

## Zbigniew Szczęsny: O realizmie w mechanice kwantowej

Licząca sobie już 120 lat mechanika kwantowa jest wciąż obszarem nieustannej konfrontacji naszych intuicji ontologicznych i epistemologicznych z matematyczną spekulacją, a potoczna wizja otaczającej nas rzeczywistości wydaje się w jej świetle mocno niepewna. Chociaż bowiem teoria kwantowa daje nam znakomite wyniki, które pozwalają na nieustanny rozwój technologiczny, to jednocześnie stawia przed nami fundamentalne pytania, na które nie mamy jasnej odpowiedzi – pisze Zbigniew Szczęsny w „Teologii Politycznej Co Tydzień”: „Historiografia nauki i koniec idei postępu”.

*Istnieje rzeczywistość fizyczna niezależna od uzasadnienia i percepcji – Albert Einstein*

Fizyka kwantowa narodziła w wyniku obserwacji niezwyklej własności światła i materii, których nie udawało się jakimkolwiek sposobem wyjaśnić na gruncie fizyki klasycznej. Okazało się, że światło, które wcześniej znano jako zjawisko o naturze czysto falowej, czasami zachowuje się jak cząstka – foton.

W 1924 r. w publikacji pt. *Badania nad teorią kwantową* młody francuski uczony Louis de Broglie wyłożył pewną osobliwą hipotezę:

Fakt, że po wprowadzeniu przez Einsteina fotonów dla fal świetlnych, wiadomo, że światło zawiera cząstki, będące koncentracjami energii, wchodzącymi w skład fali, sugeruje, że wszystkie cząstki, jak np. elektrony, muszą być transportowane w fali, w której skład wchodzi. Moja główna idea polega na rozszerzeniu współistnienia fal z cząstkami, odkrytego przez Einsteina w 1905 w przypadku fotonów światła, na wszystkie cząstki [...] Z każdą cząstką materialną musi być skojarzona pewna fizyczna fala, powiązana ściśle z jej pędem.

Hipoteza ta stała się inspiracją dla Erwina Schrödingera, który na jej podstawie zaproponował w 1926 r. swoje słynne równanie opisujące dynamikę proponowanej przez de Broglie'a fali. Wszystko to pozostałoby zapewne w rejestrach czystej spekulatywności, gdyby nie to, że w 1927 r. hipoteza de Broglie'a została potwierdzona w dwóch niezależnych eksperymentach, w trakcie których została zaobserwowana dyfrakcja elektronów – zjawisko charakterystyczne dla procesów falowych, niedające się wyjaśnić na gruncie teorii czysto korpuskularnej. Falowo-korpuskularna natura materii stała się niezaprzeczalnym faktem, otwierając zarazem wielki problem natury ontologicznej: czym właściwie jest materia, skoro przejawia tak zdumiewające właściwości?

Istota tego pytania sprowadza się do tego, czy jest ona czymś, co istnieje „obiektywnie” – jest „tu i teraz”, czy raczej jest czymś, co kompletnie wymyka się takim kategoriom? Czymś, co się jedynie „objawia” wówczas, kiedy między nią a nami (obserwatorami) dochodzi do interakcji.

## Przeczytaj także: Einstein a Spinoza

W najbardziej lapidarnym ujęciu – w skali mikroświata zatracają się klasyczne pojęcia położenia czy trajektorii ruchu cząstek. Aby ściśle dowiedzieć się, gdzie dana cząstka się znajduje, musimy w jakiś sposób wejść z nią w interakcję, a tym samym doprowadzić do wymiany energii między nią a naszą aparaturą pomiarową. Akt wymiany energii sprawia jednak, że cząstka zmienia swój stan i jej przyszłe położenie staje się pewną niewiadomą. Ta niepewność znajduje ścisłe ujęcie matematyczne w tzw. zasadzie nieoznaczoności.

Na pierwszy rzut oka wydawać by się mogło, że interakcja nie jest tu absolutnie konieczna, ale to pozór. Widać to nawet na gruncie zupełnie klasycznym. Wyobraźmy sobie, że jesteśmy na froncie i w zupełnej mgle znajdujemy się pod ostrzałem karabinu maszynowego, przebywając w murowanym pomieszczeniu z oknem. To okno to już jedynie dziura w murze, przez którą do naszego pomieszczenia wpadają kule, trafiając zawsze dokładnie w jedno miejsce na ścianie. Wiemy zatem, że strzelec jest całkiem nieruchomy i chcielibyśmy wiedzieć, z jakiego kierunku padają strzały, żeby właśnie w tę stronę skierować naszą odpowiedź. Co możemy zrobić? Załóżmy dla uproszczenia, że kule poruszają się po liniach prostych. Kierunek strzału możemy wówczas wyznaczyć, prowadząc linie między śladem kul na ścianie a krawędziami okna. Daje to pewną wiązkę możliwych kierunków, na których znajduje się strzelec. Nasz szacunek będzie tym lepszy, im mniejsze jest okno. Jeśli kule wpadają przez malutki otwór okienny, to właściwie wystarczy poprowadzić linię między nim a śladem kul na ścianie i wszystko wiadomo! Ale czy na pewno? Kiedy ten otwór okienny jest zupełnie mały, a mimo to kule przez niego przelatują, to co się stanie? Wiele z nich będzie w ten czy inny sposób zahaczać o

jego krawędzie i odbijać się od nich, czego skutkiem będzie to, że na przeciwległej ścianie nie zobaczymy już jednego miejsca, w które trafiają kule, ale wiele śladów w różnych miejscach, co wynika z tego, że po rykoszecie od krawędzi otworu kule zmieniają trajektorię lotu. W ten sposób tracimy możliwość dokładnego wyznaczenia kierunku strzelca – od pewnego momentu tym bardziej tę możliwość tracimy, im bliższy średnicy kul jest otwór, przez który wpadają.

W świecie kwantowym ta zasada staje się matematycznie ścisła i ma charakter fundamentalny – aby cokolwiek dowiedzieć się o pozycji cząstki elementarnej musimy w ten czy inny sposób wymienić się z nią energią. Im dokładniej chcemy tę pozycję ustalić, tym większa musi być ta porcja wymienianej energii a im lżejsza, tym mniej pewna staje się jej trajektoria. Pozostaje jednak zasadnicze pytanie – czy pomimo tego, że ustalenie trajektorii cząstki podlega temu fundamentalnemu ograniczeniu, to ona jednak porusza się po jakiejś „obiektywnej” trajektorii, a my jedynie nie wiemy jakiej, czy raczej samo pojęcie trajektorii nie ma tu zastosowania a cząstki jedynie „manifestują” niekiedy swoją obecność, pozostając poza tym czymś nieokreślonym, pozbawionym ontologicznego sensu?

Jest to właśnie wspomniany w tytule problem realizmu we współczesnej fizyce kwantowej i nie jest to problem trywialny. Sęk w tym, że mechanikę kwantową można matematycznie sformułować na wiele dość równoważnych sposobów różniących się jedynie co do wygody stosowania danego aparatu. Sformułowania bazujące na realizmie określa się tu mianem „teorii ukrytych zmiennych”, a najważniejsza z nich została zapoczątkowana właśnie przez Louisa de Broglie’a i rozwinięta w latach 60-tych minionego wieku przez amerykańskiego fizyka Davida Bohma. Termin „ukryte zmienne”

wynika właśnie z tego, że teorie te zakładają realne istnienie parametrów, które są dla nas obserwacyjnie niedostępne – w szczególności chodzi o trajektorie cząstek.

### **Przeczytaj także: Karl Popper a fizyka współczesna**

Sformułowaniem mechaniki kwantowej odrzucającym w pełni realizm jest tzw. „interpretacja kopenhaska”, która jest obecnie wśród fizyków kwantowych poglądem zdecydowanie dominującym. Tutaj uczeni przyjmują formalizm posługujący się wyłącznie językiem prawdopodobieństwa i statystyki. W jego ramach, dopóki nie dokona się pomiaru stanu układu kwantowego, nie istnieje on w klasycznym sensie, ale wyłącznie jako pewien wachlarz możliwości odpowiadających każdemu możliwemu wynikowi pomiaru – tzw. superpozycja. Pomiar, czyli właśnie interakcja układu ze światem zewnętrznym „konkretyzuje” układ kwantowy, który objawia się wówczas w dobrze już określonym stanie z prawdopodobieństwem wskazanym przez opisującą go funkcję falową Schrödingera. Taki punkt widzenia jest dla nas mocno nienaturalny – nic dziwnego, że znalazł anegdotyczny wyraz w opowieści o „kocie Schrödingera”, który siedzi zamknięty w pudle równocześnie żywy i martwy, dopóki ktoś pudła nie otworzy. Wówczas następuje „kolaps” superpozycji stanów kwantowych kota w jeden z dwóch wariantów i obserwator znajduje go jeszcze żywego lub już martwego. Jakby to trywialnie nie zabrzmiało, to właśnie taki punkt widzenia prowadzi do na najbardziej eleganckiej formy matematycznej a w efekcie – do najprostszych rachunków, które dają zarazem jak najbardziej wiarygodne wyniki. Tymczasem sformułowania „realistyczne” prowadzą do ogromnych matematycznych komplikacji, w wyniku czego rachunki są „wylizalne” jedynie dla bardzo prostych przypadków.

Jednak niepewny status ontologiczny świata wynikający z interpretacji kopenhaskiej zawsze był kontestowany i różni uczeni próbowali znaleźć wyjście z impasu. Jednym z najoryginalniejszych dokonań na tym polu jest koncepcja amerykańskiego fizyka Hugh Everetta, który w 1956 r. opublikował pracę pt. *Teoria uniwersalnej funkcji falowej*. Zdaniem Everetta problem z interpretacją kopenhaską jest taki, że swoją obliczeniową prostotę uzyskuje za sprawą niepisanej uproszczenia polegającego na tym, że traktuje badany układ kwantowy jako izolowany – wychodzi on z tej izolacji dopiero pod wpływem „obserwacji”, czyli oddziaływania z innym układem kwantowym zwanym „obserwatorem”. Everett uważa, że to uproszczenie jest epistemologicznie fałszywe. Według niego funkcja falowa od początku musi uwzględniać istnienie obserwatora. Wówczas nie ma żadnego jej tajemniczego „kolapsu”, gdyż zmiana stanu kwantowego dotyczy zarówno badanego układu, jak samego obserwatora. Jednak „obserwator” jako taki również nie jest izolowany, a jest częścią układu kwantowego obejmującego jego otoczenie, które także nie jest izolowane itd. W efekcie – sensowne jest jedynie mówienie o funkcji falowej całego Wszechświata, która jest jaka jest i w ogóle nie jest żadną „superpozycją”. Każdy pojedynczy Wszechświat istnieje jako izolowana „banieczka” wśród niepoliczalnej ich liczby w „Multiwersum” i realizuje określoną – „konkretną” wersję funkcji falowej. O kwantowej superpozycji można zatem mówić jedynie w kontekście owego „Multiświata”, natomiast poszczególne jego „Kosmosy” są już w pełni realistyczne. W jednym Wszechświecie „kot Schrödingera” od początku był żywy a w innym – od początku martwy. W pewnym sensie interpretacja Everetta jest zatem „metateorią” umieszczającą teorię kwantową w zupełnie innym (meta)fizycznym kontekście.

Koncepcja ta stała się znana jako „hipoteza wielu światów” i spotkała się z ostrą krytyką ze strony Nielsa Bohra i innych zwolenników interpretacji kopenhaskiej. Ich zadaniem niczego nie wносиła a ontologicznie była jeszcze mniej prawdopodobna niż pogląd dominujący. Jednak ziarno zostało zasiane i rozważania Everetta na temat „uniwersalności” funkcji falowej – już w oderwaniu od koncepcji Wieloświata – stały się punktem wyjścia dla rozwoju jednej z najbardziej intensywnie dziś rozwijanych teorii: tzw. teorii dekoherencji. Światowej sławy ekspertem w tej dziedzinie jest działający w USA polski fizyk Wojciech Hubert Żurek. Teoria dekoherencji jest dziś jednym z wiodących kierunków realizmu w obszarze mechaniki kwantowej.

Na wagę zagadnienia realizmu w fizyce kwantowej wielki wpływ miał „eksperyment myślowy” przeprowadzony w 1935 r., który przeszedł do historii pod nazwą paradoksu Einsteina-Podolskiego-Rosena (tzw. paradoks EPR). Uczeń ci zauważyli, że interpretacja kopenhaska dopuszcza superpozycję w ramach układu złożonego z kilku składowych. Może być, że chociaż składowe te początkowo znajdowały się blisko siebie, to z czasem znacząco się od siebie oddaliły. Mimo tego, z kopenhaskiej interpretacji mechaniki kwantowej wynika, że jeśli w wyniku obserwacji zostanie określony stan jednej części takiego złożonego układu, to zmiana ta musi być NATYCHMIAST odzwierciedlona w drugiej, niezależnie od dzielącej dwie części odległości. Zdaniem Einsteina przeczyło to jego teorii względności, gdyż oznaczało, że w ostateczności informacja o zmianie byłaby przekazywana szybciej niż światło! Na tej podstawie Einstein twierdził, że mechanika kwantowa w interpretacji kopenhaskiej jest teorią niekompletną, gdyż z pewnością pomija jakieś „ukryte zmienne”. Postulowana przez nią natychmiastowość zmiany stanu kwantowego

jednej części układu w wyniku zmiany stanu drugiej oznacza bowiem, że jest ona teorią „nielokalną” – dopuszcza natychmiastowe korelacje między oddalonymi fragmentami.

### **Przeczytaj także Michał Heller: Romantyczny język nauki**

Szybko zauważono, że w istocie nie mamy tu do czynienia z przepływem jakiegoś sygnału, lecz jedynie właśnie z korelacją. Trudno zatem mówić o wymianie informacji – żaden z obserwatorów nie zna przecież „początkowego” stanu kwantowego danego fragmentu, dopóki nie dokona pomiaru. Nie może zatem wiedzieć, że coś się zmieniło – żadna informacja o zmianie nie jest tu przekazywana. Jednak pomiar dokonany na jednym fragmencie wymusza wynik pomiaru na drugim. Obserwatorzy mogą zatem już zupełnie „klasyczną” drogą wymieniać się informacją o uzyskanych wynikach, co pozwala im stwierdzić, czy faktycznie były one skorelowane czy nie. Już w tym samym 1935 r. spostrzeżenia tego dokonała niemiecka badaczka Grete Hermann, lecz niestety nie zostało ono zauważone przez społeczność naukową. Dopiero w 1964 r. spostrzeżenia tego dokonał ponownie północnoirlandzki fizyk John Steward Bell i nadał mu ścisłą formę matematyczną znaną dziś jako tzw. nierówność Bella. Wynika z niej, że jeśli stany kwantowe faktycznie są większe (czyli są częścią większego układu kwantowego będącego ich superpozycją), to korelacja wyników otrzymanych przez dwóch odległych od siebie obserwatorów będzie zawsze większa niż w przypadku, jeśli te stany kwantowe nie byłyby splątane. W kolejnych latach jego wyniki zostały eksperymentalnie potwierdzone a dziś stały się podstawą tzw. kryptografii kwantowej umożliwiającej całkowicie pewne stwierdzenie, czy wymieniana poufny kanałem informacja została „po drodze” odczytana przez stronę trzecią. Prowadzi to do wniosku, że żadna lokalna teoria „zmiennych ukrytych” nie może opisać wszystkich zjawisk mechaniki

kwantowej. Mechanika kwantowa jest zatem albo teorią nielokalną (dopuszczającą natychmiastowe korelacje) albo żadne „zmiennne ukryte” nie istnieją, czyli nie jest teorią realistyczną. Niewykluczone też, że nie jest ani lokalna, ani realistyczna.

W ostatnich dekadach obserwuje się znaczący wzrost zainteresowania realistycznymi ujęciami mechaniki kwantowej. Pojawiły się nowe idee, jak np. opracowana przez w 1986 r. przez Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini i Tullio Weber – tzw. teoria kolapsu spontanicznego. Jest ona uważana za szczególnie interesującą, gdyż wynika z niej możliwość eksperymentalnego potwierdzenia jej założeń – dla pewnych eksperymentów przewiduje uzyskanie znacząco innych wyników niż przewiduje interpretacja kopenhaska. Jej wadą jest jednak to, że w obecnym kształcie nie uwzględnia ona efektów relatywistycznych, co znacząco ogranicza jej zastosowanie. Z kolei słynny fizyk brytyjski Roger Penrose proponuje alternatywną koncepcję „kolapsu obiektywnego”, która chociaż zakłada, że pozycje i trajektorie cząstek są jak najbardziej realistyczne, to zarazem obiekty mikroskopowe – takie jak elektron – mogą istnieć równocześnie w wielu miejscach. Być może zatem we Wszechświecie jest tak naprawdę tylko jeden elektron, który jednak ma wiele „inkarnacji”...

Licząca sobie już 120 lat mechanika kwantowa jest zatem wciąż obszarem nieustannej konfrontacji naszych intuicji ontologicznych i epistemologicznych z matematyczną spekulacją, a potoczna wizja otaczającej nas rzeczywistości wydaje się w jej świetle mocno niepewna. Chociaż bowiem teoria kwantowa daje nam znakomite wyniki, które pozwalają na nieustanny rozwój technologiczny, to jednocześnie stawia przed nami fundamentalne pytania, na które nie mamy jasnej odpowiedzi.

*Zbigniew P. Szczęsny*

**Wszystkie artykuły z „Teologii Politycznej Co Tydzień” [507]:  
„Historiografia nauki i koniec idei postępu”**