

Indeterminizm mechaniki kwantowej

Nie istnieje reprezentacja funkcji falowej ψ w rzeczywistości empirycznej, dokładniej jest nie mierzalna empirycznie. Funkcja falowa ψ jest jedynie matematycznym konstruktem i należy do formalizmu mechaniki kwantowej [1]. Wyznaczając funkcję falową z równania Schrödingera otrzymujemy funkcję własną operatora. Jak to się ma do rzeczywistości empirycznej? Wspomniałem, że nie istnieje fizyczna reprezentacja funkcji falowej, posługujemy się jedynie kwadratem modułu funkcji, który stanowi gęstość prawdopodobieństwa. Zatem determinizm równania Schrödingera, które jest liniowe i w swym formalizmie deterministyczne, załamuje się [2].

W rzeczywistości dokonując pomiaru, na przykład położenia cząstki, cząstka przyjmuje losowo jeden ze stanów własnych operatora położenia. Taki indeterminizm jest utrzymany w świetle kopenhaskiej interpretacji probabilistycznej. Wiele filozofów i fizyków krytykuje taką interpretację, zarzucając niespójność w kluczowym pojęciu jakim jest obserwacja. Jak możemy przezwyciężyć taki indeterminizm? Ian Stewart pisze w swej książce: “może potrzebujemy jedynie głębszych podstaw matematycznych?” [3]

Problem pomiaru przewija się nieustannie przy mechanice kwantowej. Już sam akt pomiaru zaburza stan badanego układu. Przyrząd pomiarowy należy zarówno do świata makro jak również mikro. Wedle interpretacji pomija się oddziaływanie układu, na przykład z elektronami własnymi narzędzia pomiarowego. W istocie sam pomiar zaburza stan układu, jak już wcześniej napisałem. Problem pomiaru jest związany również ze słynnym paradoksem EPR. Pokażę później jak zagadnienie EPR daje możliwość chaotycznego testowania w zastępstwie indeterminizmu kwantowego. Einstein, Podolski i Rosen zaproponowali pewien eksperyment myślowy, który de facto później doczekał się

przetestowania empirycznego. Rozważmy dwie cząstki, które znajdują się blisko siebie i oddziałują ze sobą. Możemy mierzyć położenia lub pęd tych cząstek. Później, gdy cząstki się rozbiegną, nawet na bardzo dużą odległość, mierzymy pęd jednej z nich, wówczas funkcja falowa pierwszej kurczy się przyjmując pewną konkretną wartość. Jednakże z mechaniki kwantowej wynika, że całkowity pęd obu cząstek zostaje zachowany. W konsekwencji pęd drugiej cząstki również przyjmuje określoną wartość, gdy mierzymy pęd pierwszej [4]. Pomiar pędu jednej cząstki powoduje skurczenie funkcji falowej drugiej, gdyż znamy funkcję falową w całości.

Świadczy to o tym, jakby istniała jakaś przedziwna, natychmiastowa komunikacja między cząstkami. To narusza zasadę lokalności, mówiącą, że nic nie może poruszać się szybciej niż światło. Czy dyskwalifikuje to ową natychmiastową komunikację, czy świadczy o nielokalności mechaniki kwantowej? Eksperyment EPR istnieje w innej wersji przytaczanej przez Hellera [5].

W tym przypadku badamy spiny cząstek. Badając spin pierwszej i otrzymując $+1/2$ wiemy, że spin drugiej równy jest $-1/2$. Wniosek o natychmiastowym przekazaniu informacji jest nieunikniony, jak pisze Heller. Czy możliwa jest jakaś teoria z ukrytymi parametrami, które uzupełniają informację zawartą w funkcji falowej? Paradoks EPR zawiera również słabe punkty. Nie każdy może się zgodzić na ów transfer informacji. Przykładowo Bohr nie widzi żadnej trudności, uważa że nie ma sensu wypowiadać się na temat stanu drugiej cząstki, bez jakiegokolwiek pomiaru. Uważa, że hipotetyczne skurczenie się fali drugiej cząstki nie możemy uważać za transfer informacji. Problem potęgują tak zwane nierówności Bella. Bell zaproponował doświadczenie: mamy źródło cząstek o spinie $-1/2$. Jeden strumień cząstek porusza się na północ a drugi na południe. Cząstki w strumieniach mają taką samą prędkość. Na północy jak i na południu znajdują się dwa urządzenia rejestrujące spin cząstek. Ten północny spinomierz mierzy spin w kierunku do góry, a południowy w kierunku odchyłonym o

pewien kąt A od kierunku spinomierza północnego.

Porównując pomiary obydwu spinomierzów Bell wyznaczył funkcje korelacji wskazującą w jakim stopniu spin cząstek w jednym strumieniu związany jest ze spinem drugich. Powtarzamy eksperyment i wykonujemy pomiar teraz dla kąta B różnego od A. W swoim rozumowaniu Bell założył, że obserwowane wartości spinów nie są losowe, lecz zależą od ukrytych parametrów. Bell na podstawie takiego doświadczenia sformułował nierówność uwzględniającą relacje funkcji korelacji dla kątów A i B. Mając na uwadze teorie ukrytych parametrów, według której stan cząstek nie jest losowy lecz wynika z pewnej wewnętrznej, deterministycznej dynamiki opartej na ukrytych parametrach, Bell doszedł do wniosku, że układ ewoluujący zgodnie z jakąś teorią ukrytych parametrów musi spełniać nierówność. Przeprowadzone eksperymenty jednak wykazały, że owa funkcja korelacji nie spełnia nierówności Bella. Powszechnie zostało to uznane że mechanika kwantowa musi być probabilistyczna [6].

Czy nierówność Bella wyklucza jakąkolwiek teorię ukrytych parametrów? Nierówność ta została sformułowana z założeniem lokalności. Zatem na pewno wyklucza wszystkie deterministyczne, lokalne teorie z ukrytymi parametrami. Chciałbym teraz przedstawić interpretację Bohma, która jak się okaże jest interpretacją z ukrytymi parametrami, lecz jest nielokalna. Bohm próbował w nowy sposób rozwiązać paradoks EPR. Propozycja Bohma to nie tylko interpretacja lecz także propozycja nowej matematyki, mianowicie Bohm przypisał funkcji falowej znaczenie fizyczne. Nie możemy bezpośrednio mierzyć funkcji falowej. Według interpretacji kopenhaskiej stan cząstki jest superpozycją stanów własnych, cząstki spełniają równanie Schrödingera dla funkcji falowej, z wyjątkiem przypadku dokonania pomiaru [7].

Bohm twierdzi, że cząstki spełniają równanie Schrödingera i koniec. Dodał nowe równania określające relację funkcji falowej i ruchu cząstki oraz przyznał uprzywilejowaną rolę położeniom cząstek. Obraz Bohma jest deterministyczny, a

dotychczasowy indeterminizm mechaniki kwantowej jest oznaką niewiedzy obserwatora lub przyrządu. Teoria Bohma wyklucza założenia interpretacji kopenhaskiej zawieszającej prawa natury w chwili pomiaru. Teoria ta utrzymuje klasyczny determinizm, lecz charakteryzuje ją pewien aspekt nielokalności. "Funkcja falowa rozpościera się w całej przestrzeni i natychmiast reaguje na każde oddziaływanie z inną cząstką (...) w interpretacji Bohma funkcja falowa jest realnym obiektem fizycznym" [8]. A wewnętrzna deterministyczna dynamika działa w sposób jaki być może przytacza Heller, jako obraz pilotującej fali [9].

Co więcej zaletą teorii Bohma jest nie tylko utrzymanie klasycznego determinizmu, lecz również zniesienie sztucznego podziału na makro i mikroświat. Problem kopenhaskiej interpretacji: nieciągły skok od deterministycznie ewoluującej funkcji falowej (zgodnie z równaniem) do jedynie statystycznych przewidywań. Teoria Bohma nie redukuje funkcji falowej do cząstki, lecz przyznaje współistnienie cząstki jak i fali [10].

Widzimy teraz sens teorii z ukrytymi parametrami. Co jest istotą owych ukrytych parametrów? Ukryte parametry utrzymują determinizm, są odpowiedzialne za wewnętrzną dynamikę, pozwalają deterministycznie ewoluować układowi.

W przypadku teorii Bohma ukrytymi parametrami są nieobserwowalne szczegóły rzeczywistej funkcji falowej [11].

Chciałbym przytoczyć jeszcze jedną teorię, która utrzymuje klasyczny determinizm w mechanice kwantowej. Oparta jest o teorię chaosu deterministycznego. Musze poczynić na początku krótkie wprowadzenie. Zauważmy podstawowy fakt z historii nauki, mechanika kwantowa została opracowana dużo wcześniej niż teoria chaosu deterministycznego. Dla dowolnego układu deterministycznego (mam na myśli układy mechaniki klasycznej) istnieje układ probabilistyczny, który jest czymś w rodzaju "zgrubnej reprezentacji". Zamiast określić dokładnie w jakim

punkcie przestrzeni fazowej znajduje się układ w danej chwili, możemy obliczyć tylko prawdopodobieństwo. Przypomina to początki mechaniki statystycznej, gdzie próbowano zrozumieć gazy. Na początku sądzono, że dynamika gazów jest probabilistyczna, lecz później okazało się, że prawdopodobieństwa wynikają z niezwykle skomplikowanej deterministycznej dynamiki. Zatem taka teoria mechaniki statystycznej była teorią z ukrytymi parametrami, a ukrytymi parametrami były położenia i prędkości cząstek gazu [12].

Również historia chaosu deterministycznego pokazała jak pozornie skomplikowane i chaotyczne wykresy, czy iteracje generowane są deterministycznie z prostych równań. Należy w tym miejscu poczynić ważne rozróżnienie, chaotyczne zachowanie według teorii chaosu deterministycznego, jest czymś zupełnie innym niż potoczne rozumienie chaosu czy nieprzewidywalność pomiaru w mechanice kwantowej. "Chaotyczny" wykres w teorii chaosu deterministycznie ewoluuje zgodnie z równaniem [13], bądź też pewna pozorna nieprzewidywalność wynika z niesamowitej wrażliwości na warunki początkowe. Być może za regularności pomiaru w mechanice kwantowej odpowiedzialna jest jakaś chaotyczna teoria ukrytych parametrów. Pozostaje pytanie co zrobić z nierównością Bella? Być może można się pozbyć nierówności Bella. Będzie to trudne, gdyż nierówność Bella pozostaje w zgodzie z wszystkimi dotychczasowymi eksperymentami. Staranna analiza ujawnia pewne luki w dowodzie nierówności Bella [14].

Jaka chaotyczna teoria ukrytych parametrów byłaby zadowalająca? Jej chaos musiałby znosić nierówność Bella i jednocześnie pozostać deterministyczny. Przyjrzyjmy się uważniej propozycji jaką nam przedstawia Tim Palmer. Atraktor chaotyczny charakteryzuje się pewnym rodzajem stabilności. Punkt zaburzony w niewielkiej odległości od atraktora powróci do atraktora. My zajmiemy się układem atraktorów, przynajmniej dwóch, z których jeden ma dziurawy obszar przyciągania. W przypadku atraktora o dziurawym obszar przyciągania, będą

istniały punkty, które nie są przyciągane a wręcz odwrotnie – odpychane. Wyobraźmy sobie układ dwóch atraktorów o dziurawych obszarach przyciągania, przy czym obszary przyciągania wzajemnie wypełniają swoje luki. Taki układ dwóch atraktorów o dziurawych obszarach przyciągania jest w dużym stopniu nieprzewidywalny. Rozważając punkty znajdujące się dostatecznie blisko obydwu atraktorów nie możemy przewidzieć na którym z atraktorów wybrany punkt skończy. Zastanówmy się co dzieje się w przypadku układu z większą ilością atraktorów. Sprawa wygląda bardzo skomplikowanie. Układy ze splecionymi obszarami przyciągania są w zasadzie całkowicie deterministyczne, lecz w praktyce nie dają się policzyć [15].

Mając stan początkowy nie możemy obliczyć co będzie się działo, lecz można zrobić obliczenia statystyczne. Można wyznaczyć prawdopodobieństwo dojścia do dowolnego atraktora. Propozycja Palmera polega właśnie na wykorzystaniu takiego układu atraktorów. Taki układ byłby źródłem ukrytych parametrów, określających w jaki sposób stan kwantowy zmienia się, gdy go obserwujemy. "Traktujemy punkt w przestrzeni fazowej ukrytych parametrów jako stan kwantowy przed rozpoczęciem obserwacji, a atraktory ukrytych parametrów jako reprezentacje możliwych stanów własnych. Taka teoria zachowuje determinizm, pozwala na statystyczne obliczenie, wszakże sama jest w praktyce na razie nie policzalna. Co więcej propozycja Palmera znosi nierówność Bella.

Nierówność została wyprowadzona z wykorzystaniem rzeczywistych wartości ukrytych parametrów i porównaniu ich [16]. Wobec tego, iż dynamika ukrytych parametrów jest niepoliczalna wyrażenia te tracą sens, nie można ich porównywać. Palmer w ten sposób wykorzystuje lukę nierówności Bella. Propozycja Palmera rozwiązuje również paradoks EPR. Jeżeli istnieje wewnętrzna dynamika ukrytych parametrów, to elektrony, które pozostawały w bliskim sąsiedztwie i mają zsynchronizowane stany, będą miały zsynchronizowane stany pomimo oddalania, gdyż ewoluują zgodnie z wewnętrzną dynamiką. Jest to coś w

rodzaju dynamicznej pamięci. Oczywiście elektrony spotykają na swojej drodze inne cząstki, z którymi mogą oddziaływać, co w konsekwencji zaburzy ich ewolucję. Jednak propozycja Palmera dobrze rozwiązuje paradoks EPR na poziomie myślowego eksperymentu. Propozycja Palmera pozostaje na razie niepoliczalna, lecz w przeciwieństwie do interpretacji kopenhaskiej posługuje się skomplikowanym deterministycznym mechanizmem, a nie kapryśnym losem. Jak pisze Stewart niekoniecznie natura musi działać w ten sposób, lecz prace Palmera doprowadziły do wniosku, że mimo nierówności Bella deterministyczny model mechaniki kwantowej jest wciąż osiągalny.

1 wyjątek stanowi interpretacja Bohma, który przypisuje funkcji falowej znaczenie fizyczne, Ian Stewart Czy Bóg Gra w Kości?, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 2001, s. 383

2 por. H. G. Schuster Chaos deterministyczny: wprowadzenie, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 1993, s. 212

3 por. Ian Stewart Czy Bóg Gra w Kości?, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 2001, s. 370

4 por. tamże, s. 382

5 por. Michał Heller Wszechświat Otwarty, Universitas, Kraków 2006, s. 185-186

6 por. Ian Stewart Czy Bóg Gra w Kości?, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 2001, s. 390

7 por. tamże, s. 384

8 tamże, s. 386

9 por. Michał Heller Wszechświat Otwarty, Universitas, Kraków 2006, s. 187

10 por. tamże, s. 188

11 por. Ian Stewart Czy Bóg Gra w Kości?, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 2001, s. 388

12 por. Ian Stewart Czy Bóg Gra w Kości?, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 2001, s. 392

13 Ruch chaotyczny, nieregularny, który jest otrzymany z

układu nieliniowego, którego prawa dynamiki jednoznacznie określają ewolucję stanu układu w czasie, H. G. Schuster Chaos deterministyczny: wprowadzenie, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 1993, s. 15

14 por. Ian Stewart Czy Bóg Gra w Kości?, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 2001, s. 394

15 por. tamże, s. 397

Jeżeli potrzebujesz konsultacji przy pisaniu pracy licencjackiej lub magisterskiej, to polecamy serwis [pisanie prac](#) - pomoc w pisaniu prac w granicach dozwolonych prawem