

Michał Tempczyk

Renesans mechaniki klasycznej

Rozwój nauki to jeden z podstawowych przedmiotów zainteresowania filozofii nauki. Od czasu wydania w 1962 roku książki T. Kuhna *Struktura rewolucji naukowych* [1968] ustalił się pogląd, że nauka nie rozwija się kumulatywnie, i że w zasadzie każda teoria jest w pewnym sensie umownym opisem zjawisk — dlatego o żadnej z nich nie można powiedzieć, że opisuje przynajmniej w przybliżeniu prawdziwą strukturę świata. Nieuniknionym losem wszystkich teorii jest historyczność i przemijanie. Podobnie jak teorie przeszłości okazały się przybliżone i na ich miejsce przyszły teorie nowe, które tworzą aktualny stan nauki, tak też w przyszłości podobny los czeka teorie aktualnie uznawane.

O rozwoju nauki, a nawet o tym, czy w ogóle można w nauce mówić o rozwoju, o przemianach dokonujących się w niej nieustannie, a zwłaszcza w okresach przełomowych, zwanych rewolucjami, napisano wiele. Celem tej pracy jest spojrzenie na te zagadnienia z punktu widzenia mechaniki klasycznej. Analiza przemian mechaniki klasycznej pokazała, do czego prowadzi rewolucja naukowa w dyscyplinie dojrzałej teoretycznie. W historii nauki dokonało się wiele rewolucji, w różnych dziedzinach nauk przyrodniczych. Już w XVIII wieku flogistonowa teoria spalania została zastąpiona przez teorię opisującą ten proces jako łączenie się ciał z tlenem. W XIX wieku przyszedł czas na zmianę poglądów dotyczących m.in. natury ciepła, własności światła.

Na początku obecnego stulecia wielkie rewolucje — relatywistyczna i kwantowa — radykalnie przekształciły poglądy dotyczące czasu, przestrzeni, przyczynowości, determinizmu itp. Rewolucje te zdetronizowały mechanikę klasyczną, która w klasycznej fizyce zajmowała centralną pozycję. Te dwie najważniejsze rewolucje najnowszej nauki posiadały cechy szczególne, różniące je od dawniejszych. Mówiąc najogólniej, dawne rewolucje można było interpretować jako zastąpienie teorii fałszywej przez

teorię prawdziwą, lub co najmniej bliższą prawdy. W konsekwencji dawało to obraz rozwoju nauki jako systematycznego wzrostu wiedzy, eliminowania poglądów błędnych i zbliżania się do prawdy.

W wypadku mechaniki sprawa nie przedstawia się tak prosto. Przez ponad dwieście lat była to teoria, która uchodziła za wzór ścisłości, prawdziwości i ogólności. Podporządkowała sobie niemal całą fizykę i stała się wzorcem oraz bazą dla innych nauk. Jej zwolennicy widzieli przyszłość nauki w redukowaniu wszystkich procesów do zjawisk mechanicznych. Program ten, zwany „mechanicyzmem”, miał na swym koncie wiele sukcesów; największym z nich była redukcja termodynamiki do fizyki statystycznej. Tym większym zaskoczeniem było pojawienie się teorii względności i fizyki kwantowej, które ukazały odmienne własności podstawowych zjawisk fizycznych i przybliżony charakter praw mechaniki, oraz określiły zakres, w którym jest ona wystarczająco dobrym opisem zjawisk. Obecnie przyjęło się uważać mechanikę za teorię przybliżoną w porównaniu z nowoczesnymi teoriami fizycznymi — stosowalną w granicach zjawisk makroskopowych, odbywających się przy małej szybkości uczestniczących w nich ciał.

Ta powszechna ocena nie jest jednak prawdziwa. Nieoczekiwanie bowiem nastąpił w mechanice okres gwałtownego rozwoju, w wyniku którego trzeba było dokonać wielu przewartościowań. To, co w wyniku tego powstało można ogólnie nazwać „teorią chaosu”. Teoria ta wyrosła z mechaniki i stanowi jej kontynuację. Powstała ona niedawno i szybko się rozwija. Nie wiadomo, do czego rozwój ten doprowadzi, lecz to, co uzyskano dotychczas, godne jest uwagi. Opiszemy tę «drugą młodość» mechaniki i na jej przykładzie zastanowimy się nad pewnymi ciekawymi cechami rozwoju nauki.

Dwie mechaniki — klasyczna i kwantowa

Głęboki kryzys fizyki na przełomie XIX i XX wieku i powstanie szczególnej teorii względności oraz mechaniki kwantowej radykalnie zmieniły zarówno naukowy obraz świata jak i obraz nauki i roli w niej mechaniki. Te rewolucyjne przemiany omówimy porównując mechanikę klasyczną i kwantową. Do fizyki relatywistycznej będziemy odwoływać się w małym stopniu, a to z dwóch przyczyn. Po pierwsze, teoria chaosu zmienia nasze poglądy na temat porządku, przyczynowości, przewidywalności, a o te sprawy chodziło, gdy powstawała mechanika kwantowa. Po drugie, szczególna teoria względności jest pod pewnymi ważnymi względami kontynuacją fizyki klasycznej, podczas gdy w wypadku fizyki kwantowej o kontynuacji takiej nie można mówić.

Zanalizujemy dokładniej trzy zagadnienia: przybliżony charakter praw mechaniki klasycznej, odmiennosć obrazów świata proponowanych przez obie teorie i niemoż-

ność pogodzenia klasycznego jednoznacznego determinizmu ze statystycznym charakterem funkcji falowej.

W wyniku obu rewolucji dokonanych w fizyce naszego stulecia, mechanika klasyczna — jak już wspomniano — z ideału ścisłości matematycznej i zgodności z doświadczeniem zmieniła się w teorię przybliżoną. Była to w historii nauki sytuacja zasadniczo nowa. Gdy na przykład udowodniono, że ciepło jest formą energii, to koncepcja ciepła musiała być uznana za fałszywą: uznano, że po prostu nie ma ciepła, tak jak nie ma flogistonu. Nowa teoria wykazała fałszywość starej — obie są sprzeczne ze sobą i nie mogą w żaden sposób współistnieć. Sytuacja mechaniki po rewolucji kwantowej była bardziej skomplikowana. Nie można było powiedzieć, że mechanika jest to teoria fałszywa, której nie wolno stosować. Gdyby tak nawet było, to trudno byłoby wyjaśnić, dlaczego ta fałszywa teoria przez dwieście lat odnosiła sukcesy i tak dokładnie przewidywała pewne zjawiska. Jej prawa i modele zawiodły w świecie atomowym, w którym procesy przebiegają w całkowicie inny sposób. Nie można jednak ostro rozgraniczyć zakresów stosowalności obu mechanik, bowiem wówczas opisywałyby one różne sfery zjawisk i byłyby nieporównywalne.

Fizycy opracowali więc metodę przechodzenia od kwantowego do klasycznego opisu procesów. Fizyka kwantowa związana jest ze zjawiskami niesłychanie subtelnymi o skali rzędu stałej Plancka h , równej $6,62 \cdot 10^{-27}$ erg·s. Zdziwiająca własność świata atomowego znikają, gdy dochodzi do procesów odbywających się w skali makroskopowej, charakterystycznej dla świata codziennego. Istnieje formalna metoda przekształcania wzorów mechaniki kwantowej, gdy można zaniedbać drobne przyczynki kwantowe, czyli gdy formalnie dokonuje się przejścia granicznego $h \rightarrow 0$. Można opisać tę sytuację jako stopniowe upraszczanie pełnego, kwantowego obrazu zjawisk, uzasadnione tym, że kwantowe poprawki stają się drobne i nieistotne, gdy dochodzimy do odpowiednio dużych układów. Przypomina to sytuację oddalania się od bardzo skomplikowanego i ciekawego obrazu, które prowadzi do zacierania szczegółów — spostrzeżone zostają tylko najogólniejsze całościowe struktury obrazu. Mechanika kwantowa dawałaby taki obraz z bliska, mechanika klasyczna — z daleka, a metoda przejścia klasycznego pozwalałaby określić, jak obraz dokładny przechodzi w przybliżony i jak daleko trzeba odejść, aby przestać widzieć określone drobne struktury. Zasadą korespondencji pomiędzy nową i starą teorią zajmowali się ze szczególną uwagą filozofowie polscy [Krajewski 1977; Krajewski, Mejbaum, Such (red.) 1974].

Takie naświetlenie wzajemnej relacji obu teorii nie daje mechanice klasycznej żadnych szans na odzyskanie utraconej pozycji. Gdy mamy teorie wzajemnie wykluczające się — jak na przykład falowa i korpuskularna teoria światła — to można mieć nadzieję, że nowe fakty doświadczalne i przebudowa pewnych modeli przywrócą do łask teorię obecnie przegrywającą. Trudno sobie wyobrazić, aby do tego doszło, gdy wiadomo, że stara teoria jest przybliżona i dokładnie określono granice jej stosowal-

ności. Teoria nowa jest silniejsza i dokładniejsza od niej. Wydaje się, że żadne adaptacje i nowe fakty doświadczalne nie mogą tu nic pomóc.

Relacja między mechaniką klasyczną a kwantową nie jest jednak tak prosta. Chodzi o to, że nie potrafimy sobie wyobrazić zjawisk kwantowych. Gdy fizycy próbują tworzyć poglądowe modele tego, co dzieje się w mikroświecie, to stale dochodzą do paradoksów. Twórcy mechaniki kwantowej długo zastanawiali się nad tym faktem i w końcu Bohr i Heisenberg doszli do wniosku, że świat atomowy jest niewyobrazalny, że wyobrażenia nasza jest uwięziona w makroświecie. Sformułowali oni pesymistyczną — tzw. kopenhaską — interpretację mechaniki kwantowej. Zgodnie z tą interpretacją wszelkie próby wyobrażenia sobie zjawisk kwantowych są skazane na niepowodzenie. Myśleć musimy w sposób klasyczny, chociaż nie oddaje to istoty zjawisk [Heisenberg 1965]. Teoria przybliżona jest dla nas jedynym źródłem intuicyjnych modeli. Fizycy wiele wysiłku włożyli w próby stworzenia poglądowych modeli mechaniki kwantowej. Nie dało to jednak pożądanych rezultatów. Trzeba było pogodzić się z paradoksami; zgodnie z najbardziej znanym — obiekty mikroświata posiadają jednocześnie własności falowe i korpuskularne.

Wielkim problemem fizyki kwantowej jest statystyczny charakter funkcji falowej. Ideałem poznania klasycznej nauki było jednoznaczne opisanie i przewidywanie zjawisk. Ideał ten był silnie ugruntowany w matematycznym formalizmie mechaniki i w sukcesach jednoznacznych przewidywań wielu zjawisk, na przykład astronomicznych. Wydawało się, że procesy w świecie przebiegają w jednoznaczny, zdeterminowany sposób, a zadaniem nauki jest w miarę dokładne opisanie tego przebiegu. Symbolicznym wyrazem tego ideału jest demon Laplace'a. Nikt nie sądził zapewne, że ideał ten jest praktycznie osiągalny i że uda się go zrealizować. Można było jednak dążyć do niego i nic nie stało na przeszkodzie coraz dokładniejszemu poznawaniu zjawisk.

Mechanika kwantowa położyła kres temu dążeniu. Stała Plancka okazała się nieprzekraczalną granicą dokładności podstawowych pomiarów. Nie jest to granica praktyczna lecz teoretyczna; jej istnienie i wielkość wynika z zasad samej teorii. Determinizm fizyki klasycznej okazał się złudzeniem, wynikającym z nieznamości teorii dokładnej. Ideał poznania coraz dokładniejszego okazał się teoretycznie fałszywy. Jeżeli mechanika kwantowa jest teorią bardziej podstawową niż mechanika klasyczna, to głęboką strukturą zjawisk rządzą prawa statystyczne.

Podsumujmy ten obraz stosunku mechaniki klasycznej i kwantowej. Mechanika klasyczna jest teorią przybliżoną, lecz nie możemy uwolnić się od dostarczanej przez nią wizji świata, bowiem procesy mikroświata nie są uchwytne dla naszej wyobraźni. Ideał jednoznacznego opisu zjawisk, stanowiący podstawę fizyki klasycznej, okazuje się fikcją teoretyczną. Próby przezwyciężenia tej sytuacji i powrotu do praw jednoznacznych lub pojęciowego opanowania praw mechaniki kwantowej, nie dały rezultatów. Sytuację tę przedstawia się zwykle następująco: mechanika klasyczna poniosła klęskę

na każdym poziomie teoretycznym: stała się teorią przybliżoną, zawiodły jej podstawowe pojęcia i ideał poznania. Pokażemy teraz, do jakich zmian w tym obrazie doprowadził w ostatnich dziesięcioleciach rozwój tej teorii.

Od porządku do chaosu

Przez prawie trzysta lat rozwoju mechaniki, podstawowe cechy jej opisu zjawisk nie ulegały zmianie. Najważniejszą z tych cech było to, że opis ów zmierzał do ujawnienia jednoznacznego i prostego porządku, panującego w sferze prostych procesów mechanicznych. Był to porządek ruchu planet, zderzających się kul bilardowych, ciał spadających pod wpływem siły ciężenia itd. Oczywiście zdawano sobie sprawę z tego, że większość zjawisk występujących w przyrodzie nie jest tak prosta, lecz spodziewano się, że pod ich złożonością kryją się proste zasady i elementarne procesy. Postęp nauki polegał, między innymi, na odkrywaniu tej prostoty, jak miało to miejsce w kinetycznej teorii gazów. Proste równania dynamiki Newtona miały prowadzić do regularnych rozwiązań w wypadkach niezbyt skomplikowanych układów. Komplikuąc te układy można było dojść do poznania coraz bardziej złożonych procesów i nic nie stało na przeszkodzie temu, aby ten proces poznania prowadzić bez granic. Złożoność i nieporządek wydawały się nieistotne. Najważniejsza była harmonia praw i najprostszych procesów.

Dzięki poznaniu porządku, panującego w sferze prostych układów mechanicznych, można było jednoznacznie opisać ich rozwój. Wprawdzie niewiele równań miało analityczne rozwiązania, lecz można było stosować metody przybliżone i coraz dokładniej przewidywać przyszłość. Tak więc determinizm i prostota wielu ważnych procesów stały się podstawą sukcesów klasycznej fizyki. Powstanie fizyki relatywistycznej i kwantowej nie tylko nie zmieniło tego obrazu, lecz nawet go utrwaliło, ponieważ determinizm mechaniki klasycznej został przeciwstawiony indeterminizmowi mechaniki kwantowej. Wprawdzie determinizm okazał się przybliżony, lecz było to ograniczenie pochodzące z zewnątrz. W samej mechanice wydawało się, że tak musi być i że przyszłość nie może już niczego zmienić. Tymczasem od dawna wielu fizyków i matematyków pracowało nad dziedziną, która zmusiła do odrzucenia tych poglądów na istotę ruchu mechanicznego. Badania te doprowadziły do powstania teorii chaosu.

Sprawa zaczęła się sto lat temu [Stewart 1989, 60]. W roku 1887 król Szwecji Oscar II wyznaczył nagrodę 2500 koron za odpowiedź na pytanie, czy układ planetarny jest stabilny. Jest to ważny problem teoretyczny. Wiadomo z obserwacji, że w krótkim okresie planety poruszają się po powtarzalnych orbitach, co zapewnia stałość warunków panujących na Ziemi. Jednak ciała Układu Słonecznego są stale pod wpływem drobnych sił zaburzających ich okresowy ruch, takich jak grawitacyjne wpływy innych planet, komety, meteoryty, globalne ruchy atmosfery niektórych planet itp. Zaburzenia

te nie zmieniają istotnie ruchu planet w okresach rzędu miliarda lat, lecz mogą one doprowadzić do całkowicie odmiennego stanu całego układu w dalekiej przyszłości. Na przykład planety mogą spadać na Słońce, łączyć się ze sobą w układy podwójne, zderzać się. Odległa przyszłość naszego układu planetarnego interesowała już Newtona, lecz w tym czasie nie było wiadomo, jak sformułować matematycznie i rozwiązać to zagadnienie.

Akademia Francuska ogłosiła konkurs, na który między innymi wpłynęła praca H. Poincarégo, dotycząca problemu trzech ciał. Jej autor nie wiedział, jak rozwiązać ten problem w sposób ogólny, lecz postanowił przyrzeć się ruchowi trzech ciał działających na siebie siłą ciężenia. Wiadomo, że dwa ciała tworzą okresowy układ, w którym ciała poruszają się po orbitach wokół wspólnego środka ciężkości. Tak wygląda między innymi ruch planet, badany z punktu widzenia ich oddziaływania ze Słońcem. Dla trzech ciał nie ma ogólnych analitycznych rozwiązań. Poincaré uprościł sobie jeszcze zadanie, zakładając, że dwa ciała mają duże masy, a trzecie jest tak drobne, że nie wpływa na ruch dwóch pozostałych, natomiast samo porusza się w ich wspólnym polu grawitacyjnym.

Wydawało się, że ten prosty układ, bardzo podobny do dobrze znanego układu dwóch ciał, powinien zachowywać się w regularny i prosty sposób. Tymczasem ku zdumieniu Poincarégo okazało się, że drobne ciało w chaotyczny sposób «miota się» pomiędzy swymi dwoma towarzyszami, a jego ruch nie może być opisany ani przewidziany w żaden sensowny sposób. Był to wynik zaskakujący, ponieważ dowodził, że prosty układ, opisany za pomocą prostych równań różniczkowych, wcale nie musi działać w prosty i przewidywalny sposób. Jest on wprawdzie zdeterminowany, lecz równania ruchu niewiele w tym wypadku dają. Można sobie łatwo wyobrazić, jak skomplikowany i nieprzewidywalny musi być ruch całego Układu Słonecznego, rozpatrywany odpowiednio szczegółowo.

Praca Poincarégo była napisana w 1892 roku. Od tego czasu powstała nowa dziedzina — teoria układów dynamicznych — badająca stabilność, przewidywalność i inne jakościowe cechy rozwiązań równań różniczkowych. Teoria ta pokazała, jak naiwne i nieuzasadnione są stereotypowe poglądy na temat regularności i zdeterminowania świata opisywanego przez klasyczną naukę, zwłaszcza mechanikę. Standardowe przykłady ruchu mechanicznego są wyjątkowo proste i stabilne. Kiedy jednak badamy wszystkie możliwe układy dynamiczne, to okazuje się, że układów o regularnym zachowaniu, które wydaje nam się typowe i podstawowe dla świata materii, jest niestęchanie mało; przeważają układy, których trajektorie są powikłane i trudne do opisanie. Wyobraźmy sobie, że mamy ogromny worek z wszystkimi możliwymi układami dynamicznymi i na chybił trafił wyciągamy z niego jakiś układ. Wówczas z prawdopodobieństwem bliskim jedności będzie to układ niestabilny.

Dzięki osiągnięciom Poincarégo i Liapunowa matematycy zrozumieli wagę stabilności rozwiązań równania różniczkowego. Rozwiązania te są stabilne, jeżeli zmieniając w nieznacznym sposób parametry opisujące rozwiązanie, otrzymamy rozwiązanie bardzo mało różniące się od pierwotnego. Intuicyjny, fizyczny sens stabilności jest jasny. Jeżeli na przykład strzelamy z karabinka do tarczy, to drobne zmiany położenia lufy w chwili wystrzału powodują drobne zmiany toru pocisku. Dla strzelca, kierowcy samochodowego i dla użytkowników wielu urządzeń, którymi trzeba kierować, stabilność jest własnością oczywistą, bez niej bowiem nie byłoby możliwe kontrolowanie ruchu tych układów. Podstawą sterowania jest proporcjonalność efektów do wywołujących je przyczyn. Również przewidywanie toru ciała jest możliwe tylko wtedy, gdy jest on stabilny. Stan każdego układu znamy z ograniczoną dokładnością. Nigdy nie udaje się wyeliminować wszystkich zakłóceń pomiaru i zmierzyć położenia oraz prędkości ciała idealnie dokładnie. Z tego powodu przewidywania ruchu są zawsze obarczone błędem. Dopóki błąd ten jest dosyć mały i wywołuje małe odstępstwa od przewidywanego toru, to przewidywanie jest skuteczne.

W układach niestabilnych sytuacja jest o wiele trudniejsza. Drobna zmiana parametrów wyjściowych powoduje ogromne zmiany torów. Przykładem takiego układu jest bilard. Jest to powierzchnia płaska, ograniczona pionowymi ściankami, od których odbijają się kule bilardowe, poruszające się praktycznie bez tarcia. Kula taka może ze stałą prędkością poruszać się po powierzchni, zmieniając tylko kierunek ruchu po odbiciu się od ścianki. Zbadajmy tory dwóch kul, które zaczynają ruch z jednego punktu, a kierunki ich ruchu różnią się o bardzo mały kąt, który mieści się w granicach błędu i nie jest zauważalny. Kule te odbijają się wedle zasady, zgodnie z którą kąt padania równa się kątowi odbicia. Łatwo można obliczyć, że różnica ich kierunków ruchu po każdym odbiciu staje się dwa razy większa. Po dziesięciu odbiciach jest ona już 1024 razy większa. W rezultacie tory początkowo prawie identyczne, zaczynają istotnie różnić się i po kilkunastu odbiciach trudno domyślić się, obserwując kule, że miały one kiedyś podobne tory. Trudno również w takiej sytuacji przewidywać tory w dłuższym okresie, ponieważ błędy pomiaru narastają lawinowo i trafność takich przewidywań jest bardzo niska.

Pamiętajmy, że mówimy tutaj o układach zdeterminowanych. To zdeterminowanie nie przeszkadza im zachowywać się w nieregularny, nieprzewidywalny i pozornie chaotyczny sposób. Matematycy udowodnili, że odpowiednio niestabilny układ może być z powodzeniem opisywany jako układ statystyczny. W fizyce statystycznej miarą statystycznego, niejednoznacznego charakteru układu jest jego entropia. W 1958 r. pojęcie „entropii” zostało również wprowadzone do teorii układów dynamicznych przez Kołmogorowa. Entropia w tym ujęciu służy za miarę niestabilności układu [Martin, England 1981]. Układ niestabilny zachowuje się jak układ statystyczny i nie jest to kwestią naszej niewiedzy ani niezdeterminowania jego ruchu. Obserwacja ruchu odpo-

wiednio nieregularnego po prostu nie pozwala na jednoznaczne stwierdzenie, czy jest on pozbawiony regularności i działa w sposób przypadkowy, czy też rządzące nim prawo jest za trudne do «odcyfrowania».

Wynik ten ma ogromne znaczenie dla relacji między mechaniką klasyczną a mechaniką kwantową, ponieważ — jak pamiętamy — podstawowa sprzeczność pomiędzy nimi jest wyznaczona przez determinizm klasyczny i indeterminizm kwantowy. Zanim przejdziemy do tych spraw, wspomnimy krótko o drugim najważniejszym rezultacie teorii chaosu. Na razie wiemy, że z porządku i jednoznaczności łatwo może «powstać» nieporządek i niejednoznaczność. Badania rozwiązań nieliniowych równań różniczkowych pokazały, że zachodzi również zależność odwrotna. Równań takich nie udaje się zwykle rozwiązać w sposób ścisły. Trzeba korzystać z metod przybliżonych i rozwiązań numerycznych. Rozwiązania te są zwykle bardzo nieregularne, i trudno na ich podstawie przewidzieć dalszy przebieg danego zjawiska. Uczeni jednak zainteresowali się długookresowym charakterem tych rozwiązań i odkryli oni wówczas zdumiewające zjawisko zwane „atraktorem”.

Każde równanie różniczkowe posiada rozwiązania w określonej przestrzeni parametrów, zwanej „przestrzenią fazową”. Rozwiązania te są liniami w tej przestrzeni. Na przykład równania ruchu punktu materialnego opisują ruch tego punktu w trójwymiarowej przestrzeni fizycznej. Aby dowiedzieć się, jaki będzie tor ciała, należy (i wystarczy) oprócz położenia tego ciała w zadanej chwili czasu znać również jego prędkość. Przestrzeń fazowa jest więc sześciowymiarową przestrzenią położenia i prędkości. Przez każdy punkt przestrzeni przechodzi tylko jedno rozwiązanie równań. Jednoznaczność ta wynika z determinizmu procesów mechanicznych. Dla zjawisk opisywanych równaniami nieliniowymi tory układów są zwykle niesłychanie nieregularne. Można jednak zamiast lokalnego kształtu torów badać ich długookresowe zachowanie się. Dla długich okresów czasu lokalny brak porządku może stać się niewidoczny, a może pojawić się niedostrzegana wcześniej regularność.

Rozumowanie takie okazało się w pewnych wypadkach uzasadnione. Kiedy zaczęto badać zachowanie się rozwiązań pewnych równań, to odkryto, że po okresie chaotycznego «miotania się» po przestrzeni fazowej pojawia się tendencja do skupiania się w pewnych obszarach przestrzeni fazowej. Obszary te jakby «przyciągały» rozwiązania do siebie, dlatego nazwano je „atraktorami” [Tabor 1989]. Zachodzi tu proces odwrotny do opisanego poprzednio stochastycznego zachowania się układów niestabilnych. W układach niestabilnych «z bliska» widzimy porządek i regularność, a «z daleka» ruch wygląda chaotycznie, natomiast rozwiązania równań nieliniowych posiadających atraktory są «z bliska» nadzwyczaj nieregularne, a rozpatrywane w długich okresach przejawiają porządek wynikający z istnienia atraktora. Można powiedzieć, że atraktory prowadzą do wyłaniania się porządku z chaosu lokalnych oddziaływań. I znowu mamy to samo zjawisko — przeplatanie się porządku i chaosu.

Która teoria ma rację?

Spójrzmy teraz — w świetle omówionych powyżej wyników teorii chaosu — na wzajemne powiązanie mechaniki klasycznej i kwantowej. Radykalna zmiana poglądów na temat istoty ruchu mechanicznego zwiększa szanse mechaniki klasycznej na powrót do łask. Przede wszystkim determinizm tej teorii nie jest sprzeczny ze statystycznym charakterem funkcji falowej. Wiemy obecnie, że opis odwołujący się do determinizmu i opis odwołujący się do przypadkowości mogą być różnymi, lecz równoważnymi sposobami opisu ruchu układów wysoce niestabilnych. Gdy układ jest niestabilny, to świadomość, że jest on w zasadzie zdeterminowany, niczego nam w praktyce nie daje. Teoria chaosu przewyższa zatem przeciwieństwo pojęciowe „determinizm” — „przypadkowość”.

Z punktu widzenia tradycyjnego sposobu myślenia matematyków i fizyków to połączenie obu pojęć, wykazanie ich związku, jest rewolucyjnym krokiem w rozwoju nauki. Dobrze wiadomo, jakim problemem były dla fizyków dziewiętnastego wieku prawa mechaniki statystycznej. Nie wiedzieli oni, jak pogodzić je z deterministycznym charakterem procesów mechanicznych, leżących u podłoża obserwowanych zjawisk termodynamicznych. W końcu sformułowano rozwiązanie polegające na rozdzieleniu zakresów obowiązywania obu rodzajów praw. Polegało ono na założeniu, że deterministyczna mechanika opisuje istotę zjawisk, natomiast prawa statystyczne są wyrazem naszej niewiedzy i uproszczonego opisu tego, co się dzieje w dużych zespołach podobnych cząstek. Rozwiązanie to wydawało się tak przekonujące, że stało się wzorcem dla tych, którzy — jak Einstein — nie mogli pogodzić się z przypadkowością zjawisk mikroświata. Okazało się jednak, że analogia z mechaniką statystyczną zawodzi w wypadku fizyki kwantowej. Teorie parametrów ukrytych nie odniosły sukcesu, a z punktu widzenia nierówności Bella są one nawet niezgodne z obserwacjami.

Dzięki rezultatom teorii chaosu problem przestaje być taki ważny, ponieważ własności statystyczne stały się jednymi z własności ruchu mechanicznego. Jest to dla tradycyjnie myślącego fizyka prawdziwa rewolucja i to w dodatku rewolucja, która dokonała się bez hałasu. Stare poglądy na temat istoty ruchu mechanicznego i jego podstawowych własności okazały się po prostu zbyt wąskie i rygorystyczne. [Tempczyk 1990 i 1991]. Wpływ teorii ergodycznej, którą traktujemy tutaj jako część teorii chaosu, na koncepcje prawdopodobieństwa był omawiany przez filozofów. Pojęcie „prawdopodobieństwa” nabiera charakteru dynamicznego. Dla układów, w których nie zachodzi rozpraszanie energii (opisywanych równaniami Hamiltona i dlatego nazywanych „hamiltonowskimi”) w przestrzeni fazowej istnieje wyróżniona miara objętości, która może być traktowana jak miara prawdopodobieństwa i gęstości odpowiednich układów dynamicznych [Earman 1986; Clark 1987]

Rzeczywiście rozwój nauki doprowadził także do zmiany poglądów na istotę procesów kwantowych. Ich statystyczny charakter podsuwał fizykom myśl, że może dałoby się opisać je jako pewną klasę ruchu Browna. Pomiedzy klasycznym ruchem Browna a mechaniką kwantową istnieją jednak podstawowe różnice, które dopiero ostatnio udało się przezwyciężyć, dzięki mechanice stochastycznej [Nelson 1985]. W dziedzinie tej udało się stworzyć stochastyczne modele zjawisk kwantowych: interferencji, spinu, stanów własnych itp. Badania te są stale prowadzone. Większość fizyków patrzy na te badania jako na nowe modele procesów opisywanych przez mechanikę kwantową, dla stworzenia jednolitego obrazu świata mają one jednak ogromne znaczenie. Dzięki takim pracom fizyka kwantowa przestaje być taka nieintuicyjna, jak opisywali ją jej twórcy, należący do szkoły kopenhaskiej. Wielką rolę odegrały tutaj rozwiązania nieliniowych równań różniczkowych, które pokazały, jak niezwykle mogą być konsekwencje nieliniowości. Warto przypomnieć, że Bohm, klasyk teorii parametrów ukrytych, twierdził dawno temu, że mechanika kwantowa jest teorią nieliniową i to właśnie stąd wynikają jej trudne do zrozumienia w sposób klasyczny własności [Bohm 1988].

Podsumujmy teraz, co daje teoria chaosu dla zrozumienia roli mechaniki klasycznej i jej stosunku do mechaniki kwantowej. Teoria ta doprowadziła mianowicie do istotnych zmian modelu ruchu mechanicznego. To, co dawniej uważano za sprzeczne z podstawowymi prawami mechaniki (przede wszystkim stochastyczność), stało się obecnie częścią mechanicznego opisu układów dynamicznych. Z kolei lepsze poznanie rozwiązań równań nieliniowych pozwoliło na wzbogacenie repertuaru zachowań układów fizycznych. To, co dawniej wydawało się niemożliwe do zrozumienia w poglądowy sposób, na przykład istnienie dyskretnych stanów stacjonarnych, w tej chwili należy do dobrze znanych zjawisk, zachodzących na poziomie makroskopowym. Z punktu widzenia teorii chaosu mechanika klasyczna badała wąską i nietypową klasę zjawisk wyjątkowo prostych — liniowych i stabilnych. Obecnie można opisać procesy o wiele bardziej skomplikowane, których własności nigdy byśmy nie poznali bez zastosowania komputerów. Procesy te są jednak opisane przez deterministyczne równania różniczkowe, należą więc do mechaniki. Posiadają one wiele własności, które do niedawna wiązano jedynie z nieintuicyjnym światem atomowym. Dzięki temu świat ten znacznie zbliżył się do makroświata.

Dawniej traktowano mechanikę klasyczną jako niedokładne przybliżenie mechaniki kwantowej. Teoria chaosu, która jest rozszerzeniem mechaniki klasycznej, odwraca ten stosunek. W odkrytym niedawno bogactwie nieliniowych i niestabilnych zjawisk mechanicznych, procesy kwantowe zaczynają być traktowane jako pewna dość prosta klasa tych zjawisk. W ten sposób fizyka kwantowa staje się pochodną fizyki klasycznej. Chaos można badać zarówno w układach klasycznych, jak i w kwantowych. Okazuje się jednak, że układy kwantowe są znacznie mniej chaotyczne od klasycznych. Wynika to z tego, że klasa stanów stacjonarnych jest w mikroświecie bardzo ograniczona. Na

przykład w atomie stany elektronów są skwantowane. Jeżeli atom porównamy do miniaturowego układu planetarnego, to układ planetarny jest dynamicznie znacznie bogatszy, są w nim bowiem dopuszczalne wszystkie orbity planet. W takim bogatszym układzie chaos ma większe możliwości niż w układzie, w którym orbit jest bardzo mało — jak w atomie [Gutzwiller 1990]. Chociaż więc atomy opisuje się za pomocą funkcji falowej, która ma charakter statystyczny, to prawdziwego chaosu w nich nie ma. Jest to rezultat nadzwyczaj ciekawy. Pokazuje on, że świat zdeterminowany i klasyczny może być bardziej nieregularny od kwantowego.

Na koniec chciałbym dorzucić kilka uwag na temat rozwoju nauki. To, co dzieje się w mechanice jest zaskakujące z punktu widzenia stereotypowych poglądów w tej kwestii. Mechanika klasyczna jest przykładem teorii, którą po ponad dwustu latach bujnego rozwoju uznano za dojrzałą i wyeksploatowaną. Nikt nie spodziewał się, że może w niej jeszcze zdarzyć się coś ciekawego i naprawdę nowego. Wydawało się, że mechanika kwantowa, najdokładniejsza i najbardziej uniwersalna teoria współczesnej fizyki, wyparła na zawsze swą poprzedniczkę, określając jej granice i zakres stosowności. Nikt nie uważa rozwoju fizyki za skończony, dlatego oczekiwano raczej, że powstaną teorie całkowicie nowe, niż że powróci najstarsza teoria nowożytnej nauki. Nie twierdzą oczywiście, że mechanika klasyczna rozwiąże wszystkie problemy fizyki. Jej nieoczekiwany rozkwit powinien być jednak ostrzeżeniem dla tych, którzy zbyt prosto wyobrażają sobie dzieje nauki. Sądzę, że należy przede wszystkim przemyśleć od nowa i znacznie złagodzić tezę o niewspółmierności teorii rozdzielonych rewolucją naukową. Powodowane przez rewolucje — rzekomo nieprzekraczalne — podziały, ulegają zatarciu i po latach przestają przeszkadzać w tworzeniu jednolitego obrazu zjawisk.

Literatura

Bohm, Dawid

1961 - *Przyczynowość i przypadek w fizyce współczesnej*, Warszawa, PWN.

1988 - *Ukryty porządek*, Warszawa, Pusty Obłok.

Clark, Peter

1987 - „Determinism and probability in physics”, *The Aristotelian Society Supplementary* Vol. LXI, 185-210.

Earman, John

1986 - *A Primer on Determinism*, Dordrecht, Reidel.

Gutzwiller, M.C.

1990 - *Chaos in Classical and Quantum Mechanics*, New York, Springer.

Heisenberg, Werner

1965 - *Fizyka i filozofia*, Warszawa, PWN.

- Krajewski, Władysław
1977 - *Correspondence Principle and the Growth of Science*, Dordrecht, Reidel.
- Krajewski, Władysław; Mejbaum, Waław; Such, Jan (red.)
1974 - *Zasada korenspondencji w fizyce a rozwój nauki*, Warszawa, PWN.
- Kuhn, Thomas
1968 - *Struktura rewolucji naukowych*, Warszawa, PWN.
- Martin, N.F.G.; England, J.W.
1981 - *Mathematical Theory of Entropy*, New York, Addison-Wesley.
- Nelson, E.
1985 - *Quantum Fluctuations*, Princeton, Princeton University Press.
- Stewart, Ian
1989 - *Does God Play Dice?*, London, Penguin Books.
- Tabor, Michael
1989 - *Chaos and Integrability in Nonlinear Dynamics*, New York, Wiley.
- Tempczyk, Michał
1990 - „Teoria chaosu — rewolucja przez ewolucję”, *Zagadnienia Naukoznawstwa*, t.XXVI, z.3, s.449-461.
1991 - „Random Dynamics and the Research Programme of Classical Mechanics”, *International Studies in the Philosophy of Science*, Vol. 5, No 3, s.227-239.