

Katarzyna Kuś, Marek Kuś

Interpretacja mechaniki kwantowej Everetta w świetle realizmu modalnego Lewisa i semantyki Kripkego

Słowa kluczowe: Hugh III Everett, mechanika kwantowa, pomiar kwantowy, logika modalna, semantyka światów możliwych, możliwość, realizm modalny

Kompletna teoria modalności powinna odpowiadać na dwa podstawowe pytania ontologiczne – co, jeśli w ogóle coś, sprawia, że twierdzenia dotyczące możliwości i konieczności są prawdziwe – i epistemologiczne – w jaki sposób, jeżeli w ogóle, zdobywamy wiedzę na temat możliwości i konieczności. Realizm modalny Davida Lewisa jest teorią, która ma za zadanie dobrze sobie radzić przynajmniej ze znaczną częścią tych problemów. Zgodnie z nią można bowiem w sposób odpowiedzialny używać pojęć modalnych, ponieważ odnoszą się one do realnie istniejących światów i zdają sprawę ze stanów rzeczy w nich zachodzących. Lewisowskie uniwersum wszystkich światów ma pewną strukturę, która być może jest opisywalna przez pewien system logiki. Jeżeli uda się wypracować takie rozumienie operatorów modalnych, które odpowiada rzeczywistym relacjom między światami, to możliwe jest skonstruowanie systemu, który opisuje pod wyróżnionym względem uniwersum światów.

W 1957 roku Hugh Everett zaproponował konkurencyjną do standardowej wieloświatową interpretację mechaniki kwantowej. Zgodnie z nią wszystkie przewidziane przez mechanikę kwantową możliwe wyniki są równocześnie realizowane w trakcie pomiaru – każdy w jednym niezależnym równoległym świecie. Everett nie wprowadzał przy tym żadnego nowego założenia do samej mechaniki kwantowej, lecz usuwał postulat redukcji paczki falowej w procesie pomiaru.

To, że „wiele światów” pojawia się w interpretacji Everetta, może, ale nie musi, oznaczać, iż ma ona związek z ontologicznymi i semantycznymi koncep-

cjami dotyczącymi modalności. Celem niniejszej pracy jest pokazanie, na czym polegają analogie między koncepcją Everetta a realizmem modalnym Lewisa. Wieloświatowa interpretacja mechaniki kwantowej z pewnego punktu widzenia może bowiem dostarczać wyjaśnienia, czym jest możliwość fizyczna, zapewniając jednocześnie znaturalizowaną koncepcję światów możliwych.

Do przedstawionej interpretacji mechaniki kwantowej można zastosować pewną wersję semantyki Kripkego. Pokażemy, że światy Everetta mogą stanowić podstawę ontologii „światów możliwych” i podamy interpretację zachodzącą między światami relacji dostępności, która decyduje o sposobie rozumienia modalności. Pozwoli to na określenie systemu logiki modalnej, któremu konstrukcja Everetta odpowiada.

I. Interpretacja von Neumanna-Diraca mechaniki kwantowej

1. Funkcja falowa

Zgodnie z kopenhaską interpretacją mechaniki kwantowej cała informacja o układzie kwantowym (np. pojedynczej cząstce lub układzie cząstek) zawarta jest w zespolonej funkcji falowej. Sama funkcja falowa nie ma bezpośredniego sensu fizycznego, dopiero kwadrat jej wartości absolutnej interpretujemy jako gęstość prawdopodobieństwa (np. znalezienia cząstki w danym obszarze przestrzeni). W szczególności, za pomocą funkcji falowej można ustalić prawdopodobieństwa wyników dokonywanych na układzie pomiarów wszelkich własności fizycznych.

Funkcja falowa jest elementem (nieskończenie wymiarowej) przestrzeni Hilberta¹. W dalszej części ograniczymy się do układów opisywanych za pomocą wektorów o skończonej liczbie składowych. Jest to uproszczenie, gdyż funkcja falowa przyjmuje taką postać tylko wówczas, gdy stosujemy ją do opisu pewnych szczególnych własności układów kwantowych (np. spinu), jednak nie wpływa to na przedstawione w tej pracy rezultaty.

2. Równanie Schrödingera

Prawa mechaniki kwantowej pozwalają określić, jak funkcja falowa (tzn. jej składowe $c_1, \dots, c_n$) zmienia się w czasie pod wpływem oddziaływań układu z otoczeniem i/lub między jego częściami. Zmiana funkcji falowej w czasie opisywana jest równaniem Schrödingera:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = H\psi,$$

¹ Precyzyjniej mówiąc, stan układu kwantowego jest jedno-jednoznacznie określony przez punkt w odpowiedniej przestrzeni rzutowej, nie ma to jednak znaczenia dla dalszych rozważań.

gdzie H jest macierzą o wymiarach $n \times n$ zależną od rozważanego układu fizycznego. Rozwiązaniem równania Schrödingera, pozwalającym na znalezienie $\psi(t)$ (wartości funkcji falowej w chwili t), jeśli znane jest $\psi(0)$, jest:

$$\psi(t) = U\psi(0), \quad (1)$$

gdzie U jest pewną zespoloną macierzą kwadratową. Z praw mechaniki kwantowej wynika, że jeśli układ jest izolowany od otoczenia, to macierz U jest unitarna²,

$$UU^\dagger = U^\dagger U = I,$$

gdzie I oznacza macierz jednostkową (operator tożsamościowy). W konsekwencji w czasie ewolucji iloczyn skalarny dwóch funkcji falowych

$$\psi(t) = \begin{bmatrix} c_1(t) \\ \vdots \\ c_n(t) \end{bmatrix}, \quad \varphi(t) = \begin{bmatrix} d_1(t) \\ \vdots \\ d_n(t) \end{bmatrix}$$

nie zależy od czasu, tzn.

$$\overline{c}_1(t)d_1(t) + \dots + \overline{c}_n(t)d_n(t) = \overline{c}_1(0)d_1(0) + \dots + \overline{c}_n(0)d_n(0).$$

W szczególności oznacza to, że

$$\|\psi(t)\|^2 = \overline{c}_1(t)c_1(t) + \dots + \overline{c}_n(t)c_n(t) = |c_1(t)|^2 + \dots + |c_n(t)|^2,$$

nie zależy od czasu:

$$\|\psi(t)\|^2 = \|\psi(0)\|^2 \quad (2)$$

Współczynnik c_k interpretowany jest jako amplituda prawdopodobieństwa znalezienia układu w stanie

$$\psi_k = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \leftarrow k, \quad (3)$$

tzn. $|c_k|^2$ jest prawdopodobieństwem znalezienia układu w stanie o numerze k (wymagamy przy tym, aby $|c_k|^2 + \dots + |c_k|^2 = 1$). Równanie (2) oznacza, że ewo-

² Używamy standardowych oznaczeń: $X^\dagger$ jest sprzężeniem hermitowskim X , a c oznacza liczbę sprzężoną do c .

lucja układu polega na zmianie rozkładu prawdopodobieństwa, z jakim układ znajduje się w konkretnych stanach, ale suma wszystkich prawdopodobieństw jest stała (równa jeden).

3. Pomiar w mechanice kwantowej

Oprócz ewolucji unitarnej standardowa interpretacja mechaniki kwantowej wymaga występowania jeszcze jednego rodzaju zmian, którym podlega układ kwantowy. Zmiany te następują momentalnie w chwilach, gdy dokonywany jest pomiar pewnej wielkości fizycznej (położenia, energii, spinu) układu. Pomiar wymaga oddziaływania z otoczeniem, zależnego od tego, jaką wielkość mierzymy. W jego wyniku układ przechodzi do jednego ze stanów wyznaczonych przez rodzaj pomiaru – tzn. przez to, co mierzymy. Z przejściem do każdego z tych stanów związany jest w zasadzie jednoznacznie wynik pomiaru (np. „spin do góry”). Wynik pomiaru nie jest jednak wielkością deterministyczną. Stan układu przed pomiarem wyznacza jedynie prawdopodobieństwa otrzymania poszczególnych wyników. Np. dwuskładowy wektor

$$\psi = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}, \quad (4)$$

dla którego spełniony jest warunek $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$, może opisywać cząstkę elementarną obdarzoną pewną własnością fizyczną zwaną spinem. Spin może przyjmować dwie wartości: „do góry” lub „do dołu”, co odpowiada stanom:

$$\psi_+ = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

oraz

$$\psi_- = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

Jeśli dokonamy pomiaru spinu za pomocą odpowiedniego urządzenia pomiarowego na układzie znajdującym się przed pomiarem w stanie (4), to bezpośrednio po pomiarze układ znajdzie się natychmiast w jednym ze stanów (5) lub (6). Wynikiem pomiaru będzie więc „spin do góry” lub „spin do dołu”. Mimo znajomości stanu przed pomiarem (4) oraz znajomości urządzenia pomiarowego nie jesteśmy w stanie przewidzieć wyniku pomiaru, możemy jedynie określić prawdopodobieństwa otrzymania każdego z wyników (odpowiednio $|\alpha|^2$ oraz $|\beta|^2$).

Podsumowując, przedstawiony powyżej pomiar można przedstawić jako probabilistyczną natychmiastową przemianę („redukcję paczki falowej”):

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \rightarrow \begin{cases} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} & \text{z prawdopodobieństwem } |\alpha|^2 \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} & \text{z prawdopodobieństwem } |\beta|^2 \end{cases} \quad (7)$$

W ogólności taka przemiana nie może być przedstawiona w postaci (1) tzn. unitarnej ewolucji. Zaprezentowana interpretacja mechaniki kwantowej wymaga zatem występowania dwóch rodzajów ewolucji: unitarnej typu (1) oraz nieunitarnej typu (7).

II. Interpretacja Everetta mechaniki kwantowej

Interpretacja Everetta mechaniki kwantowej miała być odpowiedzią na niektóre paradoksy powstające przy ujęciu standardowym von Neumanna-Diraca. Opiera się na pomysle, jak rozwiązać problem pomiaru bez odwoływania się do redukcji paczki falowej.

Zgodnie ze standardową metateorią mechanika kwantowa nie wyjaśnia zachowania układu, w którym brano by również pod uwagę jego obserwatora: jest on zawsze traktowany jako zewnętrzny w stosunku do badanego przez siebie układu. W szczególności więc nie można opisać wszechświata jako całości, w której wszyscy obserwatorzy byłiby wewnątrz układu, a żaden na zewnątrz. W standardowej interpretacji bowiem układ ewoluuje zgodnie z funkcją falową, a pomiar dokonywany jest za pomocą narzędzia spoza układu, co wpływa na ten układ i sprawia, że następuje (nieunitarna) redukcja paczki falowej.

Pomysł Everetta opiera się na idei, że można jako cały układ uznać badany obiekt (który może sam być złożonym układem kwantowym w sensie standardowej mechaniki kwantowej) wraz z narzędziem pomiaru i/lub obserwatorem badającym ten obiekt. Zachowanie takiego większego układu będzie również opisywane za pomocą pewnej funkcji falowej. Pomiar i obserwacje wewnątrz całego układu można bowiem modelować przy użyciu równania falowego dla układu, który zawiera i badającego, i badane przez niego obiekty. Everett proponuje odrzucenie koncepcji redukcji paczki falowej. W zamian za to interpretuje on empiryczne przewidywania teorii standardowej jako subiektywne doświadczenia obserwatora, który sam siebie traktuje jako część opisywanego przez swoją teorię układu fizycznego. Zgodnie więc z tą koncepcją cały wszechświat wraz ze swoimi obserwatorami może być opisany za pomocą jednej uniwersalnej funkcji falowej.

U podstaw interpretacji Everetta stoją dwa założenia:

1. Metafizyczne: funkcja falowa koduje wszystkie informacje o przedmiocie (tak samo jak w standardowej interpretacji), ale zakłada się, że jest ona fizycznym polem o wartościach zespolonych w przestrzeni o odpowiednio dużym

wymiarze. Jest przedmiotem rzeczywiście istniejącym, tego samego typu, co np. pole elektromagnetyczne, i jest niezależna od obserwatora. Pod pewnymi względami jest to powrót do klasycznego, przedkwantowego spojrzenia na wszechświat, w którym wszystkie matematyczne własności teorii fizycznej odpowiadają elementom rzeczywistości.

2. Fizyczne: funkcja falowa spełnia empirycznie wyprowadzone standardowe deterministyczne liniowe równanie falowe (np. równanie Schrödingera, dające dobre przybliżenie rzeczywistości dla układów nierelatywistycznych), jej ewolucja jest unitarna (1), także podczas pomiaru. Obserwator nie zajmuje wyróżnionego miejsca w teorii i dzięki temu nie zachodzi redukcja paczek falowych³.

III. Wieloświatowość w teorii Everetta

Zgodnie z interpretacją mechaniki kwantowej Everetta rozwinętą przez DeWitta⁴, każdy pomiar powoduje rozpad uniwersalnej funkcji falowej (tzn. funkcji falowej całego układu, być może całego wszechświata) na części należące do nieoddziałujących ze sobą światów (nazywanych też czasami gałęziami lub historiami). Jeżeli za układ uznamy obserwatora wykonującego pomiar⁵ oraz obiekt przez niego badany, to w wyniku pomiaru układ rozpadnie się na kilka niezależnych od siebie składowych, z których każda zawiera nieświadomego rozpadu obserwatora, badającego jeden z możliwych rezultatów wyników pomiaru. Tak więc każdorazowo dokonanie pomiaru powoduje rozpad świata na wiele wzajemnie nieobserwowalnych, ale realnie równoległe istniejących światów. Nie następuje redukcja paczki falowej, natomiast w wyniku w pełni deterministycznego procesu wszystkie możliwe wyniki pomiaru funkcji falowej zostają równocześnie zrealizowane. Każda z tych realizacji jest odpowiedzialna za powstanie jednego świata – złożonego z wielu częściowo ze sobą oddziałujących podukładów (w tym obserwatora). Światy równoległe nie istnieją przed pomiarem, a rozpad jednego świata na wiele jest procesem fizycznym związanym z dynamiczną ewolucją wektora falowego. W rezultacie istnieje wiele światów we wszechświecie obok naszego jednego, którego jesteśmy świadomi.

Różnicę między klasyczną interpretacją mechaniki kwantowej a wieloświatową Everetta dobrze widać na przykładzie eksperymentu myślowego zapro-

³ Por. Michael Clive Price, „The Everett FAQ”, <http://www.hedweb.com/manworld.htm>.

⁴ Nie zajmujemy się tu problemem, czy interpretacja DeWitta jest zgodna z nigdzie formalnie nieprzedstawionymi, oryginalnymi intencjami Everetta. W tej sytuacji, lepszym określeniem omawianej tu koncepcji, w której następuje „rozszczenie światów”, jest „interpretacja Everetta-DeWitta”, por. Chalmers *The Conscious Mind*, s. 346–347.

⁵ „Obserwator” jest tu używany w szerokim sensie, w szczególności może to być po prostu narzędzie (np. licznik Geigera), które nie zakłada świadomego obserwatora.

ponowanego przez Schrödingera⁶. Zgodnie z interpretacją standardową kot przed dokonaniem pomiaru (otwarcie pojemnika) znajduje się w superpozycji wszystkich możliwych stanów wyznaczanych przez odpowiednią funkcję falową – jego stan jest fundamentalnie nieokreślony, jest jednocześnie i martwy, i żywy. Everett natomiast proponuje równie nieintuicyjne rozwiązanie postawionego przez Schrödingera problemu: świat zawierający kota w pudełku rozpadł się na dwa realnie istniejące, ale niepowiązane ze sobą światy – w jednym z nich kot jest żywy, a w drugim martwy. Każdy z tych dwóch światów zawiera również badacza, który otwiera pudełko i sprawdza, czy kot przeżył. Z punktu widzenia danego obserwatora (lub kota) po rozpadzie świata na dwa równoległe nie ma żadnych praw, które byłyby odpowiedzialne za to, że znalazł się w tym, a nie innym świecie.

IV. Światy możliwe jako światy realne

1. Realizm modalny Lewisa

Pojęcie „światów możliwych” przypisywane jest Leibnizowi i we współczesnej logice i filozofii wprowadza się je, by badać możliwość i konieczność (a przynajmniej jako narzędzie pozwalające analizować modalne twierdzenia, zawierające takie wyrażenia jak „koniecznie, że”, „możliwe, że”, „może” itd.). Możliwy świat to taki, który różni się w pewien sposób od świata aktualnego, w którym żyjemy. Nie ma zgody co do statusu ontologicznego światów możliwych. Jedną z propozycji odpowiedzi na to jest modalny realizm, mający za swego głównego przedstawiciela Davida Lewisa.

Modalny realizm jest poglądem, zgodnie z którym wszystkie możliwe światy istnieją i są tak samo rzeczywiste jak świat aktualny:

Nasz świat jest tylko jednym ze światów wśród innych światów. Nazywamy go aktualnym nie dlatego, że różni się pod względem rodzaju od wszystkich innych, lecz dlatego, że jest tym światem, w którym się znajdujemy. Mieszkańcy innych światów mogą zgodnie z prawdą nazywać swoje własne światy światami aktualnymi, jeśli przez aktualny rozumieją to, co my⁷.

Istnieje każdy świat, który może być opisany za pomocą maksymalnie niesprzecznego zbioru zdań, nie może jednak być z nim utożsamiany. Światy moż-

⁶ Kot Schrödingera zamknięty jest w pojemniku wraz ze śmiertelną dawką trucizny wyzwalanej w wyniku procesu kwantowego – ampulka z trucizną zostaje stłuczona, gdy umieszczony w pobliżu licznik Geigera zareaguje na rozpad atomu. W wyniku ewolucji czasowej nietrwały atom przechodzi do stanu superpozycji stanów „przed rozpadem” i „po rozpadzie”. Ponieważ stan kota (odpowiednio: „żywy” lub „martwy”) jest jednoznacznie określony przez stan atomu, kot musi również znajdować się w stanie będącym superpozycją.

⁷ David Lewis, „Światy możliwe”, w: *Metafizyka w filozofii analitycznej*, Towarzystwo Naukowe Katolickiego Uniwersytetu Lubelskiego, Lublin 1995, s. 128–129.

liwe są niezależne od naszego języka i myśli i nie mogą być zredukowane do jakichkolwiek innych bardziej podstawowych bytów (pojęciowych, językowych, struktur teoriomnogościowych)⁸. Według Lewisa bowiem każda taka teoria popada w błędne koło, analizując, czym jest możliwość, lub odwołuje się do niewytłumaczalnego w jej ramach pojęcia możliwości. Zgodnie z realizmem modalnym wszystkie światy możliwe, różniąc się jedynie zawartością, mają dokładnie taką samą naturę jak nasz świat. Różnią się między sobą tym, co się w „nich dzieje”, co przekłada się na różną wartość logiczną zdań je opisujących. Światy możliwe są konkretnymi bytami całkowicie odizolowanymi od siebie czasoprzestrzennie, w żaden sposób nieoddziałującymi na siebie przyczynowo. Żaden przedmiot z jednego świata nie wchodzi w relację czasową, przestrzenną ani przyczynową z jakimkolwiek obiektem z innego świata⁹.

Każde konkretne indywiduum istnieje tylko w jednym świecie, nie istnieje bowiem nic takiego jak transświatowa identyczność. Indywidua mają natomiast swoje odpowiedniki w innych światach, jest to jednak relacja oparta jedynie na podobieństwie, a nie na logicznej relacji identyczności¹⁰.

2. Realizm wieloświatowy Everetta

W teorii Everetta liczba istniejących światów nie jest związana z liczbą wszystkich niesprzecznych opisów światów, lecz z koniecznością wynikającą z praw mechaniki kwantowej. Światy – obiekty fizyczne – powstają jako rezultaty pomiaru pewnych wielkości fizycznych. Każdy tak powstały świat istnieje dokładnie w ten sam sposób, w jaki istnieje świat, w którym jesteśmy. Świat aktualny (nasz) różni się jedynie tym od innych, że akurat my w nim jesteśmy i z naszego punktu widzenia opisywana jest rzeczywistość¹¹.

W każdym nowo powstałym świecie istnieje osoba, która przeprowadzała eksperyment, istnieją też te same rzeczy, które istniały w świecie, z którego te nowe światy powstały. Otwartym pytaniem pozostaje, czy bliższe tej teorii jest mówienie o transświatowej identyczności (co jest powszechnie przyjmowane wśród fizyków), czy o istnieniu jedynie przedmiotów podobnych do siebie w poprzek światów. Żadna z tych koncepcji nie jest jednak sprzeczna z interpretacją Everetta.

⁸ David Lewis, „Możliwości: konkretne światy czy abstrakcyjne obiekty proste?”, w: *Metafizyka w filozofii analitycznej*, wyd. cyt., s. 160–164.

⁹ Tamże, s. 155.

¹⁰ Por. David Lewis, „Counterparts or Double Lives?”, w: *On the Plurality of Worlds*, Blackwell, 1986, s. 193–263.

¹¹ Everett dla oddania tego, co w terminologii Lewisa znaczy w wypadku realizmu modalnego dystynkcja aktualny/możliwy, używał sformułowań: „realny z punktu widzenia teorii” i „realny z punktu widzenia obserwatora”.

3. Wiele światów a światy możliwe

Niewątpliwie istnieją pewne podobieństwa między koncepcjami Everetta i Lewisa, problematyczne jest jednak ich spójne połączenie lub przynajmniej zastosowanie pewnych elementów ogólnej koncepcji Lewisa do szczególnego przypadku wielu światów Everetta. Wydaje się bowiem, że ich cele są różne, a obiekty, o których mówią, należą do innych porządków. Interpretacja mechaniki kwantowej Everetta ma być odpowiedzią na pewne nieintuicyjne wyjaśnienia dostarczane przez teorię fizyczną, podczas gdy światy możliwe Lewisa służą do wyjaśniania zagadnień ontologicznych, związanych z pytaniem, co powoduje, że zdania dotyczące konieczności lub prawdziwości są prawdziwe.

Szczególnie rzucają się w oczy dwie różnice między światami Everetta i Lewisa:

1. Światy Everetta pochodzą od wspólnej przyczyny (świata, który po pomiarze rozpadł się na kilka), podczas gdy światy możliwe Lewisa są od siebie pod każdym względem niezależne¹².
2. Natura światów Everetta i Lewisa jest różna. Światy Everetta związane są z koniecznością fizyczną – są to tylko te światy, których istnienie jest niesprzeczne z mechaniką kwantową (a więc te, które zgodnie z tą teorią są możliwe) – i istnieją tylko te, które powstały na skutek dokonania pewnego pomiaru. Natomiast, według Lewisa, istnieją te światy, których opis jest niesprzeczny (a więc te, które są logicznie możliwe) – i istnieją wszystkie takie. W szczególności istnieją światy, w których obowiązują inne prawa fizyczne (ale nie logiczne lub arytmetyczne) niż w świecie aktualnym¹³. Tak więc z punktu widzenia teorii Lewisa światy Everetta można ujmować jako jeden rodzaj światów, będący specyficzną podklasą wszystkich istniejących światów.

W ontologii Everetta podstawowe obiekty są rzeczywiste i mają charakter fizyczny, a podstawowym argumentem za ich uznawaniem jest stojąca za nimi mechanika kwantowa. Realizmowi modalnemu zarzuca się czasem, że nie tłumaczy, co sprawia, że pewne stany rzeczy są możliwe lub konieczne¹⁴. Unikając problemów teorii Lewisa, teoria wielu światów może stanowić próbę znaturalizowania przynajmniej niektórych (związanych z możliwością fizyczną) własności modalnych.

¹² Por. Paul Tappenden, „Identity and Probability in Everett's Multiverse” i Alastair Wilson, „Modal Metaphysics and the Everett Interpretation”.

¹³ David Lewis, *Światy możliwe*, s. 132.

¹⁴ Graeme Forbes, „The Plurality of Worlds”, s. 151.

V. Semantyka Kripkego dla teorii „wielu światów”

1. Światy w interpretacji Everetta

Analiza modalnych aspektów interpretacji Everetta może być rozwijana także na poziomie formalnym. Pojawiające się w niej „światy” mogą służyć jako uniwersum pewnej semantyki modalnej w rozumieniu Kripkego. Dla przeprowadzenia analizy takiej koncepcji należy jednak nieco dokładniej sprecyzować kilka pojęć, które pojawiły się w różnych kontekstach powyżej, w szczególności samego pojęcia „świata” i „wielu światów”.

Należy stwierdzić, że w oryginalnej pracy Everetta¹⁵ oraz w jego rozprawie doktorskiej¹⁶, w której zaprezentował po raz pierwszy swoją interpretację mechaniki kwantowej, pojęcie „wielu światów” nie jest używane. Everett pisze w tym kontekście o „rozgałęzieniu (*branching*) trajektorii”. Pojęcie wielu światów pojawia się w dopiero w późniejszych pracach DeWitta¹⁷ i Grahama¹⁸.

W celu sprecyzowania pojęcia świata spróbujemy uprościć nieco sytuację przez ograniczenie się do wypadku, gdy interesuje nas, co się może wydarzyć na skutek N pomiarów $P_1, P_2, \dots, P_N$, przeprowadzonych w chwilach $t_1, t_2, \dots, t_N$. Zakładamy ponadto, że w wyniku pomiaru P_k możemy otrzymać M_k różnych rezultatów $r_1^{(k)}, \dots, r_{M_k}^{(k)}$.

Każdy pomiar prowadzi do rozkładu funkcji falowej na składniki o określonej wartości aktualnie mierzonej wielkości. Tak więc każdy z „wielu światów” opisany jest funkcją falową odpowiadającą określonej wartości każdego z pomiarów. Kent (notabene jest on zdecydowanym przeciwnikiem interpretacji Everetta) formułuje to następująco:

Przypuśćmy, że w chwili t funkcja falowa $\psi(t)$ ma rozkład:

$$\psi(t) = \sum_{r_1^{(1)}, \dots, r_{i_N}^{(N)}} \psi(r_1^{(1)}, \dots, r_{i_N}^{(N)}) \quad (8)$$

gdzie $\psi(r_1^{(1)}, \dots, r_{i_N}^{(N)})$ jest stanem, otrzymanym w wyniku N pomiarów. Wówczas [...] istnieje klasyczny świat odpowiadający każdemu ze zbiorów $(r_1^{(1)}, \dots, r_{i_N}^{(N)})$ ¹⁹.

Światy różnią się więc wynikami pomiarów $P_1, P_2, \dots, P_N$, przeprowadzonych w chwilach $t_1, t_2, \dots, t_N$.

¹⁵ Hugh Everett III, „Relative State” Formulation of Quantum Mechanics.

¹⁶ Tegoż, *The theory of the universal wave function*.

¹⁷ Bryce S. DeWitt, „Quantum mechanics and reality”, s. 155; tegoż, „The Many-Universe Interpretation of Quantum Mechanics” s. 169.

¹⁸ Neil Graham, „The measurement of relative frequency”, s. 229.

¹⁹ Arthur Kent, „Against Many-Worlds Interpretation”, w: „International Journal of Modern Physics” 5, s. 1748.

W najprostszych przypadkach cząstki o spinie $\frac{1}{2}$ i jednego pomiaru w jednym ze światów spin cząstki będzie skierowany „do góry”, a w drugim – „do dołu”. Z punktu widzenia świata, w którym spin skierowany jest „do góry”, drugi ze światów jest „światem możliwym”: wynikiem pomiaru mogło być (z wyjątkiem pewnych bardzo szczególnych przypadków – por. niżej) stwierdzenie, że spin jest skierowany „do dołu”. Wydaje się to zgodne z potocznym rozumieniem możliwości: „mogło się zdarzyć coś innego, niż się zdarzyło w rzeczywistości”. Warto jednak zauważyć, że gdyby bezpośrednio przed pomiarem spin skierowany był do dołu, możliwość zaobserwowania stanu „do góry” nie istniałaby w ogóle, a więc drugi ze światów (ze spinem „do dołu”) nie zaistniałby. Wynika to z faktu, iż prawdopodobieństwo $|\beta|^2$ (por. wzory (4)–(6) wyżej) znalezienia stanu $\psi_{\downarrow}$ odpowiadającego spinowi „do dołu” byłoby równe zeru – stan ψ miałby postać $\psi_{\uparrow}$ zarówno przed pomiarem, jak i po nim. Tak więc w opisanej powyżej sytuacji świat ze spinem „do dołu” nie jest światem możliwym dla świata ze spinem „do góry”. Ściśle biorąc, argument ten odwołuje się do standardowej interpretacji mechaniki kwantowej, jednak w żadnym stopniu nie osłabia to wniosku, gdyż wyniki pomiarów przewidywane w ramach interpretacji Everetta pokrywają się z predykcjami interpretacji standardowej.

VI. Model semantyczny dla interpretacji Everetta

Konstrukcja modelu logiki modalnej przebiega według schematu, który zdaje się stosunkowo wiernie oddawać intuicje związane z takimi pojęciami jak „możliwy”, „konieczny”, „niemożliwy” itp. Po pierwsze, należy określić zbiór „możliwych światów” W . Z formalnego punktu widzenia jego elementami są dowolne obiekty, jednak intuicyjnie chcielibyśmy je powiązać z pewnymi „stanami rzeczy”. Np. pewien świat $w \in W$, to taki „stan rzeczy”, przy którym np. cząstka a ma prędkość v i znajduje się w punkcie x , a cząstka b – prędkość u oraz położenie y . Rozważmy następnie pewien pojedynczy świat $w_0 \in W$. Zazwyczaj nie wszystkie inne światy (tzn. wszystkie pozostałe elementy W) stanowią alternatywę dla naszego świata. Np. jeśli uznamy prawo zachowania energii za obowiązujące we wszystkich światach, które są alternatywne wobec naszego („świata aktualnego”), to te elementy W , w których prawo to jest złamane, nie będą „światami możliwymi z punktu widzenia świata aktualnego”. Tak więc, przy konstrukcji modelu musimy zdefiniować dwuargumentową relację R („relację dostępności”), taką, że dwa światy w_1 i w_2 są w tej relacji ($w_1 R w_2$) wtedy i tylko wtedy, gdy świat w_2 jest „osiągalny” („dostępny”) ze świata w_1 , tzn. stanowi dla wyróżnionego świata rzeczywiście alternatywny „stan rzeczy”. Własności tej relacji decydują o typie logiki modalnej lub, mniej formalnie, o intuicyjnym znaczeniu, jakie przypisujemy wyrażeniom modalnym. Ostatni element konstrukcji modelu polega na opisanu, który z możliwych światów (elementów W) odpowiada stanowi rzeczy opisane-

mu poszczególnymi zdaniem, które wypowiadamy, stwierdzając zachodzenie danego stanu rzeczy (np. cząstka a ma prędkość v i znajduje się w punkcie x). Można to zrobić na dwa używane równolegle w literaturze przedmiotu, równoważne sposoby. Pierwszy polega na wyróżnieniu odwzorowania P ze zbioru liczb naturalnych N (numerów kolejnych zdań) w podzbiory W . Wartością odwzorowania P dla $n \in N$ jest podzbiór tych światów, w których zachodzi stan rzeczy opisywany przez zdanie o numerze n ²⁰. Innym sposobem jest zdefiniowanie binarnej funkcji wartościowania V określonej na iloczynie kartezjańskim zbioru zmiennych zdaniowych Z i zbioru możliwych światów W . Funkcja V przyjmuje wartość 1, $V(a, w) = 1$, jeśli zdanie a adekwatnie opisuje stan rzeczy zachodzący w świecie w , w przeciwnym zaś wypadku $V(a, w) = 0$. Innymi słowy $V(a_n, \cdot)$ jest funkcją charakterystyczną tego podzbioru W , który jest wartością zdefiniowanego poprzednio odwzorowania P dla argumentu n będącego numerem zdania a_n ²¹. Zauważmy, że w praktyce możemy postąpić następująco: określamy wartości V na pewnym podzbiorze Z („zdaniami atomowych”) – takim, że pozostałe zdania konstruujemy, używając reguł syntaktycznych teorii – a następnie rozszerzamy wartościowanie V na zdania złożone zgodnie z regułami syntaktycznymi (np. $V(a \wedge b, w) = 1$ wtedy i tylko wtedy, gdy $V(a, w) = 1$ i $V(b, w) = 1$).

Podsumowując powyższe rozważania, definiujemy model typu Kripkego jako uporządkowaną trójkę $\langle W, R, V \rangle$, gdzie W jest zbiorem możliwych światów, R – relacją na W (tzn. podzbiorem $W \times W$), a V funkcją z iloczynu kartezjańskiego $Z \times W$ (zmiennych zdaniowych i możliwych światów) w zbiór $\{0, 1\}$.

Taka formalizacja sugeruje następującą konstrukcję modelu typu Kripkego dla interpretacji Everetta:

1. Elementami zbioru wszystkich światów są sekwencje określonych wyników pomiarów $P_1, P_2, \dots, P_N$, przeprowadzonych w chwilach $t_1, t_2, \dots, t_N$. Należy przy tym dodać, że jeśli (zgodnie z naszym założeniem) pomiar P_k może dać w wyniku M_k rezultatów, to $M = M_1 M_2 \dots M_N$ jest maksymalną liczbą możliwych światów. Może się okazać, że liczba faktycznie dopuszczalnych światów jest mniejsza. Tak np. żadna interpretacja mechaniki kwantowej nie dopuszcza sytuacji, w której dwa pomiary tej samej wielkości fizycznej dla tego samego układu, przeprowadzone bezpośrednio po sobie (tzn. natychmiast po przeprowadzeniu pierwszego pomiaru przeprowadzony został drugi), dały różne wyniki (przeciwna sytuacja byłaby bardzo niekomfortowa z punktu widzenia fizyki – pomiar straciłby w takim wypadku przypisywane mu w naukach przyrodniczych praktyczne znaczenie)²².

²⁰ Brian F. Chellas, *Modal logic, an introduction*, s. 69 i nast.; K. Świrydowicz, *Podstawy logiki modalnej*, s. 56.

²¹ G.E. Hughes, M.J. Cresswell, *A companion to modal logic*, s. 7 i nast.; tychże, *A new introduction to modal logic*, s. 38.

²² Por. N. Graham, dz. cyt., s. 230.

2. Następnym krokiem jest zdefiniowanie podzbioru stanów „dostępnych” z danego świata „aktualnego”. Jest to decydujący moment dla ustalenia, który ze znanych systemów logiki modalnej odpowiada koncepcji Everetta. Poniżej będziemy argumentowali, że nie istnieje jednoznaczne rozstrzygnięcie tej kwestii. W świetle powyższych uwag dotyczących cząstki o spinie $\frac{1}{2}$ podlegającej pojedynczemu pomiarowi, pierwszym narzucającym się sposobem określenia relacji dostępności jest następująca definicja: światy w_1 i w_2 są w relacji R wtedy i tylko wtedy, gdy funkcja falowa ψ w chwili bezpośrednio poprzedzającej pierwszy pomiar P_1 ma postać pozwalającą na otrzymanie w wyniku pomiarów $P_1, P_2, \dots, P_N$ zarówno rezultatów charakteryzujących stan w_1 , jak i w_2 (co można ująć w stwierdzeniu, że obydwa światy, w_1 i w_2 , „pochodzą” od tej samej funkcji falowej w chwili t_1). Jest to równoważne określeniu zbioru światów dostępnych (w chwili t) jako tych i tylko tych, które opisywane są jedną z funkcji $\psi(r_{i_1}^{(I)}, \dots, r_{i_N}^{(N)})$, tworzących rozkład (8), przy czym świat aktualny znajduje się wśród nich. Tak zdefiniowana relacja R jest zwrotna i symetryczna. Z punktu widzenia klasyfikacji logik modalnych skonstruowany model jest modelem logiki B^{23} . Mechanika kwantowa nie rozstrzyga natomiast, czy relacja między światami jest przechodnia. Zależy to od liczby światów istniejących przed wykonaniem jakiegokolwiek pomiaru. Jeżeli istniał tylko jeden świat, to wszystkie światy powstałe na skutek przeprowadzenia pomiarów pochodzą od niego i R jest przechodnia. Mamy w tym wypadku do czynienia z relacją równoważności, a więc z systemem S5. Mechanika kwantowa nie wyklucza jednak tego, że świat opisany funkcją $\psi(r_{a_1}^{(I)}, \dots, r_{a_N}^{(N)})$ powstał w wyniku dwóch różnych sekwencji pomiarów przeprowadzonych na dwóch różnych światach. Jeśli więc początkowo istniały przynajmniej dwa światy, to nie mamy gwarancji, że relacja między światami jest przechodnia²⁴. Przechodniość relacji R jest w takim wypadku zależna od tego, czy jest możliwe, by jeden świat powstał w wyniku dwóch różnych sekwencji zdarzeń w dwóch różnych światach początkowych. Nietrudno zauważyć, że sytuacją taką należy z olbrzymim prawdopodobieństwem wykluczyć w wypadku, gdy liczba pomiarów, które doprowadziły do aktualnego stanu świata, jest duża. Szansa, że ten sam stan uda się stworzyć w wyniku innej sekwencji pomiarów w innym świecie początkowym, maleje wykładniczo wraz z liczbą przeprowadzonych pomiarów. Jeżeli więc wykluczylibyśmy taką sytuację, to w danej chwili światy tworzyłyby nieprzecinające się rodziny potomków pochodzą-

²³ Brian F. Chellas, dz. cyt., s. 76; G.E. Hughes, M.J. Cresswell, *A new introduction to modal logic*, s. 62; K. Świrydowicz, dz. cyt., s. 44.

²⁴ W wypadku bowiem, gdy przed pomiarem istniały dwa nie pochodzące od wspólnego przodka światy A i B i w wyniku niezależnych pomiarów A rozpadł się na świat C i D, a B na D i E (D jest światem, który powstał w wyniku dwóch różnych sekwencji pomiarów), C jest w relacji do D, a D do E, nie jest jednak tak, że C jest w relacji do E.

cych od tego samego świata przodka, dzielące uniwersum światów na klasy abstrakcji równoważnościowej, a więc przechodniej, relacji R . Należy jednak przypomnieć, że ponieważ świat aktualny należy zawsze do jednej i tylko jednej klasy abstrakcji równoważnościowej relacji R , istnienie innych klas abstrakcji nie ma z punktu widzenia świata aktualnego żadnego znaczenia – światy należące do tych klas są niedostępne ze świata aktualnego, a więc ich istnienie nie podlega jakimkolwiek sprawdzeniu.

Zdefiniowana powyżej relacja dostępności oddaje dobrze intuicje związane z pytaniem: *Jakie światy są w tej chwili (chwili t) możliwe, jeśli świat aktualny opisywany jest funkcją falową $\psi(r_{a_1}^{(I)}, \dots, r_{a_N}^{(N)})$, gdzie $r_{a_1}^{(I)}, \dots, r_{a_N}^{(N)}$ są wynikami pomiarów otrzymanymi w świecie aktualnym?* Równie uprawnione jest pytanie nadające zagadnieniu charakter czasowy: *Jakie światy mogą zaistnieć w przyszłości, jeśli w tej chwili (chwili t) świat aktualny jest opisywany funkcją falową $\psi(r_{a_1}^{(I)}, \dots, r_{a_N}^{(N)})$?* Mechanika kwantowa dostarcza odpowiedzi na pytanie, jakie są możliwe wyniki przyszłych pomiarów, osobną kwestią jest jednak ustalenie, jaka relacja zachodzi między przyszłymi możliwymi światami a światem, od którego one pochodzą. Aby ją poprawnie opisać, potrzebne jest zbudowanie takiego systemu modalnego, w którym, po pierwsze, czas jest liniowy w przeszłości, to znaczy, że z punktu widzenia świata aktualnego w przeszłości istniał tylko jeden świat, z którego on powstał²⁵. Musimy natomiast zapewnić możliwość rozgałęzień czasu w przyszłości. Standardowo system taki buduje się przez wprowadzenie operatorów czasowych F (będzie kiedyś tak, że...) oraz P (było kiedyś tak, że...). Najłabszą normalną logiką czasu jest K_t ²⁶. Z punktu widzenia światów Everetta istotne wydaje się, aby relacja dostępności między nimi była przechodnia, tzn. $FFp \rightarrow Fp$, co jest aksjomatem charakterystycznym dla systemu K_4 . Liniowość przeszłości bez wykluczania rozgałęzień w przyszłości zapewnia dodanie aksjomatu $Pp \wedge Pq \rightarrow (P(p \wedge q) \vee P(p \wedge Pq) \vee P(q \wedge Pp))$. Jeżeli teraz zdefiniujemy możliwość w duchu Diodorusa z Chronos, tzn. że możliwe to to, co jest lub kiedyś będzie, ($\Diamond p \Leftrightarrow p \vee Fp$), to otrzymamy system logiki modalnej równoważny $S4$ ²⁷.

3. Zdaniem atomowymi są „pomiar P_k dał w wyniku $r_i^{(k)}$ ”. Przyjmujemy, że $V(\alpha, w) = 1$ dla zdania atomowego α i świata w wtedy i tylko wtedy, gdy:
 - a) $\alpha =$ „pomiar P_k dał w wyniku $r_i^{(k)}$ ” oraz

²⁵ Ponownie, warunek ten jest spełniany jedynie, jeżeli nie dopuszczamy możliwości, by jeden świat powstał w wyniku dwóch różnych sekwencji zdarzeń w dwóch różnych światach początkowych.

²⁶ Aksjomatami K_t są m.in. $G(p \rightarrow q) \rightarrow (Gp \rightarrow Gq)$ oraz $H(p \rightarrow q) \rightarrow (Hp \rightarrow Hq)$, gdzie $Gp = \sim F \sim p$, $Hp = \sim P \sim p$, które w oczywisty sposób odpowiadają intuicjom związanym z każdym modelem czasu.

²⁷ Otrzymany system logiki temporalnej to Kb Reschera-Urquharta, por. Świrydowicz, dz. cyt., s. 156 i nast.

- b) świat w opisywany jest funkcją falową $f(a, b, \dots, r_{ik}^{(k)}, \dots, y, z)$, gdzie $a, b, \dots, y, z$ są dowolnymi wynikami odpowiednich pomiarów (różnych od P_k). Tak skonstruowany model wymaga dalszej analizy. Np. prawa mechaniki kwantowej wyznaczają reguły syntaktyczne łączenia zdań atomowych, a – co za tym idzie – określają w pełni wartościowanie V .

Choć realizm Lewisa proponuje wiele odpowiedzi na fundamentalne pytania dotyczące modalności, nie cieszy się dużym powodzeniem wśród filozofów. Z drugiej strony interpretacja Everetta mechaniki kwantowej nie daje defini-tywnych rozwiązań wszystkich problemów modalności. Nie pozwala na ostateczne ustalenie, czego dotyczą stwierdzenia modalne i co sprawia, że możemy o nich orzekać prawdziwość lub fałszywość. Jednak jeżeli ograniczymy nasze pytania do konieczności wyznaczonej przez prawa przyrodnicze, można za jej pomocą próbować ustalać, co mechanika kwantowa może mieć do powiedzenia na temat pojęć takich jak „konieczność” czy „możliwość”. Interpretacja Everetta dostarcza bowiem odpowiedzi na pytanie, co czyni pewne zdania dotyczące modalności prawdziwymi. Dalszej uwagi natomiast wymagają badania nad zastosowaniem semantyki Kripkego do przedstawionej interpretacji mechaniki kwantowej.

Bibliografia

- Barret Jeffrey. Everett's *Relative-State Formulation of Quantum Mechanics*, w: *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <http://plato.stanford.edu/>.
- Chalmers David J. 1996. *The Conscious Mind*, Oxford, Oxford University Press.
- Chellas Brian F. 1980. *Modal logic, an introduction*, Cambridge, Cambridge University Press.
- DeWitt Bryce S. 1973. „Quantum mechanics and reality”, w: DeWitt Bryce S. i Graham Neil (red.), *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton, Princeton University Press, s. 155–165, przedruk z: „Physics Today” 23 (9): s. 155–161.
- DeWitt Bryce S. 1973. „The Many-Universes Interpretation of Quantum Mechanics”, w: DeWitt Bryce S. i Graham Neil (red.), *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton, Princeton University Press, 1973 s. 167–218, [przedruk z:] *Foundations of Quantum Mechanics*, Academic Press, New York, 1971.
- DeWitt Bryce S. i Graham Neil (red.). 1973. *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton, Princeton University Press.

- Everett III Hugh. 1957. „'Relative State' Formulation of Quantum Mechanics”, „Review of Modern Physics”, 29: 454–462.
- Everett III Hugh. 1973. „The theory of the universal wave function”, w: DeWitt, Bryce S. i Graham, Neil (red.), *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, s. 3–140.
- Graham Neil. 1973. „The measurement of relative frequency”, w: DeWitt, Bryce S. i Graham, Neil (red.), *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, s. 229–252.
- Forbes Graeme. 1988. „The Plurality of Worlds”, „Philosophical Quarterly” 38: 365–370.
- Hughes G.E. i Cresswell M.J. 1984. *A companion to modal logic*, London, Methuen.
- Hughes G.E. i Cresswell M.J. 1996. *A new introduction to modal logic*, London, Routledge.
- Jammer Max. 1974. *The Philosophy of Quantum Mechanics. The Interpretations of Quantum Mechanics in Historical Perspective*, New York, Wiley.
- Kent Arthur. 1990. „Against Many-Worlds Interpretation”, w: „International Journal of Modern Physics A” 5: 1745–1762.
- Lewis David. 1995. „Światy możliwe”, w: Tadeusz Szubka (red.), *Metafizyka w filozofii analitycznej*, tłum. Urszula Żegleń, Lublin, Towarzystwo Naukowe Katolickiego Uniwersytetu Lubelskiego, s. 127–135.
- Lewis David. 1995. „Możliwości: konkretne światy czy abstrakcyjne obiekty proste?”, w: Tadeusz Szubka (red.), *Metafizyka w filozofii analitycznej*, tłum. Urszula Żegleń, Lublin, Towarzystwo Naukowe Katolickiego Uniwersytetu Lubelskiego, s. 155–176.
- Lewis David. 1986. „Counterparts or Double Lives?”, w: tenże, *On the Plurality of Worlds*, London, Blackwell, s. 193–263.
- Price Michael Clive. *The Everett FAQ*, <http://www.hedweb.com/manworld.htm>.
- Świrydowicz Kazimierz. 2004. *Podstawy logiki modalnej*, Poznań, Wydawnictwo Naukowe UAM.
- Tappenden Paul. 2000. „Identity and Probability in Everett's Multiverse”, „British Journal for the Philosophy of Science”, 51: 99–114.
- Wilson Alastair. 2006. *Modal Metaphysics and the Everett Interpretation*, Pittsburgh Philosophy of Science Archive.

**Everett's Interpretation of Quantum Mechanics
in the Light of Everett's Modal Realism and Kripke's Semantics**

Key words: *Everett's interpretation of quantum mechanics, quantum mechanics, quantum measurement, possible worlds semantics, modal logic, possibility, modal realism*

The paper analyzes Everett's interpretation of quantum mechanics in which every quantum measurement process results in a splitting of the actual world into a family of possible worlds. These worlds differ depending on the results of the measurement – in each of the worlds one of the possible particular outcomes takes place. We pose and discuss two problems: (i) to what extent can the measurement-created worlds be identified with the possible worlds of Lewis', and (ii) which system of modal logic is modeled by Everett's worlds. In contrast with Lewis' worlds, whose existence is limited only by consistency, Everett's universes are conditioned by past measurements. Moreover, they are "genetically" interconnected by the fact that new worlds stem from their predecessors in which a particular measurement was performed. The type of modal logic that can describe the modalities in Everett's interpretation depends on the way in which we implement our intuitions concerning 'possibility' – as something that concerns the totality of possible situations in which we could have been now, if a particular sequence of measurements had taken place in the past – or, in a more temporal spirit, as a question about possible worlds in which we can find ourselves in the future.