

Andrzej Koleżyński

Determinizm Laplace'a w świetle teorii fizycznych mechaniki klasycznej

Zagadnienia Filozoficzne w Nauce nr 40, 59-75

2007

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 KOLEŻYŃSKI
AGH, Kraków; PAT, Kraków

***DETERMINIZM LAPLACE'A W ŚWIETLE
TEORII FIZYCZNYCH MECHANIKI
KLASYCZNEJ***

W tradycyjnej dyskusji filozoficznej, rozróżnia się od siebie zagadnienia ontologiczne i epistemologiczne, utrzymując niejako te obszary przedmiotowe w separacji. Z punktu widzenia fizyki, chemii oraz filozofii tych nauk, relacja pomiędzy tymi obszarami ma wszakże bardzo istotne znaczenie¹. Przykładowo, wiele problemów odnoszących się do pomiarów, zmusza nas do rozważania jednocześnie naszej wiedzy o stanach i wielkościach obserwowanych (obserwablach) danego układu (perspektywa epistemologiczna) oraz stanów i obserwabli, niezależnie od takiej wiedzy (perspektywa ontologiczna). Szczególnie dobrze widać to w mechanice kwantowej, choć również szereg innych dziedzin szczegółowych nauk przyrodniczych, np. fizyka cząstek elementarnych, czy fizykochemia ciała stałego, nie są wolne od związków pomiarów z teorią. Od związków ontologiczno-epistemologicznych, nie jest wolne również zagadnienie determinizmu w przyrodzie, poczynając od jego klasycznej, Laplace'owskiej wersji, a na współczesnych nam wersjach kończąc. W swej sławnej wypowiedzi dotyczącej deter-

¹Jako pierwszy wprowadził rozróżnienie na aspekty ontyczne i epistemiczne w fizycznym opisie rzeczywistości Erhard Scheibe [1964, 1973], a po nim zostało to rozwinięte przez innych autorów (m.in. Primas [1990, 1994]; Atmanspacher [1994], d'Espagnat [1994]).

minizmu, Laplace [1812] odniósł się bezpośrednio do ontologicznej sfery determinizmu²:

Powinniśmy rozpatrywać aktualny stan wszechświata, jako skutek jego przeszłości oraz przyczynę jego przyszłości. Intelpekt, który znałby wszystkie siły przyrody działające w danej chwili oraz położenie każdej części składowej wszechświata i byłby równocześnie wystarczająco niezmierny, aby objąć analizą wszystkie dane, byłby w stanie streścić w jednej formule ruchy wszystkich obiektów, zarówno największych ciał w świecie, jak i najmniejszych atomów; dla takiego intelektu znikłaby niepewność i zarówno przyszłość, jak i przeszłość stanęłyby otworem przed jego oczami.

Intelpekt ten stał się powszechnie znany jako demon Laplace'a. Jego możliwości wykraczają daleko poza epistemologiczną rzeczywistość obserwacji empirycznej i wiedzy. Równocześnie Laplace w tym stwierdzeniu, mówiąc o przyczynie i skutku, z góry założył konkretny kierunek upływu czasu. Ten porządek czasowy nie jest wprost widoczny w powyższym cytacie, odnoszącym się do bardziej ogólnego rodzaju determinizmu niż przyczynowość — determinizmu, w którym aspekty ontologiczny i epistemologiczny są zjednoczone.

60 lat później, w 1873 roku Maxwell, w debacie na temat determinizmu i wolnej woli stwierdził³:

²Tłum. własne z wersji ang.: "We may regard the present state of the universe as the effect of its past and the cause of its future. An intellect which at any given moment knew all of the forces that animate nature and the mutual positions of the beings that compose it, if this intellect were vast enough to submit the data to analysis, could condense into a single formula the movement of the greatest bodies of the universe and that of the lightest atom; for such an intellect nothing could be uncertain and the future just like the past would be present before its eyes."

³Tłum. własne z wersji ang.: "It is a metaphysical doctrine that from the same antecedents follow the same consequents. No one can deny this. But it is not much use in a world like this, in which the same antecedents never again concur, and nothing ever happens twice [...]. The physical axiom which has a somewhat similar aspect is 'that from like antecedents follow like consequents'. But here we have passed from sameness to likeness, from absolute accuracy to a more less rough approximation."

Twierdzenie, że z takich samych antecedenencji (poprzednich stanów układu) otrzymujemy takie same konsekwencje jest metafizyczną doktryną. Nikt temu nie może zaprzeczyć. Nie ma to jednak wielkiego zastosowania w świecie, w którym takie same sytuacje nigdy się dwa razy nie zdarzają [...]. Fizycznym aksjomatem o podobnym wydźwięku jest stwierdzenie, że z podobnych antecedenencji przechodzimy do podobnych konsekwencji. Ale w ten sposób przechodzimy od tożsamości do podobieństwa, od absolutnej dokładności do mniej lub bardziej grubego przybliżenia. Istnieją pewne klasy zjawisk, w których mały błąd w danych początkowych, prowadzi do niewielkich tylko błędów wyników, przebieg zdarzeń jest w tych układach stabilny. Istnieją inne klasy zjawisk, bardziej skomplikowanych, w których może pojawić się niestabilność [...].

Analizując powyższy cytat, można stwierdzić, że Maxwell, pisząc: „Istnieją inne klasy zjawisk [...] w których może pojawić się niestabilność”, ewidentnie rozróżnił opisy ontologiczny i epistemologiczny, chociaż skupił się on tutaj głównie na zagadnieniu przyczynowości, jego argument dotyczy antecedenencji i konsekwencji, w sensie przyczyny i skutku. Jeśli rozumieć je jako ontyczne stany następujące po sobie w różnych chwilach w czasie, to stwierdzenie, że „z podobnych antecedenencji, otrzymujemy podobne konsekwencje” charakteryzuje tzw. silną wersję przyczynowości, zupełnie nieadekwatną do intensywnie rozwijanej obecnie teorii układów chaotycznych. Słaba przyczynowość, właściwa do opisu dynamicznych układów chaotycznych, nie przeczy „metafizycznemu” (ontologicznemu) stwierdzeniu, że „z takich samych antecedenencji (stanów układu) otrzymujemy takie same konsekwencje”. W przypadku silnej przyczynowości, małe zmiany warunków początkowych dla danego procesu, mogą skutkować wyłącznie małymi zmianami po dowolnym czasie. Słaba przyczyno-

There are certain classes of phenomena, in which a small error in the data only introduces a small error in the result, the course of events in these cases is stable. There are other classes of phenomena which are more complicated, and in which cases instability may occur [...].”

wość natomiast, uwzględnia przypadek, w którym mała zmiana warunków początkowych, może być wzmocniona w funkcji czasu. Odpowiednie procesy zależą silnie od warunków początkowych w taki sposób, że „takie same konsekwencje” mogą być otrzymane wyłącznie z „takich samych poprzedników”. W przypadku silnej przyczynowości, podobnie jak u Laplace’a, ontyczny i epistemologiczny opis są tożsame. Dla słabej przyczynowości pojawia się już jednak rozróżnienie: układ ontycznie deterministyczny, ze względu na fakt, że podobne poprzedniki, mogą prowadzić tylko do podobnych konsekwencji, a różnice mogą wzmacniać się z upływem czasu, może sprawiać poważne kłopoty dla przewidywania ewolucji stanu układu.

W sposób jeszcze wyraźniejszy wskazał na ten problem Henri Poincaré [1903]⁴:

Gdybyśmy znali dokładnie prawa natury i stan układu w początkowym momencie, byłibyśmy w stanie przewidzieć stan układu w następującej po nim chwili. Ale nawet gdyby prawa natury nie miały przed nami już żadnej tajemnicy, moglibyśmy wciąż poznać warunki początkowe tylko w sposób przybliżony. Jeśli to umożliwiłoby nam przewidywanie stanu układu w następnej chwili z taką samą dokładnością, a to wszystko, czego nam potrzeba, to moglibyśmy wtedy powiedzieć, że zjawisko zostało przewidziane; że podlega ono prawom natury. Ale nie zawsze tak jest; może się zdarzyć, że małe różnice warunków początkowych, prowadzą do bardzo dużych różnic w zjawiskach koń-

⁴Tłum. własne z wersji ang.: “If we knew exactly the laws of nature and the situation of the universe at the initial moment, we could predict exactly the situation of that same universe at a succeeding moment. But even if it were the case that the natural laws had no longer any secret for us, we could still only know the initial situation approximately. If that enabled us to predict the succeeding situation with the same approximation, that is all we require, and we should say that the phenomenon had been predicted, that it is governed by laws. But it is not always so; it may happen that small differences in the initial conditions produce very great ones in the final phenomena. A small error in the former will produce an enormous error in the latter. Prediction becomes impossible [...]”

cowych. Mały błąd wcześniej, powoduje wielki błąd później.
Przewidywanie staje się niemożliwe [...].

Mamy tutaj bezpośrednie odniesienie do problemu przewidywalności. Obok ontycznego charakteru determinizmu na początku cytatu: „Gdybyśmy znali dokładnie [...] moglibyśmy przewidzieć”, co jest aluzją do demona Laplace'a z jego ontyczną sferą związaną z tematem, pojawiają się wyraźne akcenty epistemologiczne, wraz ze wskazaniem na istotne znaczenie w przewidywaniu, niemożności dokładnego określenia wartości początkowych „moglibyśmy wciąż poznać warunki początkowe tylko w sposób przybliżony” i problemu propagacji błędów pomiaru „może się zdarzyć, że małe różnice warunków początkowych, prowadzą do bardzo dużych różnic w zjawiskach końcowych [...]”. Przewidywanie staje się niemożliwe [...]”. Poruszając problem dokładności określenia warunków brzegowych i propagacji błędów (określany obecnie jako tzw. problem wrażliwości na warunki początkowe), Poincare może być, w jakimś, sensie uważany za prekursora opisu deterministycznych układów chaotycznych. Powszechnie używane obecnie określenie „chaos deterministyczny”, wyraża wewnętrzne napięcie pomiędzy ontyczną (ukrytą) pełnią rządzących układem praw, a epistemiczną (pozorną) nieregularnością w układach chaotycznych. Stosowany przez nas opis praw przyrody (równań różniczkowych rządzących dynamiką takich układów) jest bez wątpienia deterministyczny, ale ich obserwowalny charakter jest zupełnie niedeterminowalny (w sensie mierzalności, obliczalności czy przewidywalności) z dowolnie wielką precyzją. Deterministyczny chaos *jest* deterministyczny, ale w żadnym stopniu nie determinowalny. Ta różnica pomiędzy determinizmem, a determinowalnością nawiązuje w sposób bezpośredni do różnicy pomiędzy opisem ontycznym i epistemicznym. O ile bowiem determinizm odnosi się do dociekań dotyczących niezależnej („gdy nikt nie patrzy”) rzeczywistości ontycznej, o tyle determinowalność wyraża podejście odnoszące się do naszej epistemicznej wiedzy o tej rzeczywistości.

Pomimo, że pierwotnie motywacja ontyczno-epistemicznego rozróżnienia w fizyce pochodziła z teorii kwantów, to z powyższych

rozważań widać wyraźnie, że rozróżnienie to ma znaczenie również w przypadku fizyki klasycznej. Klasyczna mechanika dostarcza czytelnego przykładu „degeneracji” mieszającej poziomy ontyczny z epistemicznym, co prowadzi zarówno do praktycznych problemów epistemologicznych — np. nie jesteśmy w stanie stwierdzić czy dany układ chaotyczny jest układem ontycznie deterministycznym, ale ze względu na wrażliwość na warunki początkowe zachowuje się chaotycznie, czy też zarówno ontologicznie, jak i epistemologicznie patrząc, jest układem chaotycznym, jak i do fundamentalnych problemów epistemologicznych, jak choćby zagadnienie możliwości znalezienia jednoznacznej odpowiedzi na pytanie czy świat jest, czy też nie jest deterministyczny. Wiąże się to bezpośrednio z zagadnieniem istnienia uniwersalnych, powszechnych praw przyrody — zagadnieniem, które samo w sobie jest niezwykle interesujące i o głębokich konsekwencjach filozoficznych, niemniej jednak jego analiza wykracza daleko poza ramy niniejszej pracy.

Przy próbie uporania się z powyższym problemem, pojawia się pytanie — w jaki sposób możemy stwierdzić, czy świat jest ontycznie deterministyczny. Determinizm wymaga, co najmniej, aby:

1. świat miał dobrze zdefiniowany stan w dowolnym momencie w czasie,
2. prawa przyrody były prawdziwe w każdym miejscu i w każdej chwili czasu.

Problem stanowi zarówno spełnienie warunku a) (brak możliwości określenia z dowolną dokładnością stanu układu, choćby ze względu na efekty kwantowe i zasadę nieoznaczoności), jak i niemożliwość udowodnienia prawdziwości warunku b).

Wydaje się więc, że nie będziemy w stanie nigdy uzyskać odpowiedzi na to pytanie.

Zagadnienie to może otrzymać jednakże pewne wsparcie ze strony współczesnych i przyszłych teorii fizycznych — jeśli teorie te okażą się deterministyczne, to może być to dla nas wskazówka (lecz tylko wskazówka!), że również i świat rzeczywisty prawdopodobnie jest taki.

Spróbujmy zastanowić się pokrótce, jakie kryteria musi spełniać teoria fizyczna, aby była deterministyczna.

Stone [1989] zaproponował bardzo wygodny schemat, modelowe podsumowanie kluczowych elementów, tworzących (łącznie) Laplace'owski obraz determinizmu klasycznej mechaniki punktowej Newtona (jak pokazano w dalszej części pracy, przy niewielkich modyfikacjach, można zastosować to podejście do dowolnej teorii fizycznej). Model ten składa się z czterech elementów⁵:

- (DD) Dynamika różniczkowa (*Differential dynamics*)⁶
 (Stone [1989, ss. 124–125], Kellert [1993, ss. 50, 56–59]). Istnieje w teorii (modelu) algorytm, który łączy stan układu w dowolnej chwili czasu ze stanem układu w dowolnej, innej chwili.
- (UE) Jednoznaczna ewolucja (*Unique evolution*)
 (Stone [1989, ss. 124–125], Kellert [1993, ss. 50, 59–60]). Algorytm w teorii (modelu) spełnia warunek, że dla *danego* stanu układu, stany go poprzedzające (po nim następujące) podlegają *zawsze* takiej samej sekwencji przejść.
- (VD) Determinowalność (obliczalność) wartości (*Value determinateness*)
 (Stone [1989, ss. 124–125], Kellert [1993, s. 50]). Każdy stan układu może być opisany z dowolnie małym (niezerowym) błędem.

⁵Pierwsze dwa elementy dotyczą ontycznych aspektów determinizmu. Trzeci (VD) opisuje zarówno ontyczny, jak i epistemologiczny, a ostatni (AP) epistemologiczny aspekt determinizmu. Jak widać, problem determinizmu zawiera w swojej istocie nierozzerwalne związki ontyczno-epistemologiczne i jakakolwiek bardziej szczegółowa analiza tego problemu wymaga uważnego namysłu z punktu widzenia obu tych filozoficznych perspektyw.

⁶Chociaż oryginalnie Stone przedstawił ten schemat dla mechaniki klasycznej i stąd określenie „dynamika różniczkowa” nasuwa na myśl wyłącznie równania różniczkowe, to w gruncie rzeczy jest to warunek znacznie bardziej ogólny, dopuszczający również np. równania różniczkowo-całkowe, całkowe, czy inne wynikające z analizowanych teorii fizycznych (Bishop [2002], [2003]).

(AP) Absolutna przewidywalność (*Absolute predictability*)

(Stone [1989, s. 128]). Dowolny stan układu, może być wygenerowany (przewidziany) przy pomocy takiego algorytmu z dowolnie małym (niezerowym) błędem, z dowolnego innego stanu.

W powyższym schemacie, przez stan układu rozumiemy punkt w przestrzeni stanów. Czynimy tutaj niejawnie założenie (tzw. *faithful model assumption*), że nasz matematyczny model (algorytm definowany w teorii fizycznej) stanowi dokładną reprezentację układu fizycznego, a przestrzeń stanów jest wiernym obrazem przestrzeni fizycznej. Zaletą stosowania przestrzeni stanów w analizie problemu determinizmu danej teorii fizycznej, jest możliwość badania geometrycznych własności trajektorii stanów układu, często bez konieczności znajomości dokładnych rozwiązań równań dynamicznych. Dodatkowo — w różnych teoriach, użyteczne będą różne wersje przestrzeni stanów — może to być przestrzeń fazowa (położenia vs pędy), konfiguracyjna (położenia vs czas), gęstości (położenia vs gęstości cząstek), jak również różne rodzaje przestrzeni transformowanych, np. w fizyce ciała stałego za pomocą transformaty Fouriera transformowane wzajemnie sieć rzeczywista w odwrotną w kryształach (położenia vs pędy). Pozwala to dobrać najbardziej użyteczny rodzaj przestrzeni stanów dla danej teorii celem analizy ewolucji stanów i stąd określenia zachowania układu i jego (in)deterministycznego charakteru.

Pierwszy element w tym schemacie (DD) wynika wprost z konstatacji, że wszystkie teorie fizyczne wykorzystują równania matematyczne, które razem z warunkami początkowymi i brzegowymi, opisują zachowanie modelowych układów (indywidualne trajektorie w przestrzeni stanów), stanowiących przedmiot zainteresowania tych teorii.

Drugi element (UE) jest ściśle związany z pierwszym. Jeśli weźmiemy np. układ, w którym (DD) wyrażony jest poprzez równania ruchu, to za każdym razem, wychodząc od zdefiniowanego stanu początkowego z zadanymi przez nas warunkami początkowymi i brzegowymi, jeśli układ wróci do tego samego stanu początkowego, będzie miał taką samą historię kolejnych przejść pomiędzy stanami. In-

nymi słowy, ewolucja układu będzie jednoznaczna i niepowtarzalna ze względu na konkretny wybór warunków początkowych i brzegowych.

Te dwa pierwsze elementy Laplace'owskiego obrazu odpowiadają grupie własności równań matematycznych (dobre postawienie i ciągłość równań, istnienie i jednoznaczność rozwiązań). Własności te są niezbędne, aby istniały jednoznaczne rozwiązania równań w fizyce matematycznej.

Trzeci element (VD) wynika z wiary Laplace'a, że nie istnieje nic, co uniemożliwiłoby matematycznego i fizycznego opisu układu z dowolną precyzją; stan początkowy można określić w sposób dokładny i stąd tak samo będzie określony każdy następny stan układu. Jak wiadomo, mechanika kwantowa i kwantowe fluktuacje przeczą temu twierdzeniu, niemniej jednak nie oznacza to wcale, że z tego względu żadna teoria nie może być deterministyczna — warto tu zasygnalizować problem wrażliwości (lub jej braku) na warunki początkowe i propagację błędów.

Ostatnim elementem tego obrazu jest (AP). *Prima facie* racjonalnym jest oczekiwanie, że jeśli trzy pierwsze elementy są prawdziwe, to (przynajmniej co do zasady) powinno być możliwe, wychodząc od danego stanu układu, przewidywanie dokładnego stanu układu w dowolnej chwili czasu, wcześniejszej i późniejszej. W obrazie Laplace'a, z trzech pierwszych elementów wynika jednoznacznie prawdziwość ostatniego. Co więcej, ponieważ definicja (AP) jest niezależna od jakichkolwiek odniesień do jakichkolwiek szczególnych chwil w czasie i nie odwołuje się do innych form, jak np. statystyczna przewidywalność, to pozwala przewidywać dokładny stan układu w *każdej* chwili. Dla Laplace'a istniały tylko praktyczne ograniczenia w nieograniczonej precyzji (DD), (UE) i (VD) i stąd w naszej możliwości przewidywania; nie istniały jego zdaniem, w zasadzie, ograniczenia w metodach fizyki klasycznej. Jak widać, dla Laplace'a (AP) było ontologiczną implikacją (DD), (UE) i (VD), mimo epistemologicznych odniesień. Rozwój teorii układów chaotycznych pokazał, że trzy pierwsze elementy są niezależne od (AP). Stone [1989] pokazał, że pomimo tego, iż te

trzy elementy obrazu Laplace'a są łącznie wystarczające dla determinizmu, to dla (AP) są niewystarczające. Swoją argumentację oparł on na konieczności pokonania, w celu umożliwienia przewidywań w fizyce klasycznej, efektów występowania i propagacji dwojakiego rodzaju błędów — źródłem pierwszych są ograniczenia w możliwościach pomiarów, a drugich, ograniczenia w możliwości precyzyjnej reprezentacji liczb niewymiernych. Związana z tymi błędami propagacja błędów może być a) zerowa, gdy błąd ma wartość stałą, b) liniowa, c) wielomianowa i d) wykładnicza. Najsilniejsza możliwa forma przewidywalności opisuje sytuację, w której dla błędu początkowego ϵ , niedokładność naszego przewidywania δ_{pred} jest zawsze mniejsza niż dowolnie mały błąd predykcji δ , tak że

$$(AP) \quad \forall t \exists \epsilon \forall \delta: \delta_{pred}(\epsilon, t) < \delta.$$

Ta forma przewidywalności jest spełniona dla propagacji błędów b)–d) tylko wtedy, gdy $\epsilon = 0$. Ponieważ zgodnie z obrazem Laplace'a, możliwa jest, w zasadzie, całkowita eliminacja błędów, to według Stone'a bardziej właściwą jest następująca zmodyfikowana definicja (AP):

$$(AP') \quad \forall \epsilon > 0 \exists \delta \forall t: \delta_{pred}(\epsilon, t) < \delta.$$

W przypadku niektórych układów chaotycznych, mamy jednak do czynienia z wykładniczą propagacją błędów i mimo, iż intuicja związana z obrazem Laplace'a mówi nam, że jeśli uda nam się zminimalizować wystarczająco błędy początkowe i w ten sposób zapewnić wystarczającą precyzję przewidywania z błędem δ mniejszym niż zadany, to — jak twierdzi Stone — nie istnieje w fizyce klasycznej procedura, przy pomocy której możemy dla początkowej wartości ϵ otrzymać $\delta_{pred}(\epsilon, t) < \delta$ dla *wszystkich* chwil dla układów chaotycznych.

Tak więc, ponieważ układy chaotyczne nie spełniają warunku (AP'), więc (DD), (UE) i (VD) wzięte razem nie implikują (AP'). Stąd determinizm i absolutna przewidywalność są separowalne.

Bishop [2003] pokazał, że nawet w przypadku liniowej i wielomianowej propagacji błędu w fizyce klasycznej, nie da się spełnić warunku (AP') dla dowolnej chwili w przyszłości lub przeszłości. W chwilach

odpowiednio odległych od aktualnej, błąd predykcji przekroczy założony δ , nawet dla układów niechaotycznych.

Można wszakże zdefiniować przewidywalność (AP_r) która dla danego czasu t_r i aktualnego stanu układu, pozwala z założoną dokładnością przewidywać stany układu w przedziale czasowym $(-t_r, t_r)$. Jeśli więc mamy zbiór modelowych równań, spełniających warunki (DD), (UE) i (VD), oszacowaną wartość błędów pomiarowych wartości początkowych i brzegowych oraz założoną, dopuszczalną precyzję predykcji, możemy obliczyć czas t_r dla którego $\delta_{pred}(\epsilon, t_r) < \delta$. Czas t_r , zwany czasem relaksacji, jest horyzontem predykcji, rządzonym przez dynamikę modelu i warunki nałożone na błędy i może być obliczony w ramach klasycznej fizyki. Stąd fizyka klasyczna implikuje istnienie ograniczonej definicji predykcji:

$$(P_r) \quad \forall t < t_r \exists \delta \exists \epsilon > 0: \delta_{pred}(\epsilon, t) < \delta.$$

Ta wersja predykcji może być zastosowana wraz z warunkami (DD), (UE) oraz (VD) do wyrażenia słabszej wersji obrazu Laplace’a, często w praktyce stosowanej przez nauki przyrodnicze.

Bishop [2003] zwraca uwagę na dwa ciekawe fakty dotyczące przewidywalności P_r , związane z dyskusją o relacji determinizmu i przewidywalności. Po pierwsze, jeśli układ, lub model jest P_r — przewidywalny, to jest deterministyczny. Jest tak, ponieważ t_r jest bezpośrednią konsekwencją warunków (DD), (UE) i (VD), stąd ten rodzaj predykcji ma charakter zarówno ontologiczny, jak też epistemologiczny. Równocześnie, P_r mówi nam o ograniczeniach, jakim podlegają układy deterministyczne i stąd nie może być użyte w sensie argumentu Poppera [1950], że z braku możliwości predykcji wynika wprost brak determinizmu układu. Po drugie, chociaż definicja AP_r jest w gruncie rzeczy pragmatyczna, to zakładając, że wiąże się ona z naszymi zainteresowaniami i możliwościami, odnośnie równań modelowych i nieredukowalnych błędów, jest ona wciąż w sposób formalny wyprowadzalna z naszych równań, w połączeniu z naszymi najlepszymi oszacowaniami błędów. Tak określony horyzont predykcji jest naturalnym wynikiem naszych obliczeń dla badanego układu. Skale czasowe, dla

których wzmocnienie błędów prowadzi do praktycznej bezużyteczności predykcji, mogą być, co oczywiste, znacznie dłuższe w przypadku niewykładniczej propagacji błędów, niż dla propagacji wykładniczej, ale odpowiedź na pytanie, kiedy amplifikacja błędów jest zbyt duża, aby uznać wyniki predykcji za wiarygodne, zależy zarówno od badanego układu, stosowanej teorii, praktycznych potrzeb związanych z predykcją i stąd ma bardziej praktyczny, niż teoretyczny charakter. Wynika stąd ważny wniosek — przewidywalność nie jest dwuwartościową własnością układu typu „wszystko lub nic”, lecz własnością stopniową, wielowartościową⁷.

Chociaż Stone skupił się w swojej pracy na układach chaotycznych, to dowolna szybkość amplifikacji błędów wystarcza, aby pokazać, że tylko ta słabsza forma predykcji, mianowicie P_r , jest spójna z determinizmem.

Przedstawione omówienie schematu determinizmu w ujęciu Laplace’a, pokazuje konieczność uwzględnienia (DD), (UE) i (VD) łącznie, jako warunków koniecznych i wystarczających, aby modele klasycznej fizyki punktowej były deterministyczne, a równocześnie sygnalizuje niezależność (wbrew poglądom Laplace’a) determinizmu od absolutnej przewidywalności — układ może być bowiem deterministyczny, a równocześnie jego ewolucja nieprzewidywalna.

Schemat zaproponowany przez Stone’a, pozwala (poprzez odpowiednie modyfikacje warunków (DD) i (VD)), w prosty sposób przejść od silnego ujęcia determinizmu Laplace’a, do jego słabszych wersji, bardziej adekwatnych w przypadku innych teorii fizycznych. Przykładowo odrzucenie warunku (VD) prowadzi do zmiany opisu i estyma-

⁷Wiąże się z tym dodatkowy problem, tzw. obliczalności i możliwości znajdowania dokładnych rozwiązań układów równań stosowanych w matematycznych modelach w fizyce (Szczegółowo problem ten omawia Earman [1986], w klasycznej już, przeglądowej pracy pt. *Primer on determinism*). Prowadzi to do ważkiego pytania, czy przy właściwych fizycznych i matematycznych założeniach, wszystkie modelowe równania w fizyce mają obliczalne rozwiązania. Jeśli obliczalność zawodzi dla dowolnej z tych teorii, oznacza to, że w takim przypadku (DD), (UE) i (VD) mogą być spełnione, a mimo wszystko jakakolwiek predykcja nie będzie możliwa, niezależnie od przyjętego horyzontu czasowego i precyzji estymacji błędów pomiarowych warunków początkowych i brzegowych.

cji wartości charakteryzujących stany z dyskretnych na przedziałowe. Może to być na przykład użyteczne w niektórych rodzajach modeli meteorologicznych, w których takie zmienne jak ciśnienie i temperatura są określane przedziałowo ze względu na ograniczenia pomiarowe i te określone przedziałowo stany układu, są następnie poddawane czasowej ewolucji z uwzględnieniem przedziałowej estymacji wartości dla stanów przyszłych. Przy takim, wciąż deterministycznym podejściu, epistemiczny opis przedziałowy, może być powiązany z znajdującym się głębiej ontycznym opisem charakteryzującym się stanami mikroskopowymi o wartościach dyskretnych (Atmanspacher, Kronz [1999]).

Innym przykładem jest mechanika statystyczna, w której odrzucając warunek (DD), możemy przejść do zastosowania gęstości prawdopodobieństwa w naszym przybliżonym, uśrednionym makroskopowym opisie, właściwym dla precyzji naszych obserwacji. Podobnie jak poprzednio, taki opis jest wciąż deterministyczny, a epistemiczny opis makroskopowy można powiązać z ontycznym opisem mikroskopowych stanów o wartościach dyskretnych. Możemy też spotkać przypadki, dla których ontyczny opis przy pomocy prawdopodobieństw, jest właściwy, jeśli leżące głębiej mikroskopowe stany o wartościach dyskretnych są niedefiniowalne. Jak widać możemy zdefiniować różne rodzaje determinizmów, dopasowane do teorii (modeli) fizycznych, opisujących układy inne niż punktowa mechanika Newtona.

W przeciwieństwie do dwóch wymienionych powyżej warunków, zmiana (UE) nie wydaje się implikować odpowiedniej zmiany notacji stanów układów. Przykładowo, niezależnie od tego czy wybierzemy notację wykorzystującą wielkości o wartościach dyskretnych, czy przedziałowych, co odpowiada zmianie warunku (VD), określenie identycznych warunków początkowych nie gwarantuje ewolucji do jednoznacznego, unikalnego stanu końcowego, ponieważ odwzorowanie pomiędzy stanami jest teraz typu jeden do wielu i determinizm już nie jest zachowany dla takich modeli. Możemy więc stwierdzić, że różne deterministyczne modele, właściwe dla różnych układów, posiadają wspólnie taką samą własność (UE), a różnią się warunkami

(DD) i (VD) tak dobranymi, aby można było w sposób właściwy dla danego układu opisać jego stany.

Podsumowując, można stwierdzić, że przedstawione w tej pracy koncepcje determinizmu, przyczynowości i przewidywalności, są powiązane ze sobą i równocześnie różnią się istotnie między sobą. Determinizm definiowany tutaj w podstawowym, klasycznym znaczeniu, jako — najogólniej biorąc — związki funkcjonalne między zdarzeniami, jest „najbardziej ontyczny” ze wszystkich trzech pojęć. Nie wymaga on wyróżnionego kierunku czasu, ani nie używa jakiegokolwiek epistemicznej koncepcji stanu. Przyczynowość wymaga określenia wyróżnionego kierunku czasu. W swej słabej i silnej wersji, może być odniesiona odpowiednio do koncepcji epistemicznych i ontycznych. Przewidywalność natomiast oparta na przeszłości (np. pamięci minionych zdarzeń) lub odtwarzanie historii oparte na przyszłości (antycypacja) są specyficznymi typami determinowalności, jako przeciwstawienie determinizmu, odnosząc się tylko do epistemicznych stanów i bazując na przedzałożeniu o łamaniu elementarnej deterministycznej symetrii względem czasu⁸.

⁸Elementarny, ontyczny determinizm dowolnego układu deterministycznego (włączając w to chaos deterministyczny) jest oparty na odwracalnych w czasie równaniach opisujących ewolucję jego stanu ontycznego. Jeżeli symetria w czasie zostanie złamana, dostajemy dwa odrębne typy ewolucji — jeden z nich odpowiada przyczynowości „następczej”, charakteryzowanej stwierdzeniem „przyczyna poprzedza skutek”. Drugi, przyczynowości „wstecznej”, jest zwykle w rozwiązaniach równań w teoriach fizycznych odrzucany. Wyraża on dziwne zjawisko czasowego poprzedzania przyczyny przez skutek, jako formy *causa finalis* przeciwstawionej *causa efficiens*. Warto jednak cały czas pamiętać, że nie ma żadnego powodu, aby *a priori* wybrać jeden z tych dwóch kierunków ewolucji stanu układu w czasie, kosztem drugiego. Takiego wyboru dokonuje się zwykle w oparciu o dodatkowe założenia, np. gdy rozpatrujemy przebieg procesów dyfuzyjnych w ciele stałym, dowolny atom spełnia równanie ruchu symetryczne względem czasu, ale uwzględnienie makroskopowego gradientu potencjału chemicznego, naprężeń, stężenia wakacji itp. powoduje, że wybieramy jeden z wyróżnionych kierunków czasu — ten który prowadzi do zmniejszania i w ostateczności wyrównania potencjału chemicznego w całym układzie. Wprowadzenie wyboru kierunku w czasie jako wyniku podejmowania decyzji wymaga przejścia od determinizmu w najbardziej ogólnym sensie, do przyczynowości. Wiąże się z tym epistemologiczne pojęcie przewidywalności i odtwarzania wstecz historii układu, jako

Przedstawiony powyżej schemat determinizmu w klasycznych teoriach fizycznych i jego analiza pokazuje, że zagadnienie to jest niezmiernie złożone i konieczne jest spojrzenie na ten problem równocześnie z perspektywy ontycznej i epistemologicznej. Jakakolwiek próba określenia czy dany model, teoria fizyczna, chemiczna czy z zakresu jakiegokolwiek innej dziedziny nauk szczegółowych (inżynierii materiałowej, biochemii, finansów, socjologii itp.) jest deterministyczna, wymaga sformułowania spójnego modelu determinizmu, właściwego dla danego typu układu (przemyślanego wyboru typu przestrzeni stanów, precyzyjnego zdefiniowania notacji stosowanej w opisie stanów układu, określenia rodzaju, wielkości błędów wartości początkowych i brzegowych modelu oraz sposobu ich propagacji, określenia dopuszczalnej precyzji predykcji). Dopiero gdy te warunki zostaną spełnione, można rozpocząć sensowną próbę odpowiedzi na pytanie, czy dany układ (w tak zdefiniowanych warunkach) jest deterministyczny, czy też nie. W przeciwnym wypadku analiza taka będzie miała w najlepszym razie niewielką wartość poznawczą.

LITERATURA

- Atmanspacher, H., [1994], "Is the Ontic/Epistemic Distinction Sufficient to Describe Quantum Systems Exhaustively?", [in:] *Symposium on the Foundations of Modern Physics 1994*, K. Laurikainen, C. Montonen and K. Sunnarborg (eds.), Gif-sur-Yvette: Editions Frontières, pp. 15–32.
- Atmanspacher, H., and Kronz, F. K., [1999], "Relative Onticity", [in:] *On Quanta, Mind and Matter: Hans Primas in Context*, H. Atmanspacher, A. Amann, and U. Müller-Herold (eds.), Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, pp. 273–294.

specyficznych form determinowalności (jako przeciwstawienie determinizmu.) Dla układów chaotycznych przewidywalność zawodzi, co nie oznacza, że układ nie jest deterministyczny w sensie tu przedstawionym. *Błędne przewidywanie nie falsyfikuje determinizmu, podobnie jak prawidłowe przewidywanie go nie potwierdza.*

- Bishop, R. C., [2002], “Deterministic and Indeterministic Descriptions”, [in:] *Between Chance and Choice*, A. Atmanspacher and R.C. Bishop (eds.), Thorverton: Imprint Academic, pp. 5–31.
- Bishop, R. C., [2003], “On Separating Predictability and Determinism”, *Erkenntnis* 58: 169–188.
- d’Espagnat, B., [1994], *Veiled Reality: An Analysis of Present-Day Quantum Mechanical Concepts*, Reading, MA: Addison-Wesley.
- Earman, J., [1986], *Primer on Determinism*, University of Western Ontario Series in the Philosophy of Science, Vol. 32, D. Reidel Publishing Company.
- Kellert, S.H., [1993], *In the Wake of Chaos*, University of Chicago Press.
- Laplace, P.S. de, [1812], *Essai philosophique sur les probabilités*.
- Maxwell, J.C., [1873], *Does the Progress of Physical Science Tend to Give Any Advantage to the Opinion of Necessity (or Determinism) over that of the Contingency of Events and the Freedom of the Will?*.
- Poincaré, H., [1903/1952], *Science et Methode*, Flammarion, Paris 1903; [tłum. ang.:] *Science and Method*, New York: Dover, p. 68 (1952).
- Popper, K., [1950], “Indeterminism in Quantum Physics and in Classical Physics”, *The British Journal for the Philosophy of Science* 1, 117–133.
- Primas, H., [1990], “Mathematical and Philosophical Questions in the Theory of Open and Macroscopic Quantum Systems”, [in:] *Sixty-Two Years of Uncertainty*, A. Miller (ed.), New York: Plenum, pp. 233–57.
- Primas H., [1994], “Endo- and Exotheories of Matter”, [in:] *Inside Versus Outside*, H. Atmanspacher and G. Dalenroot (eds.), Berlin: Springer-Verlag, pp. 163–93.

Scheibe, E., [1964/1973], *The Logical Analysis of Quantum Mechanics*, Oxford: Pergamon Press.

Stone, M.A., [1989], "Chaos, Prediction and Laplacean Determinism", *American Philosophical Quarterly* **26**, 123–31.

SUMMARY

LAPLACEAN DETERMINISM IN THE LIGHT OF PHYSICAL THEORIES OF CLASSICAL MECHANICS

There has been a long-standing debate in philosophical literature about the relationship of predictability and determinism. Some philosophers have claimed that determinism implies predictability; some have claimed the opposite and the others that there are no direct implication relations between these two concepts. According to the above, there are various notions of determinism and predictability at work in the philosophical literature. In contrast, in scientific tradition, the belief that any deterministic system is predictable has long history and is based on the power of the intuitions lying behind the concept of physical determinism, confirmed by many experiments. In this essay, I focus on the Laplacean vision for determinism and predictability (or more precisely on what I take to be such a vision). While many forms of predictability are inconsistent with this vision, I argue that a suitably modified notion of predictability, defined within a framework of model notion of physical determinism, is implied by the Laplacean concept of determinism and, after some modifications, by other modern theories in physics, chemistry and related sciences. It is also argued, that such modified concept of predictability is consistent with common practice of scientists, and any attempt to find out whether a given scientific theory is deterministic, should be accompanied by careful analysis and appropriate modification of constituent elements of model notion of determinism.