Filozofia Nauki
Rok VIII, 2000, Nr 2(30)

Roman Stanisław Ingarden

Modalna interpretacja mechaniki kwantowej i klasycznych teorii fizycznych

Janowi Łopuszańskiemu z serdecznymi pozdrowieniami z okazji 75-lecia urodzin

Streszczenie

W 1990 r. Bas C. van Fraassen nadał mechanice kwantowej interpretację modalną, polegającą na potraktowaniu mechaniki kwantowej jako „czystej teorii tego, co możliwe, zawierającej sprawdzalne, empiryczne implikacje tego, co się rzeczywiście zdarza". Występuje tu wąskie, tradycyjne rozumienie modalności, uwzględniające jedynie pojęcie możliwości (zwykle oznaczane w logice przy pomocy symbolu C.I. Lewisa „◊"), oraz pojęcie konieczności „□", definiowane przy pomocy „◊". Jednakże we współczesnej logice modalność jest rozumiana w o wiele szerszym sensie, a mianowicie — jako dowolny funktor intensjonalny (tj. nieekstensjonalny, czyli taki, który nie jest zdeterminowany przez prawdziwość zdania). W moich niedawnych publikacjach (1997) — niezależnych od publikacji van Fraasena — przedstawiłem próbę zastosowania owego szerszego rozumienia modalności do interpretacji fizyki klasycznej i kwantowej. W niniejszych rozważaniach omawiam problemy tej interpretacji na tle krótkiego przeglądu podejścia logicznego do mechaniki kwantowej w ciągu ostatnich siedmiu dekad. Wykorzystuję tutaj nowe pojęcie podmodalności i nadmodalności wielu rzędów.

1. WSTĘP. LOGIKA WIELOWARTOŚCIOWA A LOGIKA NIEDYSTRYBUTYWNA

Gdy patrzymy na wiek XX z dzisiejszej perspektywy — z perspektywy *fin de siécle* — stwierdzamy, że w dziedzinie fizyki największymi osiągnięciami są mechanika kwantowa i teoria względności. Obie teorie powstały pod naciskiem niespodziewanych danych eksperymentalnych — i po wielu nieudanych próbach teoretycznego ich wyjaśnienia na podstawie ogólnie wówczas przyjmowanych zasad fizyki. Obie wymagały nowego paradygmatu koncepcji fizycznych — i nie tylko fizycznych. Obie też okazały się teoriami bardzo mocnymi, wytrzymującymi jak dotąd wszystkie próby falsyfikacji, w czasie których dokonywano coraz dokładniejszych pomiarów. Równocześnie stanowią one jednak wielkie wyzwanie dla rozumu ludzkiego, dla najgłębiej zakorzenionych zasad zdrowego rozsądku i intuicji fizycznej, a nawet dla logiki klasycznej.

Początkowo teoria względności wywoływała pewne protesty — rzadko wśród fizyków, częściej natomiast wśród filozofów i intelektualistów. Niels Bohr — jeden z głównych twórców mechaniki kwantowej — powiedział, że ten, kto potrafi myśleć o mechanice kwantowej bez lekkiego zawrotu głowy, z pewnością jej nie rozumie. I rzeczywiście, nawet Niels Bohr zrezygnował z pełnego jej zrozumienia w zwykłym sensie, występującym w logice i filozofii Zachodu. Gdy przyjmował on zasadę komplementarności, uciekł się do pomocy filozofii chińskiej. Gdy z kolei wymyślił koncepcję skoków kwantowych w swoim pierwszym modelu atomu wodoru, to w istocie swoim fizykalnym i logicznym sumieniem «przeskoczył» łacińską sentencję: *Natura non facit saltus* (Natura nie czyni skoków) i klasyczną zasadę ciągłości różniczkowej. Kiedy później Max Born i Werner Heisenberg użyli algebr z nieskończonymi macierzami zawierającymi współczynniki zespolone, jasno rozumieli matematyczną stronę swoich teorii — ale nie ich interpretację fizyczną. Zasada nieoznaczoności — sformułowana przez Heisenberga kilka lat później — oraz statystyczna interpretacja mechaniki kwantowej podana przez Borna w tym samym czasie stanowiły świadomą rezygnację z pełnego opisu i zrozumienia procesów fizycznych, w podobnym sensie, jak słynne *hypotheses non fingo* Newtona, który ciążenie powszechne rozumiał tylko przy pomocy obrazu spadającego jabłka, a nie przez ujęcie mechanizmu fizycznego. Tak samo Einstein szczególną i ogólną teorię względności rozumiał na poziomie swoich słynnych eksperymentów myślowych. Istnieje anegdota, według której relatywistyczną koncepcję jednoczesności zrozumiał on w chwili, gdy spojrzał na strzałki zegara ratuszowego odbitego w lusterku taksówki w czasie jazdy po ulicy Kramgasse w Bernie [8, s. 909]. Dopiero później Hermann Minkowski podał pewne ogólne ale jasne schematy geometryczne, pozwalające ujmować względność intuicyjnie. Jednakże wszystkie trudności zrozumienia teorii względności — zarówno szczególnej, jak i ogólnej — są niczym w porównaniu z trudnościami związanymi z mechaniką kwantową. Dlatego od dawna teorie względności traktowane są jako część fizyki klasycznej, w przeciwieństwie do fizyki kwantowej, którą traktuje się jako dziedzinę nie-klasyczną, kryjącą w sobie znaczne trudności filozoficzne. Nawet tacy kompetentni fizycy matematyczni i filozofowie fizyki jak Paul Busch, Pekka Lahti czy Peter Mittelstaedt na początku swojej monografii poświęconej kwantowej teorii pomiarów [5, s.1] przyznali:

> Dotychczas nie osiągnięto zrozumienia mechaniki kwantowej w sensie ogólnie przyjętej interpretacji. Podstawową przyczynę tej trudności należy upatrywać w nieredukowalnie probabilistycznej strukturze mechaniki kwantowej, wypływającej z nieklasycznego charakteru jej języka.

Max Jammer, w znakomitej książce *Filozofia mechaniki kwantowej* [20, s. 341], napisał:

> Rozłożenie teorii fizycznej *T* [...] na formalizm matematyczny *F*, zbiór relacji epistemicznych *R*, oraz obraz fizyczny *M*, pociągało za sobą to, że interpretacja *T* powinna koncentrować się na jednym lub kilku z tych składników. Wszystkie dotychczas opisane interpretacje mechaniki kwantowej opierały się na tym założeniu. Jednakże pewne rezultaty matematyki i filozofii doprowadziły do koncepcji, według której alternatywy dyskutowane dotychczas nie są wyczerpujące, i według której pewien czwarty składnik, o charakterze, powiedzmy, ogólniejszym — przez co właśnie był dotychczas ignorowany — może również stać się przedmiotem badania w ramach poszukiwań odpowiedniej interpretacji, a mianowicie: formalna struktura rozumowania dedukcyjnego użyta do sformułowania *T*. Jeśli pewna teoria *T* prowadzi do impasu, to — jak się twierdzi — niekoniecznie należy modyfikować formalizm matematyczny jako taki czy pojęcia pozalogiczne; równie dobrze może się okazać, że trzeba zrewidować logikę leżącą u podstaw sformułowania *T*. Ten sposób poszukiwania interpretacji mechaniki kwantowej nazywa się zwykle podejściem kwantowo-logicznym.

Jak wiadomo dotychczas podjęto dwie próby takiej rewizji logiki. Pierwsza polegała na sformułowaniu tzw. logiki niechryzypowej (czasami nazywanej też „logiką niearystotelesowską", co jest historycznie mniej poprawne), a mianowicie: logiki wielowartościowej. Druga polegała na zastosowaniu logiki niedystrybutywnej, opartej na algebraicznym pojęciu kraty.

Na początku XX wieku pojawiło się kilka niezależnych od siebie prób sformułowania logiki trójwartościowej (później wielowartościowej), a mianowicie próba dokona przez Hugha MacColla (1832—1909) w Londynie w 1906 r., przez Charlesa Sandersa Peirce'a (1839—1914) w Nowym Jorku w 1909 r., przez Nikołaja Aleksandrowicza Wasiliewa (1880—1940) w Kazaniu w 1910 r., przez Jana Łukasiewicza (1878—1956) w Warszawie w 1918 r. i przez urodzonego w Polsce Emila Leona Posta (1897—1954) w USA w 1920 r. Tylko dwaj ostatni formułowali swoje teorie w sposób matematyczny; trzej pierwsi nazywali swoje koncepcje „logiką trzech wymiarów", „matematyką trychotomiczną" i „wyobrażeniową logiką niearystotelesowską", i nie podawali żadnych interpretacji. Dopiero Łukasiewicz zinterpretował trzecią wartość logiczną jako możliwość (np. możliwość przyszłego wydarzenia) i powiązał ją z indeterminizmem w fizyce. (W 1969 r. jego uczeń Jerzy Słupecki zinterpretował trzecią wartość jako zmianę, tak że występowały u niego wartości logiczne: nieistnienie — 0, zmiana — 1/2, istnienie 1.) Łukasiewicz także „rozpatrywał możliwość uogólnienia swojego systemu do logiki nieskończenie wielowartościowej" [20, s. 344], w sposób zbliżony do konstrukcji rachunku prawdopodobieństwa. Zastosowanie logiki trójwartościowej do mechaniki kwantowej zostało po raz pierwszy zaproponowane przez Zygmunta Zawirskiego (1882—1948) w Poznaniu w 1931 r., a później niezależnie przez Hansa Reichenbacha (1891—1953) w Berlinie w 1932 r. oraz przez Fritza Zwicky'ego w Pasadenie w 1933 r. Pierwszy z nich zastosował logikę trójwartościową Łukasiewicza z trzecią wartością logiczną zinterpretowaną jako niepewność, natomiast pozostali — nieskończenie wielowartościową logikę z ciągłą skalą wartości prawdziwościowych zinterpretowaną jako prawdopodobieństwo. Podejście to zostało poddane krytyce przez Henry'ego Margenau (1934), który wskazał, że prawdziwość prawa fizycznego przybiera tylko dwie wartości i powinna być odróżniona od prawdy eksperymentu, który „jest w stanie płynnym" (*in flux*). Sądzę, że jest to kwestia typu czy rzędu zdań, tj. tego, czy mówimy w języku konkretnym (obiektywnym) o elementach rzeczywistości, czy też mówimy w metajęzyku o zdaniach lub zbiorach rzeczywistych elementów. Fizycy interesują się głównie tym pierwszym językiem, filozofowie — tym drugim, ale oba języki są w równym stopniu dopuszczalne w nauce. Interpretacja Zawirskiego—Reichenbacha—Zwicky'ego była pomyślana jako fizykalna. Została sformułowana w języku obiektywnym, choć z wielowartościowymi funkcjami prawdziwościowymi. Natomiast jej metajęzyk mógł zawierać tylko dwuwartościowe funkcje prawdziwościowe. Powrócimy do tego problemu później w kontekście ogólniejszym.

Wspomniane wielowartościowe interpretacje mechaniki kwantowej pozostały, jak się wyraził Jammer, „właściwie nieznane światu fizyki" (Zawirski pisał po polsku i francusku, Reichenbach — po niemiecku, Zwicky — po angielsku); zostały one odnotowane jedynie przez kilku filozofów zajmujących się współczesną fizyką. Jammer zauważył, że nowa idea fundamentalna potrzebuje zwykle długiego czasu, by dojrzała do szerokiego zrozumienia i zastosowania. Podobnie wyglądało to w wypadku geometrii nieeuklidesowej Riemanna, zastosowanej przez Einsteina do fizyki dopiero niemal w sto lat po pierwszym pojawieniu się idei tej geometrii w matematyce. Jednakże, jak stwierdza Jammer [*loc. it.*, s. 346]:

> W istocie pierwszy poważny przełom w stosowaniu logiki nieklasycznej do mechaniki kwantowej dokonał się w 1936 r. Ale nie zasada dwuwartościowości, lecz raczej prawo dystrybucji logiki klasycznej stało się przedmiotem ataku.

Przeprowadzono go w słynnym artykule Garretta Birkhoffa i Johna von Neumanna „Logika mechaniki kwantowej", opublikowanym w 1936 r. Obecnie zagadnienie to ma rozległą literaturę i jest dobrze znane wśród fizyków matematycznych. Zamiast przestrzeni fazowej Γ klasycznego systemu mechanicznego Birkhoff i von Neumann zastosowali zespoloną przestrzeń ośrodkową Hilberta H systemu kwantowego. Zastąpili oni podzbiory Γ zamkniętymi podprzestrzeniami liniowymi H służącymi do reprezentowania zdarzeń kwantowych lub zdań kwantowych otrzymywanych w rezultacie eksperymentów. W ten sposób wartość prawdziwościowa zdania kwantowego a

jest wartością własną — 1 lub 0 — operatora projekcji a. Logika kwantowa jest ortokomplementarną kratą modularną zamkniętych podprzestrzeni H lub operatorów projekcji na tych podprzestrzeniach. Jak wiadomo, kratę ogólną definiuje się jako zbiór częściowo uporządkowany przez relację porządkującą $\leq$, która w przestrzeni H jest reprezentowana przez inkluzję $\subseteq$. Koncepcja kraty została wprowadzona przez Ernsta Schrödera w 1890 r. i nazwana przez Richarda Dedekinda w 1897 r. „grupą dualną", ponieważ charakteryzuje się operacjami dualnymi: sumy $\cup$ i iloczynu $\cap$, reprezentowanymi w przestrzeni H odpowiednio przez sumę liniową i przecięcie podprzestrzeni. W mechanice kwantowej suma jest interpretowana jako alternatywa, a iloczyn — jako koniunkcja. Ortokomplement definiuje się w H jako przejście od podprzestrzeni zamkniętej a do podprzestrzeni w stosunku do niej ortogonalnej, i jest równoważny negacji logicznej. Relację inkluzji podprzestrzeni interpretuje się logicznie jako relację implikacji. Abstrakcyjnie rzecz ujmując, w kracie z elementem zerowym 0 i elementem jednostkowym I (w H — odpowiednio wektor zerowy i cała H), ortokomplement $\neg a$ do a jest zdefiniowany jako dualny automorfizm a, tj. taki automorfizm, że zachodzi:

(1) $\neg(a \cap b) = \neg a \cup \neg b, \quad \neg(a \cap b) = \neg a \cup \neg b$

i spełnione są dla niego dodatkowo dwa warunki:

(2) $\neg\neg a = a$

oraz

(3) $a \cap \neg a = 0, \quad a \cup \neg a = I$

Mówiąc ogólnie, pojęcie *komplementarności* jest pojęciem o szerszym zakresie niż pojęcie *ortokomplementarności*, ponieważ to drugie jest definiowane tylko przy pomocy warunku (3): ortokomplementarność niekoniecznie jest jednoznaczna — niekoniecznie stanowi ona automorfizm. Oczywiście, każdy ortokomplement jest komplementem, ale niekoniecznie jest tak również na odwrót. Jednakże w kracie dystrybutywnej, takiej jak krata boole'owska, komplement jest jednoznaczny i jest on również ortokomplementem. W przestrzeni Hilberta H ortokomplement jako podprzestrzeń, będąc komplementem w rozumieniu teorii krat, nie jest komplementem w sensie teoriomnogościowym (tj. boole'owskim). W ujęciu fizykalnym, fakt wystąpienia liniowego — nieteoriomnogościowego — dodawania zdarzeń wiąże się ze zjawiskiem interferencji lub z zasadą superpozycji tzw. fal materii lub amplitud prawdopodobieństwa. Ten fakt eksperymentalny burzy właściwie klasyczne pojęcie cząstki jako przedmiotu fizycznego. W konsekwencji, również filozoficzne pojęcie przedmiotu jako czegoś indywidualnego traci sens w fizyce kwantowej. W dziedzinie kwantowej nie ma więc miejsca na «przedmiotowość» w ścisłym sensie — nie ma «obiektywności». Mamy w niej do czynienia tylko ze słabszym pojęciem rzeczywistości, rozumianym jako dyspozycja do — czy możliwość — pojawienia się cząsteczki lub z pojęciem przedmiotu potencjalnego, wirtualnego — a nie obiektywnego. Czy z tego wynika, że rzeczywistość jest «subiektywna»? I tak, i nie. W szerszym sensie jest subiektywna, ponieważ interferencja wiąże się z przygotowaniem urządzeń pomiarowych, dokonywanym przez obserwatora; w sensie węższym nie jest subiektywna, gdyż zjawisko interferencji nie zależy od woli obserwatora, gdy urządzenia pomiarowe zostały już nastawione. Ktoś może powiedzieć, że *res* — przedmiot (np. cząstka) — pojawia się jednak w takich zjawiskach, jak efekt fotoelektryczny, scyntylacja itp. Jest to twierdzenie fałszywe, ponieważ elektron i inne cząsteczki kwantowe, takie jak fotony, mezony itd., są jedynie kwantami pola kwantowego i nie cechują się indywidualnością: nie zachowują się zgodnie z klasyczną statystyką Boltzmanna. Stąd mówienie o indywidualistycznej interpretacji mechaniki kwantowej — jak to się często czyni — wprowadza w błąd i lepiej jest mówić o interpretacji realistycznej. Mamy do czynienia ze zjawiskami rzeczywistymi, zdarzeniami, faktami fizykalnie intersubiektywnymi i powtarzalnymi, a nie — z «twardymi substancjami» czy «rzeczami indywidualnymi» w sensie klasycznym, takimi jak nierozkładalne atomy Demokryta. Ten punkt widzenia jest zgodny z nieredukowalnym charakterem prawdopodobieństwa kwantowego i odrzuceniem zmiennych ukrytych, będącego wynikiem uznania wielu twierdzeń typu „Nie idź" (*no-go theorems*) [Gleason 1957, Bell 1966, Specker 1967 i in.].

Koncepcja, według której świat składa się nie z rzeczy, lecz z faktów, została sformułowana w filozofii przed powstaniem mechaniki kwantowej. W 1918 r. Ludwig Wittgenstein napisał swoje słynne tezy: „(1) The world is all that is the case. (1.1) The world is the totality of facts, not things" [52, s. 7] (por. także [53, 45]). W rzeczywistości w mechanice kwantowej mamy do czynienia z czymś więcej niż z samymi faktami: nie z substancjami, lecz z dyspozycjami (stanami czystymi lub mieszanymi: amplitudami prawdopodobieństwa lub prawdopodobieństwem), stanowiącymi dodatek do wielkości obserwowalnych rozumianych jako własności (fakty). W ten sposób z koncepcji Arystotelesa pozostały pojęcia tego, co potencjalne i aktualne (własności), lecz zniknęło pojęcie substancji.

Z drugiej strony, w kracie kwantowej modularność stanowi słabszą stronę dystrybutywności w logice klasycznej — boole'owskiej. Jest ona mianowicie zdefiniowana przez warunek:

(4) Jeśli $a \subseteq b$, to $a \cup (b \cap c) = (a \cup b) \cap c$.

Jak już wspomniano, klasyczna krata boole'owska jest komplementarną kratą dystrybutywną, ale ze względu na wspomniane twierdzenie może ona być zdefiniowana również jako ortokomplementarna krata dystrybutywna. W logice kwantowej będącej ortokomplementarną modularną geometrią krat domkniętych przestrzeni Hilberta H (lub ortogonalnych projekcji na podprzestrzenie), tkwi nieskończona liczba zupełnych i ortonormalnych układów odniesienia w H. Te układy odniesienia — jako zbiory wektorów ortonormalnych — można zinterpretować jako kraty boole'owskie, które są klasycznymi logikami zdarzeń możliwych (interpretacji), zachodzących w czasie pomiarów ustalonych obserwowalnych wielkości fizycznych. W ten sposób eksperymenty kwantowe, dokonane głównie w XX wieku, wykryły rotacyjne stopnie swobody logiki klasycznej (rotacje unitarne między układami własnymi odniesienia niekomutujących wielkości obserwowalnych) w nowym świecie grupy przekształceń unitarnych.

W celu uproszczenia wykładu pominiemy tu definicje ważnych pojęć powstałych w toku dalszego rozwoju logiki kwantowej, takich jak *kompatybilność* czy *ortomodularność* [por. np. 29, Appendix 1, s. 343—352]. Pominiemy także omówienie takich podstawowych odkryć w statystycznej strukturze mechaniki kwantowej, jak twierdzenie Gleasona z 1957 r., pojęcie *entropii* i *informacji kwantowej* [por. 15, 38 i 16], pojęcie *kwantowych podgrup dynamicznych* i *kwantowych systemów otwartych* [24, 7], pojęcie *efektu* (Günther Ludwig 1970, por. 27) i odpowiednie uogólnienia pojęcia *wielkości obserwowanej* od pojęcia operatora samosprzężonego czyli miary o wartościach operatorów rzutowych (miary PV lub miary spektralnej) do pojęcia miary o wartościach operatorów dodatnich (miary POV czy miary semispektralnej) (1970, por. [12, 6]), jak również wprowadzenie przy pomocy tego ostatniego — pojęcia *pomiaru pośredniego nieostrego* (rozmytego) [13], a także *uprzedmiotowienia nieostrego* (*rozmytego*) [5, s. 127]. Pomijamy także pojęcia *systemów obserwowanych ciągle*, *stanów a posteriori*, *filtrowania kwantowego* i *pomiarów niezaburzających* [44,1], *efektu EPR* [6], *nierówności Bella*, *uwikłania* i *teleportacji* (por. [14]). Zakładamy, że pojęcia te są obecnie mniej więcej znane wśród fizyków matematycznych i niektóre z nich wykorzystamy później. W celu zapoznania się z obecnym stanem logiki kwantowej można sięgnąć do odpowiednich artykułów przeglądowych i książek (C. Piron [40, 41], J.M. Jauch [21], V.S. Varadarajan [51], E. Beltrametti i G.Cassinelli [2], P. Mittelstaedt [33]).

Tutaj omówimy krótko tylko jedno zagadnienie o charakterze matematycznym i jedno o charakterze fizykalnym.

Otóż wysunięto następującą obiekcję matematyczną: logika Birkhoffa — von Neumanna nie jest logiką we właściwym sensie, ponieważ implikacja jest w niej tylko relacją (porządku), a nie operacją. Obiekcję tę usunął toruński logik Jerzy Kotas [25, 26]. Wykazał on, że w mechanice kwantowej istnieje sześć operacji odpowiadających spójnikom klasycznym — w szczególności implikacji — z których pięć jest identycznych z relacją implikacji Birkhoffa — von Neumanna, a wszystkie pozostałe są z nią równoważne. Kotas podał także dwa równoważne implikacyjno-negacyjne systemy aksjomatyczne, równoważne z logiką modularną Birkhoffa — von Neumanna.

Zagadnienie fizykalne stanowi chyba najważniejszy problem i logicy kwantowi wiążą z nim duże nadzieje. Chodzi mianowicie o problem reprezentacji: o to, czy modularna krata z ewentualnymi warunkami dodatkowymi zawsze może być reprezentowana w przestrzeni Hilberta. Wielu sądziło, że tak jest. Na przykład van Fraassen napisał optymistycznie w 1991 r. [91, s. 199]:

> Postulaty logiki kwantowej zawężały stopniowo klasę modeli, aż w końcu twierdzenia o reprezentacji pokazały, że przestrzeń stanów została ograniczona do przestrzeni Hilberta.

Jednakże jeszcze w tym samym roku inni specjaliści — Busch, Lahti i Mittelstaedt — w wyżej wspomnianej książce napisali o tym problemie w sposób pesymistyczny [5, s. 4]:

> Każde z tzw. ujęć aksjomatycznych pogłębiło nasze rozumienie struktur matematycznych i pojęciowych mechaniki kwantowej. Jednakże żadne z nich nie doprowadziło do wyczerpującego uzasadnienia zwykłej mechaniki kwantowej przestrzeni Hilberta. Szczególnie podejście wykorzystujące kraty kwantowo-logiczne nie jest wystarczające do rekonstrukcji tej teorii.

W tym miejscu zacytowali oni książkę G. Kalmbacha *Miary i kraty Hilberta* z 1986 r. [22], uznając, jak się zdaje, że własność bycia przestrzenią Hilberta powinna być wprost założona. Problem powinien zostać ostatecznie wyjaśniony przez matematyków i logików. Jako fizyk sądzę, że występuje tu sytuacja podobna do tej, jaka panuje w mechanice klasycznej. Zasady mechaniki klasycznej zawierają się w logice Boole'a i w wypadku mechaniki kwantowej nie należy oczekiwać czegoś innego. Nie można uniknąć dodatkowych postulatów fizycznych. U podstaw teorii przestrzeni Hilberta leżą abstrakcyjne aksjomaty, a nie konkretne przedstawienia służące za model. Fizykom się zdaje, że każda kompletna teoria matematyczna i fizyczna powinna być aksjomatyczna, bo w przeciwnym wypadku nie wiemy, co w niej jest podstawowe i co można wywnioskować z prostszych założeń. Jednakże czasami pedantyczna aksjomatyzacja, zwłaszcza w fizyce, może być traktowana jako pewna uciążliwość lub kwestia elegancji matematycznej — nie zawsze pilnie koniecznej, wygodnej czy potrzebnej. Nie jesteśmy szewcami — powiedział Kant. Ale znane jest też stare angielskie powiedzenie autorstwa Thomasa Dekkera (ok. 1572—1632): „Dzielni szewcy — wszyscy oni to rycerze szlachetnego rzemiosła".

Jednakże z ogólnologicznego i lingwistycznego punktu widzenia aksjomatyzacja, aczkolwiek bardzo użyteczna, nie jest ani konieczna, ani wystarczająca do stworzenia pełnej teorii. Z punktu widzenia lingwistycznego, jak wiadomo, syntaktyka wymaga semantyki. Z kolei z punktu widzenia logicznego system aksjomatyczny wymaga modelu do sprawdzenia niesprzeczności i niezależności aksjomatów przez podanie interpretacji. Ta interpretacja może być dwuwartościowa dla teorii wielowartościowej, i na odwrót. (Np. H. Rasiowa udowodniła niezależność aksjomatów dwuwartościowego systemu Tarskiego—Bernaysa przy pomocy logiki wielowartościowej [42]; ogólne omówienie problemu por. [56, rozdz. 3].)

Chcielibyśmy dodać tu dwa komentarze. Po pierwsze: w istocie nie ma wyraźnej sprzeczności między koncepcją logiki wielowartościowej a koncepcją logiki niedystrybutywnej. Jammer stwierdził, że w logice modularnej występują tylko dwie wartości logiczne (dwuwartościowość), ponieważ operator projekcji na domkniętej podprzestrzeni a w przestrzeni H ma dwie wartości własne — 0 i 1. Jak wspominaliśmy, istnieje jednak możliwość nieskończenie wielu obrotów unitarnych tej podprzestrzeni wokół wektora O w przestrzeni Hilberta H, co daje inne pary wartości własnych. Oczywiście z powodu występowania niezmienniczości cechowania względem stałej (początkowej lub *absolutnej*) fazy reprezentacji stanu, obrócone podprzestrzenie można traktować również jako reprezentacje danego zdania. Kiedy jednak reprezentacja (tj. faza początkowa) zostanie ustalona jako pewna podprzestrzeń *a*, interpretowana jako stan własny znaleziony w wyniku pomiaru jakiejś wielkości obserwowalnej, to fazy względne między *a* i jej obróconymi podprzestrzeniami mają już znaczenie fizyczne (np. jako faza Berry'ego). Zatem zdania wyrażone przez wszystkie podprzestrzenie obrócone, z wyjątkiem tych podprzestrzeni, które są kompatybilne z *a*, tj. zdania wyrażone przez wszystkie przestrzenie położone «na ukos» od *a*, nie mogą być ani prawdziwe, ani fałszywe, lecz są «nieokreślone», gdy podprzestrzeń *a* została ustalona jako prawdziwa w danym pomiarze. Mogą one być prawdziwe lub fałszywe tylko wtedy, gdy zostanie dokonany inny specjalnie ukierunkowany pomiar — pomiar niekompatybilny z poprzednim (tj. gdy odpowiednie wielkości obserwowalne nie są wymienne). Innymi słowy, w *H* mamy niejako wiele niekompatybilnych logik dwuwartościowych, które razem tworzą jedną logikę nieskończenie wielowartościową, odpowiadającą modularnej logice Birkhoffa — von Neumanna. Z drugiej strony również zjawisko «skoku kwantowego» można traktować jako coś odpowiadającego «zmianie» wartości logicznej, jak to zasugerował Słupecki w swojej interpretacji trzeciej wartości logicznej Łukasiewicza. Ponieważ jednak w ogóle istnieje nieskończenie wiele różnych możliwości skoków kwantowych w systemie kwantowym, to również tutaj występuje w istocie nieskończenie wiele wartości logicznych. Dlatego też w zasadzie oba wspomniane podejścia logiczne do mechaniki kwantowej nie są sprzeczne ze sobą i oba są poprawne z fizykalnego punktu widzenia. Jednakże metoda krat jest o wiele szczegółowsza i ściślejsza, a ponadto wprowadza nowy algorytm algebraiczny, który, jak wykazał Kotas i inni, można rozwijać dalej. Rodzi się jednak pytanie, czy metoda ta jest wystarczająca do pełnego zrozumienia mechaniki kwantowej. Omówimy to zagadnienie później.

Przejdźmy do drugiego komentarza. Warunek wielowartościowości nie wystarcza do scharakteryzowania kwantowego charakteru logiki. Na przykład prawdopodobieństwo klasyczne (nie kwantowe) można zdefiniować przy pomocy jakiejś logiki nieskończenie wielowartościowej — ale niekwantowej (por. [55]), podczas gdy istotnie różniące się od niego — chociaż analogiczne — prawdopodobieństwo kwantowe można sformalizować przy pomocy nierównoważnej z poprzednią logiki nieskończenie wartościowej — ale kwantowej. Logiczne różnice między tymi dwoma wypadkami stanowią różnice między dystrybutywnością a modularnością (lub ortomodularnością).

2. MODALNOŚĆ KLASYCZNA (NIEKWANTOWA)

Modalność jest właśnie tym nowym pojęciem, które chcielibyśmy dodać do koncepcji logiki kwantowej służącej do interpretacji mechaniki kwantowej. Teorię modalności można porównać do wielu fragmentów gramatyki języka naturalnego. Stanowi ona niejako morfologię — czy nawet pragmatykę — logiki, jak to wyjaśnimy później. Innymi słowy, chcielibyśmy zbliżyć pojęcie logiki do koncepcji języka naturalnego. Modalność stanowi «koniugację» pojęć logicznych, czyniąc je — by tak rzec — bardziej elastycznymi, bardziej wyrafinowanymi i niejako bardziej kulturalnymi. W ten sposób próbujemy jakby opuścić podstawową szkołę tzw. logiki ekstensjonalnej i wstąpić do wyższej szkoły tzw. logiki modalnej czy intensjonalnej. Podejście to nie jest dla logików nowością. W istocie początki logiki modalnej sięgają czasów antycznych — prac Arystotelesa — ale rozwijała się ona raczej powoli aż do XX wieku, kiedy jej rozwój stał się bardzo intensywny, zwłaszcza w piątej i szóstej dekadzie — również w Polsce (polscy logicy — Jan Łukasiewicz, Alfred Tarski, Mordchaj Wajsberg, Jerzy Słupecki, Roman Suszko, Jerzy Łoś, Stanisław Jaśkowski, Jerzy Kotas, Jerzy Perzanowski i inni, oraz do pewnego stopnia również matematycy Helena Rasiowa i Roman Sikorski (por. [43]) — wnieśli pośrednio i bezpośrednio wkład w logikę modalną).

Na początek zdefiniujemy — nieformalnie i zwięźle — logikę modalną (niekwantową czyli dystrybutywną). *Modalność* (od łacińskiego słowa *modus* oznaczającego miarę, ilość, rytm, granicę, ograniczenie, koniec, metodę, sposób) w logice oznacza wartościowanie logiczne czegoś, wyrażanie stosunku do czegoś, o czym się mówi, opinię, ocenę lub oszacowanie czegoś z pewnego punktu widzenia przez kogoś, przez obserwatora lub przez urządzenie obserwujące. Jest to uogólnienie szacowania prawdziwości lub fałszywości zdania. Takim punktem widzenia może być np. prawda i prawdopodobieństwo, a zwłaszcza możliwość czy konieczność. Może to być również punkt widzenia obowiązku, wiedzy i przekonania, potencjalności i przyczynowości, czasu i przestrzeni, istnienia itd. Za G.H von Wrightem (1951 r.) i A.N. Priorem (1967 r.) rozróżnia się mniej lub bardziej sformalizowane gałęzie logiki modalnej:

— logika aletyczna — prawdy i prawdopodobieństwa;

— szczególna logika aletyczna, czyli logika modalna w węższym sensie — tylko prawdopodobieństwa i konieczności (historycznie biorąc, była to pierwsza forma logiki modalnej);

— logika deontyczna — obowiązku, zezwolenia, zakazu, a w przyszłości być może również grzechu, przestępstwa, uprzejmości, dobra i zła — zagadnień zazwyczaj należących do dziedziny etyki lub aksjologii;

— logika kauzalna — potencjalności i przyczynowości;

— logika epistemiczna — wiedzy, falsyfikacji, mierzalności;

— logika spacjalno-temporalna — przestrzeni i czasu;

— logika egzystencjalna — istnienia, ontologii, *modi existentia* (taka jak w filozofii Średniowiecza).

W językach naturalnych pewien rodzaj logiki modalnej tworzą kategorie gramatyczne zaimka osobowego, terminów relacji rodzinnych, wyrazów uprzejmości, czasowników modalnych (w języku angielskim zwanych *modals*: *can*, *could*, *may*, *might*, *will*, *would*, *shall*, *should*, *must*, *ought*, *need*), przysłówków modalnych, takich jak: *z pewnością*, *zapewne*, *chyba*, *być może*, *możliwie*, *prawdopodobnie* itd., trybów i odmian czasowych czasownika, odmian osobowych czasownika w języku polskim itd.

Ocena przestrzeni i czasu jako warunków prawdziwości może być uogólniona do dowolnego wskazywania lub odnoszenia się do osoby lub obserwatora, punktu odniesienia, okazjonalności, względności lub kontekstu użycia.

Pierwsza teoria modalności w węższym sensie miała charakter syntaktyczny. Została stworzona przez Clarence'a Irvinga Lewisa (1883—1964), który począwszy od 1918 r. podał pięć systemów aksjomatycznych — każdy kolejny coraz ogólniejszy — dla pojęć (funktorów) możliwości „◊" i konieczności „□": S1, S2, S3, S4, S5 [28, 10, 39]. Aksjomatyzacje te zostały następnie pogłębione przez ważne badania algebraiczne (z zastosowaniem w topologii) przez Alfreda Tarskiego [46] i J.C.C. McKinseya [31]. Drugą teorią modalności była semantyczna teoria Saula Kripkego, który w 1959 r. zdefiniował tzw. strukturę Kripkego: $\mathscr{K} = (G, K, Q, R)$, gdzie K oznacza zbiór możliwych światów zwany ***universum***, $G \in K$ oznacza świat realny, $Q \subseteq K$ oznacza zbiór światów anomalnych, a $R \subseteq K^2$ — relację binarną w K, która pozwala rozstrzygnąć, który z systemów aksjomatycznych Lewisa jest odpowiedni [10, 30, s. 328—330]. Najmłodszą i najogólniejszą teorią jest pragmatyczna teoria modalności stworzona w 1968 r. przez Richarda Montague (1930—1971) [38] i jego współpracowników Dana Scotta, Daniela Kaplana, M.J. Cresswella i ucznia Daniela Gallina [11] (por. również książki w języku polskim [47, 30]). Za punkt wyjścia posłużyła Montague klasyfikacja semiotyki (lingwistyki czy informatyki w sensie ogólnym) przeprowadzona przez Charlesa W. Morrisa (1938 r.). Montague napisał o tym tak [34, s. 95]:

> Badania nad językiem (tj. *semiosis* lub *semiotyka*) zostały podzielone w książce Morrisa na trzy gałęzie — syntaktykę, semantykę i pragmatykę. Można je scharakteryzować tak: syntaktyka zajmuje się wyłącznie relacjami między wyrażeniami językowymi, semantyka — relacjami między wyrażeniami a przedmiotami, do których się one odnoszą, pragmatyka — relacjami między wyrażeniami, przedmiotami, do których się one odnoszą, i użytkownikami kontekstów użycia tych wyrażeń.
>
> Syntaktyka była już znacznie rozwinięta w momencie, w którym pisał Morris, głównie przez Tarskiego, Gödla i członków grupy Hilberta [...]. Większość współczesnych prac z syntaktyki należy do jednej z poddziedzin: teorii dowodu lub do wciąż jeszcze prowizorycznej dziedziny lingwistyki matematycznej.
>
> Podwaliny semantyki zostały również w całości położone (Tarski w 1933 r.) w chwili pisania uwag przez Morrisa; od tamtej pory rozwinęła się ona najbardziej pod szyldem „teorii modeli".
>
> Jednakże w momencie pojawienia się monografii Morrisa, pragmatyka wciąż jeszcze była sprawą przyszłości. Bar-Hillel wyraził przypuszczenie (1954 r.), że przedmiotem badania pragmatyki jest to, co C.S. Peirce w minionym stuleciu nazwał „wyrażeniami wskaźnikowymi" (*indexical expressions*), tj. słowa i zdania, których odniesienia nie można określić bez wiedzy o kontekście użycia — takie np. jak „ja", „tutaj", zdania, w których użyto form czasowych. Wyrażenia te nazywa się też „deskrypcjami egocentrycznymi" (Russell), „wyrażeniami samozwrotnymi" (Reichenbach), „słowami wskazującymi" (Goodman), „zdaniami niewiecznymi" (Quine) [i — w Polsce — „okazjonalizmami"].

Od czasów Gottloba Fregego (1848—1945) logicy każde wyrażenie językowe (nazwę, predykat czy zdanie) ζ charakteryzują co do jego ekstensji (czyli denotacji czyli odniesienia Ext[ζ]) oraz jego intensji (konotacji czyli sensu). Podkreślmy istotną różnicę znaczeniową między słowem „intensja", związanym ze słowem „intensywny", znaczącym tyle, co „wysokiej jakości, wysokiego stopnia", a słowem „intencja", związanym ze słowem „intent", znaczącym tyle, co „zadanie, cel". Za Rudolfem Carnapem (1891—1970) intensję wyrażenia ζ — Int[ζ] — definiuje się przy pomocy równości:

(5) $\mathrm{Int}[\zeta](\mathrm{i}) = \mathrm{Ext}[\zeta, \mathrm{i}]$

gdzie $i \in I$ jest indeksem, czyli kontekstem użycia, a I zbiorem indeksów. Wyrażenia, dla których zależność od i jest istotna — tj. dla których zbiór I zawiera więcej niż jeden element — są nazywane *wskaźnikami* lub *wyrażeniami modalnymi*. Ekstensją nazwy (terminu) jest element zbioru lub klasy denotowany przez tę nazwę (element, do którego się ta nazwa odnosi), np. pies, liczba. Natomiast według Fregego ekstensją zdania jest wartość prawdziwościowa — 0 lub 1. (Jest to zwykłe uproszczenie ekstensjonalnego dwuwartościowego rachunku zdań, który jest wyraźnie niewystarczający w wypadku implikacji. W 1967 r. Roman Suszko, zainspirowany przez filozofię L. Wittgensteina [52] zinterpretowaną przez B. Wolniewicza [53] jako ontologia sytuacji, zaproponował logikę niefregowską, w której denotację zdania stanowi sytuacja — niem. „*Sachlage*" [45].) Wśród funktorów logicznych — a w szczególności funktorów zdaniotwórczych od zdań — można wyróżnić *funktory ekstensjonalne* zależne wyłącznie od wartości prawdziwościowych swoich argumentów, 0 i 1, czyli wyłącznie od swoich ekstensji, oraz *funktory intensjonalne*, czyli *funktory modalne*, zależące również od swoich intensji (treści, sensu). Funktorami ekstensjonalnymi są np. zwykłe spójniki klasycznego dwuwartościowego rachunku zdań, takie jak „$\neg$" — „nie" (negacja), „$\vee$" = „lub" (suma, alternatywa), „$\wedge$" = „i" (iloczyn, koniunkcja). Przykładem funktorów modalnych są: „$\Diamond$" (oznaczane również przez „*M*" lub „*P*") = „jest możliwe, że", „$\Box$" („*L*" lub „*N*") = „jest konieczne, że", a także „jestem przekonany, że", „wiem, że" itp. Funktory „$\Diamond$" i „$\Box$" są ze sobą wzajemnie związane przez relacje:

(6) $\Box p \equiv \neg \Diamond \neg p, \quad \Diamond p \equiv \neg \Box \neg p$

Funktory ekstensjonalne mogą być z punktu widzenia zwykłej logiki Boole'a potraktowane jako *logika ekstensjonalna*, ale funktory modalne w ogóle nie występują w logice boole'owskiej i wymagają nieklasycznej logiki wielowartościowej, takiej jak *logika intensjonalna* czy *logika modalna*. Nie jest to łatwo dostrzec przy tradycyjnej metodzie aksjomatycznej rozwijania rachunku zdań, w przeciwieństwie do tak zwanej metody macierzowej (macierzy wartości logicznych uogólniających macierze prawdziwościowe) definiowania funktorów zdaniotwórczych i sprawdzania twierdzeń o nich. Na przykład w wypadku funktorów możliwości i konieczności zdefiniowanych przez systemy aksjomatyczne S4 i S5 [10, 43 rozdz. XI] potrzebna jest jakaś logika nieskończenie wielowartościowa. Oczywiście, że dzięki wprowadzeniu wielu wartości logicznych można dokonać uogólnienia pojęcia funktorów istotnie ekstensjonalnych, a funktory modalne — traktować jako ekstensjonalne w tym uogólnionym słabszym sensie (można by je nazwać np. *semi-ekstensjonalnym*). Łukasiewicz w ten sposób zdefiniował wiele 3- i 4-wartościowych modalności. Wraz z rosnącą liczbą wartości logicznych problem znacznie się komplikuje, chociaż wiele intuicji teoretycznych sprecyzowali Słupecki, Łoś i inni.

Jeśli modalność dotyczy nie zdania, a przedmiotu, osoby lub działania, tj. jeśli należy do języka przedmiotowego, a nie do metajęzyka, to — zgodnie z terminologią średniowieczną — nazywa się ją *modalitas de re*. Na przykład: „Ta funkcja stanowi możliwe rozwiązanie", „Jest on prawdopodobnym kandydatem", „Sherlock Holmes mógł żyć w Londynie". Jeśli natomiast modalność dotyczy zdania, czyli — innymi słowy — jeśli należy do metajęzyka, jak np. w zdaniach „Jest możliwe, że ta funkcja stanowi rozwiązanie" lub, „Jest prawdopodobne, że on jest kandydatem", „Jest możliwe, że Sherlock Holmes mieszkał w Londynie", to zgodnie z tradycją nazywa się ją *modalitas de dicto*.

3. MODALNOŚĆ KWANTOWA

To, co dotychczas powiedzieliśmy o modalności, było częścią logiki niekwantowej, aczkolwiek — wielowartościowej. Ogólna kwantowa logika modalna nie jest jeszcze dokładnie opracowana; wyjątek stanowią pojęcia modalności szczególnych, prawdopodobieństwa i konieczności. Ten ostatni problem został rozwiązany przez wspomnianego holendersko-amerykańskiego filozofa i fizyka Basa V. van Fraassena (obecnie Uniwersytet Princeton, N.J.). Pierwszy pomysł przedstawił on w 1981 r. [48], a później rozwinął go w latach 1990 i 1991 [50]. Zwięzła prezentacja jego szczególnej interpretacji modalnej znajduje się w cytowanej książce Busha—Lahtiego—Mittelstadta [5, s. 118—122]. Autorzy tej książki opisują koncepcję van Fraassena tak:

> Dalsza interpretacja mechaniki kwantowej, która wychodzi poza interpretację minimalną, ale w której zarazem unika się problemu uprzedmiotowienia — jest to modalna interpretacja mechaniki kwantowej stworzona przez van Fraassena (1981, 1990). W ramach tej interpretacji mechanikę kwantową traktuje się jako czystą teorię tego, co możliwe, ze sprawdzalnymi, empirycznymi implikacjami tego, co się rzeczywiście zdarza.

Tutaj przez problem uprzedmiotowienia rozumie się pytanie, czy każdy pomiar kwantowy powinien prowadzić do określonego ostrego wyniku (por. [5, s. 33]). Jak wiadomo, pomiar uogólnionej wielkości obserwowalnej (obserwabli) (pomiar POV) w ogólnym wypadku daje wynik nieostry (np. jednoczesny pomiar momentu i pozycji cząsteczki w stanie Heisenberga z minimalną niepewnością pozycji i momentu). Dlatego problem uprzedmiotowienia jest negowany lub się go unika. „Minimalna interpretacja" jest zdefiniowana następująco [5, s. 11]:

Liczba $E_T(X) = tr[TE(X)]$ jest prawdopodobieństwem tego, że pomiar wielkości obserwowalnej [jako pomiar PV lub POV] E, dokonany na systemie S będącym w stanie T, prowadzi do wyniku w zbiorze X [np. $X \in B(R)$ w borelowskiej rzeczywistej przestrzeni pomiarów $(R, B(R))$].

W celu pokazania jeszcze jednego fundamentalnego założenia poczynionego przez van Fraassena (dla prostoty pominiemy jego dalsze założenia) odwołajmy się również do cytowanej książki [5, s.119]:

Rozpatrzmy system fizyczny S, i niech E oraz T będą odpowiednio jakimikolwiek wielkościami obserwowalnymi i stanami. W interpretacji modalnej rozróżnia się dwa typy zdań: *zdania przypisujące wartość*, głoszące, że wielkość obserwowalna E ma wartość X, co się oznacza jako (E, X) — oraz *zdania przypisujące stany*, głoszące, że pomiar E prowadzi do rezultatu w X, co się oznacza jako $[E, X]$. Zgodnie z interpretacją minimalną interpretacja stanu T czyni zdanie przypisujące stan $[E, X]$ prawdziwym, jeśli $E_T(X) = 1$. Sednem tej interpretacji jest charakterystyka prawdziwości zdania przypisującego wartość, czyli podanie odpowiedzi na pytanie, które zdania przypisujące wartości (E, X) są prawdą w danym stanie T. Prawdziwość (E, X) nie będzie identyfikowana z prawdziwością $[E, X]$. Aby to wyjaśnić, potrzebna jest następująca definicja: stan T' jest *możliwy w stosunku do* T (van Fraassen oznacza tę relację przez TRT') zawsze i tylko wtedy, gdy jeśli dla każdego operatora projekcji P $tr[TP] = 1$, to $tr[T'P] = 1$. W ten sposób stan wektorowy $P[\varphi]$ jest możliwy w stosunku do T dokładnie, gdy φ jest w przeciwdziedzinie T. W szczególności, jeśli $P[\varphi]$ występuje w dekompozycji T, $P[\varphi]$ jest możliwy w stosunku do T [...]. Wobec tego modalna interpretacja rozpoczyna się od przyjęcia następującego postulatu:

(P) *Przy założeniu, że system S znajduje się w stanie T, istnieje pewien czysty stan $P[\varphi]$, który jest możliwy względem T, i zarazem taki, że dla wszystkich wielkości obserwowalnych E związanych z S:*

(a) *zdanie przypisujące stan $[E, X]$ jest prawdziwe zawsze i tylko wtedy, gdy T czyni je prawdziwym;*

(b) *zdanie przypisujące wartość (E, X) jest prawdziwe zawsze i tylko wtedy, gdy $P[\varphi]$ czyni $[E, X]$ prawdziwym.*

Mamy tu jedynie definicję względnej możliwości R według interpretacji van Fraassena. Teraz podamy jego ogólną definicję funktora konieczności „□" oraz funktora możliwości „◊" przy pomocy relacji R. Van Fraassen nazwał te funktory *operatorami modalnymi* i zdefiniował je w swojej książce w sposób następujący (D12, s. 314):

Jeśli q jest jakimś zdaniem, to

(7) $\Box q = \{w : \text{dla wszelkiego } w', \text{jeśli } wRw' \text{ to } w' \in q\}$,

(8) $\Diamond q = \{w : \text{dla pewnego } w', \text{jeśli } wRw' \text{ to } w' \in q\}$.

Przypominamy, że zdania lub zdarzenia, lub przestrzenie odwzorowań — przeciwdziedziny — lub operatory stanów mieszanych są przedstawiane jako domknięte podprzestrzenie H; jeśli operator stanu T posiada przestrzeń obrazów x, a operator T' — przestrzeń obrazów y, to TRT' lub xRy odpowiada $y \subseteq x$.

Z braku miejsca zrezygnujemy z dalszego rozwinięcia szczególnej interpretacji modalnej van Fraassena. Naszym zdaniem stanowi ona ważny przyczynek do zrozumienia mechaniki kwantowej. Zapoczątkowała ona pojawienie się wielu prac na ten temat (artykuły Lahtiego, Cassinelliego i innych), aczkolwiek wciąż jeszcze jest ich mało jak na wagę zagadnienia. Przyczyną tego stanu rzeczy jest chyba to, że omawiana modalność stanowi tylko modalność szczególną, podczas gdy ogólne pojęcie modalności nie jest jeszcze dostatecznie znane ani wśród fizyków, ani również wśród filozofów. Chcielibyśmy zaproponować uogólnienie tej interpretacji i wskazać jej związki z fizyką klasyczną, w której w istocie wykorzystywano nieświadomie tę modalność od czasów antycznych. Przyczyna tego jest jasna: modalność to część ludzkiego języka i bez niej nie jesteśmy w stanie rozumieć świata i nas samych, «rzuconych» w ten świat. Jednakże filozofia i kultura Zachodu — w przeciwieństwie do kultury i filozofii Dalekiego Wschodu: Indii, Chin i Japonii — skupia się bardziej na ostrości, kategoryczności, absolutności i nie wykazuje dostatecznego wyczucia modalności: rozmytości, odcieni i względności.

4. MODALNA INTERPRETACJA MECHANIKI KLASYCZNEJ I KWANTOWEJ

Problem modalności w fizyce — klasycznej i kwantowej — został zwięźle omówiony przeze mnie we wstępie do wydanej w 1997 r. książki, napisanej z Kossakowskim i Ohyą [16], oraz w wykładzie na VI Polskim Zjeździe Filozoficznym w Toruniu w 1995 r. [17]. Zostałem w tym zainspirowany przez badania nad językiem japońskim oraz przez filozofię Dalekiego Wschodu, z którą zetknąłem się w czasie wielokrotnego pobytu w Japonii w charakterze *visiting professor*. W istocie język japoński jest chyba wśród wszystkich języków najbogatszy w modalne wyrażenia i modalne formy gramatyczne. Jest to język odznaczający się wieloma stylami mówienia i pisania, licznymi stopniami uprzejmości — język o dużym bogactwie odcieni znaczeniowych. W filozofii buddyjskiej i dżainistycznej rozróżnia się dwa spojrzenia filozoficzne na rzeczywistość: *substancjalne* (w sanskrycie *dravyarthika naya*), reprezentowane np. przez hinduistyczną Wedantę, a w Europie przez arystotelizm, oraz modalne (*paryayarthika naya*), reprezentowane przez filozofię buddyjską «drogi pośredniej» (*madhyama pratipad*) — system *madhyamika* stworzony przede wszystkim przez hinduskiego filozofa Nagarjunę (II—III wiek) (por. [36]). Ten punkt widzenia ma związek z buddyjskim rozumieniem pustki, próżni, *nirwany*, o której Nagao — jeden ze współczesnych filozofów buddyjskich z Japonii — powiedział:

> Pustka [...] nie jest po prostu nicością. W sposób konieczny i bezpośredni stanowi ona również bycie współzależnego i równoczesnego powstawania [37, s. 4].

„Współzależne i równoczesne powstawanie" (w sanskrycie *pratotya-samutpada*) rozumie się tutaj jako tzw. *samsarę* czyli fenomenalny świat doświadczenia. Nie można orzec o świecie ani że istnieje, ani że nie istnieje, gdyż świat istnieje tylko potencjalnie, wirtualnie — odznacza się prawdopodobieństwem czy dyspozycją do istnienia. Wszystkie te stare koncepcje są — jak się zdaje — bardzo podobne do koncepcji współczesnej fizyki kwantowej. Problem stanowi jedynie wyrażenie ich w języku matematyki. Już samo pojęcie *wyrażenia matematycznego* nasuwa problem, czy pojęcia modalne, np. coś tak nieostrego, jak kwantowy nieklasyczny «przedmiot nieostry», można opisać przy pomocy modelu stworzonego w ramach dwuwartościowej logiki boole'owskiej. Oczywiście można to zrobić, a przykładem jest przedstawienie «amplitud prawdopodobieństwa» w przestrzeniach Hilberta. Tego odkrycia dokonali Born i Heisenberg w latach dwudziestych. Zamiast dwóch wartości logicznych logiki klasycznej występowało tam — jak się zdaje — nieskończenie wiele nowych wartości rzeczywistych dodatnich i znormalizowanych prawdopodobieństw lub kompleksowych amplitud prawdopodobieństwa. Podejście, w którym mówi się o zespolonych czy ewentualnie kwaternionowych «amplitudach» prawdopodobieństwa, proponuję nazywać *submodalnością*, ponieważ mówi się tu jak gdyby o nierzeczywistych «korzeniach» x prawdopodobieństwa p, w tym znaczeniu, że $p = \bar{x}x$, gdzie $\bar{x}$ jest liczbą sprzężoną (x-zespolone) z x. Jednakże jeśli mówimy o prawdzie w mechanice kwantowej lub w teorii pola — czyli nie o rzeczywistości, lecz o zdaniach mówiących coś o rzeczywistości, wykorzystując logikę drugiego lub wyższego rzędu — tj. jeśli mówimy w metajęzyku (tak jak we wspomnianej krytyce Margenau) — to możemy używać terminu *supermodalność*. Ta nowa modalność może być modalnością zerową, tj. granicznym językiem kategorialnym dwuwartościowej logiki Boole'a albo wielowartościową modalnością właściwą. Procedura ta jest zasadniczo powtarzalna. Jak wiadomo, rozróżnianie typów (rzędów) wyrażeń jest konieczne do uniknięcia antynomii (por. np. [35, rozdz. VIII]). Sądzę, że wektory kompletnej bazy ortonormalnej zespolonej ośrodkowej przestrzeni Hilberta mechaniki kwantowej (wektory te odpowiadają atomom w kracie kwantowej) można bezpośrednio traktować jako uogólnione wartości logiczne tej submodalnej logiki kwantowej. Są one zespolone, ale zawierają się w jednostkowej kuli Hilberta, ponieważ wektory stanu czystego są znormalizowane do 1. Tylko przy operacjach liniowych możemy czasami wykroczyć poza kulę jednostkową, ale w końcu musimy i tak trafić do jej wnętrza. Wśród operatorów liniowych przestrzeni Hilberta H tylko efekty i pomiary POV skonstruowane przez nie jako uogólnione wielkości obserwowalne — oraz jako operatory prawdopodobieństwa (gęstości) przypadków szczególnych występujące jako stany czyste i mieszane, wraz ze szczególnymi operatorami modalnymi van Fraassena — posiadają znaczenie *fizykalne* i mogą być nazwane *ogólnymi operatorami modalnymi*. Pamiętając, że efekty E są zdefiniowane jako operatory przy pomocy warunku:

$$(9) \qquad O \leq E \leq I,$$

dostrzegamy, że warunek ten stanowi kwantowy odpowiednik i uogólnienie klasycznego warunku nałożonego na prawdopodobieństwo $O \leq E \leq 1$ z nieskończoną liczbą wartości w przedziale rzeczywistym $[0,1]$. Prawdopodobieństwo kwantowe i modalność kwantowa są jednak o wiele ogólniejsze i mocniejsze niż prawdopodobieństwo i modalność klasyczna. W obu wypadkach prawdopodobieństwo jest najważniejszą i najogólniejszą spośród modalności. Wspomniane modalności kwantowe posiadają w charakterze argumentów jeden wektor, ale w zasadzie można rozpatrywać również operatory wieloargumentowe. Jest to uogólnienie daleko idące, ale moim zdaniem współczesna fizyka zmusza nas do tego. Oczywiście problem ten wymaga dalszych badań z punktu widzenia logicznego — dokładniej: z punktu widzenia logiki semi-ekstensjonalnej.

Jednakże nie tylko fizyka kwantowa wymaga modalności. W istocie pojęć modalnych używano w fizyce — jak wspomniałem — już od czasów antycznych. Mianowicie przyczynowość stanowi rodzaj konieczności, a potencjalność i prawdopodobieństwo stanowią rodzaje lub uogólnienia możliwości. Również pojęcie *energii zawierającej energię potencjalną* stanowi pojęcie modalne, podpadające pod pojęcie *możliwości*, ponieważ nie jest ona pracą, lecz możliwością pracy (przykłady i dalsze omówienie por. również [17]). Jednakże, jak się zdaje, pojęciem dla całej fizyki najważniejszym jest pojęcie *względności*, np. względność w stosunku do czasoprzestrzennego układu odniesienia i — mówiąc ogólnie — rola obserwatora w teorii względności i mechanice kwantowej, jako przykłady i uogólnienie pojęcia indeksu i wyrażeń modalnych w sensie Peirce'a—Bar-Hillela—Carnapa—Montague. Istotne jest to, że wszelkie pomiary fizyczne mają układ odniesienia, urządzenie pomiarowe i otoczenie jako «kontekst użycia». W zasadzie wszystkie one zawsze dokonują się w systemie otwartym, który znajduje się w słabszym lub mocniejszym oddziaływaniu wzajemnym z systemie mierzonym, nawet jeśli ten ostatni jest odizolowany energetycznie czy informacyjnie (w entropii, np. termicznie) (por. [16]). Również w fizyce klasycznej występuje problem nieostrych wyników pomiarów, ale dopiero w fizyce kwantowej problem ten staje się newralgiczny i nie daje się zredukować do kwestii niedostatku wiedzy, pomyłki czy aproksymacji (por. [4]). Pojęcie zbiorów rozmytych zostało wprowadzone do matematyki niezależnie przez K. Mengera w 1951 r. [32] i L.A. Zadeha w 1965 r. [54] na podstawie czysto klasycznych przesłanek, a mianowicie z powodu występowania nieostrych pojęć w języku naturalnym. Tylko do 1984 r. opublikowano 2400 artykułów na temat teorii zbiorów rozmytych (por. [23, 9]). Nowe oblicze tej teorii powstało w wyniku zastosowania jej przez S. Bugajskiego do teorii prawdopodobieństwa i fizyki kwantowej (por. np. [3]). Można zauważyć, że w kwantowej teorii ciśnieniowego poszerzania linii spektralnych Aleksandra Jabłońskiego z lat trzydziestych i czterdziestych [18, 19], wykorzystano koncepcję statystyki linii spektralnych — tj. statystycznych hamiltonianów — jako teorię statystyczną drugiego rzędu, statystykę statystyki, supermodalności, aczkolwiek ten zasadniczy punkt widzenia nie został przez Jabłońskiego osobno opracowany. W literaturze przedmiotu istnieją już pewne opracowania tego zagadnienia, ale — jak się zdaje — pożądane są dalsze badania w tym kierunku.

Zauważmy jednak, że fizyka kwantowa nie zawsze prowadzi do rozmytości. Na przykład Niels Bohr zarzucił swoją błędną koncepcję, według której prawo zachowania energii i pędu nie miało się jakoby spełniać w mechanice kwantowej w sposób ostry, lecz tylko w przybliżeniu, statystycznie. W rzeczywistości, prawa te zachowują się ściśle (w systemie izolowanym), i to w sposób konieczny, tj. jako szczególna modalność. (Również entropia-informacja są ściśle zachowane w systemie izolowanym.)

Jest wielce prawdopodobne, że w teorii procesu powstawania par cząstek masowych w próżni wokół czarnych dziur właśnie te prawa zachowania umożliwią wyjaśnienie siły odpychającej, która powoduje rozszerzanie się wszechświata i stanowi równowagę dla przyciągającej siły grawitacji. Być może ten efekt kwantowy pomoże w wyjaśnieniu nie tylko promieniowania Hawkinga, lecz również ciśnienia spowodowanego tym promieniowaniem i wartości stałej kosmicznej Λ Einsteina, którą niedawno ponownie wprowadzono do kosmologii relatywistycznej.

Na koniec chciałbym wyrazić nadzieję, że u schyłku bieżącego stulecia modalny punkt widzenia może być użyteczny do przezwyciężania istniejących trudności w interpretacji i rozumieniu mechaniki kwantowej.

PODZIĘKOWANIA

Pragnę podziękować serdecznie Profesorowi Rudolfowi Haagowi za interesującą dyskusję na temat fizykalnych aspektów niniejszego referatu po jego wygłoszeniu na XII Sympozjum poświęconym Bornowi we Wrocławiu 23 września 1998 r., oraz Profesorowi Jerzemu Perzanowskiemu za szczegółową dyskusję, która odbyła się później w Toruniu, i za jego liczne uwagi dotyczące logicznych i filozoficznych aspektów niniejszego tekstu.*

Przełożył Jerzy Pluta

BIBLIOGRAFIA

[1] Belavkin, V.P., „Nondemolition principle of quantum measurement theory", *Foundation of Physics* 24(1994), 687—714

[2] Beltrametti, E. i G. Cassinelli, *The logic of quantum mechanics*, Addison—Wesley, Reading, Mass. 1981

[3] Bugajski, S., „Fundamentals of fuzzy probability theory", *International Journal of Theoretical Physics* 35(1996), 2229—2244

[4] Bush, P. i P.J. Lahti, „Some remarks on unsharp quantum measurements, quantum non-demolition, and all that", *Annalen der Physik* 47(1990), 369—382

[5] Bush, P. i P.J. Lahti, P. Mittelstaedt, *The quantum theory of measurement*, Springer, Berlin 1991

[6] Bush, P., M. Grabowski i P.J. Lahti, *Operational quantum physics*, 2nd ed., Springer, Berlin 1997

[7] Davies, E.B., *Quantum theory of open systems*, Academic Press, London 1976

---

* Tekst jest autoryzowanym przekładem artykułu „Modal interpretation of quantum mechanics and classical physical theories", którego oryginał ukazał się w *Lecture Notes in Physics*, vol. 539, Berlin 2000, Springer, s. 32—51. Dziękujemy bardzo Springer-Verlag za uprzejmą zgodę na publikację przekładu.

[8] Davies, N., *Europa. Rozprawa historyka z historią* [przekład z angielskiego — E. Tabakowska], Znak, Kraków 1998

[9] Drewniak, J., *Podstawy teorii zbiorów rozmytych*, UŚ, Katowice 1984

[10] Fays, R., *Modal logic*, Gauthier-Villars, Paris 1965

[11] Gallin, D., *Intensional and higher order modal logic*, North-Holland, Amsterdam 1975

[12] Grabowski, M., *Miary półspektralne w nierelatywistycznej mechanice kwantowej*, UMK, Toruń 1990

[13] Holevo, A.S., *Probabilistic and statistical aspects of quantum theory*, North-Holland, Amsterdam 1982

[14] Horodecki, R., *Correlation and information-theoretic aspects of quantum nonseparability of mixed states*, UG, Gdańsk 1996

[15] Ingarden, R.S., A. Kossakowski, „An axiomatic definition of information in quantum mechanics", *Bull. Acad. Polon. Sci. Sér. Math. Astron. Phys.* **16**(1968), 61—65

[16] Ingarden, R.S., A. Kossakowski i M. Ohya, *Information dynamics and open systems. Classical and quantum approach*, Kluwer, Dordrecht 1997

[17] Ingarden, R.S., „Modalność w fizyce i językoznawstwie", [w:] J. Perzanowski i A. Pietruszczak, *Byt. Logos. Matematyka. FLFL 1995*, UMK, Toruń 1997, 63—70

[18] Jabłoński, A., „Über die wellenmechanische Behandlung der Linienverbreitung", *Acta Physica Polonica* **6**(1937), 371—391

[19] Jabłoński, A., „General theory of pressure broadening of spectral lines", *Physical Review* **68**(1945), 78—93

[20] Jammer, M., *The philosophy of quantum mechanics. The interpretation of quantum mechanics in historical perspective*, Wiley—Interscience, New York 1977

[21] Jauch, J.M., *Foundation of quantum mechanics*, Addison—Wesely, Reading, Mass. 1968

[22] Kalmbach, G., *Measures and Hilbert lattices*, World Scientific, Singapore 1986

[23] Kaufmann, A., *Theory of fuzzy sets*, Masson, Paris 1972

[24] Kossakowski, A., „On quantum statistical mechanics of non-Hamiltonian systems", *Reports on Mathematical Physics* **3**(1972), 247—274

[25] Kotas, J., „An axiom system for the modular logic", *Studia Logica* **21**(1967), 17—38

[26] Kotas, J. „The modular logic as a calculus of logical schemata", *Studia Logica* **27**(1971), 73—79

[27] Kraus, K., *States, effects and operations*, Springer, Berlin 1983

[28] Lewis, C.I. i C.H. Lanford, *Symbolic logic*, Dover, New York 1931 [nowe wydanie z „Appedix III" 1959]

[29] Ludwig, G., *Foundations of quantum mechanics I*, Springer, New York 1983

[30] Marciszewski, W. (red.), *Logika formalna. Zarys encyklopedyczny z zastosowaniem do informatyki i lingwistyki*, PWN, Warszawa 1987

[31] McKinsey, J.C.C., „A solution of the decision problem for the Lewis system S2 and S4 with an application to topology", *Journal of Symbolic Logic* **6**(1941), 117—134

[32] Menger, K., „Ensembles flous et fonctions aléatoires", *C. R. Acad. Sci. Paris* **232**(1951), 2001—2003

[33] Mittelstaedt, P., *Quantum logic*, Reidel, Dordrecht 1978

[34] Montague, R., *Formal philosophy* [wybór pism opracowany przez — R.H. Thomasson], Yale University Press, New Haven 1974 [3 wydanie — 1979]

[35] Mostowski, A., *Logika matematyczna*, UW, Warszawa 1948

[36] Murti, T.R.V., *The central philosophy of buddhism. A study of the Madhyamika system*, Unwin, London 1987

[37] Nagao, G., *The foundamental standpoint of Madhyamika philosophy* [przekład z japońskiego przez — J.P. Keenan], State University of New York., Albany, NY 1989

[38] Ohya, M., D. Petz, *Quantum entropy and its use*, Springer, Berlin 1993

[39] Perzanowski, J., „Logiki modalne a filozofia", [w:] J. Perzanowski (red.), *Jak filozofować? Studia z metodologii filozofii*, PWN, Warszawa 1989

[40] Piron, C., „Survay of general quantum physics", *Foundations of physics* **2**(1972), 287—314; [przedrukowane w:] C. Hooker (red.), *The logico-algebraic approach to quantum mechanics*, Reidel, Dordrecht 1975, 513—544

[41] Piron, C., *Foundations of quantum physics*, Benjamin, Reading, Mass. 1976

[42] Rasiowa, H., „O pewnym fragmencie implikacyjnego rachunku zdań", *Studia Logica* **3**(1955), 208—226

[43] Rasiowa, H. i R. Sikorski, *The mathematics of metamathematics*, 3 wydanie, PWN, Warszawa 1970

[44] Staszewski, P., *Quantum mechanics of continuously observed systems*, UMK, Toruń 1993

[45] Suszko, T., „Ontology in *Tractatus* of L. Wittgenstein", *Notre Dame Journal of Formal Logic* **9**, 7—33; [po polsku w:] R. Suszko, *Wybór pism*, Polskie Towarzystwo Semiotyczne, Warszawa 1998, 196—224

[46] Tarski, A., „Der Aussagenkalkül und die Topologie", *Fundamenta Mathematica* **25**, 103—134

[47] Tokarz, M., *Elementy pragmatyki logicznej*, PWN, Warszawa 1993

[48] van Fraassen., B.C., „A modal interpretation of quantum mechanics", [w:] E. Beltrametti i B.C. van Fraassen (red.), *Current issues in quantum logic*, Plenum, New York 1981, 229—258

[49] van Fraassen, B.C., „The modal interpretation of quantum mechanics", [w:] P. Lahti i P. Mittelstaedt (red.), *Symposium on the foundations of modern physics. Joensuu 1990*, World Scientific, Singapore 1991, 440—460

[50] van Fraassen, B.C., *Quantum mechanics: en empiricist view*, Clarendon, Oxford 1991

[51] Varadarajan, V.S., *Geometry of quantum theory*, 2nd ed., Springer, New York 1985

[52] Wittgenstein, L., *Tractatus logico-philosophicus* [tekst niemiecki i przekład angielski przez — D.F. Pears i B.F. McGuinness], Routledge & Kogan Paul, Longon 1961

[53] Wolniewicz, B., *Rzeczy i fakty. Wstęp do pierwszej filozofii Wittgensteina*, PWN, Warszawa 1968

[54] Zadeh, L.A., „Fuzzy sets", *Information and Control* **8**(1965), 338—353

[55] Zawirski, Z., „Über das Verhältnis der mehrwertigen Logik zur Wahrscheinlichkeitsrechnung", *Studia Philosophica* **1**(1935), 407—442

[56] Zinowiew, A., *Filozoficzne problemy logiki wielowartościowej* [przekład z rosyjskiego — J. Jaroń], PWN, Warszawa 1963