

Stan kwantowy: informacja, wolny wybór, losowość

Mechanika kwantowa dostarcza niezwykle adekwatnych przewidywań wyników pomiarów, jednakże pytanie, jaki musi być świat, jeżeli ta teoria jest prawdziwa, nie uzyskało dotychczas zadowalającej odpowiedzi. Zamierzeniem naszego projektu jest wniesienie wkładu w tę dyskusję, biorąc pod uwagę wyniki uzyskane w tej dziedzinie w ostatnim okresie. Wiodącym wątkiem naszych rozważań będzie zagadnienie stanu kwantowego, a bardziej szczegółowe tematy, jakie chcemy podjąć, są następujące: epistemiczna koncepcja stanu kwantowego, warunek niezależności ustawień oraz pytanie o indeterminizm mechaniki kwantowej.

Przewidywania wyników pomiarów przy użyciu mechaniki kwantowej dokonywane są wg następującej procedury: najpierw przypisujemy układowi pewien stan kwantowy (zgodnie z tym, w jaki sposób został on przygotowany przed pomiarem); potem obliczamy jego ewolucję w czasie zgodnie z równaniem Schrödingera; a na końcu wykonujemy pomiar, przy czym prawdopodobieństwa jego możliwych wyników odczytujemy ze stanu kwantowego w chwili pomiaru za pomocą reguły Borna. Reguła Borna nie daje nam informacji o tym, jaki dokładnie będzie wynik, lecz jedynie podaje prawdopodobieństwa możliwych wyników. Wspomniana dwoistość reguł ewolucji układu (równanie Schrödingera i reguła Borna) prowadzi do problemu pomiaru, który jest największym wyzwaniem w próbach zrozumienia mechaniki kwantowej.

Jak widać z powyższego opisu, stan kwantowy jest centralnym obiektem mechaniki kwantowej. W obliczu trudności, na jakie napotykają próby zrozumienia tego obiektu jako reprezentującego coś fizycznie realnego (interpretacja ontyczna), pojawił się pomysł, aby interpretować go w sposób epistemiczny – a więc jako reprezentację przekonań podmiotu. Naszym pierwszym celem jest krytyczna analiza współczesnych wariantów tego podejścia (z których najważniejsze są trzy: (i) QBism, (ii) dyskusja w ramach teorii modeli ontologicznych zainicjowana przez Harrigana i Spekkensa (*Found. of Phys.* 40, 2010) oraz (iii) konstrukcja epistemicznych modeli przypominających mechanikę kwantową zainicjowana przez Spekkensa (*Phys. Rev. A* 75, 2007)). Nowatorstwo naszego programu badawczego polega tutaj na wzięciu pod uwagę odróżnień pojęciowych i narzędzi współczesnej epistemologii; w szczególności stawiamy hipotezę, że wspomniane podejścia są w pewnych punktach konceptualnie problematyczne, gdyż nie biorą pod uwagę pewnych kluczowych cech pojęcia wiedzy (np. tego, że wiedza, że p zakłada prawdziwość „ p ”).

Inna próba zrozumienia natury świata kwantowego wychodzi od założenia, że mechanika kwantowa nie jest zupełna i należy ją poszerzyć o nowe zmienne (tzw. zmienne ukryte), reprezentujące własności układu, których stan kwantowy nie uchwytuje. Okazuje się jednak, że istnieją silne ograniczenia na tego typu teorie, co pokazuje seria twierdzeń, poczynając od słynnego twierdzenia Bella (*Physics* 1(3), 1964). Owo twierdzenie wyklucza możliwość teorii zmiennych ukrytych spełniających łącznie trzy warunki niezależności – wyników, parametrów i ustawień. Można jednak konstruować teorie zmiennych ukrytych łamiące co najmniej jeden z tych warunków. Dotychczas badacze skupiali się na pierwszych dwóch, ale obecnie pojawiają się głosy, by rozważać także teorie łamiące warunek niezależności ustawień (np. Ciepielewski et al., *Brit. Journ. Phil.* 2022), co jest kontrowersyjne m.in. dlatego, że ów warunek zdaje się być powiązany z wolnością wyboru przez podmiot ustawień eksperymentu. Naszym celem jest rozważenie konsekwencji łamania tego warunku, a także jego analiza biorąca pod uwagę modalną naturę tego warunku (tzn. jego ścisły związek z pojęciami możliwości i konieczności). Ten drugi cel będzie zrealizowany przy użyciu formalizmu teorii rozgałęziających się czasoprzestrzennych historii (zob. Belnap, Müller i Placek, *Branching Space-Times: Theory and Applications*, Oxford University Press 2022), który jest do tego odpowiedni, gdyż umożliwia badanie pojęć modalnych w kontekście relatywistycznym.

Naszym trzecim przedmiotem rozważań będzie pytanie o to, czy mechanika kwantowa jest indeterministyczna. W pierwszej kolejności chcemy dokonać przeglądu możliwych rozumień determinizmu i indeterminizmu, gdyż jak się okazuje, pojęcia te mogą być definiowane na różne sposoby. Zamierzamy rozważyć co najmniej sześć różnych podejść: (1) syntaktyczne, czyli bazujące na strukturze językowej teorii (zaniechane – w naszym mniemaniu zbyt pochopnie – po krytyce Montague’a (*Formal Philosophy*, Yale University Press 1974)), (2) semantyczne, czyli bazujące na jakościowej identyczności modeli teorii, (3) branchingowe (z pierwotnym pojęciem modalności), (4) odwołujące się do intuicji „wytwarzania” nowych stanów świata z wcześniejszych, (5) odwołujące się do jedyności rozwiązań równań różniczkowych, (6) nowe podejście rozwinięte przez Landsmana (2020, arXiv:2003.03554), stosujące pojęcie losowości w rozumieniu matematycznej teorii obliczalności. Zdaniem Landsmana mechanika kwantowa jest indeterministyczna, gdyż ciągi wyników pomiarów zadane przez regułę Borna są losowe we wspomnianym sensie. Nie podaje on jednak żadnej konkretnej definicji indeterminizmu, pozostawiając to jako otwarty problem badawczy – zakłada jedynie, że losowość jest dla indeterminizmu warunkiem wystarczającym. Naszym celem będzie właśnie podjęcie tego otwartego problemu, a także rozważenie zasadności wiązania indeterminizmu z losowością (która bywa kwestionowana, zob. np. Eagle 2021, <https://plato.stanford.edu/archives/spr2021/entries/chance-randomness>). Ponadto chcielibyśmy zbadać, jakie jest źródło losowości w przypadku reguły Borna i czy alternatywne warianty mechaniki kwantowej nie zakładające tej reguły również wykazują losowość.