

M a r e k    K u ś

## Zasada Leibniza w mechanice kwantowej

Tomasz Bigaj, *Identity and Indiscernibility in Quantum Mechanics*, Palgrave Macmillan, Springer Nature Switzerland, Cham 2022, 260 s.

Leibnizowska zasada identyczności przedmiotów nierozróżnialnych (*principium identitatis indiscernibilium*), stwierdzająca, że dwa przedmioty mające dokładnie te same cechy są identyczne, tj. są tym samym przedmiotem, tworzy w połączeniu z dodatkowym założeniem nierozróżnialności przedmiotów identycznych (dwa przedmioty identyczne mają dokładnie te same cechy) jedną z najważniejszych ogólnych zasad metafizycznych, niezbędną, jak się wydaje, np. w dyskusji na temat indywiduów. Choć można kontestować jej uniwersalność nawet dla obiektów makroskopowych (Max Black), to prawdziwe zagrożenie stwarza mechanika kwantowa. Dopuszcza ona, czy wręcz postuluje, istnienie obiektów pod każdym względem identycznych, a jednak w jakimś sensie różnych. Tak więc wszystkie elektrony są identyczne pod każdym względem, a jednocześnie ich liczba może być większa niż jeden. Pogląd, że zasada Leibniza jest łamana w mechanice kwantowej układów cząstek identycznych, zakorzenił się w filozofii fizyki i, jak się wydaje, był powszechnie akceptowany do lat 80. XX wieku (Steven French i Michael Redhead, Alberto Cortes, Elena Castellani i Peter Mittelstead, Allen Ginsberg).

Kompatybilny z łamaniem zasady Leibniza jest więc pogląd, że cząstki takie jak elektrony nie mogą być traktowane jako indywidua w sensie, do którego jesteśmy przywiązani w fizyce układów makroskopowych (opisywanych mechaniką klasyczną). Klasyczne obiekty można bowiem indywidualizować przez ogół ich cech. Jednak dla fizyka takie podejście do obiektów mechaniki kwantowej nie jest atrakcyjne. Wyniki wielu doświadczeń dotyczą

bowiem „pojedynczych cząstek” i nie jest jasne, w jakim sensie taka cząstka nie stanowi indywiduum.

Książka Tomasza Bigaja dyskutuje opisane powyżej problemy i robi to w sposób mistrzowski. Zasadniczy jej wątek to dyskusja, czy cząstki tego samego typu (to termin używany przez autora w celu uniknięcia stosowanych w fizyce określeń „cząstki identyczne” czy „cząstki nierozróżnialne”, z góry suponujących własności tych obiektów), np. elektrony, można odróżniać jeden od drugiego za pomocą ich własności fizycznych. A jeśli tak, to jak to robić?

Potencjalnego czytelnika należy ostrzec, że większość przeprowadzanych w książce rozumowań wymaga pewnej znajomości mechaniki kwantowej i używanego w niej formalizmu. Na szczęście autor w zasadzie ogranicza się do mechaniki kwantowej w skończenie wymiarowej przestrzeni Hilberta (co pozwala np. na analizę układów spinowych), a wtedy formalizm matematyczny mechaniki kwantowej wykorzystuje jedynie elementarną algebrę liniową. Podstawowe pojęcia mechaniki kwantowej opisane są w „Dodatku” zamykającym książkę. Czy to wystarczy, aby dzieło było dostępne dla nefizyków, trudno mi (jako fizykowi) stwierdzić. Sądzę, że czytelnicy nieznający podstaw mechaniki kwantowej napotkają tu niemałe trudności, gdyż wnioski wyciągane są przez autora na podstawie obliczeń.

Dla dalszych rozważań nad książką Tomasza Bigaja niezbędne jest jednak krótkie przypomnienie, jak wygląda matematyczna struktura mechaniki kwantowej. Tak więc stany układów fizycznych, takich jak np. cząstki elementarne (elektrony, protony, mezony), opisywane są wektorami w przestrzeni liniowej – przestrzeni Hilberta (w rzeczywistości, dla uzyskania jednoznaczności takiego przedstawienia, powinniśmy przejść do odpowiedniej przestrzeni rzutowej, jednak nie jest to tutaj istotne). Wielkości fizyczne, takie jak np. energia, spin itp., reprezentowane są przez operatory liniowe działające w danej przestrzeni Hilberta. Mechanika kwantowa jest teorią statystyczną i dla powiązania formalizmu z rzeczywistością posługujemy się wartościami średnimi. Istnieje dokładny przepis, jak, znając stan układu, znaleźć wartość średnią obserwabli przy przeprowadzeniu szeregu doświadczeń. W wypadku większej liczby cząstek odpowiednią przestrzenią Hilberta jest iloczyn tensorowy (tzn. uporządkowany arbitralnie zbiór wektorów po jednym z każdej z przestrzeni pojedynczej cząstki wraz z ich kombinacjami liniowymi – możliwość tworzenia kombinacji liniowych stanów jest szczególną cechą mechaniki kwantowej, na gruncie klasycznym taka operacja nie ma sensu). Tak więc każdej z cząstek odpowiada numer tej przestrzeni w iloczynie, zgodny z przyjętym porządkiem numerowania przestrzeni. Taki opis zdaje egzamin, gdy mamy do czynienia z cząstkami o różnych własnościach fizycznych, np. elektronem i protonem, tworzącymi układ dwuskładnikowy. Jednak gdy wszystkie cząstki są tego samego typu (np. wszystkie są elektronami), mechanika kwantowa wymaga, aby wartość średnia każdej obserwabli nie zmieniała się przy dowolnej zamia-

nie (permutacji) składników. Jest to tzw. postulat nieodróżnialności. Jego wymagania będą spełnione przez przyjęcie tzw. postulatu symetryzacji – stany całego układu muszą być całkowicie symetryczne lub całkowicie antysymetryczne ze względu na zamianę cząstek. Oznacza to, że zbiorem stanów układu złożonego jest nie cała „dostępna” przestrzeń Hilberta (iloczyn przestrzeni poszczególnych cząstek), ale jej symetryczna (antysymetryczna) podprzestrzeń. Cokolwiek zdarza się takiemu układowi złożonemu, pozostawia go w tej podprzestrzeni. W dalszym ciągu jednak, przynajmniej w ortodoksyjnym podejściu do mechaniki kwantowej, numery przestrzeni odpowiadają numerom pojedynczych cząstek – taki postulat nazywany jest „postulatem faktoryzmu” (ang. *factorism*). Okazuje się jednak, co pokazano w rozdziale drugim książki, że z postulatu symetryzacji wynika też odpowiednia symetria obserwabli, tzn. możemy założyć, że używamy tylko obserwabli symetrycznie działających na wszystkie składniki podukładu. Co więcej, zmuszeni jesteśmy do używania tylko symetrycznych obserwabli, gdyż obserwable niesymetryczne mogłyby wyprowadzić układ z (anty)symetrycznej podprzestrzeni. Tu pojawia się zasadniczy problem. Chcielibyśmy bowiem mieć możliwość wykonywania pewnych operacji, np. pomiaru obserwabli na konkretnej cząstce, jednak jest to niemożliwe, gdyż każda symetryczna obserwabla działa na wszystkie cząstki jednakowo. Nie jesteśmy więc w stanie zindywidualizować poszczególnych cząstek. Rozdziały 2 i 3 omawianej książki zawierają wyczerpującą analizę wszystkich tych zagadnień. Jest to najlepsza znana mi prezentacja tej problematyki w literaturze światowej.

Z punktu widzenia filozofa, ważne są przede wszystkim ontologiczne i epistemologiczne konsekwencje opisanych powyżej w skrócie wyników formalnych. W ramach przedstawionej interpretacji mechaniki kwantowej, dotyczącej układów cząstek tego samego typu, Zasada Leibniza jest więc łamana. Autor dyskutuje dogłębnie zależności między wspomnianymi powyżej postulatami oraz Zasadą Leibniza i wyjaśnia ich źródła (przede wszystkim empiryczne). Dyskusja w tym kontekście Zasady Leibniza dotyczy cech, które należy wziąć pod uwagę przy ustalaniu nieodróżnialności cząstek – tak np. przyjęcie, że cechą taką jest *haecceitas*, czyli własność czyniąca każde konkretne indywiduum akurat tym indywiduum, którym to indywiduum jest, trywializuje Zasadę Leibniza, sprowadzając ją do logicznej prawdziwości. Podstawowym zagadnieniem pozostaje jednak odpowiedź na pytanie, czy Zasada Leibniza jest konieczna i wystarczająca dla celów empirycznych: możliwości wskazywania poszczególnych cząstek i stwierdzania ich numerycznej identyczności (np. w celu wyznaczenia ich liczby). Temu poświęcona jest pozostała część omawianej książki. Rozpoczyna się ona w rozdziale 4 dyskusją różnych wariantów odróżnialności. Jak się wydaje, najważniejszą z punktu widzenia mechaniki kwantowej jest tzw. słaba odróżnialność, zaproponowana przez Simona Saundersa. Koncepcja ta zyskała pewną popularność i choć jasne było, że nie

umożliwia ona odwoływanie się do poszczególnych obiektów w wypadku nierozróżnialności, to dawała nadzieję na ugruntowanie numerycznego zróżnicowania obiektów (np. w celu ustalenia ich liczby). Formalnie zasada ta postuluje, że w języku, którego używamy w dyskursie dotyczącym kwantowych cząstek tego samego typu, można skonstruować relację symetryczną i niezwrotną. Relacja taka (słabo) rozróżnia obiekty, jeśli spełniana jest przez obiekty  $a$  i  $b$ . Taki sposób rozróżniania obiektów zostaje skrytykowany w rozdziale 4 (był też krytykowany wcześniej przez kilku autorów). Uważam jednak, że podstawowy zarzut cyrkularności (presuponujemy bowiem, że istnieją dwa *a priori* różne obiekty) jest raczej chybiony, czy to w tym wypadku, czy w innych podobnych, gdyż można go zastosować do samej Zasady Leibniza, co czyni jej dyskusję zasadniczo bezprzedmiotową. Ważne jest jednak, że słaba odróżnialność nie zapewnia możliwości odnoszenia się do jednego i żadnego innego obiektu.

Spróbujmy sformułować krótkie omówienie problemu Zasady Leibniza w mechanice kwantowej układów cząstek tego samego typu. Z punktu widzenia fizyki doświadczalnej, chcielibyśmy mieć, po pierwsze, możliwość odnoszenia się do poszczególnych cząstek, i po drugie, możliwość indywidualizacji numerycznej cząstek (a więc m.in. możliwość, że liczba ich w danym układzie będzie np. równa 2). Standardowo przypisujemy każdej z cząstek „jej” przestrzeń Hilberta (faktoryzm), a następnie chcielibyśmy dokonać pomiaru danej obserwabli (np. składowej spinu) w jednej z tych przestrzeni, co pozwoliłoby na stwierdzenie „składowa spinu  $k$ -tej cząstki w danym kierunku wynosi tyle a tyle”. Ponieważ jednak stany układu kwantowego cząstek tego samego typu są zawsze albo całkowicie symetryczne, albo całkowicie antysymetryczne względem permutacji, obserwabla, niejako ze swej natury, muszą być symetryczne i działać we wszystkich przestrzeniach Hilberta w taki sam sposób. Nie istnieje więc procedura pomiaru obserwabli na  $k$ -tej cząstce.

W omawianej książce Tomasz Bigaj nazywa powyższe ujęcie problemu „ortodoksyjnym”, a następnie proponuje i szczegółowo dyskutuje podejście „heterodoksyjne”, przy którym indywidualizacja, tzn. możliwość przypisania poszczególnym cząstkom różnych własności, jest dokonywana za pomocą jedynych dopuszczalnych obserwabli, tzn. obserwabli symetrycznych względem permutacji. Szczegółowa konstrukcja takich obserwabli jest przedstawiona w książce. Cel zostaje osiągnięty poprzez rezygnację z faktoryzmu, na rzecz takich sformułowań, dotyczących układu cząstek tego samego typu, jak np. „jedna z cząstek ma składową spinu o jakiejś wartości, a druga z nich o innej”, przy czym określenia „jedna” i „druga” nie odnoszą się do konkretnych numerów przestrzeni Hilberta pojedynczych cząstek, ale oznaczają „jedna z dwóch cząstek” itd.

W książce szczegółowo porównano podejście „ortodoksyjne” i „nieortodoksyjne”, a przede wszystkim przedyskutowano problemy, jakie stwarza po-

dejsie „heterodoksyjne” (problemy podejścia „ortodoksyjnego” już znamy). Dwa z nich wydają mi się szczególnie ważne. Po pierwsze, skonstruowana symetryczna obserwabla, oprócz pomiaru konkretnych wartości związanej z nią wielkości fizycznej, indywidualizuje cząstki, inna obserwabla, związana z inną wielkością fizyczną, prowadzi do innej indywidualizacji („innych cząstek”). Po drugie, do znanych problemów związanych z identycznością diachroniczną w świecie makroskopowym dodaje problemy specyficznie kwantowe, szczegółowo omówione w książce. Nie ulega dla mnie wątpliwości, że problemy te nie znalazły dotychczas ostatecznego rozwiązania, co w kilku wypadkach stwierdza również autor.

Dla filozofa szczególnie atrakcyjny powinien być ostatni rozdział książki, poświęcony metafizyce obiektów kwantowych. To, że ontologia mechaniki kwantowej może być zasadniczo różna od ontologii obiektów klasycznych, jest, mniej lub bardziej, jasne od zarania mechaniki kwantowej. Do pewnego stopnia opracowany przez Nielsa Bohra opis pomiaru w mechanice kwantowej, podkreślający, że w procesie tym jesteśmy skazani na używanie języka teorii klasycznej do opisu zjawisk, które tej teorii nie podlegają, można traktować jako antycypację problemu, gdy „na siłę” staramy się wtłoczyć ontologię świata kwantowego w znany świat klasyczny (choćby przez używanie pojęć takich jak „cząstka”). Odejście od podobnego traktowania obiektów kwantowych oferuje kwantowa teoria pola, w której zamiast „cząstek” używa się „kwantów”, tzn. w tym kontekście, wzbudzeń pola kwantowego. Taki formalizm omawiany jest też w książce w rozdziale 7. Wprawdzie jego dyskusja została u mnie pewien niedosyt, został on jednak w dużej mierze zredukowany przez lekturę ostatniego rozdziału, gdzie omówiono różne koncepcje ontologiczne obiektów kwantowych, a przede wszystkim porównano metafizyczne konsekwencje wspomnianych wyżej podejść: „ortodoksyjnego” i „heterodoksyjnego”.

Książka Tomasza Bigaja jest, jak już wspomniałem, książką trudną. Wymaga niezłego obycia zarówno z formalizmem mechaniki kwantowej, jak i jej podstawami filozoficznymi. Zarówno więc dla fizyków zainteresowanych podstawami mechaniki kwantowej, jak i filozofów nauki może być sporym wyzwaniem. Jednocześnie, jak już również wspomniałem, książka jest najlepszym i najbardziej wyczerpującym dziełem dotyczącym fizyki i filozofii układów cząstek tego samego typu w literaturze światowej.