teorem Bella nie sprawdza się na poziomie subatomowym, trzeba będzie zrezygnować z założenia lokalności i szukać

rozwiązania wynikających z tego trudności.

2. Zastosowanie teorii kwantów do problemu stwarzania świata

Niewielu kosmologów kwestionuje dzisiaj standartową teorię Wielkiego Wybuchu. Według tej teorii przesunięcie prążków widma odległych galaktyk ku czerwieni może być najlepiej wyjaśnione przez ucieczkę gwiazd, a tzw. promieniowanie tła jest reliktem pierwotnego żaru Wszechświata. Interesującym pytaniem jest, jak doszło do owego Wybuchu. Otóż w 1981 r. młody amerykański fizyk Alain Guth opublikował pracę na temat teorii wielkiej unifikacji (GUT). Starał się w szczególności wyjaśnić, dlaczego czasoprzestrzeń Wszechświata jest „płaska”, czyli niemal Euklidesowa, tzn. dlaczego bieżąca wartość jego średniej gęstości jest bliska wartości krytycznej Ω .

Wprowadzając pojęcia fałszywej i prawdziwej próżni opracował hipotezę inflacyjnej fazy rozwoju Wszechświata, będącej początkiem Wielkiego Wybuchu. W tej hipotezie dużą rolę odgrywają odniesienia do ortodoksyjnej interpretacji TK. „Zjawiska kwantowe – pisze Robert Matthews – zostały wywołane przez „kipiące” (wskutek gorąca) poza próżnię niezliczone tryliony subatomowych cząstek. Z nich później powstały atomy i cząsteczki, a znacznie później także rodzaj ludzki oraz wszystko, co wokół siebie widzimy. [...] Teoria kwantowa – w szczególności zasada nieoznaczoności – wymaga, by nawet prawdziwa próżnia kipiała od cząstek odurzonych odwoływaniem i przywoływaniem do istnienia. Można obliczyć energię, którą obecnie te wszystkie cząstki wnoszą do stanu próżni; kiedy to się zrobi, w odpowiedzi otrzyma się po prostu ogromną ilość. Cała ta energia kwantowa w jakiś sposób jest anulowana, by w rezultacie dać wartość zerową, co się rzeczywiście obserwuje. Dokładnie nie wiadomo, jak to się dzieje”⁷.

Jak widać, teoria ta wykorzystuje ortodoksyjną interpretację TK, według której na poziomie kwantowym brak jest określoności i przyczynowości. Jest to twierdzenie ontologiczne, a nie tylko teoriopoznawcze. Prawdopodobieństwo jest w tej interpretacji traktowane jako możliwość ontyczna. Ontologizuje się formalizm matematyczny. Naszą niewiedzę interpretuje się jako nieoznaczoność bytową. W takim ujęciu nawet nic może produkować cząstki. Pytanie tylko, czy interpretacja Szkoły kopenhaskiej jest jedynie słuszna.

„Obliczenia Hawkinga i jego zespołu – pisze dalej Matthews – wskazują, że podczas krótkotrwałego „panowania” grawitacji kwantowej efekty wynikające z zasady nieoznaczoności rozmyły rozróżnienie czasu i przestrzeni. [...] Hawking wyjaśnia: «Czas przestaje być wielkością dobrze zdefiniowaną w bardzo wczesnym Wszechświecie, tak jak kierunek północ przestaje być dobrze zdefiniowany na biegunie północnym. Pytanie o to, co zdarzyło się przed Wielkim Wybuchem, jest jak pytanie o miejsce odległe o kilometr na północ od bieguna północnego. [...] Jeżeli Wszechświat jest naprawdę samowystarczalny, nie ma żadnych granic ani brzegów, to nie ma też początku ani końca, po prostu istnieje. Gdzież jest wtedy miejsce dla Stwórcy?»”⁸.

Zbliżone ujęcie stworzenia Wszechświata prawie dosłownie z niczego podaje Andrei Linde, fizyk teoretyk rosyjski. Twierdzi on, że „skutki związane ze skwantowaniem grawitacji stają się znaczące na poziomie długości mniejszej niż długość Plancka 10^{-33} cm i przy gęstościach większych niż 10^{94} g/cm². Standartowy model Wielkiego Wybuchu podaje, że ta gęstość została osiągnięta, gdy Wszechświat mierzył 10^{-4} cm, tj. około 10^{29} razy więcej niż wynosi stała Plancka. [...] W różnych scenariuszach inflacyjnych cały obserwowalny Wszechświat o średnicy około 10^{28} cm powstał z obszaru o rozmiarach rzędu długości Plancka 10^{-33} cm. Mógł więc zostać stworzonym na zasadzie fluktuacji kwantowej w zgodności z zasadą nieoznaczoności”⁹.

Na zasadę nieoznaczoności powołuje się także Edward P. Tryon. Pisze on: „Elektrodynamika kwantowa ujawnia, że elektron, pozyton i foton czasami samorzutnie wynurzają się z doskonałej próżni.” Istnieją jednak bardzo krótko, poniżej czasu Δt , dozwolonego na podstawie relacji $\Delta E \Delta t \sim h^{10}$. Podobny przykład podaje P. Davies, twierdząc, że gdy pole elektromagnetyczne jest wystarczająco silne i przekroczy pewną granicę natężenia, zaczynają się pojawiać z niczego i w sposób nieprzewidywalny elektrony i pozytony¹¹. Zauważyć jednak przy tym należy, że próżnia, o jakiej tu mowa, nie jest całkowicie pusta, ponieważ jest wypełniona intensywnym polem elektromagnetycznym. Analogiczny proces może się dokonywać w silnym polu grawitacyjnym. Tak się tłumaczy tzw. „parowanie” czarnych dziur.

3. Problem nielokalności a argumentacja z przygodności za istnieniem Boga

Jednym z założeń teodycealnej argumentacji z przygodności jest pluralizm bytowy. Stwierdzenie wielości bytów pozwala na uzasadnienie Tomaszowej koncepcji realnego złożenia z istoty i istnienia bytów ograniczonych. Jeśli istnieje wiele bytów, a każdy ma swoją własną istotę, to między istnieniem, które w poszczególnych bytach samo z siebie jest takie same, a tymi wieloma istotami zachodzi relacja jedno-wieloznaczna. Ona zaś wskazuje, że to połączenie jest przygodne. Dalej na podstawie zasady racji dostatecznej poszukuje się czynnika, który stanowiłby wyjaśnienie ontologiczne tego połączenia. Także pluralizm substancji i pluralizm gatunków pozwala skonstruować argument z przygodności złożenia substancjalno-przypadłościowych oraz hylemorficznych.

Tymczasem w wielu interpretacjach TK kwestionuje się indywidualność cząstek. Bernard d'Espagnat pisze: „Cząstki lub grupy cząstek, które zwykle uważa się za oddzielne obiekty, oddziaływały na ogół kiedyś w przeszłości z innymi obiektami. Naruszenie lokalności wydaje się prowadzić do wniosku, że w pewnym sensie wszystkie te obiekty stanowią niepodzielną całość”¹².

Trzeba podkreślić, że stanowią całość tylko w pewnym sensie. Nielokalność jest wyraźna na poziomie kwantowym. Na poziomie jednak makroskopowym ta nielokalność zacierza się. Przedmioty makroskopowe zachowują się wobec siebie nawzajem stosunkowo niezależnie. Pozwala to na uznanie pluralizmu i na argumentację z przygodnych powiązań.

Ks. Kazimierz Kłósak, który TK zajął się wkrótce po wojnie, wstrzeźliwie odnosił się do wypowiedzi ontologicznych interpretacji ortodoksyjnej, dotyczących indywidualności cząstek elementarnych. Stwierdził, że parametry występujące w twierdzeniach na temat relacji niedokładności Heisenberga są relatywne „do treści wrażeniowych, a nie posiadają ważności w znaczeniu absolutnym dla rzeczywistości transcendentnej”¹³.

4. Kontrpropozycja dla interpretacji kopenhaskiej

Kontrpropozycje dla tez filozoficznych związanych z kopenhaską interpretacją TK mogą być różne. Można kwestionować zasadność tej interpretacji w aspekcie metodologicznym, sugerując większą słuszność interpretacji teoriopoznawczej. Można też próbować dowodzić, że interpretacja nieortodoksyjna bardziej zgadza się z eksperymentami, a teoria ukrytych parametrów jest także do przyjęcia. Stroną metodologiczną zajmiemy się później. Obecnie przedstawimy alternatywną interpretację mechaniki kwantowej, której autorem jest Dawid J. Bohm (Szkoła einsteinowska). Jest ona konkurencyjna dla tzw. kopenhaskiej interpretacji mechaniki kwantowej (szkoła Nielsa Bohra).

Są trzy zasadnicze różnice pomiędzy tradycyjnym a alternatywnym sformułowaniem mechaniki kwantowej. Doświadczenia z elektronami obalają dogmaty twórców mechaniki kwantowej mówiące, po pierwsze, że podstawowymi zjawiskami w przyrodzie rządzi

przypadek, po drugie, że chociaż obiekty materialne zawsze znajdują się w przestrzeni, są sytuacje, w których nie można określić, jaki obszar zajmują, po trzecie, że prawa rządzące zachowaniem się zwykłych obiektów fizycznych okazują się drastycznie zawodne. Deterministyczna interpretacja D. Bohma opiera się na dwóch hipotezach kosmologicznych dotyczących struktury świata materialnego. Pierwsza z nich zakłada jakościową nieskończoność przyrody, druga natomiast głosi, że rzeczywistość materialna składa się z nieskończonej liczby poziomów wzajemnie ze sobą powiązanych, posiadających jednak względną autonomię. Wśród tych poziomów można wyróżnić poziom makroskopowy (klasyczny), poziom kwantowy i poziom subkwantowy. W poziomach tych zawierają się poziomy dalsze, i nie jest wcale wykluczone, że jest ich nieskończona ilość. Są one w ten sposób zorganizowane, że jeden poziom wchodzi w substruktury drugiego i tak poziom subkwantowy implikuje bezpośrednio pozostałe dwa poziomy. Zarazem każdy z poziomów podlega odrębnym prawom, a prawa jednego poziomu nie są ilościowym rozszerzeniem praw innych poziomów. Tak więc, określony poziom posiada ograniczoną autonomię i nie daje się sprowadzić do innych poziomów, jednak wpływa na nie. Związki między poszczególnymi poziomami są obustronne. Zgodnie z hipotezą o wzajemnej zależności każdy przedmiot materialny i każde zjawisko we wszechświecie ma nieskończenie wiele przyczyn łącznych. Niektóre oddziaływania są jednak tak słabe, że można je pominąć, gdyż nie mają praktycznego znaczenia. Te natomiast skutki powiązań przyczynowych, które są wyraźne i silne, to nic innego jak przyczyny istotne (*significant causes*)¹⁴.

Wszystkie zdarzenia, jakie zachodzą w przyrodzie, mogą być rozpatrywane w pewnych izolowanych zespołach, które są opisywane za pomocą określonego rodzaju praw. Jednak żaden zespół zdarzeń, jak i praw nie obejmuje wszystkich jakości występujących w przyrodzie, a to dlatego, że przyroda, zdaniem D. Bohma, jest jakościowo nieskończona. Te z czynników przyczynowych, które pozostają poza danym zespołem zdarzeń, są nazywane przez niego czynnikami ubocznymi i przeciwstawiane są konieczności. Szczególną formą czynników ubocznych jest przypadek¹⁵.

Zarówno przyczynowość, która jest szczególnym przypadkiem konieczności, jak i czynniki uboczne są dwoma aspektami procesów zachodzących w przyrodzie. Te ostatnie, pozostając poza badanym zespołem zdarzeń, posiadają pewien stopień autonomii, która pozwala im na fluktuacje w zasadzie niezależne od tego co zachodzi w obrębie rozpatrywanego zespołu izolowanego. Wtedy też cechę konieczności można przypisać prawom przyczynowym. Gdy jednak abstrahuje się od zespołu izolowanego, to wtedy zależność przyczynowa zaczyna podlegać czynnikom ubocznym, które, jako że są związane z niedostępnymi jeszcze poziomami, są w znacznej mierze nieznanne. Fluktuacje czynników ubocznych mają wpływ na powstawanie zaburzeń, których nie da się przewidzieć przy pomocy dotychczas znanych praw. Średnia tych zaburzeń stanowi granicę stosowania prawa przyczynowego. Fluktuacje czynników ubocznych mają charakter nieregularny (nie można ich przewidzieć za pomocą praw rozpatrywanego zespołu zdarzeń). Można jednak sformułować prawa statystyczne, jeśli badać się będzie odpowiednio duże zespoły czynników podlegających fluktuacjom, gdyż wtedy będziemy mieli do czynienia z regularnymi tendencjami pozwalającymi formułować wspomniane prawa. Prawa te pomijają indywidualne szczegóły fluktuacji, uwarunkowane przyczynowo w szerszym zespole zdarzeń. To ograniczenie obszaru ważności praw statystycznych, wynikające z pominięcia związków przyczynowych w szerszych zespołach zdarzeń, równoważone jest ograniczeniem obszaru ważności prawa przyczynowego, będącego skutkiem pominięcia czynników ubocznych¹⁶.

Jeśli procesy, które na poziomie kwantowym wydają się nam indeterministyczne, są możliwe do opisanie tylko przez prawa statystyczne, to w gruncie rzeczy mogą być owe procesy zdeterminowane przez poziomy subkwantowe rządzone prawami przyczynowymi.

Tak więc stosunek praw przyczynowych do statystycznych należy pojmować w ten sposób, że z jednym poziomem związane są prawa przyczynowe, a z następnym prawa statystyczne. Musimy pamiętać, że według Bohma każdy poziom charakteryzuje się specyficznym, sobie tylko właściwym układem praw, którego nie można ekstrapolować na inne poziomy. Jeśli zatem amerykański uczony wprowadza pojęcie poziomu subkwantowego, to stwierdza tym samym, że kopenhaska interpretacja mechaniki kwantowej, którą reprezentuje Heisenberg, nie jest w stanie szczegółowo rozpatrywać ruchu cząstek elementarnych. By móc rozpatrywać te ruchy, należy zejść na poziom głębszy, który będzie pozostawał w takim stosunku do poziomu atomowego, jak ten pozostaje do poziomu ruchów Browna. Bohm sądzi, że podobna sytuacja zachodzi w przypadku mechaniki kwantowej. Prawa statystyczne, prawa prawdopodobieństwa, które ją opisują, są rezultatem przyczynowego biegu zdarzeń na niższym poziomie subkwantowym¹⁷.

Najistotniejszym zjawiskiem w pomiarach parametrów elektronów są zmiany wartości spinu elektronu. Są dwie składowe spinu elektronu, a mianowicie spin poziomy i spin pionowy. Elektron może przyjmować tylko jedną z dwóch wartości spinu pionowego, czyli góra lub dół w urządzeniu pomiarowym pionowym (niech jego modelem będzie pudełko pionowe) i jedną z dwóch wartości spinu poziomego, czyli prawy lub lewy w urządzeniu pomiarowym poziomym (pudełko poziome). Według standartowej interpretacji mechaniki kwantowej elektrony dzielą się statystycznie na połowy podczas pomiaru wartości spinu pionowego, a także podczas pomiaru wartości spinu poziomego. Elektrony znajdujące się w urządzeniu pomiarowym pionowym dzielą się dokładnie na połowy, z których jedna połowa, czyli 50% elektronów, wydostanie się otworem w górę, natomiast druga połowa, czyli następne 50% elektronów, wydostanie się otworem w dół. W urządzeniu pomiarowym poziomym połowa elektronów opuści urządzenie ze spinem prawym a druga ze spinem lewym.

Zwolennicy standartowej TK twierdzą dalej, że pomiary wartości spinu poziomego i pionowego elektronów, dokonywane w urządzeniach pomiarowych, są zakłócone¹⁸. Za zakłócenia uważa się zmiany wartości spinu połowy elektronów, np. ze spinem poziomym, kiedy dokonuje się pomiaru wartości spinu pionowego tych elektronów. Zachodzi również odwrotna sytuacja, w której zmienia się wartość spinu pionowego połowy elektronów wprowadzonych do urządzenia pomiarowego poziomego. Na przykład, dokładnie połowa statystyczna elektronów ze spinem prawym, podczas pomiaru wartości spinu pionowego, przybiera nową wartość, spinu lewego. Druga połowa elektronów podczas takiego pomiaru zachowuje tę samą wartość, spinu prawego, czyli pozostaje niezmienną. Według standartowej teorii kwantów nie można znaleźć uzasadnienia dla zaburzenia wartości spinu poziomego, dokładnie połowy elektronów, podczas pomiaru wartości spinu pionowego. Nie można znaleźć żadnej własności fizycznej, która by uzasadniała zmianę wartości spinu połowy elektronów. Nie da się przewidzieć, która połowa elektronów zmieni wartość spinu, a która nie. Wobec tego, że nie znajduje się przyczyn tych zmian, mówi się, że prawa nimi rządzące działają na zasadzie przypadku. Opisana sytuacja nasuwa trudności natury filozoficznej, bo metafizyczna zasada racji dostatecznej stwierdza, że nie są możliwe jakiegokolwiek zmiany bez przyczyny. Żeby udowodnić, że zmiany wartości spinu elektronów dokonują się pod wpływem konkretnych przyczyn, zwolennicy teorii Bohma wskazują na proste doświadczenie z elektronami.

Są dwa warianty doświadczenia, w których wykazuje się, że po pierwsze (pierwszy wariant) nie zawsze elektrony doznają zmiany wartości spinu poziomego podczas pomiaru wartości spinu pionowego¹⁹. Po drugie (drugi wariant), jeżeli połowa elektronów zmieni wartość spinu poziomego podczas pomiaru wartości spinu pionowego, to będzie wiadomo, co jest takiej zmiany przyczyną. W obu doświadczeniach wykorzystuje się przewidywania

zachowania się elektronów zgodnie z tradycyjnym sformułowaniem teorii kwantów sprawdzając, czy się one potwierdzą. W pierwszym wariacie doświadczenia przewiduje się, że elektrony z prawym spinem opuszczają „aparaturę” ze zmienioną wartością spinu, czyli że połowa z nich na wyjściu powinna mieć spin prawy a druga połowa lewy. Elektrony ze spinem prawym zostają wprowadzone do urządzenia pomiarowego pionowego. Połowa elektronów wylatujących w górę powinna mieć 50% elektronów ze spinem prawym i 50% elektronów ze spinem lewym. Również elektrony uciekające w dół powinny przejawiać tę samą statystykę. Elektrony biegnące w dół i w górę zostają odbite od specjalnych lusterek, aby można je było skupić w urządzeniu pomiarowym poziomym, w celu sprawdzenia wartości spinu. Okazuje się, że przewidywania co do zmiany wartości spinu poziomego elektronów nie sprawdzają się. Wszystkie elektrony z prawym spinem wprowadzone do aparatury opuściły ją, mając tylko prawy spin. Także zablokowanie połowy elektronów, w drugim wariacie doświadczenia, które wydostają się z urządzenia pomiarowego pionowego, nie powinno mieć wpływu na końcowy wynik uzyskany w pierwszym doświadczeniu. Jednak okazuje się, że taki wpływ istnieje, bo elektrony idące tylko ku górze lub tylko ku dołowi posiadają spin prawy i lewy a nie tylko prawy. W konsekwencji elektrony odbite od lusterek i skupione w urządzeniu pomiarowym poziomym opuszczają je dzieląc się na dwie połowy, jedną ze spinem prawym i drugą ze spinem lewym.

Wyniki doświadczeń z elektronami nie potwierdzają przewidywanego zachowania się elektronów, które sugerowała standardowa teoria kwantów. Prawem rządzącym zmianami wartości spinu elektronów nie kieruje przypadek, lecz przyczyna, która te zmiany powoduje. Stanowisko D. J. Bohma będące konkurencją dla kopenhaskiej interpretacji mechaniki kwantowej zamyka się w stwierdzeniu, że zmiana wartości spinu elektronów jest procesem deterministycznym, który można dokładnie prześledzić matematycznie. Jeżeli znany jest punkt wyjścia elektronu, to można obliczyć także punkt, do którego ten elektron zmierza.

Przez długi czas teoria Bohma była wyśmiewana przez protagonistów szkoły kopenhaskiej, choć nie potrafili oni znaleźć w niej żadnych błędów. Obecnie fizycy zaczynają brać ją bardziej na serio. Np. Dawid Z. Albert pozytywnie ocenia teorię D. Bohma. Píše on: „Według Bohma funkcje falowe to nie tylko obiekty matematyczne, ale byty fizyczne. Bohm traktuje je podobnie jak klasyczne pola sił, takie jak grawitacyjne czy magnetyczne. W jego teorii funkcje falowe decydują o ruchu cząstek, sterując nimi według właściwych dróg”²⁰.

„Teoria Bohma potrafi więc opisać osobliwe zachowanie się elektronów równie dobrze jak teoria standardowa. Co więcej (i co bardzo ważne) pozbawiona jest komplikacji, które kojarzą się z kwantowo-mechanicznym efektem superpozycji.” [...] „Interpretacja kopenhaska nadal pozostaje dogmatem przeciętnego fizyka, ale poważni badacze podstaw mechaniki kwantowej coraz rzadziej bronią standardowej wersji”²¹.

5. Obrona realizmu

Można się dziwić, dlaczego interpretacja kopenhaska ma takie wzięcie u fizyków. Nie opiera się ona przecież na intuicyjnym wglądzie w sferę subkwantową, nie wynika z doświadczenia. Najprawdopodobniej skłonność do negowania subkwantowej rzeczywistości, czyli tzw. „ukrytych parametrów” wynika z panującego w pierwszej połowie XX w. neopozytywizmu. Neopozytywiści dziedziczyli przekonanie I. Kanta, że świat pozapodmiotowy jest *ignotum x*. Nie możemy więc do niego dotrzeć. „Pozytywiści nie twierdzą, że poza umysłem świat nie istnieje; odrzucają oni tylko jako nie mające znaczenia jakiegokolwiek stwierdzenie o zewnętrznej rzeczywistości, które nie odwołuje się do wrażeń zmysłowych. W dwudziestym wieku niektórzy radykalni pozytywiści mieli znaczący wpływ

na poglądy fizyków, teoretyków”. [...] „Można sobie wyobrazić fizykę opartą na zasadach pozytywistycznych, która przewidywałaby wszystkie możliwe korelacje zdarzeń, a nadal pozostawiałaby świat całkowicie niezrozumiałą. Widząc te skrajne skutki odrzucenia realizmu, jest się skłonny nie odstępować od tego pierwszego założenia. Realizm [...] jest uzasadnieniem postulatu swobodnego stosowania indukcji”²².

Z tą postawą fizyków wiąże się ich pragmatyzm. „Wysoko cenią oni teorię kwantów, ponieważ jest ona niezwykle skutecznym maszynopodobnym narzędziem, pozwalającym na przewidywanie i wyjaśnianie zjawisk naturalnych, takich jak stałość atomu i struktura okresowego układu pierwiastków. Pytania dotyczące ostatecznej rzeczywistości tych zjawisk ogólnie biorąc niewiele ich interesują”²³.

Obecnie podchodzi się do poglądów pozytywistycznych z pewną dozą krytycyzmu. Naturalny umysł domaga się obiektywnego wyjaśnienia obserwowanych regularności. Statystyczne prawidłowości powinny mieć swoje uzasadnienie ontologiczne w zachowaniu się indywidualnych cząstek. „Indeterminizm zjawisk kwantowych – pisze S. Mazierski – nie oznacza jakiegoś chaosu, braku prawidłowości w przebiegu mikrozwisk. Prawidłowość ta jest podstawą przypisania cech kauzalnych procesom mikrofizycznym, aczkolwiek będzie to przyczynowość określająca zachowanie nie pojedynczych mikroobiektów, lecz zespołów statystycznych. Istnieje więc prawidłowość statystyczna, która jest przejawem wpływu środowiska na pojedyncze mikrozwiska”²⁴. Sama nawet korelacja spinów cząstek w stanie singletowym świadczy, że w zjawiskach kwantowych występują prawidłowości, niezależnie od naszej obserwacji.

Ks. Kazimierz Kłósak zachowuje ostrożną postawę wobec TK w sferze determinizmu przyczynowo-skutkowego. Idąc za J. Metallmannem i Z. Zawirskim stwierdza on, „że niemożność wyznaczenia czegoś za pomocą pomiarów nie jest jeszcze tym samym co brak zdeterminowania przyczynowego w naturze”²⁵.

Mówienie o redukcji paczki falowej (inne nazwy: przeskok funkcji falowej, skokowa redukcja superpozycji możliwości, redukcja funkcji falowej) w czasie pomiaru, nie jest poprawne. Metodologicznie biorąc jest to przejście od jednej metody, jaką jest statystyczny formalizm, wyrażony w funkcji falowej Schrödingera, stosowalny do zjawisk masowych, do metody makroskopowej obserwacji zachowania się indywidualnej cząstki wykrywanej przez detektor.

Fizycy popełniają też dość często błąd zacierania różnicy między aspektem teoriopoznawczym, a ontologicznym w interpretacji zjawisk kwantowych. Włodzimierz Kołos np. pisze: „W mechanice kwantowej natomiast probabilistyczny charakter naszej wiedzy wynika z samej istoty bytów mikroświata, a nie z ułomności naszego poznania”²⁶. John D. Barrow tak streszcza pogląd Nielsa Bohra w tym względzie: „Interpretacja kopenhaska ... utrzymuje, że nie istnieje żadna głęboka rzeczywistość, którą moglibyśmy odkryć w tradycyjnym sensie tego słowa, istnieje tylko jej opis. Rzeczywistość, którą obserwujemy, jest zdeterminowana przez akt obserwacji. Istnieje faktycznie w trakcie pomiaru – nie jest złudzeniem – lecz nie ma sensu mówić, że istnieje, gdy nie ma aktu pomiaru”²⁷. L. Pereira komentuje tę wypowiedź: „W «interpretacji kopenhaskiej» więc *rzeczywistość jest identyczna z rzeczywistością obserwowaną*. Tego, co nie jest obserwowane w akcie pomiaru, nie można uznać za istniejące w jakimś sensownym znaczeniu”²⁸.

Zakończenie

Problemów filozoficznych związanych z TK jest więcej. Można by dyskutować nad próbami wiązania wolności wyboru u człowieka z właściwościami kwantowymi jego mózgu²⁹. Można by omówić problem „parowania” czarnych dziur w scenariuszu przyszłych

dziejów Wszechświata, zastanowić się dokładniej nad sensownością stosowania mechaniki kwantowej do Wszechświata w momencie zwanym czasem Plancka (10^{-43}), gdy jego wymiary były mniejsze niż długość jego fali kwantowej, a w związku z tym nad autokreacją materii. Byłyby to jednak problemy szczegółowe, związane z zastosowaniem kopenhaskiej interpretacji TK. Podważywszy jednak w artykule tę teorię ogólnie od strony metodologicznej, możemy czuć się zwolnieni od rozpatrywania wyżej wymienionych szczegółowych zagadnień.

Stanisław ZIEMIAŃSKI SJ

PHILOSOPHISCHE FOLGEN DER ORTHODOXEN AUSLEGUNG DER QUANTENTHEORIE

Zusammenfassung

Auf der Ebene der Quantenobjekte stößt das menschliche Erkenntnisvermögen an eine unüberschreitbare Grenze. Diese Tatsache wurde von W. Heisenberg im Unbestimmtheitsprinzip ausgedrückt. Laut diesem Prinzip ist die Möglichkeit ausgeschlossen, die sogenannten komplementären Eigenschaften, wie das Momentum und der Ort, der subatomaren Objekte gleichsam mit der beliebigen Genauigkeit zu messen. Die Richtigkeit dieses Prinzips wird von niemandem in Frage gestellt. Das Prinzip selbst wird aber unterschiedlich philosophisch ausgelegt und kommentiert. Die Interpretationen der Quantentheorie können zu zwei wichtigsten Paradigmen zurückgeführt werden, d.h. zu einem ontologischen und einem erkenntnistheoretischen.

Die sogenannte orthodoxe (anders gesagt Kopenhagen-) Auslegung ist am häufigsten ontologisch gefärbt. Sie beinhaltet eine Negation des Determinismus auf der mikrokosmischen Ebene. In einigen Varianten der orthodoxen (bzw. standard-) Interpretation werden die subatomaren Eigenschaften als Aufsätze der Möglichkeiten verstanden, die erst durch die Beobachtung oder den Messungsvorgang aktualisiert und verwirklicht werden.

Eine andere Variante der ontologischen Interpretation wurde von A. Einstein gehalten. Der berühmte Gelehrte war immer der Meinung, die Quantenprozesse werden von verborgenen Parametern gesteuert. Leider konnte er nicht, trotz vieler Bemühungen, seine Stellung experimentell begründen. Er pflegte zu sagen, „daß Gott nicht mit den Würfeln spiele“, d.h. nichts in der Natur ist der lauten Zufälligkeit preisgegeben. Deshalb ist, seiner Meinung nach, die Quantentheorie unvollständig.

In der erkenntnistheoretischen Auslegung enthält man sich der ontologischen Behauptungen über die Quantenobjekte. Die sogenannte Reduktion des Wellenpackets wird als der Übergang von der statistischen zur individuellen Forschungsmethode betrachtet. Ein Versuch, zwischen den zwei oben erwähnten Interpretationen mittels des bekannten Bellschen Theorems zu entscheiden, scheiterte, in dem Sinn, daß obwohl die optischen Experimente meistens der Bellschen Ungleichheit widersprachen, und so besser mit der orthodoxen Auslegung übereinstimmten, das wichtigste Problem, ob es die verborgenen Parameter gibt oder nicht, jedoch keineswegs endgültig gelöst worden ist. Die Experimente zwingen uns nur dazu, irgendeine der Voraussetzungen der Quantentheorie zu verlassen. Da diese lediglich drei sind: Realismus, Induktion und Lokalität, reicht es, um einen

Widerspruch auszuschliessen, auf eine weniger wichtige Voraussetzung, z.B. auf die Lokalität zu verzichten. Es entstehen dann zwar neue Schwierigkeiten, aber die Wissenschaft ist dabei von keiner revolutionären Erschütterung bedroht.

Eine Entscheidung für irgendeine Auslegung der Quantentheorie ist philosophisch in verschiedenen Bereichen folgenswer. Nach der orthodoxen Auslegung wird z.B. auf die Ansicht hingebaut, daß die Welt von selbst, ohne Gottes Eingreifen, durch die Quantenfluktuation entstand.

Das Verzichten auf die Lokalität der Partikel, die sich in einem Singlettzustand befinden, erschwert das Kontingenzargument, welches als seine Voraussetzung eine Pluralität der Seienden hat.

Es gibt auch Versuche, den freien Willen auf Grund der orthodoxen Auslegung zu interpretieren, die für den Indeterminismus im subatomaren Mikrowelt wirbt.

Der Autor des Artikels neigt zur unorthodoxen Auslegung, sowohl in ihrer erkenntnistheoretischen Form, als auch in ihrer ontologischen positiven Variante. Er kritisiert die Standardinterpretation, indem er sich auf den Gegenvorschlag von J. Bohm beruft. Dieser Physiker stellte auf Grund der Experimenten, in welchen er den Elektronenspin erforscht hat, fest, daß sich die Elektronen nicht gemäß der orthodoxen Auslegung verhalten.

Dann weist der Autor auf die geschichtsphilosophischen Wurzeln der Kopenhageninterpretation hin. Er stellt fest, daß in ihr der Positivismus und Neopositivismus ihr negatives Gepräge hinterlassen haben. Das positivistische System behauptet, es existiert nur das, was wir direkt beobachten. Was sich der Sinneserfahrung entzieht, das existiert nicht. Es bleibt dann nichts übrig als pragmatisch das Wirken der Messinstrumenten zu Betrachten.

Der Autor stimmt einerseits mit der Stellung von K. Klószak überein, der sagte, daß die Unmöglichkeit, die Parameter im Quantenbereich zu bestimmen, uns nicht berechtigt, einen Entschluss bezüglich dessen was im subatomaren Bereich vorgeht, zu fassen. Andererseits neigt er nicht zum absoluten Agnostizismus bezüglich des Quantenmikrokosmoses. Die statistischen Regelmäßigkeiten weisen auf die tieferen wirklichen Bedingungen, die im subatomaren Bereich verborgen sind. Auch beweist die Korrelation der Drehimpulse der Partikel im Singlettzustand, daß in den Quantumphänomenen eine Regelmäßigkeit herrscht, ungeachtet, ob jene beobachtet oder unbeobachtet sind.

Im Artikel blieben einige Themen außer Acht, z.B. das Problem der Relation zwischen der Quantentheorie und dem freien Willen, das Problem des vermuteten Eingreifens Gottes in den Bereich des Unbestimmten. Der Autor ist der Meinung, daß diese Scheinprobleme sind und nicht in Betracht genommen werden müssen, wenn es gelingt generell, die orthodoxe Interpretation als unhaltbar und als unnötig zu beweisen, denn die Auslegung ist nur soviel wert, wie auch ihre Fundamente sind. Wir brauchen auch die philosophischen Folgen der orthodoxen Stellung nicht allzu ernst nehmen, wenn deren Prämissen ungenügend begründet sind.

¹ Planck 1900, Einstein 1905

² John Polkinghorn, *One World*, Princeton (Princeton Univers. Press), 1986, s. 41.

³ W. Kołos, *Indeterminizm w fizyce kwantowej i poza nią*, w: *Nauka – religia – dzieje*. VII Seminarium w Castel Gandolfo, 3-5 VIII 1993, s. 25.

⁴ Z. Jacyna-Onyszkiewicz, *Problem istnienia – immaterialna interpretacja teorii kwantów*, w: *Nauka – religia – dzieje*. VII Seminarium w Castel Gandolfo, 3-5 VIII 1993, s. 35.

⁵ S. Mazierski, *Elementy kosmologii filozoficznej i przyrodniczej*. Poznań 1972, s. 305.

⁶ Zob.: A. Aspect, J. Dalibard i G. Roger, *Phys. Rev. Lett.* 49, 1804 (1982).

⁷ R. Matthews, *O najskrytszych zamysłach Pana Boga. Tajemnice na pograniczu wiedzy*, przeł. Aleksandra Kopystyńska. Warszawa 1995, s. 259.

⁸ Tamże, s. 264. Zob. Stephen W. Hawking, *Krótką historia czasu. Od Wielkiego Wybuchu do czarnych dziur*. Warszawa 1990, s. 134.

⁹ *The Universe Inflation out of Chaos*, w: *Physical Cosmology and Philosophy*, ed. by John Leslie, New York, London, 1990, N. 19, s. 247.

¹⁰ *Is the Universe a Vacuum Fluctuation?* w: *Physical Cosmology and Philosophy*, ed. John Leslie, n. 17, New York, London 1990, s. 218.

¹¹ *What Causes the Big Bang?* w: *Physical Cosmology and Philosophy*, ed. John Leslie, n. 18, New York, London 1990, s. 237.

¹² *Teoria kwantowa i rzeczywistość*, przeł. Zygmunt Ajduk, „Postępy Fizyki”, 33 (1982), z. 5-6, s. 341.

¹³ *Zasada komplementarności N. Bohra i relacje niedokładności W. Heisenberga a zagadnienie indywidualności fizykalnych*, „Polonia Sacra” I (1948), s. 312.

¹⁴ Zob. D. Bohm, *Przyczynowość i przypadek w fizyce współczesnej*, przeł. S. Ruppert, Warszawa 1961, s. 28.

¹⁵ Zob. tamże, s. 18-19.

¹⁶ Zob. D. Bohm, *Filozoficzne problemy nowego ujęcia mechaniki kwantowej*, przeł. O. Wojtasiewicz, „Studia Filozoficzne”, (1959) z. 1, s. 35-37.

¹⁷ Zob. D. Bohm, *Przyczynowość i przypadek...*, dz. cyt., s. 140-144 i 182-187. Zob. też: D. Bohm, *A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of „Hidden” Variables. I and II.*, w: *Quantum Theory nad Measurements*, red. J. A. Wheeler i W. H. Zurek. Princeton University Press, 1983.

¹⁸ Por. *Przyczynowość i przypadek*, dz. cyt., s. 34-35.

¹⁹ Por. *Filozoficzne problemy*, dz. cyt. s. 36-37.

²⁰ *Alternatywna mechanika kwantowa*, „Świat Nauki” (Scientific American) wyd. polskie, 7(35) lipiec 1994, s. 39.

²¹ Tamże, s. 40.

²² B. d'Espagnat, dz. cyt. s. 337-338.

²³ Christopher F. Mooney, *Theology and the Heisenberg Uncertainty Principle*, „The Heythrop Journal”, 34 (1993), s. 261.

²⁴ Stanisław Mazierski, *Elementy kosmologii filozoficznej i przyrodniczej*. Poznań 1972, s. 342.

²⁵ *Metafizyczna i fizyczna zasada przyczynowości wobec relacji niedokładności W. Heisenberga*, „Roczniki Filozoficzne”, I (1948), Lublin, s. 211.

²⁶ *Indeterminizm w fizyce kwantowej i poza nią*, w: „Nauka – religia – dzieje” VII Seminarium w Castel Gandolfo, 3-5.VIII. 1993, s. 27.

²⁷ John D. Barrow, *The World within the World*, Oxford University Press, 1988, s. 131-159, cytowane za: Lancelot Pereira SJ, *The Enchanted Darkness*, Gujarat 1995, s. 114.

²⁸ Lancelot Pereira SJ, tamże, s. 118.

²⁹ Niektórzy, jak Ian Barbour, w książce: *Issues in Science and Religion*, N.Y. 1971, s. 305-314, twierdzą, że komórki mózgowie i neurony są zbyt duże, by do nich stosować mechanikę kwantową.