

Stanisław Mazierski

Zakres stosowalności fizycznej zasady przyczynowości

Studia Philosophiae Christianae 28/2, 77-93

1992

Artykuł został zdigitalizowany i 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.

STANISŁAW MAZIERSKI

ZAKRES STOSOWALNOŚCI FIZYCZNEJ ZASADY PRZYZYNOWOŚCI

I. Sformułowanie i treść zasady przyczynowości. II. Czy mechanika kwantowa podważyła zasadę przyczynowości? II.1. Stanowisko szkoły kopenhaskiej. II.2. Poglądy rosyjskich teoretyków poznania fizykalnego na problem kauzalizmu. II.3. E. Nagła stanowisko wobec zagadnienia przyczynowości. III. Uogólnienie zasady przyczynowości na zjawiska mikrofizyczne.

I. SFORMUŁOWANIE I TREŚĆ ZASADY PRZYZYNOWOŚCI

Zasadzie przyczynowości nadaje się różny sens i przypisuje różne funkcje, co się ujawnia w odmiennych jej sformułowaniach i interpretacjach.

(1) W bardzo ogólnym ujęciu zasada ta głosi, iż zjawiska w przyrodzie są ze sobą realnie powiązane i wzajemnie na siebie oddziałują w sposób regularny; dzięki temu istnieje w makrokosmosie stały porządek. Te realne zależności między zdarzeniami można wyrazić następująca: (a) nic nie dzieje się bez przyczyny, (b) takim samym przyczynom towarzyszą takie same skutki. Pierwsze z tych twierdzeń dotyczy faktu, że w przyrodzie nie ma zjawisk absolutnie izolowanych. Wszystko, co się dzieje, jest uwarunkowane zewnątrz przez przyczyny sprawcze lub wewnątrz przez wzajemne oddziaływanie części układu (samodeterminowanie). Wprowadzając tu dynamiczne pojęcie energii, określimy to uwarunkowanie przyczynowe w sposób następujący: „przejście od wcześniejszego stanu S_1 do późniejszego stanu S_2 jest uwarunkowane bądź przekazem energii z zewnątrz, bądź oddziaływaniem wzajemnym części układu, bądź jednocześnie jednym i drugim”¹. Drugie twierdzenie (b) jest uogólnieniem indukcyjnym dotyczą-

¹ S. Amsterdamski, *O obiektywnych interpretacjach pojęcia prawdopodobieństwa*, (w:) *Prawo, konieczność i prawdopodobieństwo* (praca zbiorowa), Warszawa 1964, 67—68. Por. W. Krajewski, *Związek przyczynowy*, Warszawa 1967, 116—122 oraz 241—259. Zob. także S. Mazierski, *Elementy kosmologii filozoficznej i przyrodniczej*, Poznań 1972, 284—285.

cym stałych relacji między zdarzeniami w skali makroskopowej, pozwalającym jednoznacznie przewidywać zjawiska. Ponieważ jednym z podstawowych zadań nauk przyrodniczych jest prognozowanie zdarzeń i procesów, co ma również praktyczne znaczenie, uwaga specjalistów w tej dziedzinie jest szczególnie zwrócona na zabiegi prognostyczne.

(2) Inne sformułowanie zasady przyczynowości jeszcze bardziej uwyrażnia porządek w przyrodzie; w rzeczywistości materialnej bieg zjawisk jest tak zdeterminowany, że takie same przyczyny w takich samych warunkach wywołują zawsze i z konieczności fizycznej takie same skutki. Ci zaś autorzy, którzy istotną wartość poznawczą omawianej zasady upatrują w możliwości prognozowania, definiują ją następująco:

(3) Jeżeli znany jest stan izolowanego układu fizycznego w teraźniejszości S'_0 i prawa nim rządzące, to dadzą się wyznaczyć jednoznacznie stany tegoż układu w przyszłości, czyli pozwalają się określić stany: S'_1 , S'_2 , S'_3 . I wreszcie inne sformułowanie tej zasady brzmi:

(4) Procesy w przyrodzie przebiegają w taki sposób, że stan izolowanego układu fizycznego podlegającego oddziaływaniom w chwili t_1 , determinuje jednoznacznie stan tegoż układu w chwili t_2 .

(5) Zasadę przyczynowości traktuje się również jako regułę metodologiczną, nakazującą poszukiwanie prawidłowości w przyrodzie a nie jako bardzo ogólne twierdzenie charakteryzujące związki między zdarzeniami.

Pierwsze i drugie sformułowanie ma wvbitnie charakter ontologiczny, gdyż akcentuje realne, obiektywne generowanie jednych fenomenów przez drugie. W trzeciej wersji zasady przyczynowości jest zaznaczony charakter epistemologiczny i prognostyczny. Z tego punktu widzenia zasługuje ona raczej na miano zasady determinizmu niż przyczynowości. Czwarte zaś sformułowanie łączy w sobie aspekt dynamiczny i prognostyczny. I wreszcie ostatnie ujęcie odmawia zasadzie kauzalnej treści fizycznej, przypisując jej tylko rolę heurystyczną, regulatywną w badaniach przyrodniczych.

Przyrodnicy z reguły nie odróżniają przyczynowości od determinizmu. Dopiero dokładniejsza analiza treściowej zawartości zasady przyczynowości ujawnia potrzebę odróżnienia idei kauzalnej od idei determinacji, które to pojęcia dość wyraźnie są oddane terminem złożonym „determinizm przyczynowy”. Przywiązuje się wielką wagę do przewidywania zjawisk i ten moment wpływa głównie na utożsamianie zasady przyczyno-

wości ze schematem przewidywania. Niewątpliwie u podstaw prognozowania tkwi założenie o jedności i jednostajności przyrody. Tę ostatnią dobrze wyraża zasada Maxwella: „wszystkie prawidłowości są czasoprzestrzennie niezmiennie”, lub inna teza: „w tych samych warunkach zdarza się zawsze i wszędzie to samo”².

Z punktu widzenia metodologicznego zasada kauzalna, obejmująca swym zasięgiem charakterystyczne stałe, realne zależności między fenomenami, jest metasytemowym założeniem o bazie zewnętrznej w stosunku do empirycznych dyscyplin naukowych, posiadających własne założenia o bazie wewnętrznej. Z tej racji przyrodnicy nie muszą uwzględniać zasady kauzalnej w ramach nauk szczegółowych. Nie mniej jednak zasada ta, sięgając do ontologicznych podstaw nauk przyrodniczych, usprawiedliwia przewidywanie potencjalnych zjawisk. W swym tradycyjnym (klasycznym) sformułowaniu zasada kauzalna (jeśli znamy stan układu fizycznego w teraźniejszości, to możemy określić, względnie przewidzieć, stany tegoż układu w przyszłości) stosuje się do fenomenów makrofizycznych. Przewidywanie stanów przyszłych jest możliwe wtedy, gdy znamy aktualny stan układu, wyrażony w poprzedniku okresu warunkowego. Warunek ten możliwy jest do spełnienia w obrębie zjawisk makrofizycznych, podlegających determinizmowi jednoznacznemu, natomiast nie jest do zrealizowania w dziedzinie zjawisk mikrofizycznych, ponieważ nie potrafimy jednoznacznie określić ich stanów w teraźniejszości. Mikrokosmos jest „rządzony” prawami probabilistycznymi, kwantowymi. Z tego nie wynika, że zjawiska mikrofizyczne nie stosują się do innych nieklasycznych form zależności przyczynowych.

Nie brak teoretyków poznania fizykalnego, którzy pomijają realny aspekt zasady przyczynowości ale akceptują jej prognostyczny walor. Przyjmują determinizm fizyczny, interpretując go akauzalnie. W prognostycznej akauzalnej interpretacji nie uznaje się przyczynowego oddziaływania jednych układów z drugimi, a funkcję determinizmu przyczynowego ogranicza się do możności przewidywania zjawisk. Takie ograniczenie nie jest usprawiedliwione. Pomiedzy empirią a zasadą kauzal-

² B. J. Gawęcki, *Zagadnienie przyczynowości w fizyce*, Warszawa 1969, 18. Por. M. Bunge, *O przyczynowości — Miejsce zasady przyczynowości we współczesnej nauce*, tłum. S. Amsterdamski, Warszawa 1968, 35—38. Zob. także Cz. Białobrzeski, *Podstawy poznawcze fizyki świata atomowego*, Warszawa 1956, 250—262.

ną istnieje ścisła zależność. Zasada ta organizuje doświadczenie teraźniejsze oraz pozwala podporządkować i przewidywać potencjalne doświadczenie przyszłe. Nowe doświadczenie może ujawnić elementy, których zasada kauzalna w dotychczasowym sformułowaniu nie posiadała i w ten sposób wpłynąć na jej modyfikację. Analiza tej zasady jest zarazem analizą naszego doświadczenia fizycznego, a więc i relacji kauzalnych, a zatem analiza doświadczenia jest zarazem analizą zasady przyczynowości³. Omawiana zasada wyraża bardzo ogólnie regularność zachodzących zdarzeń, pozwalającą prognozować przyszłe zdarzenia z jednej strony, a z drugiej — wskazuje na realność, dynamiczność zachodzących zdarzeń, którym towarzyszy przekazywanie energii pod różnymi postaciami.

II. CZY MECHANIKA KWANTOWA PODWAŻYŁA ZASADĘ PRZYCZYNOWOŚCI?

Rozstrzygnięcie problemu stosowalności zasady przyczynowości do mikrozwjawisk zależy od tego, jaką przyjmie się interpretację teorii kwantów i jakie sformułowanie zasady kauzalnej weźmie się w rachubę. Teoretycy poznania fizykalnego w dyskusjach nad zagadnieniem przyczynowości w mikrokosmosie najczęściej odwołują się do sformułowań zasady kauzalnej podanych w punktach (3) i (4).

Nie można dać jednej definitywnej odpowiedzi omawianej kwestii, gdyż nie ma jednolitej interpretacji mechaniki kwantowej i jednakowej charakterystyki modelu układu mikrofizycznego. Funkcję falową interpretuje się na różne sposoby, zależnie od przyjętych postulatów i definicji przyporządkowujących. Sprawę utrudnia i ta okoliczność, że interpretację funkcji falowej podaje się w języku mieszanym, bo zawierającym pojęcia aparatu formalnego mechaniki klasycznej i falowej⁴. W konsekwencji stosuje się niekiedy przedstawienia obrazowe w opisie funkcji stanu, które prowadzą do paradoksalnych wniosków. Nie należy zapominać, że terminy wzięte z języka fizyki newtonowskiej, takie jak „pęd”, „położenie”, „cząstka”, „fala”, mają inne znaczenie w teorii kwantowej. Nadto różnie pojmuje się i wyjaśnia samą teorię deterministyczną i indeterministyczną: pierwszą teorię usiłuje się interpretować kau-

³ J. Metallmann, *Determinizm nauk przyrodniczych*, Kraków 1934, 64 i n.

⁴ D. Błochincew, *Podstawy mechaniki kwantowej*, tłum. Z. Kopeć i J. Werle, Warszawa 1954, 42—70.

zalnie, drugiej zaś z reguły odmawia się cech wskazujących na relacje przyczynowe. Różnorodność ujęć zasady przyczynowości i interpretacji funkcji falowej, a w szczególności opisu stanu układu mikrofizycznego, znalazła swój wyraz w odmiennych stanowiskach wobec stosowalności zasady przyczynowości w fizyce kwantowej.

II.1. STANOWISKO SZKOŁY KOPENHASKIEJ

Przedstawiciele tej szkoły (W. Heisenberg, N. Bohr, P. Jordan i inni) twierdzą, że zasada przyczynowości nie jest ważna na terenie mechaniki kwantowej, przy czym zasadę tę utożsamiają z jednoznacznym przewidywaniem zjawisk w przyszłości, jeśli dany jest określony stan w teraźniejszości.

W mechanice klasycznej przyszłe stany makroukładu są wyznaczone newtonowskimi równaniami ruchu. Znając początkowy stan układu, określony zbiorem wszystkich współrzędnych położenia i pędów w chwili $t = 0$, możemy przewidzieć jednoznacznie stan tegoż układu w dowolnej przyszłej chwili. Zgodnie z opisem klasycznego modelu układu jedne i drugie współrzędne przysługują obiektowi jednocześnie. Możliwość ścisłego przewidywania stanu wskazuje na deterministyczne zachowanie się mikroukładów. Przy kauzalnej interpretacji tego determinizmu (tym bardziej, gdy się go utożsamia z przyczynowością) przechodzi się do stwierdzenia związków przyczynowych pomiędzy stanami układu. Determinizm przybiera postać zasady kauzalnej. Formuluje się ją najczęściej w postaci okresu warunkowego, którego poprzednik brzmi: „jeżeli znany jest stan układu materialnego w teraźniejszości”, a następnik: „to da się przewidzieć jednoznacznie stan tegoż układu w przyszłości”. Różne typy indeterminizmu okazują nieważność poprzednika, a w konsekwencji nieważność następnika. Ponieważ określenie początkowego stanu układu jest niemożliwe, zasada przyczynowości nie ma zastosowania w teorii kwantów, bo nie jest przydatna do jednoznacznego przewidywania mikrozwjawisk⁵.

Rewizję znanych dotychczasowych klasycznych cech związków kauzalnych nasuwał rozwój mechaniki kwantowej w okresie 1900—1925 r. Zakwestionowano najpierw jeden z atrybu-

⁵ W. Heisenberg, *Kausalgesetz und Quantenmechanik*, „Erkenntnis” 2(1931), 174; tenże: *Fizyka a filozofia*, tłum. S. Amsterdamski, Warszawa 1965, 26—41. Zob. także Ks. K. Kłósak, *Metafizyczna i fizyczna zasada przyczynowości wobec relacji niedokładności W. Heisenberga*, „Roczniki Filozoficzne” 1(1948), 198—213.

tów przyczynowości fizycznej to jest ciągłość zmian. Przekonano się, że działania w świecie atomowym dokonują się pewnymi porcjami energii, czyli kwantami. Nie możemy więc dowolnie modyfikować przyczyn, jak to miało miejsce w fizyce klasycznej i utrzymywać, że dowolnie małym zmianom przyczyny odpowiadają dowolnie małe zmiany skutku. W świecie atomowym kwant energii reprezentowany przez $h\nu$ jest tą najmniejszą porcją, której przyroda dzielić nam nie pozwala. W następnym okresie od 1925 r. zakwestionowano jednoznaczność stosunku przyczyny do skutku, gdy zaczęto operować układami mikrofizycznymi i kwantowymi zbiorówiskami statystycznymi. Inteterminizm fizyczny, głoszący, że nie można przewidywać jednoznacznie zjawisk kwantowych, przyjęto jako fakt domagający się wyjaśnienia. Czyżby „indeterminizm” znaczył tyle, co brak przyczynowości? Odwołajmy się do już przytoczonego doświadczenia. W przypadku emisji fotonu przez wzbudzony atom zdajemy sobie sprawę, aczkolwiek ogólnikowo, że przyczyną tego zjawiska jest zadziaływanie na atom wysoką temperaturą. Nie wiemy natomiast, do jakiego stanu energetycznego przejdzie ten mikroukład. Przeskok elektronu na jeden z możliwych poziomów nie jest jednoznacznie określony, ale daje się wyznaczyć prawdopodobieństwo każdego z możliwych przejść. Większa trudność nasuwa się wtedy, gdy analizujemy zjawiska naturalnej promieniotwórczości. Naturalny rozpad ciał radioaktywnych następuje samorzutnie bez naszej ingerencji. Przyzwyczajeni do przyczynowego ujmowania procesów w przyrodzie pytamy nadal o przyczynę zjawisk promieniotwórczych. Przyczyny ich wskazać nie potrafimy. Czy to oznacza, że rozkład jąder atomowych radioaktywnych jest bezprzyczynowy? Przedstawiciele szkoły kopenhaskiej twierdzą, że gdy ktoś nie może określić przyczyny zjawiska, a jednocześnie utrzymuje, iż ona musi istnieć, ten zasadę przyczynowości przesuwają z dziedziny ścisłych faktów przyrodniczych w dziedzinę fikcji.

Jako najsilniejszy argument przeciw stosowalności zasady kauzalnej w mechanice kwantowej wysuwają oni zasadę nieoznaczności, która głosi, że jednoczesne pomiary współrzędnych położenia i pędu są obarczone nieuniknionymi błędami czy też niepewnościami Δq_i i Δp_i , spełniającymi nierówność $\Delta q_i \cdot \Delta p_i \geq h$. Zasada ta wyklucza możliwość określenia stanu początkowego układu z dowolną dokładnością, co pociąga za sobą niemożliwość jednoznacznego przewidywania stanów układu. Jeśli nie znamy stanu początkowego, nie potrafimy

przewidzieć stanu przyszłego, a zatem zasada przyczynowości nie jest ważna w mikrokosmosie. Niemożliwość jednoznacznego wyznaczenia wartości zmiennych, charakteryzujących mikroobiekt, nie jest kwestią doskonalenia techniki pomiarowej. Mechanika kwantowa jest teorią indeterministyczną „w swej naturze”, a zasada nieoznaczności jest konsekwencją struktury teorii kwantowej. Stosowany w niej opis stanu układu interpretuje się statystycznie i wyprowadzone z niej przewidywania opierają się na założeniach statystycznych wykluczających opis mikrozjawisk w kategoriach przestrzenno-czasowych. Znaczy to, że mechanika falowa nie dopuszcza opisu mikroukładów w kategoriach przyczynowych. Wprawdzie i mechanika klasyczna posługuje się statystyką, ale taką, która pozwala na uściślenie zmiennych statystycznych: zwiększając dokładność pomiaru współrzędnych położenia i pędu cząstek możemy zmniejszać rozrzut wartości tych wielkości. W teorii kwantów niekontrolowany wpływ przyrządu uniemożliwia przeprowadzenie pomiaru z dowolną dokładnością i opisu przyczynowego mikrozjawisk. Opis w przestrzeni i czasie z jednej strony i matematyczny schemat poza przestrzenią i czasem z drugiej wzajemnie się wykluczają. Analogicznie zasada nieoznaczności i przyczynowości są zasadami komplementarnymi i wyłączającymi się. Opis przy pomocy funkcji falowej nie obejmuje przebiegu pomiaru. Wobec tego funkcja φ jest tworem matematycznym poza przestrzenią i czasem. Opis przestrzenno-czasowy jest możliwy przy użyciu przyrządu pomiarowego, ale wtedy wymyka się nam deterministyczna charakterystyka zachowania się obiektu mierzonego⁶.

Funkcja falowa jest „zbiorem informacji” o pojedynczej cząstce; służy do uporządkowania wyników obserwacji przy pomocy metod statystycznych. Pojedyncze mikrozjawisko nie jest jednoznacznie zdeterminowane, może się bowiem urzeczywistniać w różny sposób. Teoria kwantowa określa tylko prawdopodobieństwo realizacji jednej z możliwości przysługującej mikroukładowi, ale nie potrafi powiedzieć, która z nich się urzeczywistni. Ze względu na obowiązującą w teorii kwantowej zasadę nieoznaczności i na posługiwanie się parametrami statystycznymi należy uważać mechanikę falową za teorię istotnie indeterministyczną, nie dopuszczającą stosowania kategorii czaso-przestrzennych, przyczynowych.

⁶ M. Born, *Über den Sinn der physikalischen Theorien*, „Die Naturwissenschaften” 17 (1927), 117 i n.

II.2. POGŁADY ROSYJSKICH TEORETYKÓW POZNANIA FIZYKALNEGO NA PROBLEM KAUZALIZMU

Poglądy ich na problem kauzalizmu w teorii kwantowej ukształtowały się w wyniku krytyki kopenhaskiej interpretacji mechaniki falowej. Reprezentanci szkoły kopenhaskiej utrzymują, że tylko do pojedynczych mikrozwjawisk jako do układów odizolowanych można by było stosować pojęcie przyczynowości klasycznej; jedynie wtedy wolno byłoby oczekiwać kauzalnego związku między stanami układu mikrofizycznego, ale taka sytuacja eksperymentalna jest niemożliwa, gdyż wszelki pomiar zakłada ingerencję przyrządu w stan mikrocząstki. Trzeba zatem zrezygnować ze stosowania pojęć przyczynowych w mechanice kwantowej. Błochincew przyznaje, że w świecie atomowym nie ma tego rodzaju odizolowanych zjawisk, lecz inaczej interpretuje oddziaływanie narzędzia z mikroukładem. Uważając przyrządy pomiarowe za analizatory widmowe rozkładające zespół statystyczny na podzespoły, daleki jest od bezwzględnej przeciwstawiania mikrokosmosu makrokosmosowi. Zjawiska mikrofizyczne przebiegają w warunkach makroskopowych i to daje podstawę do przestrzenno-czasowego a więc przyczynowego opisu mikrozwjawisk⁷.

Relacje nieoznaczoności Heisenbarga nie przeczą możliwości opisu (czaso-przestrzennego (przyczynowego), lecz wyznaczają granice stosowania klasycznych pojęć do tworców mikrokosmosu, które nie są ani cząsteczkami, ani falami w znaczeniu klasycznym⁸. Relacje niedokładności są wyrazem własności mikroukładów, których zachowanie się opisuje funkcja falowa. Jeśli usiłujemy scharakteryzować stan mikrocząstki w nieadekwatnych terminach mechaniki klasycznej, nie potrafimy wykonać tego zadania z dowolną dokładnością, lecz musimy ograniczyć się do opisu statystycznego. Z tego nie wynika, że zasada przyczynowości nie jest ważna w mechanice kwantowej. Co najwyżej należy stwierdzić, że ilościowe sformułowanie określonego prawa przyczynowego nie stosuje się do mikroobiektów. Jest tak dlatego, że opis złożonego układu mikrocząstek przez podanie jednoczesnych wartości wszystkich

⁷ D. Błochincew, *Krytyka idealistycznego ujęcia teorii kwantów* (w:) *Zagadnienia filozoficzne mechaniki kwantowej*, Warszawa 1953, z. 1, 60—61.

⁸ W. Fock, *Podstawowe prawa fizyki w świetle materializmu dialektycznego* (w:) *Zagadnienia filozoficzne mechaniki kwantowej i teorii względności*, tłum. z jęz. ros. S. Czarnecki, K. Kowalska, Warszawa 1954, z. 2, 22.

współrzędnych położenia i pędu nie odpowiada naturze mikrocząstek, ale to nie przeczy możliwości stosowania kategorii przyczynowych. Funkcja falowa opisująca stan mikroukładu jest ciągła, jednoznaczna i określona dla danego obszaru. Ze względu na to, iż stan układu scharakteryzowany według wymogów mechaniki kwantowej wynika jednoznacznie z poprzedniego stanu — wskazuje na możliwość stosowania zasady przyczynowości, ale nie w sformułowaniu ilościowym, jak w fizyce klasycznej, lecz w jakimś sformułowaniu ogólniejszym. Faktem jest, że nie możemy wyznaczyć jednoznacznie i z dowolną dokładnością położenia i pędu mikrocząsteczki, ale to, co nazywamy mikrocząstką (np. elektronem), nie jest grudką materii w sensie klasycznym. Dla określenia jej stanu trzeba sięgnąć po inny zbiór parametrów. Negowanie przyczynowości w świetle mikrozwjawisk jest konsekwencją utożsamiania pojęcia stanu układu mechanicznego z pojęciem stanu kwantowego. Odrzucenie pojęć przyczynowych na terenie mechaniki kwantowej ma swe źródło w tym, że stan mikrocząstek usiłuje się nadal opisać w „niewłaściwych im pojęciach mechaniki klasycznej”. Struktura mikrozwjawisk narzuca nam nową metodę opisu statystycznego. Funkcja falowa interpretowana empirycznie daje tylko statystykę rezultatów pomiarowych. Wpływają na to również warunki zewnętrzne, jakimi są przyrządy pomiarowe, rozkładające zespół statystyczny na podzespoły. Funkcja ψ , ściśle mówiąc, nie opisuje indywidualnych mikroobiektów. Układ w teorii kwantów jest zespołem statystycznym, rządzonym prawami statystycznymi matematycznie określonymi, którym nie można odmówić cech deterministycznych. Wszystkie prawa fizyki opisują prawidłowości statystyczne lub niestatystyczne. Funkcja falowa charakteryzująca zespół statystyczny stosuje się do równania falowego, które pozwala określić tę funkcję dla dowolnej chwili, jeśli ona znana jest w chwili początkowej. W ten sposób dla zespołu statystycznego obowiązuje pewna forma związku przyczynowego.

Główny argument szkoły kopenhaskiej rzekomo podważający kategorię przyczynowości w teorii kwantów, a mianowicie zasada nieoznaczoności, nie wytrzymuje krytyki naukowej, gdyż opis stanu układu przez podanie jednoczesnych pomiarów położenia i pędu obiektu jest właściwy mechanice klasycznej, a nie odpowiada modelowi układu mechaniki falowej. Jeśli ktoś przystępuje do badania mikrokosmosu z klasycznym aparatem pojęć i chce wyrokować o niestosowalno-

ści zasady kauzalnej, to źle stawia sam problem przyczynowości w mechanice kwantowej. Wprawdzie w przypadku samorzutnego rozpadu jąder atomów promieniotwórczych nie potrafimy jednoznacznie przewidzieć, który z nich ulegnie rozpadowi i kiedy, jednak możemy obliczyć okres tzw. połowicznego zaniku. Indeterminizm zjawisk kwantowych nie oznacza jakiegoś chaosu, braku prawidłowości w przebiegu mikrozwisk. Prawidłowość ta jest podstawą przypisania cech kauzalnych procesom mikrofizycznym, aczkolwiek będzie to przyczynowość określająca zachowanie się nie pojedynczych mikroobiektów, lecz zespołów statystycznych. Istnieje więc prawidłowość statystyczna, która jest przejawem wpływu środowiska na pojedyncze mikrozwiska.

II.3. E. NAGLA STANOWISKO WOBEC ZAGADNIENIA PRZYCZYNOWOŚCI

Zbliżone do poglądów rosyjskich fizyków i teoretyków poznania fizykalnego jest stanowisko Nagla, które jeszcze bardziej eksponuje deterministyczne i kauzalne zachowanie się zbiorowisk mikrocząstek, aczkolwiek opisywanych przy pomocy parametrów statystycznych. Związek przyczynowy definiuje on jako „funkcyjną zależność zmiany w jednostce czasu jednej wielkości (tj. pędu) od innych wielkości”⁹. W oparciu o tę definicję interpretuje on kauzalnie newtonowskie prawa ruchu, gdyż pozwalają one określić wielkość zmiany pędu — na jednostkę czasu — poszczególnych punktów materialnych należących do jakiegoś układu fizycznego zależnie od wartości innych zmiennych układu. Wobec tego stwierdzenie funkcyjnej zależności zmiany w jednostce czasu jednej klasy własności fizycznych od własności drugiej klasy jest koniecznym i wystarczającym warunkiem relacji kauzalnych między zespołami własności fizycznych.

Wychodząc z podanej definicji związku przyczynowego uważa, że zarówno mechanika newtonowska jak i klasyczna mechanika statystyczna oraz mechanika kwantowa są teoriami deterministycznymi, a zatem i kauzalnymi. Teoria nie jest kopią rzeczywistych procesów. Należy przeto odróżnić deterministyczny charakter samej teorii, która ustala zmienne stanu pozostające od siebie w określonych relacjach logicznych, od potwierdzalności teorii przez dane eksperymentalne. Teoria fizyczna nie jest adekwatnym opisem konkretnego procesu. W

⁹ E. Nagel, *Struktura nauki* (tłum. zbiorowe), Warszawa 1970, 246.

każdej bowiem sytuacji eksperymentalnej w wyniku pomiaru otrzymuje się zbiór wielkości charakteryzujący się pewną dyspersją w stosunku do wartości obliczonych na podstawie teorii fizycznej. Gdyby ktoś uznał za kryterium indeterminizmu faktyczną rozbieżność między teoretycznymi wartościami parametrów a wartościami uzyskanymi doświadczalnie, musiałby dojść do wniosku, że mechanika newtonowska jest teorią indeterministyczną.

Nie można klasycznej mechanice statystycznej i mechanice kwantowej odmówić cech teorii deterministycznej tylko dlatego, że eksperymentalnie otrzymane wartości zmiennych nie pokrywają się dokładnie z wartościami określonymi w oparciu o teorię. Tezy tej nie osłabia fakt, że stan układu w jednej i drugiej mechanice opisuje się przy pomocy zmiennych statystycznych. Fizyka klasyczna jest teorią deterministyczną ze względu na stan układu zdeterminowany w terminach mechanistycznych. U podstaw klasycznej mechaniki statystycznej leżą również postulaty o charakterze mechanistycznym. Teoria zaś kwantowa w opisie zachowania się mikroukładów posługuje się również parametrami statystycznymi, aczkolwiek charakteryzują one niemechanistyczne zespoły statystyczne, czyli nie dające się opisać na sposób mechaniki klasycznej. Istotnym momentem dla zaliczenia teorii do klasy teorii deterministycznych nie jest to, czy charakteryzuje się stan układu przy pomocy parametrów niestatystycznych lub statystycznych, lecz to, czy na podstawie teorii można określić jednoznacznie stan układu w przyszłości wychodząc ze znajomości stanu układu w teraźniejszości. Nagel precyzuje tę myśl w następujący sposób: „teoria jest deterministyczna wtedy i tylko wtedy, gdy z wartości zmiennych stanu dla pewnego okresu początkowego wynika logicznie, ze względu na tę teorię, jednoznacznie określony zbiór wartości owych zmiennych dla dowolnego innego okresu”¹⁰.

Mechanika kwantowa określa więc w sposób jednoznaczny ewolucję układu mikrofizycznego w czasie, a zatem warunek uznania w niej relacji kauzalnych jest spełniony. Nie jest słuszne stanowisko szkoły kopenhaskiej, według której jedynie stany układu mechanicznego miałyby czynić zadość zasadzie przyczynowości. Zasada ta nie narzuca jakiegś specjalnej definicji opisu stanu układu, nie wymaga stosowania jedynie zmiennych niestatystycznych. Charakterystyka stanu

¹⁰ Tamże, 257.

układu w zmiennych statystycznych lub *quasi*-statystycznych nie rozmija się z kategorią przyczynowości, ponieważ zespoły statystyczne podlegają determinizmowi statystycznemu matematycznie określönemu zgodnie z przytoczoną definicją teorii deterministycznej¹¹. Nie można zgodzić się z twierdzeniem, że jeśli w opisie stanu figurują zmienne statystyczne, to nie spełniają one zasady przyczynowości.

Według Heisenberga nie da się obliczyć wielkości zmian zachodzących w mikroobiektych w trakcie pomiaru, gdyż zmiany te nie podlegają kontroli. Nieznajomość wielkości tych zmian uniemożliwia stosowanie pojęć kauzalnych w mechanice kwantowej. Zasada przyczynowości suponuje możliwość opisu stanu układu w kategoriach przestrzenno-czasowych, co jest niemożliwe do wykonania w odniesieniu do mikroukładów. Opis procesu atomowego w terminach czasu i przestrzeni oraz stosowalność zasady przyczynowości wzajemnie się wykluczają.

Zdaniem Nagla nie jest uzasadniony wniosek, że skoro teoria kwantowa nie pozwala przewidywać ewolucji pojedynczych mikroobektów, to ich zachowanie się z natury jest niezdeteminowane, a więc jest przejawem „absolutnego” przypadku. Teoria kwantowa nie zajmuje się zachowaniem poszczególnych mikrocząstek, lecz ich zbiorowiskami. Zresztą niemożliwość jednoczesnego i dowolnie dokładnego pomiaru pędu i lokalizacji mikroukładu jest następstwem relacji nieoznaczoności, a nie wynika z sytuacji eksperymentalnej, w której następuje interakcja między mikrocząstką i narzędziem pomiarowym. Wiadomo, że można wyznaczyć dokładnie położenie mikrocząstki kosztem określenia jej pędu (i odwrotnie), do czego jest niezbędne użycie narzędzia. Nie można traktować mechaniki kwantowej jako teorii indeterministycznej i akauzalnej tylko dlatego, że zasada nieoznaczoności wyklucza dokładny i jednoczesny pomiar położenia i pędu mikroobektu. Wniosek ten jest nieuzasadniony, ponieważ terminom „cząstka”, „fala”, „położenie”, i „pęd” odpowiada inna treść fizyczna w mechanice newtonowskiej niż w mechanice kwantowej: reguły rządzące użyciem tych terminów są odmienne w tych dwóch teoriach fizycznych. Popelnia się błąd *non sequitur*, gdy się rozumuje w ten sposób: ponieważ w fizyce klasycznej równoczesne mierzenie współrzędnych położenia i pędu mikroukładu będące warunkiem jednoznacz-

¹¹ *Tamże*, 283.

nego przewidywania jest możliwe, a w mechanice kwantowej analogiczny zabieg pomiarowy w odniesieniu do mikroukładu jest niemożliwy, przeto mechanika klasyczna ma charakter deterministyczny a teoria kwantowa — indeterministyczny. Błąd polega na tym, że traktuje się układ mikrofizyczny jak miniaturę układu makrofizycznego. Mikroobiektów postulowanych przez teorię kwantową nie można opisać w kategoriach przestrzenno-czasowych nie dlatego, jakoby procesy atomowe zachodziły rzekomo poza przestrzeń i czasem, lecz dlatego, że obiekty mikrofizyczne nie są cząstkami w sensie klasycznym.

Pogląd, według którego procesy mikrofizyczne nie stosują się do zasady przyczynowości, jest następstwem ograniczenia ważności tej zasady: jedynie ta teoria jest deterministyczna, która operuje parametrami niestatystycznymi oraz modelami mechanicznymi lub niemechanicznymi typu elektrodynamicznego. Z tą opinią nie można się zgodzić, gdyż zasada przyczynowości nie narzuca nam posługiwania się tylko niektórymi specjalnymi modelami układów fizycznych.

III. UOGÓLNIENIE ZASADY PRZYCZYNOWOŚCI NA ZJAWISKA MIKROFIZYCZNE

W wyniku dyskusji nad zakresem zasady przyczynowości zarysowały się dwa odmienne poglądy. Jeden z nich głosi, że zasada ta w swym klasycznym sformułowaniu nie jest stosowalna na terenie mechaniki kwantowej, która ma charakter indeterministyczny. Stanowisko to jest konsekwencją dwóch założeń: a) zasada kauzalna odnosi się tylko do układów specjalnego typu, a mianowicie mechanicznego i niemechanicznego, ale opisywalnego przy pomocy teorii ściśle deterministycznej, dynamicznej (jak w elektrodynamice maxwellowskiej), b) jeśli teoria opisuje stan układu w zmiennych statystycznych, nie może być uznana za deterministyczną. Teoria deterministyczna ustala jednoznaczne zależności między zmiennymi układu reprezentującymi wielkości obiektów indywidualnych. Denotuje ona tylko takie stany układów, które są ze sobą dynamicznie powiązane i jednoznacznie określone. Determinizm niejednoznaczny jest czymś sprzecznym w sobie.

Z tego stanowiska zagadnienie, czy zasada kauzalna jest ważna w teorii kwantów, pozornie jest nierozstrzygalne lub źle postawione, ponieważ mechanika kwantowa posługuje się innym (w stosunku do mechaniki klasycznej) pojęciem stanu.

układu, który opisuje się w terminach statystycznych. Próba rozszerzenia czy też uogólnienia zasady przyczynowej, tak by objęła swym zasięgiem mikrozwjawiska, jest niewykonalna. Do opisanie zdarzeń mikrofizycznych może służyć tylko teoria indeterministyczna, akauzalna, nieredukowalna do teorii deterministycznej. Należy pozostawić zasadę przyczynowości w klasycznym dotychczasowym brzmieniu bez istotnych zmian.

Nasuwa się uwaga krytyczna, że restrykcja zasady kauzalnej tylko do pewnego typu układów z pominięciem innych nie jest słuszna¹². Teorie fizyczne posługują się różnymi modelami układów, nie tracąc swych cech kauzalnych. Mechanika kwantowa nie jest teorią deterministyczną ze względu na opis układu zdefiniowany przez współrzędne położenia i pędu, odnoszące się do poszczególnych elementów układu, ale jest teorią deterministyczną ze względu na sposób opisu stanu mikroukładu (w sensie zespołu statystycznego) zdefiniowanego przez funkcję ψ w terminach statystycznych, charakterystycznych dla teorii kwantów. Nic nas nie zmusza do przyjęcia tezy, że teoria deterministyczna dotyczy tylko ściśle jednoznacznych zależności między poszczególnymi stanami indywidualnych układów, które pozwalają przewidywać ewolucję układu w sposób jednoznaczny.

Według przedstawicieli drugiego poglądu, chociaż zasada przyczynowości w dotychczasowym sformułowaniu nie ma zastosowania w mikrokosmosie, ponieważ głosi jednoznaczne odniesienie przyczyny do skutku, to jednak z tego nie wynika, że zjawiska mikrofizyczne zachodzą poza zakresem oddziaływań kauzalnych. W świecie atomowym spotykamy zdarzenia, które nie są jednoznacznie, lecz statystycznie określone. Jednakże istniejące wśród nich prawidłowości pozwalają formułować prawa w ściśle matematyczny sposób. Że mikrokosmos pozostaje pod „rządami” praw probabilistycznych — to nie przekreśla uznania w nim pewnej postaci kauzalizmu. Ten ostatni da się utrzymać w świecie mikrozwjawisk, ale będzie to przyczynowość niejednoznaczna, uogólniona¹³. Nie jest to *contradictio in adiecto*. Sprzeczność byłaby wtedy, gdybyśmy z pojęciem kauzalizmu musieli łączyć jednoznaczne przyporządkowanie danej przyczynie określonego skutku, ale do tego nas nic nie zmusza. Wielu autorów

¹² S. Mazierski, *Elementy kosmologii filozoficznej i przyrodniczej*, Poznań 1972, 345—347.

¹³ Cz. Białobrzęski, *Podstawy poznawcze fizyki świata atomowego*, Warszawa 1956, 300—304.

współczesnych akceptuje tezę, że stwierdzenie faktu, iż w danych warunkach można określić prawidłowości statystyczne zachowania się mikroukładów, jest wystarczającą podstawą uznania przyczynowości w fizyce kwantowej. Spośród autorów podzielających ten pogląd należy wymienić przede wszystkim L. de Broglie'a odróżniającego ścisły determinizm od przyczynowości. Analizując doświadczenie rozproszeniowe (ślady na ekranie w postaci błysków w wyniku odbijania się elektronów od kryształu) fizyk francuski dochodzi do wniosku, że zachowanie się mikroobiektów nie rozmija się z kategorią przyczynowości, lecz wymaga rozszerzenia jej zakresu. A oto schemat ilustrujący sposób uogólnienia przyczynowości. Weźmy pod uwagę zjawisko A, po którym następuje któreś ze zjawisk $B_1, B_2, B_3, \dots B_n$, gdy zaś żadne ze zjawisk $B_1, B_2, B_3, \dots B_n$ nie zachodzi, jeśli nie zaszło A, wtedy trzeba przyjąć, że A jest odpowiednio przyczyną zjawiska B_1, B_2, B_3 itd. Tak się prezentuje rozszerzona definicja pojęcia przyczynowości.

Z tej definicji wynikają konsekwencje: pomiędzy zjawiskiem A a zjawiskiem $B_1, B_2, B_3, \dots B_n$ istnieje związek przyczynowy, ale nie ma tu determinizmu jednoznacznego, ponieważ nie potrafimy przewidzieć, które ze zjawisk B_1, B_2, B_3 itd. nastąpi, jeśli zadziała przyczyna A. W przyczynowości wieloznacznej zrealizowany stan, np. B_{n-1} , należy ściśle do określonego zbioru stanów $B_1, B_2, B_3, \dots, B_n$, z których każdy ma określone prawdopodobieństwo urzeczywistnienia¹⁴.

Nie powinno się jednak zapominać, że determinizm w procesach makrofizycznych i mikrofizycznych nie jest tym samym co kauzalizm. Empirystyczne próby redukcji przyczynowości do prawidłowości są typowe dla filozofów Koła Wiedeńskiego, którzy utożsamiają „prawdę z kryterium prawdy”, sensowność zdania z jego empiryczną weryfikacją. Wykrycie deterministycznych relacji o charakterze jednoznacznym bądź statystycznym (probabilistycznym) może być kryterium występowania cech kauzalnych w związkach fizycznych. Determinizm przyczynowy jest jedną z postaci determinizmu. Ilekroć zachodzą związki przyczynowe, tylekroć ma miejsce fakt przekazywania energii jednemu układowi przez drugi

¹⁴ L. de Broglie, *Nouvelles perspectives en microphysique. La physique quantique restera-t-elle indéterministe?* Paris 1956. Praca ta została przetłumaczona na jęz. polski: *Czy fizyka kwantowa pozostanie indéterministyczna?* (w:) *Zagadnienia filozoficzne mechaniki kwantowej i teorii względności*, Warszawa 1955, z. 4, 110—143.

lub energii pomiędzy elementami układu, o czym nie mówi sam determinizm.

Różne sposoby determinowania stanów układów fizycznych mechanicznych (niestatystycznych lub statystycznych) lub niemechanicznych (statystyczno-kwantowych) teoretycy poznania fizykalnego okrelają w następujący sposób: „Wszystkie procesy przyrody przebiegają w taki sposób, że fizyczne oddziaływania, jakim podlega w chwili t_3 układ znajdujący się w stanie scharakteryzowanym przez odpowiedni zespół parametrów, wyznaczają jednoznacznie lub probabilistycznie stan tego układu w chwili t_2 . Jeli układ jest izolowany, to stan, w którym się on znajdzie w chwili t_2 , wyznaczają jednoznacznie lub probabilistycznie oddziaływania między jego częściami w chwili t_3 ”¹⁵. Zależność przyczynowa zachodzi również wtedy, gdy przekaz energii powoduje przejście układu ze stanu S_1 w stan S'_2 lub ... S_2^n z określonym prawdopodobieństwem dla każdego z tych przejść. Zmiana stanu układu może być określona bądź jednoznacznie, bądź niejednoznacznie (probabilistycznie). Stan zaktualizowany należy do ściśle określonego zbioru stanów, które przed doświadczeniem miały jednoznacznie określone prawdopodobieństwo realizacji.

Nie jest konieczne łączyć z pojęciem przyczynowości jednoznacznego przewidywania i ciągłości procesów. Zmodyfikowana koncepcja kauzalizmu rozszerza zasadę przyczynowości również na zjawiska mikrofizyczne i pozwala stosować ją nie tylko w mechanice newtonowskiej, lecz także w mechanice kwantowej¹⁶.

ANWENDUNGSBEREICH DES PHYSIKALISCHEN KAUSALPRINZIPS

Zusammenfassung

In dem vorliegenden Aufsatz wurde das Problem gestellt, ob das physikalische Kausalprinzip nur in der klassischen (Newtonischen) Physik anwendbar ist oder man kann das Prinzip so modifizieren, dass

¹⁵ S. Amsterdamski, *O obiektywnych interpretacjach...*, 67.

¹⁶ Z tych końcowych stwierdzeń nie wynika, że we wszystkich formach determinowania występują relacje przyczynowe. M. Bunge zauważył, że prawidłowości przyczynowe stanowią tylko niektóre kategorie determinowania. Zob. jego cytowaną pracę *O przyczynowości...*, 20—44.

es auch in der Quantenphysik gilt. Der Verfasser vertritt den zweiten Standpunkt. Deswegen hat er vorgestellt eine Verallgemeinerungsart des Kausalprinzips auf die Phänomene der Mikrophysik, dabei aber betonte er, dass nicht in allen Beziehungen die Kausalrelationen hervortreten. Kausalität bildet nur eine von den Kategorien der Beziehungen zwischen den physikalischen Tatsachen.