

Robert Więckowski

Ku ontologii obiektów kwantowych

Studia Philosophiae Christianae 39/2, 363-377

2003

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

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.

EMPIRICAL, THEORETICAL AND PSYCHOLOGICAL CAUSES OF TAXONOMIC CONTROVERSIES

Summary

Paleoanthropologists excavate and examine fossil material, then try to classify it. But the history of fossil hominids convinces us that this is not an easy task. The same fossil material has often been classified in totally different ways. In the past, anthropologists multiplied taxonomic names. To the mid – 20th century subfamily *Australopithecinae* contained three genus: *Australopithecus*, *Paranthropus*, and *Plesianthropus*. Material from Far East was classified into several species. In the sixties and seventies, such multiplication was stopped. Moreover, anthropologists decided to combine different names of hominids.

The question which arises therefore, is what was the reason of such controversies. Why did anthropologist classify the same fossil material in different ways? I think that causes of taxonomic controversies belong to three areas: empirical, theoretical and psychological. To the first of them I number the fragmentary nature of fossil findings and unclear degree of sexual dimorphism. To the second one there belong: multitude of paradigms in anthropology and different definitions of species. The last area consists of psychological issues.

ROBERT WIĘCKOWSKI

Instytut Filozofii UKSW

KU ONTOLOGII OBIEKTÓW KWANTOWYCH

Czy realnie istnieją obiekty kwantowe? Inaczej mówiąc, czy indywidua opisywane przez teorię kwantową istnieją obiektywnie, transcendentnie w stosunku do poznającego podmiotu, jakkolwiekby tę transcendencję rozumieć? Mogłoby się wydawać, że odpowiedź na tak postawione pytanie zależy tylko od przyjęcia podstawowych preferencji filozoficznych. Dla realisty uznającego, najogólniej mówiąc, istnienie rzeczywistego świata niezależnie od podmiotu, takie mikroobiekty istnieją tak, jak wszystkie inne. Albo przyjmuje się postawę realisty konsekwentnie, a więc także w stosunku do świata cząsteczek, atomów i cząstek elementarnych, albo należy ją konse-

kwentnie odrzucić. Idealista będzie odpowiednio przypisywał tym obiektom status bytów idealnych. Przyjmując postawę realisty, chciałbym wykazać, że odpowiedź na postawione pytanie bynajmniej nie jest trywialna.

Jednym z powodów kwestionowania przez realistę istnienia obiektów kwantowych może być fakt, że w zasadzie obserwujemy bezpośrednio jedynie makroobiekty typu chleb czy kamień, które w opisie fizycznym stanowią zespół ogromnej liczby atomów. Problem ten, jak sądzę, w dużej mierze został rozstrzygnięty przez eksperymenty fizyczne, które są w stanie względnie wyizolować takie pojedyncze cząstki. Znane są np. doświadczenia ze złapaniem pojedynczego atomu boru w pułapkę magnetyczną. Toteż o ile można mówić o istnieniu cząstek kwantowych, o tyle wyniki eksperymentów uzyskanych za pomocą najnowszych technik laboratoryjnych skłaniają mnie do przyjęcia takiego istnienia. Osobną trudność stanowią tu kwarki, które nie występują samodzielnie w przyrodzie, ale jedynie w połączeniu z innymi kwarkami, tworząc w ten sposób różne typy cząstek elementarnych. Pomijając zagadnienie istnienia owych kwarków, sądzę, że bycie częścią dużych indywiduali nie stanowi przeszkody dla istnienia cząstek kwantowych, czymkolwiek by one nie były.

Poważniejszy problem stanowi fakt, że o tych obiektach i ich specyficznych własnościach można mówić, jedynie posługując się opisem złożonej teorii fizycznej, jaką jest mechanika kwantowa. Nie wystarczą tu sprawdzone, naturalne ludzkie intuicje. Pozostaje natomiast opis za pomocą skomplikowanego formalizmu matematycznego, z użyciem idealnych obiektów matematycznych, które reprezentują realne fizyczne obiekty. Bez owego ogromnego bagażu teoretycznego wyobraźnia nie na wiele tu się przyda. Te trudności pomnaża fakt, że badane obiekty wykazują własności nie występujące w fizyce klasycznej i w doświadczeniu potocznym. Do owych realnych bytów nie mamy dostępu inaczej, jak za pomocą idealnych obiektów matematycznych występujących w teoriach fizycznych. Doświadczenie fizyczne, w którym bada się owe własności, zakłada całą mechanikę kwantową i dlatego nie jest w stanie usunąć tej trudności pojmowania rzeczywistości kwantowej. Jeśli na przykład, mówiąc o elektronie, używam pojęcia funkcji falowej z przestrzeni Hilberta, to nasuwa się tu pytanie, czy mam do czynienia z rzeczywistym elektronem, czy z abstraktem matematycznym o charakterze idealnym? Poza tą idealizacją nie ma rozsądnego opisu mikro-

obiektów, jak to ma miejsce w przypadku makroobiektów znanych skądinąd z doświadczenia codziennego. W doświadczeniu potocznym nie ma po prostu żadnego odpowiednika dla doświadczenia kwantowego. Uwikłanie w opis matematyczny nasuwa pytanie, na ile badane obiekty kwantowe są transcendentne w stosunku do języka teorii fizycznej, co przywołuje pytanie postawione na początku o realność tych obiektów. Wydaje się, że ze względu na to uwikłanie niektórzy autorzy z nurtu tomistycznego rezygnują z rozpatrywania tego zagadnienia już w punkcie wyjścia¹.

Zagadnienie to wymaga osobnego opracowania i nie zamierzam go w tym artykule dalej roztrząsać. Przyjmuję jedynie, że obiekty kwantowe nie są jedynie tworam idealnym z tego tylko względu, że ich opis dokonuje się w języku zmatematyzowanej teorii. Ten opis bowiem przez doświadczenie fizyczne jest konfrontowany z rzeczywistością. Ów aspekt eksperymentalny stanowi, jak sądzę, gwarancję tego, że fizycy nie zajmują się jedynie własnymi wytworami umysłów, ale rzeczywistością, mimo uwikłania w dość wysublimowane i złożone narzędzia teoretyczne. Konieczność użycia opisu matematycznego świadczy nie o iluzoryczności cząstek kwantowych, ale o złożoności badanej przez fizyków rzeczywistości.

Problem istnienia na poziomie kwantowym sięga głębiej niż kwestia użycia specyficznego języka matematycznego i dotyczy specyficznych własności kwantowych mikrocząstek. Od samego początku istnienia teorii kwantowej zagadnienie to okazało się twardym orzechem do zgryzienia. Był to tak trudny temat, że pierwsza i najbardziej rozpowszechniona interpretacja mechaniki kwantowej, zwana szkołą kopenhaską od dzieł N. Bohra i W. Heisenberga² opublikowanych właśnie w Kopenhadze, skrzętnie omijała zagadnienia ontologiczne, pozostając jedynie na poziomie epistemologicznym. Wszystkie inne interpretacje również nie potrafiły podać zadowalającej koncepcji ontologicznej świata kwantowego. Problem, do dzisiaj otwarty, jeszcze pewnie długo nie znajdzie rozstrzygających rozwiązań. W dalszej części artykułu zamierzam przedstawić niektóre wła-

¹ M. A. Krapiec, S. Kamiński, Z. J. Zdybicka, P. Jaroszyński, *Wprowadzenie do filozofii*, Lublin 1992, 166-169.

² W. Heisenberg, *Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*, *Zeitschrift für Physik* 43(1927), 172-198; N. Bohr, *The quantum postulate and the recent development of atomic theory*, *Nature* 121(1928), 580-590.

sności obiektów kwantowych w ujęciu szkoły kopenhaskiej oraz w tzw. eksperymencie EPR, by następnie przejść do próby sformułowania pewnych wniosków natury filozoficznej.

1. ZAGADNIENIE ISTNIENIA CZĄSTEK KWANTOWYCH W INTERPRETACJI KOPENHASKIEJ

Brak wyraźnego stanowiska ontologicznego w szkole kopenhaskiej z jednej strony może uchodzić za jej mankament, z drugiej jednak ostrożność przed zbyt pochopnym określaniem natury zjawisk atomowych może być dobrym punktem wyjścia do polemiki na temat rzeczywistości cząstek kwantowych. Sam N. Bohr, jeden z głównych architektów omawianej interpretacji, świadomie unikał ostatecznych rozstrzygnięć w tej sprawie³. Niektóre bowiem koncepcje, na przykład takie, jak teoria wielu światów, czy koncepcja von Neumanna kolapsu funkcji falowej w świadomości obserwatora, uważane są przez wielu autorów za zbyt pretensjonalne i wnoszące w sposób niedostatecznie uzasadniony nadmierny bagaż metafizyczny. Zanim uda się określić status metafizyczny mikroobiektów, co, jak uważam, jest w przyszłości możliwe i pożądane, warto by przedyskutować to zagadnienie z punktu widzenia najmniej kontrowersyjnej interpretacji teorii kwantowej, jaką jest wspomniana szkoła kopenhaska.

Obiekty kwantowe są reprezentowane fizycznie w postaci tzw. funkcji falowej. Matematycznie jest ona wektorem w pewnej przestrzeni liniowej zwanej przestrzenią Hilberta. Oznacza to, że dla funkcji falowej obowiązuje zasada superpozycji. Jedna taka funkcja falowa, albo inaczej wektor stanu, rozkłada się zwykle na nieskończenie wiele innych wektorów stanu, podobnie jak składanie wektorów w przestrzeni. W momencie pomiaru cząstka ta przechodzi z całego pęku owych potencjalnych stanów w jeden określony wektor stanu, zgodnie z uzyskanymi wynikami pomiaru⁴. W tym rozkładzie funkcji

³ J. A. Wheeler, *Bohr, Einstein, and the strange lesson of the quantum*, w: *Mind in nature*, red. R. Q. Elvec, San Francisco 1982, 6.

⁴ Ściśle mówiąc, tak się dzieje dla tzw. pomiarów pierwszego rodzaju, które stanowią pewną sytuację idealną. W rzeczywistym eksperymencie fizycznym mamy do czynienia z pomiarem drugiego rodzaju, jednak te rozróżnienia nie są istotne dla obecnych rozważań i dlatego dalej nie będę wyjaśniał, na czym polega różnica między nimi. Zwykle w zagadnieniach pomiaru kwantowego autorzy ograniczają się tylko do omówienia pomiarów pierwszego rodzaju.

falowej na rodzinę innych funkcji falowych przy każdej z nich stoi pewien współczynnik, który jest liczbą zespoloną. Zgodnie z interpretacją M. Borna, reprezentanta szkoły kopenhaskiej, kwadrat modułu tego współczynnika jest prawdopodobieństwem znalezienia się cząstki w tym stanie w trakcie pomiaru. Mamy zatem pakiet stanów potencjalnych oraz ich aktualizację w akcie pomiarowym.

Obecność wspomnianych współczynników sprawia, że w tym ujęciu funkcja falowa ma charakter probabilistyczny. Powstaje tu pytanie o naturę owych stanów potencjalnych i sens wspomnianych tu współczynników probabilistycznych. Czy prawdopodobieństwo to ma charakter obiektywny czy subiektywny; czy jest ono realne, czy stanowi pewną wiedzę obserwatora na temat przewidywanych wyników pomiaru? Według interpretacji kopenhaskiej ma ono charakter podstawowy i nieredukowalny⁵. Nie musi to zaraz oznaczać istnienia jakichś ukrytych praw deterministycznych, o których jeszcze nic nie wiemy. Ta probabilistyka jest fundamentalną i wewnętrzną cechą świata materialnego o charakterze obiektywnym i nie jest tylko subiektywną miarą wiedzy podmiotu, wykonującego określony eksperyment⁶. Jeśli, na przykład, chcemy badać położenie jakiejś cząstki, to z opisu teoretycznego wynika, że cząstka ta jest w superpozycji stanów bycia w różnym położeniu. Każdemu punktowi w przestrzeni odpowiada pewna gęstość prawdopodobieństwa znalezienia się cząstki w tym właśnie punkcie. Zrealizowanie eksperymentu dopiero pozwoli stwierdzić, gdzie faktycznie ta cząstka była zarejestrowana.

Niektórzy autorzy tacy, jak C. F. Weizsäcker⁷ i G. Süßmann⁸, przyjmują skrajnie subiektywne stanowisko. Ten pierwszy uważa, że można uniknąć wszystkich pozornych paradoksów, jeżeli wektor stanu potraktuje się konsekwentnie jako stan wiedzy obserwatora⁹. Wówczas na przykład przyjęta w teorii kwantowej zasada nieoznaczoności Heisenberga byłaby po prostu wyrazem ograniczenia naszej wiedzy

⁵ H. Primas, *Chemistry, Quantum Mechanics and Reductionism*, Berlin-Heidelberg 1981, 99.

⁶ В. А. Фок, *Об интерпретации квантовой механики*, *Успехи Физических Наук* 62(1957), 461-474.

⁷ C. F. Weizsäcker, *Zur Deutung der Quantenmechanik*, *Zeitschrift für Physik* 118(1941), 489-509.

⁸ G. Süßmann, *An analysis of measurement*, w: *Observation and interpretation*, red. S. Körner, London 1957, 131-136.

⁹ C. F. Weizsäcker, *Die Einheit der Physik*, w: *Werner Heisenberg und die Physik unserer Zeit*, red. F. Bopp, Braunschweig 1961, 23-46.

o układzie. Podobnie można by wytłumaczyć inne niejasności mechaniki kwantowej, gdy się przyjmie taką subiektywną interpretację funkcji falowej. Pojawia się jednak inny problem. Nie jest jasne, dlaczego subiektywny wektor stanu spełnia równanie Schrödingera zależne od czasu¹⁰. Owe współczynniki probabilistyczne przy potencjalnych wektorach stanu ściśle podlegają obiektywnym prawom fizycznym, co przemawia za tym, że nie możemy mówić tylko o wiedzy ludzkiej, ale o wewnętrznej własności samej cząstki.

Ustalenie obiektywności wspomnianych wyżej potencjalnych wektorów stanu oraz ich współczynników jest trudnym zagadnieniem i znajduje różne rozwiązania w ramach samej interpretacji kopenhaskiej. Bardziej subiektywny charakter przyjmuje stanowisko W. Heisenberga. Według niego, prawa przyrody, które fizycy formułują matematycznie w mechanice kwantowej, nie dotyczą samych cząstek, ale opisują jedynie naszą wiedzę o cząstkach elementarnych¹¹. Jednocześnie przyjmuje on obiektywny charakter czystych stanów kwantowych w tym sensie, że własności fizyczne, jakie są w nich zawarte, mają charakter obiektywny, odnoszą się one do wewnętrznych własności obiektów kwantowych. Ale nawet w przypadku czystych stanów kwantowych nie można utożsamiać ze sobą obiektywności i realności. Heisenberg przyjmuje, że stany te reprezentują potencjalną możliwość, która ma charakter obiektywny, tzn. ta możliwość jest niezależna od obserwatora. Stan zamkniętego układu kwantowego reprezentowany przez wektor z przestrzeni Hilberta jest obiektywny, ale nie realny¹².

O tym, że składowe, potencjalne wektory stanu nie koniecznie muszą mieć charakter realny, ale stanowią pewną formę opisu może świadczyć fakt, że wybór takiej rodziny wektorów stanu może się dokonać na wiele sposobów. To jak krojenie bochenka chleba. Taki bochenek można kroić w różnych płaszczyznach: poziomej, pionowej w poprzek, wzdłuż i w najróżniejszych płaszczyznach ukośnych. Za każdym razem otrzymamy inne pajdy chleba składające się na ten sam bochenek. Podobnie jest z superpozycją stanów

¹⁰ H. Primas, dz. cyt., 104.

¹¹ W. Heisenberg, *The representation of nature in contemporary physics*, Daedalus 87(1958), 95-108.

¹² W. Heisenberg, *The development of the interpretation of the quantum theory*, w: *Niels Bohr and the development of physics*, red. W. Pauli, London 1955, 12-29.

kwantowych. Daną funkcję falową można rozłożyć na wektory stanu położenia, pędu, energii i inne. Każda taka superpozycja da w efekcie ten sam wektor stanu, choć każda jest zbiorem innych wektorów stanu. Dopiero akt pomiarowy sprawia, że jeden z takich stanów się aktualizuje, stając się już realnym stanem kwantowym. Można by zatem przyjąć za szkołą kopenhaską, że stany potencjalne oraz ich współczynniki probabilistyczne stanowią obiektywne własności danej cząstki, które aktualizują się dopiero w momencie pomiaru kwantowego.

W ten sposób problem własności cząstek kwantowych zostaje przerzucony na moment pomiaru kwantowego. To zagadnienie jest kluczowe w interpretacji mechaniki kwantowej. Wszystkie paradoksy tej teorii skupiają się na pomiarze kwantowym. Jest to także główny przedmiot zainteresowań interpretacji kopenhaskiej. Problem ten ma także wymiar ontologiczny. Zachodzi tutaj pytanie, czy redukcja stanów potencjalnych do pojedynczego stanu mierzonego w eksperymencie jest tylko zwiększeniem wiedzy obserwatora, czy dokonuje się jakaś obiektywna zmiana stanu cząstki? Odpowiedzi na te pytania są różne.

W. Heisenberg przyjmuje, że w opisie aktu pomiarowego należy dokonać przez obserwatora podziału świata fizycznego na dwie części, którymi są: obiekt obserwowany i układ, który dokonuje obserwacji¹³. Badana cząstka traktowana jest kwantowo, zaś aparatura pomiarowa opisywana jest w języku fizyki klasycznej. Ten podział jest w zasadzie dowolny i pozostawiony obserwatorowi, aby go dokonał według własnego uznania i potrzeb. Przyjmuje on zatem zachodzenie ostrego „cięcia” pomiędzy układem badanym, a urządzeniem eksperymentalnym, które może być dokonane arbitralnie na wiele sposobów¹⁴.

Inaczej na to zagadnienie zapatruje się N. Bohr. Nie mówi on o „cięciu”, gdyż według niego w opisie fizycznym nigdy nie można pomijać urządzenia badającego. Proponuje, aby użycie słowa „zjawisko” odnosić wyłącznie do obserwacji uzyskanej w określonych warunkach, obejmującej cały eksperyment¹⁵. Wówczas doświadczenie fizyczne traktowane jest jako niepodzielna całość, która zawie-

¹³ H. Primas, dz. cyt., 100.

¹⁴ Tamże, 100.

¹⁵ N. Bohr, *On the notion of causality and complementarity*, *Dialectica* 2(1948), 312-319.

ra także narzędzia obserwacyjne. Dla niego, jak pisał, „nie ma świata kwantowego”¹⁶. Nie traktuje on układu kwantowego jako oddziałujących cząstek istniejących niezależnie od siebie. Badany układ kwantowy nie może być uważany za izolowany od otoczenia eksperymentalnego, a wektor stanu charakteryzuje zarazem dany układ mikrofizyczny i całą aparaturę doświadczalną używaną w celu dokonania obserwacji¹⁷. Środki obserwacyjne wraz z badanym obiektem traktuje Bohr jako niepodzielną całość.

W przeciwieństwie do fizyki klasycznej, całkowita entropia badanego obiektu i środków obserwacyjnych wzrasta zawsze po dokonaniu pomiaru. Klasycznie, przynajmniej w teorii jest do pomysłenia sytuacja, w której wpływ obserwacji na badany proces jest do zaniebdania i nie zwiększa entropii mierzonego układu fizycznego. Obiekt badany traktowany jest jako niezależny od urządzenia pomiarowego, które biernie rejestruje wyniki, nie wpływając w sposób istotny na przebieg procesu fizycznego danego układu. Nawet jeśli zdawano sobie sprawę z tego, że w praktyce nie da się osiągnąć tego ideału, to uważano, że wpływ urządzenia obserwowanego będzie można w przyszłości dowolnie ograniczyć przez zastosowanie coraz to bardziej doskonalej aparatury. W mechanice kwantowej akt pomiarowy jest procesem wewnątrznie nieodwracalnym¹⁸ i część informacji o badanym obiekcie ginie bezpowrotnie. W efekcie zwiększa się entropia układu. Obserwacja doświadczalna może być uważana za kompletną tylko wtedy, gdy jej wyniki są zarejestrowane w postaci makrofizycznego zapisu dostępnego bezpośrednio obserwatorowi. W przypadku procesów kwantowych jest to możliwe tylko wtedy, gdy zachodzi redukcja paczki falowej, co jest procesem nieodwracalnym, istotnie zmieniającym stan całego układu fizycznego. Dlatego nie da się nigdy wyeliminować wpływu środków pomiarowych na przebieg badanego procesu kwantowego.

Ta ingerencja w akcie pomiarowym wprowadza jednak pewne ograniczenia. Nie można mierzyć jednocześnie pewnych wielkości dynamicznych. Wielkości te Bohr nazywa komplementarnymi¹⁹. Są

¹⁶ N. Bohr, *Essays 1958-1962 on atomic physics and human knowledge*, New York 1963.

¹⁷ H. Primas, dz. cyt., 100-101.

¹⁸ N. Bohr, *Quantum physics and philosophy, causality and complementarity*, art. cyt., 308-314.

¹⁹ Tamże, 103.

to własności fizyczne, które w pewien sposób wzajemnie się wykluczają, a które zarazem są niezbędne do pełnego opisu dynamiki układu kwantowego. Takimi wielkościami są np. pęd i położenie albo spin w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach. Ich aktualizacja w procesie pomiaru jest możliwa tylko pod warunkami wzajemnie się wykluczającymi. Nie można np. mierzyć spinu w kierunku z , jeżeli mierzy się ten spin w kierunku x . Jeżeli obserwujemy jedne własności, te drugie pozostają ukryte. Jeśli obserwujemy efekt dyfrakcji elektronu jako przejaw jego własności falowych, to nie można obserwować jego własności korpuskularnych. Które własności mają być obserwowane, a które pozostaną ukryte, pozostawione jest do wyboru eksperymentatorowi. Może on bowiem wybierać, który spośród wzajemnie wykluczających się eksperymentów ma być zrealizowany²⁰.

Chociaż obserwator może wybierać, które doświadczenie zaaranżować i którą wielkość ma zmierzyć, to jednak W. Pauli zauważa, że dalej nie ma on już żadnej możliwości, aby wpłynąć na wyniki eksperymentu²¹. W tym sensie opis zjawisk atomowych w tej teorii ma charakter obiektywny. Nie jest to jednak obiektywność taka jak w fizyce klasycznej. Stan układu kwantowego w pewnym sensie zależy od wyboru rodzaju eksperymentu. Zachodzenie takiej zależności od dokonanego pomiaru fizycznego ukazuje nowy rodzaj przyrody jako swoistej całości²². Jednak nieodwracalność aktu pomiarowego daje w efekcie obiektywny charakter zdarzeń kwantowych.

2. TEST ONTOLOGICZNY W EKSPERYMENCIE EPR

Problem statusu ontycznego stanów kwantowych doczekał się trafnego testu doświadczalnego zwanego eksperymentem EPR. Nazwa pochodzi od autorów pomysłu A. Einsteina, B. Podolsky'ego i N. Rosena²³. Einstein, który od początku powstania teorii kwantowej był oponentem w stosunku do interpretacji kopenhaskiej, uważał, że interpretacja kopenhaska jest niezupełna i że w rzeczywistości istnieje ukryty mechanizm, który kryje się we wszechświecie

²⁰ W. Pauli, *The concept of complementarity. Editorial*, *Dialectica* 2(1948), 307-311.

²¹ W. Pauli, *Matter, w: Man's right to knowledge*, New York 1955, 10-18.

²² Tamże, 10-18.

²³ A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*, *Physical Review* 47(1936), 777-780.

i ujawnia się na poziomie kwantowym jako niepewność, zasada nieoznaczoności Heisenberga i fluktuacje statystyczne.

Chociaż sama idea eksperymentu niezwykle trafnie wychwytuje trudności związane ze zrozumieniem mechaniki kwantowej, to jego realizacja jest w praktyce bardzo trudna. Dopiero John Bell w 1964 roku podał sposób na zmierzenie owych korelacji EPR. Bell rozpatrywał dla potrzeb eksperymentu spiny cząstek lub polaryzację fotonów. Cząstka obdarzona spinem zachowuje się jak kręcący się bąk. Obecność spinu objawia się między innymi w tym, że cząstka posiada określony moment magnetyczny i w zewnętrznym polu elektromagnetycznym zachowuje się jak mały magnes. Wielkościami komplementarnymi dla spinu są jego składowe w kartezjańskim układzie współrzędnych. Kiedy mierzymy spin cząstki w kierunku x , to nie możemy dokonać pomiaru składowych spinu w kierunku y i w kierunku z . Zatem wartości składowe spinu S_x i S_z są wielkościami komplementarnymi. Takimi wielkościami są też składowe S_x i S_y , albo S_y i S_z . Wartość spinu jest o tyle łatwiej wyznaczyć, że dla większości cząstek może on przyjmować tylko dwie wartości $+1/2$ i $-1/2$, mierzone w jednostce \hbar . Takie wielkości dla pary pojedynczych cząstek jest o wiele łatwiej mierzyć aniżeli położenie i pęd. W przypadku światła spin fotonu manifestuje się przez polaryzację światła²⁴, która jest stosunkowo łatwa do zmierzenia. Wystarczy do tego celu użyć zwykłych filtrów polaryzacyjnych.

Bell badał korelacje między mierzonymi składowymi spinu dla obu cząstek z eksperymentu EPR. Pomimo wspomnianych ułatwień realizacja takiego doświadczenia wciąż nie jest prosta, gdyż należy badać wiele par cząstek, które mają przypadkowo ustawione spiny i należy odrzucić te przypadki, w których spin obu cząstek mierzony jest w tym samym kierunku. Jeżeli wszystkie zmienne dynamiczne cząstek są w każdej chwili dobrze określone, to prosta analiza zjawiska, na podstawie teorii zbiorów prowadzi do nierówności:

$$n(X^+ Y^+) \leq n(X^+ Z^+) + n(Y^+ Z^+),$$

gdzie np. X^+ oznacza cząstkę, której spin zmierzony w kierunku x wynosi $+1/2$, a liczba $n(X^+ Z^+)$ oznacza liczbę takich par cząstek, dla jakich spin jednej cząstki był mierzony w kierunku osi i i był

²⁴ S. Weinberg, *Teoria pól kwantowych*, Warszawa 1999, 97 n.

skierowany do góry (+), a spin drugiej cząstki był mierzony w kierunku osi i też był skierowany do góry (+). Podana zależność nazywana jest nierównością Bella²⁵. Jednakże rozważania prowadzone na gruncie mechaniki kwantowej dają inny wynik i zachodzi nierówność przeciwna. Głównym powodem tej różnicy jest to, że niezmierzone składowe spinu nie są dobrze określone i znajdują się w superpozycji dwóch stanów + i -.

Fizycy dokonali szeregu prób na przetestowanie nierówności Bella. Do najbardziej udanych należy eksperyment A. Aspecta, J. Dalibarda i G. Rogera²⁶ wykonany w 1982 roku, prawie 50 lat po opublikowaniu idei paradoksu EPR. W tym doświadczeniu mierzone były pary fotonów, wyemitowanych przez atom wapnia, wzbudzony przez laser. Wykorzystano tu system bardzo szybkich przełączników, działających w czasie około 10 nanosekund, co w porównaniu z czasem lotu fotonów rzędu 40 nanosekund pozwoliło uzyskać sytuację wymaganą w eksperymencie Bella²⁷. Ten i inne eksperymenty jednoznacznie potwierdziły przewidywania mechaniki kwantowej w interpretacji Bohra i sfalsyfikowały przewidywania Einsteina.

Oznacza to również istnienie szeregu niejasności związanych z rolą samego procesu pomiarowego i obserwatora w pomiarze kwantowym. Po pierwsze, zaobserwowane korelacje wskazują na to, że zasada nieoznaczoności Heisenberga związana z wielkościami komplementarnymi nie jest tylko brakiem wiedzy o niezmiernych wielkościach fizycznych, ale wskazuje na szczególny sposób istnienia danego układu fizycznego, jakby w pakiecie wielu potencjalnych stanów. W przypadku badanych cząstek w eksperymencie Bella jest to stan dwóch położeń składowej spinu + i -. Po drugie, sam akt pomiarowy w sposób istotny zmienia ten stan rzeczy, powodując zajście skoku kwantowego do dobrze określonego stanu badanej wielkości dynamicznej. Po trzecie wreszcie, powyższy eksperyment jest silnym potwierdzeniem nielokalnego charakteru obiektów kwantowych.

²⁵ Por. B. d'Espagnat, *Teoria kwantowa i rzeczywistość*, Postępy Fizyki 33(1982)5-6, 328-331.

²⁶ A. Aspect, J. Dalibard, G. Roger, *Physical Review Letters* 49(1982), 1804.

²⁷ P. C. W. Davies, J. R. Brown, *Duch w atomie*, tłum. z ang. P. Amsterdamski, Warszawa 1996, 32.

3. KU FILOZOFII MATERII KWANTOWEJ

Powyższe rozważania pozwalają na wysunięcie pewnych wniosków co do natury wyróżnionej klasy obiektów. Każda forma materii istnieje w postaci pakietu potencjalnych stanów. Każdemu takiemu stanowi odpowiada pewna własność fizyczna, którą można zmierzyć doświadczalnie. Prawie wszystkie własności takiego obiektu kwantowego mają, używając języka Heisenberga, charakter obiektywny, potencjalny, ale nie realny. Owe własności stają się realne w momencie, gdy zostają zaktualizowane w procesie pomiaru takiej własności. Na przykład cząstka nie ma realnie zorientowanego spinu, dopóki nie zostanie on zaktualizowany w pomiarze kwantowym. Cząstka nie ma określonego położenia albo potencjalnie znajduje się prawie wszędzie, dopóki nie dokona się pomiaru jej położenia aktualizującego jej określone miejsce w przestrzeni.

Jak widać, wyróżnionym momentem w dynamice indywidualów kwantowych jest ich pomiar, co od razu stawia problem własności materii nieobserwowanej przez eksperymentatora. Rozwiązanie tego zagadnienia zależy już od przyjętej interpretacji mechaniki kwantowej. Koncepcje subiektywistyczne przyjmują, że tylko świadomość osoby rozumnej może dokonać takiej aktualizacji. W większości jednak przyjmuje się stanowisko bardziej obiektywistyczne, zgodnie z którym taki pomiar kwantowy występuje powszechnie w przyrodzie niezależnie od jakiegokolwiek obserwatora. W tym przypadku są to po prostu pewne wyszczególnione procesy w przyrodzie, które nazywamy pomiarem kwantowym i które wykorzystujemy w doświadczeniu fizycznym.

Co to znaczy potencjalne, obiektywne, ale nie realne? Tu również wyjaśnienie tego specyficznego stanu istnienia (jeżeli można mówić w tym przypadku o istnieniu) zależy od konkretnej interpretacji kwantowej. Niewątpliwie mamy tu do czynienia z takim stanem materii, jaki nie jest znany z doświadczenia potocznego. Nie mamy wyrobionych intuicji, które pomogłyby nam zrozumieć naturę mikroświata. Szczególną postacią potencjalności stanów jest nielokalność obiektów kwantowych. Szereg doświadczeń mocno potwierdza tę specyficzną własność materii. Foton może przelatywać dwiema, trzema, czterema różnymi drogami a następnie interferować ze sobą samym. Jest to dość niezwykła cecha. Gdyby było to możliwe w świecie makroskopowym, to można by na przykład wchodzić do budynku

przez kilka wejść naraz. To, co intuicja podpowiada nam jako absurd, jest powszechne i typowe w mikroświecie. Nielokalność potwierdza także doświadczenie EPR, gdyż dwa odległe od siebie cząstki są wewnętrznie powiązane ze sobą, jakby stanowiły jedną całość.

Inną ważną cechą świata kwantowego jest ta, którą B. D'Espagnat nazywa nieseparowalnością²⁸. Powiązania EPR sprawiają, że nie można traktować świata jako zbioru izolowanych ciał. Świat nie jest „konstrukcją klocków LEGO”. Intuicja Bohra, który uważa, że nie można odseparować badanej cząstki kwantowej od otoczenia, w tym aparatury pomiarowej, wydaje się tu bardzo trafna. Omówiony wyżej eksperyment potwierdza stanowisko D'Espagnata, który twierdzi, że jakakolwiek realistyczna koncepcja świata zakładająca separowalność materii jest błędna²⁹. To zagadnienie prowokuje do postawienia pytania następującego rodzaju. Czy w konsekwencji istnieją siły, które działają natychmiastowo na odległość? Czy istnieją przyczynowe relacje między zdarzeniami, które są tak odległe w przestrzeni i tak blisko w czasie, że nawet światło nie miałoby czasu, by przynieść informację od jednej cząstki do innej? Pytania te są bardziej złożone, niż by się to początkowo wydawało, ponieważ sposób ich sformułowania pociąga za sobą pojęcia „siły”, „przyczynowości” i „działania”, których zwykłe definicje nie są dość dokładne, by móc rozwiązać ogromne problemy powstające w tym kontekście.

Pojęcie siły w fizyce, na przykład, zostało zdefiniowane w zasadach Newtona na podstawie ludzkiego działania w potocznym jego rozumieniu. Tak, jak człowiek siłą swoich mięśni wprawia w ruch przedmioty, tak siła fizyczna powoduje przyspieszenie ciała o wartość proporcjonalną do wartości przyłożonej siły. Jeżeli przyjmujemy takie rozumienie siły, to możemy odpowiadać na pytania postawione powyżej tylko przecząco. Fakt, że przewidywania mechaniki kwantowej są, jak dotąd, poprawne, wystarcza do odrzucenia jakiegokolwiek możliwości ludzkiego działania na odległość szybciej niż światło.

Z drugiej jednak strony oddziaływanie w doświadczeniu EPR zachodzi szybciej niż prędkość światła, co prowadzi do odrzucenia zasady separowalności. Oznacza to możliwość obserwowania wzajemnych

²⁸ B. D'Espagnat, *Reality and the physicist*, Cambridge University Press, Cambridge 1989, 96-97.

²⁹ Tamże, 97.

wewnętrznych powiązań różnych części materii całkowicie oddzielonych od siebie przestrzennie. Zatem, aby móc odpowiedzieć na postawione wyżej pytania, należałoby najpierw dokonać rozróżnienia między przyczynowością a oddziaływaniem fizycznym. Istnienie bowiem oddziaływania natychmiastowego nie musi pociągać za sobą odrzucenia zasady przyczynowości. Od dawna na przykład wiadomo, że powiązania EPR cząstek kwantowych nie można wykorzystać do przekazywania materii, energii lub informacji. Stąd jakiegokolwiek zjawisko fizyczne nie może tą drogą przyczynowo wpłynąć na inne zjawisko przez przekaz energii, materii czy informacji. Tak więc, po przyjęciu powyższego rozróżnienia, można by się zgodzić z tym, że mechanika kwantowa przyjmuje istnienie oddziaływania, ale nie związków przyczynowo-skutkowych, z prędkością większą niż prędkość światła. W przeciwieństwie do fizyki klasycznej, w świecie kwantowym zasada separowalności jest faktycznie naruszona.

Wymienione powyżej aspekty ontologii kwantów nie są wyczerpujące. Wskazują jedynie na skalę trudności w ustaleniu ich statusu ontologicznego w porównaniu z obiektami znanymi z doświadczenia codziennego. Wracając zatem do pytania postawionego na początku, trzeba powiedzieć, że chociaż cząstki kwantowe istnieją, to jednak nie jest to taki realizm, jaki narzuca nam intuicja wzięta z poznania codziennego. Mikroświat posiada bardziej złożoną naturę, niż by się to na pozór wydawało. Obiekty kwantowe odznaczają się stanami potencjalnymi, nielokalnością i nieseparowalnością, które są własnościami nieznanymi w makroświecie. Wiele mogłyby tu dopowiedzieć konkretne interpretacje mechaniki kwantowej przez zaproponowanie ontologicznej koncepcji świata kwantowego. Moje rozważania starałem się prowadzić, unikając sporu interpretacyjnego teorii kwantowej, ale zapewne taka interpretacja wydaje się niezbędna do właściwego rozumienia omawianych zjawisk. Można tylko żywić nadzieję, że nowsze propozycje rozwiążą choć trochę te niejasności, które pojawiają się w próbie zrozumienia natury mikrocząstek.

TOWARDS ONTOLOGY OF QUANTUM OBJECTS

Summary

The paper deals with some ontological aspects of quantum objects. The question of reality of quantum particles, which description is entangled in mathe-

mathematical language, is discussed. Ontology of micro-objects in Copenhagen interpretation is depicted also. Objective but non-real states are distinguished, and the nature of the states in EPR experiment is shown.

The analysis comes to the resolution that quantum objects can exist in the states that are not known in macroscopic realm. One can call them the potential states. Other properties of micro-objects, not present in macro-objects, are non-locality and non-separability. Proper understanding of these features requires more accurate definition of such notions as 'force', 'causality' and 'interaction'. In particular, it seems necessary to distinguish causality and physical interaction.

STANISŁAW OLSZEWSKI
Instytut Chemii Fizycznej PAN

CZESŁAW BIAŁOBRZESKI: FIZYK I FILOZOF
(WSPOMNIENIE W 50. ROCZNICĘ ŚMIERCI)

Dnia 12 X 1953 r. zmarł w Warszawie po krótkiej chorobie profesor Uniwersytetu Warszawskiego Czesław Białobrzęski. Był wybitnym fizykiem-teoretykiem o bardzo silnych inklinacjach w kierunku filozofii.

Urodzony 31 VIII 1878 r. w Powszechoniu (na Syberii) jako syn lekarza-Polaka, blisko połowę życia spędził na rodzinnej kijowszczyźnie i w samym Kijowie. Tam ukończył studia w Uniwersytecie i podjął pracę naukową w zakresie fizyki, początkowo pod kierunkiem prof. Kosonogowa, później – po blisko dwuletnim stażu u prof. P. Langevina w Paryżu – były to badania samodzielne. Do Polski powrócił tuż po I Wojnie Światowej. Najpierw został powołany na katedrę fizyki w Uniwersytecie Jagiellońskim, ale wkrótce potem – na początku lat dwudziestych – objął katedrę fizyki teoretycznej w Uniwersytecie Warszawskim, którą zajmował już do końca życia¹.

Najważniejszym odkryciem naukowym Białobrzęskiego było zwrócenie uwagi na rolę ciśnienia promieniowania w budowie gwiazd. Prace te – oparte na termodynamice klasycznej – ukończył

¹ W Ściśłowski, *Czesław Białobrzęski (1878-1953)*, *Postępy Fizyki* 5(1954)413.