

## POLEMIKI

Michał Tempczyk

### **Integracja wiedzy o myśleniu i mózgu**

Podstawą naszej dyskusji jest artykuł Bobryka [1993], w którym dowodzi on, że nigdy nie uda się nam dokonać zunifikowanego opisu ludzkiego myślenia i zachodzących w mózgu procesów fizjologicznych. Nie zgadzam się z tym stanowiskiem, nie czuję się jednak na siłach dyskutować z nim w sposób ogólny. Zamiast tego chciałbym omówić postęp naszej wiedzy o działaniu mózgu, jaki dokonał się w ciągu kilku ostatnich lat dzięki zastosowaniu w tej dziedzinie modeli i metod teorii chaosu, oraz wyciągnąć filozoficzne wnioski istotne dla zagadnienia integracji wiedzy. Zacznę od ogólnego scharakteryzowania głównych wyników teorii chaosu, odsyłając czytelnika zainteresowanego szczegółami do książek poświęconych tej teorii [Gleick 1987; Schuster 1993; Stewart 1994].

Teoria chaosu jest dynamicznie rozwijającą się dziedziną interdyscyplinarnych badań teoretycznych i empirycznych, dzięki którym uczeni zdobyli nowe, niezwykle skuteczne metody porządkowania zjawisk bardzo skomplikowanych, wobec których do niedawna byli bezsilni. Z bogactwa najważniejszych wyników tej teorii omówię tylko te, które są istotne dla naszego zadania — opisanie sposobów i rezultatów badań skomplikowanej dynamiki mózgu ludzkiego. Zagadnieniu temu uczeni poświęcili wiele

uwagi, ponieważ zrozumienie istoty działania mózgu i myślenia jest jednym z centralnych problemów współczesnej nauki.

Teorię chaosu określa się często jako dynamikę nieliniową, czyli teorię działania nieliniowych układów dynamicznych. Określenie to nie wyczerpuje, moim zdaniem, zakresu całej teorii chaosu, charakteryzuje ono jednak niewątpliwie jej najważniejszą część. Badanie układów nieliniowych jest zadaniem bardzo trudnym w porównaniu z badaniem układów liniowych. Imponujące osiągnięcia analizy matematycznej odnoszą się przede wszystkim do liniowych równań różniczkowych, które mają wiele własności ułatwiających ich rozwiązywanie i badanie. Monografie poświęcone równaniom różniczkowym omawiały do niedawna wyłącznie kilka podstawowych typów równań liniowych. Ogólna teoria tych równań nie dawała się przenieść na równania nieliniowe, o których sto lat temu powszechnie sądzono, że nie mają ścisłych rozwiązań analitycznych. Można bez wielkiej przesady powiedzieć, że matematycy nie potrafili sobie z nimi poradzić.

Była to dla matematyków sytuacja trudna i prowokująca do wysiłków, dzięki którym powoli zdobywano wiedzę o równaniach nieliniowych. Pierwszy krok polegał na tym, że udało się znaleźć ściśle ogólne rozwiązania niektórych spośród tych równań. Było to jednak zbyt mało dla rozwinięcia ogólnej wiedzy o procesach nieliniowych. Większość zjawisk w przyrodzie jest nieliniowa, dlatego dobrze znane równania liniowe znajdują zastosowanie wyłącznie jako uproszczone modele zjawisk naprawdę nieliniowych. Najważniejsza z przybliżonych metod rozwiązywania równań nieliniowych, zwana „rachunkiem zaburzeń”, polegała na tym, że najpierw upraszczano równanie nieliniowe do liniowego i rozwiązywano je, a następnie dodawano wyrazy nieliniowe, traktując je jako drobne zaburzenia modelowego rozwiązania liniowego. Postępując w ten sposób, uczeni dochodzili czasami do interesujących przybliżonych rozwiązań równań nieliniowych. Metoda ta miała jednak podstawową wadę; była mianowicie dobra tylko wtedy, gdy nieliniowość równania nie prowadziła do istotnie nowych własności rozwiązań. Tymczasem było dobrze wiadomo, że oddziaływania nieliniowe mogą prowadzić do całkowicie nowego sposobu działania całości.

Dopiero nowoczesne komputery stały się narzędziem w miarę dokładnego rozwiązywania równań nieliniowych. Dzięki nim uczeni odkryli dwa fakty, które poprzednio umykały ich uwadze — silną zależność rozwiązań od warunków początkowych i istnienie atraktorów. Sprawy te najlepiej omówić na przykładzie równań Lorenza, pierwszego znanego przypadku posiadającego te własności [Gleick 1987, rozdz.1].

W roku 1963 E. Lorenz, amerykański meteorolog, wypisał uproszczony układ trzech równań, opisujących ruch powietrza zachodzący pod wpływem podgrzewania powierzchni gruntu przez promienie słoneczne. Do rozwiązywania tych równań zastosował komputer i zaczął analizować wyliczone przez komputer tory układu w trójwymiarowej przestrzeni parametrów. Tory te okazały się niezwykle poplątane, a ich przebieg istotnie zależał od wyboru punktu początkowego. Drobna zmiana początkowych wartości parametrów prowadziła w krótkim czasie do dużych różnic między

torami. Zjawisko to, określane jako silna zależność rozwiązań od warunków początkowych, nazwał Lorenz „efektem motyla”. Nazwę tę wyjaśnia metafora motyla, który trzepocząc dzisiaj skrzydełkami w Tokio, może za miesiąc spowodować burzę w Nowym Jorku. Odkrycie silnej zależności od warunków początkowych było ciekawym wynikiem, jednak o wiele ważniejsza okazała się inna własność rozwiązań tych równań, odkryta także przez Lorenza.

Nie mogąc zorientować się w chaosie lokalnego nieuporządkowanego przebiegu rozwiązań układu równań, Lorenz postanowił zbadać, jak rozwiązania te wyglądają w długich okresach. Ku jego zdumieniu, wszystkie trajektorie zaczęły po odpowiednio długim czasie zakreślać regularne pętle na dwóch dwuwymiarowych fragmentach przestrzeni fazowej, przypominających motyle skrzydła lub listki. Każda trajektoria obiegała jeden listek, a potem w nieoczekiwanej chwili przeskakiwała na drugi, biegła po nim, znowu wracała na pierwszą powierzchnię i tak bez końca. Czas przeskoków był nieprzewidywalny i przypadkowy, natomiast kształt trajektorii był zadziwiająco regularny, co pozostawało w sprzeczności z lokalnym chaosem tych rozwiązań. Obraz ruchu wyglądał tak, jakby w przestrzeni fazowej istniał obszar przyciągający wszystkie rozwiązania. Rozwiązania te były w dalszym ciągu lokalnie «kapryśne» i nieprzewidywalne, istniał jednak całościowy porządek związany z tym wyjątkowym obszarem, który nazwano „atraktorem”.

Odkrycie atraktora Lorenza, a później wielu innych atraktorów występujących w przestrzeniach rozwiązań równań nieliniowych, spowodowało przełom w podejściu uczonych do zagadnienia uporządkowania danych. Przekonali się oni, że w masie pozornie chaotycznych danych może być ukryty globalny porządek, który można wykryć. Sprawa jest stosunkowo prosta, gdy mamy do czynienia z określonymi równaniami różniczkowymi, ponieważ wystarczy wówczas badać za pomocą komputerów rozwiązania tych równań, poszukując atraktorów. W równaniach różniczkowych występują zwykle pewne liczbowe parametry, opisujące fizyczne własności danego układu. Dla określonych liczbowych wielkości tych parametrów rozwiązania są regularne; dla innych są chaotyczne, lecz nie mają atraktorów; dla jeszcze innych występują atraktory. Wszystko to trzeba badać stosując komputery. Matematycy nie wiedzą, jak w ogólny sposób sprawdzić, czy dany układ równań posiada atraktory i dla jakich wielkości parametrów. Dla pewnych wyjątkowo prostych typów równań atraktory istnieją i można badać w sposób ścisły ich własności geometryczne.

Dalszy postęp polegał na opracowaniu metody poszukiwania atraktorów w danych liczbowych, bez znajomości odpowiednich równań opisujących dynamikę badanych układów [Stewart 1994, rozdz. 9]. Metoda ta stała się punktem wyjścia nowej analizy danych empirycznych znanych od dawna, często pochodzących z ubiegłego stulecia. Posługując się nią opracowano, na przykład, dane dotyczące dynamiki chorób zakaźnych, takich jak różyczka i ospa wietrzna, zgromadzone w USA i w Anglii jeszcze przed wprowadzeniem szczepień ochronnych. W danych tych znaleziono atraktory, dzięki którym można było przewidzieć, jak choroby te zareagują na szczepienia, a

następnie porównać te przewidywania z odpowiednimi danymi. Obecnie poszukiwania atraktorów prowadzi się w wielu dziedzinach, a ich istnienie jest źródłem porządku ukrytego «pod powierzchnią» lokalnych nieregularnych oddziaływań. Jest to porządek jakościowo odmienny od tego, który zauważano dawniej, dzięki obserwacjom prostych układów lub badaniom statystycznym.

Do dziedzin badań empirycznych, w których stosuje się modele i metody teorii chaosu, należą badania dynamiki układu nerwowego i mózgu. Badania te pomogły zrozumieć nowe aspekty fizjologii układu nerwowego. Okazało się, że posiada on wiele dynamicznych cech układów nieliniowych. Dawniej wyobrażano sobie mózg jako układ podobny do komputera. Układ taki ma odpowiednie obwody, realizujące określone funkcje, których bogata struktura powinna wystarczyć do zrozumienia wszystkich podstawowych własności spostrzegania zmysłowego i myślenia. Taki model mózgu pozwolił zrozumieć i opisać wiele aspektów myślenia, posiadał on jednak poważne ograniczenia, z których badacze stopniowo zaczęli zdawać sobie sprawę. Nie będę zajmował się krytyką takiego podejścia do świadomości, typowego dla badań nad «sztuczną inteligencją»; zamiast tego omówię krótko rezultaty wskazujące na to, że nieregularna, chaotyczna dynamika odgrywa w poznaniu niezastąpioną rolę. Tezę tę potwierdza bogaty i dobrze opracowany materiał empiryczny.

Zacznę od spostrzegania wzrokowego. Często zwraca się uwagę na podobieństwo oka i aparatu fotograficznego. Oko, podobnie jak aparat fotograficzny, ma soczewkę i mięśnie kontrolujące przepuszczaną ilość światła oraz ustawiające ostrość. Rolę błony fotograficznej pełnią zakończenia nerwowe znajdujące się na dnie oka. Podobieństwo budowy oka i aparatu fotograficznego stanowiło uzasadnienie dla użycia odpowiedniego modelu działania zmysłu wzroku. Wydawało się rzeczą oczywistą, że w trakcie patrzenia posługujemy się okiem jak aparatem fotograficznym. Zaskoczeniem było więc odkrycie chaotycznego ruchu oka i jego roli w procesie patrzenia. Okazało się, że patrząc na jakiś przedmiot wcale nie unieruchamiamy oka, jak to się czyni w trakcie robienia zdjęć. Jest wręcz przeciwnie, ponieważ oko cały czas wykonuje drobne chaotyczne ruchy, które nie tylko nie utrudniają widzenia, a są wręcz do widzenia konieczne. Oko unieruchomione w sposób sztuczny bardzo prędko przestaje widzieć. To ciekawe odkrycie zmusiło badaczy do zmiany koncepcji działania oka. Pomimo ogromnego podobieństwa do aparatu fotograficznego, oko selekcjonuje dochodzącą do niego informację w sposób całkowicie odmienny. Nie jest to statyczne, bierne odczytywanie obrazu zawartego w wiązce światła, lecz aktywna selekcja regularności z chaotycznie odbieranych danych. Wiadomo ponadto, że im szerszy zakres chaotycznych drobnych ruchów gałki ocznej, tym większa dokładność i moc rozdzielcza oka. Widzenie stałych struktur naszego otoczenia jest procesem uzależnionym od przypadkowego, nieregularnego rejestrowania światła. Przypomina to bardzo atraktory pojawiające się na globalnym poziomie dynamiki, która lokalnie jest nieuporządkowana.

Uczeni sformułowali i zbadali dotychczas wiele modeli działania pojedynczych komórek nerwowych i ich zespołów [Gierer 1974; Julesz 1974; Paseman 1993]. W

modelach tych wielką rolę odgrywają procesy nieliniowe. Prosty jednowymiarowy układ nieliniowy tym różni się od układu liniowego, że w jego dynamice mogą występować wyróżnione częstości drgań. Struna opisywana liniowym równaniem różniczkowym nie posiada takich częstości; może ona drgać z dowolną częstością, zależnie od warunków i siły działającej na nią. Gdy struna ta jest umocowana na końcach, to wysokość wydawanych przez nią tonów zależy jedynie od jej długości. Długość stacjonarnej fali musi być taka, by na całej strunie mieściła się całkowita liczba tych fal. Zmieniając długość struny, jak czyni to np. grający skrzypek, zmieniamy wysokość tonu. Jest to zjawisko dobrze znane i od dawna wyjaśnione.

Mniej znany jest fakt, że układ nieliniowy, w którym występują istotne powiązania części wpływające na ich ruch, może mieć pewne wyróżnione częstości. Dla układów dwu- lub więcej wymiarowych pojawiają się wyróżnione struktury wielowymiarowe, porządkujące działanie takich układów. Nieliniowe modele pojedynczych neuronów i ich zespołów, przewidują istnienie takich wyróżnionych rezonansowych częstości i bardziej złożonych struktur przestrzennych. Zadaniem badaczy stało się odkrycie takich struktur w doświadczeniach. Można to robić na materiale wypreparowanym z organizmów. Dobrze poznane są wyróżnione częstości drgań komórek serca, które interpretuje się jako dowód istnienia atraktora zwanego „cyklem granicznym” [Stewart 1994, s. 323]. W wypadku ludzkiego układu nerwowego istnieje możliwość badania tych zjawisk na dwóch poziomach — neurofizjologicznym i psychologicznym — wynikająca z tego, że ludzie mogą opisywać swoje przeżycia [Cowan, Ermentrout 1979].

Badania fizjologiczne polegają głównie na zapisywaniu EEG wybranych części mózgu śpiących ludzi i na opracowywaniu tych danych za pomocą metod teorii chaosu: poszukiwaniu atraktorów i na liczeniu ich wymiarów, wykładników Liapunowa i entropii. Takie badania można prowadzić również na mózgach zwierzęcych. Ludzie mają jednak samoświadomość i używają języka, co daje możliwość spojrzenia na procesy zachodzące w mózgu z nowego punktu widzenia. Naukowcy zaczęli zastanawiać się, czy nieliniowe struktury dynamiczne, pojawiające się w mózgu w efekcie jego funkcjonowania, mogą ujawniać się na poziomie świadomości — i skierowali swoją uwagę na pewne rodzaje halucynacji. W pewnych chorobach umysłowych oraz bezpośrednio po zażyciu narkotyków, pojawiają się u ludzi halucynacje, mające regularną strukturę geometryczną: prostokątne sieci, koncentryczne koła ze szprychami, przypominające sieci pajęczce, spirale itp. Te dobrze znane fakty zaczęto interpretować, stosując modele dynamiki nieliniowej, jako przejawy stabilnych struktur drgań własnych sieci nerwowych. Struktury te pojawiają się na poziomie świadomości wtedy, gdy kontakt z otoczeniem i dominacja w mózgu bodźców zewnętrznych, są osłabione przez chorobę lub narkotyki. To nowe ciekawe spojrzenie na fakty znane od dawna jest przykładem tego, w jaki sposób nowa teoria pozwala w odmienny sposób zinterpretować pewne znane zjawiska.

Uczeni nie poprzestali jednak na takiej nowej interpretacji danych znanych z obserwacji. Postanowili oni przeprowadzić eksperymenty, obrazujące dynamikę ludzkiej

aktywności fizycznej kierowanej przez świadomość. W tym celu kazali osobie badanej wykonywać w jednakowym tempie okrężne ruchy palcami wskazującymi obu rąk [Kelso, Schoner, Scholz and Haken 1987]. Ruchy te były dwojakiego rodzaju. Jedne, prostsze, polegały na tym, że ruchy obu rąk były zgodne, to znaczy, oba palce jednocześnie wznosiły się do góry lub opadały. Druga możliwość polegała na przesunięciu obu ruchów; gdy jeden palec wznosił się, to drugi w tym czasie opadał i na odwrót. Ruchy pierwszego rodzaju były łatwiejsze do wykonywania niż ruchy drugiego rodzaju.

Do obu rąk przyczepiono sieć czujników, za pomocą których dokładnie badano ruchy poszczególnych mięśni, korelacje ruchów mięśni jednej ręki i obu rąk, drobne zaburzenia tych ruchów, pomyłki, opóźnienia itp. Powstał dzięki temu bogaty dynamiczny obraz tego działania. Tempo ruchów, podawane osobie badanej przez słuchawki, było co pewien czas przyspieszane; ponadto do palców wysyłano od czasu do czasu drobne impulsy zaburzające. W ten sposób badano stabilność zadanego wzorca dynamicznego. Okazało się, że prostsza sekwencja ruchów jest stabilna, chociaż podlega drobnym zaburzeniom, które można było dokładnie mierzyć i analizować. Inny, o wiele bogatszy, był przebieg doświadczenia, gdy na początku badany wykonywał ruchy palcami przesunięte w fazie. Wzrost szybkości tych ruchów prowadził do pomyłek, początkowo kontrolowanych i eliminowanych dzięki wysiłkowi świadomości; przy dużej prędkości pomyłki te wymykały się jednak spod kontroli, następował okres silnych zaburzeń ruchu, a w końcu osoba badana wbrew swojej woli zaczynała wykonywać ruchy obu rąk zgodne w fazie. Następowła zmiana struktury ruchu.

Teoretyczny model tego doświadczenia wykracza poza układ z jednym atraktorem. Występują w nim dwa atraktory, których stabilność i siła przyciągania nie są jednakowe. Ruchy prostsze są stabilne, chociaż liczba pomyłek zależy od ich prędkości i zaburzeń; natomiast ruchy o przeciwnych fazach wymagają wzmożonej czujności, a w coraz trudniejszych warunkach badany przestaje nad nimi panować i po typowym okresie silnych fluktuacji ruchu i braku atraktora następuje uporządkowanie ruchu zgodne z atraktorem silniejszym i bardziej stabilnym. Tego rodzaju sytuacje, polegające na zmianie struktury uporządkowania układu, są w fizyce znane od dawna, a przejście od jednego uporządkowania do innego nazywane jest „przejściem fazowym”. Teoria przejść fazowych powstała w klasycznej termodynamice i jest bogatą, stale rozwijaną teorią. Znalazła ona zastosowanie w teorii chaosu, gdzie opisuje układy posiadające kilka atraktorów. Nieliniowe układy dynamiczne o kilku atraktorach zachowują się zgodnie z przewidywaniami tej teorii.

Podobną zgodność modelu teoretycznego i obserwowanego przebiegu zjawisk stwierdzono w omawianym doświadczeniu. Zaobserwowano i zmierzono w nim wszystkie fazy i własności dynamiczne przejścia fazowego. Nowością było to, że przebadano układ dynamiczny, w którym struktura jest zadana i kontrolowana przez świadomość. Zgodność wyników pomiarów z modelem teoretycznym jest potwierdzeniem tego, że na świadomość można patrzeć jak na standardowy układ dynamiczny. Jest to układ, w

którym świadome sterowanie i dynamika mięśni stanowią całość. Człowiek jest świadomy ogólnej struktury swoich działań, lecz fizyczne szczegóły ruchów jego mięśni wymykają się jego świadomości i kontroli. W konsekwencji ruchy ciała są uporządkowane w sposób typowy dla układów nieliniowych posiadających atraktory. Uporządkowanie to ma charakter globalny, natomiast na poziomie poszczególnych drobnych ruchów występują zaburzenia, nieregularności i pomyłki.

To nowe podejście teoretyczne do ludzkiego działania i funkcjonowania świadomości daje uczonym większe możliwości wyjaśniania, niż modele tradycyjne. Przede wszystkim jest to model bogatszy i bardziej elastyczny. Gdy na mózg patrzono jak na komputer o ustalonej sztywnej strukturze, dającej ściśle określone możliwości działania, to nie można było wyjaśnić zmian zachodzących w tej strukturze. W miarę rozwoju fizycznego i uczenia się, dana jednostka mogła wzbogacać repertuar swoich działań lub operacji umysłowych, natomiast nie powinny w niej zachodzić istotne zmiany jakościowe, prowadzące do pojawienia się struktur odmiennych od tego, co ujawniało się w przeszłości. Trudno było opisać i wyjaśnić, jak może zmieniać się działanie układu, który ma sztywną ustaloną budowę, zadaną genetycznie. Trzeba było zakładać, że w mózgu jakiś układ uległ rozstrojeniu i przebudowie. Trudno było połączyć to w spójny sposób z naszą wiedzą o budowie układu nerwowego, w którym połączenia między nerwami nie ulegają przerwaniu.

Teoria chaosu ujmuje funkcjonowanie świadomości bardziej elastycznie. Nasze odruchy, nawyki, schematy spostrzegania zmysłowego i myślenia nie są w niej traktowane jako sztywne wzorce funkcjonalne, ustalone raz na zawsze. Są to schematy porządkujące bogaty, zmienny proces dynamiczny, w którym nie ma żadnych absolutnych, niezmiennych elementów. Istnieje oczywiście hierarchia stabilności tych struktur, jedne są bardziej trwałe, uniwersalne i podstawowe od innych, lecz różnice te mają charakter ilościowy, a nie jakościowy. Wydaje się, że poznawcze perspektywy związane z zastosowaniem tej teorii w psychologii i fizjologii układu nerwowego są ogromne. Na razie uczeni badają przypadki stosunkowo proste, lecz coraz śmielej używają nowego języka do opisu zagadnień złożonych i trudnych. Naturalne jest interpretowanie systemów pojęć porządkujących nasze myślenie jako układów atraktorów, dzięki którym skomplikowany proces myślowego porządkowania świata nabiera określonej struktury. Chociaż takie podejście do myślenia wydaje się obiecujące, wymaga ono ogromnej pracy eksperymentalnej i teoretycznej, zanim doprowadzi do godnych zaufania rezultatów.

Powróćmy na koniec do centralnego zagadnienia integracji wiedzy. Sądzę, że wiele problemów związanych z nim wynika ze zbyt rygorystycznego traktowania warunków tej integracji. Wiedza zintegrowana nie musi być wcale jednolita. Ogólne teorie integrujące kilka dziedzin nie pozbawiają ich swoistości i odrębności. Historia nauki daje wiele przykładów sytuacji, w których integracja doprowadziła do bogatego, rozczłonkowanego obrazu zjawisk. Taką integrującą teorią jest w fizyce mechanika kwantowa. Stosuje się ją w teorii atomu, chemii kwantowej, teorii ciała stałego i jądra

atomowego i w wielu innych dziedzinach. W każdej z nich ogólne prawa kwantowe nabierają swoistej treści, oraz prowadzą do określonych konsekwencji. Na poziomie szczegółowych rozważań dziedziny te są odmienne, a łączy je ogólny schemat wyjaśniający mechaniki kwantowej.

W podobny sposób teoria chaosu integruje wiele dziedzin, które dawniej nie miały ze sobą nic wspólnego. Ujednocila ona język, sposoby opisu i porządkowania danych, proponuje podobne modele. Na omówionych powyżej przykładach starałem się pokazać, że dzięki niej powstaje jednolity obraz myślenia i funkcjonowania układu nerwowego. W obrazie tym człowiek potraktowany jest jako wieloaspektowy, skomplikowany układ dynamiczny, którego poszczególne poziomy i sposoby funkcjonowania są ze sobą powiązane. Nie znaczy to wcale, że nasze myślenie i świadomość tracą swoje wyjątkowe własności, lecz intencjonalność poznania nie wydaje mi się cechą uniemożliwiającą potraktowanie człowieka jak układu dynamicznego podobnego do innych układów występujących w przyrodzie.

### Literatura

Bobryk, Jerzy [1993], „Czy możliwa jest integracja wiedzy”, *Filozofia Nauki*, 1, s. 137-151.

Gierer, A. [1982], „Generation of Projections in the Developing and Regenerating Nervous System”, [w:] H. Haken (ed.), *Evolution of Order and Chaos in Physics, Chemistry and Biology*, Springer, Berlin.

Gleick, James [1987], *Chaos. Making a New Science*, Penguin Books, New York.

Julesz, Bela [1974], „Hierarchical Systems in Visual Perception”, [w:] H. Haken (ed.), *Cooperative Phenomena*, North Holland, Amsterdam.

Kelso, J.A.S., Schoner, G., Scholz, J.P., and Haken, H. [1987], „Phase-Locked Modes, Phase Transitions and Component Oscillators in Biological Motion”, *Physica Scripta*, 35, s. 79-87.

Paseman, Frank [1993], „Dynamics of a Single Model Neuron”, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 3, 271-78.

Schuster, H.G. [1993], *Chaos deterministyczny*, PWN, Warszawa.

Stewart, Ian [1994], *Czy Bóg gra w kości?*, PWN, Warszawa.