

# Andrzej Łukasik

---

## Mechanika kwantowa a zdrowy rozsądek

---

Filozofia Nauki 18/2, 97-111

---

2010

Artykuł został opracowany do udostępnienia w internecie przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego. Artykuł jest umieszczony w kolekcji cyfrowej [bazhum.muzhp.pl](http://bazhum.muzhp.pl), gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.

Andrzej Łukasik

## **Mechanika kwantowa a zdrowy rozsądek**

Prawa [...] fizyczne mają jedną dziwną cechę — im bardziej wzrasta ich ogólność, tym stają się odleglejsze od zdroworozsądkowych przekonań i intuicyjnie coraz mniej zrozumiałe. [...] Musimy maksymalnie wyteżać wyobraźnię, nie po to, żeby odwrotnie niż w literaturze, wyobrazić sobie rzeczy, których naprawdę nie ma, ale by zrozumieć to, co naprawdę istnieje.

Richard P. Feynman<sup>1</sup>

### **WSTĘP**

Jednym z zagadnień, które fascynowało Helenę Eilstein, było to, że rozwój nauk empirycznych prowadzi nie tylko do wzbogacenia obrazu świata i coraz skuteczniejszego opanowania przyrody, ale ukazuje jednocześnie pewne granice poznania. Zajmowała bliskie mi stanowisko realizmu naukowego, łącząc go jednocześnie z „umiarkowanym optymizmem poznawczym”. Pogląd ten głosi, że chociaż nauka charakteryzuje się jak dotąd postępowaniem, to jednak charakterystyczne dla nauki jest występowanie pewnych przeszkód na drodze owego postępu, które uwarunkowane są „zarówno naturą poznania naukowego, jak zależnością jego rozwoju od innych składników życia społecznego i kultury”.<sup>2</sup> Pisała w związku z tym, że

---

<sup>1</sup> R. P. Feynman, *Charakter praw fizycznych*, tłum. P. Ansterdamski, Prószyński i S-ka, Warszawa 2000, s. 135-136.

<sup>2</sup> H. Eilstein, *Uwagi o granicach potencji poznawczej podmiotu naturalnego*, [w:] E. Kałuszyńska (red.), *Podmiot poznania z perspektywy nauki i filozofii*, Wyd. IFiS PAN, Warszawa 1998, s. 42.

[j]est rzeczą charakterystyczną dla współczesnej nauki empirycznej, że ustala ona (oczywiście hipotetycznie) przynajmniej pewne granice swojej mocy poznawczej. Właśnie na podstawie pewnych uznawanych obecnie za dobrze uzasadnione hipotez empirycznych zmuszeni jesteśmy niejednokrotnie uznać, że [...] sam ustrój rzeczywistości nakłada ograniczenia na warunki, w jakich mogą istnieć i działać takie podmioty, i na skuteczność ich zabiegów poznawczych.<sup>3</sup>

W swoich pracach analizowała m.in. podmiotowe ograniczenia poznawcze związane z biologicznymi uwarunkowaniami gatunku *homo sapiens*, ludzką kulturą (w tym względami etycznymi), jak również ograniczenia przedmiotowe wynikające ze struktury rzeczywistości fizycznej ukazywanej przez współczesne teorie naukowe. Podkreślała również, nieczęsto eksponowany w filozofii nauki fakt, że olbrzymie koszty „wzbogacenia materiału doświadczalnego i przerobu uzyskiwanych informacji charakteryzujący zaawansowane poznawczo stadia nauki”<sup>4</sup> (np. budowa niezmiernie kosztownych urządzeń, takich jak akceleratory i detektory cząstek elementarnych czy sondy kosmiczne) stanowią czynnik ograniczający możliwość testowania hipotez empirycznych, co powinno znaleźć odzwierciedlenie we współczesnych refleksjach nad poznaniem naukowym.

Artykuł ten jest przyczynkiem do ukazania pewnych ograniczeń poznawczych naturalistycznie rozumianego podmiotu poznającego, przejawiających się w nieadekwatności sądów zdrowego rozsądku w stosunku do świata takiego, jakim przedstawia go mechanika kwantowa. Ponieważ zdrowy rozsądek może być utożsamiony z elementarną racjonalnością, ograniczenia ważności sądów zdrowego rozsądku w tej dziedzinie mogą być uznane za pewne ograniczenia ludzkiej racjonalności.

### CZY PRZYRODA MOŻE BYĆ ABSURDALNA?

Oczywiście, takie kategorie, jak racjonalność, racjonalizm czy irracjonalizm (zatem i ich przeciwieństwa) są przede wszystkim kategoriami epistemologicznymi — stosowane są więc w odniesieniu do czynności i rezultatów poznawczych. W filozofii przyrody jednak używa się niekiedy kategorii racjonalności w pewnym metaforycznym sensie w odniesieniu do samego świata, a nie tylko do ludzkiego poznania. Na przykład Michał Heller twierdzi, że podstawowym („milcząco przyjmowanym”) założeniem filozofii przyrody i nauk empirycznych jest założenie racjonalności przyrody, to znaczy przypisanie jej pewnej własności, dzięki której poddaje się ona badaniom. „Jest sens zwracać się do przyrody z racjonalnymi pytaniami tylko wtedy, gdy oczekuje się, że udzieli ona racjonalnych odpowiedzi”.<sup>5</sup> Twierdzenie, że przyroda jest racjonalna, znaczy więc przynajmniej tyle, że przyroda jest poznawalna dla ludzkiego umysłu. Od XVII wieku ukształtowało się ponadto przeświadczenie, że

<sup>3</sup> H. Eilstein, *Sądy opisowe i oceniające*, w: M. Czarnocka (red.), *Dziedzictwo logicznego empiryzmu*, Wydawnictwo IFiS PAN, Warszawa 1995, s. 77.

<sup>4</sup> H. Eilstein, *Uwagi...*, s. 52.

<sup>5</sup> M. Heller, *Filozofia przyrody. Zarys historyczny*, Znak, Kraków 2004, s. 224-225.

owa racjonalność ma specyficzny charakter, to znaczy jest typu matematycznego — przyroda okazuje się efektywnie poznawalna za pomocą metod matematycznych. Zastosowanie matematycznego opisu zjawisk było początkiem nauki nowożytnej i jednocześnie początkiem sukcesów w poznaniu i opanowaniu przyrody. Owa „niepojęta skuteczność matematyki”<sup>6</sup> budziła podziw i zdumienie wielu uczonych. „Jak to możliwe — pisał Albert Einstein — aby matematyka, będąca przecież produktem ludzkiego myślenia niezależnym od wszelkiego doświadczenia, tak doskonale pasowała do przedmiotów rzeczywistości?”<sup>7</sup>

Niezależnie od tego, jakiej odpowiedzi udzielilibyśmy na to pytanie (czy jest to cecha jedynie ludzkiego umysłu, cecha samego świata czy też po prostu „cudowny dar, którego nie rozumiemy”<sup>8</sup>), faktem jest, że świat przyrody daje się skutecznie badać za pomocą matematyki. Jest to prawda zarówno w odniesieniu do fizyki klasycznej, jak i kwantowej. W nauce klasycznej jednak matematyczny opis zjawisk dostarczał również elementów obrazu świata, które układały się w racjonalną (czyli zrozumiałą) całość. Klasyczny obraz świata charakteryzował się ponadto w bardzo dużej części poglądowością i był zasadniczo zgodny z naszymi zdroworozsądkowymi przekonaniem.

W mechanice kwantowej, która dotyczy świata atomów i cząstek elementarnych niezmiernie odległego od świata naszego bezpośredniego doświadczenia, matematyka również pełni podstawową rolę — na dobrą sprawę (poza eksperymentem) jedyny dostęp poznawczy do mikroświata daje nam właśnie matematyka.<sup>9</sup> Sukcesy mechaniki kwantowej można więc potraktować jako potwierdzenie tezy o (matematycznej) racjonalności przyrody. Problem polega jednak na tym, że mechanika kwantowa ukazuje tak zdumiewające własności mikroświata, że choć poddają się one matematycznemu opisowi, to jednak zdecydowanie wykraczają poza naszą wyobraźnię, a nawet poza możliwość zrozumienia. Co więcej, z punktu widzenia zdrowego rozsądku wiele aspektów mikroświata robi na nas wrażenie absurdalnych.

Nieadekwatność zdroworozsądkowych przekonań w odniesieniu do mikroświata wzbudzała zdumienie już wśród twórców mechaniki kwantowej. Werner Heisenberg pisał:

Przypominam sobie wielogodzinne, przeciągające się do późnej nocy dyskusje z Bohrem, które doprowadzały nas niemal do rozpacz. [...] [c]zy przyroda może być rzeczywiście aż tak absurdalna, jak to się nam wydaje, gdy rozważamy wyniki doświadczalnych badań zjawisk atomowych?<sup>10</sup>

<sup>6</sup> E. Wigner, *Niepojęta skuteczność matematyki w naukach przyrodniczych*, tłum. J. Dembek, „Zagadnienia filozoficzne w nauce” 1991, XIII, s. 5.

<sup>7</sup> A. Einstein, *Geometria a doświadczenie*, [w:] S. Butryn (red.), *Albert Einstein. Pisma filozoficzne*, tłum. K. Napiórkowski, Wydawnictwo IFiS PAN, Warszawa 1999, s. 51.

<sup>8</sup> E. Wigner, *Niepojęta...*, s. 16.

<sup>9</sup> Por. M. Heller, *Mechanika kwantowa dla filozofów*, Biblos, Kraków 1996, s. 17.

<sup>10</sup> W. Heisenberg, *Fizyka a filozofia*, tłum. S. Amsterdamski, Książka i Wiedza, Warszawa 1965, s. 23-24.

Niels Bohr twierdził nawet, że jeśli ktoś „nie jest w pierwszej chwili przerażony teorią kwantów, to przecież niemożliwe, żeby ją zrozumiał”.<sup>11</sup>

Znany jest pogląd, że radykalnie nowa teoria naukowa rodzi się zawsze jako herezja. Na przykład zarówno twierdzenie Kopernika o ruchu Ziemi, jak i twierdzenia Einsteina o względności czasu, przestrzeni i równoczesności zdarzeń wydawały się wielu uczonym (i filozofom) absurdalne na gruncie przyjmowanych wówczas paradygmatów. Współcześnie twierdzenia teorii przyrodniczych, rewolucyjnych w swoim czasie, stanowią na ogół powszechnie przyjęte elementy światopoglądu wykształconego człowieka. Problem z mechaniką kwantową polega jednak na tym, że ponad osiemdziesiąt lat rozwoju tej teorii, choć przyniosły one niewątpliwy postęp w teoretycznym poznaniu i praktycznym opanowaniu mikroświata, to nie doprowadziły, jak dotąd, do przezwyciężenia poczucia „absurdalności przyrody”. Richard P. Feynman wyraził ten stan rzeczy dobitnie: „nikt nie rozumie mechaniki kwantowej”.<sup>12</sup> Jak bowiem pogodzić ze zdrowym rozsądkiem takie osobliwości mikroświata, jak dualizm korpuskularno-falowy, superpozycja stanów, redukcja wektora stanu podczas pomiaru i nielokalność?

### **KWANTOWA SCHIZOFRENIA, CZYLI DUALIZM KORPUSKULARNO-FALOWY**

Obraz świata fizyki klasycznej był prosty i zasadniczo zgodny z naszymi zdroworozsądkowymi przekonaniem na temat rzeczywistości fizycznej. Charakteryzował się ponadto poglądowością. Pojmowano przestrzeń i czas jako niezmiennie tło zdarzeń, które ostatecznie sprowadzały się do ruchu cząstek i fal promieniowania. Pojęcia cząstki i fali używane w mechanice klasycznej są idealizacjami przedmiotów dostępnych w bezpośrednim doświadczeniu zmysłowym, takich jak małe drobiny materii czy fale na wodzie. Cząstki są obiektami dyskretnymi (mikroskopijnymi ciałami stałymi), są dobrze zlokalizowane w czasoprzestrzeni i poruszają się po jednoznacznie określonych trajektoriach, są rozróżnialnymi indywiduami i mają atrybut nieprzenikliwości, co znaczy, że dwie cząstki nie mogą zajmować w tym samym czasie tego samego obszaru przestrzeni. Fale są obiektami ciągłymi i nie można ich zlokalizować w dowolnie małym obszarze czasoprzestrzeni. Ponadto dwie fale mogą istnieć jednocześnie w tym samym obszarze przestrzeni, czyli mogą ulegać interferencji. Jest to charakterystyczna własność fal — z punktu widzenia mechaniki klasycznej niemożliwe jest, by cząstki ulegały interferencji. Cząstki w fizyce klasycznej pojmowano jako obiekty samoistne, czyli rzeczy, charakteryzujące się autonomią bytową, fale zaś traktowano jako drgania układu złożonego z wielu cząstek lub zaburzenia eteru.

<sup>11</sup> W. Heisenberg, *Część i całość. Rozmowy o fizyce atomu*, tłum. K. Napiórkowski, PIW, Warszawa 1987, s. 260.

<sup>12</sup> R. P. Feynman, *Charakter...*, s. 137.

W mechanice kwantowej używa się zarówno korpuskularnego, jak i falowego opisu zjawisk w kombinacji, jaka nie występuje w mechanice klasycznej.<sup>13</sup> Einstein, formułując teorię zjawiska fotoelektrycznego (1905), założył, że promieniowanie elektromagnetyczne, które dotąd traktowano jako ciągłą falę elektromagnetyczną, jest w rzeczywistości strumieniem cząstek, nazwanych później fotonami. Energia fotonów jest proporcjonalna do częstości fali ( $E = h\nu$ ), a ich pęd  $p$  związany jest z długością fali  $\lambda$  wzorem:  $p = h/\lambda = h\nu/c$ , gdzie  $h$  jest stałą Plancka. Louis Victor de Broglie wprowadził następnie koncepcję fal materii (1924), zgodnie z którą z każdą cząstką o pędzie  $p$  stowarzyszona jest fala materii o długości  $\lambda = h/p$ . Fakt, że światło i materia pewnych zjawiskach wykazują własności charakterystyczne dla fal, w innych natomiast wykazują własności charakterystyczne dla cząstek, określono mianem dualizmu korpuskularno-falowego.

Problem polega na tym, że zgodnie z mechaniką kwantową falowy aspekt materii i promieniowania nie jest związany z kolektywnym zachowaniem układu wielu cząstek (jak na przykład fale na wodzie), ale pojedyncze mikroobiekty wykazują własności charakteryzujące zarówno dla cząstek, jak i dla fal. Jednak z punktu widzenia fizyki klasycznej (zgodnego z przekonaniem zdroworozsądkowymi) ten sam obiekt nie może być zarazem cząstką i falą.

Trudności pojęciowe dotyczące dualizmu korpuskularno-falowego najlepiej ilustruje sławny eksperyment z dwiema szczelinami, który — jak pisze Feynman — „zawiera w sobie wszystkie tajemnice mechaniki kwantowej”.<sup>14</sup>

Załóżmy, że ze źródła  $Z$  emitowane są cząstki (np. elektrony lub fotony), które przechodzą przez przesłonę z dwiema wąskimi szczelinami  $S_1$  i  $S_2$ , a następnie docierają do ekranu  $E$ , na którym zostawiają ślady w miejscach, w których trafiły w ekran. Cząstki możemy przepuszczać przez układ pojedynczo, tak, że w danym czasie tylko jedna cząstka przechodzi przez przesłonę i trafia w ekran. Za każdym razem cząstka wyemitowana ze źródła trafia w ściśle określone miejsce na ekranie, zostawiając wyraźny ślad. To upoważnia nas do twierdzenia, że elektrony lub fotony są właśnie cząstkami, czyli obiektami dobrze zlokalizowanymi w przestrzeni. Jednak gdy przez układ przepuścimy setki lub tysiące cząstek, na ekranie pojawia się charakterystyczny obraz interferencyjny, dokładnie taki, jakby przez układ dwóch szczelin przechodziły fale i ulegały interferencji. O interferencji można mówić jedynie wówczas, gdy są przynajmniej dwa źródła fal (w tym przypadku szczeliny  $S_1$  i  $S_2$ ), co oznacza oczywiście, że fala przechodzi jednocześnie przez dwie szczeliny. Na ekranie obserwujemy jednak za każdym razem wyraźny ślad, świadczący o tym,

<sup>13</sup> Por. A. Łukasik, *Atomizm dawniej i dziś. O niewspółmierności ontologicznej klasycznego i kwantowomechanicznego pojęcia elementarnych składników materii*, „*Studia Philosophiae Christianae*” 2009, 45, 1, s. 133-162. Szczegółowe analizy rozmaitych aspektów osobliwości kwantowomechanicznego pojęcia obiektów fizycznych por. E. Castellani (ed.), *Interpreting Bodies. Classical and Quantum Objects In Modern Physics*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey 1998.

<sup>14</sup> R. P. Feynman, *Charakter...*, s. 138.

że do ekranu dotarła cząstka. Ale cząstka — zgodnie z fizyką klasyczną i zdrowym rozsądkiem powinna przejść albo przez jedną szczelinę, albo przez drugą. Gdyby jednak tak było w rzeczywistości, to na ekranie nie pojawiłby się obraz interferencyjny. Zatem twierdzenie, że niepodzielna cząstka musiała przejść albo przez szczelinę  $S_1$ , albo przez szczelinę  $S_2$  jest fałszywe.

Z matematycznego punktu widzenia opis eksperymentu nie sprawia najmniejszych problemów, lecz jego rezultaty godzą niewątpliwie w nasze zdroworozsądkowe przekonania, że jeden niepodzielny obiekt (a elektrony niewątpliwie są niepodzielne, o czym świadczą wszystkie dotychczas wykonane eksperymenty, wskazujące na to, że zawsze rejestrujemy obiekt o ściśle określonych wartościach masy i ładunku elektrycznego) w jakimś sensie znajduje się równocześnie w różnych miejscach przestrzeni (precyzyjniej należałoby powiedzieć, że można określić prawdopodobieństwo znalezienia elektronu w pewnym obszarze przestrzeni). Wiadomo, że w mechanice kwantowej, jeśli jakiś proces może zajść na przykład na dwa sposoby, opisane zespolonymi amplitudami prawdopodobieństwa (np. amplituda prawdopodobieństwa tego, że elektron przechodzi przez szczelinę  $S_1$ , amplituda prawdopodobieństwa tego, że elektron przechodzi przez szczelinę  $S_2$ ), to w celu poprawnego opisu zjawiska należy dodać do siebie odpowiednie amplitudy prawdopodobieństwa, a następnie obliczyć prawdopodobieństwo trafienia cząstki w pewien punkt ekranu (zgodnie z interpretacją fizycznego znaczenia wektora stanu podaną przez Maxa Borną). Sposób, w jaki poruszają się „cząstki” kwantowe, radykalnie wykracza poza nasze zdroworozsądkowe wyobrażenia, ukształtowane na podstawie obserwacji świata makroskopowego. Elektrony docierają do ekranu w całości, tak jak cząstki, „ale prawdopodobieństwo rejestracji elektronów jest określone takim wzorem jak natężenie fali. W tym sensie elektron zachowuje się jednocześnie jak cząstka i jak fala”.<sup>15</sup>

Dodajmy, że można wprawdzie stwierdzić, czy elektron przeszedł przez szczelinę  $S_1$  czy też przez szczelinę  $S_2$  (umieszczając w pobliżu szczelin odpowiednie detektory), ale wówczas zmieniamy warunki eksperymentu tak, że znika obraz interferencyjny. Interferencję zaobserwowano nie tylko dla elektronów i fotonów, ale również dla fulerenów, czyli całkiem dużych cząstek złożonych z 60 albo 70 atomów węgla.<sup>16</sup>

Dualizm korpuskularno-falowy Louis V. de Broglie określił jako „wielki dramat współczesnej fizyki” i „sprzeczność z podstawowymi intuicjami fizycznymi”.<sup>17</sup> In-

<sup>15</sup> R. P. Feynman, *Charakter...*, s. 147.

<sup>16</sup> Biorąc pod uwagę, że same atomy węgla są systemami złożonymi, znaczy to, że interferencja obserwowalna jest również dla bardzo skomplikowanych układów (por. np. A. Zeilinger, *Why The quantum? „It” from „Bit”? A Participatory Universe? The Far-reaching Challenges from John Archibald Wheeler and their Relation to Experiment*, [w:] J. D. Barrow, P. C. Davies, Ch. L. Harper, Jr, *Science and Ultimate Reality. Quantum Theory, Cosmology, and Complexity*, Cambridge University Press, Cambridge 2004, s. 211-213.

<sup>17</sup> L. V. de Broglie, *Czy fizyka kwantowa pozostanie indeterministyczna?*, tłum. St. Rouppert, [w:] *Zagadnienia filozoficzne mechaniki kwantowej i teorii względności*, PWN, Warszawa 1955, s. 110.

tuicyjnie oczywiste wydaje się, że albo mamy do czynienia z obiektem dobrze zlokalizowanym przestrzennie, czyli z cząstką, albo ze zjawiskiem falowym, a fala jest rozprzestrzeniona w pewnym obszarze, ale nigdy jedno i drugie zarazem, gdyż oznaczałoby to przypisanie przedmiotom fizycznym cech wykluczających się nawzajem.

Odpowiedzią Nielsa Bohra była sformułowana przez niego zasada komplementarności.<sup>18</sup> Stwierdza ona, że dwa klasycznie wykluczające się opisy zjawiska fizycznego są komplementarne, jeżeli dla poznania całości potrzebne są obydwa, ale znajomość jednego aspektu wyklucza równoczesną znajomość drugiego.<sup>19</sup> Komplementarne opisy uzupełniają się i wyczerpują wszelką możliwą wiedzę o układzie. Opis falowy i opis korpuskularny zdają sprawę z równie ważnych aspektów zjawisk atomowych i nie ma między nimi sprzeczności, ponieważ zastosowanie mechanicznych pojęć cząstki i fali odnosi się do wzajemnie wykluczających się układów doświadczalnych.<sup>20</sup>

Z zasady komplementarności wynika jednak, że mikroświat na zawsze pozostanie dla nas niewyobrażalny, ponieważ klasycznych obrazów kwantowej rzeczywistości nigdy nie uda nam się złożyć w taką całość, jak w fizyce klasycznej. Nie możemy opisać tego, co się dzieje między jedną obserwacją a drugą, ponieważ opis rezultatów doświadczenia musi być wyrażany w języku fizyki klasycznej. Wiemy jednocześnie, że zakres stosowalności tych pojęć, w szczególności zaś zakres stosowalności pojęć „cząstka” i „fala”, jest ograniczony. „Światło i materia — pisze Heisenberg — są jednolitymi zjawiskami fizycznymi, ich pozorna dwoista natura ma swe źródło w istotnej nieudolności naszego języka”.<sup>21</sup> Pewną klasę eksperymentów możemy opisać tak, jakby obiekty kwantowe były cząstkami, inną zaś — tak, jakby były falami. Jeżeli jednak usiłujemy stosować te pojęcia do samych makroobiektów, niezależnie od opisu konkretnej sytuacji eksperymentalnej, to nieuchronnie natrafiamy na paradoksy przeczące naszemu zdroworozsądkowemu pojmowaniu świata.<sup>22</sup>

---

<sup>18</sup> Por. N. Bohr, *The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory*, Supplement to „Nature” 1928, nr 121 (April 14), s. 580-590.

<sup>19</sup> Por. N. Bohr, *On the Notions of Causality and Complementarity*, „Dialectica” 1948, Vol. 2, s. 314.

<sup>20</sup> Por. N. Bohr, *Fizyka atomowa...*, s. 15. N. Bohr, *Fizyka atomowa i wiedza ludzka*, tłum. W. Staszewski, S. Szpikowski, A. Teske, PWN, Warszawa 1963, s. 15.

<sup>21</sup> W. Heisenberg, *Die physikalischen Principien der Quantentheorie*, Verlag von S. Hirzel, Leipzig 1930, s. 7.

<sup>22</sup> Pojawiają się jednak próby skonstruowania pojęcia, które zawierałoby w sobie elementy pojęć fali i cząstki. Przykładem jest koncepcja Paula Tellera, który twierdzi, że ani pojęcie cząstki, ani pojęcie fali nie są pierwotnymi i dalej nieanalizowalnymi, lecz zawierają pewne składowe, których wyodrębnienie pozwoli dokładniej zrozumieć, jaka składowa pojęcia cząstki stoi w konflikcie z jaką składową pojęcia fali. Według Tellera można skonstruować pojęcie mikroobiektu (*quanta*), które zawiera pewien aspekt klasycznego pojęcia cząstki i pewien aspekt klasycznego pojęcia fali, co uwolni nas od paradoksów mechaniki kwantowej (por. P. Teller, *An Interpretive Introduction to Quantum Field Theory*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey 1995, s. 16 i n.)



Jeżeli zatem w eksperymencie z dwiema szczelinami nie monitorujemy, przez którą szczelinę przeszedł foton, to na ekranie otrzymujemy obraz interferencyjny i powinniśmy stosować opis falowy (foton zachowuje się jak fala). Jeżeli zastosujemy detektor, umożliwiający stwierdzenie, przez którą szczelinę przeszedł foton, to musimy stosować obraz korpuskularny (foton zachowuje się jak cząstka — wówczas znika obraz interferencyjny).

John Archibald Wheeler zaproponował pewną modyfikację tego eksperymentu, zwaną eksperymentem z opóźnionym wyborem.<sup>23</sup> Rzecz w tym, że możemy zdecydować, czy umieścić detektor monitorujący tor ruchu fotonu na chwilę przed tym, gdy trafi on na ekran, ale już po tym, jak przeszedł on przez układ szczelin. Jeżeli nawet już zaakceptowalibyśmy wysoce nieintuicyjny pogląd, że pojedynczy foton przechodzi równocześnie przez obydwie szczeliny (interpretacja Feynmana), to jak poradzić sobie z faktem, że fakt, czy przeszedł on przez jedną czy też przez dwie szczeliny, zależy od tego, jakiego rodzaju eksperyment postanowiliśmy wykonać w przyszłości? Z eksperymentu Wheelera wynika bowiem zadziwiający wniosek, że nasza decyzja co do umieszczenia detektora wpływa na to, jak zachowywał się foton (jak cząstka czy też jak fala) w przeszłości.

### ZAGADKA SUPERPOZYCJI I PARADOKS POMIARU

W mechanice kwantowej stan układu w chwili  $t$  reprezentowany jest przez wektor w przestrzeni Hilberta. Jest to liniowa wektorowa przestrzeń nad ciałem liczb zespolonych. Konsekwencją liniowości przestrzeni Hilberta jest zasada superpozycji stanów: jeżeli układ może znajdować się w stanie reprezentowanym przez wektory  $\Psi_1$  i  $\Psi_2$ , to może znajdować się w stanie będącym dowolną kombinacją liniową tych stanów. W odróżnieniu od mechaniki klasycznej, w której stan układu reprezentowany jest przez wielkości fizyczne mierzalne (np. pędy i położenia cząstek), stan układu kwantowomechanicznego nie jest wielkością mierzalną, lecz jego znajomość pozwala na obliczenie prawdopodobieństwa wyniku pomiaru. Zasada superpozycji stanów jest odpowiedzialna za pewne osobliwości mikroświata, które z pewnością nie mieszczą się w ramach myślenia zdroworoządkowego. Wynika z niej bowiem, że istnieją stany kwantowe, w których pewne wielkości fizyczne nie mają określonej wartości.

Ewolucję stanu układu kwantowego w czasie opisuje (w przypadku nierelatywistycznym) równanie Schrödingera. Jest to liniowe równanie różniczkowe drugiego stopnia, które ma, podobnie jak równania Newtona w mechanice klasycznej, charakter ciągły i deterministyczny. Oznacza to, że jeśli znany jest wektor stanu układu w pewnej chwili  $t_0$ , to na podstawie równania Schrödingera można obliczyć wektor stanu dla dowolnej chwili późniejszej  $t$ . Jednak wektor stanu nie reprezentuje żadnej rzeczywistości fizycznej i może być powiązany z doświadczeniem jedynie wówczas, gdy

<sup>23</sup> J. A. Wheeler, *The „past” and the „delayed-choice” double-slit experiment*, [w:] A. R. Maslow (ed.), *Mathematical Foundations of Quantum Theory*, Academic Press, New York 1978, s. 9-45.

nastąpi pomiar danej wielkości fizycznej. Zgodnie z interpretacją kopenhaską podczas pomiaru zachodzi nieciągła i indeterministyczna redukcja wektora stanu — po pomiarze układ znajduje się w tzw. stanie własnym, odpowiadającym wartości własnej mierzonej wielkości fizycznej. Mówiąc inaczej: spośród wszystkich możliwości, jakie reprezentuje wektor stanu, w procesie pomiaru realizuje się jedna, pozostałe zaś znikają. Według interpretacji kopenhaskiej to, do którego stanu własnego zredukuje się wektor stanu (która z możliwości urzeczywistni się) nie jest zdeterminowane przez jakiś nieznaną nam mechanizm, działający na głębszym od opisywanego przez mechanikę kwantową poziomie<sup>24</sup>, ale ma charakter losowy. Na podstawie formalizmu mechaniki kwantowej można obliczyć jedynie prawdopodobieństwo uzyskania w pomiarze określonej wartości mierzonej wielkości fizycznej. W tym sensie mechanika kwantowa jest teorią indeterministyczną — pozwala jedynie na przewidywania prawdopodobieństw rezultatów pomiarów. „Jeśli oryginalnym celem nauki było — a wszyscy sądzili, że tak właśnie było — poznanie praw, które pozwalają w danej sytuacji przewidzieć, co się stanie dalej, to w pewnym sensie fizycy skapitulowali”<sup>25</sup>. Skrajnie optymistyczny pogląd Laplace’a o zasadniczej przewidywalności wszystkich stanów wszechświata, o ile podmiot dysponowałby odpowiednią wiedzą i byłby w stanie poddać analizie odnośne dane, nie znajduje potwierdzenia na gruncie mechaniki kwantowej. Indeterministyczny charakter praw mechaniki kwantowej „zmusza do uznania, że sama struktura nomiczna rzeczywistości nakłada nieprzewidywalne ograniczenia na prognostyczne i retrodykcyjne zdolności wszelkiego naturalnego podmiotu”<sup>26</sup>.

Ograniczenia możliwości przewidywania zjawisk to jednak nie wszystko. Jeżeli już nawet zaakceptujemy tę zadziwiającą prawdę, że „Bóg gra w kości”, to pozostają jeszcze pytania o to, jak interpretować superpozycję stanów i jakie czynniki są odpowiedzialne za redukcję wektora stanu, czyli co nadaje procesowi charakter pomiaru w sensie przyjętym w mechanice kwantowej.

Konsekwencje, do jakich prowadzi zasada superpozycji, i trudności, jakie sprawia interpretacja pomiaru, w najbardziej jaskrawy sposób uwidaczniają się w paradoksie kota Schrödingera. Eksperyment myślowy zaproponowany przez Erwina Schrödingera (1935)<sup>27</sup> przebiega następująco: w pudle odseparowanym od otoczenia

<sup>24</sup> Próby poszukiwania takiego mechanizmu są ideą przewodnią Davida Bohma interpretacji parametrów ukrytych. Por. D. Bohm, B. J. Hiley, *The Undivided Universe. An Ontological Interpretation of Quantum Theory*, Routledge, New York 1993, s. 29-30; D. Bohm, *Przyczynowość i przypadek w fizyce współczesnej*, tłum. S. Rouppert, Książka i Wiedza, Warszawa 1961; D. Bohm, *Ukryty porządek*, tłum. M. Tempezyk, Wydawnictwo Pusty Obłok, Warszawa 1988; D. Bohm, *Quantum Theory*, Prentice—Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 1951.

<sup>25</sup> R. P. Feynman, *Charakter...*, s. 154.

<sup>26</sup> H. Eilstein, *Uwagi...*, s. 62.

<sup>27</sup> E. Schrödinger, *Die gegenwärtige Situation In der Quantenmechanik*, „Naturwissenschaften” 1935, 23, s. 807-812; 823-828; 844-849, tłum. ang. J. Trimmer, *The Present Situation in Quantum Mechanics: A Translation of Schrödinger's „Cat Paradox” Papper*, [w:] J. A. Wheeler, W. H. Żurek

umieszczony jest kot oraz atom pierwiastka promieniotwórczego.<sup>28</sup> Z założenia prawdopodobieństwo rozpadu atomu w czasie godziny wynosi  $\frac{1}{2}$ . Jeżeli atom rozpadnie się, to odpowiednie urządzenie uruchamia mechanizm uśmiercający kota. W przeciwnym wypadku kot żyje. Wektor stanu atomu jest superpozycją stanów „przed rozpadem” i „po rozpadzie”. Ponieważ stan atomu jest sprzężony ze stanem kota, stan układu atom—kot jest również superpozycją stanów „atom przed rozpadem, kot żywy” i „atom po rozpadzie, kot martwy”.<sup>29</sup> Jeżeli zajrzemy do pudła, czyli wykonamy odpowiedni pomiar, to zawsze zaobserwujemy kota żywego albo martwego (następuje redukcja wektora stanu). Przed pomiarem jednak kot znajduje się w stanie superpozycji „kota żywego” i „kota martwego”. Dlaczego więc nigdy nie obserwujemy kwantowych liniowych superpozycji przedmiotów makroskopowych? Na czym polega przejście od świata mikroskopowego do makroskopowego?

Według interpretacji kopenhaskiej mechanika kwantowa dostarcza jedynie formalizmu matematycznego, pozwalającego opisać rezultaty pomiarów nad układem kwantowym wykonywane przez zewnętrznego w stosunku do tego układu obserwatora. Bohr i Heisenberg podkreślali, że opis przyrządów pomiarowych i rezultatów pomiarów musi być wyrażany w języku fizyki klasycznej. „Każde doświadczenie fizyczne, niezależnie od tego, czy dotyczy zjawisk życia codziennego, czy też mikroświata, może być opisane wyłącznie w terminach fizyki klasycznej. Język pojęć klasycznych jest językiem, którym posługujemy się, gdy opisujemy doświadczenia oraz ich wyniki. Pojęć tych nie umiemy i nie możemy zastąpić innymi”.<sup>30</sup>

Możemy opisywać (używając języka fizyki klasycznej) rezultaty pomiarów, lecz nie to, co dzieje się pomiędzy jednym pomiarem a drugim. O ile jednak w odniesieniu do mikroobiektów możemy jeszcze zgodzić się na stwierdzenie Bohra, że pomiędzy jednym pomiarem a drugim „istnieniu elektronu czy fotonu nie możemy nadać obiektywnego znaczenia”, o tyle z przedmiotem makroskopowym, takim jak kot, sprawa staje się bardziej złożona. Paradoks staje się wyraźniejszy, gdy umieścimy w pudle „przyjaciela Wignera”. Z perspektywy obserwatora wewnątrz pudła nastąpiła redukcja wektora stanu, natomiast z perspektywy obserwatora zewnętrznego układ pozostaje w stanie superpozycji. Wydaje się, że interpretacja taka prowadzi do daleko idących konsekwencji subiektywistycznych.

W interpretacji kopenhaskiej kluczową rolę odgrywa podział na obserwowany obiekt (opisywany przez mechanikę kwantową) i przyrząd pomiarowy (którego opis formułowany jest w kategoriach mechaniki klasycznej). John von Neumann zwrócił jednak uwagę na to, że również przyrząd pomiarowy jest zbudowany z takich samych atomów i cząstek elementarnych, jak układ kwantowy, który obserwujemy,

(ed.), *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey 1983, s. 152-167.

<sup>28</sup> Chociaż w roku 1935 odseparowanie pojedynczego atomu nie było możliwe, to jednak współcześnie fizycy potrafią pułapkować pojedyncze atomy.

<sup>29</sup> Por. np. S. Szpikowski, *Podstawy mechaniki kwantowej*, Wyd. UMCS, Lublin 2006, s. 343.

<sup>30</sup> W. Heisenberg, *Fizyka...*, s. 26.

zatem sam przyrząd powinien również podlegać prawom mechaniki kwantowej. Jeśli tak, to układ obiekt—przyrząd pomiarowy może znajdować się w superpozycji stanów, co oznacza, że należałoby wprowadzić kolejny przyrząd pomiarowy... Prowadzi to do *regressus ad infinitum*. Proces pomiaru nie mógłby zostać zakończony bez jakiegoś dodatkowego czynnika. Eugene Wigner twierdził, że wektor stanu ulega redukcji, gdy obserwator uświadamia sobie wynik pomiaru. Według zdrowego rozsądku jednak, Księżyć istnieje również wówczas, gdy nikt na niego nie patrzy.

W interpretacji kopenhaskiej postuluje się istnienie zewnętrznego wobec badanego układu obserwatora. To zaś rodzi trudności w kosmologii kwantowej — jeżeli zastosujemy mechanikę kwantową do wszechświata jako całości, to pojawia się problem, co należy rozumieć pod pojęciem zewnętrznego w stosunku do wszechświata obserwatora?

W interpretacji wieloświatowej (*Many-Worlds Interpretation*) zaproponowanej przez Hugh Everetta III (1957),<sup>31</sup> a rozwijanej współcześnie z pewnymi modyfikacjami m.in. przez Davida Deutscha, nie ma „zewnętrznego obserwatora”, nie występuje również postulat redukcji. Oznacza to, że ewolucja wektora stanu przez cały czas ma charakter unitarny, a podczas pomiaru realizują się wszystkie możliwości, przy czym proces ten prowadzi do rozszczepienia wszechświata na tyle nieoddziałujących następnie ze sobą wszechświatów, ile możliwości zawiera wektor stanu (w omawianym paradoksie kota Schrödingera realizują się zarówno stany „kot żywy”, jak i „kot martwy”, ale każdy realizuje się w innym wszechświecie).<sup>32</sup> Zwracano uwagę, że z filozoficznego punktu widzenia trudno tę interpretację pogodzić z zasadą brzytwy Ockhama, że nie należy mnożyć bytów (wszechświatów!) ponad potrzebę, jednak zdaniem zwolenników interpretacji wieloświatowej jest ona właśnie najprostsza, ponieważ — jak sądził Everett — wynika bezpośrednio z formalizmu mechaniki kwantowej, a ponadto nie wymaga przyjęcia dodatkowych założeń, takich jak na przykład postulat redukcji. Jest to równocześnie interpretacja obiektywistyczna (nie wymaga odwoływania się do świadomego obserwatora), jak i całkowicie deterministyczna. Jak się jednak przedstawia stosunek tej interpretacji do zdrowego rozsądku? Wydaje się, że o ile widmo żywo-martwego kota Schrödingera niewątpliwie budzi nasze zdumienie, to nie mniejsze zdumienie budzi zapewne myśl o nieskończeniu wielu wszechświatach, w których istnieje nieskończenie wiele kopii zarówno autora tego artykułu, jak i Czytelnika.

---

<sup>31</sup> H. Everett III, „*Relative State*” *Formulation of Quantum Mechanics*, „*Reviews of Modern Physics*” 1957, Vol. 29, nr 3, s. 454-462.

<sup>32</sup> W zależności od wersji interpretacji mówi się o rozszczepianiu się wszechświata na wiele gałęzi albo o równoczesnym istnieniu wielu wszechświatów, które nie oddziałują ze sobą, z wyjątkiem takich sytuacji, jak doświadczenie interferencją na dwóch szczelinach. Zgodnie z interpretacją wielu światów, cząstka przelatuje w każdym wszechświecie przez jedną szczelinę, a fakt, że na ekranie pojawia się w dobrze określonym miejscu, świadczy o tym, że wszechświaty te połączyły się. Por. P. C. W. Davies, J. R. Brown, *Duch w atomie. Dyskusja o paradoksach teorii kwantowej*, tłum. P. Amsterdamski, CIS, Warszawa 1996, s. 107.

W modelu dekoherencji również nie zakłada się wyróżnionej roli pojęć fizyki klasycznej, nie występuje także natychmiastowa redukcja wektora stanu, a podstawowym założeniem jest koncepcja, że „za ewolucję stanu pola odpowiedzialna jest dyssypacja energii pola do otoczenia”.<sup>33</sup> Z modelu dekoherencji wynika jednak zdumiewający wniosek, że „układy makroskopowe znajdują się, choć niezwykle krótko, w stanach superponowanych, typu «wskazanie + 1 i równoczesne wskazanie — 1» [...] oznacza to, że są stany będące równoczesnym złożeniem dwóch, klasycznie wykluczających się stanów”.<sup>34</sup>

Interpretacji mechaniki kwantowej jest znacznie więcej i nie jest celem niniejszego artykułu ich wyczerpująca analiza. Wszystkie jednak, jak się wydaje, sprowadzają się do prób przełożenia na nasz zwyczajny język tego, co ujawnia kwantowo-mechaniczny formalizm. „Są to po prostu kule inwalidzkie naszej ograniczonej wyobraźni, sposoby uchwycenia dziwności świata kwantów, które nigdy nie znikają i pozostają poza zasięgiem codziennego doświadczenia”.<sup>35</sup>

### UPIORNE DZIAŁANIE NA ODLEGŁOŚĆ

Fundamentalną rolę w fizyce współczesnej odgrywa postulat lokalności, który głosi, że wszelkie oddziaływania polegają na emisji i absorpcji cząstek — kwantów odpowiedniego pola. Zgodnie ze szczególną teorią względności prędkość światła w próżni jest maksymalną prędkością, z jaką mogą rozchodzić się jakiegokolwiek oddziaływania. Oznacza to oczywiście, że w fizyce współczesnej nie występuje pojęcie natychmiastowego oddziaływania na odległość.<sup>36</sup> Dlatego trudno pogodzić ze zdrowym

<sup>33</sup> T. Placek, *Obserwacja kota Schrödingera i dekoherencji*, „Przegląd Filozoficzny. Nowa Seria” 1997, 2 (22), s. 40.

<sup>34</sup> *Ibidem*, s. 44.

<sup>35</sup> J. Gribbin, *Encyklopedia fizyki kwantowej*, tłum. P. Lewiński, Amber, Warszawa 1998, s. 143.

<sup>36</sup> Zwykle powiada się, że fizyka klasyczna dostarczała pogładowego modelu zjawisk. Warto jednak zwrócić uwagę na to, że klasyczny obraz świata również nie był pozbawiony pewnych osobliwości. Newtonowska koncepcja siły działającej na odległość (*actio in distans*) była niewątpliwie ideą daleko wykraczającą poza myślenie zdroworozsądkowe. Pogląd ten krytykował m.in. Leibniz, pisząc: „Ciało jest poruszane w sposób naturalny zawsze tylko przez inne ciało, które je popycha dotykając go i znajduje się potem w ruchu dopóty, dopóki nie przeszkodzi mu inne ciało, które go dotyka: wszelkie inne działania na ciało jest albo cudowne, albo urojone” (G. W. Leibniz, *Polemika z Clarkiem. Piąte pismo Leibniza*, [w:] idem, *Wyznanie wiary filozofa. Rozprawa metafizyczna. Monadologia. Zasady natury i łaski oraz inne pisma filozoficzne*, tłum. S. Cichowicz, J. Domański, H. Krzeczowski, H. Moese, PWN, Warszawa 1969, s. 382). Newton miał niewątpliwie świadomość osobliwości tkwiącej w pojęciu siły. Pisał: „Niewyobrażalne jest, by nieożywiona surowa materia mogła (bez pośrednictwa czegoś innego, co nie jest materialne) działać i mieć wpływ na inną materię bez wzajemnego kontaktu, jakby to musiało być, gdyby ciężenie stanowiło istotną i wrodzoną cechę materii w sensie Epikura. Z tego powodu pragnąłem, by nie przypisywał mi pan poglądu o wrodzoności ciężenia. Przypuszczenie, że ciężenie jest wrodzoną, nieodłączną i istotną cechę materii, tak iż jedno ciało mogłoby działać na drugie na odległość przez próżnię, bez pośred-

rozsądkiem kolejną cechą mechaniki kwantowej, jaką jest nielokalność, czyli „upierne działanie na odległość”, jak określił tę kwantowomechaniczną osobliwość Einstein.

W 1925 Einstein wspólnie z Podolskym i Rosenem<sup>37</sup> przedstawił eksperyment myślowy (paradoks EPR), który miał dowodzić niekompletności mechaniki kwantowej. W szczególności, zdaniem Einsteina, każda cząstka ma jednocześnie określony pęd i położenie (i inne wartości wielkości komplementarnych), ale mechanika kwantowa nie jest w stanie tego faktu opisać. Zgodnie z mechaniką kwantową, jeżeli dwie obserwabla reprezentowane są przez niekomutujące operatory, to dokładna wiedza o jednej z nich wyklucza jednocześnie dokładną wiedzę o drugiej. Gdy ustalono w pomiarze wartość pierwszej wielkości, to wszelka próba eksperymentalnego wyznaczenia drugiej wielkości zaburza stan układu tak, że niszczy wiedzę o pierwszej. Zdaniem Einsteina w pewnych przypadkach można przewidzieć zarówno położenie, jak i pęd cząstki bez zakłócania stanu układu, zatem wielkości te należy uznać za jednocześnie realne. Ponieważ, zgodnie z mechaniką kwantową, nie można zmierzyć jednocześnie wielkości komplementarnych dla jednej cząstki, Einstein rozważa układ dwóch cząstek, które uprzednio oddziaływały ze sobą — a zatem są opisane przez wspólny wektor stanu — i pokazuje, że dokonując pomiaru na układzie I, można przewidzieć w sposób pewny stan układu II bez jego zakłócania, co znaczy, że wielkości te są realne. Einstein wnosi stąd, że mechanika kwantowa nie jest teorią kompletną, chyba że przyjmemy, iż stan układu II zależy od procesu pomiaru przeprowadzonego na układzie I, co w żaden sposób nie zakłóca stanu układu II. „Nie można oczekiwać, by jakkolwiek rozsądna definicja rzeczywistości na to pozwalała”.<sup>38</sup> Einstein twierdził bowiem, że teorie fizyczne muszą się wiązać z założeniem, że poszczególne rzeczy istnieją całkowicie niezależnie od siebie „o ile «leżą w różnych częściach prze-

---

nictwa czegoś innego, co by przekazywało działanie lub siłę od jednego do drugiego, jest, moim zdaniem, tak wielkim absurdem, że, jak wierzę, nikt kto ma w sprawach filozoficznych odpowiednią zdolność myślenia, nie mógłby go nigdy sformułować. Ciężenie musi być spowodowane przez czynnik działający stale w myśl określonych praw, czy jednak czynnik ten jest materialny, czy niematerialny, to pozostawiam rozważce czytelników” (I. Newton, *Newton to Bentley (25 February 1692/3)*, [w:] W. H. Turnbull (ed.), *The Correspondence of Isaac Newton*, Vol. III, 1688-1694, Cambridge 1961, s. 252-254). W związku z powyższym Kuhn zauważa: „Grawitacja, zinterpretowana jako «wrodzone przyciąganie» między każdymi dwiema cząstkami materii, była równie tajemnicza jak «naturalna tendencja do spadania» scholastyków. Dlatego też, dopóki były żywe standardy koncepcji korpuskularnej, poszukiwanie mechanicznego wyjaśnienia grawitacji było jednym z największych wyzwań dla tych, którzy uznawali *Principia* za paradygmat” (T. S. Kuhn, *Struktura rewolucji naukowych*, tłum. H. Ostromięcka, PWN, Warszawa 1968, s. 188). Sukcesy teorii Newtona sprawiły, że „pytanie o przyczynę grawitacji znalazło się poza zasięgiem nauki” (*ibidem*, s. 258).

<sup>37</sup> A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality by Considered Complete?*, „Physical Review” 1935, Vol. 47, s. 777-780; tłum. polskie: *Czy opis kwantowomechaniczny rzeczywistości fizycznej można uznać za zupełny?*, [w:] S. Butryn (red.), *Albert Einstein. Pisma filozoficzne*, tłum. K. Napiórkowski, Wydawnictwo IFiS PAN, Warszawa 1999, s. 117-123.

<sup>38</sup> *Ibidem*, s. 122.

strzeni». Bez przyjęcia takiej wzajemnej niezależności egzystencji [...] rzeczy odległych przestrzennie, wypływającego przede wszystkim z myślenia potocznego, myślenie fizyczne w znanym nam sensie byłoby niemożliwe”.<sup>39</sup>

Po sformułowaniu przez Johna Bella (1964) słynnej nierówności,<sup>40</sup> która powinna być spełniona, gdyby słuszny był wniosek Einsteina, że kwantowomechaniczny opis rzeczywistości fizycznej nie jest opisem kompletnym, możliwy stał się empiryczny test między stanowiskami Bohra i Einsteina. Wyprowadzenie nierówności Bella oparte jest na dwóch założeniach: realizm (lub założenie obiektywnej rzeczywistości) oraz lokalność (separowalność). Realizm — obiekty kwantowe mają jednocześnie określone wszystkie wartości parametrów dynamicznych całkowicie niezależnie od dokonywanych pomiarów (nawet gdy pomiar w mechanice kwantowej nie pozwala na jednoczesne określenie wielkości komplementarnych z dowolną dokładnością); lokalność (einsteinowska) — żadne oddziaływanie fizyczne nie może rozprzestrzeniać się szybciej, niż wynosi prędkość światła w próżni  $c$  (co oczywiście wyklucza natychmiastowe działanie na odległość). Decydujące znaczenie dla rozstrzygnięcia sporu między stanowiskami Einsteina i Bohra miały doświadczenia przeprowadzone przez zespół Alaina Aspecta (1982).<sup>41</sup> Rezultaty doświadczeń potwierdzają korelacje przewidywane przez mechanikę kwantową, falsyfikują natomiast nierówność Bella. Oznacza to, że przynajmniej jedno z przyjętych w wyprowadzeniu nierówności Bella założeń jest fałszywe, co wyklucza wszystkie realistyczne i zarazem lokalne modele zjawisk kwantowych.<sup>42</sup> Należy zatem odrzucić lokalność albo realizm (w przedstawionych wyżej znaczeniach tych terminów).

Myślenie zdroworozsądkowe niewątpliwie związane jest z postawą realistyczną w tym sensie, że przyjmuje się, iż rzeczy mają pewne cechy całkowicie niezależnie od tego, czy są „obserwowane”. Podobnie, do zdrowego rozsądku należy również przekonanie, że rzeczy istnieją całkowicie niezależnie od siebie, o ile leżą w różnych miejscach przestrzeni. Rezultaty mechaniki kwantowej podważają przynajmniej jedno z tych założeń.

<sup>39</sup> A. Einstein, *Mechanika kwantowa a rzeczywistość*, [w:] S. Butryn (red.), *Albert Einstein...*, s. 163.

<sup>40</sup> Por. J. S. Bell, *On the Einstein Podolsky Rosen Paradox*, „Physics” 1964, t. 1, s. 195-200, [w:] [http://www.drchinese.com/David/Bell\\_Compact.pdf](http://www.drchinese.com/David/Bell_Compact.pdf).

<sup>41</sup> Por. A. Aspect, J. Dalibard, G. Roger, *Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time Varying Analyzers*, „Physical Review Letters” 1982, Vol. 49, nr 25, s. 1804-1807.

<sup>42</sup> Rezultaty doświadczeń Aspecta wykluczają lokalne teorie zmiennych ukrytych, nie wykluczają jednak teorii, w których zakłada się występowanie oddziaływań z prędkością ponadświetlną. Por. R. Penrose, *Nowy umysł cesarza. O komputerach, umyśle i prawach fizyki*, tłum. P. Amsterdamski, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1996, s. 320.

## WNIOSKI

Być może niezgodność mechaniki kwantowej z teoriami klasycznymi dotyczącymi rzeczywistości makroskopowej i zdrowym rozsądkiem wynika z tego, że — jak sądzili niegdyś Einstein, Schrödinger czy Bohm, a współcześnie m.in. Penrose — jest ona teorią niekompletną i powstanie kiedyś głębsza teoria, która wyeliminuje pojawiające się paradoksy. Oczywiście, trudno wykluczyć taką możliwość — historia nauki pokazuje, że niejednokrotnie teorie, które uważane były w swoim czasie za „ostateczne” musiały zostać zastąpione przez inne. Przekonanie, że mechanika kwantowa jest ostatnim słowem, jeśli chodzi o nasze rozumienie mikroświata, wydaje się równie dogmatyczne, jak twierdzenie, że nigdy nie uzyskamy głębszego zrozumienia świata atomów i cząstek elementarnych. Zauważyć jednak należy, że jak dotąd mechanika kwantowa poprawnie opisuje wszystkie zjawiska, a żadnej „głębszej teorii” jak na razie nie udało się skonstruować. Nie wiadomo zatem, czy, jeśli takowa teoria powstanie, wyeliminuje ona obecne paradoksalne aspekty mechaniki kwantowej, czy też, przeciwnie, ukáže aspekty świata jeszcze bardziej paradoksalne i obce naszemu zdroworozsądkowemu myśleniu.

Ludzka racjonalność, a zatem i to, co nazywamy zdrowym rozsądkiem, wykształciły się w rezultacie procesu ewolucji. Bezpośrednio doświadczamy jedynie świata makroskopowego, i do takiego doświadczenia przystosowane jest nasze myślenie. Być może zatem nie powinniśmy zbyt dziwić się temu, że na poziomie atomów i cząstek elementarnych przyroda zachowuje się zupełnie inaczej, niż wydaje nam się, jak „powinna się” zachowywać. Jeżeli absurdalne i niezgodne ze zdrowym rozsądkiem wydaje nam się to, że coś może zachowywać się czasami jak cząstka, a czasami jak fala, że jeden niepodzielny obiekt może być w jakimś sensie w wielu różnych miejscach równocześnie, że dany obiekt może znajdować się w superpozycji stanów, która odpowiada dwóm klasycznie wykluczającym się stanom, czy wreszcie, że to, co się dzieje w pewnym miejscu w przestrzeni, skorelowane jest z tym, co się dzieje w innym odległym miejscu, to może świadczyć równie dobrze jedynie o ograniczoności naszego zdrowego rozsądku. Wrażenie absurdalności mikroświata wynikałoby zatem jedynie z ograniczoności naszych władz poznawczych i przyzwyczajenia, że rzeczy „powinny” zachowywać się w określony sposób.

Feynman napisał kiedyś, że „warunkiem koniecznym istnienia nauki jest istnienie umysłów, które nie zakładają, że nauka musi spełniać jakiegokolwiek przyjęte z góry warunki”.<sup>43</sup> Jeżeli zjawiska mikroświata przeczą naszym zdroworozsądkowym przekonaniom, może to świadczyć nie o niekompletności mechaniki kwantowej, ale o tym, że zdrowy rozsądek jest przeszkodą epistemologiczną w poznaniu mikroświata. „Postęp nauki dokonuje się nie tylko dlatego, że poznajemy i rozumiemy nowe fakty, lecz i dlatego, że wciąż na nowo uczymy się, co może znaczyć słowo «rozumieć»”.<sup>44</sup>

<sup>43</sup> R. P. Feynman, *Charakter...*, s. 156.

<sup>44</sup> Wypowiedź C. F. von Weizsäckera cytowana przez Heisenberga (*Część i całość...*, s. 163).