

Andrzej Łukasik

Atomizm dawniej i dziś. O niewspółmierności ontologicznej klasycznego i kwantowo-mechanicznego pojęcia elementarnych składników materii

Studia Philosophiae Christianae 45/1, 133-162

2009

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.

ANDRZEJ ŁUKASIK

Zakład Ontologii i Teorii Poznania, Instytut Filozofii UMCS, Lublin

ATOMIZM DAWNIEJ I DZIŚ. O NIEWSPÓLMIERNOŚCI ONTOLOGICZNEJ KLASYCZNEGO I KWANTOWOMECHANICZNEGO POJĘCIA ELEMENTARNYCH SKŁADNIKÓW MATERII

1. Wstęp.
2. Zagadnienie trwałości.
3. Zagadnienie lokalizacji czasoprzestrzennej.
4. Zagadnienie zupełności charakterystyki.
5. Zagadnienie indywidualności.
6. Zagadnienie separowalności.
7. Wnioski.

1. WSTĘP

Erwin Schrödinger napisał ponad pięćdziesiąt lat temu, że „wzrost wiedzy sprawia w pewien sposób, że jesteśmy nie coraz bardziej, ale coraz to mniej pewni natury materii. Podczas gdy Dalton i jego szkoła mieli jasny obraz podstawowych cząstek materii jako realnych i niezniszczalnych ciał stałych, ze współczesnej mechaniki falowej wynika bardzo wyraźnie, że w ogóle nie istnieją identyfikowalne jednostki tego typu”¹. Myśl Schrödingera nie straciła na aktualności i dobrze ilustruje trudności pojęciowe dotyczące elementarnych składników materii w fizyce współczesnej. Chociaż fizyka XX wieku odniosła spektakularne sukcesy w poznaniu i opanowaniu świata atomów i dlatego stanowi potwierdzenie i rozwinięcie hipotezy atomistycznej, to jednak zmiany i trudności pojęciowe spowodowane przez mechanikę kwantową ukazały nieadekwatność ontologicznego modelu świata klasycznego atomizmu.

¹ E. Schrödinger, *What Is an Elementary Particle?*, w: *Interpreting Bodies. Classical and Quantum Objects in Modern Physics*, red. E. Castellani, Princeton, New Jersey 1998, 197.

Jak wiadomo, koncepcja głosząca, że materia ma strukturę dyskretną i zbudowana jest z pewnych elementarnych składników, zwanych atomami (gr. *atomos* – niepodzielny) pochodzi od greckich filozofów przyrody Leukipposa i Demokryta (IV w. p.n.e.). Przez ponad dwa tysiące lat atomizm był jednak jedynie spekulatywną koncepcją filozoficzną, ponieważ stan techniki eksperymentalnej nie pozwalał na sprawdzenie tezy o istnieniu atomów i próżni. Za twórcę naukowej atomistyki powszechnie uważany jest dopiero John Dalton. Dzięki jego pracom pojęcie atomu, rozumianego jako elementarny składnik substancji chemicznej, uzyskało status pojęcia naukowego i uzyskało związek z laboratoryjną praktyką badawczą w chemii. W połowie XIX wieku atomizm uzyskał status teorii naukowej również w fizyce (kinetyczno-molekularna teoria materii Jamesa Clerka Maxwella, Rudolfa Clausiusa i Ludwiga Boltzmanna). Dalsze badania doprowadziły do odkrycia złożoności atomów (Joseph John Thomsom – odkrycie elektronu) i postawienia pytań o to, w jaki sposób zbudowane są atomy. Okazało się, że wbrew etymologicznej treści pojęcia, atomy nie są obiektami niepodzielnymi i pozbawionymi struktury wewnętrznej. Wiemy współcześnie, że atomy złożone są z jądra atomowego (odkrył je Ernest Rutherford w 1911 roku) i elektronów, samo zaś jądro składa się protonów i neutronów, te zaś z jeszcze bardziej elementarnych składników – kwarków (Murray Gell-Man, 1964). W ten sposób za najbardziej podstawowe składniki materii uznano nie atomy, ale cząstki elementarne.

Jednak zarówno w chemii i fizyce XIX wieku, jak i w dawniejszej filozofii przyrody (od Leukipposa i Demokryta poczynając) elementarne składniki materii pojmowano właśnie jako „realne i niezniszczalne ciała stałe”, a to oznacza, że poglądy na temat elementarnych składników materii kształtowano na podstawie analogii z przedmiotami makroskopowymi. Rozwój badań nad atomistyczną strukturą materii doprowadził na początku XX wieku do ukazania nieoczekiwanych granic stosowalności fizyki klasycznej i nieadekwatności poglądowych modeli elementarnych składników materii. Okazało się, że mechanika klasyczna, która choć nadal znakomicie sprawdza się w obszarze makroskopowego doświadczenia, jest całkowicie nieadekwatna do opisu świata atomów i cząstek elementarnych i musi być zastąpiona mecha-

niką kwantową, której podstawy sformułowali w latach 1925–1926 niezależnie od siebie Werner Heisenberg i Erwin Schrödinger. Teoria ta jest podstawą naszego rozumienia fundamentalnej struktury materii i jest powszechnie uważana za najdokładniejszą ze wszystkich teorii naukowych, jakie kiedykolwiek zbudowano. Empiryczna adekwatność mechaniki kwantowej nie budzi najmniejszych wątpliwości – dzięki niej poznano własności atomów i cząstek elementarnych i, co nie mniej ważne, osiągnięto wiele sukcesów praktycznych: od rozbicia jądra atomowego po możliwość manipulowania pojedynczymi atomami.

Problem jednak w tym, że o ile zarówno spekulatywny atomizm filozofii przyrody, jak i atomizm fizyki klasycznej pozwalały na prostą i zgodną z naszym codziennym doświadczeniem odpowiedź na pytanie o naturę elementarnych składników materii (całkowicie niezależnie od tego, że z dzisiejszej perspektywy poglądy te mogą wydawać się naiwne), to mechanika kwantowa prowadzi do wniosku, że nie tylko wszystkie atrybuty, jakie tradycyjnie przypisywano elementarnym składnikom materii (atomom, a później cząstkom elementarnym), należy odrzucić jako nieadekwatne, ale również że nie potrafimy (jak dotąd) zbudować spójnego ontologicznego modelu mikroświata. Mechanistyczny obraz elementarnych składników materii z pewnością należy do przeszłości, a kwantowomechaniczne pojęcie elementarnego składnika materii okazuje się niewspółmierne z pojęciem klasycznym.

Spośród wielu znaczeń „niewspółmierności” interesować nas będzie tu niewspółmierność ontologiczna. Przyjmujemy, zgodnie z ontologią w sensie Quine’a, że odpowiedź na pytanie o to „co istnieje?” jest odpowiedzią na pytanie o to, jakiego rodzaju przedmioty postulowane są przez formalizm danej teorii naukowej. Zarówno bowiem mechanika klasyczna, jak i mechanika kwantowa postulują istnienie pewnych bytów, takich jak cząstki, siły, pole, przestrzeń czy czas, które składają się na ontologiczny model świata danej teorii. W dalszych rozważaniach porównamy jedynie pojęcie elementarnego składnika materii według fizyki klasycznej i kwantowej, stosując dla uproszczenia określenia „cząstka klasyczna” i „cząstka kwantowa” odpowiednio.

Klasyczne pojęcie cząstki można scharakteryzować następująco²:

1. Cząstki klasyczne to mikroskopijne ciała stałe, absolutnie niezmiennie, niepodzielne i niezniszczalne.
2. Cząstki klasyczne są realnymi przedmiotami, istnieją w czasie i przestrzeni.
3. Cząstki klasyczne mają określone pierwotne cechy, które są obiektywne i przysługują im niezależnie od tego, jakiego rodzaju układy złożone tworzą te cząstki oraz niezależnie od wykonywanych pomiarów.
4. Cząstki klasyczne są rozróżnialne, mogą być policzone i ponumerowane, a zamiana miejscami dwóch cząstek – nawet wówczas, gdy nie różnią się one od siebie żadną cechą wewnętrzną – tworzy obiektywnie nowy układ.
5. Cząstki klasyczne są niezależnie od siebie istniejącymi indywidualiami, o ile znajdują się w różnych obszarach przestrzeni.

Powyższe cechy przypisywane są obiektom określanym jako „ciała”, „rzeczy materialne” czy „przedmioty fizyczne” zarówno w literaturze filozoficznej³, jak i w ramach zdroworozsądkowej wizji świata. „Obiekt fizyczny” generalnie charakteryzowany jest zatem jako coś, co posiada pewien zespół obiektywnych cech fizycznych, jest zlokalizowane w czasie i przestrzeni i trwa w czasie⁴.

W dalszej części artykułu pokażemy, że fundamentalne kategorie, które miały charakteryzować atomy w ramach stylu myślowego De-

² Por. M. Redhead, P. Teller, *Particle Labels and Indistinguishable Particles in Quantum Mechanics*, *The British Journal for the Philosophy of Science* 43(1992)2, 202.

³ W celu ilustracji podamy jedynie dwa przykłady. „Świat składa się z rzeczy (substancji), np. gór, roślin, ludzi itd., które określone są przez różne cechy – np. barwy, kształty, dyspozycje i wzajemnie połączone różnorodnymi relacjami” (J. M. Bocheński, *Współczesne metody myślenia*, Poznań 1992, 13). W ontologii reizmu uznaje się tylko jedną kategorię ontologiczną, tzn. kategorię rzeczy, którą Tadeusz Kotarbiński charakteryzuje jako „arystotelesowskie substancje w sensie naczelnym (...), słowem poszczególne rzeczy lub osoby, przy czym termin «rzecz» ulega modernizacji i obejmuje wszystko, cokolwiek jest czasowe i przestrzenne, i fizycznie określone, np. fizycznie oddziaływające na coś innego”. T. Kotarbiński, *O postawie reistycznej czyli konkretystycznej*, w: *Dzieła wszystkie. Ontologia, teoria poznania i metodologia nauk*, Wrocław – Warszawa – Kraków 1993, 155.

⁴ Por. E. Castellani, *Introduction*, w: *Interpreting Bodies. Classical and Quantum Objects in Modern Physics*, dz. cyt., 3.

mokryta i Epikura, a w dużej mierze także w ramach stylu myślowego fizyki klasycznej, w mechanice kwantowej, czyli współczesnej postaci atomizmu, w ogóle nie występują. To, co Demokryt, a ponad dwa tysiące lat później Dalton rozumieli przez „atom”, w języku mechaniki kwantowej w ogóle nie da się wyrazić.

2. ZAGADNIENIE TRWAŁOŚCI

Od Leukipposa i Demokryta poczynając, przez Newtona, Daltona, aż do końca XIX wieku atomy pojmowano jako mikroskopijne ciała stałe, niepodzielne, niezmiennie i niezniszczalne. I tak Leukippos i Demokryt twierdzili, że „nieskończona jest ilość początków, które nazywali atomami, niepodzielnymi i nieprzenikliwymi dlatego, że są pełne i pozbawione próżni”⁵. Newton pisał, że „najmniejsze cząstki wszystkich ciał także są rozciągnięte, i twarde, i nieprzenikliwe, i podległe ruchowi, i obdarzone bezwładnością”⁶. „Te pierwotne cząstki, będące ciałami stałymi, są nieporównywalnie twardsze od jakichkolwiek porowatych ciał z nich zbudowanych; są one tak twarde, że nigdy się nie zużyją ani nie rozpadną na kawałki; żadna zwyczajna siła nie zdoła podzielić tego, co Bóg uczynił całością w pierwszym akcie stworzenia”⁷. Podobne przekonania na temat niezmienności i niezniszczalności podstawowych składników materii wyrażał również Dalton: „analizy i syntezy chemiczne nie wychodzą poza oddzielenie od siebie cząsteczek i ich połączenie. Żadnego tworzenia ani niszczenia materii nie można osiągnąć w dziedzinie chemii”⁸.

⁵ Simplicjusz, *De coelo*, 242, 15; FVS 67 A 14, w: W. F. Asmus, *Demokryt. Wybór fragmentów Demokryta i świadectw starożytnych o Demokrycie*, tłum. z ros. B. Kupis, Warszawa 1961, 108.

⁶ I. Newton, *Mathematical Principles of Natural Philosophy*, tłum. z łac. A. Motte, w: *Great Books of The Western World*, t. 34, *Mathematical Principles of Natural Philosophy. Optics*, by sir Issac Newton, *Treatise on Light*, by Christian Huygens, red. R. M. Hutchins, Chicago – London – Toronto 1952, 270.

⁷ I. Newton, *Optics*, w: *Great Books of The Western World*, t. 34, *Mathematical Principles of Natural Philosophy. Optics*, dz. cyt., 541.

⁸ J. Dalton, *New System...*, cz. 1, rozdz. 3, *On Chemical Synthesis*, <http://web.lemoyne.edu/~giunta/dalton.html>.

Od czasu odkrycia przez Ernesta Rutherforda (1911) jądra atomowego wiemy oczywiście, że nieprzenikliwość nie jest atrybutem atomów. Już w planetarnym modelu atomu Rutherforda w centrum znajduje się jądro atomowe, a elektrony krążą po kołowych orbitach, przy czym rozmiary liniowe jądra są około 100000 razy mniejsze niż rozmiary atomu. Okazało się zatem, że wbrew intuicjom starożytnych atomistów dominującym „składnikiem” atomów jest pusta przestrzeń. Odkrycie promieniotwórczości (Antoine Henri Becquerel, Pierre Curie i Maria Skłodowska-Curie) doprowadziło zaś do wniosku, że poszczególne atomy mogą się w siebie przekształcać – nie są zatem niezmiennie, niepodzielne i niezniszczalne.

Okazuje się jednak, że to samo dotyczy również cząstek elementarnych. W treści pojęcia elementarnego składnika materii – najpierw atomu, później cząstki elementarnej – zawierały się zawsze dwie konstytutywne cechy: niezmienność i niepodzielność⁹. Niezmienność znaczy, że cząstka jest absolutnie trwała, jeżeli porusza się swobodnie w przestrzeni¹⁰, niepodzielność – że nie jest zbudowana z bardziej elementarnych składników, na które może zostać rozłożona.

Spośród znanych cząstek elementarnych tylko proton¹¹, elektron, pozyton, foton i neutrino są trwałe. Trwałe są jednak również obiekty z całą pewnością złożone, takie jak jądra atomowe niepromieniotwórczych pierwiastków, a także jony i atomy takich pierwiastków oraz wiele złożonych cząsteczek chemicznych. Większość cząstek elementarnych jest jednak nietrwała i rozpada się na inne cząstki. Rozpadu cząstki elementarnej nie możemy jednak rozumieć w ten sposób, że cząstki, które są rezultatem rozpadu danej cząstki elementarnej, są jej składnikami i istnieją w tej cząstce przed rozpa-

⁹ Por. A. Łukasik, *Filozofia atomizmu. Atomistyczny model świata w filozofii przyrody, fizyce klasycznej i współczesnej a problem elementarności*, Lublin 2006, 291–293.

¹⁰ Por. E. Wichmann, *Fizyka kwantowa*, tłum. z ang. W. Gorzkowski, A. Szymała, Warszawa 1975, 407.

¹¹ Niektóre współczesne teorie fizyczne przewidują jednak rozpad swobodnego protonu, przy czym jego czas życia szacowany jest na co najmniej 10^{30} lat, a więc o wiele rzędów wielkości więcej niż czas życia wszechświata, który szacuje się na około 13,7 miliardów (czyli rzędu 10^{10}) lat.

dem w pewien sposób ze sobą połączone. Na przykład neutron, gdy wchodzi w skład jąder atomowych, zachowuje się jak cząstka trwała, ale neutron swobodny rozpada się na proton, elektron i antyneutrino elektronowe. Nie znaczy to jednak, że neutron zbudowany jest z protonu, elektronu i antyneutrino elektronowego. Musimy zatem stwierdzić, że jedne cząstki elementarne przekształcają się w inne cząstki, absolutna zaś trwałość nie jest adekwatnym kryterium elementarności. Jeśli proton okazałby się nawet cząstką absolutnie trwałą i tym samym uznalibyśmy go za cząstkę elementarną, to trudno znaleźć racje, dla których bardzo podobny do niego pod wielu względami, ale nietrwały neutron, nie byłby zaliczany do elementarnych składników materii. Poza tym zarówno proton, jak i neutron uznaje się za obiekty złożone z kwarków i jeżeli nawet nie będzie możliwe rozbicie nukleonów na swobodne kwarki, to jednak – zgodnie ze współczesnymi teoriami – protony i neutrony mają określoną strukturę wewnętrzną.

Ponadto, jeżeli już nawet pominiemy setki nietrwałych cząstek elementarnych lub cząstki, takie jak protony i neutrony, o których wiemy, że złożone są z kwarków, a zatem nie są obiektami elementarnymi, i skupimy uwagę na kwarkach i leptonach, zwanych cząstkami fundamentalnymi, to okazuje się, że nie wykazują one cech, które przypisywano atomom w sensie filozoficznym.

Cząstki fundamentalne nie są również odwieczne, ponieważ Wszechświat nie istnieje odwiecznie, ale miał początek w czasie – około 13,7 miliarda lat temu powstał w gorącym Wielkim Wybuchu. W bardzo wczesnym etapie ewolucji Wszechświata, zwanym erą Plancka¹², panowały tak ekstremalne warunki fizyczne, że materia w znanej nam postaci (ani atomy, ani nawet cząstki elementarne) nie mogła wówczas istnieć.

Wprawdzie elektron jest cząstką trwałą w tym sensie, że nie ulega spontanicznemu rozpadowi, to jednak w rezultacie zderzenia ze swoją antycząstką (pozytonem) ulega anihilacji – obydwie cząstki przestają istnieć, a powstają kwanty promieniowania elektromagnetycznego ($e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$). Procesy anihilacji dotyczą również par kwark – antykwark.

¹² Czas, odległość i gęstość Plancka wynoszą odpowiednio: $t_p = \sqrt{\hbar G/c^5} \approx 5,4 \times 10^{-44} s$, $l_p = \sqrt{\hbar G/c^3} \approx 1,6 \times 10^{-35} m$, $\rho_p = c^5/\hbar G^2 \approx 5,2 \times 10^{96} kg/m^3$.

W pobliżu jądra atomowego możliwy jest również proces odwrotny do anihilacji, czyli kreacja par cząstka – antycząstka z wysokoenergetycznego fotonu ($\gamma \rightarrow e^+ + e^-$). Elektrony (i pozostałe leptony) powstają również w innych procesach, takich jak na przykład w rozpadzie neutronu na proton, elektron i antyneutrino elektronowe ($n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$). Powstające w tym rozpadzie cząstki nie są jednak składnikami neutronu w takim sensie, jak elektrony, protony i neutrony są składnikami atomów. Procesy te polegają raczej na przekształcaniu się jednych cząstek elementarnych w inne cząstki.

Taki obraz elementarnych składników materii jest jednak niezgodny z tradycją filozoficzną, ponieważ w filozoficznym pojęciu atomu przyjmowano zawsze, że żaden atom nie może ani powstać, ani przestać istnieć, ani też przekształcić się w żaden inny atom¹³. Fizyka cząstek elementarnych nie potwierdza tego założenia. Na fundamentalnym poziomie struktury materii nie znajdujemy absolutnie trwałych substancjalnych składników. Niezmiennność okazuje się więc nieadekwatnym kryterium elementarności.

Nie lepiej przedstawia się kwestia niepodzielności jako ewentualnego kryterium elementarności. Rozłożenie cząsteczki chemicznej na atomy, rozbicie atomu czy jądra atomowego niewątpliwie świadczą o złożoności tych obiektów i w zasadzie można zidentyfikować składniki, które efektywnie istnieją w tych układach przed rozbiciem. W wypadku cząstek elementarnych podstawową metodą ich badania są eksperymenty zderzeniowe wykonywane przy użyciu akceleratorów cząstek elementarnych. Okazuje się jednak, że w rezultacie zderzenia cząstek elementarnych otrzymujemy po prostu inne cząstki, nie bardziej elementarne niż te, których użyliśmy w eksperymencie. Ten stan rzeczy związany jest z efektami relatywistycznymi – zależnością masy od prędkości ciała. Zgodnie ze szczególną teorią względności Einsteina masa cząstki zależy od prędkości v :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

¹³ Dla Leukipposa i Demokryta bowiem atomy posiadały wszystkie (z wyjątkiem nieruchomości) fundamentalne cechy, jakie Parmenides przypisywał bytowi.

gdzie m_0 jest masą spoczynkową, c — prędkością światła w próżni. Jeśli zatem w akceleratorach rozpędzamy cząstki do prędkości porównywalnych z prędkością światła w próżni, to rośnie ich masa–energia ($E = mc^2$) i dlatego w zderzeniach mogą powstawać nowe cząstki.

W związku z tym może pojawić się wątpliwość, czy w tego typu eksperymentach „rozbijamy” cząstki, czy je „produkujemy”; być może nawet – jak twierdził Heisenberg – pojęcie „niepodzielności” całkowicie straciło sens¹⁴. Cząstki elementarne są niepodzielne jedynie w tym sensie, że eksperymenty zderzeniowe nie prowadzą do pojawienia się cząstek bardziej elementarnych (tzn. stanowiących niższy poziom struktury materii), ale cząstki te okazują się niszczone i przekształcalne. Podstawowym założeniem atomizmu było jednak, że schodząc w głąb struktury materii, dochodzimy do składników coraz trudniejszych do rozbicia i coraz trwalszych – aż do składników absolutnie trwałych. Fizyka cząstek elementarnych prowadzi jednak raczej do przeciwnego wniosku: na poziomie elementarnych składników materii nie znajdujemy absolutnie trwałych i niezniszczalnych składników materii.

3. ZAGADNIENIE LOKALIZACJI CZASOPRZESTRZENNEJ

Dzisiejszy stan techniki eksperymentalnej pozwala już na manipulowanie pojedynczymi atomami, co jak zauważa Ian Hacking – jest trudnym do podważenia dowodem ich realności¹⁵. Na dobrą sprawę, istnienie atomów „jest dla współczesnego człowieka faktem banalnym”¹⁶. Możemy nawet w pewnym sensie „na własne oczy” zobaczyć atomy – na przykład sławny napis IBM ułożony z 35 atomów ksenonu, którego zdjęcie wykonano za pomocą skaningowego mikroskopu tunelowego¹⁷. Poszczególne atomy ksenonu umieszczono

¹⁴ Por. W. Heisenberg, *The Nature of Elementary Particles*, w: *Interpreting Bodies. Classical and Quantum Objects in Modern Physics*, dz. cyt., 212.

¹⁵ Por. I. Hacking *Representing and Intervening*, Cambridge 1983.

¹⁶ Por. M. Tempczyk. *Czy fizyk może zrozumieć filozofa, a filozof fizyka*, *Colloquia Communia* 82–82(2007), 23.

¹⁷ Zdjęcie to otrzymano po raz pierwszy w 1990 r. w laboratorium IBM (IBM's Almaden Research Center in San Jose, Calif), por. np. <http://www-03.ibm.com/>

pojedynczo w odpowiednich miejscach przestrzeni, co wydaje się świadczyć na rzecz tezy, że atomy, podobnie jak znane z codziennego doświadczenia przedmioty makroskopowe istnieją w czasie i przestrzeni.

Jeżeli jednak przeanalizujemy dokładniej zagadnienie czasoprzestrzennej lokalizacji elementarnych składników materii według mechaniki kwantowej, to zagadnienie staje znacznie się bardziej skomplikowane. Otóż stan dowolnego układu kwantowomechanicznego (na przykład atomu czy elektronu) w danej chwili t reprezentowany jest w mechanice kwantowej przez wektor w przestrzeni Hilberta, zwany również funkcją falową Ψ . Przestrzeń Hilberta jest abstrakcyjną liniową przestrzenią wektorową nad ciałem liczb zespolonych i pełni w mechanice kwantowej funkcję analogiczną do przestrzeni fazowej (przestrzeni stanów) w mechanice klasycznej. W odróżnieniu jednak od mechaniki klasycznej, w której stan (punktu materialnego) w chwili t jest określony przez bezpośrednio mierzalne wielkości fizyczne (położenie i pęd w chwili t), wektor stanu Ψ w mechanice kwantowej nie reprezentuje żadnej realności fizycznej, lecz jest wyłącznie wielkością matematyczną służącą do obliczania prawdopodobieństw rezultatów pomiarów. Zgodnie ze statystyczną interpretacją fizycznego znaczenia wektora stanu Ψ (dla jednej cząstki, takiej jak na przykład elektron) sformułowaną przez Borna (1926) wielkość $|\Psi(x, y, z, t)|^2 dx dy dz$ (kwadrat amplitudy zespolonej funkcji falowej) jest proporcjonalna do prawdopodobieństwa tego, że w rezultacie przeprowadzonego pomiaru znajdziemy cząstkę w chwili t w elemencie objętości $dx dy dz$. Jeżeli jednak wykonamy na przykład pomiar położenia elektronu i znajdziemy go w pewnym miejscu, to nie możemy stąd wnosić, że elektron znajdował się w tym miejscu przed wykonaniem pomiaru. Przed wykonaniem pomiaru dany jest jedynie pewien rozkład prawdopodobieństwa obecności elektronu w pewnym obszarze przestrzeni, co można by wyrazić stwierdzeniem, cząstka elementarna jest „potencjalnie obecna” w pewnym obszarze przestrzeni i dopiero w rezultacie pomiaru „aktualizuje się w pewnym miejscu”.

Jednak taki sposób opisu procesu pomiaru położenia cząstki kwantowej jest dość zwodniczy i raczej wyraża nieadekwatność potocznego języka i naszych poglądowych modeli do opisu mikroświata, niż pozwala na zrozumienie zagadnienia czasoprzestrzennego istnienia cząstki kwantowej. Z uwagi na obowiązujące w mechanice kwantowej relacje nieoznaczoności dla pędu i położenia¹⁸, cząstkom kwantowym w ogóle nie możemy przypisać ściśle określonych trajektorii w czasoprzestrzeni w odróżnieniu od cząstek klasycznych, których ruch opisują deterministyczne prawa Newtona. Dobrym przykładem jest odrzucenie pojęcia orbity elektronu w atomie, jak również powszechnie znany eksperyment z dwiema szczelinami, w którym obserwuje się interferencję elektronów. Jak wiadomo, w eksperymencie tym elektrony, docierając do ekranu, lokalizują się w ściśle określonych punktach (a zatem przejawiają aspekt korpuskularny), ale w celu wyjaśnienia interferencji musimy przyjąć, że w jakimś sensie elektrony „rozchodzą się jak fale”. To absurdalne z punktu widzenia fizyki klasycznej i potocznych intuicji zachowanie mikroobiektów określono mianem dualizmu korpuskularno-falowego. Cudzysłów użyty przy wyrażeniu, że elektrony rozchodzą się jak fale, ma podkreślać, że fale mechaniki kwantowej, reprezentowane w formalizmie matematycznym przez funkcję falową Ψ , to jedynie fale prawdopodobieństwa, zdefiniowane w abstrakcyjnej przestrzeni Hilberta, a nie trójwymiarowe fale w jakimś ośrodku fizycznym, jak na przykład fale na wodzie lub fale elektromagnetyczne rozchodzące się w przestrzeni.

Cząstkom kwantowym nie możemy więc przypisywać „prostego umiejscowienia w przestrzeni”¹⁹, a ich ruch całkowicie wymyka się

¹⁸ Iloczyn nieoznaczoności składowej pędu cząstki elementarnej i odpowiadającej jej składowej położenia jest nie mniejszy niż wielkość rzędu stałej Plancka:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$

¹⁹ gdzie Δx jest nieoznaczonością x -owej składowej współrzędnej cząstki elementarnej, Δp_x — nieoznaczonością x -owej składowej pędu. Nieoznaczoność Δx i Δp_x oznacza tu pierwiastek ze średniego kwadratu odchylenia od wartości średniej, gdzie wartość średnia rozumiana jest jako wartość oczekiwana.

¹⁹ Por. A. N. Whitehead, *Nauka i świat nowożytny*, tłum. z ang. M. Kozłowski,

możliwości naocznego przedstawienia. Jak wiadomo, Niels Bohr twierdził nawet, że tezie o istnieniu elektronu lub fotonu między aktem emisji a absorpcji w ogóle nie możemy nadać obiektywnego znaczenia. Opisać możemy bowiem jedynie rezultaty obserwacji, w których użyto makroskopowych przyrządów pomiarowych, co pociąga za sobą konieczność zastosowania pojęć fizyki klasycznej, o których wiemy, że nie mogą być stosowane do świata atomów i cząstek elementarnych. Niektórzy współcześni autorzy wysuwają natomiast przypuszczenia, że cząstka kwantowa, taka jak elektron, istnieje wprawdzie między dwoma pomiarami, ale istnieje poza czasem i przestrzenią, a dopiero wykonany pomiar „wciąga” elektron w czasoprzestrzeń²⁰. Być może więc czas i przestrzeń są strukturą, w jakiej istnieją obiekty makroskopowe, i nie mają one podstawowego znaczenia na poziomie fundamentalnych składników materii.

W każdym razie obraz elementarnych składników materii, według mechaniki kwantowej, radykalnie odbiega od prostego modelu świata klasycznego atomizmu, zgodnie z którym niezmiennie cząstki pojmowane jako nieprzenikliwe, mikroskopijne ciała stałe, które znajdują się w pustej przestrzeni i poruszają się po dobrze określonych trajektoriach zgodnie z deterministycznymi prawami ruchu. Jeżeli nadal stosujemy na określenie fotonów czy elektronów pojęcie „cząstki”, to jednak pamiętać należy, że pojęcie to zawsze zawiera również aspekt falowy, co jak dotąd skutecznie uniemożliwia wszelkie próby pogładowego opisu ruchu i usytuowania w czasoprzestrzeni cząstek kwantowych. Dodajmy jeszcze, że zjawiska, takie jak polaryzacja próżni oraz cząstki wirtualne nieustannie powstające i anihilujące w próżni kwantowej, prowadzą do wniosku, że również fundamentalny dla ontologii klasycznego atomizmu podział na materię korpuskularną i pustą przestrzeń nie jest już możliwy do utrzymania.

M. Pieńkowski, Kraków 1987, 79.

²⁰ Por. D. Aerts *The Entity and Modern Physics: The Creation-Discovery View of Reality*, w: *Interpreting Bodies. Classical and Quantum Objects in Modern Physics*, dz. cyt., 223–257.

4. ZAGADNIENIE ZUPEŁNOŚCI CHARAKTERYSTYKI

Atomy i cząstki klasyczne traktowano jako rzeczy, różniące się od rzeczy postrzeganych zmysłami tym, że są niezmiernie małe i niedostępne bezpośrednio doświadczeniu zmysłowemu. Kategorie „rzeczy” charakteryzuje się w ontologii przez samodzielność (autonomię bytową), jednostkowość, konkretność i zupełność charakterystyki (czyli dookreślenie kwalifikacji treściowych)²¹. W odniesieniu do cząstek kwantowych rozważenia wymaga przede wszystkim zagadnienie zupełności charakterystyki.

Stwierdzenie, że rzeczy posiadają zupełność charakterystyki oznacza, że dla danej cechy c rzecz X ma tę cechę lub jej nie ma – w odróżnieniu na przykład od przedmiotów fikcyjnych, jak dr Watson, który jest przedmiotem niezupełnym. Oczywiście rozważamy jedynie cechy pierwotne, które przysługują obiektywnie przedmiotom fizycznym, w odróżnieniu od cech wtórnych, wynikających ze sposobu ludzkiej percepcji rzeczy.

Demokryt przyjmował niezwykle prosty model atomów, przypisując im jedynie nieprzenikliwość, kształt i wielkość jako pierwotne i obiektywne cechy. W ramach późniejszych koncepcji modyfikowano zestaw pierwotnych cech atomów, przyjmując ciężar (Epikur), bezwładność (Newton), ciężar atomowy (Dalton) czy ładunek elektryczny. Mechanika kwantowa wyposażała ponadto elementarne składniki materii w zestaw znacznie bardziej abstrakcyjnych cech, takich jak spin, dziwność czy powab, które w ogóle nie mają analogii z cechami przedmiotów makroskopowego doświadczenia. Problem jednak tkwi nie w tym, że rozwój nauki prowadzi do coraz bardziej abstrakcyjnego obrazu świata, ale w pytaniu o to, w jaki sposób cechy przysługują cząstkom kwantowym.

W pojęciu elementarnego składnika materii ukształtowanego najpierw w filozofii przyrody, później zaś w atomizmie klasycznym przyjmowano, że cząstki klasyczne mają pewne ustalone własności całkowicie niezależnie od przeprowadzanych pomiarów. Jeżeli na przykład zmierzono pęd jakiejś cząstki i uzyskano określoną wartość, to wiadomo było, że przed pomiarem i niezależnie od niego

²¹ Por. M. Hempoliński, *Filozofia współczesna. Wprowadzenie do zagadnień i kierunków*, Warszawa 1989, 64.

cząstka o danej masie poruszała się z określoną prędkością w określonym kierunku i poruszałaby się tak również wtedy, gdyby nie wykonano żadnego pomiaru. Mówiąc ogólnie – przyjmowano, że pomiar w mechanice klasycznej ujawnia stan obiektu, jaki istniał przed pomiarem i całkowicie niezależnie od niego. W mechanice kwantowej sytuacja ulega jednak radykalnej zmianie.

Oczywiście, cząstki kwantowe mają pewne ustalone parametry, takie jak masa spoczynkowa czy ładunek elektryczny, które przysługują im niezależnie od przeprowadzanych pomiarów. Jednak nie jest to prawdą w odniesieniu do wszystkich dynamicznych charakterystyk mikroobiektów. W mechanice kwantowej wielkości fizyczne mierzalne (obserwable), takie jak położenie, pęd, energia czy spin cząstki elementarnej reprezentowane są przez pewne działania matematyczne (operatory hermitowskie w abstrakcyjnej przestrzeni Hilberta). Swoistą cechą kwantomechanicznego opisu rzeczywistości fizycznej jest to, że pewne pary takich operatorów są nieprzemienne (nie komutują ze sobą), co znaczy, że jednoczesny pomiar z dowolną dokładnością wielkości reprezentowanych przez niekomutujące operatory jest zasadniczo niemożliwy. Najbardziej znanym przykładem jest pęd i położenie cząstki elementarnej. Jeżeli wykonamy pomiar położenia elektronu i znajdziemy go w określonym miejscu, to jego pęd jest wówczas całkowicie nieokreślony. Ponieważ cząstkę kwantową z dobrze określonym położeniem reprezentuje funkcja falowa Ψ , która ma ostre maksimum w miejscu, gdzie prawdopodobieństwo znalezienia elektronu jest bliskie jedności, natomiast cząstkę z określonym pędem – funkcja falowa Ψ wypełniająca całą dostępną w danych warunkach dla cząstki przestrzeń, to w mechanice kwantowej taki obiekt, jak cząstka z równocześnie dobrze określonym położeniem i pędem po prostu nie da się zdefiniować²².

Oznacza to, że nie wszystkie parametry dynamiczne przysługują cząstkom kwantowym niezależnie od przeprowadzonych pomiarów – jeżeli określona jest jedna z wielkości komplementarnych, to war-

²² Dobitnie wyraził to Arthur S. Eddington, pisząc: „dlatego nie możemy wykręć skojarzenia dokładnego położenia z dokładnym pędem, bo taka rzecz w Naturze nie istnieje” (A. S. Eddington, *Nowe oblicze natury*, tłum. z ang. A. Wundheiler, Warszawa 1934, 208).

tość drugiej może losowo fluktuować i pozostaje nieokreślona. Wracając do podanego przykładu z pędem i położeniem – jeżeli zmierzono położenie elektronu i uzyskano wartość x , to wówczas jego pęd jest całkowicie nieokreślony i dla pewnej wartości składowej pędu p_x cząstka ani go posiada, ani nie posiada. W takiej sytuacji, wykonując pomiar pędu, możemy otrzymać dowolną jego wartość. Oznacza to, że cząstki kwantowe, w odróżnieniu od rzeczy znanych z codziennego doświadczenia i cząstek klasycznych, nie charakteryzują się zupełnością charakterystyki.

5. ZAGADNIENIE INDYWIDUALNOŚCI

Przedmioty świata makroskopowego różnią się od siebie cechami jakościowymi, wielkością, kształtem, położeniem w przestrzeni i relacjami, w jakich pozostają do innych przedmiotów. Dlatego zawsze możliwe jest, przynajmniej teoretycznie, odróżnienie dwóch bardzo podobnych do siebie przedmiotów. Pogląd, że każda rzecz różni się jakąś cechą od każdej innej rzeczy, Gottfried Wilhelm Leibniz sformułował w postaci zasady identyczności nieodróżnialnych (*principium identitatis indiscernibilium* PII): „nie istnieją nierozróżnialne dwa indywidua (...). Jeśli dane są dwie rzeczy nierozróżnialne, to dana jest rzecz ta sama pod dwiema nazwami”²³.

Można ją zapisać następująco:

$$\forall F [F(a) \equiv F(b)] \rightarrow a = b.$$

W zależności od tego, czy w zakres predykatu F włączamy jedynie cechy wewnętrzne, czy też uwzględnimy również cechy relacyjne (lokalizację czasoprzestrzenną), otrzymujemy mocną lub słabą wersję PII²⁴:

Wersja mocna: F nie zawiera własności lokalizacji przestrzennej.

Wersja słaba: F zawiera własność lokalizacji przestrzennej.

²³ G. W. Leibniz, *Polemika z Clarkiem, Czwarte pismo Leibniza*, w: Tenże, *Wyznaczenie wiary filozofa. Rozprawa metafizyczna. Monadologia. Zasady natury i łaski oraz inne pisma filozoficzne*, tłum. z niem. S. Cichowicz, J. Domański, H. Krzeczowski, H. Moese, Warszawa 1969, 347.

²⁴ Por. S. French, M. Redhead, *Quantum Physics and the Identity of Indiscernibles*, *The British Journal for the Philosophy of Science* 39(1988), 234.

Sam Leibniz przyjmował mocną wersję tej zasady – na gruncie głoszonej przez niego relacjonistycznej koncepcji przestrzeni niemożliwe jest, by dwa indywidua różniły się jedynie położeniem „w przestrzeni”, ponieważ przestrzeń nie jest niezależną od ciał rzeczywistością fizyczną. Atomizm klasyczny (zarówno starożytny, jak i dziewiętnastowieczny) naruszał mocną wersję PII, chociaż słaba wersja tej zasady, także w rozumieniu ontologicznym, pozostawała w mocy. Uznawano bowiem istnienie wielu obiektów danego gatunku nieróżniących się od siebie żadnymi wewnętrznymi cechami. Atomom przypisywano jednak własność nieprzenikliwości, z czego wynika oczywiście, że żadne dwa atomy nie mogą mieć tej samej lokalizacji przestrzennej, to znaczy, że żadne z dwóch lub większej liczby trajektorii cząstek klasycznych nie przecinają się w tym samym punkcie przestrzeni w tym samym czasie. Pozwalało to cząstki klasyczne traktować jako rozróżnialne na podstawie zewnętrznych relacji czasoprzestrzennych. Obserwacja trajektorii każdej cząstki klasycznej jest teoretycznie możliwa (choć w wielu wypadkach, jak na przykład ruchu wielkiej liczby cząsteczek w naczyniu z gazem, praktycznie niewykonalna), co pozwalałoby na rozróżnienie cząstek właśnie na podstawie analizy ich trajektorii. W mechanice klasycznej cząstki jednakowe, pomimo identyczności swych fizycznych właściwości, nie tracą więc swej „indywidualności”. Można bowiem wyobrazić sobie, że „cząstki wchodzące w skład danego układu fizycznego zostały w pewnej chwili «ponumerowane», co umożliwiłoby śledzenie ich ruchów po torach; identyfikacja cząstek może być wówczas przeprowadzona w każdej chwili późniejszej”²⁵.

W mechanice kwantowej również zakłada się, że wszystkie cząstki elementarne danego gatunku nie różnią się od siebie żadną wewnętrzną cechą. Na przykład wszystkie elektrony mają dokładnie taką samą masę spoczynkową, ładunek elektryczny czy spin, choć oczywiście mogą mieć różne parametry dynamiczne zależne od stanu, takie jak pęd, energię lub położenie. Fizycy na określenie cząstek danego gatunku, których własności wewnętrzne są standaryzowane, stosują termin „cząstki identyczne”. Termin „cząstki identyczne” używany jest do oznaczenia cząstek, „które można zamienić wza-

²⁵ L. D. Landau, E. M. Lifszyc, *Krótki kurs fizyki teoretycznej*, t. 2, *Mechanika kwantowa*, tłum. z ros. J. Jędrzejewski, Warszawa 1980, 152.

jemnie miejscami w najogólniejszych warunkach bez spowodowania jakiegokolwiek zmiany w sytuacji fizycznej”²⁶. Jest to więc nieco odmienne użycie terminu „identyczność” niż w filozofii, gdzie przez „identyczność” rozumie się relację, która zachodzi między danym przedmiotem a nim samym:

$$a = b \equiv \forall F [F(a) \equiv F(b)].$$

Oczywiście, jeśli a jest identyczne z b , to wszystkie cechy, które ma a , ma również b i *vice versa*, ale oznacza to jednocześnie, że w rzeczywistości nie ma w ogóle dwóch różnych przedmiotów a i b , które byłyby identyczne, ale tylko jeden przedmiot, który może być określony dwoma różnymi nazwami²⁷, czyli – jak pisze Willard V. O. Quine – „przedmiot jest identyczny z samym sobą i z niczym innym (...) powiedzieć, że coś jest identyczne z samym sobą, to wygłosić banał, a powiedzieć, że coś jest identyczne z czymś innym – to wygłosić absurd”²⁸.

Będziemy zatem w dalszym ciągu rozważań używać określenia „cząstki identyczne” w znaczeniu przyjętym w fizyce. Podstawowa różnica między pojęciem cząstki klasycznej a pojęciem cząstki kwantowej polega na tym, że cząstki identyczne są w mechanice klasycznej rozróżnialne, natomiast w mechanice kwantowej są nierozróżnialne, co znaczy, że „nie istnieje eksperymentalna metoda, która pozwalałaby na ich rozróżnienie. Ogólniej rzecz biorąc, żadna wielkość obserwowalna nie pozwala na rozróżnienie między jednym stanem a drugim, który różni się od pierwszego jedynie permutacją cząstek”²⁹. Zasada nierozróżnialności odgrywa podstawową rolę w kwantowej teorii układów jednakowych cząstek³⁰. Formalnie wyraża się je przez żądanie, by wartość oczekiwana dowolnego operatora hermitowskiego O dla układu złożonego z N identycznych cząstek,

²⁶ L. I. Schiff, *Mechanika kwantowa*, tłum. z ang. Z. i Z. Rek, Warszawa 1977, 321.

²⁷ Por. S. French, *Why the Principle of the Identity of Indiscernibles is not Contingently True Either*, *Synthese* 78(1989), 142.

²⁸ W. V. O. Quine, *Różności. Słownik prawie filozoficzny*, tłum. z ang. C. Ciesielski, Warszawa 2000, 63–64.

²⁹ M. Redhead, P. Teller, *Particle Labels and Indistinguishable Particles Theory*, *The British Journal for the Philosophy of Science* 43(1992), 205.

³⁰ L. D. Landau, E. M. Lifszyc, *Krótki kurs fizyki teoretycznej*, t. 2, dz. cyt., 153.

których stan reprezentowany jest przez wektor $|\Psi\rangle$, nie zmieniała się w rezultacie permutacji dowolnych dwóch stanów:

$$\langle P\Psi|O|P\Psi\rangle = \langle \Psi|O|\Psi\rangle,$$

gdzie stan $|P\Psi\rangle$ powstaje ze stanu $|\Psi\rangle$ przez permutację dowolnych dwóch stanów. Nie jest zatem możliwe rozstrzygnięcie przez pomiar, czy dany układ znajduje się w stanie $|\Psi\rangle$, czy też w stanie $|P\Psi\rangle$. Wystarczającym warunkiem, by powyższa równość była spełniona, jest, by $|P\Psi\rangle = \pm|\Psi\rangle$ dla dowolnego operatora hermitowskiego O . Warunki powyższe nakładają ograniczenia na możliwe stany cząstek³¹.

Według klasycznej mechaniki statystycznej, jeżeli w jakimś układzie znajduje się pewna liczba cząstek określonego gatunku, znajdujących się w różnych stanach, to nawet jeżeli cząstki te są standaryzowane w ramach gatunku, to ich permutacja, czyli zamiana stanów między dwoma cząstkami, daje w rezultacie nowy stan różniący się od poprzedniego. Cząstki klasyczne podlegają statystyce Maxwella–Boltzmana. Dla n cząstek i m dostępnych dla nich stanów liczba możliwych układów wyraża się wzorem:

$$N_{M-B}(n, m) = m^n.$$

Załóżmy, że mamy dwie cząstki klasyczne (co do których zakładamy, że są rozróżnialne) i każda z nich może znajdować się w dwóch stanach, oznaczanych przez nas jako $|a\rangle$ i $|b\rangle$. Wówczas, zgodnie ze statystyką Maxwella–Boltzmana, dla układu dwóch cząstek możliwe są $N_{M-B}(2, 2) = 2^2 = 4$ stany, co możemy zapisać następująco:

- 1) $|a(1)\rangle|a(2)\rangle$ (obydwie cząstki w stanie $|a\rangle$);
- 2) $|b(1)\rangle|b(2)\rangle$ (obydwie cząstki w stanie $|b\rangle$);
- 3) $|a(1)\rangle|b(2)\rangle$ (cząstka 1 w stanie $|a\rangle$ i cząstka 2 w stanie $|b\rangle$);
- 4) $|a(2)\rangle|b(1)\rangle$ (cząstka 1 w stanie $|b\rangle$ i cząstka 2 w stanie $|a\rangle$).

³¹ Por. S. French, M. Redhead, art. cyt., 238.

Przypadki (3) i (4) są traktowane jako różne sytuacje fizyczne – permutacja dwóch dowolnych elementów w układzie złożonym z takich samych elementów daje w rezultacie nowy stan. Zachodzi zatem obiektywna różnica między stanem, w którym pierwsza cząstka jest w stanie $|a\rangle$, a druga w stanie $|b\rangle$, a sytuacją, w której pierwsza cząstka jest w stanie $|b\rangle$, a druga w stanie $|a\rangle$.

Jeżeli założymy, że wszystkie przypadki są równie możliwe, wówczas otrzymujemy prawdopodobieństwo tego, że obydwie cząstki znajdują się w stanie $|a\rangle$ równe $1/4$, prawdopodobieństwo tego, że obydwie cząstki są w stanie $|b\rangle$ również $1/4$ oraz prawdopodobieństwo równe $1/2$ dla sytuacji, w której każda cząstka znajduje się w innym stanie, co oczywiście jest równe sumie prawdopodobieństw pojawienia się stanów (3) i (4). Rozkład prawdopodobieństwa jest w tym przypadku dokładnie taki sam, jak dla rzutu dwiema monetami³². Na każdej monecie może wypaść albo orzeł (O), albo reszka (R), zatem dla dwóch monet otrzymujemy następujące zdarzenia, z prawdopodobieństwem $1/4$ każde:

$$O_1O_2; O_1R_2; R_1O_2; R_1R_2,$$

gdzie indeksy „1” i „2” wskazują rozróżnialne monety. Mamy więc prawdopodobieństwo równe $1/4$ dla zdarzenia polegającego na wyrzuceniu dwóch orłów, $1/4$ dla dwóch reszek oraz $1/2$ dla zdarzenia „na każdej monecie różny wynik”. Ostatniemu przypadkowi odpowiadają oczywiście sytuacje: „orzeł na pierwszej monecie i reszka na drugiej” albo „reszka na pierwszej monecie i orzeł na drugiej”. Ponieważ monety są odróżnialne (na podstawie ich położenia w przestrzeni), to układy (O, R) i (R, O) stanowią różne sytuacje fizyczne.

Statystyki kwantowe różnią się jednak zasadniczo od statystyki klasycznej Maxwella–Boltzmana. Z zasady nierozróżnialności wynikają pewne ograniczenia na obserwowalne stany cząstek w układzie złożonym z cząstek identycznych. Jeżeli $|P\Psi\rangle = |\Psi\rangle$, to stan taki nazywa się stanem symetrycznym – po permutacji dwóch stanów otrzymujemy ten sam stan; jeżeli natomiast $|P\Psi\rangle = -|\Psi\rangle$, to stan taki nazywa się stanem antysymetrycznym – w rezultacie permutacji otrzymujemy ten sam stan ze znakiem minus (co oczywiście nie wpływa

³² Por. P. Teller, *An Interpretive Introduction to Quantum Field Theory*, Princeton, New Jersey 1995, 24.

na wartość oczekiwaną operatora O). Stan, który nie jest ani stanem symetrycznym, ani antysymetrycznym, nazywamy stanem niesymetrycznym i – zgodnie z mechaniką kwantową, sformułowaną w oparciu o teorię przestrzeni Hilberta – stany takie należy wykluczyć, ponieważ prowadzą one do niezgodnej z doświadczeniem dla cząstek kwantowych klasycznej statystyki Maxwella–Boltzmanna. Bozony opisywane są stanami symetrycznymi, natomiast fermiony – antysymetrycznymi. Dla bozonów (statystyka Bosego–Einsteina) dodajemy amplitudy prawdopodobieństwa, dla fermionów (statystyka Fermiego–Diraca) dodajemy amplitudy ze znakiem minus.

Bose i Einstein wykazali, że w celu otrzymania rezultatów teoretycznych zgodnych z wynikami eksperymentów należy założyć, że dla bozonów stany (3) i (4) muszą być traktowane jako jeden stan. Zgodnie ze statystyką Bosego–Einsteina dla n cząstek i m stanów otrzymujemy:

$$N_{B-E}(n, m) = \binom{n+m-1}{n}$$

możliwych układów. W powyższym przykładzie $n = 2$ i $m = 2$ i otrzymujemy w rezultacie jedynie trzy możliwości:

1) $|a(1)\rangle|a(2)\rangle$ (obydwie cząstki w stanie $|a\rangle$);

2) $|b(1)\rangle|b(2)\rangle$ (obydwie cząstki w stanie $|b\rangle$);

oraz stan symetryczny:

5) $|a(1)\rangle|b(2)\rangle + |a(2)\rangle|b(1)\rangle$ ³³,

będący liniową superpozycją stanów (1) i (2).

Wynika stąd, że prawdopodobieństwo tego, że obydwie cząstki są w stanie $|a\rangle$ wynosi $1/3$, prawdopodobieństwo tego, że obydwie cząstki są w stanie $|b\rangle$ wynosi $1/3$ oraz prawdopodobieństwo tego, że każda cząstka znajduje się w innym stanie wynosi również $1/3$. Jeżeli powrócimy do analogii z rzutem dwiema monetami, to otrzymujemy następujące zdarzenia, z prawdopodobieństwem $1/3$ każde:

³³ Pomijamy tu nieistotne dla naszych rozważań współczynniki liczbowe.

OO ; OR ; RR ,
gdzie pominęliśmy indeksy, ponieważ traktujemy monety jak nierozróżnialne.

Dla fermionów, które podlegają zakazowi Pauliego, w układzie złożonym z wielu takich samych cząstek tylko jedna cząstka może znajdować się w danym stanie kwantowym. Wówczas otrzymujemy statystykę Fermiego–Diraca – dla n cząstek i m stanów jest

$$N_{F-D}(n, m) = \binom{n}{m}$$

możliwych układów. W odniesieniu do układu dwóch cząstek i dwóch dostępnych dla każdej z nich stanów oznacza to, że możliwy jest tylko jeden sposób obsadzenia stanów $|a\rangle$ i $|b\rangle$ przez cząstki 1 i 2 – każda cząstka znajduje się w innym stanie. Jest to stan antysymetryczny:

$$6) |a(1)\rangle |b(2)\rangle - |a(2)\rangle |b(1)\rangle.$$

W analogii do rzutu dwiema monetami byłby to układ OR .

Przykładem może być pierwsza „orbita” w atomie, na której mogą znajdować się co najwyżej dwa elektrony: wiadomo, że muszą one mieć skierowane przeciwnie spiny, ale „nie istnieje eksperymentalna metoda, pozwalająca stwierdzić, że ten elektron ma spin w górę, a tamten ma spin w dół”³⁴. Interpretując statystyki kwantowe ontologicznie, możemy powiedzieć, że zamiana stanami dwóch identycznych cząstek kwantowych nie daje w rezultacie nowego stanu rzeczy.

Różnicę między pojęciem klasycznych cząstek identycznych różnorodnych a pojęciem kwantowych cząstek identycznych nierozróżnialnych można poglądowo wyjaśnić, odwołując się do porównania z gospodarką, w której nie ma kont bankowych, a gospodarką, w której wymiana jest wyłącznie bezgotówkowa. W pierwszym przypadku każda moneta jest indywidualum, ma określoną lokalizację w czasoprzestrzeni i swoją historię oraz jest odróżnialna od każdej innej monety. Natomiast w gospodarce bezgotówkowej ważne jest je-

³⁴ M. Redhead, P. Teller, *Particles. Particle Labels, and Quanta: The Toll of Unacknowledged Metaphysics*, *Foundation of Physics* 21(1991)1, 204.

dynie to, ile jednostek jest na jakimś koncie, ale nie ma sensu pytanie o to, „który grosz” został przesunięty z jakiegoś konta na inne. Jednostki na koncie bankowym można policzyć, ale nie są one indywidualnymi i nie można używać w stosunku do nich określeń, takich jak w stosunku do monet: „ta oto” w odróżnieniu od „tamtej”. Częstki klasyczne mogą być ponumerowane – pierwsza, druga itd. i jest różnica w kolejności, w jakiej je numerujemy. Częstki kwantowe mogą być jedynie policzone, ale nie mogą być ponumerowane (zaetykietowane).

6. ZAGADNIENIE SEPAROWALNOŚCI

Albert Einstein, który wniósł istotny wkład do powstania mechaniki kwantowej, nigdy nie zaakceptował interpretacji kopenhaskiej. W trakcie prawie trzydzieści lat trwającej dyskusji z Nielsem Bohrem przedstawiał coraz to nowe eksperymenty myślowe mające, jak sądził, ukazać absurdalność konsekwencji, do jakich prowadzi mechanika kwantowa. W 1925 roku Einstein zaproponował wspólnie z Borysem Podolskym i Nathanem Rosenem³⁵ sławny eksperyment myślowy (zwany również „paradoksem EPR”). Eksperyment ten w zamierzeniu autorów 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. Jest zatem teorią niekompletną. Eksperyment ten został dopiero po pół wieku zrealizowany w rzeczywistych doświadczeniach Alaina Aspecta i współpracowników i – całkowicie wbrew oczekiwaniom autorów EPR – jego rezultaty okazały się zgodne z przewidywaniami mechaniki kwantowej, niezgodne natomiast z założeniami lokalności i realizmu (lub postulatu „obiektywnej rzeczywistości”), przyjmowanymi przez Einsteina.

Podstawową rolę w argumentacji Einsteina odgrywa przyjęte kryterium rzeczywistości fizycznej³⁶: „jeżeli, niezakłócając układu w żaden

³⁵ A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?*, Physical Review 47(1935), 777–780.

³⁶ Por. R. I. G. Hughes, *The Structure and Interpretation of Quantum Mechanics*, Cambridge, Massachusetts and London 1994, 158.

sposób, możemy w sposób pewny (tzn. z prawdopodobieństwem równym jedności) przewidzieć wartość jakiejś wielkości fizycznej, to istnieje element rzeczywistości fizycznej odpowiadający tej wielkości fizycznej”³⁷. 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 jednak, 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 wspólną funkcję falową Ψ – i pokazuje, że dokonując pomiaru na układzie I, można przewidzieć w sposób pewny stan układu II bez jego zakłócania, a zatem – zakładając przytoczone wyżej kryterium realności – należy uznać, że wielkości te są realne. Einstein wnosi stąd, że mechanika kwantowa nie jest teorią kompletną, chyba że przyjmiemy, iż stan układu II zależy od procesu pomiaru przeprowadzonego na układzie I, co w żaden sposób nie wpływa na stan układu II. „Nie można oczekiwać – twierdzi jednak Einstein – by jakakolwiek rozsądna definicja rzeczywistości na to pozwalała”³⁸. 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 przestrzeni». Bez przyjęcia takiej wzajemnej niezależności egzystencji (...) rzeczy odległych przestrzennie, wypływającego przede wszystkim z myślenia potocznego, myślenie fizyczne w znanym nam sensie byłoby niemożliwe”³⁹.

Dla dalszych rozważań wygodnie będzie przeanalizować eksperyment EPR w postaci zmodyfikowanej przez Davida Bohma. Rozważmy układ o zerowym spinie całkowitym złożony z dwóch cząstek I i II o spinie $1/2\hbar$ każda, który rozpadł się w sposób niepowodujący zmiany spinu. Załóżmy, że cząstki te poruszają się w przeciwnych kierunkach. Zgodnie z mechaniką kwantową, jedna funkcja falowa Ψ opisuje stan układu również po rozpadzie i całkowity spin układu wynosi zero również wówczas, gdy cząstki oddalą się na znaczącą odległość i przestaną

³⁷ A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, art. cyt.

³⁸ Tamże.

³⁹ A. Einstein, *Mechanika kwantowa a rzeczywistość*, w: Tenże, *Pisma filozoficzne*, red. S. Butryn, tłum. z niem. K. Napiórkowski, Warszawa 1999, 163.

ze sobą oddziaływać⁴⁰. Stan układu złożonego z dwóch cząstek, których całkowity spin wynosi zero, jest liniową superpozycją dwóch możliwości: spin pierwszej cząstki jest skierowany do góry $|\uparrow\rangle_1$, a spin drugiej w dół $|\downarrow\rangle_2$ oraz spin pierwszej cząstki jest skierowany w dół $|\downarrow\rangle_1$, a drugiej do góry $|\uparrow\rangle_2$:

$$|\Psi\rangle = |\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2 \quad ^{41}$$

Pomiar rzutu spinu cząstki I na dowolny kierunek w przestrzeni pozwala określić odpowiednią składową spinu dla cząstki II bez jakiegokolwiek oddziaływania – jest ona zawsze skierowana przeciwnie. Jeżeli na przykład w rezultacie pomiaru dokonanego na cząstce pierwszej otrzymamy „spin do góry”, to wektor stanu układu redukuje się do składowej $|\uparrow\rangle_1, |\downarrow\rangle_2$, co znaczy, że spin drugiej cząstki natychmiast przyjmuje kierunek „w dół”. Dokładnie ten sam rezultat otrzymalibyśmy, wybierając inną, dowolnie ustawioną oś.

W przypadku systemu klasycznego wyjaśnienie tego faktu nie naręcza problemów: moment pędu (który – z istotnymi jednak zastrzeżeniami – można uważać za klasyczny odpowiednik kwantowego spinu) zachowuje stały kierunek i posiada dobrze określone wszystkie trzy składowe przestrzenne, a więc pomiar na układzie I pozwala z całkowitą pewnością określić stan układu II. Jednak zgodnie z mechaniką kwantową, operatory składowych spinu nie komutują ze sobą, co znaczy, że gdy jedna składowa jest określona (tzn. w wyniku pomiaru otrzymamy określoną jej wartość), dwie pozostałe są nieokreślone i mogą losowo fluktuować. Założenie, że kierunek spinu ma określoną wartość przed pomiarem, jest równoznaczne założeniu istnienia parametrów ukrytych, co jest sprzeczne z mechaniką kwantową. Łatwo to wykazać na następującym przykładzie.

Założmy, że wykonujemy pomiar rzutu spinu elektronów na pewien kierunek w przestrzeni, na przykład z. Z prawdopodobieństwem równym 1/2 otrzymujemy „spin w górę” albo „spin w dół”. Jeżeli teraz ze strumienia cząstek wyeliminujemy te, których składowa spinu względem osi z była skierowana „w dół”, i wykonamy ponowny pomiar ustawienia spinu względem tej osi, to z pewnością uzyskujemy rezultat

⁴⁰ Por. D. Bohm, *Ukryty porządek*, tłum. z ang. M. Tempczyk, Warszawa 1988, 85.

⁴¹ Pomijamy nieistotne dla naszych rozważań współczynniki liczbowe.

„w górę” dla wszystkich cząstek. Jeżeli jednak pomiędzy pomiarami składowej spinu elektronów w kierunku z wykonujemy pomiar względem jakiejś innej orientacji przestrzennej, powiedzmy x , to sytuacja ulega zmianie. Podobnie jak dla osi x również w połowie przypadków otrzymamy ustawienie spinu równoległe do tej osi, a w połowie przypadków ustawienie antyrównoległe. Jeżeli jednak teraz wykonamy ponownie pomiar rzutu spinu elektronów w kierunku x dla cząstek, które przed przeprowadzeniem pomiaru rzutu spinu w kierunku x wszystkie miały spin ustawiony „w górę” w kierunku osi z , to okazuje się, że jedynie w połowie przypadków otrzymujemy ustawienie „spin w górę”, a w połowie przypadków – „spin w dół”. Gdyby wszystkie składowe spinu elektronu były dobrze określone i zachowywały stały kierunek w przestrzeni (jak klasyczny moment pędu), wówczas przy powtórnych pomiarze rzutu spinu na oś z powinniśmy otrzymać wyłącznie rezultat „spin w górę”. Zauważmy, że kierunek, na który zostanie dokonany pomiar spinu w układzie I, może być wybrany losowo bezpośrednio przed dokonaniem pomiaru, co uniemożliwia jakiegokolwiek oddziaływanie fizyczne układu I z odległym układem II – jeżeli oczywiście zgodnie z teorią względności wykluczamy możliwość rozchodzenia się sygnałów z prędkościami ponadświatowymi.

W 1964 roku John Stewart Bell udowodnił nierówność dotyczącą korelacji spinowych, która powinna być spełniona, gdyby słuszny był wniosek Einsteina, że kwantowomechaniczny opis za pomocą funkcji Ψ , która nie jest w stanie określić równocześnie wszystkich składowych spinu cząstki, nie jest opisem kompletnym⁴². Twierdzenie Bella nie jest związane z jakąś konkretną własnością cząstek, jak na przykład spin, ale ma znaczenie całkiem ogólne i nie zależy od wyboru cząstek ani charakteru łączących je oddziaływań; dotyczy ono logicznych reguł, jakie obowiązują w każdym procesie pomiaru. Taką regułą jest na przykład stwierdzenie, że liczba rudych mieszkańców Polski nie może być większa niż liczba rudych mężczyzn plus liczba wszystkich kobiet bez względu na kolor włosów.

Wyprowadzenie nierówności Bella oparte jest na dwóch założeniach, określanych jako realizm (lub założenie obiektywnej rzeczywistości) oraz lokalność (separowalność):

⁴² Por. J. S. Bell, *On the Einstein Podolsky Rosen Paradox*, Physics 1(1964), 195–200, http://www.drchinese.com/David/Bell_Compact.pdf.

1. 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).

2. Lokalność (einsteinowska) albo separowalność (*separability*) – żadne oddziaływania fizyczne nie mogą rozprzestrzeniać się szybciej, niż wynosi prędkość światła w próżni c (co oczywiście wyklucza natychmiastowe działanie na odległość).

Niech X, Y, Z oznaczają określone kierunki przestrzenne. W przypadku dowolnej osi wartość rzutu spinu (dla fermionów) może przyjmować tylko dwie wartości, które oznaczymy tu jako „+” i „-” odpowiednio. Gdyby cząstka miała własność X^+Y^- , to – przy założeniu, że wartości wszystkich trzech rzutów spinów są określone, chociaż zmierzyć można każdorazowo tylko jedną z nich – musi być ona oczywiście typu $X^+Y^-Z^+$ albo $X^+Y^-Z^-$. Ponieważ jednak zgodnie z zasadą nieoznaczoności Heisenberga tylko jedna składowa spinu może być zmierzona dla danej cząstki, to zamiast rozpatrywać pojedyncze cząstki można zastosować to rozumowanie do par cząstek, dla których sumaryczny spin wynosi zero.

Rozważmy parę cząstek o spinie równym zero, która rozpadła się tak, że cząstki 1 i 2 poruszają się w przeciwnych kierunkach, a ich sumaryczny spin wynosi zero. Gdy znajdują się daleko od siebie (co wyklucza ich wzajemne oddziaływanie) wykonujemy pomiar rzutu spinu. Bell wykazał, że przy założeniu lokalnego realizmu liczba par cząstek, dla których dwie składowe rzutu spinu na kierunki X i Y mają wartość „+” $n(X^+Y^+)$, musi być mniejsza niż suma liczb par cząstek, dla których wszystkie pomiary dały wartość „+”: $n(X^+Z^+)$ i $n(Y^+Z^+)$:

$$n(X^+Y^+) \leq n(X^+Z^+) + n(Y^+Z^+).$$

Ograniczenia na korelacje między pomiarami przeprowadzonymi równocześnie na dwóch rozdzielonych przestrzennie cząstkach powinny być zatem spełnione (przy założeniu lokalnego realizmu) zarówno w przypadku pomiaru składowych spinu, pędu, położenia, polaryzacji, jak i dowolnych zmiennych dynamicznych.

Według ortodoksyjnej interpretacji mechaniki kwantowej w pewnych warunkach korelacje między mierzonymi wielkościami powinny

przekraczać ograniczenia wynikające z nierówności Bella – możliwy jest zatem empiryczny test między stanowiskami Einsteina i Bohra.

Decydujące znaczenie dla rozstrzygnięcia tego sporu miały doświadczenia przeprowadzone w 1982 roku przez zespół Alaina Aspecta⁴³. W doświadczeniach tych mierzono polaryzację fotonów wyemitowanych podczas przejścia między poziomami energetycznymi atomu wapnia, wzbudzonych światłem laserów (jest to wzbudzenie dwufotonowe, które może się rozpaść tylko przez emisję dwóch fotonów). Rezultaty doświadczeń potwierdzają korelacje przewidywane przez mechanikę kwantową, fałszują natomiast nierówność Bella. Doświadczenia Aspecta nie były pierwszymi doświadczeniami, których zadaniem był empiryczny test nierówności Bella, ale – głównie z uwagi na zastosowanie losowego ustawienia przełącznika kierującego fotony do filtrów polaryzacyjnych – powszechnie uznaje się je za rozstrzygające⁴⁴.

Z eksperymentów Aspecta wynika, że przynajmniej jedno z przyjętych w wyprowadzeniu nierówności Bella założeń jest fałszywe, co wyklucza wszystkie realistyczne i zarazem lokalne modele zjawisk kwantowych⁴⁵. Należy zatem odrzucić lokalność albo realizm (w przedstawionych wyżej znaczeniach tych terminów).

Eksperymenty Aspecta prowadzą do wniosku, że cząstki, które kiedyś oddziaływały ze sobą, pozostają w jakiś sposób częściami jednego systemu nawet wówczas, gdy obecnie dzieli je znaczna odległość przestrzenna i wobec tego trudno traktować je jako całkowicie od siebie nie-

⁴³ Por. A. Aspect, J. Dalibard, G. Roger, *Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time Varying Analyzers*, *Physical Review Letters* 49(1982)25, 1804–1807.

⁴⁴ Odległość między źródłem fotonów a każdym z detektorów wynosiła 6 metrów, a odstępy czasu, między którymi zmieniano ustawienie przełącznika, były kilkakrotnie krótsze niż czas lotu fotonów. Decyzja, w jakim kierunku mierzyć polaryzację, podejmowana była dopiero wtedy, gdy fotony były już wyemitowane ze źródła, co uniemożliwiało przekaz informacji pomiędzy detektorami, na jaki kierunek polaryzacji został on nastawiony. (Jedno przełączeni trwało 10 ns, czas emisji – 5 ns, czas lotu fotonów – 40 ns).

⁴⁵ Por. R. Penrose, *Nowy umysł cesarza. O komputerach, umyśle i prawach fizyki*, tłum. z ang. P. Amsterdamski, Warszawa 1996, 320. Rezultaty doświadczeń Aspecta wykluczają lokalne teorie zmiennych ukrytych, nie wykluczają jednak teorii, w których zakłada się występowanie oddziaływań z prędkością ponadświetlną, co jest oczywiście niezgodne ze szczególną teorią względności.

zależne realności fizyczne. Niels Bohr twierdził, że w mechanice kwantowej załamuje się procedura podziału obiektów. Jeżeli układy I i II oddziaływały ze sobą, to są opisywane jedną funkcją falową Ψ i należy je traktować jako jeden niepodzielny układ nawet wówczas, gdy – jak w analizowanym eksperymencie – są od siebie oddalone przestrzennie. W ten sposób separowalność czasoprzestrzenna nie jest adekwatnym kryterium odrębności przedmiotów fizycznych w mikroświecie⁴⁶. Z ontologicznego punktu widzenia mechanika kwantowa ukazuje zasadniczą niepodzielność zjawisk przyrody. Oznacza to – zdaniem Bohra – że musimy poddać „radikalnej rewizji nasze wyobrażenia o rzeczywistości fizycznej”⁴⁷. Polega ona na odrzuceniu założenia filozofii atomizmu, że rzeczywistość składa się z całkowicie niezależnych od siebie jednostek (atomów, cząstek elementarnych), posiadających pewne absolutne (nierelacyjne) własności i powiązanych ze sobą jedynie przez sieć zewnętrznych relacji czasoprzestrzennych.

7. WNIOSKI

Na zakończenie zestawmy klasyczne i kwantowo-mechaniczne pojęcie elementarnych składników materii, biorąc pod uwagę przedstawioną we wstępie charakterystykę cząstek klasycznych. Można to uczynić w postaci następującej tabeli:

cząstki klasyczne	cząstki kwantowe
absolutnie niezmiennie i niezniszczalne, żadna cząstka klasyczna nie może przekształcić się w inną	mogą się w siebie wzajemnie przekształcać, mogą powstawać i anihilować
są dobrze zlokalizowane w czasoprzestrzeni, przysługują im ściśle określone trajektorie opisywane deterministycznymi równaniami Newtona	nie są dobrze zlokalizowane w czasoprzestrzeni (zasada nieoznaczoności Heisenberga), pojęcie ściśle określonej trajektorii traci sens (dualizm korpuskularno-falowy przejawiający się w efektach interferencyjnych); ich ruch nie podlega deterministycznemu opisowi

⁴⁶ Por. T. Bigaj, *Zarys ontologii kwantowej*, w: *Z zagadnień filozofii nauk przyrodniczych*, red. S. Butryn, Warszawa 1991, 89.

⁴⁷ N. Bohr, *Fizyka atomowa i wiedza ludzka*, tłum. z ang. W. Staszewski, S. Szpikowski, A. Teske, Warszawa 1963, 92.

cząstki klasyczne	cząstki kwantowe
wszystkie obiektywne cechy przysługują cząstkom niezależnie od przeprowadzanych pomiarów (dookreśloność charakterystyki treściowej), pomiar ujawnia wartość wielkości fizycznej przysługującej cząstce niezależnie od pomiaru	przed przeprowadzeniem pomiaru cząstka znajduje się w stanie superpozycji stanów przedstawiającej różne możliwe wartości wielkości fizycznej; pomiar jednej wielkości dynamicznej sprawia, że wielkość komplementarna pozostaje nieokreślona
są rozróżnialne nawet wówczas, gdy nie różnią się żadną wewnętrzną cechą (na podstawie trajektorii w czasoprzestrzeni), mogą być policzone i ponumerowane (są indywidualami)	cząstki tego samego rodzaju są nierozróżnialne, permutacja stanów nie prowadzi do nowego układu; mogą być policzone ale nie ponumerowane (nie przejawiają indywidualności)
są całkowicie niezależnie od siebie istniejącymi indywidualami, o ile znajdują się w różnych obszarach przestrzeni	w pewnych warunkach stany cząstek kwantowych nie są od siebie niezależne, nawet gdy są odseparowane przestrzennie (stany splecione)

Z powyższego zestawienia widzimy zatem, że współczesny atomizm łączy z fizyką klasyczną i dawniejszą tradycją atomistyczną w filozofii przyrody na dobrą sprawę jedynie tezę, że materia ma strukturę dyskretną. Poza tym pojęcie elementarnego składnika materii według mechaniki kwantowej okazuje się niewspółmierne ontologicznie z odpowiednim pojęciem klasycznym.

ATOMISM. ON ONTOLOGICAL INCOMMENSURABILITY OF CLASSICAL AND QUANTUM NOTION OF ELEMENTARY COMPONENTS OF MATER

Summary

The aim of this article is to compare classical concepts with quantum concepts of elementary particles. Atomism, which began as speculative metaphysics, has become a securely established part of experimental science. Therefore, the development of physics during the 20th century may be treated as a spectacular triumph of atomism. However, changes and conceptual difficulties brought about by quantum mechanics lead to the conclusion that the ontological model provided by classical atomism has become inadequate. Atoms (and elementary particles) are not *atomos* – indivisible, perfectly solid, unchangeable, ungenerated and indestructible

(eternal). Classical and quantum concepts of elementary particles turn out to be incommensurable.