

# Irena Czerwonogóra

---

## Kilka uwag na temat statystycznej interpretacji mechaniki kwantowej

---

Nowa Krytyka 8, 205-213

---

1997

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.

**Irena Czerwonogóra**

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza

Poznań

## **Kilka uwag na temat statystycznej interpretacji mechaniki kwantowej\***

*Nigdy nie należy lekceważyć przyjemności jaką każdy z nas odczuwa słysząc coś, o czym już wie.*

Enrico Fermi

Próbując zrozumieć konsekwencje mechaniki kwantowej, należy sobie postawić pytanie o to, czy rzeczywistość fizyczna jest w jakimś sensie kształtowana przez akt obserwacji i czy Wszechświat w pewnej mierze zachowuje się chaotycznie.

Teoria kwantów zburzyła nasze tradycyjne pojmowanie przyczynowości. Eleganckie równanie zaproponowane w 1926 roku przez Ervina Schrödingera dla opisu rozwoju zdarzeń kwantowych w czasie i przestrzeni nie daje nam – jak mechanika Newtona – pewności, lecz tylko prawdopodobieństwo określonego ich przebiegu. Zasada nieoznaczoności Heisenberga pokazuje, że nasza wiedza o zjawiskach przyrody jest ograniczona z przyczyn fundamentalnych, a mianowicie: jeśli uda nam się poznać jedną część zjawiska, druga pozostaje w ukryciu.

Twórcy mechaniki kwantowej bardzo zaangażowali się w zmagania z tymi problemami. W 1905 roku Albert Einstein pokazał,

\* Referat wygłoszony na VI Zjeździe Filozofów (Toruń 1995) w sekcji Filozofii Nauk Przyrodniczych.

w jaki sposób kwanty energii elektromagnetycznej (fotony) wywołują efekt fotoelektryczny, w którym światło padając na metal wywołuje prąd elektryczny. Ale to on właśnie upierał się później (po 1926) przy poglądzie, że bardziej dojrzała teoria tych zjawisk będzie całkowicie deterministyczna, że pozbedziemy się niepewności mechaniki kwantowej. Argumentując, że „Bóg nie gra w kości” [Born, Einstein 1971, s. 91] projektował eksperymenty myślowe mające wykazać niepełność mechaniki kwantowej. Jej obrońcy, tacy jak Niels Bohr, posługując się własnymi eksperymentami myślowymi, dowodzili, że zastrzeżenia Einsteina są jedynie efektem anachronicznego sposobu myślenia o rzeczywistości. Nie jest bowiem zadaniem uczonego – strofował Bohr swego przyjaciela – „mówić Bogu w jaki sposób ma zarządzać światem” [Horgan 1992, s. 80].

Doświadczenia potwierdzały najgorsze obawy Einsteina. Fotony, neutrony, a nawet całe atomy zachowują się czasem jak cząstki, czasem jak fale, jednak określoną formę przybierają dopiero w chwili wykonania pomiaru. Ponadto, pomiar jednej wielkości kwantowej może natychmiast wpłynąć na wartość innych wielkości.

W 1935 roku Albert Einstein, Borys Podolsky i Nathan Rosen zaproponowali eksperyment (zwany efektem EPR), który miał ujawnić mylność mechaniki kwantowej. Pytali oni, co by się stało, gdyby cząstka złożona z dwóch mikroobjektów rozpadła się, wysyłając cząstki w przeciwnych kierunkach. Zgodnie z mechaniką kwantową, tak długo, dopóki obie cząstki nie zostaną zaobserwowane, ich własności będą nieokreślone. Mamy więc do czynienia z nałożeniem się wszystkich możliwych stanów kwantowych. Oznacza to, że każda z cząstek porusza się we wszystkich możliwych kierunkach. Mikroobjekty pochodzące ze wspólnego źródła są jednak ściśle skorelowane, czyli w pewien sposób „związane”. Zwykła zasada zachowania pędu na przykład stwierdza, że jeżeli jeden obiekt kieruje się na północ, to drugi musi poruszać się na południe. A zatem dokonując pomiaru pędu jednego z obiektów, natychmiast określamy pęd drugiego, nawet jeśli zdążył zawędrować na „koniec Wszechświata”. Einstein uważał, że takie

„działanie duchów na odległość” jest niezgodne z jakimkolwiek „realistycznym” modelem rzeczywistości, a wszystkie właściwości każdego z obiektów muszą być ustalone w momencie rozpadu.

Do początku lat sześćdziesiątych większość fizyków traktowała ten problem jako czysto akademicki, ponieważ nie można było rozstrzygnąć go na drodze doświadczalnej. W 1964 roku John S. Bell z CERN wykazał, że mechanika kwantowa przewiduje dla cząstek powiązanych silniejsze korelacje o charakterze statystycznym, niż w wypadku tak zwanej lokalnej realistycznej teorii preferowanej przez Einsteina. Koncepcja Bella wywołała w laboratoriach lawinę prac, których uwieńczeniem był przeprowadzony w 1982 roku w Paryżu eksperyment Alaina Aspecta. Zamiast pędu A. Aspect badał polaryzację fotonów emitowanych z tego samego źródła w kierunku różnych detektorów. Polaryzacja analizowana dla każdego detektora oddzielnie miała charakter losowy. Jednak porównanie pomiarów z obydwu detektorów wykazywało korelacje silniejsze, niżby to dopuszczała jakakolwiek lokalna, realistyczna teoria – dokładnie jak przewidywał Bell. To, co Einstein nazywał „działaniem ducha na odległość”, okazało się rzeczywistością.

Pod koniec lat osiemdziesiątych potwierdzono efekt EPR dla pędów. Doświadczenie takie zostało wykonane w Royal Signals and Radar Establishment w Anglii. Wiązkę lasera skierowano na konwektor częstotliwości, który wytwarzał pary skorelowanych fotonów. Każdy z tych fotonów przechodził przez oddzielną przesłonę z dwiema szczelinami i wpadał do detektora. W zasadzie znając drogę, którą porusza się jeden z fotonów, moglibyśmy określić drogę przebytą przez drugi foton, na podstawie zasady zachowania pędu. Ponieważ detektory nie rozróżniają dróg fotonów, każdy z nich przebiega oboma naraz, dając strukturę interferencyjną. Mimo to kierunek lub pęd każdego z nich jest skorelowany z pędem lub kierunkiem partnera.

Dotychczasowe doświadczenia nie doprowadziły do ujednoczenia poglądu na temat tego, **co właściwie oznacza mechanika kwantowa**. Za pogląd „ortodoksyjny” uważa się oryginalną interpretację Bohra z lat dwudziestych. W interpretacji tej, zwanej

**kopenhaską**, zakładamy, że nie wiemy nic ponad to, co obserwujemy. Wszelka spekulacja na temat tego, czym jest „naprawdę” foton czy atom i co się z nim dzieje kiedy go nie widzimy, jest właśnie tylko spekulacją.

Interpretacja kopenhaska spotkała się z krytyką. Bell uważał, że każe ona godzić się z bezsenssem, a Bohr zaproponował (w latach pięćdziesiątych) realistyczną teorię, według której obiekt kwantowy w rodzaju elektronu istnieje rzeczywiście w określonym miejscu i czasie, lecz jego zachowaniem rządzi pewne niezwykle pole, tzw. fala pilotująca, której własności opisuje równanie Schrödingera:

$$dP(x) = I\Psi^2 dx,$$

gdzie:

$dP(x)$  – prawdopodobieństwo znalezienia elektronu w obszarze przestrzennym pomiędzy punktami  $x$  i  $x + dx$ ,

$I\Psi^2$  – gęstość prawdopodobieństwa znalezienia elektronu w punkcie  $x$ .

Hipoteza ta umożliwia jedną z kwantowych sztuczek – nielokalność – eliminując jednocześnie nieokreśloność położenia cząstki. Przewidywania teorii są identyczne z przewidywaniami zwyczajnej mechaniki kwantowej. Z kolei według teorii Pearle’a, ulepszonej przez Bella, dzięki dodaniu nieliniowego członu do równania Schrödingera superpozycje stanów zbiegają się ku stanom pojedynczym, w miarę jak wielkość układu zbliża się do rozmiarów makroskopowych. Teoria ta daje przewidywania subtelnie różniące się od przewidywań ortodoksyjnej mechaniki kwantowej. Na przykład przepuszczając neutrony przez dwie szczeliny uzyskuje się obraz interferencyjny. Przy poprawności tej teorii obraz interferencyjny zniknie, gdy dokonamy pomiaru z wystarczająco dużej odległości.

Niezadowolenie ze sztucznego rozdziału między układami fizycznymi i obserwatorami, jaki zakłada interpretacja kopenhaska, skłoniło więc teoretyków do przyjęcia jeszcze innej interpretacji,

tak zwanej teorii wielu światów, opracowanej w roku 1950 przez Hugh'a Everetta z Princeton. Jest to próba odpowiedzi na pytanie, dlaczego, kiedy obserwujemy zjawiska kwantowe, widzimy tylko jeden rezultat spośród wielu dopuszczalnych przez funkcję falową. Według koncepcji Everetta, za każdym razem, gdy pomiar zmusza cząstkę, by dokonała wyboru pomiędzy, na przykład, lewą i prawą szczeliną, cały Wszechświat dzieli się na dwa oddzielne wszechświaty. W jednym z nich cząstka biegnie przez lewą, a w drugim przez prawą szczelinę.

Chociaż przez długi czas odrzucano tę teorię, zaliczając ją raczej do fantastyki niż do nauki, ostatnio odżyła ona w formie zmodyfikowanej przez Murraya-Gell-Manna z Kalifornii i została nazwana interpretacją z wieloma historiami, by podkreślić, że historie są raczej możliwościami niż fizycznymi realizacjami.

Twórcą kolejnej interpretacji jest David Z. Albert, który wraz z Barry Loewerem – filozofem z Rutgers University – wyjaśnia, że każdy obserwator albo „czujący układ fizyczny” jest związany z nieskończonym zbiorem umysłów, które doświadczają różnych możliwych rezultatów pomiaru kwantowego. Wiele wyborów tkwiących w równaniu Schrödingera odpowiada raczej mnogości doznań tych umysłów niż nieskończonej ilości wszechświatów. Jest to tzw. interpretacja z wieloma umysłami.

Pojawiają się też koncepcje przewidujące zmianę sposobu myślenia. „Kiedy Einstein wprowadził swoją teorię względności odrzuciliśmy nasze stare, euklidesowe wyobrażenia o czasie i przestrzeni i posługujemy się pojęciami ogólniejszymi. Teoria kwantów wymaga podobnego przestudiowania naszych koncepcji racjonalności i logiki” – zauważył Jeffrey Bub, filozof z University of Maryland [Horgan 1992, s. 87]. Logika Boole'a, oparta na zdaniach albo–albo, jest wystarczająca w świecie, w którym atom przechodzi przez jedną albo przez drugą szczelinę, ale nigdy przez obie naraz. Według J. Buba, „logika kwantowo-mechaniczna nie jest Boole'owska. Jeśli to raz pojmiemy, wszystko być może nabierze sensu” [Horgan 1992, s. 87].

Inną zmianę paradygmatu przewiduje Wheeler. Zauważa on mianowicie, że najważniejsze przesłanie mechaniki kwantowej do-

tyczy sposobu pojmowania rzeczywistości: zjawiska fizyczne są w jakimś stopniu zdefiniowane przez sposób, w jaki zadajemy pytania. Jest to w pewnym sensie Wszechświat uczestnictwa. Kanwą rzeczywistości nie jest być może kwant, który pomimo swej ulotności jest przecież zjawiskiem fizycznym, ale odpowiedź na pytanie tak lub nie, czyli bit, który jest podstawową jednostką w dziedzinie przetwarzania danych i komunikacji. Wheeler nazywa swoją koncepcję „świat z bitu”. Dziś już wiadomo, że teoria informacji pozwala mocniej sformułować zasadę nieoznaczoności – dwoistość cząstkowo-falową i nielokalność.

Jak widać w przedstawionej panoramie zjawisk, kwestia interpretacji mechaniki kwantowej pozostaje otwarta. W tej sytuacji pozwolę sobie zaproponować czysto statystyczną interpretację mechaniki kwantowej<sup>1</sup> w sensie Błochincewa.

Dawid Błochincew zakłada istnienie zespołów kwantowych, w które grupują się cząsteczki. Pierwotną **charakterystyką zespołu kwantowego jest „funkcja falowa** (operator statystyczny) określająca przynależność cząstki do określonych warunków makroskopowego otoczenia, a zbiór cząstek odnoszących się do tego makroskopowego otoczenia tworzy zespół czysty lub mieszany” [Błochincew 1954, s. 58].

Zespoły kwantowe posiadają obiektywne znaczenie i nie powstają tylko wskutek ingerencji obserwatora zaopatrzonego w przyrząd pomiarowy. Stąd w sposób naturalny pojawia się zadanie ustalenia charakteru zespołu w takiej postaci, w jakiej istnieje on sam, niezależnie od obserwatora przeprowadzającego pomiar. Stan cząstek – w sensie ich przynależności do tego samego zespołu – można określić za pomocą pomiaru przed doświadczeniem, niezależnie od ingerencji obserwatora. Na przykład:

„Na podstawie rozproszenia promieni rentgenowskich można określić prawdopodobieństwo  $dP(x) = I\Psi^2 dx$  znalezienia

<sup>1</sup> Mechanika kwantowa nie jest szczególną metodą statystyczną, u której podstaw leży mechanika Newtona. W rzeczywistości mechanika kwantowa nie daje się pogodzić z mechaniką newtonowską i zawiera połączone w jedną całość zarówno nową metodę opisu zjawisk statystycznych, jak i nowe prawa ruchu mikrocząstek.

się elektronu w atomie. Jeżeli funkcja falowa  $\Psi(x)$  jest rzeczywista, to tym samym wyznaczyliśmy doświadczalnie  $\Psi(x) = \sqrt{P(x)}$ , tzn. określiliśmy stan elektronu w atomie przed doświadczeniem, niezależnie od obserwatora.

Ażeby wyznaczyć prawdopodobieństwo  $P(x)$  należy odtworzyć rozproszenie promieni rentgenowskich na licznych, niezależnych od siebie atomach, co w praktyce osiąga się przez badanie rozproszenia w gazach. Innymi słowy, trzeba mieć do czynienia z zespołem cząstek, nie zaś z jedną pojedynczą cząsteczką" [Błochincew 1954, s. 59].

Koncepcja zespołów kwantowych wyjaśnia również „paradoks” EPR:

„Jeśli dokonujemy pomiaru nad pierwszą cząstką i w wyniku tego pomiaru stwierdzamy, że jej pęd wynosi na przykład  $p_1$ , to na mocy zachowania pędu, pęd drugiej cząstki musi się równać  $p_2 = p_1^0 + p_2^0 - p_1$ , gdzie  $p_1^0$  i  $p_2^0$  są pędami pierwszej i drugiej cząstki przedtem niż zaczęły one oddziaływać między sobą. W ten sposób pomiar wybiera z zespołu cząstek taki podzespół, w którym pędy cząstek, nazywanych przez nas «pierwszymi», równe są  $p_1$ . Tym samym na podstawie praw zachowania «drugie» cząstki będą posiadały pędy  $p_2 = p_1^0 + p_2^0 - p_1$ . Natomiast sama zmiana pędu  $p_2^0$  na  $p_2$  zachodzi oczywiście nie w wyniku pomiaru, ale jako wynik wzajemnego oddziaływania «pierwszych» i «drugich» cząstek przed pomiarem" [Błochincew 1954, s. 61].

Einstein w gruncie rzeczy wykazał, że kopenhaska interpretacja mechaniki kwantowej, która głosi, że w efekcie niekontrolowanego oddziaływania przyrządu na obiekt nie można równocześnie ustalić położenia i pędu, jest z gruntu błędna. Eksperyment myślowy Einsteina dowodzi bowiem, że w pewnych szczególnych sytuacjach, a mianowicie w wypadku gdy wiązka cząstek emituje



wana jest z tego samego źródła, ustalenie wartości  $p$  i  $q$  z dokładnością zakazaną przez Heisenberga jest w pełni możliwe.

Czysto statystyczna interpretacja mechaniki kwantowej zakłada, że iloczyn wielkości  $p$  x  $q$ , interpretowanych jako pierwiastek z iloczynu średnich odchyżeń kwadratowych populacji statystycznych, nie może być mniejszy od pewnej stałej związanej ze stałą Plancka. Przy tej interpretacji nie można dowieść, że wielkości  $p$  i  $q$  muszą być niedookreślone dla pojedynczego obiektu kwantowego. Mechanika kwantowa rozstrzyga jedynie, że rozrzuty tych wielkości w dowolnie realizowanej populacji ograniczone są przez zasadę nieoznaczoności:

$$\Delta p \Delta x \geq h,$$

gdzie:

$\Delta p$  – nieokreśloność pędu,  $\Delta x$  – nieokreśloność położenia,  
 $h$  – stała Plancka.

Wszystkie teorie badane przez mechanikę kwantową były oparte na rachunku predykatów pierwszego rzędu. Teorie te mówiły o populacjach konkretnych obiektów. Mechanika kwantowa, jeżeli ją rozpatrujemy chłodnym okiem logika a nie fizyka, nieuchronnie jest umiejscowiona na poziomie predykatów drugiego rzędu. Rola konkretów pełnią tutaj populacje względnie zespoły kwantowe. Natomiast właściwym przedmiotem badań stają się zbiory populacji, a więc rodziny zbiorów. Ktoś, kto tego nie widzi, wraca na poziom Einsteina i Heisenberga.

### Bibliografia

- Białkowski G. 1982: *Stare i nowe drogi fizyki*, t. II. Warszawa.
- Błochincew D. 1954: *Odpowiedź akademikowi W. Fockowi*, [w:] *Zagadnienia filozoficzne mechaniki kwantowej i teorii względności*, red. D. Błochincew, W. Fock, I. Infeld. Warszawa.
- Błochincew D. 1968: *The Philosophy of Quantum Mechanics*. Dordrecht.

- 
- Born M., Einstein A. 1971: *The Born – Einstein Letters*. New York.
- Horgan J. 1992: *Filozofia teorii kwantów*. „Świat Nauki”, nr 9.
- Kaku N., Trainer J. 1993: *Dalej niż Einstein*. Warszawa.
- Mejbaum W. 1986: *Deterministyczne modelowanie świata*. „Studia Filozoficzne”, nr 9.
- Miakiszew G. 1976: *Prawidłowości dynamiczne i statystyczne w fizyce*. Warszawa.
- Prigogine I., Stengers I. 1990: *Z chaosu ku porządkowi*. Warszawa.
- Weinberg S. 1994: *Sen o teorii ostatecznej*. Warszawa.