

HENRYK PIERSA

IDENTYCZNOŚĆ MIKROOBIEKTÓW*

1. W logice pojęcie identyczności (tożsamości, równości) rozumiane jest jako relacja zachodząca między jednostkowym przedmiotem a nim samym. Nie można orzec o dwu numerycznie różnych przedmiotach, że są identyczne, choćby posiadały takie same własności. To, pochodzące od G.W. Leibniza rozumienie identyczności, jest bliskie etymologii terminów używanych na oznaczenie omawianej relacji: jednakowy, ten sam, tożsamy, równy sobie.

Za A.N. Whiteheadem i B. Russellem oznaczoną znakiem „=” identyczność definiuje następująca formuła:

$$a = b \Leftrightarrow \Lambda_F[F(a) \Leftrightarrow F(b)] \quad (1)$$

Przedmiot, denotowany nazwą \underline{a} , jest identyczny z przedmiotem oznaczanym nazwą \underline{b} wtedy i tylko wtedy, gdy posiada każdą cechę, jaką posiada przedmiot denotowany nazwą \underline{b} . Innymi słowy: przedmioty oznaczane nazwami \underline{a} i \underline{b} są identyczne wtedy i tylko wtedy, gdy każda cecha przysługująca pierwszemu z nich przysługuje także drugiemu¹.

Nas interesować będzie identyczność w innym znaczeniu, rozumiana jako relacja zachodząca pomiędzy dwoma różnymi, jednostkowymi mikroobiektami materialnymi. W celu odróżnienia jej od identyczności-tożsamości, przyjmujemy następujące określenie: dwa dowolne mikroobiekty są identyczne, gdy posiadają takie same własności. W tym zdaniu pominięto słowo „wszystkie”, gdyż w pewnych uogólnieniach dyskutowanej relacji ono nie występuje. Wypada dodać, że relacja między mikroobiektami jest symetryczna i przechodnia. Podobnie jak w logice, w fizyce kwantowej identyczne mikroobiekty są metodami fizykalnymi nierozróżnialne.

* Tekst referatu wygłoszonego podczas posiedzenia Komisji Filozofii Przyrody TN KUL 3 czerwca 2015 r.

¹ A. MOSTOWSKI, *Logika matematyczna*, Warszawa–Wrocław 1948, rozdz. V, § 1; J. SŁUPECKI, L. BORKOWSKI, *Elementy logiki matematycznej i teorii mnogości*, Warszawa 1963, rozdz. II, § 4; P. SIMONS, *Identyczność*, w: *Powszechna Encyklopedia Filozofii*, t. 4, red. A. Maryniarczyk, Lublin 2003; S. KICZUK, *Identyczność*, [w:] *Leksykon filozofii klasycznej*, red. J. Herbut, Lublin 1997, s. 288.

2. Artykuł dotyczy identyczności mikroobektów materialnych. Obiekty makroskopowe bowiem nie są identyczne. Przykładowo dwie, wykonane z tego samego izotopu żelaza kulki, o takich samych średnicach, umieszczone na dostatecznie czułej wadze, będą miały różne masy. Obejrzone przez niezbyt silnie powiększający mikroskop będą miały, „na idealnie gładkiej” powierzchni, różne rysy.

Skoro makroskopowe przedmioty identyczne nie są, należy szukać identycznych mikroobektów wśród atomów, jąder atomowych i cząstek fundamentalnych.

Nasze rozważania poprzedzimy podaniem odpowiednich informacji z mechaniki kwantowej. Omówimy tak zwane funkcje symetryczne i antysymetryczne dla układu dwu cząstek bez uwzględnienia spinu i z uwzględnieniem W. Pauliego teorii spinu.

Niech będzie dany układ dwu cząstek, np. elektronów, protonów lub atomów, poruszających się w pustej przestrzeni konfiguracyjnej wzdłuż osi x . Rozwiązaniem równania Schrödingera, dla nieoddziałujących ze sobą cząstek, jest iloczyn funkcji:

$$\Psi_s = A \Psi_1(x_1) \Psi_2(x_2), \quad (2)$$

gdzie x_1 i x_2 są współrzędnymi 1. i 2. cząstki, wskaźniki 1 i 2 numerują funkcje falowe, współczynnik A zaś jest czynnikiem normującym funkcję Ψ_s . W naszym przypadku $A = 1$.

Funkcja Ψ_s jest funkcją symetryczną, to znaczy nie zmieniającą znaku przy zamianie miejsc cząstki 1. z cząstką 2. Okazuje się, że całą równania Schrödingera jest także funkcja $-\Psi_1(x_2) \Psi_2(x_1)$, która przy permutacji cząstek zmienia znak „+” na „-”. Taką funkcją nazywa się antysymetryczną. Dodajmy, że liniowość równania Schrödingera pozwala tworzyć kombinacje liniowe z omówionych funkcji, zarówno symetrycznych, jak i antysymetrycznych².

W mechanice falowej Schrödingera funkcja Ψ zależy od współrzędnych przestrzennych (dla równania amplitud), nie zależy od współrzędnej spinowej cząstki.

W 1927 r. W. Pauli sformułował teorię spinu elektronu. Oprócz takich cech ilościowych jak masa spoczynkowa i ładunek elektryczny, elektron posiada własny spinowy moment pędu \vec{s} o wartości $\sqrt{\frac{3}{2}} \hbar$ oraz, sprzężony

² H.A. ENGE, M.R. WEHR, J.A. RICHARDS, *Wstęp do fizyki atomowej*, tłum. A. Kopystyńska, K. Ernst, Warszawa 1983, s. 234; H. MARGENAU, G.M. MURPHY, *Matematyka w fizyce i chemii*, tłum. J. Musielak, B. Borkowski, Warszawa 1962², s. 434 n.

z nim i zorientowany względem niego antyrównolegle spinowy moment magnetyczny $\vec{\mu}_s = -2 \frac{e}{2m} \vec{s}$. Okazuje się, że za strukturę subtelną poziomów energetycznych atomów, ich wiązanie w molekule, odpowiedzialny jest nie wektor \vec{s} , ale jego rzuty na wyróżniony w przestrzeni (przez wektor indukcji magnetycznej B) kierunek. W wyniku tej kwantyzacji przestrzennej wektora \vec{s} możliwe są dwa ustawienia: $+\frac{1}{2}\hbar$ lub $-\frac{1}{2}\hbar$. W żargonie fizyków używa się wyrażen „spin (ów rzut) jest skierowany do góry” (\uparrow) i „spin jest skierowany do dołu” (\downarrow) lub „trzecia składowa” czy „zetowa składowa” momentu spinowego wynosi $+\frac{1}{2}\hbar$ lub $-\frac{1}{2}\hbar$. Pauli wprowadził dwuskładnikową funkcję falową, zależną od zmiennej spinowej s : $X(s)$. Funkcja ta może przyjmować dwie wartości, scharakteryzowane jednokolumnowymi macierzami: $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ dla strzałki skierowanej do góry i $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ dla strzałki skierowanej w dół.

Dla dwu elektronów można utworzyć trzy symetryczne funkcje spinowe i jedną funkcję antysymetryczną³:

$$X_a(s) = \frac{1}{\sqrt{2}} [\alpha(1)\beta(2) - \alpha(2)\beta(1)], \quad (4)$$

gdzie litery α i β oznaczają macierze $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ i $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$, cyfry 1 i 2 numerują elektrony, zaś $\frac{1}{\sqrt{2}}$ jest czynnikiem normującym funkcję $X_a(s)$.

Dodajmy, że funkcja (4) jest utworzona dla dwu elektronów o antyrównolegle ustawionych trzecich składowych spinu; dla sumy spinów S i obydwu trzecich składowych spinów wynoszą zero.

W roku 1941 W. Pauli⁴ udowodnił następujące twierdzenia:

1. Identyczne cząstki o spinie całkowitym 0, 1, 2..., zwane bozonami, opisuje symetryczna funkcja falowa.

2. Identyczne cząstki o spinie ułamkowym $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$, zwane fermionami, opisuje antysymetryczna funkcja falowa.

W dalszych rozważaniach zaprezentowana będzie identyczność i nierozróżnialność bozonów, fermionów i nukleonów. Własności fermionów omówione będą na podstawie doświadczenia Sterna i Gerlacha.

3. Oprócz fotonów bozonami są mezony K i J/ Ψ oraz cząstki α , a także mikroobiekty złożone: jądra atomów o parzystej liczbie masowej A, atomu o parzystej liczbie masowej A i atomowej Z.

³ H.A. ENGE, M.R. WEHR, J.A. RICHARDS, *Wstęp do fizyki atomowej*, s. 236.

⁴ D. BŁOCHINCEW, *Podstawy mechaniki kwantowej*, tłum. Z. Kopeć, J. Werle Warszawa 1954, s. 449.

Przykładowo rozpatrzmy dwie cząstki α i dwa atomy helu-4. Dwie cząstki α posiadają po dwa, ustawione antyrównolegle, protony i neutrony. Wobec tego całkowite spiny tych cząstek wynoszą zero.

Masy tych cząstek są takie same, protony posiadają dodatnie ładunki elektryczne, neutrony są elektrycznie obojętne. Dwie cząstki α są identyczne i nierozróżnialne.

Każdą z cząstek α uzupełnimy elektronami o antyrównoległym ustawieniu spinów. Otrzymujemy dwa atomy helu-4 w stanie podstawowym. Jeżeli wymienione własności atomów uzupełnimy jeszcze takimi samymi strukturami (singletowymi i trypletowymi) poziomów energetycznych i takimi samymi energiami jonizacji, to atomy helu-4 są cząstkami identycznymi i nierozróżnialnymi.

Za identyczne i nierozróżnialne można uważać także jądra atomów parzysto-parzyste, zawierające tzw. liczby magiczne nukleonów: 8, 20, 82, 126, np. tlenu ^{16}O ($Z=8$, $N=8$) i ołowiu ^{208}Pb ($Z=82$, $N=126$).

W powyższych rozważaniach wybrano takie mikroobiekty, w których, w stanach podstawowych, spiny i spinowe momenty magnetyczne są ustawione antyrównolegle. Skutkiem tego sumaryczny spin i sumaryczny spinowy moment magnetyczny wynoszą zero⁵.

4. Do fermionów należą cząstki elementarne o spinie ułamkowym (elektrony, protony, neutrony...) oraz atomy posiadające jeden elektron „niesparowany” (walencyjny) na ostatnim poziomie energetycznym: wodór, lit i inne atomy z pierwszej grupy w układzie okresowym pierwiastków.

Do opisu elektronów swobodnych, jak i tych w wymienionych atomach, należy stosować antysymetryczną funkcję falową. Przy tym funkcja ta musi zależeć od współrzędnych przestrzennych i współrzędnej spinowej, Tworzy się ją, mnożąc funkcję symetryczną Ψ_s przez antysymetryczną $X_a(s)$, albo odwrotnie: antysymetryczną funkcję Ψ_a przez symetryczną funkcję $X_s(s)$. W dalszych rozważaniach wybieramy pierwszą możliwość, mnożąc funkcje (2) i (4):

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}} \Psi_1(x_1)\Psi_2(x_2)[\alpha(1)\beta(2) - \alpha(2)\beta(1)], \quad (5)$$

Nierozróżnialność identycznych atomów (i elektronów) można wykazać, stosując skomplikowane rozumowania w celu wyjaśnienia subtelnej struktury

⁵ Rozmieszczenie protonów i neutronów w jądrach oraz elektronów w powłokach energetycznych nie wpływa na zmianę jądra, atomu czy molekuly. Są to nadal te same jądra, atomy czy molekuly, tylko w innych stanach kwantowych.

poziomów energetycznych atomów, albo odwołując się do znacznie prostszego rozumowania, tłumaczącego wynik doświadczenia O. Sterna i W. Gerlacha. Wybieramy drugą ewentualność.

W 1922 r. Stern i Gerlach⁶ przeprowadzili doświadczenie z wiązką atomów srebra, przepuszczoną w doskonałej próżni, bez zewnętrznego pola i w niejednorodnym polu magnetycznym. W pierwszym przypadku na ekranie utworzył się (z napylnych atomów) pojedynczy odcinek (*a* na fotografii). W przypadku drugim utworzyły się, po obydwu stronach odcinka *a*, równoodległe do niego dwa ślady (*b* na fotografii). Prezentowane zdjęcie pochodzi z książki D. Błochincewa, dla doświadczenia z sodem.



Później omawiane doświadczenie powtórzono z atomami innych pierwiastków o jednym atomie walencyjnym.

Na początku XXI wieku przeprowadzono doświadczenie Sterna-Gerlacha ze swobodnymi elektronami w arsenku glinu o temperaturze 30 K (Yuichiro ze współpracownikami, 2004) oraz w selenku cynku w temperaturze pokojowej (D. D. Awaalom ze współpracownikami, 2006).

Wyjaśnienie tego zjawiska jest następujące: Atom srebra na podpoziomach $1s - 4d$ posiada parzyste liczby elektronów o antyrównoległym ustawieniu spinów. Całkowity spin tych sparowanych elektronów wynosi zero. Ponadto, na podpoziomie $5s$ znajduje się jeden niesparowany elektron, którego trzecia składowa s_3 w niejednorodnym polu magnetycznym może mieć wartość $+\frac{\hbar}{2}$ albo $-\frac{\hbar}{2}$.

Przed wejściem w pole magnetyczne, wektory \vec{s} niesparowanych elektronów w poszczególnych atomach srebra, posiadały wszystkie możliwe orientacje przestrzenne. W polu magnetycznym wektor \vec{s} elektronu w każdym atomie uległ kwantyzacji przestrzennej. Trzecie składowe pewnej liczby niesparowanych elektronów w atomach przyjmują wartość $+\frac{\hbar}{2}$, reszty $-\frac{\hbar}{2}$. Wiązka atomów srebra (i innych atomów I grupy) ulega podziałowi na dwa podzbiory, uwidocznione na ekranie jako dwa odcinki.

Należy dodać, że antyrównoległe ustawienie trzecich składowych spinów elektronów walencyjnych w obydwu śladach na ekranie posiada uzasadnienie

⁶ Sz. SZCZENIOWSKI, *Fizyka doświadczalna*, cz. V, 1: *Fizyka atomowa*, Warszawa 1959, s. 150-152; D. BŁOCHINCEW, *Podstawy mechaniki kwantowej*, s. 22-24.

teoretyczne w rozumowaniu dotyczącym oddziaływania dipola magnetycznego (u nas – trzeciej składowej spinu) z niejednorodnym polem magnetycznym. W związku z tym suma trzecich składowych spinu, ale oczywiście i spinów dwu elektronów, które na ekranie trafiły na inne odcinki, wynosi zero. Dlatego spośród kilku możliwych funkcji antysymetrycznych do opisu zachowania się dwu atomów, z których każdy trafia do innego śladu na ekranie, wybrano formułę (5).

Theo Mayer Kuckuk⁷ identyczność i nierozróżnialność dwu elektronów charakteryzuje w następujący sposób: „Biorąc pod uwagę funkcje falowe zależne tylko od współrzędnych położenia, nie możemy uważać obu elektronów za cząstki identyczne; tyle tylko, że obdarzone obecnie jednym wewnętrznym stopniem swobody”. Autor dodaje: „Przyłożenie [niejednorodnego – H.P.] pola magnetycznego pozwala na doświadczalne odróżnienie obu stanów elektronu”.

Autor przytoczonych wypowiedzi odróżnia elektron-cząstkę od jego stanu, opisanego funkcją falową, zależną od współrzędnych przestrzennych i współrzędnej spinowej. Tak scharakteryzowane cząstki nazywa identycznymi (domyślnie nierozróżnialnymi). Natomiast dwa stany dowolnego elektronu, scharakteryzowane liczbami $+\frac{\hbar}{2}$ i $-\frac{\hbar}{2}$, jak w doświadczeniu Sterna-Gerlacha, są rozróżnialne (i domyślnie nieidentyczne).

5. Sprawa identyczności cząstek stała się jeszcze bardziej złożona, gdy w 1932 r. W. Heisenberg wysunął propozycję, aby proton i neutron w jądrze atomowym potraktować jako jedną cząstkę – nukleon. Masa protonu wynosi ok. $1,673 \times 10^{-27}$ kg, neutronu $1,675 \times 10^{-27}$ kg, moment magnetyczny protonu jest równy $+2,7896$, neutronu zaś ok. $-1,9103$ magnetonu jądrowego. Proton posiada dodatni ładunek elementarny, neutron jest elektrycznie obojętny. Proton swobodny jest uważany za cząstkę trwałą, neutron jest cząstką nietrwałą o czasie życia 15,3 minuty. Różnice między tymi cząstkami są bardzo duże. Mimo tych różnic za traktowaniem omawianych cząstek jako jednej cząstki – nukleonu przemawia następująca racja. Oddziaływanie jądrowe silne pomiędzy dwoma protonami (p-p) jest tak samo duże jak oddziaływanie między dwoma neutronami (n-n) i w przybliżeniu takie samo jak oddziaływanie pomiędzy protonem i neutronem (p-n). W oddziaływaniach jądrowych silnych proton i neutron zachowują się tak jak cząstki identyczne⁸. Albo inaczej: w oddziaływaniach jądrowych silnych proton i neutron można traktować jako dwa stany: protonowy i neutronowy jednej

⁷ T. M. KUCKUK, *Fizyka jądrowa*, tłum. M. Kubiak, Warszawa 1987², s. 147.

⁸ Tamże, s. 147 n.

cząstki – nukleonu. Przy tym podobnie jak dwa różne stany elektronu (ustawienie spinów) można rozróżnić za pomocą niejednorodnego pola magnetycznego, tak dwa stany nukleonu można rozróżnić za pomocą pola elektrycznego.

Kierując się analogią ze spinem, dla dubletu proton-neutron wprowadza się pojęcie spinu izotopowego (izospinu), formalnego wektora w abstrakcyjnej, 3-wymiarowej przestrzeni izospinowej z trzecią składową I_3 , mogącą przyjmować wartości $+\frac{1}{2}$ dla protonu i $-\frac{1}{2}$ dla neutronu. Posługując się macierzami jednokolumnowymi, stan protonowy opisuje się macierzą $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$, natomiast stan neutronowy – macierzą $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$. Analogicznie do formuły (5) stan nukleonu opisuje się funkcją:

$$\Psi_c(r, s_3, I_3) = \Psi(r, s_3) \Phi(I_3), \quad (6)$$

gdzie $\Phi(I_3)$ jest funkcja izospinową.

Mamy więc kolejne uogólnienie pojęcia „cząstki identyczne”. Kuckuk pisze: „Z punktu widzenia Pauliego proton i neutron nie są z pewnością cząstkami identycznymi”. Jeżeli wyłączy się oddziaływanie elektrostatyczne, a pozostawi się oddziaływanie hadronowe, „...obie cząstki są... dokładnie identyczne”. Dodajmy, że oprócz dubletu nukleonowego znane są inne multiplety izospinowe. Przytoczmy tryplet pionowy. Stanowią go: elektrycznie dodatni pion π^+ , pion elektrycznie ujemny π^- i pion elektrycznie obojętny π^0 . Masa spoczynkowa pionów π^+ i π^- wynosi ok. 273,1 natomiast pionu π^0 264,1 mas elektronu. Piony posiadające ładunek elektryczny różnią się średnim czasem życia od czasu życia pionu π^0 .

W przypadku identycznych hadronów nie są istotne takie same masy, ładunki elektryczne, hiperładunki i inne charakterystyki porównywanych cząstek, ale tak samo duże ich oddziaływania wzajemne.

Można powiedzieć, że identyczne hadrony to mikroobiekty takie same ze względu na wielkość oddziaływania.

LITERATURA

- BŁOCHINCEW D., Podstawy mechaniki kwantowej, tłum. Z. Kopeć, J. Werle, Warszawa 1954.
 ENGE H.A., WEHR M.R., RICHARDS J.A., Wstęp do fizyki atomowej, tłum. A. Kopystyńska, K. Ernst, Warszawa 1983.
 KICZUK S., Identyczność, [w:] Leksykon Filozofii Klasycznej, red. J. Herbut, Lublin 1997.
 KUCKUK T.M., Fizyka jądrowa, tłum. M. Kubiak, Warszawa 1987².
 MARGENAU H., MURPHY G.M., Matematyka w fizyce i chemii, tłum. J. Musielak, B. Borkowski, Warszawa 1962².

MOSTOWSKI A., Logika matematyczna, Warszawa–Wrocław 1948.

SŁUPECKI J., BORKOWSKI L., Elementy logiki matematycznej i teorii mnogości, Warszawa 1963.

SIMONS P., Identyczność, [w:] Powszechna Encyklopedia Filozofii, t. 4, red. A. Maryniarczyk, Lublin 2003, s. 729-731.

SZCZENIOWSKI Sz., Fizyka doświadczalna, cz. V-1: Fizyka atomowa, Warszawa 1959.