

POLEMIKI

Michał Tempczyk

Dwie koncepcje porządku

Jednym z najważniejszych kierunków rozwoju współczesnej nauki są badania zjawisk nieliniowych. W tej dziedzinie uzyskano w ostatnich dziesięcioleciach wiele ważnych i głębokich rezultatów, które, zdaniem wielu uczonych, doprowadziły do prawdziwej rewolucji w samej nauce i w tworzonym przez nią obrazie świata. Ponieważ proces tych przemian jeszcze trwa i daleki jest od zakończenia, nie można powiedzieć, jak będzie wyglądał kompletny obraz świata, w którym cechy materii związane ze zjawiskami nieliniowymi zajmą należne im centralne miejsce. Dotychczasowe wyniki doprowadziły już jednak do istotnych zmian pojęciowych, o których piszą zarówno uczeni, jak i filozofowie nauki. Omawia się przede wszystkim nowe podejście do kwestii stabilności, determinizmu, przewidywalności, powiązania praw jednoznacznych i statystycznych itp. Na te tematy napisano już wiele prac i książek [Tempczyk, 1990, 1991; Holt, 1993].

Celem niniejszego artykułu jest zwrócenie uwagi na sprawę, o której rzadziej się wspomina, a która także jest godna uwagi — mianowicie na zmiany pojęcia „porządku” spowodowane przez odkrycie i precyzyjne wyjaśnienie globalnego uporządkowania pewnych dobrze znanych procesów, których istotę zrozumiano dopiero dzięki

nowej dziedzinie badań. Chociaż uporządkowanie pojawiające się w złożonych i burzliwie przebiegających zjawiskach — takich, jak wiry na wodzie, trąby powietrzne, drgania własne pewnych układów — spotykamy w życiu codziennym i jesteśmy do niego przyzwyczajeni, nauka klasyczna, czyli w tym wypadku nauka badająca zjawiska liniowe, miała wielkie trudności z jego wyjaśnieniem. Tak naprawdę procesy te rozumiano dopiero niedawno i jest to jedno z najważniejszych osiągnięć nowej dziedziny nauki. Osiągnięcie to omówimy, zastanawiając się nad istotą pojęcia „porządku”.

Zacznijmy od najprostszych i najłatwiejszych do opisanego sytuacji uporządkowania. Polegają one na tym, że układ uporządkowany jest prosty w budowie i w działaniu. Takie układy są powszechnie stosowanymi przykładami działania praw fizyki. Należą do nich przede wszystkim układy mechaniczne zbudowane z kilku elementów, połączonych lub działających na siebie w prosty sposób. Dobrze znanym przykładem, który odegrał w historii fizyki ogromną rolę, jest układ planetarny. Składa się on ze Słońca, o masie znacznie przewyższającej masy planet, i kilku planet, których ruch jest w pierwszym przybliżeniu traktowany jako rezultat grawitacyjnego działania na nie samego Słońca. Siła ciężenia określana jest za pomocą prostego wzoru, a jej rezultatem jest ruch planet po elipsach, w których ognisku znajduje się Słońce. Powstaje w ten sposób układ, który jest symbolem «odwiecznej harmonii» świata, jego niezmienności i poznawczych możliwości nauki.

Sukcesy nauki nowożytnej wyływały między innymi z tego, że uczeni starali się dobrze zrozumieć i opisać te zjawiska, które mieściły się w ówczesnych granicach możliwości matematycznych. Gdy Newton formułował podstawy mechaniki i teorii grawitacji, możliwości te były niewielkie w porównaniu z tym, co potrafimy wyliczyć obecnie. Z tego powodu przedmiotem badań fizyków były procesy ograniczone na dwa sposoby. Po pierwsze, były to procesy zachodzące w prostych układach, takich jak układ planetarny. Po drugie, procesy te opisywano w sposób wyidealizowany, wysoce uproszczony, daleki od rzeczywistej złożoności tych zjawisk. I tak na przykład — w ruchu jednostajnie przyspieszonym, odbywającym się pod wpływem siły ciężenia, nie uwzględniano siły oporu powietrza działającej na spadające ciała, a w teorii układu planetarnego nie brano początkowo pod uwagę grawitacyjnego działania planet na planety sąsiednie. Tylko przy tych upraszczających, idealizujących założeniach można było otrzymywać dokładne matematycznie przewidywania i wzory na tory ciał. Prawie wszystkie przykłady układów mechanicznych podawane w podręcznikach, nawet uniwersyteckich, są właśnie przykładami tego rodzaju. Prowadzą one do przekonania o wielkiej dokładności przewidywań naukowych i ogromnych możliwościach poznawczych nauki, która potrafi przewidywać na tysiące lat zaćmienia Słońca i ruchy planet, oraz wysłać pojazdy kosmiczne po dokładnie przewidywanych torach. Autorzy tych książek rzadko wspominali o ograniczeniach tych przewidywań, co bierze się z panującego powszechnie przekonania, że ograniczenia te można przewycięzać stosując odpowiednie metody.

Metody te polegają głównie na stopniowym komplikowaniu badanych procesów i na uwzględnianiu coraz większej liczby czynników wpływających na ruch ciał. W teorii układu planetarnego pierwszy krok komplikacji polegał na uwzględnianiu w obliczeniach grawitacyjnego działania planet na swych najbliższych sąsiadów. Krok ten okazał się niezwykle udany, ponieważ dzięki niemu przewidziano teoretycznie położenie i zaobserwowano dwie ostatnie znane planety naszego układu. Istnienia Neptuna domyślano się po zaobserwowaniu odchylenia obserwowanego ruchu Urana od jego toru wyliczonego teoretycznie. Odchylenia te zinterpretowano jako skutek działania na tę planetę blisko położonej nieznannej planety, której tor i położenie zrekonstruowano na podstawie obserwowanych zakłóceń ruchu Urana. Był to wielki sukces nauki połowy ubiegłego stulecia. Przekonał on uczonych, że przyjęta przez nich strategia poznawania i wyjaśniania ruchu układów złożonych jest dobra. Wydawało się, że tak postępując, poznamy w przyszłości istotę wszystkich zjawisk.

Nie warto dalej rozwijać tego zagadnienia, ponieważ ten obraz harmonii świata jest nam dobrze znany. Istotą tej koncepcji porządku jest przekonanie, że polega ona na prostocie układów i na dokładnym kontrolowaniu wszystkich ważnych czynników. Podstawowym pojęciem fizyki tego okresu jest pojęcie „układu izolowanego”. Układ izolowany jest to układ, którego powiązania z otoczeniem zostały ograniczone w sposób naturalny lub sztuczny, i dzięki temu można w nim kontrolować i mierzyć wszystkie istotne parametry. Układem naturalnie wyizolowanym z otoczenia jest Układ Słoneczny i dlatego działa on w tak harmonijny, regularny sposób. Gdyby na układ ten często działały czynniki zaburzające, to prędko zostałby rozbity lub jego ruch doznałby poważnych zakłóceń. Aby sobie uświadomić ten fakt wystarczy pomyśleć, jak bardzo ludzie boją się zderzenia Ziemi z jakąś planetoidą lub dużą kometą. W skali astronomicznej byłoby to stosunkowo słabe zaburzenie ruchu naszej planety, ale nas mógłby spotkać los dinozaurów. W termodynamice klasycznej pojęcie „układu izolowanego” odgrywa podstawową rolę teoretyczną, ponieważ jej proste prawa opisują tylko układy izolowane.

Przejdźmy teraz do analizy koncepcji przeciwstawnej, w której porządek nie musi wcale wynikać z prostoty i dynamicznego ubóstwa układów. Omówiony powyżej ideał nauki, zaczynającej od najprostszycy sytuacji i stopniowo obejmującej swym zasięgiem coraz bogatsze procesy, nie wszystkim wydawał się pociągający i możliwy do zrealizowania. Przeczyły mu powszechnie znane fakty oraz pewne analizy teoretyczne. Gdy zrozumiano, jak małe są atomy, to natychmiast pojawiło się pytanie, czy będzie można dokładnie opisać procesy zachodzące na poziomie makroskopowym, skoro nawet mała porcja gazu zawiera 10^{24} atomów. Wątpliwości tego typu odegrały ważną rolę w rozwoju fizyki statystycznej, której twórcy doszli do przekonania, że w takich sytuacjach pozostaje uczonym jedynie niedokładny statystyczny opis badanych układów [Tempczyk, 1991]. Ważniejsze były jednak obserwacje powszechnie znanych zjawisk, w których pomimo ogromnej złożoności układów powstają wyraźne i stabilne formy uporządkowania całości. Były to dla uczonych zjawiska fascynujące, ponieważ z jednej

strony stopień ich złożoności znacznie przekraczał możliwości dokładnego opisu i zrozumienia całości w stary, mechaniczny sposób, a z drugiej strony ich całościowe uporządkowanie było wyraźne, proste i dosyć łatwe do opisania. Do tej dziedziny należą, oprócz dobrze znanych zjawisk zachodzących w przyrodzie nieożywionej (cyklony, wiry, fale uderzeniowe, pewne procesy chemiczne) procesy związane z układami żywymi. Z tego powodu w biologii zawsze istniał wyraźny sprzeciw wobec redukcjonistycznego programu jedności nauki.

Zastanówmy się obecnie, jaka była podstawowa cecha zjawisk, które będąc lokalnie bardzo złożone i pogmatwane — są jednocześnie proste i regularne na poziomie całości. Dla klasycznego redukcjonisty są to sprawy niezrozumiałe, ponieważ istoty porządku upatruje on w prostocie. Dla niego układ złożony z ogromnej liczby podobnych składników może być co najwyżej jednorodny i nieciekawym, taki jak gazy lub ciecze. Druga zasada termodynamiki głosi przecież, że każdy układ złożony, w którym uporządkowanie nie jest zewnętrznie sztucznie podtrzymywane przez środowisko, musi w końcu osiągnąć stan monotonnej jednorodności, zwany stanem śmierci cieplnej. Wizja takiej właśnie przyszłości Wszechświata straszyla ludzi ponad sto lat temu [Szumilewicz, 1961]. Gdy jednak wyjdziemy poza ten schemat myślenia, to rozwiązanie naszego problemu okaże się dosyć proste i naturalne. Trzeba po prostu przyjąć, że złożoność może być i często jest źródłem porządku. Jest to jednak porządek innego typu, oparty na odmiennych zasadach niż porządek mechaniczny. Chociaż idea powyższa wydaje się prosta i łatwa do zrozumienia na poziomie pojęciowym, to minęło wiele czasu i trzeba było wiele zrobić zarówno w naukach empirycznych, jak i w matematyce, aby dokładnie pojąć, jak porządek całości może wyłonić się z lokalnego nieporządku i złożoności. Historia dochodzenia do nowego sposobu rozumienia zjawisk złożonych — to w zasadzie historia teorii chaosu. Tutaj skupię się jedynie na kilku podstawowych punktach nowego obrazu zjawisk.

Pierwszą uderzającą własnością tego porządku jest to, że ma on dynamiczny charakter. Nie powstaje w układach statycznych, których składniki są powiązane w stały sposób. Nie zachodzi także w układach zamkniętych, ponieważ jeżeli nawet na początku zachodzą w nich silne oddziaływania, to z upływem czasu energia tych oddziaływań maleje i w końcu dochodzi do rozpadu istniejących struktur, zgodnego z drugą zasadą termodynamiki. W nowoczesnej termodynamice, badającej takie dynamiczne struktury, mówi się, że powstają one w stanach dalekich od równowagi. Stany takie muszą być podtrzymywane przez dopływ energii i uporządkowania z zewnątrz; inaczej zabraknie im energii i dynamika całości ulegnie spowolnieniu. Dynamiczne struktury całości istnieją więc w układach otwartych, silnie powiązanych z otoczeniem. Bez tego powiązania następuje ich rozpad [Haken, 1977].

Klasyczna termodynamika opisywała układy, w których elementy są powiązane ze sobą w luźny, jednorodny sposób. Matematycznie odpowiadało to liniowym układom równań. Gdy obecnie mowa o tych układach, to podkreśla się ich liniowy charakter. Układ zbudowany w ten sposób, że jego składniki są połączone liniowo, może być

opisany w prosty sposób i liczą się w nim tylko lokalne oddziaływania. Tak jest na przykład w gazach, w których lokalne zderzenia molekuł w żaden sposób nie zależą od szerszego otoczenia i z kolei same nie prowadzą do powstania żadnych ponadlokalnych struktur. Z tego powodu każde uporządkowanie gazu jest przypadkowe lub wymuszone z zewnątrz. Gaz jako całość nie jest w stanie wytworzyć żadnych stabilnych struktur. Jest to jego zaletą, gdy chcemy opisać go i «zrozumieć» własności, lecz w rezultacie otrzymuje się układy bardzo ubogie i monotonne. Fizycy najpierw zrozumieli takie układy, a dopiero znacznie później udało im się opisać procesy bogatsze, nieliniowe.

Najważniejsza różnica pomiędzy układem liniowym a nieliniowym polega na tym, że składniki tego pierwszego biernie dostosowują się do otoczenia, podczas gdy w drugim następuje wyraźne dostosowanie części do siebie. Różnicę tę opisujemy na prostym przykładzie wziętym z biologii. Wyobraźmy sobie łąkę, na której żyją pasikoniki. Niech w chwili rozpoczęcia badań ich liczba wynosi x_0 . Znając przeciętny okres dorastania pokolenia i współczynnik rozrodczości tych zwierząt, chcemy obliczyć, jaka będzie ich liczba po określonym czasie. W tym celu musimy poczynić pewne założenia na temat ilości pożywienia i stosunku poszczególnych osobników do sąsiadów. Najprostszy model tego procesu jest liniowy. Zakładamy w nim, że łąka jest duża, pożywienia jest w bród, a poszczególne pasikoniki nie przeszkadzają sobie, ani nie walczą ze sobą. Wtedy otrzymujemy model liniowy, w którym z każdym pokoleniem badanej populacji liczba osobników zmienia się w stałym stosunku, na przykład rośnie 1,5 raza. Po dwóch pokoleniach będzie ich $2,25x_0$, po trzech — $3,375x_0$ i tak dalej. Jest to wzrost dobrze znany jako procent składany (tak rosną nasze oszczędności w banku, gdy stopa procentowa jest stała). W ten sam sposób rozwija się grupa zwierząt, gdy nie ma w środowisku żadnych przeszkód, a jedynym ograniczeniem jest przeciętna liczebność potomstwa i śmiertelność.

Model ten ma jednak silne założenia upraszczające, które powodują, że jest on odpowiedni tylko w krótkich okresach czasu. Łatwo zauważyć, że nawet zwierzęta tak małe, jak pasikoniki, nie mogą nieograniczenie powiększać swej liczby, bowiem po pewnym czasie zaczną brakować jedzenia i miejsca na łące. Pojawia się wówczas ważne czynniki ograniczające tempo wzrostu ich liczby. Czynniki te będą zależały w nieliniowy sposób od liczebności populacji. Gdy, na przykład, badamy zwierzęta, które walczą ze sobą i zabijają się, to ilość tych walk jest proporcjonalna do częstości spotkań tych zwierząt, a ta z kolei zależy od kwadratu ich całkowitej liczby na danym terenie, czyli od gęstości. W równaniach opisujących zmiany populacji pojawi się więc czynnik hamujący, proporcjonalny do kwadratu zmiennej x . Różnice między modelem liniowym a modelami nieliniowymi są dobrze widoczne w dyskusjach dotyczących przeludnienia Ziemi. Pesymiści zakładają, że tempo wzrostu populacji będzie stałe i snują katastroficzne przewidywania, co stanie się, gdy będzie wszędzie tak tłoczno, jak w windzie w godzinach szczytu. Nie biorą oni pod uwagę czynników środowiskowych, których negatywny wpływ przejawia się w postaci głodu, epidemii, wojen, spadku

rozrodczości itp. Oczywiście, czynniki te nie zastąpią racjonalnych metod kontroli wzrostu liczby ludzi.

Dobrze wiadomo, że prawdziwych układów liniowych jest mało, a klasyczne przykłady ścisłych przewidywań ruchu dotyczą układów bardzo prostych lub wyidealizowanych. Uczni od dawna próbowali uporać się z zagadnieniami nieliniowymi, lecz szło im to bardzo opornie, przede wszystkim z powodu trudności matematycznych. Opracowano wiele metod przybliżonego rozwiązywania równań nieliniowych, ich skuteczność była jednak ograniczona, a uzyskiwane wyniki rzadko były zadowalające. Przełom nastąpił w ciągu ostatnich trzydziestu lat, w znacznym stopniu dzięki zastosowaniu komputerów. Opiszemy go, koncentrując uwagę na dwóch obiektach: solitonach i atraktorach.

Solitony pojawiły się, gdy matematykom udało się dokładnie rozwiązać pewne nieliniowe równania różniczkowe [Sym, 1980]. Chociaż nie ma ogólnych metod rozwiązywania takich równań, przede wszystkim dlatego, że większość z nich nie ma rozwiązań analitycznych, matematycy powoli, drogą prób i błędów, odkrywali rozwiązania poszczególnych równań. Jednym z nich było równanie Kortewega - de Vriesa, sformułowane w roku 1895. Jest to równanie na funkcję $u(x,t)$ położenia x i czasu t , i ma ono postać:

$$u_t + 12uu_x + u_{xxx} = 0$$

Indeksy t i x przy funkcji u oznaczają różniczkowanie po danej zmiennej. Nieliniowy człon tego równania jest prosty, jest to bowiem iloczyn funkcji przez jej pochodną po czasie; wystarczył on jednak, by skomplikować obliczenia. Z tego powodu dopiero w 1958 roku udało się znaleźć ściśle rozwiązanie tego równania postaci:

$$u(x, t) = \frac{1}{4}k^2 \cosh^{-2}\left[\frac{k}{2}(x - k^2t - x_0)\right]$$

Czytelnikowi nie znającemu dobrze matematyki powyższy wzór nic nie mówi, wypisuję go jednak, ponieważ obie zmienne x i t występują w nim w prostej kombinacji $x - k^2t$. Z tego powodu rozwiązanie opisuje falę o kształcie \cosh^{-2} , poruszającą się wzdłuż osi x z prędkością k^2 . Najważniejsze jest to, że fala ta, dzięki nieliniowemu oddziaływaniu nie zmienia swego kształtu. Początkowo rozwiązanie to nazywano „samotną falą” (*solitary wave*), a od 1965 roku przyjęła się nazwa „soliton”, zaproponowana przez Zabusky’ego i Kruskala. Dalsze badania pokazały, że nawet gdy rozwiązanie opisuje dwie fale, poruszające się w przeciwnych kierunkach i działające na siebie, to i tak nie zmieniają one kształtów pod wpływem wzajemnego oddziaływania, czyli zachowują się jak sztywne ciała fizyczne.

Dla naukowców pracujących w wielu dziedzinach takie rozwiązania były bardzo przydatne, ponieważ często obserwują oni procesy nie zmieniające swego kształtu w działającym na nie środowisku. Są to dynamiczne procesy nieliniowe, obserwowane w wodzie, w plazmie, w ciałach stałych, których dawniej nie można było ani dokładnie zrozumieć, ani wyjaśnić ich trwałości. Dzięki solitonom naukowcy otrzymali matematyczne narzędzia opisu takich zjawisk. Są to zjawiska jakościowo odmienne od tych, w

których porządek wynika z lokalnych sił łączących części układów, jak to ma miejsce w kryształach. Solitony stały się modne i potrzebne, dlatego wiedza o nich szybko rosła. Obecnie jest to obszerna dziedzina badań matematycznych i empirycznych. Opisuje ona własności zjawisk, wynikające z ich nieliniowości, czyli dopasowania części do sąsiadów. Bez nieliniowości nie może powstać i rozwijać się stabilny porządek globalny. Porządek ten ma swoje źródło w bogactwie i złożoności dynamiki lokalnych oddziaływań.

Podobnie przedstawia się sprawa z atraktorami. Pierwszy atraktor był odkryty przez Lorenza w 1963 roku, a dopiero dziesięć lat później stał się znany i modny [Stewart, 1994, rozdz.7]. Lorenz badał przybliżone komputerowe rozwiązania trzech nieliniowych równań różniczkowych, opisujących uproszczone zjawiska atmosferyczne. Najpierw przekonał się, że rozwiązywanie tych równań jest szalenie trudne, a uzyskana w ten sposób informacja jest mało pewna, ponieważ drobna zmiana początkowych wartości trzech badanych parametrów prowadzi do ogromnych zmian w kształcie i przebiegu rozwiązań. Był to rezultat bardzo zniechęcający. Lorenz nazwał go „efektem motyla” i doszedł do wniosku, że przewidywanie pogody na więcej niż kilka dni jest praktycznie niemożliwe. Nie poprzestał jednak na tym, lecz postanowił zbadać, jak pogoda, opisywana przez jego równania, będzie zachowywać się w długich okresach czasu. Ku jego zdumieniu okazało się, że rozwiązania równań, rozpoczynające się od różnych wartości początkowych, po odpowiednio długim czasie skupiają się w małym obszarze przestrzeni parametrów i zachowują się w jednakowy sposób. Rozwiązania te przebiegają po liniach znajdujących się na dwóch listkach położonych blisko siebie, tworzących bardzo popularny obecnie obraz atraktora Lorenza. Wkrótce okazało się, że wiele układów równań nieliniowych ma atraktory.

Atraktory to swoista forma porządku, wynikającego z nieliniowości. Polega on na tym, że lokalnie ruch jest bardzo chaotyczny i trudny do opisanego, natomiast w odpowiednio dużej skali te drobne nierówności «wygładzają się» i na ich tle zaczyna pojawiać się porządek niedostrzegalny w masie szczegółów. Porządek ten nadaje całości kształt i nowe własności. Jest on odmienny od solitonów, które są dokładnymi rozwiązaniami, opisującymi dynamikę pojedynczych układów. Atraktory są uporządkowaniem w przestrzeni wszystkich lub znacznej części rozwiązań. Obserwując działanie jednego układu, nie dowiemy się o istnieniu atraktora, ponieważ atraktor powstaje dzięki podobieństwu i skupianiu się wielu rozwiązań. Można to zrozumieć przez analogię z losem człowieka. Znając dokładnie życie jednego lub kilku ludzi, nie dowiemy się wiele o losie wszystkich ludzi, ponieważ nie potrafimy oddzielić cech jednostkowych od ogólnych. Dopiero zbadanie życia wielu ludzi i odkrycie w nim ogólnych regularności prowadzi do wiarygodnych wniosków na temat natury ludzkiej i praw, kierujących naszym życiem. Podobnie jest z atraktorami, porządkującymi przebieg skomplikowanych zjawisk przyrody. Porządkują one całe klasy procesów, w których powstaje całościowy porządek.

Dzięki matematycznym teoriom solitonów i atraktorów, empiryczne badania skomplikowanych procesów dynamicznych nabrały rozmachu i stały się tak ściśle, jak badania uporządkowanych układów prostych. Nowoczesny uczyony nie musi już dzielić układów złożonych na części i mozolnie rekonstruować ich własności na podstawie wiedzy o tych częściach. Może on bezpośrednio przystąpić do badania całości, stosując efektywne metody komputerowego porządkowania danych. Gdy atraktory stały się znane, tak właśnie postępowano w wielu dziedzinach badań, w których nie potrafiono wcześniej uporządkować bogatego materiału obserwacyjnego. Atraktory odkryto, na przykład, w danych na temat zachorowalności na dziecięce choroby zakaźne, takie jak ospa wietrzna i różyczka. Przebadano najpierw dane z okresu przed wprowadzeniem szczepień ochronnych, a następnie, po odkryciu atraktorów, przewidziano, jak choroby te zareagują na szczepienia. Przewidywania te porównano z odpowiednimi obserwacjami, otrzymując zadowalającą zgodność teorii z doświadczeniem [Stewart, 1994, s. 320]. Metoda oparta na atraktorach jest nowatorska pod istotnym względem: pomija ona opis danych zjawisk za pomocą formuł matematycznych. Porządkując dane dotyczące chorób zakaźnych nie posługiwano się żadnym modelem rozprzestrzeniania się tych chorób, a przewidywania oparto tylko na atraktorach wydobytych z obserwacji. Model matematyczny w tradycyjnym sensie okazał się niepotrzebny. W wypadku stosunkowo prostych układów nieliniowych można tworzyć takie modele oparte na równaniach, wydobywać z równań atraktory, a następnie porównywać je z atraktorami wykrytymi w danych obserwacyjnych. Tak postąpili fizycy badając kapanie wody z kranu i oba atraktory okazały się bardzo podobne [Stewart, 1994, s. 222].

Wiemy już teraz mniej więcej, jak wyglądają dwie koncepcje porządku, pod wieloma względami sobie przeciwstawne. Jeden porządek, charakterystyczny dla tradycyjnej nauki i najlepiej opracowany w mechanice, opiera się na prostocie i niezmienności, które cechują układ planetarny, zegar, wahadło, wiele układów chemicznych i elektrycznych. Odmienne własności ma porządek pojawiający się w złożonych nieliniowych układach dynamicznych. W takich układach lokalne procesy przebiegają szybko i w sposób mało uporządkowany, w całym systemie ma miejsce wymiana masy i energii. Dzięki tym przepływom energii poszczególne części układu są silnie powiązane ze sobą, wpływają na siebie i dostosowują lokalne procesy oddziaływań do otoczenia. W rezultacie całość nabiera nowych własności, które chociaż wynikają ze zjawisk lokalnych, nie są do nich sprowadzalne, ponieważ decydujące znaczenie ma konfiguracja całości i aktywne powiązanie odległych obszarów.

Te dwa podejścia są często traktowane rozłącznie. Wybiera się jedno z nich w zależności od potrzeb, od własności zjawisk, które badamy. Z tego punktu widzenia uzupełniają się one i wzbogacają obraz świata. Istnieją jednak sytuacje, gdy nie wiadomo dobrze, jaki rodzaj porządku leży u podłoża pewnych zjawisk, lub gdy chcemy ustanowić porządek i nie wiemy, jaką strategię wybrać. Takimi wypadkami zajmujemy się obecnie. Zaczniemy od modeli ludzkiego myślenia.

Prawidłowości i reguły ludzkiego myślenia interesowały filozofów od samego początku. Świadczy o tym wielka rola logiki w filozofii greckiej i w średniowieczu. Dzięki wysiłkom wielu pokoleń filozofów coraz lepiej poznawano prawa logiki, a w ostatnim okresie do filozofów dołączyli się językoznawcy, którzy chcieli odkryć uniwersalne struktury stanowiące bazę umiejętności posługiwania się językiem. Największym osiągnięciem w tej dziedzinie jest teoria Chomsky'ego gramatyk uniwersalnych. Gramatyki te są interpretowane jako wrodzone wzorce gatunkowe konstrukcji wszystkich języków naturalnych. Człowiek ucząc się języka pod wpływem bodźców pochodzących ze społecznego środowiska, uruchamia schematy gramatyki generatywnej i konkretyzuje je, ustalając wartości pewnych podstawowych parametrów, dzięki czemu buduje jeden z możliwych języków. Ogólny schemat gramatyki wyraża ograniczenia i reguły konstrukcji, wspólne dla wszystkich języków ludzkich [Lyons, 1972].

Prawa logiki, gramatyka generatywna i inne uniwersalne reguły ludzkiego myślenia, których zakres stale wzrastał dzięki nieustannym badaniom logicznym i psychologicznym, pełnią rolę podobną do tej, jaką w mechanice odgrywały układy proste. Uczeni mieli nadzieję, że uda im się tą metodą objąć w przyszłości wszystkie dziedziny ludzkiego myślenia, tworząc coraz pełniejszy model tej sfery zjawisk. Najważniejszym założeniem tego programu badań było przekonanie, że myślenie polega na komponowaniu pewnych podstawowych wrodzonym elementom, takich jak spójniki klasycznego rachunku zdań. Również inne dziedziny działania ludzkiej świadomości, na przykład spostrzeganie zmysłowe i emocje, uważano za zbudowane w podobny sposób. Najpierw badano strukturę tych dziedzin, wyróżniając zmysły i podstawowe rodzaje bodźców przez zmysły rejestrowanych. Na przykład dla zmysłu smaku wykryto cztery podstawowe smaki — słony, słodki, kwaśny i gorzki — za pomocą których można zrekonstruować każdy smak odbierany przez ludzi.

Ponieważ te podstawowe składniki ludzkiego spostrzegania, poznawania i przeżywania uważano za uniwersalne i wrodzone, konsekwencją tego było poszukiwanie w mózgu odpowiednich struktur stanowiących neurofizjologiczną podstawę tych jednostek funkcjonalnych. Dzięki temu powstawały coraz dokładniejsze mapy mózgow ludzi i zwierząt, pokazujące, jakie obszary są odpowiedzialne za określone procesy. Uczeni jednocześnie opracowywali teorię struktury świadomości i poszukiwali w mózgu nośnika tej struktury. Takie modele opisywały człowieka i zwierzęta jako komputery o złożonej strukturze. Uważano, że struktura ta na najniższym poziomie jest sztywna i nie daje się zmodyfikować; można ją co najwyżej uszkodzić. Badanie sposobów działania uszkodzonych mózgow stanowi ważny nurt takiego podejścia nadawczego. W wypadku ludzi chodziło o uszkodzenia spowodowane przez choroby, wady wrodzone lub wypadki; u zwierząt odpowiednie uszkodzenia wywoływano celowo. Podobieństwo funkcjonowania mózgu do działania komputera stało się podstawą tworzenia komputerowych modeli pewnych aspektów procesów poznawczych i tak powstała dziedzina badań zwana „nauką o sztucznej inteligencji”, która jest intensywnie rozwijana i która korzysta z zaawansowanych metod nowoczesnej logiki [Penrose, 1989].

Podobnie jak w wypadku układów fizycznych i chemicznych, to podejście do funkcjonowania mózgu i świadomości ma ograniczenia, z których badacze zaczęli sobie coraz lepiej zdawać sprawę. Po pierwsze, trudno z prostych funkcji ułożyć skomplikowane metody myślenia czy poznawania świata. Po drugie, wiele ważnych funkcji mózgu nie ma jednoznacznej lokalizacji, ponieważ po uszkodzeniu danych partii mózgu ich rolę przejmują inne jego części. Ponadto w wielu wypadkach nasz układ nerwowy odbiera i analizuje informację w sposób globalny, zależny od sytuacji lub nastawienia. Poznano wiele faktów świadczących o tym, że redukcja wszystkich funkcji mózgu do funkcji podstawowych nie jest możliwa, lub co najmniej jest bardzo trudna. Rosła świadomość tego, że trzeba podchodzić do tych spraw w odmienny sposób. Najbardziej obiecujące podejście konkurencyjne oparte jest właśnie na teorii chaosu, zwłaszcza na atraktorach.

Uczni badający działanie układu nerwowego zebrali ogromny materiał obserwacyjny, pokazujący jak bogata i skomplikowana jest dynamika struktur nerwowych. Struktury te opisuje się za pomocą teorii sieci neuronowych, których podstawową własnością jest nieliniowość. Pojedyncze komórki nerwowe sprzęgają się w układy działające w specyficzny całościowy sposób. Układy nieliniowe — jak pamiętamy — nie są prostą sumą swych części, ponieważ w ich działaniu zaczynają odgrywać rolę swoiste sposoby zachowania, nieredukowalne do samych części i sposobu ich powiązania w całość. Całość nabiera dzięki temu nowych własności — i może ona realizować zadania, które są charakterystyczne tylko dla niej i nie mają swoich odpowiedników na poziomie pojedynczych komórek. Dzięki temu może dokonywać się selekcja i integracja informacji, zależna od wiedzy danego organizmu, jego nastawienia poznawczego, celów, nawykowych przyzwyczajień.

Skomplikowane sieci komórek nerwowych, pełniących w mózgu wiele ważnych funkcji, zwłaszcza poznawczych, można opisywać stosując język dynamiki nieliniowej [Wilson, 1974]. Układy takie bada się na dwóch najważniejszych poziomach: struktur neurofizjologicznych i funkcjonowania organizmu. Na poziomie neuronów stosuje się najczęściej badania elektroencefalograficzne, a więc zapisuje się zmiany potencjałów elektrycznych, zachodzące w poszczególnych partiach mózgu. Można w ten sposób, na przykład, «zobaczyć» reakcję kory węchowej na zapach [Horgan, 1994]. Uczni opracowali dokładne mapy poszczególnych funkcji mózgu — i wiedzą, gdzie odbywa się odbiór i porządkowanie informacji związanej ze zmysłami oraz jakie struktury mózgu kierują naszym poznaniem i emocjami. Struktury te działają w sposób globalny, tworząc skomplikowane wzorce dynamiczne oparte na występowaniu atraktorów. Język dynamiki nieliniowej coraz szerzej wkracza do dziedzin badających układ nerwowy.

„Chaos” nie jest w tych badaniach jedynie terminem teoretycznym. Coraz więcej wiadomo o chaotycznym działaniu układów żywych. Wielkim zaskoczeniem było dla uczonych odkrycie nieustannego chaotycznego ruchu gałki ocznej. Okazało się, że oko bez przerwy wykonuje nieuporządkowane ruchy, które nie tylko nie przeszkadzają w

widzeniu, lecz są do widzenia konieczne, bowiem oko sztucznie unieruchomione przez eksperymentatora prędko przestaje widzieć. Odkrycie to było sprzeczne z popularnym do niedawna modelem oka jako aparatu fotograficznego. Aparat jest urządzeniem statycznym, ponieważ nawet drobne poruszenie nim powoduje rozmycie zdjęcia. Dzięki odkryciu ruchów oka zrozumiano, że spostrzeganie przedmiotów nie jest biernym procesem rejestracji światła dochodzącego do oka, lecz aktywną selekcją informacji z bogatego procesu dynamicznego — za pomocą atraktorów powstałych w procesie uczenia się. Uczni próbują podobnie interpretować rolę pojęć w porządkowaniu i nadawaniu struktury danym zmysłowym [Nicolis, 1986].

Z innym przykładem zastosowania nowego pojęcia „porządku” mamy do czynienia w ekonomii. W tej dziedzinie obserwujemy gwałtowną zmianę koncepcji sposobów osiągania stanu równowagi gospodarczej. Otóż można wyróżnić dwie przeciwstawne koncepcje kierowania gospodarką, które dobrze pasują do opisanych powyżej dwóch pojęć „porządku”. Porządkowi mechanicznemu odpowiada doktryna centralnego planowego sterowania życiem gospodarczym, która była do niedawna oficjalną doktryną naszego regionu. Zgodnie z nią należy dokładnie zaplanować całą produkcję państwa i zgodnie z tym planem rozdzielić zadania pomiędzy określone jednostki gospodarcze. Wszystko powinno być przy tym dokładnie zaplanowane i zrównoważone. Jeżeli, na przykład, planuje się wydanie określonej liczby książek, to trzeba przewidzieć, ile papieru i farby drukarskiej powinien wytworzyć przemysł. Podobnie planowano zbiory w rolnictwie, liczbę wyrąbanych drzew, ilość wydobytego węgla, wyprodukowanej energii elektrycznej itp. Istniał, oczywiście, pewien margines bezpieczeństwa, bowiem nie wszystko można dokładnie przewidzieć na rok lub kilka lat naprzód, zwłaszcza w rolnictwie.

Ludzie kierujący gospodarką narodową w taki sposób byli przekonani, że jest to najlepsze rozwiązanie problemu stabilności i efektywności gospodarowania. W takiej gospodarce miało nie być marnotrawstwa związanego z nadmierną produkcją dóbr, miało nie być braków, wszystko miało odbywać się rytmicznie i planowo. Temu sposobowi gospodarowania przeciwstawiano konkurencyjną i mało uporządkowaną gospodarkę wolnorynkową. Podkreślano ujemne cechy tej gospodarki: nadmiar pewnych dóbr przy braku innych, olbrzymie koszty reklamy, walkę o byt, bankructwa, kryzysy, nieprzewidywalność popytu i podaży. Zwolennikom centralnego planowania wydawało się, że racjonalne uporządkowane wytwarzanie dóbr materialnych powinno dawać lepsze wyniki od chaotycznej skomplikowanej gospodarki rynkowej. Tymczasem, wbrew tym oczekiwaniom okazało się, że gospodarka rynkowa jest lepsza, bardziej stabilna i efektywna. Dzięki metodom i pojęciom teorii chaosu łatwo można wyjaśnić, dlaczego tak jest.

Gospodarka centralnie sterowana i dokładnie planowana jest przede wszystkim mało stabilna. Wystarczy, że w jednej jej gałęzi nastąpią nieprzewidziane zaburzenia, na przykład susza w rolnictwie, i ulega załamaniu cały misterny proces równoważenia podaży i popytu w powiązanych dziedzinach produkcji. Oszczędna gospodarka plano-

wa nie ma wolnych mocy produkcyjnych, dzięki którym można by szybko przeciwdziałać czynnikom zaburzającym. Nie ma w niej także sieci sprzężeń zwrotnych stabilizujących cały układ, ponieważ zgodnie z oficjalną doktryną, sprzężenia takie nie były potrzebne, skoro wszystko miało być z góry zaplanowane i przewidziane. Gospodarka planowa jest także mało efektywna. Pamiętamy dobrze przestoje w produkcji przemysłowej, spowodowane brakiem jakichś często drobnych części zamiennych. W dokładnie zaplanowanej maszynarii brak lub awaria drobnej części może spowodować straty nieproporcjonalnie duże w porównaniu z wartością przyczyny tych strat.

Ostatnią ważną wadą takiej gospodarki, o której wspomnimy, jest jej sztywność, brak elastyczności. Drobna zmiana pewnych wielkości charakteryzujących produkcję dóbr wymaga odpowiednich zmian we wszystkich dziedzinach z nimi związanych. Gdy pojawi się nowy rodzaj towaru lub usług, to trzeba dokonać odpowiednich zmian w znacznych obszarach planowania — oraz przygotować i zrealizować te zmiany. W wypadku nowych towarów pojawiających się na rynku, często związanych z modą, czas potrzebny na uruchomienie produkcji jest niezwykle długi; w tym czasie moda lub technologia mogą ulec zmianie i towar pojawia się na rynku, gdy jest już przestarzały lub niemodny.

Inaczej jest w gospodarce rynkowej, traktowanej jako przykład złożonego systemu o bogatej dynamice, w którym porządek pojawia się jako całościowy rezultat powiązanych ze sobą procesów lokalnych. Warto tutaj skupić uwagę na dwóch sprawach: na stabilności i sterowaniu. Stabilność uzyskuje się dzięki sieci sprzężeń między różnorodnymi działami, przedsiębiorstwami, regionami itp. Ponieważ nie ma sztywnych rozgraniczeń, planów, ograniczeń produkcji i inwestycji, poszczególne podmioty gospodarcze elastycznie reagują na aktualną sytuację gospodarczą. Jeżeli, na przykład, pojawi się możliwość dużego zysku wynikająca z produkcji nowego atrakcyjnego towaru lub wzrostu popytu towaru produkowanego od dawna, to wielu przedsiębiorców zaczyna inwestować i konkurować ze sobą, co prowadzi do sytuacji przypominającej sytuację na łące z dużą populacją pasikoników. Z matematycznego punktu widzenia sytuacja jest nieliniowa i dzięki temu w krótkim czasie powstaje stan równowagi i porządek. Przykładów tego typu znamy wiele, na przykład w dziedzinie komputerów, w której stale powstają nowe ulepszone produkty, na które jest ogromny popyt. Swoboda panująca na rynku nie znaczy wcale, że w gospodarce rynkowej nie ma ingerencji państwa. Istnieje wiele powodów, zmuszających państwo do kontroli rynku. Mają one charakter zarówno społeczny, jak i gospodarczy. Kierowanie rynkiem nie odbywa się jednak drogą szczegółowego określania, co należy wytwarzać i w jakiej ilości; odpowiednie organy państwa ustalają ogólne parametry gospodarcze, takie jak podatek, kontrolowane ceny na pewne produkty, dotacje, ulgi itp. Tego rodzaju czynniki wpływają na ekonomiczne warunki panujące w określonych dziedzinach, stymulując produkcję, zmieniając efektywność inwestycji, powodując odpływ lub dopływ kapitału. Wpływ tych globalnych parametrów można zrozumieć przy pomocy prostych modeli dynamiki nieliniowej. Jednym z najważniejszych wyników teorii chaosu jest diagram

Feigenbauma, który pokazuje, jak w pewnym przedziale parametru kontrolnego drobna jego zmiana może doprowadzić do poważnym zmian w dynamice całego układu. Zamiast jednostajnego zbliżania się do przyciągającego stabilnego stanu układu — otrzymuje się kilkuelementowy cykl, po którym dynamika całości oscyluje w okresach kilkuletnich [Stewart, 1994, s. 182]. Podobnie można za pomocą zmiany podatków i innych opłat, wpływać na zachowanie się rynku, a w pobliżu punktów niestabilności drobna zmiana istotnych czynników może doprowadzić do dużych zmian w gospodarce. Dla zrozumienia tych zjawisk konieczne jest wykorzystanie wyników teorii układów nieliniowych, ponieważ globalne efekty powstają dzięki nieliniowemu współdziałaniu i dopasowaniu poszczególnych składników gospodarki. W ten sposób nawet takie szkieletowe spojrzenie na dobrze znane układy, oparte na teorii nieliniowej, pozwala zrozumieć pewne ich ciekawe i istotne własności.

Zadaniem tych dwóch przykładów, z braku miejsca potraktowanych ogólnie i mało konkretnie, było pokazanie, jak bardzo nowa matematyka, wykrywająca globalne własności układów działających w sposób nieliniowy, pomaga uzupełnić to, co od dawna wiemy o świecie dzięki starej koncepcji porządku, opartej na teorii liniowej. Te dwa obrazy porządku uzupełniają się i — stosowane w odpowiedni sposób — dają bogaty obraz zjawisk zachodzących w przyrodzie i w społeczeństwie.

Literatura

- Haken, Herman, 1977: *Synergetics. An Introduction*, Berlin, Springer.
- Holt, D.Lynn and Holt, R.Glynn, 1993: „Regularity in Nonlinear Dynamical Systems”, *The British Journal for the Philosophy of Science*, vol.44, s.711-727.
- Horgan, John, 1994: „Czy nauka zdoła wyjaśnić zjawisko świadomości?”, *Świat Nauki*, nr 9, s.76-82.
- Lyons, John, 1972: *Chomsky*, Warszawa, Wiedza Powszechna.
- Nicolis, John S., 1986: „Chaotic dynamics applied to information processing”, *Reports on Progress in Physics*, vol. 49, s.1109-1196.
- Penrose, Roger, 1989: *Emperor's New Mind*, Oxford, Oxford University Press.
- Stewart, Ian, 1994: *Czy Bóg gra w kości?*, Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Sym, Antoni, 1980: „Solitony”, *Postępy Fizyki*, t. 31, s. 3-18.
- Szumilewicz, Irena, 1961: *Teoria śmierci cieplnej wszechświata*, Warszawa, PWN.
- Tempczyk, Michał, 1990: „Teoria chaosu — rewolucja przez ewolucję”, *Zagadnienia Naukoznawstwa*, t. XXVI, z. 3, s. 449-461.
- Tempczyk Michał, 1991: „Random dynamics and the research programme of classical mechanics”, *International Studies in the Philosophy of Science*, s. 227-239.
- Wilson, Hugh R., 1974: „Mathematical models of neural tissue”, [w:] H. Haken (red.), *Cooperative Phenomena*, Amsterdam, North Holland, s. 247-262.