

Irena Czerwonogóra

Eksperyment myślowy EPR a spór o przedmiot mechaniki kwantowej

Nowa Krytyka 6, 87-94

1995

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, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.

Irena Czerwonogóra

Eksperyment myślowy EPR a spór o przedmiot mechaniki kwantowej

Kiedy jest mowa o doświadczeniu, zawsze podkreśla się rolę jaką ono pełni w: a) uzasadnianiu (sprawdzaniu) hipotez, koncepcji, teorii; b) procesie genezy teorii – eksponując jego funkcję heurystyczną względem niej. Ponieważ teorię fizyczną traktuje się jako zbiór sądów (twierdzeń) uporządkowanych dedukcyjnie, to z punktu widzenia tak rozumianej teorii, doświadczenie funkcjonuje jako jedno lub kilka twierdzeń w owym porządku teoretyczno-dedukcyjnym.

Inaczej sprawa się przedstawia, gdy na doświadczenie spojrzymy nie jako na dostarczające określonego twierdzenia "potrzebnego teorii", ale jako na dające możliwość "zrobienia, wytworzenia" określonych stanów rzeczy, czyli jako na sposób nadawania określonym twierdzeniom postaci względnie autonomicznej w stosunku do twierdzeń, myśli, przekonań. Innymi słowy, kiedy doświadczenie przypisujemy funkcję kreującą rzeczywistość fizyczną.

Doświadczenie możemy sobie również wyobrazić, a ponieważ w fizyce wyobrażenia (kontrolowana gruntowną znajomością praw fizyki) odgrywała zawsze ważną rolę, więc w historii fizyki znane są tzw. doświadczenia myślowe, będące często przełomem w jej rozwoju.

Struktura logiczna eksperymentu myślowego była wielokrotnie przedmiotem dociekań w metodologii nauk. *Prima facie* przyjąć można następujące stanowisko. Eksperyment myślowy jest to argument w sporze teoretycznym, w którym oponenty przyjmują pewne wspólne *presupozycje* dotyczące konceptualizacji przedmiotu badań (w eksperymencie myślowym Galileusza taką presupozycją było przekonanie o addytywności masy [por. Żukrowska 1976]). Eksperyment myślowy jest argumentem *ad absurdum*: pokazuje mianowicie, że formułowany *explicite* pogląd jednego z teoretyków jest logicznie sprzeczny z akceptowaną wspólnie presupozycją.

Jednym z takich doświadczeń jest eksperyment zaproponowany w 1935 r. przez Einsteina i jego dwóch współpracowników: Podolski'ego i Rosena (Eksperyment myślowy EPR). Einstein nie lubił¹ oficjalnej interpretacji mechaniki kwantowej, często więc wiódł spory z jej współtwórcą – Nielsem Bohrem. I właśnie ów eksperyment miał być jednym z argumentów przeciw Bohrowi i wnioskowi wynikającym z zasady nieoznaczoności Heisenberga². Miał bowiem wykazać "wewnętrzzną sprzeczność" ortodoksyjnej interpretacji mechaniki kwantowej. Eksperyment ten przedstawia się następująco:

Mamy dwuatomową cząstkę o zerowym spinie całkowitym, a każdy z atomów ma spin równy 1/2. Cząstka ta ulega dysocjacji tak, by moment pędu nie zmienił się. Atomy rozdziela się i szybko przestaną na siebie oddziaływać. Gdyby spin był klasyczną

¹ Einstein – zwolennik przyczynowości – nie mógł się pogodzić z nieobiektywnym obrazem świata proponowanym przez mechanikę kwantową. Uważał, że prawdopodobieństwa nie mogły stanowić rzetelnych podstaw całej teorii, że teoria kwantów jest niepełna. "Moim zdaniem – argumentował – kompletna teoria winna nieodzownie spełniać następujące wymagania: każdy element fizycznej rzeczywistości musi mieć swój odpowiednik w teorii" [Einstein, Podolski, Rosen, 1935, s. 777].

² Zasada nieoznaczoności Heisenberga

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq h$$

jest to związek między odpowiednio zdefiniowaną nieokreślonością pędu Δp i położenia cząstki Δx . Z relacji tej wynika, że nie można jednocześnie wyznaczyć dokładnie położenia i pędu cząstki. Najczęściej mamy do czynienia ze skończonym rozmyciem zarówno pędu, jak i położenia cząstki.

zmienną (którą nie jest), można by powiedzieć, że wszystkie składowe spinu jednego z atomów mają ściśle określone wartości, zawsze równe i przeciwnie skierowane do składowych drugiego atomu. Ta korelacja powinna utrzymywać się również po rozdzielaniu atomów i powinna być określona przez deterministyczne równanie ruchu. Wobec tego, mierząc dokładnie spin jednego z atomów poznalibyśmy bez dodatkowych bezpośrednich pomiarów spin drugiego atomu.

Ponieważ w mechanice kwantowej można zmierzyć pewną składową spinu jednego z atomów wiedząc, że podobny pomiar dla drugiego atomu dałby wartość przeciwną, można więc przypuszczać, że po zmierzeniu składowej (położenia) q_x jednego atomu, składowa q_x drugiego atomu musi być elementem rzeczywistości, który istniał zanim został przeprowadzony pomiar pierwszego atomu. Prowadzi to do wniosku, że muszą istnieć zdefiniowane elementy rzeczywistości, które odpowiadają równoczesnemu określeniu składowych q_x, q_y, q_z .

Ponieważ funkcja falowa Ψ (równania Schrödingera³) może co najwyżej wyszczególnić dokładnie tylko jedną składową w czasie, Einstein wywnioskował stąd, że informacja zawarta w funkcji falowej jest niekompletna.

Żeby się przekonać, czy wniosek ten jest właściwy rozpatrzmy (na przykład) dwie niekomutujące⁴ wielkości obserwowalne, takie jak położenie i pęd elektronu. Wartości żadnej z tych wielkości nie

³ Równanie Schrödingera

$$p(x,t) dx = |\Psi(x,t)|^2 dx = \Psi \cdot \Psi dx$$

jest to amplituda prawdopodobieństwa znalezienia cząstki (układu) w chwili t w stanie określonym przez jej argumenty (np. w punkcie x, y, z). Samo prawdopodobieństwo otrzymamy biorąc kwadrat bezwzględnej wartości $|\Psi|^2$ i mnożąc odpowiednio przez przedział liczb kwadratowych występujących w argumentcie. Np. $dP = |\Psi(t, x, y, z)|^2 dx dy dz$ daje nam prawdopodobieństwo znalezienia cząstki w chwili t w przedziale o szerokości $dx dy dz$ dookoła punktu x, y, z .

⁴ Własności mechaniki kwantowej:

operator – pewna operacja matematyczna (np. pochodna),

funkcja – obiekt, na który działa operator,

jeżeli wyniki działania operatorów qp i pq na tę samą funkcję są różne, to znaczy, że operatory q i p nie komutują.

mogą być w danym układzie ściśle określone. Dane są tylko w formie przybliżonej, w myśl zasady Heisenberga. Każda ze zmiennych może być ściślej zdefiniowana tylko kosztem dokładności określenia innej.

Nie ma ściśle określonych elementów rzeczywistości, które by należały tylko do elektronu. Nie daje to jednak wystarczającej odpowiedzi na wątpliwości Einsteina co do zastanawiającej sytuacji, w której dwa atomy są powiązane ze sobą w sposób, który narusza nasze rozumienie przyczynowości. Mianowicie tak, że eksperymentator w jednym obszarze wydaje się zdolny do oddziaływania na stan układu w obszarze oddalonym od niego.

W 1982 roku francuski zespół badawczy kierowany przez Alaina Aspecta wykonał zmodernizowaną wersję doświadczenia EPR⁵. Używane w doświadczeniu cząstki (fotony) znajdowały się w takiej odległości, aby żaden sygnał fizyczny nie był w stanie przenieść pomiędzy nimi informacji, zanim nie zostaną wykonane odpowiednie pomiary. Okazuje się, że cząstka dalsza (foton) "dowiaduje" się o swoim stanie spinowym natychmiast po ustaleniu (na skutek pomiaru) spinu cząstki bliższej.

Zaskakująca sytuacja z jaką mamy do czynienia w doświadczeniu EPR i doświadczeniu Aspecta wydaje się świadczyć o tym, że wyjaśnień należy szukać nie wśród znanych praw fizyki, a w jakimś nowym prawie. Przede wszystkim należy zwrócić uwagę na to, że nie mamy tu do czynienia z natychmiastowym lub choćby szybszym od światła rozprzestrzenianiem się sygnału zdolnego do przenoszenia informacji. My po prostu, wykonując pomiar spinu jednego fotonu, natychmiast otrzymujemy informacje o spinie drugiego. A zatem wyniki doświadczenia Aspecta nie przeczą teorii względności, według której żaden sygnał nie może poruszać się szybciej od światła. By podkreślić ten fakt, fizycy mówią nie tyle o komunikowaniu się dwóch fotonów w doświadczeniu Aspecta, ile raczej o korelacji między nimi.

Stan fotonów z doświadczenia Aspecta jest zakodowany w ich funkcji stanu. Informacja o zmierzonej wartości spinu nie musi się

⁵ Korzystam tu z opisu przedstawionego przez M. Hellera [Haller 1994].

przemieszczać, ona jest zawarta w odpowiedniej funkcji stanu. To eksperymetatorzy wykonujący pomiary i aparaty pomiarowe znajdują się w przestrzeni. Fotony i inne cząstki elementarne nie wymagają przestrzeni, by się dowiadywać o swoim stanie. Zwracając uwagę na ten fakt fizycy mówią, że wnioski wynikające z eksperymentu myślowego EPR i doświadczenia Aspecta świadczą o nielokalności mechaniki kwantowej, tzn. że pojęcie miejsca straciło sens.

Celem EPR było obalenie pewnych interpretacji formuł nieoznaczoności. Einstein pisał:

"zupełnie nie podoba mi się obecnie modna pozytywistyczna tendencja do kurczowego trzymania się tego, co obserwowalne. Uważam za banalne to, iż w zakresie wielkości atomowych nie jest możliwe dokonywanie przewidywań z pożądanym stopniem dokładności i sądzę, że teorii nie można zmontować z wyników obserwacji, lecz można je jedynie wymyśleć.

Postawić można pytanie, czy – z punktu widzenia dzisiejszej teorii kwantów – statystyczny charakter naszych odkryć eksperymentalnych stanowi wyłącznie rezultat oddziaływania na system z zewnątrz, podczas gdy systemy same w sobie – opisywane za pomocą funkcji – zachowują się w sposób deterministyczny. Heisenberg igra z taką interpretacją, lecz nie przyjmuje jej konsekwentnie. Pytanie to postawić można jednak również w taki sposób: czy funkcję Ψ – której zmiany uwarunkowane czasowo mają, zgodnie z równaniem Schrödingera, charakter deterministyczny – winniśmy traktować jako całkowity opis rzeczywistości fizycznej, przy czym jedynie (niedostatecznie znane) oddziaływanie na system z zewnątrz przez obserwację winniśmy obarczać odpowiedzialnością za to, iż przewidywania nasze mają charakter tylko statystyczny?

Odpowiedź do jakiej doszliśmy, brzmi, iż funkcji nie należy traktować jako całkowitego opisu fizycznego stanu systemu.

[...] Ortodoksyjny teoretyk fizyki kwantowej oczywiście powie, iż nie ma niczego takiego jak opis całkowity i że możliwy jest jedynie statystyczny opis całości systemów, a nie opis systemu pojedynczego. Jednakże przede wszystkim powinien on to powiedzieć; a po drugie, nie wierzę, że będziemy musieli na zawsze zadowolić się tak błahym opisem przyrody.

Zauważyć trzeba, że niektóre ze ścisłych przewidywań, jakie uzyskać mogę w oparciu o system B (zgodnie ze swobodnie wybranym sposobem mierzenia A) można powiązać wzajemnie w taki sposób, jak powiązane są pomiary położenia i pędu. Nie unikniemy więc wniosku, że system B faktycznie ma określony pęd i określone współrzędne położenia. Bowiem to, czego dotyczyć mogą moje przepowiednie, w oparciu o swobodny wybór, musi istnieć w rzeczywistości.

Moim zdaniem współczesny, zasadniczo statystyczny opis, stanowi jedynie stadium przejściowe". [Popper, 1977, s. 368].

Einstein uważał, że pewne wnioski z EPR formułowane na bazie mechaniki kwantowej są sprzeczne z teorią względności. Jednakże wyniki doświadczenia Aspecta wykazały, że nie miał racji.

Jaką rolę spełniają eksperymenty myślowe w kreowaniu rzeczywistości fizycznej? Pod względem historycznym ich rola jest podobna do roli rzeczywistych eksperymentów laboratoryjnych czy obserwacji. Jednakże posiadają one zdolność ujawniania nieprzystosowalności przyrody do dotychczasowych oczekiwań. Ich funkcją jest ujawnianie sprzeczności tkwiących *implicite* w określonym sposobie myślenia. W rezultacie przeprowadzonego eksperymentu myślowego powstają nowe pojęcia zastępujące dotychczasowe, których stosowanie przyczyniło się do nieporozumień. Nie zawsze jednak pojęcia ulegające modyfikacji są wewnętrznie sprzeczne. Są one często rezultatem trudności wynikających z niemożności dostosowania aparatury pojęciowej do nowego obszaru rzeczywistości. Dzięki specyficznej konceptualizacji świata, ekspe-

rymenty myślowe uwalniają niedostępne dotąd informacje przyczyniając się do rewizji istniejącej teorii. Dlatego, jak twierdzi Kuhn [Kuhn 1985, s. 369], eksperyment myślowy jest jednym z podstawowych narzędzi wykorzystywanych podczas kryzysu teorii. Służy on do przeprowadzenia reformy pojęciowej, a jego rezultat może być taki, jak wynik rewolucji. Umożliwia więc poszerzenie wiedzy o to, co dotychczas było niedostępne poznaniu, kreując tym samym nową rzeczywistość fizyczną. I dlatego tak często pojawia się w dziełach wielkich twórców nowych naukowych koncepcji – Arystotelesa, Galileusza, Kartezjusza, Bohra, Einsteina.

Bibliografia

- Ajdukiewicz K. 1960: *Język i poznanie*. Warszawa.
- Białobrzeski C. 1984: *Podstawy poznawcze fizyki świata atomowego*. Warszawa.
- Einstein A., Podolsky B., Rosen N. 1935: *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Complete?*, [w:] "Physical Review", vol. 47, s. 777.
- Feyerabend P. 1979: *Jak być dobrym empirystą*. Warszawa.
- Heisenberg W. 1965: *Fizyka a filozofia*. Warszawa.
- Heller M. 1994: *Wszechświat u schyłku stulecia*. Kraków.
- Kemeny J.G. 1967: *Nauka w oczach filozofa*. Warszawa.
- Kmita J., Pałubicka A. 1992: *Problem użyteczności pojęcia doświadczenia*, [w:] Such J. (red.) *Poszukiwanie pewności i jego postmodernistyczna dyskwalifikacja*, s. 149–181.
- Kaku M., Trainer J. 1993: *Dalej niż Einstein*. Warszawa.
- Kuhn T.S. 1968: *Struktura rewolucji naukowych*. Warszawa.
- Kuhn T.S. 1985: *Dwa bieguny*. Warszawa.
- Norwood J. 1982: *Fizyka współczesna*. Warszawa.
- Popper K.R. 1977: *Logika odkrycia naukowego*. Warszawa.
- Prigogine I., Stengers I. 1990: *Z chaosu ku porządkowi*. Warszawa.
- Huch J. 1975: *Problemy weryfikacji wiedzy*. Warszawa.

- Van Name F.W. 1965: *Fizyka współczesna*. Warszawa.
- Weinberg S. 1994: *Sen o teorii ostatecznej*. Warszawa.
- Werle J. 1970: *Rozwój i perspektywy fizyki*. Warszawa.
- Wójcicki R. 1982: *Wykłady z metodologii nauk*. Warszawa.
- Zeidler P. 1993: *Spór o status poznawczy teorii*. Poznań.
- Żukrowska A. 1976: *Założenia eksperymentu myślowego Galileusza*, [w:]
"Studia Metodologiczne" nr 14.