130881

ROCZNIKI FILOZOFICZNE
Tom XIII, zeszyt 3 — 1965

BIBLIOTEKA UNIWERSYTECKA
KUL
1000263979

ZYGMUNT HAJDUK

WSPÓŁCZESNE INTERPRETACJE MECHANIKI KWANTOWEJ

W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat daje się zaobserwować wśród fizyków oraz metodologów fizyki szczególnie żywe zainteresowanie problemem interpretacji mechaniki kwantowej, a konsekwentnie problemem deterministycznego czy indeterministycznego charakteru świata mikrofizyki.

Jak wiadomo mechanika kwantowa jako teoria statystyczna, w przeciwieństwie do mechaniki klasycznej, nie twierdzi kategorycznie, że określone zdarzenie fizyczne będzie miało miejsce. Równanie falowe Schrödingera pozwala na obliczenie prawdopodobieństwa znalezienia pewnego mikroukładu, np. elektronu, w tym a nie w innym miejscu ekranu, nie daje jednak dokładnie przewidzieć zachowania się tego mikroukładu.

Taki stan rzeczy bywa interpretowany na dwa różne sposoby:

1° Charakter statystyczny mechaniki kwantowej jest czymś ostatecznym i nieodwołalnym, a statystyczny opis stanu układu kwantowomechanicznego jest zupełny. Zachowanie się indywidualnego układu mikroskopowego jest wewnętrznie niezdeterminowane, nieuwarunkowane przyczynowo; nie ma sensu pytać o przyczynę tego, że poszczególny elektron trafia w ten a nie inny punkt ekranu. Nieoperatywne jest pojęcie dokładnego modelu indywidualnego mikroukładu, które należy odrzucić na rzecz komplementarnych obrazów fali oraz cząstki. Teoria mikroświata jest z natury swej indeterministyczna.

2° Opis statystyczny stanu układu kwantowomechanicznego nie stanowi opisu pełnego. Istnieje bardziej fundamentalny i w zasadzie przyczynowy opis, w stosunku do którego mechanika kwantowa zajmuje analogiczną pozycję, jak klasyczna mechanika statystyczna, dotycząca zbioru molekuł, do mechaniki Newtona, odnoszącej się do indywidualnych molekuł. Przy obecnym stanie wiedzy przyrodniczej ta bardziej fundamentalna wiedza jest jeszcze nieznana, jednak należy prowadzić poszukiwania takiej teorii deterministycznej, ponieważ nie można racjonalnie zakładać, że istnieją pewne zjawiska fizyczne, które nie podlegają żadnym prawom przyrody[1].

Pierwsze stanowisko reprezentuje tzw. szkoła kopenhaska, na czele której stoją dwaj współtwórcy teorii kwantów, jak również jej fizykalnej interpretacji: N. Bohr i W. Hei-

---

[1] Por. H. Freistadt, *The Causal Formulation of Quantum Mechanics (The Theory of de Broglie, Bohm and Takabayasi)*, „Supplemento al Volume V, Serie X, del Nuovo Cimento", No. I (1957) 1—2.

senberg. Stanowisko szkoły kopenhaskiej sformułowane wyraźnie w dyskusji na temat filozoficznych podstaw mechaniki kwantowej, publikowanej na łamach szwajcarskiego czasopisma, „Dialectica", rozpowszechniło się stosunkowo szybko i pozyskało większość fizyków-teoretyków, głównie z krajów zachodnich.

Stanowisko drugie było pierwotnie reprezentowane przez M. Plancka i A. Einsteina, którzy podnosili zastrzeżenia co do probabilistycznej interpretacji mechaniki kwantowej już od chwili jej powstania. Schrödinger podnosił wątpliwości co do dzisiejszego schematu pojęciowego mechaniki kwantowej.[2] Fizycy radzieccy ustosunkowali się krytycznie do interpretacji kopenhaskiej i podjęli dyskusję na temat filozoficznych podstaw mechaniki kwantowej oraz na temat znaczenia funkcji falowej.[3]

Od roku 1952 mało podówczas znany fizyk amerykański David Bohm występuje z szeregiem prac, w których poddał analizie krytycznej schemat pojęciowy mechaniki kwantowej w jej obecnej postaci. Dał również zarys nowej, przyczynowej interpretacji mechaniki kwantowej. Prace Bohma znalazły żywy oddźwięk u pewnych teoretyków francuskich, grupujących się wokół de Broglie'a. Sam de Broglie pod wpływem prac Bohma poddał rewizji swoje stanowisko odnośnie do interpretacji mechaniki kwantowej i od roku 1952 wycofał się ze stanowiska szkoły kopenhaskiej, a nawiązał do swych prac z lat 1925—1927 mianowicie do tzw. teorii podwójnego rozwiązania.[4] Również cały szereg innych autorów, nawiązując do powyższej dyskusji pomiędzy szkołą kopenhaską a stanowiskiem pierwotnie reprezentowanym przez Plancka i Einsteina, podaje próby deterministycznych interpretacji mechaniki kwantowej.

Bardzo ogólne wprowadzenie do problematyki zasygnalizowanej tematem niniejszego artykułu nasuwa, jak się wydaje, racjonalną potrzebę filozoficznej analizy dotyczącej najpierw fizykalnej interpretacji w ogóle, następnie probabilistycznej interpretacji mechaniki kwantowej, jak również przyczynowej interpretacji tej ostatniej. Podjęta zostanie w końcu próba uszeregowania różnych interpretacji mechaniki kwantowej. W artykule przyjęto taki porządek analizy postawionego problemu.

Większość fizyków rozumie przez fizykę klasyczną wszystkie działy fizyki, które powstały przed latami dwudziestymi XX wieku, a więc przed powstaniem fizyki kwantowej. Działem fizyki klasycznej jest również teoria względności.[5] W ramach fizyki kwantowej wyróżnia się znowu: mechanikę kwantową, elektrodynamikę kwantową, kwantową teorię pól.[6] Nasze uwagi skoncentrują się na problemie różnych sposobów

---

[2] Por. S. Szczeniowski, *Próby nowej interpretacji mechaniki kwantowej*, „Myśl Filozoficzna", 5—6 (1955) 71.

[3] Por. J. Plebański, J. Werle, *O interpretacjach mechaniki kwantowej*, „Myśl Filozoficzna", 2(12), (1954) 39—67.

[4] Por. L. de Broglie, *Non-Linear Wave Mechanics. A Causal Interpretation*, Amsterdam, New York, London 1960, s. V i VI; D. Bohm, *Causality and Chance in Modern Physics*, London 1958, s. X.

[5] Por. H. Margenau, *The Nature of Physical Reality*, New York—Toronto—London 1950, s. 39.

[6] Por. J. Plebański, J. Werle, *O interpretacjach..*, s. 49.

interpretacji mechaniki kwantowej. Słusznie podkreśla się[7], że żywa współcześnie dyskusja wokół zagadnienia deterministycznego czy indeterministycznego charakteru mechaniki kwantowej nie dotyczy bezpośrednio aparatu matematycznego, jakim teoria kwantowa się posługuje, jak również faktów empirycznych, ale dotyczy interpretacji, a więc jakościowego ujęcia tego aparatu matematycznego oraz faktów empirycznych.

W systemie fizyki wyróżnia się za Carnapem trzy główne działy: 1° system sformalizowany logiko-matematyczny, który jest zwykle rachunkiem, stanowiącym logiczny szkielet systemu. Obok postulatów logiko-matematycznych występują tutaj postulaty specyficzne, które definiują aksjomatycznie podstawowe pojęcia teorii; 2° układ zdań obserwacyjnych, stanowiących jakby empiryczną bazę całego systemu; 3° interpretacja czyli układ reguł i definicji przyporządkowujących pojęciom w rachunku empiryczną treść poprzez łączenie ich z konkretnym materiałem, zdobytym na drodze doświadczenia.[8] Interpretacja stanowi pewnego rodzaju ogniwo koordynujące język fizyki teoretycznej z językiem fizyki eksperymentalnej. W literaturze metodologiczno-przyrodniczej interpretacja jest określana różnymi nazwami.[9] Dzięki definicjom przyporządkowującym można teorię sformalizowaną interpretować empirycznie. Sposoby interpretacji są nieraz bardzo skomplikowane i trudno podać jakiś jeden ogólnie ważny w tym względzie schemat. Analiza prostego przykładu uwyraźni pewne istotne elementy procedury interpretacyjnej.

Wiadomo, że teoria atomu Bohra postulowała najpierw, iż atomy zbudowane są z dodatnio naładowanego jądra atomowego i z pewnej określonej liczby ujemnie naładowanych elektronów, krążących po odpowiednich orbitach. Liczba elektronów jest różna dla różnych pierwiastków. Zakładano następnie, że jest tylko określony ciąg torów, po których krążą elektrony. Dopóki elektron krąży po danej orbicie, energia układu jest stała, promieniowanie nie jest emitowane; gdy elektron przeskakuje z toru n-tego na i-ty, wtedy energia atomu zmienia się z E_n na E_i, a różnica energii $E_n - E_i$ jest wyemitowana.[10]

W jaki sposób powyższa teoria jest przyporządkowana danym doświadczenia?

Krążenie elektronów po orbitach, ich skoki z orbity na orbitę nie stanowią treści pojęć, aplikowanej danym doświadczenia. Należy zatem ustalić związki pomiędzy tymi pojęciami teoretycznymi a tym, co można zidentyfikować na drodze procedury

---

[7] Por. A. Landé, *The Case for Interminism,* [W:] *Determinism and Freedom in the Age of Modern Science,* New York 1958, s. 69; P. W. Bridgmann, *The Nature of Physical Theory,* New York 1936, s. 131.

[8] Por. St. Kamiński, *Struktura nauk przyrodniczych,* „Znak", 12 (1960) 774; *Structure of Scientific Thought,* E. H. Madden (ed), Cambridge Mass. 1960, s. 106.

[9] Definicje koordynujące, reguły interpretacji, reguły semantyczne (E. Nagel, *Logic without Metaphysic,* Glencoe 1956, s. 309), korelacje epistemologiczne (F.S.C. Northrop, *Meeting of East and West,* New York 1946, s. 443), tekst równań (P. W. Bridgmann, *The Nature..,* s. 59, 60, 112), reguły odpowiedniości (H. Margenau, *The Nature..,* s. 60), definicje przyporządkowujące (H. Reichenbach, *Powstanie filozofii naukowej,* Warszawa 1950, na jęz. polski tłum. H. Krahelska).

[10] Por. M. Jeżewski, *Fizyka,* Warszawa 1957, s. 640 i 641.

laboratoryjnej. Związki te ustalono w ten sposób: teoria elektromagnetyczna światła wiąże linię w widmie danego pierwiastka z falą elektromagnetyczną, której długość można obliczyć z pewnych danych eksperymentalnych. Teoria Bohra wiąże z kolei długość fali światła emitowanego przy przeskoku elektronu z jednej orbity na drugą. Konsekwentnie teoretyczne pojęcie przeskoku elektronu jest związane z eksperymentalnym terminem linii widmowej.[11]

Podaje się zazwyczaj pewne cechy interpretacji. Odwołując się do przytoczonego przykładu można stwierdzić, że nie mieliśmy tam do czynienia z wyraźną definicją terminu teoretycznego. Wyrażenie jest wyraźnie zdefiniowane, gdy można je wyeliminować z kontekstu, w którym występuje i zastąpić je zwrotem definiującym, a sens kontekstu nie ulega zmianie. Tego nie można powiedzieć o teorii Bohra. Teoretyczny zwrot: „x jest długością fali promieniowania wysyłanego przy przeskoku elektronu z jednej z dopuszczalnych orbit na inną orbitę atomu wodoru" nie jest wyraźnie zdefiniowany, gdy jest przyporządkowany takiemu zwrotowi: „y jest linią występującą w określonym miejscu widma atomu wodoru". Treść obu zwrotów jest różna. I chociaż na podstawie definicji przyporządkowującej jest ustalony związek pomiędzy tymi zwrotami, to zwrot pierwszy nie może być zastąpiony przez drugi w takim np. zdaniu: przeskok elektronu z orbity K na orbitę L zachodzi w przypadku 10% rozważanej liczby atomów wodoru. Gdyby dokonać wspomnianego podstawienia otrzymalibyśmy wyrażenie bez sensu fizykalnego.[12]

Pojęciom teoretycznym przyporządkowuje się często więcej aniżeli jeden termin obserwacyjny. I tak teoretycznemu pojęciu przeskoku elektronu odpowiada eksperymentalny termin linii widmowej, na podstawie zaś prawa promieniowania Plancka przyporządkowuje się temu pojęciu zmiany temperatury w promieniowaniu ciała czarnego. Brak jednoznacznej odpowiedniości pomiędzy pojęciem teoretycznym a terminem eksperymentalnym można uwyraźnić jeszcze w inny sposób. W ramach fizyki teoretycznej, mówiąc ogólnie, formułuje się teorie, w których relacje pomiędzy teoretycznymi terminami pierwotnymi czy zdefiniowanymi są precyzyjnie ustalone. Interpretacja zaś, ustalając relacje pomiędzy pojęciami teoretycznymi i eksperymentalnymi, nie otrzymuje takiego precyzyjnego sformułowania. W praktyce naukowej spotyka się stosunkowo szerokie i niedoprecyzowane koordynacje. To nieokreślenie interpretacji pochodzi stąd, że terminy eksperymentalne nie posiadają tak ostro zarysowanych „konturów" jak pojęcia teoretyczne.[13] Trudno więc zgodzić się z definicją fizykalnej interpretacji jako jednoznacznego przyporządkowania nowego pojęcia do pewnej własności realnych przedmiotów fizycznych.[14]

Należy jeszcze zwrócić uwagę na inną cechę interpretacji. Otóż w ramach teorii Bohra podaje się reguły przyporządkowujące dla pewnych tylko pojęć teoretycznych.

---

[11] Por. E. Nagel, *The Structure of Science*, New York 1961, s. 94—95.

[12] Tamże, s. 97 i 98.

[13] Tamże, s. 99 i 100.

[14] Por. R. S. Ingarden, *O Fenyesa interpretacji mechaniki kwantowej*, [W:] *Materiały z konferencji fizyków w Spale*, Warszawa 1954, s. 81.

Nie wszystkie więc pojęcia teoretyczne są interpretowane w terminach eksperymentalnych. Ta cecha interpretacji jest ważna dlatego, ponieważ pozwala stosować daną teorię w nowych dziedzinach badania naukowego a to przez wprowadzenie nowych reguł odpowiedniości dla terminów w dotychczasowej praktyce naukowej nieinterpretowanych.[15]

Zinterpretowanie niektórych przynajmniej pojęć teorii w terminach eksperymentalnych jest warunkiem empirycznego charakteru teorii. Formuły matematyczne i logiczne same z siebie nic nie mówią o rzeczywistości materialnej, stąd mowa o pustości tych formuł. Autorzy związani z kierunkiem neopozytywistycznym określają je jako nieinformujące i tautologiczne. Ten sam aparat matematyczny może być różnie interpretowany zależnie od ad hoc aplikowanych reguł semantycznych.[16]

Fizycy przyjmują zazwyczaj, iż matematyczny aparat mechaniki kwantowej oraz jego fizykalna interpretacja stanowią pewną spójną całość i dopiero ten łączny układ jest weryfikowany przez najszerszy możliwie zakres eksperymentów, potwierdzających prognozy otrzymane na podstawie zinterpretowanego aparatu matematycznego.[17]

Mechanika kwantowa rozwinęła się w dwóch matematycznych schematach: macierzowym i falowym. Pierwszy, oparty na algebrze macierzowej, rozwinęli Heisenberg, Born, Dirac i Jordan, drugi — de Broglie i Schrödinger.[18] Punktem wyjścia de Broglie'a jest pomysł, że dualizm falowo-korpuskularny jest właściwością nie tylko promieniowania ale i cząstek materialnych. Tę linię badań podejmuje Schrödinger, który okazał, jak stany stacjonarne układów atomowych mogą być reprezentowane przez rozwiązanie równania falowego, do którego odkrycia Schrödinger doszedł kierowany analogią, wskazaną przez Hamiltona, pomiędzy mechaniką klasyczną i optyką geometryczną. W tych samych latach Heisenberg, opierając się na tym, że w matematycznym schemacie teorii kwantów powinny zawierać się tylko wielkości dostępne sprawdzeniu doświadczalnemu, wprowadził matematyczny schemat teorii kwantów, w którym zmienne kinematyczne i dynamiczne mechaniki klasycznej zostały zastąpione przez symbole podległe regule nieprzemienności mnożenia.[19] Że obydwa schematy są matematycznie równoważne, okazał Schrödinger.[20] Schemat macierzowy, prowadząc poza przykładami prostych układów do zawiłych i praktycznie niewykonalnych operacji algebraicznych, został właściwie zaniechany.[21] Praktycznie zasadniczą rolę odgrywa schemat falowy, który stanowi również główny przedmiot w problema-

---

[15] Por. E. Nagel, *The Structure..*, s 101. i 102.

[16] Por. M. Bunge, *Causality. The Place of the Causal Principle in Modern Science,* Cambridge Mass. 1959, s. 77.

[17] Por. D. Bohm, *A Suggested Interpretation of the Quantum Theory In Terms of „Hidden" Variables,* „Physical Review", 85 (1952) 168.

[18] Por. M. Born, *Experiment and Theory in Physics,* Cambridge 1956, (1943), s. 16.

[19] Por. N. Bohr, *Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics,* [W:] *A. Einstein, Philosopher-Scientist,* New York 1957, s. 207.

[20] Por. l. c., s. 208.

[21] Por. Cz. Białobrzeski, *Podstawy poznawcze fizyki świata atomowego,* Warszawa 1956, s. 137.

tyce interpretacyjnej mechaniki kwantowej.[22] Podanie interpretacji funkcji falowej w schemacie matematycznym Schrödingera napotkało na poważne trudności, podyktowane między innymi tym, że rozwiązanie danego problemu nie było jedynie kwestią inwencji przyszłego wynalazcy, ale musiało być również powiązane z danymi doświadczenia. Ze względu na pewne trudności teoretyczne nie przyjęła się interpretacja podana przez Schrödingera. Zadowalającą teoretycznie i eksperymentalnie interpretację wysunął M. Born.[23] Istotę statystycznej interpretacji funkcji falowej stanowi stwierdzenie, że przez kwadrat modułu funkcji zespolonej, spełniającej równanie Schrödingera, rozumie się gęstość prawdopodobieństwa znalezienia cząstki w danym elemencie objętości w chwili t. [24]

Powyższa interpretacja funkcji falowej jest w sposób istotny związana z ortodoksyjną interpretacją mechaniki kwantowej. Interpretacja ta uzyskała swój najbardziej systematyczny wyraz w sformułowanej przez Bohra zasadzie komplementarności, której podstawy przedstawił Bohr na międzynarodowym kongresie fizyków (Como, wrzesień 1927) [25]. Całość argumentacji, jaką przedstawił Bohr, miała prowadzić do wniosku, iż komplementarność jest uogólnieniem idei przyczynowości.[26]

Zasada komplementarności opiera się na dwu przesłankach doświadczalnych: (1) dualizmie falowo-korpuskularnym promieniowania i materii, (2) istnieniu kwantu działania, wyrażonego relacjami: de Broglie'a ($p = \frac{h}{\lambda}$) i Plancka—Einsteina ($E = h\nu$).[27]

Cząstki elementarne posiadają dwa niesprowadzalne do siebie aspekty: falowy i korpuskularny, do których trzeba się odwołać, by zrozumieć własności tych cząstek. Są to jakby dwie strony tego samego przedmiotu, których nie można obserwować jednocześnie, ale po kolei.[28]

Takie układy zmiennych jak: x, y, z oraz p są komplementarne tzn. (a) wzajemnie się wykluczają, dokładna bowiem znajomość jednej grupy wielkości sprawia nieokreśloność drugiej, (b) obydwie grupy wielkości są potrzebne dla otrzymania zupełnego opisu wyników eksperymentalnych.

Znaczenie zasady komplementarności podane wyżej od strony eksperymentalnej można krótko podać w ten sposób: na poziomie kwantowym najbardziej ogólne cechy fizyczne każdego układu muszą być wyrażone za pomocą par komplementarnych

---

[22] Racje, dla których większość prac na tematy interpretacyjne z reguły stawia problem na poziomie równania Schrödingera czy Diraca, podają J. Plebański, J. Werle, *O interpretacjach..*, s. 60—64.

[23] Por. M. Born, *Zur Quantenmechanik der Stossvorgänge*, „Zeitschrift für Physik", 37 (1926) 863—867; oraz *Experiment...*, s. 23.

[24] Por. W. Heisenberg, *The Development of the Interpretation of the Quantum Theory*, London 1955, s. 13.

[25] Sprawozdanie z tego kongresu zamieszczono w „Nature", 121 (1928) 78, 580.

[26] Por. N. Bohr, *Discussion...*, s. 211.

[27] Por. P. Feyerabend, *O interpretacji relacji nieokreśloności*, „Studia Filozoficzne", 4(19) (1960) 47.

[28] Por. L. de Broglie, *The Revolution in Physics*, New York 1956, s. 18, 47, 217.

pojęć, z których każde może być lepiej określone kosztem dokładności określenia pozostałego pojęcia.[29]

Jako przykład par komplementarnych pojęć podaje się również opis przestrzenno-czasowy oraz przyczynowy.[30]

Interpretacja kopenhaska z zasadą komplementarności wiąże pewne wnioski, które mają już charakter pozafizykalny. Mamy na myśli tzw. zasadę ścisłej obserwowalności, która postuluje, by nie zakładać istnienia bytów, których nie można jakoś zaobserwować. Zasada ta stanowi pozafizyczne ograniczenie możliwych rodzajów teorii. Termin „pozafizyczne" jest użyty w tym sensie, iż ani z danych doświadczenia ani z ich indukcyjnych uogólnień nie można wnosić, że nie będzie można odkryć bytów, których obecnie nie możemy jeszcze zaobserwować.[31]

Zwolennicy wskazanego aspektu komplementarności utrzymują, że mikroukłady nie są ani korpuskułem ani falą, że nie są czymś w sobie, ponieważ nic nie można twierdzić o ich istnieniu poza doświadczeniem. Terminy „korpuskuł", „fala" nie oznaczają materialnych przedmiotów czy ich własności, stanowią one jedynie element opisu pewnych eksperymentów. Doktryna komplementarności nie koncentruje uwagi na przedmiocie, jaki jest obserwowany i jaki istnieje przed i po doświadczeniu, ale zwraca uwagę na samo doświadczenie. Utrzymuje się, że obiektom mikrofizyki nie można przypisywać fizycznej czyli niezależnej od aktu pomiaru realności.[32] Co więcej, przedmioty mikrofizyki oraz ich własności uważa się jedynie za układ symboli matematycznych.[33] Jest błędem mówić, że na podstawie relacji nieoznaczoności nie można z dowolną dokładnością dokonać pomiaru położenia i pędu mikroobiektu, takie twierdzenie zakłada, że położenie i pęd stanowią dobrze określone własności przedmiotów, tymczasem należy zrezygnować z samoistnych własności przedmiotów, [34] z autonomicznego istnienia przedmiotów atomowych. Teoria atomowa nie zakłada istnienia rzeczy samych w sobie, istniejących niezależnie od aktu obserwacji.[35] Fizyka atomowa, zajmując się jedynie tym, co obserwowalne w sensie aktualnie obserwowalnego, wyklucza wszelkiego rodzaju parametry ukryte.[36]

Mimo, iż zwolennicy komplementarności uważają ten punkt widzenia za najbar-

[29] Por. D. Bohm, *Quantum Theory*, New York 1957, s. 160.

[30] Por. W. Heisenberg, *Physics and Philosophy*, London 1959, s. 50; N. Bohr, *On the Notion of Causality and Complementarity*, „Dialectica", 2(1948) 312; W. Heisenberg, *Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie*, Leipzig 1930, s. 48; J. Metallmann, *Zasada komplementarności Bohra a opis przyczynowy zjawisk*, „Czasopismo Chemiczne", 1 (1937) 7 i 10.

[31] Por. D. Bohm, *A Suggested...*, s. 188.

[32] Por. N. Bohr, *Kausalität und Komplementarität*, „Erkenntnis", 6 (1936) 295.

[33] Por. Ph. Frank, *Foundations of Physics*, [W:] *International Encyklopedia of Unified Science*. Vol. 1, No. 6—10, Chicago 1955 (1938), 54.

[34] Por. Ph. Frank, *Philosophische Deutungen und Missdeutungen der Quantentheorie*, „Erkenntnis", 6 (1936) 308.

[35] Por. N. Bohr, *Kausalität...*, s. 297.

[36] Por. W. Heisenberg, *Wandlungen in die Grundlagen der Naturwissenschaft*, Zurich 1947, s. 86. Wydaje się, że powyższe stwierdzenia zwolenników interpretacji kopenhaskiej w swych założeniach filozoficznych w znacznej mierze opierają się na kantyzmie oraz empiriokrytycyzmie.

dziej wierny sposób opisania faktów[37], to, jak zauważył Metallmann[38] a później Reichenbach i Einstein[39], powyższa koncepcja komplementarności jest przykładem idealizmu typu esse-percipi.[40]

Wyżej przedstawiona wersja komplementarności odnosi się negatywnie do zagadnienia poziomu subkwantowego[41], a konsekwentnie do zagadnienia przyczynowości. Zgodnie z przedstawioną wersją komplementarności nie można mówić o przedmiotach lub prawach inaczej, jak tylko w łączności z wynikami obserwacji. Ponieważ na razie nie można wskazać, jakiego typu doświadczenia są właściwe dla poziomu subkwantowego, to chociażby poziom subkwantowy nawet istniał, jednak twierdzi się, że zgodnie z prawami teorii kwantów nie można by dokonać pomiarów jakichkolwiek wielkości, charakteryzujących poziom subkwantowy. O poziomie takim można by mówić jedynie wtedy, gdyby odkryto nową dziedzinę mikrofizyki, gdzie byłoby możliwe dokonanie pomiarów odpowiednich wielkości poziomu subkwantowego, albo też gdyby wykonano eksperyment, którego wynik byłby sprzeczny z jakimś prawem teorii kwantów. Ponieważ żaden człon tej alternatywy nie został zrealizowany, stąd hipoteza poziomu subkwantowego nie ma jakiegokolwiek uzasadnienia.

Konsekwentnie należałoby zrezygnować z pojęcia przyczynowości w odniesieniu do szczegółowego zachowania się materii na poziomie atomowym. Ponieważ zachowanie się indywidualnego układu atomowego opisujemy za pomocą funkcji falowej, interpretowanej probabilistycznie, zatem na poziomie kwantowomechanicznym panuje niepełny determinizm. Jeżeliby zatem należało zrezygnować z hipotezy poziomu subkwantowego, wtedy zachowanie się materii nie byłoby w szczegółach zdeterminowane nie tylko przez żaden czynnik poziomu kwantowomechanicznego, ale przez żaden czynnik w ogóle. Innymi słowy — indywidualne układy poziomu atomowego nie byłyby zdeterminowane przyczynowo.[42]

Powyższe rozważania, będące konsekwencją zasady ścisłej obserwowalności, można zilustrować przykładem promieniotwórczego rozpadu pierwiastków. W procesach takiego rozpadu są emitowane promienie: α, β, γ. W teorii kwantów nie określa się dokładnie czasu rozpadu, ale tylko średni czas rozpadu zwany okresem półtrwania. Jest to okres czasu, w którym połowa ogólnej liczby atomów promieniotwórczych

---

[37] Por. L. Rosenfeld, *Strife about Complementarity*, „Science Progress", 163 (1953) 396.

[38] Por. J. Metallmann, *Zasada...*, s. 13.

[39] Por. H. Reichenbach, *Powstanie...*, s. 275—278; A. Einstein, *Remarks Concerning the Essays Brought Together in This Co-operative Volume*, [W:] *A. Einstein, Philosopher-Scientist*, s. 669.

[40] Przegląd argumentów przytaczanych za idealistyczną interpretacją mikrofizyki oraz ich krytyczna analiza jest zawarta w artykule: H. Mehlberg, *Idealizm i realizm na tle współczesnej fizyki*, „Kwartalnik Filozoficzny," 17 (1948) 87—116 i 207—239.

[41] Temat poziomów kwantowych szerzej jest opracowany przez D. Bohma, *Filozoficzne problemy nowego ujęcia mechaniki kwantowej*, „Studia Filozoficzne", 1 (10) (1959), 30—63; 2 (11) (1959), 70—96.

[42] Por. D. Bohm, *Comments on an Article of Takabayasi Concerning the Formulation of the Quantum Mechanics with Classical Pictures*, „Progress of Theoretical Physics", 9 (1953) 284.

ulegnie rozpadowi.[43] Np. dla uranu (okres półtrwania wynosi $2{,}48 \cdot 10^5$ lat)[44] nie można określić, czy pewien określony atom rozpadnie się jutro, za tydzień czy za $2{,}48 \cdot 10^5$ lat. Zgodnie z ortodoksyjną interpretacją dokładna wartość czasu rozpadu atomu waha się w sposób całkowicie dowolny, nie regulowany żadnymi prawami. Trzeba przyjąć, że pewne zdarzenia zachodzą bez poprzednika we wcześniejszych stanach rozważanego układu. Rozpad promieniotwórczy atomu jest zdarzeniem tego typu. Fakt ten należy przyjąć jako pierwotny i nie pytać o jego przyczynę, bo w ramach ortodoksyjnej interpretacji mechaniki kwantowej pytania takiego nie można nawet sensownie postawić.[45]

Potrzebę wprowadzenia alternatywnej interpretacji mechaniki kwantowej w stosunku do interpretacji probabilistycznej sugerują nie tylko pewne trudności, na jakie napotyka kwantowa teoria pola, opierająca się na mechanice kwantowej, ale również analiza pewnych racji przemawiających za poprawnością zwyczajnej interpretacji mechaniki kwantowej. Interpretacja ta opiera się na dwu założeniach: 1° funkcja falowa i jej probabilistyczna interpretacja określają kompletnie stan indywidualnego układu atomowego, 2° proces transmisji pojedynczego kwantu z układu obserwowanego do aparatury mierzącej jest nie tylko praktycznie ale zasadniczo niemożliwy do przewidzenia. Pytając, czy te założenia są uzasadnione od strony eksperymentalnej trzeba zdać sobie sprawę z tego, że matematyczny aparat mechaniki kwantowej łącznie z fizykalną interpretacją stanowią całość, która jest punktem wyjścia dla eksperymentalnie weryfikowanych prognoz. Gdyby założenia 1° i 2° w sposób jednoznaczny łączyły się z aparatem matematycznym, wtedy wniosek o poprawności zwyczajnej interpretacji byłby ważny, ponieważ w przypadku zanegowania przez doświadczenie otrzymywanych na drodze teoretycznej prognoz można by wnioskować o fałszywości założeń 1° i 2°. Jak się stwierdza[46], założenia te nie łączą się w ten sposób z aparatem matematycznym, by można wyprowadzić jeden tylko ciąg prognoz, które można by eksperymentalnie zweryfikować. Na skutek tego w razie napotkania na dane eksperymentalne niezgodne z teorią zakłada się, że teorię można uzgodnić z doświadczeniem przez wprowadzenie modyfikacji w aparacie matematycznym bez wprowadzania zmian do fizykalnej interpretacji. A to znaczy, że jak długo przyjmujemy zwyczajną interpretację mechaniki kwantowej, to żaden eksperyment nie doprowadzi do wniosku o potrzebie zrezygnowania z tej interpretacji. Należy zatem poddać analizie konsekwencje postulatów, pozostających w relacji sprzeczności do założeń 1° i 2°. Można by więc postulować, że dokładne wyniki indywidualnego pomiaru są w zasadzie dokładnie określone przez ukryte zmienne. Gdyby eksperymenty nie potwierdziły tego rodzaju

---

[43] Promieniotwórczy rozpad atomów zachodzi zgodnie z funkcją wykładniczą: $N_t = N_0 e^{-\lambda t}$, gdzie N_0 oznacza liczbę atomów promieniotwórczych w chwili początkowej, e — podstawa logarytmów naturalnych, λ — stała rozpadu, t — czas, w którym zjawisko rozpatrujemy.

[44] Por. M. Jeżewski, J. Kalisz, *Tablice wielkości fizycznych*, Warszawa 1957, s. 220.

[45] Por. D. Bohm, *Proof that Probability Density Approaches* $|\psi|^2$ *in Causal Interpretation of the Quantum Theory*, „Physical Review", 89 (1953) 465; oraz *Filozoficzne problemy...*, s. 58—60.

[46] Por. D. Bohm, *A Suggested...*, s. 169.

hipotezy, nie znaczyłoby to jeszcze, że zwyczajna interpretacja z konieczności jest poprawna. Mogłoby się okazać, że należy odpowiednio zmienić teorię, o której zakłada się, że opisuje zachowanie ukrytych parametrów. I Bohm sugeruje właśnie interpretację mechaniki kwantowej w terminach ukrytych zmiennych.

Poddamy ją bliższej analizie, jako że z alternatywnych — względem probabilistycznej — interpretacji jest teoretycznie i eksperymentalnie najbardziej zadowalająca.

Ograniczając rozważania przyczynowej interpretacji do mechaniki kwantowej nierelatywistycznej, której zasadniczym elementem jest równanie Schrödingera[47] stwierdzimy[48], że funkcja falowa jest całką równania Schrödingera:

$$i\bar{h}\frac{\partial\psi}{\partial t} = -\frac{\bar{h}^2}{2m}\left(\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}\right) + V\psi$$

W tym równaniu „i" jest jednostką urojoną; $\bar{h} = \frac{h}{2\pi}$; V oznacza energię potencjalną cząstki, zaś m oznacza masę cząstki. Ponieważ Ψ jest wielkością zespoloną możemy napisać ją w takiej postaci:

$$\psi = Re^{\frac{iS}{\bar{h}}}$$

gdzie R oraz S oznaczają funkcje rzeczywiste. Jeśli to wyrażenie podstawimy do równania Schrödingera, wykonany działania i oddzielimy część rzeczywistą od urojonej, wtedy otrzymamy dwa równania:

$$(1)\quad \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{1}{2m}\left[\left(\frac{\partial S}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial z}\right)^2\right] - \frac{\bar{h}^2}{2m}\frac{1}{R}\left(\frac{\partial^2 R}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 R}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 R}{\partial z^2}\right) + V = 0$$

$$(2)\quad \frac{\partial}{\partial t}(R^2) + \frac{1}{m}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(R^2\frac{\partial S}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(R^2\frac{\partial S}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(R^2\frac{\partial S}{\partial z}\right)\right] = 0$$

Równania te pozwalają ustalić związek pomiędzy mechaniką klasyczną i mechaniką kwantową. Jeśli mianowicie zwrócimy uwagę, że nawet dla elektronu, który jest cząstką elementarną o najmniejszej masie, ułamek: $\frac{\bar{h}^2}{2m} \sim 6 \cdot 10^{-28}$ ($\sim$ czytamy: jest rzędu) w układzie cgs, to dla protonu wartość tego ułamka jest 1836 razy mniejsza, zaś dla cząstek makrofizyki staje się niepomiernie mała. Wobec tego przedostatni wyraz równania (1) można zaniedbać w stosunku do pozostałych wyrazów równania (1). Co się zaś odnosi do cząstek makrofizyki, wyraz przedostatni jest zawsze znikomo mały

[47] Por. H. Freistadt, *The Causal...*, s. 12.

[48] Relacjonując interpretację Bohma posługiwałem się tłumaczeniami zamieszczonymi u S. Szczeniowskiego, *Próby nowej...*, s. 72—76.

wobec pozostałych wyrazów równania (1). Zaniedbując ten wyraz otrzymujemy równanie:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{1}{2m}\left[\left(\frac{\partial S}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial z}\right)^2\right] + V = 0 \tag{3}$$

które jest znanym z mechaniki klasycznej równaniem Hamiltona — Jacobiego. Jeśli to równanie scałkujemy, znajdując S jako funkcję współrzędnych: x, y, z oraz czasu t, to równanie:

$$S(x, y, z, t) + Et = \text{const} \tag{4}$$

(gdzie E oznacza całkowitą energię mechaniczną cząstki, którą można uważać za stałą) przedstawia dla różnych wartości stałej po prawej stronie równania (4) rodzinę nieprzecinających się powierzchni. Możliwe tory rozpatrywanej cząstki stanowią ortogonalne trajektorie tej rodziny powierzchni, a więc krzywe w każdym punkcie normalne do przechodzącej przez ten punkt powierzchni, należącej do wspomnianej rodziny powierzchni; w tym punkcie składowe pędu cząstki dane są następującymi zależnościami:

$$p_x = \frac{\partial S}{\partial x} \quad \text{(analogicznie dla } p_y \text{ i } p_z\text{)}$$

Równanie (2) opisuje zachowanie się zespołu cząstek rozłożonych w przestrzeni z gęstością R^2; przy czym R^2 jest u Bohma rozpatrywane również jako gęstość prawdopodobieństwa znalezienia cząstki w danym elemencie przestrzeni.[49]

Przeprowadzone rozumowanie było w zasadzie znane już u początków rozwoju mechaniki kwantowej. De Broglie zdawał sobie sprawę z podobieństwa, jakie zachodzi między równaniem (1) a równaniem Hamiltona — Jacobiego. De Broglie próbował podać opis zjawisk kwantowych za pomocą zmodyfikowanej mechaniki klasycznej[50]. W roku 1927 de Broglie publikuje [51] przyczynową interpretację mechaniki kwantowej, nazwanej teorią podwójnego rozwiązania. Tej teorii nadał de Broglie formę

[49] Por. D. Bohm, *A Suggested...*, s. 169—170, 171; D. Bohm, J.P. Vigier, *Model of the causal Interpretation of Quantum Theory in Terms of a Fluid with Irregular Fluctuations*, „Physical Review", 96 (1954) 209.

[50] Por. L. de Broglie, *Sur la possibilité de relier les phénomènes d'interférence et de diffraction à la théorie des quanta de lumière*, „Comptes rendus Hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences", 183 (1926) 447—449; *La structure atomique de la matière et du rayonnement et la Mécanique ondulatoire*, „Compt. rend.," 184 (1927) 273—274; *Sur le rôle des ondes continues en Mécanique ondulaire*, „Compt. rend.," 185 (1927) 380—382.

[51] Por. artykuł de Broglie'a z „Journal de Physique", 8 (1927) 225; nie był autorowi dostępny w czasie pisania artykułu.

uproszczoną (teoria fali — pilota)[52]. Pod adresem tej ostatniej zasadnicze trudności wysunął W. Pauli. Bohm, którego interpretacja jest analogiczna do teorii fali — pilota, uchylił trudności wysunięte przez Pauliego poprzez aplikację przyczynowej interpretacji do teorii pomiaru oraz do wyjaśnienia eksperymentu Franck — Hertza oraz efektu Comptona [53].

Wracając do analizy interpretacji Bohma powiadamy, że równanie (1) stanowi formalny odpowiednik równania Hamiltona — Jacobiego. W związku z tym obok „klasycznej" energii (V) Bohm przyjmuje tzw. energię „kwantowomechaniczną". Dana jest wyrażeniem:

$$U(x, y, z) = \frac{\hbar^2}{2m} \frac{1}{R} \left(\frac{\partial^2 R}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 R}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 R}{\partial z^2} \right)$$

Równanie (1) można zapisać w takiej formie:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{1}{2m} \left[\left(\frac{\partial S}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial z} \right)^2 \right] + (U + V) = 0$$

interpretując je jako równanie mechaniki klasycznej. Zatem cząstce przypisuje Bohm pewien tor, a ruch cząstki po torze odbywa się zgodnie z prawami mechaniki Newtona. Energia potencjalna dana jest przez: $(U + V)$. Mamy zatem:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = - \frac{\partial (U + V)}{\partial x}$$

Podobnie dla pozostałych współrzędnych[54]

Znając początkowe położenie i prędkość cząstki oraz R mamy jednoznacznie określony ruch cząstki poprzez powyższe równania. Pęd cząstki spełnia dla każdej chwili równania: $p_x = \frac{\partial S}{\partial x}$; $p_y = \frac{\partial S}{\partial y}$; $p_z = \frac{\partial S}{\partial z}$, jeżeli tylko równania takie są spełnione dla chwili początkowej.

Jeżeli uważać, że gęstość prawdopodobieństwa rozkładu przestrzennego rozpatrywanego zbioru cząstek jest dana przez R^2, wtedy równanie (2) ma u Bohma takie znaczenie, jak w ujęciu klasycznym. W związku z tym Bohm okazał,[55] że przy założeniu równości: $v_x = \frac{1}{m} \frac{\partial S}{\partial x}$ (analogicznie dla v_y, v_z) oraz jeżeli ψ spełnia równanie Schrö-

[52] Por. L. de Broglie, *The Revolution...*, s. 226; *Non-Linear...*, s. V—VI, 99 i 174.

[53] Por. D. Bohm, *A Suggested...*, s. 175—178, 180—182, 191—193.

[54] Tamże, s. 170.

[55] Por. D. Bohm, *Proof...*, s. 458—466. Trudności matematyczne, jakie nasunęły się przy uogólnieniu wyników tego artykułu, udało się uchylić w artykule: D. Bohm, J. P. Vigier, *Model...*, s. 208—216.

dingera, gdy mamy do czynienia z zespołem cząstek o dowolnym początkowym rozkładzie prawdopodobieństwa, przy czym cząstki te podlegają mechanice Bohma, wtedy — na skutek zderzeń pomiędzy cząstkami i na skutek działania innych czynników związanych z poziomem subkwantowym — gęstość ta z biegiem czasu dąży[56] do R^2.

Przyczynową interpretację osiąga Bohm następnie traktując funkcję falową indywidualnego elektronu jako matematyczną reprezentację realnego pola fizycznego. To pole ψ jest wyznaczone przez wartość funkcji falowej oraz przez równanie Schrödingera z odpowiednimi warunkami brzegowymi, wynikającymi z fizycznych warunków rozpatrywanego zagadnienia. Znając ψ można określić R oraz S, co pozwala określić tor cząstki[57].

To, że pole ψ różni się[58] od pola np. grawitacyjnego czy elektrycznego, znanych z fizyki klasycznej, na co szczególną uwagę zwraca Takabayasi[59], Bohm tłumaczy tym, że również charakter zjawisk, tłumaczonych przy pomocy tego pola, jest całkowicie różny od zjawisk poziomu klasycznego[60]. Ponieważ kwantowomechaniczny potencjał przy odległościach rzędu rozmiarów atomu ulega szybkim zmianom, stąd tory cząstek są bardzo skomplikowane[61], komplikacje te wyrównują się dopiero przy rozpatrywaniu statystycznego zespołu cząstek.

Jeśli za Bohmem przyjąć: 1° pole ψ spełnia równanie Schrödingera, 2° składowe pędu cząstki są dane jako: $p_x = \frac{\partial s}{\partial x}$ (analogicznie dla p_y, p_z), 3° nie można dokładnie przewidzieć położenia cząstki, ale tylko statyczny zbiór takich położeń, określony jako: $P = |\psi|^2 = R^2$, wtedy interpretacja Bohma prowadzi do wszystkich eksperymentalnych rezultatów, otrzymywanych w ramach prognoz ortodoksyjnej interpretacji mechaniki kwantowej.[62] Jednak wielkości nieostro określone w interpretacji ortodoksyjnej i podlegające relacjom nieoznaczoności, są dla Bohma tylko pewnymi wielkościami średnimi dla zespołu cząstek. Ostro określone współrzędne położenia i składowe pędu stanowią dla Bohma ukryte zmienne, które już nie podlegają zasadzie Heisenberga.[63] Zasadnicza trudność wysunięta przez von Neumanna pod adresem ukrytych parametrów nie dotyczy bohmowskiej interpretacji, ponieważ von Neumann dowiódł, że mechanika kwantowa w swej obecnej postaci i przy kopenhaskiej inter-

---

[56] Por. D. Bohm, *Comments...*, s. 273—274.

[57] Por. D. Bohm, *A Suggested...*, s. 170.

[58] Tamże, s. 170—171.

[59] Por. T. Takabayasi, *On the Formulation of Quantum Mechanics Associated with Classical Pictures*, „Progress of Theoretical Physics", 8 (1952) 143.

[60] Por. D. Bohm, *Comments...*, s. 279.

[61] Por. D. Bohm, *A Suggested...*, s. 185; M. Bunge, *Causality*, s. 350.

[62] Por. D. Bohm, *A Suggested...*, s. 171; *Hidden Variables in the Quantum Theory*, [W:] *Quantum Theory*, New York — London 1962, s. 357.

[63] Por. D. Bohm, *A Suggested...*, s. 183; *Filozoficzne...*, s. 51—53; H. Freistadt, *The Causal...*, s. 11—12.

pretacji jest niezrozumiała w terminach statystycznego rozkładu ukrytych parametrów. Tę konkluzję odnośnie do interpretacji przyczynowej uchylił Bohm. Von Neumann ograniczył się w swoim dowodzie do wąskiej klasy parametrów ukrytych, związanych mianowicie z układem obserwowanym, zaś według Bohma należy brać pod uwagę również ukryte parametry cząstek wchodzących w skład przyrządu mierzącego.[64]

Interpretację przyczynową rozwija Bohm również w oparciu o model hydrodynamiczny, którego koncepcję wysunął Madelung.[65] Współcześnie rozwijają go Takabayasi[66], Schönberg[67], i inni. Bohm i Vigier poszerzyli pierwotny model hydrodynamiczny Madelunga o pewne dodatkowe założenia.[68] Uogólniając ten model Bohm wraz z Szillerem i Tiomno[69] uzyskali przyczynową interpretację równania Pauliego. Odpowiednie modele hydrodynamiczne pozwolą, zdaniem tych autorów, uzyskać większość wyników, otrzymanych przy pomocy relatywistycznego równania Diraca, jak również pozwolą przypuszczalnie wytłumaczyć szereg rezultatów tzw. drugiej kwantyzacji [70].

Istotne punkty przeanalizowanej interpretacji przyczynowej Bohma można ująć w następujące punkty: 1° funkcja falowa reprezentuje realne pole fizyczne i nie jest matematycznym symbolem tylko, 2° obok realnego pola fizycznego zakłada się istnienie cząstek, których stan jest zawsze dokładnie określony przez współrzędne położenia oraz składowe pędu, 3° składowe prędkości cząstek są dane $v_x = \frac{1}{m}\frac{\partial S}{\partial x}$, gdzie m jest masą cząstki a S jest fazą, jaką otrzymamy pisząc funkcję falową jako: $\psi = Re^{\frac{iS}{\hbar}}$, gdzie R oraz S są rzeczywiste, 4° na cząstkę działa nie tylko potencjał klasyczny (V) ale i potencjał kwantowomechaniczny (U), 5° pole znajduje się w stanie szybkich i przypadkowych fluktuacji, które pochodzą z poziomu subkwantowego w podobny sposób, jak fluktuacje cząstki w ruchu Browna pochodzą z poziomu atomowego. Równanie Schrödingera określa przeciętne zachowanie się pola ψ.[71]

Interpretacja Bohma stała się przedmiotem krytyki takich fizyków jak Einstein,[72]

---

[64] Por. D. Bohm, *A Suggested...*, s. 187—188.

[65] Por. E. Madelung, *Quantentheorie in der hydrodynamischer Form*, „Zeitschrift für Physik", 40 (1926) 322—326.

[66] Por. T. Takabayasi, *On the Formulation...*, s. 143—179; *Remarks on the Formulation of Quantum Mechanics with Classical Pictures and on Relations between Linear Scalar Fields and Hydrodynamical Fields*, „Prog. Theor. Phys.", 9 (1953) 187—222.

[67] Por. M. Schönberg, *A Non-Linear Generalisation of the Schrödinger and Dirac Equations*, „Suppl. Nuov. Cim.", 11 (1954) 674—682.

[68] Por. D. Bohm, J. P. Vigier, *Model...*, s. 208—216.

[69] Por. D. Bohm, R. Schiller, J. Tiomno, *A Causal Interpretation of the Pauli Equation*, „Suppl. Nuov. Cim.," 1 (1955) 48—66; D. Bohm, R. Schiller, *A Causal Interpretation of the Pauli Equation*, „Suppl. Nuov. Cim.", 1 (1955) 67—91.

[70] Por. D. Bohm, R. Schiller, *A Causal...*, s. 91.

[71] Por. D. Bohm, *Hidden...*, s. 356.

[72] Artykuł zamieszczony w *Scientific Papers Presented to M. Born*, New York 1953 nie był dostępny autorowi podczas pisania artykułu.

Heisenberg[73], Pauli[74], Rosenfeld[75], Halpern[76] i innych[77]. Nie wchodząc w szczegóły tej dyskusji dla jej specjalistycznego w przeważnej części charakteru, należałoby jedynie wyjaśnić stanowisko Einsteina, który przecież nigdy nie opowiadał się za probabilistyczną interpretacją mechaniki kwantowej. Otóż Einstein nie argumentuje przeciw samej idei przyczynowej interpretacji, leżącej u podstaw mechaniki kwantowej w ujęciu probabilistycznym, ale przeciw opieraniu takiej interpretacji na równaniu Schrödingera, które może mieć, zdaniem Einsteina, statystyczną jedynie interpretację w sensie Borna.[78]

Bardzo ważnym wnioskiem tej dyskusji jest to, że żadnemu z autorów nie udało się wykazać błędów, względnie logicznych niekonsekwencji w modelu interpretacji Bohma, czy też niezgodności z doświadczeniem. Nie znaczy to jednak, by interpretacja Bohma była już czymś wykończonym. Jest tu jeszcze wiele niedomagań, z których sam Bohm zdaje sobie zresztą sprawę.[79]

Trzeba jednak pamiętać, iż Bohm okazał, podając logicznie zwartą interpretację mechaniki kwantowej, możliwość wprowadzenia do niej ukrytych parametrów. Już sama logiczna możliwość takiej interpretacji może stać się punktem wyjścia dla dokonania pewnych modyfikacji, co zagwarantowałoby jej fizykalną sprawdzalność. Czy interpretacja w terminach ukrytych parametrów odpowiadających poziomowi subkwantowemu jest słuszna, okaże dopiero przyszłość, jednak już dziś dadzą się przytoczyć pewne racje, że takie podejście jest prawidłowe, chociaż może nie być słuszne we wszystkich szczegółach. Otóż współczesna fizyka cząstek o wysokich energiach wykryła szereg cząstek elementarnych, które mogą powstawać, znikać, przekształcać się wzajemnie. Fakt tego rodzaju procesów kreacji, amnihilacji i wzajemnego przekształcania się cząstek wyraźnie sugeruje pogląd, że tzw. cząstki elementarne nie są faktycznie elementarnymi, ale powstają na podłożu pewnych ruchów nowego rodzaju tworów, jeszcze bardziej fundamentalnych. Te twory należałyby do sugerowanego przez Bohma poziomu subkwantowego, z którego cząstki elementarne wyłaniałyby się jako pewnego rodzaju struktury przejściowe.[80] Następnie Bohm uważa, że przy bardzo małych odległościach oraz przy bardzo wysokich energiach spodziewać się można nowego rodzaju zjawisk, które pozwolą stwierdzić istnienie poziomu subkwantowego. Przy tych bowiem odległościach i energiach stosowanie obecnej teorii kwantów prowadzi do niezado-

[73] Por. W. Heisenberg, *The Development...*, s. 17—27; *Physics...*, s. 115—118.

[74] Por. W. Pauli, *Remarques sur le problème des paramètres cachés dans la mécanique et sur la théorie de l'onde pilote*, [W:] *L. de Broglie, physicien et penseur*, Paris 1953, s. 33—42.

[75] Por. L. Rosenfeld, *Strife...*, 403.

[76] Por. O. Halpern, *A Proposed Re-Interpretation of Quantum Mechanics*, „Physical Review", 87 (1952) 389.

[77] Por. J. Plebański, *Praca Bohma o interpretacji teorii kwantowej przy pomocy ukrytych parametrów*, s. 73—76; W. Fock, [W:] *Materiały...*, s. 64.

[78] Por. H. Freistadt, *The Causal...*, s. 40.

[79] Por. D. Bohm, *Hidden...*, s. 359—360; *Causality...*, s. 117—118.

[80] Por. D. Bohm, R. Schiller, *A Causal...*, s. 91: D. Bohm, *Hidden...*, s. 362.

walających z punktu widzenia fizyki rezultatów, co zdaje się przemawiać za niestosowaniem obecnej teorii kwantów w pewnych zespołach zdarzeń.[81]

Przechodząc do ostatniej części postawionego na wstępie zagadnienia przypominamy, że współcześnie wyróżnia się zasadniczo dwie grupy interpretacji mechaniki kwantowej: interpretację probabilistyczną oraz interpretacje przyczynowe. Grupa pierwsza występuje najczęściej w postaci wprowadzonej przez szkołę kopenhaską. Druga grupa obejmuje interpretacje alternatywne w stosunku do interpretacji probabilistycznej. Były one formułowane przez wielu autorów wprowadzających różne odmiany interpretacji przyczynowych. Wspólne dla tej grupy interpretacji jest to, że nawracają do pojęcia rzeczywistości fizycznej, jakim posługiwano się w ramach fizyki klasycznej. Mamy więc tutaj do czynienia z nawrotem do idei obiektywnego świata fizycznego, którego nawet najmniejsze elementy istnieją niezależnie od tego czy są, czy też nie są przedmiotem badań.[82]

Mimo, że podawano już wiele niesprzecznych interpretacji przyczynowych, żadna z nich nie objęła dotychczas wszystkich dyscyplin mikrofizyki. Jednak poważne braki interpretacji probabilistycznej, jakie wykryła analiza krytyczna przeprowadzona w ramach alternatywnych interpretacji[83], jak również pewien kryzys, jaki daje się zaobserwować w kwantowej teorii pola, stanowią w dużej mierze racjonalne uzasadnienie dla samej koncepcji przyczynowych interpretacji, przy czym za jedno z głównych zadań tych interpretacji uważa się [84] to, by stały się one punktem wyjścia dla teorii, które pozwoliłyby wyjść poza rezultaty osiągane za pomocą zwyczajnej interpretacji.

Należy zdać sobie sprawę, iż podejmujemy próbę uszeregowania różnych interpretacji tego samego matematycznego sformułowania mechaniki kwantowej, innymi słowy — zajmujemy się próbą uszeregowania różnych układów reguł fizykalnej interpretacji tego samego zasadniczo schematu matematycznego.

Sformułowania matematyczne mechaniki kwantowej nie muszą być pod każdym względem takie same, owszem mogą zachodzić pewne np. przesunięcia w układzie aksjomatów, czy też mogą być wprowadzone nowe aksjomaty.

Te interpretacje, które zostaną uwzględnione poniżej, dotyczą próby fizykalnego zrozumienia pewnego schematu matematycznego, ukonstytuowanego przez następujące elementy: (1) równanie Schrödingera, (2) matematyczne restrykcje nałożone na funkcję falową, (3) definicję elementu macierzy oraz wartości przeciętnych zmiennych dynamicznych, (4) relacje nieoznaczoności Heisenberga[85]. Uwzględnimy przy tym różne podejścia przedstawicieli interpretacji probabilistycznych oraz przyczynowych do kilku podstawowych zagadnień dotyczących podstaw interpretacji mechaniki

[81] Por. D. Bohm, *Hidden...*, s. 346, 361—362; *Causality...*, s. 121—124.

[82] Por. W. Heisenberg, *The Development...*, s. 20; *Physics...*, s. 115.

[83] Por L. de Broglie, *Non-Linear...*, s. 72—89; D. Bohm, A *Suggested...*, s. 168—169.

[84] Por. H. Freistadt, *The Causal...*, s. 29.

[85] Por. M. Bunge, *Survey of the Interpretations of Quantum Mechanics*, „American Journal of Physics", 24 (1956) 237.

kwantowej. Oto one: 1° jakie jest znaczenie zmiennych dynamicznych, tzn. czy reprezentują one jakieś obiektywne własności materii, czy też stanowią jedynie symbole przydatne do formalnych operacji, dokonywanych dla otrzymywania wyników, zgodnych z danymi doświadczenia, 2° jakie jest znaczenie funkcji falowej, czy stanowi ona jedynie matematyczny symbol bez fizykalnego znaczenia, czy reprezentuje pewną realność fizyczną, np. pole, czy daje statystyczne jedynie informacje czy też opisuje indywidualne układy kwantowomechaniczne, 3° jaka jest natura i geneza relacji nieoznaczoności Heisenberga, czy te relacje są wynikiem niekompletności obecnej mechaniki kwantowej, czy są zakotwiczone w naturze rzeczy czy eksperymentu, 4° jaka jest natura mikroukładów, którymi zajmuje się mechanika kwantowa, czy są to fale czy też cząstki względnie elementy, które się jawią raz jako fala raz jako cząstka, czy też są czymś, co jest magicznie wywoływane (conjured up)[86] przez eksperymentatora.

Odpowiedzi przytaczane na pierwsze z powyższych pytań można podzielić na dwie klasy: (A) zmienne dynamiczne są tworami matematycznymi, które reprezentują wielkości mierzalne czyli takie, którym można przypisać określone rzeczywiste wartości liczbowe. Wartości liczbowe nie przedstawiają jednak własności przedmiotów materialnych, mających autonomiczne istnienie w świecie fizycznym. I tak pewnemu układowi kwantowomechanicznemu, np. elektronowi, przypisuje się położenie poprzez wykonanie odpowiedniego pomiaru, poza którym nie można sensownie mówić o położeniu elektronu. Operatory mechaniki kwantowej mają znaczenie czysto matematyczne, ich wartości własne mają znaczenie empiryczne, nie mają zaś znaczenia materialnego, tzn. nie można ich przyporządkować czemukolwiek, co istnieje niezależnie od doświadczenia. Takie stanowisko reprezentują: Heisenberg[87], Jordan[88], Franck[89], Schlick[90]. (B) Zmienne dynamiczne stanowią abstrakcyjne przedstawienie konkretnych własności układów materialnych, przy czym odnoszą się tylko bądź do rozważanego układu kwantowomechanicznego, bądź do układu kwantowomechanicznego i aparatury mierzącej łącznie. W drugim przypadku opis należy uzupełnić przez wprowadzenie ukrytych zmiennych, dotyczących samego układu i pozwalających opisać obiektywnie istniejące wielkości, tzn. takie jakie dany układ posiada niezależnie od aktu obserwacji, który jedynie wprowadza zmiany do tych wielkości (Bohm).[91]

Odpowiedzi, jakie daje się na drugie z postawionych pytań również można podzielić na dwie grupy. Grupę pierwszą (A), mówiąc najogólniej, można w ten sposób scharakteryzować, że funkcję falową uważa się za pewien symbol matematyczny.

---

[86] Por. L. Rosenfeld, *Strife...*, s. 393.

[87] Por. W. Heisenberg, *Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*, „Zeitschr. Phys.", 43(1927) 185.

[88] Por. P. Jordan, *Über den positivistischen Begriff der Wirklichkeit*, „Die Naturwiss.", 22 (1934) 485.

[89] Por. Ph. Frank, *Philosophische...*, s. 303.

[90] Por. M. Schlick, *Quantentheorie*, „Erkenntnis", 6 (1936) 317.

[91] Por. D. Bohm, *A Suggested...*, s. 183—184.

W grupie tej można wyróżnić dwa stanowiska. Pierwsze (1), reprezentowane przez Bohra [92] i Heisenberga[93], uważa funkcję falową za pojęcie pomocnicze, pozwalające nam wyrachować wartości pewnych wielkości, które można weryfikować eksperymentalnie. Funkcja falowa stanowi również symbol pomocniczy przy formułowaniu praw prawdopodobieństwa, jakie rządzą procesami atomowymi, przy czym prognozy probabilistyczne uważa się za kompletne w tym sensie, że nie można podać prognoz o charakterze nieprobabilistycznym. Stąd też funkcję falową nazywa się nieraz funkcją prawdopodobieństwa, uważając ją za swoistą mieszaninę dwóch rzeczy: stanu faktycznego i naszej wiedzy o nim. Chodzi tutaj z jednej strony o coś znajdującego się pomiędzy ideą zdarzenia a rzeczywistym zdarzeniem, o pewien rodzaj fizycznej realności leżący pomiędzy możliwością a rzeczywistością, z drugiej zaś strony chodzi o niepewność naszej wiedzy o układzie kwantowomechanicznym. Zatem funkcja prawdopodobieństwa łączy w sobie twierdzenie o możliwościach z twierdzeniem o naszej wiedzy o zdarzeniach. Tym złożonym charakterem funkcji falowej tłumaczy się niemożliwość opisu przyczynowego procesów elementarnych, jako że pojęcie prawdopodobieństwa nie może być wyeliminowane z opisu układów mechaniki kwantowej. Zgodnie ze stanowiskiem drugim (2) reprezentowanym między innymi przez Błochincewa [94] i Einsteina [95] uważa się, że funkcja falowa nie charakteryzuje indywidualnych układów, ale zbiory statystyczne. Zatem opis dokonany za pomocą funkcji falowej jest niekompletny, są bowiem elementy fizykalnej realności (np. dokładny czas rozpadu promieniotwórczego pojedynczego atomu radu), które w obecnej teorii nie mają odpowiednika. Zdania odnoszące się do indywidualnych układów mogą mieć zatem znaczenie tylko prawdopodobieństwowe. Ten sposób interpretacji funkcji falowej, nazywany statystycznym, należy odróżnić od probabilistycznego sposobu interpretacji funkcji falowej, jaki podano w punkcie poprzednim.

W ramach drugiej (B) grupy utrzymuje się, że funkcja falowa jest symbolem matematycznym, który odnosi się do układów materialnych, podobnie jak inne symbole matematyczne. Można tutaj odróżnić kilka stanowisk. Zgodnie z pierwszym (1) funkcja falowa odnosi się do realnego pola. I tak elektron winien być rozpatrywany jako ciągły rozkład naboju, którego gęstość jest związana z amplitudą fali ψ zależnością: $\rho = |\psi|^2$ (Schrödinger) [96]. Wedle drugiego stanowiska (2) funkcja falowa reprezentuje wszystko przenikającą ciecz kwantową. Taki pogląd jest właściwy autorom rozwijającym hydrodynamiczny model Madelunga. W przypadku trzecim (3) funkcja ψ zachowuje interpretację probabilistyczną i nie ma żadnego znaczenia fizycznego czyli nie reprezentuje

[92] Por. N Bohr, *Chemistry and the Quantum Theory of Atomic Constitution*, „Journal of Chemical Society", 21 (1932) 349—384.

[93] Por. W. Heisenberg, *Physics...*, s. 46—57.

[94] Por. D. Błochincew, *Podstawy mechaniki kwantowej*, tłum. Z. Kopeć, J. Werle, Warszawa 1954, s. 53—57.

[95] Por. A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete*, „Phys. Rev.", 47 (1935) 777.

[96] Por. D. Bohm, *Causality...*, s. 77.

realnego pola czy też cząstki, dopiero funkcja u, mająca tę samą fazę co funkcja ψ ale inną amplitudę, reprezentuje cząstkę, stanowiącą centrum rozciągłego zjawiska falowego (de Broglie)[97]. W stanowisku następnym (4) funkcja ψ ma dwa znaczenia: z jednej strony reprezentuje realne pole fizyczne, z drugiej strony kwadrat modułu tej funkcji jest interpretowany jako gęstość prawdopodobieństwa (Bohm).[98]

Odpowiedzi autorów na trzecie zagadnienie również można ugrupować w dwie klasy. W ramach pierwszej (A) znajdą się takie ujęcia: (1) Nie można podać takiej interpretacji mechaniki kwantowej, w której przy pewnych warunkach zasada Heisenberga nie byłaby ważna. Nieoznaczoność nie stanowi następnie przymiotu tkwiącego w przedmiotach materialnych, ponieważ poza doświadczeniem nie można o takich sensownie mówić. Relacje Heisenberga stanowią nieredukowalną cechę wszystkich wyników doświadczeń. Swój początek relacje te biorą z niemożliwości przeprowadzenia dokładnie linii granicznej pomiędzy obserwowanym przedmiotem i układem mierzącym.[99] (2) Relacje nieoznaczoności stanowią obiektywny i nieredukowalny brak zdeterminowania, biorący swój początek w zakłóceniach, jakie powstają przy akcie pomiaru (Dirac, Lenzen)[100]. (3) Niezdeterminowanie, o jakim mówią relacje Heisenberga, jest wynikiem skomplikowanych ruchów pewnych hipotetycznych tworów (zerony Weizla)[101], związanych z poziomem niższym od kwantowego, podobnie jak w przypadku ruchów Browna, gdzie w wyniku zderzeń drobniutkich zawiesin z drobinami ośrodka, ruchy tych zawiesin nie mogą być dokładnie określone przez zmienne (położenie i pęd), istniejące na poziomie samego ruchu Browna (tu należy również hipotetyczna ciecz kwantowa, postulowana przez Vigiera i Bohma). Druga klasa (B) odpowiedzi odnosi nieoznaczoność związaną z zasadą Heisenberga do naszej wiedzy o przedmiotach fizycznych a nie do samych tych przedmiotów. (1) Jedni, np. von Laue [102], utrzymują, że nieoznaczoność związana z zasadą Heisenberga jest wynikiem zastosowania pojęcia cząstki do opisu zjawisk falowych. (2) Inni głoszą, że relacje Heisenberga nie odnoszą się do ukrytych zmiennych, które mają określoną wartość dla dowolnej chwili t. Statystyczny rozkład wartości jest spowodowany przez gwałtowne fluktuacje potencjału kwantowomechanicznego, które występują nawet pod nieobecność układu mierzącego (Bohm).

Na ostatnie z wysuniętych zagadnień jedni (A) odpowiadają, że mikroukłady nie są czymś w sobie określonym. Utrzymuje się, że poza doświadczeniem, gdzie dokonuje

---

[97] Por. L. de Broglie, *Non-Linear...*, s. 98—99; *The Revolution...*, s. 226.

[98] Por. D. Bohm, *A Suggested...*, s. 172.

[99] Por. M. Bunge, *Survey...*, s. 280: *Causality...*, s. 346—347.

[100] Por. P.A.M.Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics*, Oxford 1957, s. 4; V.F. Lenzen, *Philosophical Problems of the Statistical Interpretation of Quantum Mechanics*, [W:] *Second Berkeley Symposium of Mathematical Statistics and Probability*, Berkeley—Los Angelos 1951, s. 951.

[101] Por. W. Weizel, *Ableitung des Quantentheorie auss einem klassischen, kausal determinierten Modell*, „Zeitschr. Phys.", 134 (1953) 264.

[102] Por. M. von Laue, *Über den Heisenbergs Ungenauigkeistbeziehungen und ihre erkenntnistheoretische Bedeutung*, „Die Naturwiss.," 22 (1934) 43.

się pomiarów wielkości mierzalnych, mikroukłady nie istnieją i mechanika kwantowa nie dotyczy przyrody, ale jej poznania. Takie terminy jak „cząstka", „fala" są jedynie obrazowym modelem, jakim się posługujemy przy opisie doświadczenia (Heisenberg, Frank) [103]. Że mikroukłady są czymś w sobie określonym, utrzymują inni (B): (1) Mikroukłady są cząstkami, względem których fale są czymś pochodnym (F. Bopp) [104] (2) Istnieją zasadniczo tylko fale, aczkolwiek skupione na małej przestrzeni przypominają cząstkę (Schrödinger)[105]. Tak aspekt falowy, jak i korpuskularny mikroukładów jest zasadniczy i jednakowo fizycznie realny (Bohm).

CONTEMPORARY INTERPRETATION OF THE QUANTUM MECHANICS

Modern interpretation of the quantum mechanics follows two main lines: probabilistic and causal. The first approach is usually expressed in terms elaborated by the Copenhagen school. It has been given its most systematic formulation in Bohr's principle of complementarity. Within the Copenhagen interpretation this principle leads to the so-called principle of strict observability which postulates that only such beings should be assumed existing as can be observed. From the philosophical viewpoint, the Copenhagen interpretation of complementarity is an idealism of the esse-percipi type.

Various causal interpretations have been proposed by many authors as alternative to the probabilistic explanation. Their common denominator is the notion of physical reality, borrowed from classical physics. What we witness here is then the return to the idea of an objective physical world, the least elements of which exist irrespectively of whether they are object of observation or not.

In the last part of the article an attempt is made to classify various interpretations of the same mathematical formulation of the quantum mechanics, i.e. to classify various sets of rules of physical interpretation of the essentially identical scheme in the quantum mechanics. In the process, the author reviews different interpretations, both probabilistic and causal, of some basic problems regarding the fundamental principles of the interpretation of the quantum mechanics.

[103] Por. W. Heisenberg, *Physics...*, s. 118.

[104] Por. W. Heisenberg, *50 Jahre...*, s. 49; Ph. Frank, *Foundations...*, s. 55.

[105] Por. E. Schrödinger, *Are there Quantum Jumps?*, „The British Journal for the Philosophy of Science", 3 (1953) 109.