

Piotr Wrzeźniewski

Pojęcie złożoności w świetle teorii samoorganizujących się systemów

Intuicyjnie jasne — pojęcie prostoty okazuje się, przy próbie bardziej wnikliwej analizy znaczeniowej, wieloznaczne i nieostre. Zazwyczaj jednak z dwóch członów opozycji prostota-złożoność, wydaje się ono łatwiejszym do określenia. Próbując zdefiniować pojęcia tej pary, filozofowie koncentrowali się na ogół na analizie pojęcia prostoty. Wynikało to zapewne z dwu dodatkowych powodów. Po pierwsze, prostota struktury, czy też opisu była uważana za cechę pożądaną: średniowieczna «brzytwa Ockhama» funkcjonowała przez stulecia jako dyrektywa metodologiczno-heurystyczna. Po drugie, sądzono, zwykle bez deklarowania tego w postaci odrębnego postulat, że poprzez wyjaśnienie, na czym polega prostota, otrzyma się automatycznie, jako proste dopełnienie, odpowiedź na pytanie, czym jest złożoność.

Celem artykułu jest analiza pojęcia złożoności w kontekście powstałej w ostatniej dekadzie teorii samoorganizujących się systemów. Być może przeciwny kierunek analizy znaczeniowej — określenie tego, co złożone — pozwoli również na lepsze zrozumienie tego, co proste. Artykuł składa się z czterech części. W części pierwszej skrótowo przedstawiam proponowaną ideę spontanicznego wzrostu złożoności oraz zarzuty, które są przeciw niej podnoszone. Część druga poświęcona jest analizie warunków, które powinna spełniać zadowalająca definicja pojęcia złożoności. Część trzecia zestawia szereg możliwych dróg, które prowadzić mogą do sformułowania definicji omawianego pojęcia. Część czwarta wreszcie zawiera konkluzje oraz końcowe uwagi.

I

W ciągu ostatniej dekady ukazało się drukiem wiele prac, zarówno specjalistycznych, jak i popularnonaukowych, proklamujących nową rewolucję naukową, która zdaniem ich autorów aktualnie zachodzi (książki: Kauffmana *The Origins of Order, At*

Home in the Universe; Castiego *Complexification*; Coveneya i Highfielda *Frontiers of Complexity*; Mainzera *Thinking in Complexity* oraz Kampisa *Self-Modifying Systems in Biology and Cognitive Science* stanowią reprezentatywną próbkę obu rodzajów). Rewolucja ta ze względu na swą radykalność porównywana jest niejednokrotnie do rewolucji, którą przyniosła darwinowska teoria ewolucji, czasami zaś uznawana jest po prostu za drugi etap darwinizmu. Nowym postrewolucyjnym paradygmatem ma stać się ogólna teoria spontanicznego wzrostu złożoności.

Zwolennicy tej nowej unifikującej teorii lub — jak jest ona często nazywana — nowej interdyscyplinarnej dziedziny naukowej podkreślają, że przypadki samorzutnego wzrostu uporządkowania są bardzo powszechne w przyrodzie. Kropla wody przybiera kształt kulisty, płatek śniegu, powstały z mikroskopijnych kropelek szybko zamarzającej wody, posiada sześciokrotną symetrię, a jednokomórkowy zarodek przekształca się w wielokomórkowy organizm o bardzo wysokim stopniu złożoności. Uważają oni, że ogólna teoria złożoności stanowi uogólnienie darwinowskiej teorii ewolucji biologicznej na okres poprzedzający pojawienie się gatunków. Wedle ich poglądu, nowa uogólniona teoria zmian w przyrodzie uzupełnia darwinowski mechanizm ewolucji — selekcji naturalnej i przypadkowych mutacji — o równie istotny, a częściej występujący, mechanizm samoorganizacji. Obiekty materialne uważane są nie za mechanistyczne agregaty części przestrzennych, lecz za nieredukowalne do swych części, trwające w czasie indywidua-procesy.

Z dwóch względów trudno jest zestawić listę tez podzielanych przez wszystkich zwolenników nowego paradygmatu. Po pierwsze, nie formułują oni zazwyczaj podstawowych pozytywnych twierdzeń metodologicznych i filozoficznych, lecz ograniczają się do krytykowania pewnych cech klasycznej metodologii nauki. Po drugie, różnią się oni między sobą znacznie zarówno co do specyfiki poszczególnych zarzutów, jak i w ocenie ich wagi. Wydaje się jednak, że główne ich idee da się skrótkowo zestawić w następujących sześciu punktach:

(a) Odrzucenie stanowiska mikroredukcjonistycznego w sensie metodologicznym (postulat nowej metodologii).

Do wyjaśnienia zachowania systemu nie wystarcza analiza strukturalna — zidentyfikowanie części i ich wzajemnych powiązań. Całość to więcej niż suma części — stwierdzają, nie usiłując nawet często sprecyzować, czym owo «więcej» miałyby być. Próby «wyjaśnienia» często ograniczają się do cytatów rozmaitego typu autorytetów. Mówi się więc, że już Goethe w *Fauście* zauważył, że jest to «duchowe powiązanie (ogniwo)», które klasyczna nauka z góry eliminuje, zanim przystąpi do wyjaśniania jakiegokolwiek zjawiska. W tym kontekście cytuje się również stwierdzenie Piageta, że pojęcie struktury (systemu) zawiera w sobie trzy główne idee: ideę całości, ideę przekształcenia oraz ideę samoregulacji. Mniej metaforyczne wyjaśnienia odwołują się zwykle do przykładów ewoluujących systemów naturalnych lub komputerowo symulowanych, posiadających w chwili t_2 cechy zupełnie niespodziewane dla badacza, który dysponował w miarę kompletnym opisem systemu w chwili t_1 ($t_2 > t_1$), przy czym

system w chwili t_2 jest dużo bardziej zróżnicowany i w związku z tym, intuicyjnie biorąc, bardziej złożony. Przykładem mogą być różnego rodzaju programy komputerowe symulujące ewolucję biologiczną (np. program *Raya Tierra* — jeden z pierwszych w dziedzinie tzw «sztucznego życia»). Znajomość warunków początkowych i zadanych praw, według których przebiega ewolucja systemu, nie wystarcza do analitycznego obliczenia, a więc i do przewidzenia *a priori*, które z możliwych stanów zrealizują się w przyszłości. Zaskoczenie badacza przez proces ewolucji systemu nie da się zatem wytłumaczyć ignorancją — pominięciem w opisie systemu jakiejś istotnej charakterystyki — bo nie można wiedzieć nic więcej ponad to, co zostało zaprogramowane.

(b) Odrzucenie synchronicznego opisu strukturalnego i redukcjonizmu w sensie ontologicznym (postulat nowej ontologii).

Błędem jest widzenie świata jako składającego się ze statycznych obiektów. Świat nie «składa się» z prostych elementów, nie może być uważany za kolekcję zachowujących swą tożsamość, trwających w czasie obiektów materialnych. Świat jest wielością koegzystujących i powiązanych systemów. Reistyczny obraz świata musi zostać zastąpiony przez diachroniczny opis procesowy, uwzględniający ciągłą zmianę. Zapewnia to podejście systemowe, które jest w stanie zdać sprawę z sieci dynamicznych relacji, wiążących hierarchicznie zorganizowany system systemów. Oczywistym błędem jest stanowisko redukcjonizmu w sensie ontologicznym. Paradoksy fizyki cząstek elementarnych dokumentują to dobitnie. Nie można twierdzić, że leptony czy bariony «składają się» z kwarków, jeśli masy spoczynkowe postulowanych «części» przewyższają znacznie masy spoczynkowe «całości».

(c) Odrzucenie leżącego u podstaw klasycznej nauki założenia o możliwości sformułowania obiektywnego opisu zachodzących w świecie procesów (postulat nowej epistemologii).

Opis świata jest zależny w wielu sensach od ludzkiego obserwatora i procesu konstruowania wiedzy ludzkiej. Zależy on od przyjętej aparatury pojęciowej, od nieuniknionego zaburzania układu przez procedurę pomiarową, wreszcie od wyjątkowości specyficznie ludzkiej perspektywy, jaką udostępnił nam proces ewolucji. «Złożonościowcy» postulują konieczność uwzględnienia w nowej epistemologii nauki procesu uzyskiwania informacji przez obserwatora, mając nadzieję, że ich unifikujący paradygmat będzie w stanie rozwiązać również epistemologiczne trudności mechaniki kwantowej. Krytycyzm ten prowadzi do rezygnacji z poszukiwania absolutnie prawdziwego opisu, a zaleca — jako dyrektywę metodologiczną — zadowolenie się opisami przybliżonymi.

(d) Odrzucenie idealizującego mechanistycznego założenia, że proces ewolucji systemu da się matematycznie opisać przez liniowy układ równań różniczkowych (postulat nieliniowości).

Liniowy układ równań różniczkowych opisuje na przykład ruch falowy. Rozwiązania opisują tutaj fale różnego kształtu. Liniowość jest istotna, gdy zada się pytanie o zachowanie układu, w którym rozchodzą się dwie dowolne fale. Okazuje się, że układ

taki znajduje się w stanie ruchu falowego, przy czym amplitudy wypadkowej fali otrzymać można przez dodanie amplitud fal składowych. Analiza fourierowska pokazuje, że każdą funkcję okresową można przedstawić jako sumę (na ogół nieskończoną) ciągu fal sinusoidalnych. Dochodzi tu jeszcze raz do głosu intuicja redukcjonistyczna, okazuje się bowiem, że każdy okresowy proces fizyczny da się przedstawić jako agregat procesów elementarnych. Efektywne analityczne rozwiązanie takiego układu równań jest z rachunkowego punktu widzenia często niemożliwe, wiadomo jednak, że układ taki posiada rozwiązania. Niemożliwość odtworzenia historii i przewidzenia przyszłej ewolucji Wszechświata jest zatem ograniczeniem epistemologicznym. Złożonościowcy podkreślają z naciskiem, że założenie to jest fałszywe zarówno w wypadku organizmów żywych, jak i różnego rodzaju samoorganizujących się systemów chemicznych i fizycznych. Ewolucja takich układów w czasie jest procesem, którego nie można opisać przy pomocy układu równań liniowych. Zasada superpozycji nie jest więc spełniona. Okazuje się, że nawet stosunkowo proste systemy nieliniowe, o małej liczbie stopni swobody, mogą demonstrować zaskakująco bogaty i zróżnicowany repertuar zachowań. (Przykład prostego układu nieliniowego podaje [Davies 1988, s. 25-31]. Z filozoficznego punktu widzenia systemy nieliniowe pokazują, że utożsamiane często, zwłaszcza przez filozofów o pozytywistycznym nastawieniu, pojęcia układu niezdeteminowanego oraz układu, którego ewolucji nie można przewidzieć, dają się rozróżnić. Układ fizyczny opisywany przez równania nieliniowe jest ściśle deterministyczny, a mimo to jego ewolucji nie da się przewidzieć.

(e) Odrzucenie fizykalnego fundamentalizmu w opisie organizacji wiedzy naukowej (postulat antyfundamentalizmu w odniesieniu do struktury nauki).

Wiedza naukowa tworzy sieć powiązanych z sobą teorii, o różnym stopniu ogólności, opisujących różnego typu systemy. Możliwe są przy tym korektury każdej indywidualnie rozpatrywanej teorii. Warunek spójności logicznej powoduje, że zmiana dokonana w ramach pojedynczej teorii, modyfikuje poprzez szereg powiązań również pozostałe teorie, należące do aktualnego stanu nauki. Unifikacji nauki nie można zatem uzyskać przez redukcję wszystkich teorii naukowych do fizyki cząstek elementarnych, opisującej obiekty, które w ontologicznym sensie obecne są we wszystkich innych systemach. Unifikacja, jeśli możliwa, może być osiągnięta jedynie na poziomie meta-naukowym, poza obrębem którejkolwiek z dyscyplin odnoszących się do poszczególnych klas podsystemów współistniejących w świecie. Ogólna teoria systemów samoorganizujących się stwarza taką szansę.

(f) Odrzucenie dotychczasowego stosunku człowieka do przyrody (postulat skutecznego działania w świetle paradygmatu systemowego).

Złożonościowcy dostarczają tu teoretycznej podstawy ruchom ekologicznym. Systemowe myślenie podkreśla, że nie można osiągnąć zamierzonych zmian w systemie przez zmodyfikowanie jednego parametru, którego wartość, z tych czy innych względów, uznana jest za niepożądaną. Zazwyczaj, jeśli bodziec oddziałujący na system jest wystarczająco silny by doprowadzić do pożądanej zmiany, powoduje szereg nega-

tywnych, nieprzewidzianych skutków ubocznych, których ujemny efekt może być szkodliwszy niż osiągnięta względna poprawa. Przykładów tego typu sytuacji nie trzeba daleko szukać. Efekty działań ludzkich, zarówno w sferze ekonomicznej, jak i ekologicznej, dostarczają wielu takich przykładów. Chcąc działać skutecznie, należy najpierw zrozumieć złożoność systemu, a dopiero następnie, stosując stosunkowo słabe bodźce, nie ograniczające się wyłącznie do modyfikowania pojedynczego parametru, można modyfikować w pożądanym sposobie zachowanie systemu. Najprostszym fizycznym przypadkiem takiego podejścia jest zmiana zachowania układu drgającego poprzez oddziaływanie na system z częstością równą częstości jego drgań własnych.

Jak można się spodziewać, ogłoszenie zasadniczej zmiany w paradygmacie nauki spotkać się musi z różnorodną krytyką. Poprzestanę tu na wymienieniu trzech powtarzanych często argumentów.

Po pierwsze, w krytykach często pojawia się argument socjologiczno-lingwistyczny. Podkreśla on, że teorie systemów samoorganizujących się rozwijano mozolnie od wielu lat. «Złożonościowcy» wprowadzili jedynie do języka nauki nowe słowo, które jest dla szerszej publiczności intuicyjnie zrozumiałe, a przy tym nie jest jeszcze, w kontekście nauki, «zużyte» przez ciągłe powtarzanie. Laik może zatem ulec złudzeniu, że nowa ogólna teoria spontanicznego wzrostu złożoności pozwoli na lepsze, głębsze zrozumienie przyrody. Osiągnięcie takiego stanu na gruncie opinii publicznej umożliwia otrzymanie środków finansowych na badania naukowe — zarówno ze źródeł rządowych, jak i rozlicznych prywatnych fundacji. Proklamowanie «nowej rewolucji złożonościowej» jest zatem, wedle tych krytyków, raczej swego rodzaju chwytym reklamowym mającym na celu stworzenie przychylniej atmosfery wokół takich ośrodków jak np. Santa Fe Institute for Studies in the Sciences of Complexity, niż autentyczną zmianę paradygmatu w nauce.

Po drugie, inni krytycy formułują argument «historyczny». Wskazują mianowicie na fakt, że teoria spontanicznego wzrostu złożoności stanowi jedynie nowy głos włączający się do chóru tych, którzy — jak Goethe, Hegel, czy Whitehead — w ciągu ostatnich dwóch stuleci, utrzymywali, że całość jest czymś więcej niż sumą swych części. Krytycy ci [Horgan 1995] zestawiają całą listę teorii naukowych, sformułowanych w ciągu ostatnich 40 lat, które uznawane były za podobnie przełomowe i zapowiadały równie gruntowną reunifikację nauki, jak ta proponowana przez «złożonościowców». Lista ta obejmuje:

- (1) teorię systemów von Bertalanffy'ego;
- (2) cybernetykę Wienera;
- (3) teorię informacji Shanona i Weavera;
- (4) teorię katastrof Thoma;
- (5) synergetykę Hakena;
- (6) teorię chaosu Ruellego.

Teorie te, zdaniem krytyków, nie spełniły oczekiwań, jakie z nimi wiązano i jako programy badawcze nie cieszą się obecnie zainteresowaniem naukowców. Podobny los

spotka teorie spontanicznego wzrostu złożoności. W stosunkowo krótkim czasie przestanie ona budzić zainteresowanie i zostanie odsunięta na margines nauki.

Krytyczne rozważenie powyższych dwu argumentów wykracza poza ramy tego artykułu. Warto jednak nadmienić, że zwłaszcza drugi z powyższych zarzutów spotyka się ze zdecydowanym sprzeciwem zwolenników paradygmatu złożonościowego. Uczonych umieszczonych na powyższej «czarnej liście», wraz z niekontrowersyjnym obecnie Darwinem, zaliczają oni do grona swych duchowych poprzedników, podkreślając, że niezależnie od bezsprzecznych merytorycznych wartości proponowanych teorii, z historycznego punktu widzenia były one wyzwaniem dla dominującego w nauce XX-wiecznego paradygmatu redukcjonistycznego.

Argument trzeci krytyków nowego paradygmatu to zarzut, że pojęcie złożoności jest nieostre, wieloznaczne i pozbawione empirycznej treści, jako że nie ma metody, pozwalającej na choćby jakościowe oszacowanie stopnia złożoności systemu, jeśli już zrezygnuje się z jej mierzenia. Nie spełniające takich warunków pojęcia nie mogą być użyte do konceptualizacji empirycznej teorii naukowej. W konsekwencji następujące twierdzenie:

Złożoność świata (lub jakiegokolwiek innego samoorganizującego się systemu) wzrasta,

jest albo analitycznie prawdziwe, albo jest empirycznie weryfikowalne, lecz jego znaczenie redukuje się do truizmu:

Świat się zmienia.

Przed przystąpieniem do przeglądu podstawowych rodzajów określania pojęcia złożoności wypada zadać narzucające się pytanie: jeśli pojęcie złożoności jest rzeczywiście tak nieodzowne, to dlaczego nauki empiryczne obywaty się bez tego pojęcia tak długo i dlaczego dopiero obecnie, z końcem wieku XX-go, stara się ono zadomowić w nauce?

Odpowiadając na to pytanie, złożonościowcy wymieniają z reguły dwa powody:

- (a) stopniowe rozszerzanie zasięgu paradygmatu ewolucyjnego;
- (b) komputeryzacja badań naukowych.

Powód pierwszy — sięgający w fizyce do wieku XVIII, a w biologii do pierwszej połowy wieku XIX — to uświadomienie, że nie można osiągnąć postępu w żadnej z dyscyplin szczegółowych, pozostając wyłącznie na poziomie opisu synchronicznego. Teoria ewolucji w biologii jest powszechnie uważana za początek diachronicznej analizy w nauce. Sukces teorii Darwina przyczynił się do wprowadzenia podejścia ewolucyjnego do innych dziedzin nauki. Opis ewolucji czasowej układów fizycznych, który znany był znacznie wcześniej, ograniczał się zasadniczo do procesów czasowo odwracalnych i okazał się, że względu na trudności matematyczne, niemożliwy do bezpośredniego uogólnienia. Redukcjonisci końca XIX wieku i pierwszej połowy XX wieku zadowalali się twierdzeniem, że jedyną przeszkodą uniemożliwiającą sformułowanie opisu ewolucji czasowej dowolnie skomplikowanego układu fizycznego są trudności rachunkowe.

Idee ogólnosystemowe pojawiały się w nauce, ale do połowy lat osiemdziesiątych były one niemożliwe do zweryfikowania. Paradygmat systemowy miał dla naukowców i filozofów nauki, zdominowanych przez pozytywistyczne myślenie, wartość równą dialektyce Hegla. Uznawano te obie idee za interesujące spekulacje, które nie były w stanie przewidzieć żadnych nowych, nieznanych nauce zjawisk. Poza tym, co gorsze, wymykały się zupełnie analizie ilościowej. W tym samym okresie obliczenia von Neumana, wyniki Gödla i inne prace, analizujące zagadnienia granic obliczalności i rozstrzygalności w matematyce, pokazały jasno, że nadzieje redukcjonistów oparte są na fałszywym założeniu. Wyżej wymienione rezultaty doprowadziły do rozróżnienia dwu klas nierozwiązywalnych problemów: klasy problemów istotnie nierozstrzygalnych, oraz klasy problemów praktycznie nierozwiązywalnych — problemów, do których rozwiązania najszybsze możliwe do zaprojektowania komputery operujące na zasadzie znanych praw fizycznych wymagałyby czasu dłuższego niż wiek wszechświata (wiek wszechświata używany jest tutaj dla celów ilustracyjnych, może on być zastąpiony przez jakikolwiek inny zniechęcająco długi interwał czasowy). Obie te klasy zawierają nieskończenie wiele problemów. Te matematyczne twierdzenia limitacyjne interpretowano zazwyczaj wyłącznie epistemologicznie, nie widząc ich dalej sięgających konsekwencji. Uświadomienie sobie znaczenia wyników metamatematycznych dla filozoficznych podstaw fizyki i innych nauk empirycznych zachodziło stopniowo, jako że fizycy o inklinacjach filozoficznych koncentrowali się głównie na zagadnieniach związanych z pojęciowymi trudnościami mechaniki kwantowej oraz na problemach fizyki cząstek elementarnych. Zainteresowanie tą drugą dziedziną inspirowane było nie tylko przez dominację myślenia redukcjonistycznego, ale również przez nakłady finansowe na badania w tej dziedzinie, związane z aktualnymi i oczekiwanymi zastosowaniami militarnymi.

Powód drugi, to szybko postępująca komputeryzacja badań naukowych, która ma co najmniej dwojakie konsekwencje istotne z punktu widzenia paradygmatu złożonościowego.

Po pierwsze, komputery przesuwają jakościowo granice praktycznej obliczalności. Problemy rachunkowe, które zespołowi wprawnych rachmistrzów musiałyby zabrać lata, popularny komputer osobisty rozwiązuje w ciągu kilku minut. W związku z tym nastąpił gwałtowny rozwój metod numerycznych, zarówno w dziedzinie zastępowania równań analitycznych przez równania numeryczne, jak i w dziedzinie konstruowania szybkich algorytmów do rozwiązywania tych równań. Klasa problemów praktycznie rozwiązywalnych została wyraźnie rozszerzona. Nie szuka się przy tym rozwiązań analitycznych. Przybliżone rozwiązania numeryczne stają się powszechnie przyjętym standardem.

Po drugie, komputery rozszerzają klasę procedur werfikacyjnych (lub falsyfikacyjnych) o symulacje komputerowe. Można pokusić się o porównanie znaczenia wprowadzenia do powszechnego użytku metody symulacji komputerowych do wpływu, jaki na rozumienie obserwacji (testowalności empirycznej) miało wynalezienie mikroskopu

lub teleskopu. Wirtualne testowanie hipotez empirycznych wywołuje oczywiście intuicyjny opór. Wydaje się jednak, że interesujące z punktu widzenia historii nauki byłoby porównanie sprzeczności, na jakie napotykała ekstrapolacja obserwacji optycznej przez dołączenie, jako równoprawnej procedury, obserwacji pośredniej — dokonywanej przy użyciu mikroskopu lub teleskopu. Obecnie fizycy, chemicy i biologowie, bardziej serio już niż żartobliwie, mówią o «eksperymentach komputerowych». Być może symulacja komputerowa uznana będzie w przyszłości za pełnoprawną metodę testowania hipotez i teorii naukowych. W każdym razie jest ona procedurą intersubiektywnie komunikowalną, powtarzalną i sprawdzalną, czego nie można powiedzieć z równą pewnością o tzw. doświadczeniach myślowych, które traktowane są w fizyce jako poznawczo wartościowe. Symulacja komputerowa pozwala rozszerzyć granice dostępności weryfikacyjnej — by nie powiedzieć obserwalności — na procesy, których długo- (lub krótko-) trwałość sprawia, że nie mogą być one bezpośrednio obserwowane. Uwypukla to jeszcze bardziej analogię z mikroskopem lub teleskopem. Oba te przyrządy umożliwiły obserwacje obiektów, które w przestrzennych rozmiarach były zbyt małe lub zbyt odległe dla obserwacji bezpośredniej. Teleskop i mikroskop funkcjonują zatem jako «modulatory odległości (przestrzeni)», komputer zaś stwarza szanse stania się «modulatorem interwału czasowego (czasu)». Jedno wydaje się pewne, symulacja komputerowa jest obecnie uznana i uważana za ważne uzupełnienie realnego eksperymentu w sytuacjach, w których doświadczenie może być wykonane. W sytuacjach zaś, w których eksperyment, z różnych względów, wykonany być nie może (zjawiska zachodzące we wnętrzu gwiazd, zmiany populacyjne zachodzące w trakcie ewolucji biologicznej, czy też przemiany historyczne i socjologiczne) modelowanie komputerowe jest jedyną szansą na lepsze zrozumienie zachodzących procesów. Dodatkową interesującą cechą symulacji komputerowej jest brak zakłócenia wprowadzanego przez rzeczywisty pomiar. Interwencja eksperymentatora polega tutaj na scharakteryzowaniu symulowanego procesu przez program komputerowy. Komputer realizuje następnie program w sposób niezależny od obserwatora.

II

Widać z powyższego, że warunkiem wstępnym, koniecznym dla rozstrzygnięcia kwestii, czy rzeczywiście obecne zmiany w biologii, chemii i fizyce zasługują na miano „rewolucji naukowej”, jest sformułowanie zadowalającej definicji pojęcia złożoności. Definicja taka powinna być materialnie adekwatna i formalnie poprawna. Z punktu widzenia formalnego, minimalne warunki, jakie chcę nałożyć, ograniczają się do przyjęcia, że pojęcie złożoności używane jest do celów porównawczych i w związku z tym można opisać złożoność za pomocą relacji dwuczłonowej:

Cxy — x jest bardziej złożone niż y (x ma wyższy stopień złożoności niż y)
lub

$\bar{C}xy$ — x jest nie mniej złożone niż y (x ma stopień złożoności niemniejszy niż y)

Nałożenie formalnego warunku w tej postaci nie rozstrzyga kwestii, czy złożoność jest cechą wewnętrzną przysługującą pojedynczemu w pełni izolowanemu obiektowi. Intuicyjnie biorąc, relacja Cxy (wersja słaba) jest co najmniej relacją częściowego porządku, tzn. jest zwrotna, antysymetryczna i tranzytywna. Tranzytywność relacji Cxy umożliwia szacowanie zmian zachodzących w indywidualnym obiekcie trwającym w czasie, w języku zmian złożoności tego obiektu w czasie. W tym wypadku, najistotniejszym z punktu widzenia ewolucji systemowej, relacja Cxy opisana jest na zbiorze przekrojów czasowych obiektów (systemów). Jeśliby tak nie było, opis zmiany złożoności obiektu w czasie nie byłby możliwy.

Nałożenie takich stosunkowo słabych wstępnych warunków formalnych na postulowaną definicję złożoności umożliwia odejście od jednej przedrefleksyjnej intuicji związanej z opozycją złożoność-prostota. Otóż wydaje się, że użycie pary dualnych pojęć w języku potocznym, entymematycznie zakłada liniowość uporządkowania indywiduów kwalifikowanych przez te pojęcia, tj. porównywalność wszystkich elementów należących do dziedziny relacji Cxy .

Kwestia istnienia elementów maksymalnego i minimalnego w dziedzinie określoności relacji Cxy nie jest, jak mi się wydaje, jednoznacznie rozstrzygnięta przez intuicję. Po poprawnym zdefiniowaniu relacji złożoności, zagadnienie to powinno być rozstrzygnięte empirycznie.

Intencją takiego podejścia do analizy pojęcia złożoności jest uzyskanie jasności w odniesieniu do relacyjnego charakteru tego pojęcia. Krytycy takiej analizy mogą wystąpić z zarzutem, że rozstrzyga ona, *a priori* negatywnie, kwestię istnienia odniesienia pojęcia złożoności, jako nieredukowalnego abstrakcyjnego bytu. Ontologiczny prymat «rzeczownikowej» wersji pojęcia złożoności znika, gdyż prezentowane tutaj ujęcie relacyjne charakteryzuje pojęcie stopnia złożoności. Taka krytyczna obserwacja wydaje się jednak nietrafna, konwencje językowe zezwalają bowiem na zastąpienie jednego opisu przez drugi. Przejście od struktury relacyjnej do języka indywiduów możliwe jest poprzez zdefiniowanie klas abstrakcji, grupujących wszystkie indywidua o równym stopniu złożoności, a następnie zinterpretowanie relacji porządkującej — określonej na zbiorze wszystkich indywiduów (w dziedzinie relacji) — jako rezultatu porównywania przynależności danego indywiduum do tej czy innej klasy abstrakcji.

Rodzaj zastosowanej w tej pracy analizy nie rozstrzyga zatem ani problemu ontologicznego, ani też aspektu metodologiczno-heurystycznego — tj. odpowiedzi na pytanie, który z dwu możliwych opisów powinien być preferowany jako bardziej płodny, wygodniejszy, prostszy *etc.* Dla zwolennika realizmu naukowego oba pytania pozostają kwestiami empirycznymi; dla antyrealisty pierwszy problem jest bezsensowny, a drugi rozstrzygany jest przez praktykę naukową.

Sformułowanie warunków materialnej adekwatności, które spełniać powinna zadowalająca definicja złożoności, jest kwestią trudniejszą. Warunki te powinny określić dziedzinę obiektów porównywalnych poprzez relacje Cxy , $C'xy$, oraz pozwolić na zinterpretowanie tych relacji w sposób zgodny z intencjami propagatorów teorii spon-

tanicznego wzrostu złożoności, przy jak najmniejszym naruszeniu intuicji związanych z potocznym użyciem tego terminu. W tym celu omówię kolejno potocznie rozumienie pojęcia złożoności, a następnie główne idee związane z pojęciem złożoności, które występują w pracach «kompleksologów».

W języku potocznym pojęcie złożoności przeciwstawiane jest pojęciu prostoty. Para tych pojęć używana jest zazwyczaj do dwu różnych wartościowań: wartościowania ontologicznego i epistemologicznego.

Porównywać można obiekty materialne i przedmioty abstrakcyjne, orzekając, które z nich są prostsze, a które bardziej złożone. Intuicyjnie nikt nie ma wątpliwości, że np. kamień jest przedmiotem prostszym niż kwiat chryzantemy, a drukowany obwód elektryczny przedmiotem bardziej skomplikowanym niż sztabka metalu. Podobnie w wypadku obiektów matematycznych: okrąg uważany jest za figurę prostszą od elipsy, a liniowe równanie algebraiczne za prostsze od liniowego równania różniczkowego. Stopień złożoności intuicyjnie ocenia się, biorąc pod uwagę dwa czynniki: ilość podstawowych elementów, wchodzących w skład danego obiektu, oraz ilość i rodzaj powiązań, które zachodzą między tymi elementami, przy czym znaczenie («waga statystyczna») tego drugiego czynnika jest wyraźnie większa. Dwa dodatkowe, bardziej subiektywne, bo związane bezpośrednio z perspektywą oceniającego czynniki — to: rozmiar obiektu i stopień regularności (symetrii), jaki oceniający dostrzeże. Dwa obiekty strukturalnie izomorficzne rozpoznawane są jako różniące się stopniem złożoności. Za bardziej skomplikowany uważa się zazwyczaj obiekt mniejszy. Można to stosunkowo łatwo zaobserwować w wypadku oceny stopnia złożoności grafów. Graf wypełniający całą stronicę intuicyjnie oceniany jest jako prostszy, gdy porównywany jest z izomorficznym grafem pomniejszonym np. dziesięciokrotnie. Podobnie dwa grafy narysowane w tej samej skali i posiadające tę samą liczbę węzłów i strzałek, są intuicyjnie uznawane za różniące się stopniem złożoności, jeśli jeden z nich jest w oczywisty sposób regularny, a drugi, na pierwszy rzut oka żadnej regularności nie przejawia.

Porównywać można również opisy i teorie naukowe, szeregując je od prostszych do coraz bardziej złożonych. Mówi się np., że newtonowska teoria grawitacji jest opisem bez wątpienia prostszym (łatwiejszym do zrozumienia) niż ogólna teoria względności Einsteina. Pojęcie złożoności (prostoty) w sensie epistemologicznym jest synonimiczne z pojęciem trudności (łatwości) zrozumienia. Komplikuje to dodatkowo sytuację, ponieważ druga z wymienionych par pojęć jest w sposób oczywisty subiektywna. W celu wyeliminowania tego elementu subiektywnego wprowadza się często pojęcie normalnego obserwatora lub idealnego racjonalnego podmiotu działającego.

Możliwość oceny zarówno obiektów świata fizycznego, jak i opisów, przy pomocy pojęcia stopnia złożoności — otwiera pole dla szeregu interesujących pytań filozoficznych. Czy można bezpośrednio porównywać złożoność obiektów i ich opisów? Czy może obiekty należące do każdej z tych klas wolno porównywać pod względem złożoności wyłącznie z innymi obiektami należącymi do tej samej klasy? Jeśli wyklu-

czyć porównywalność złożonościową obiektów i ich opisów, to czy relacja złożoności między obiektami przenosi się do klasy opisów tych obiektów? Tzn. czy jeśli Cxy (gdzie x i y są obiektami materialnymi lub abstrakcyjnymi) to czy również $Cx'y'$ (gdzie x' i y' są opisami tych obiektów)? Czy jest to prawdziwe dla wszystkich opisów, czy też np. dla każdej pary obiektów takich, że Cxy istnieje taka para ich opisów, o ustalonym stopniu aproksymacji (adekwatności) taka, że $Cx'y'$?

Porównywanie opisów i obiektów opisywanych jest *a priori* możliwe, bowiem każdy opis jest sam przez się obiektem (materialnym, jeśli rozpatrywany jest jako napis — lub abstrakcyjnym, jeśli identyfikowany jest z komunikowaną treścią). Próbując odpowiedzieć na te pytania można sformułować następujące, hipotetycznie możliwe stanowiska (wydaje się przy tym, że nasze potoczne intuicje nie preferują żadnego z nich).

(a) Obiekty i ich opisy nie mogą być porównywane ze sobą pod względem złożoności. „ Cxx ” oraz „ $Cx'x$ ” są wypowiedziami bezsensownymi. Relacja Cxy zdefiniowana jest oddzielnie w każdej z dziedzin i nie można jej niebanalnie uogólnić do ich sumy.

(b) Indywidua z obu dziedzin są złożonościowo porównywalne i prawdziwość lub fałszywość $Cx'x$ nie jest możliwa do jednolitego ustalenia dla całej klasy par $x'x$, jako że może ona zależeć od co najmniej dwóch dodatkowych czynników: typu kodu używanego do opisu danej dziedziny (kody o dużym stopniu wewnętrznej złożoności podnoszą złożoność x') i stopnia podatności indywiduów z dziedziny obiektów pozajęzykowych na łatwość opisu w danym kodzie.

(c) Indywidua te są porównywalne i następujące twierdzenie limitacyjne jest prawdziwe: $C'x'x$. Stopień złożoności opisu jest niemniejszy od stopnia złożoności opisywanego obiektu. W granicy najmniej złożony opis danego obiektu musi mieć złożoność równą złożoności obiektu. Twierdzenie to jasno pokazuje, jak bardzo zawodne są potoczne intuicje. Z jednej strony — wydaje się oczywiste, że nie można wiernie opisać niczego przez odwzorowanie obiektu bardziej skomplikowanego w strukturalnie mniej złożony. Z drugiej jednak — niekwestionowana wartość poznawcza opisów naukowych (nie mówiąc już o mapach geograficznych) jasno dokumentuje, że jest to właśnie osiąmane przez naukę. (Usunięcie tego paradoksu wiodło filozofów do odrzucenia tezy o prawdzie absolutnej.)

(d) Indywidua te są porównywalne i zachodzi zależność odwrotna: $C'xx'$ — czyli że opisy są zawsze mniej złożone od opisywanych obiektów (lub bardziej realistycznie, używając kwantyfikatorów mieszanych — dla każdego obiektu istnieje w danym kodzie opis, opisujący ten obiekt z danym stopniem adekwatności — taki, że jego stopień złożoności jest mniejszy od stopnia złożoności obiektu). Uzasadnienie tej intuicji odwoływać się może do procesu, jaki zachodzi podczas formułowania opisu. Proces ten jest różnie nazywany przez rozmaitych autorów: idealizacja, abstrakcja, kompresja informacji, czy też jej filtracja, lub zapominanie.

Jeśli więc zgodzić się na porównywalność złożonościową opisów i obiektów opisywanych, to można bronić trzech wzajemnie niespójnych powyższych tez. Przy

tym intuicyjne rozumienie złożoności, jak się wydaje, nie preferuje żadnej z powyższych możliwości.

III

Nowy paradygmat złożonościowy odchodzi od potocznej intuicji opozycji złożoności i prostoty.

Złożoność uważa się za cechę systemu tego samego typu, co uporządkowanie i chaotyczność. Zamiast biegunowości złożoność-prostota wprowadza się skalę uporządkowania o dwóch skrajnych stanach: doskonałego porządku i kompletnego chaosu. Przy tym oba te stany są oceniane jako stany o zerowym stopniu złożoności.

Przykładem systemu doskonale uporządkowanego jest regularna sieć krystaliczna. Przykładem drugiej skrajności — systemu w pełni chaotycznego — jest zachowanie cząsteczek gazu. Proponuje się zwykle proste kryterium jakościowe, pozwalające uznać, że oba te tak różne układy fizyczne są w pewnym stopniu podobne. Jeśli bowiem zamieni się miejscami dwa dowolne, jednakowe pod względem rozmiaru i kształtu fragmenty, to w obu wypadkach, obserwator nieświadomy faktu zamiany, nie dostrzeże żadnej różnicy. Fakt niezauważalności zmiany przy zastąpieniu miejscami jednakowych co do wielkości i kształtu części — empirycznie dokumentuje brak złożoności. Kryterium to w wypadku żywego organizmu — jak również w wypadku skomplikowanego urządzenia mechanicznego — pozwoli stwierdzić, że oba te obiekty są złożone. Trudno jednak orzec, który z nich ma wyższy stopień złożoności.

Wychodząc z powyższego, intuicyjnego rozumienia, zaczęto szukać takiego określenia pojęcia złożoności (relacji Cxy), które zachowywałoby powyższe intuicje, tzn. które uznawałoby oba skrajne stany — w skali od doskonałego porządku do kompletnej chaotyczności — za mniej złożone od stanów pośrednich. Np. cytowany na wstępie kwiat chryzantemy winien być wedle poszukiwanej definicji bardziej złożony niż zarówno sieć krystaliczna, jak i chaotyczny układ cząstek gazu. Pod kątem tych intuicji, które określają warunek materialnej adekwatności, próbowano w teorii samoorganizujących się systemów sformułować szereg definicji relacji Cxy . Dziedziną tej relacji są momentalne przekroje czasowe samoorganizujących się systemów. Żadna z nich nie jest jednak w pełni zadowalająca.

Przystąpię teraz do omówienia najważniejszych spośród proponowanych definicji złożoności (opieram się tu na pracach: [Bennett 1990] oraz [Kurths *et al.* 1994])

(a) Złożoność algorytmiczna.

Pierwsze intuicje, które doprowadziły do uformowania tego pojęcia, znaleźć można w pracach von Misesa z okresu międzywojennego, poświęconych precyzacji pojęcia przypadkowości w odniesieniu do szeregu zerowo-jedynkowego. Pojęcie złożoności algorytmicznej sformułowane zostało w sposób precyzyjny w latach sześćdziesiątych w pracach Kołmogorowa, Chaitina oraz Solomonoffa. Bazuje ono na wprowadzonym przez Turinga rozróżnieniu liczb obliczalnych i nieobliczalnych. Dziedziną porównywanych obiektów są liczby. Nasuwa się pytanie wstępne, w jaki sposób złożoność

abstrakcyjnych obiektów, jakimi są liczby, odnosić się może do złożoności obiektów opisywanych przez nauki empiryczne? Odpowiedź na to pytanie przynosi przedstawienie analizy złożoności jako procesu dwustopniowego. W pierwszym etapie określa się sposób porównywania liczb pod względem złożoności, etap drugi definiuje jednoznaczne przyporządkowanie liczbom obiektów z dziedziny nauk empirycznych. Takie jednoznaczne przyporządkowanie określa relacje w interesującej nas dziedzinie.

Złożoność liczb określa się tutaj jako długość najkrótszego (minimalnego) programu, przy pomocy którego komputer (uniwersalna maszyna Turinga) wydrukować może daną liczbę. Nieskończona w rozwinięciu dziesiętnym liczba: $0,42857142857142\dots$ okazuje się stosunkowo mało złożona, bo wyliczona być może przy pomocy krótkiego programu: podziel 3 przez 7 i wydrukuj wynik. (Liczba ta to dziesiętne rozwinięcie ułamka $3/7$). Jeśli natomiast zamierza się napisać program, który wydrukować ma liczbę, będącą ciągiem 100 000 cyfr otrzymanych kolejno w wyniku rzutów 10-boczną kostką, to najkrótszy możliwy program komputerowy musi mieć postać: wydrukuj ... (kropki zastępują tutaj ciąg 100 000 cyfr — otrzymanych jako wyniki rzutów). Pierwsza z powyższej pary liczb jest «obliczalna», druga jest «nieobliczalna».

Nie wchodząc głębiej w szczegóły techniczne można stwierdzić, że dla każdej liczby da się określić stopień złożoności równy długości minimalnego programu prowadzącego do wydrukowania tej liczby. Ta matematyczna, czy raczej metamatematyczna konstrukcja może być zastosowana do określenia stopnia złożoności obiektów materialnych. Przykładowo rozważyć można cząsteczkę DNA. Stanowi ona sekwencję czterech podstawowych par. Jeśli pary te oznaczy się odpowiednio liczbami 0, 1, 2, 3, to z molekułą DNA może być jednoznacznie związana skończona liczba, np. 221023011032221... Można teraz zadać pytanie o długość minimalnego programu dla tej liczby. Nie jest to liczba całkowicie losowa, bo kod genetyczny stanowi sekwencję trypletową. Długość minimalnego programu liczby reprezentującej cząsteczkę DNA może być interpretowana jako miara stopnia złożoności rośliny lub zwierzęcia, którego informację genetyczną ta molekuła zawiera.

Skończone liczby, choć niesłychanie długie, mogą być w podobny sposób związane z jakimikolwiek przedmiotami materialnymi. Wystarczy zidentyfikować jego elementy na pewnym poziomie organizacji (atomy, molekuly, komórki itp.), następnie zakodować strukturę, typ i liczbę połączeń między elementami, a otrzyma się reprezentującą obiekt liczbę. Długość minimalnego programu związanego z tą liczbą stanowi miarę złożoności tego przedmiotu.

Taka definicja złożoności nie spełnia jednak warunku materialnej adekwatności, bowiem najbardziej złożone okazują się według niej obiekty kompletnie chaotyczne, reprezentowane przez liczby losowe (nieobliczalne).

(b) Złożoność obliczeniowa.

Pojęcie to jest z punktu widzenia interesującego nas zastosowania równie nieadekwatne. Wyraża ono złożoność problemu — może to być na przykład znów wydrukowanie jakiejś ustalonej liczby — poprzez minimalny czas, jaki komputer musi na to

zadanie zużyć. Łatwo zauważyć, że ta definicja skrytykowana być może w podobny sposób, jak pojęcie złożoności algorytmicznej. Jediną różnicą jest mierzenie stopnia komplikacji obiektu przez długość trwania interwału czasowego, a nie przez długość (przestrzenną rozciągłość) programu.

(c) Złożoność oparta na stopniu zróżnicowania obiektu fizycznego.

Definicja ta została zaproponowana przez Hogga i Hubermana. Jest ona interesująca z dwu powodów. Po pierwsze, jest ona zgodna z intuicją pod tym względem, że uznaje ona za najmniej złożone zarówno obiekty doskonale uporządkowane, jak i w pełni chaotyczne. Po drugie, odwołuje się ona do redukcjonistycznych intuicji, tak więc z punktu widzenia «kompleksologów» jest ona formą hybrydalną.

W definicji tej używa się pojęcia struktury hierarchicznej obiektu materialnego. Chodzi tu o to, że w każdym obiekcie elementy składowe zgrupowane są w swego rodzaju podsystemy — w wyniku istnienia oddziaływań międzyelementowych. W zależności od siły oddziaływań, podsystemy te istnieją w obiekcie na różnych poziomach strukturalnych. W obiekcie fizycznym te podsystemy — to hadrony wyróżnione dzięki spójności kwarków, jądra atomowe powstałe w wyniku sił jądrowych, atomy uformowane przez siły elektromagnetyczne itd. Jeśli ustali się specyficzną dla danego obiektu hierarchię, to można wyznaczyć jego stopień złożoności, analizując różnorodność oddziaływań na wszystkich poziomach hierarchii.

Są dwa powody, dla których definicja ta nie jest ogólnie przyjęta. Nie jest jasne, w jaki sposób wyznaczyć należy hierarchiczne zorganizowanie danego obiektu. Różne hierarchizacje przyjęte za podstawę wyznaczenia stopnia złożoności prowadzą na ogół do przypisania obiektowi różnych stopni złożoności. Po wtóre, definicji tej stawia się zarzut błędnego koła, bowiem nie wydaje się możliwe opisanie hierarchicznej struktury obiektu bez co najmniej entymematycznej wiedzy o jego stopniu złożoności.

(d) Złożoność jako głębokość logiczna.

Podejście to, zaproponowane przez Bennetta, utożsamia realny system fizyczny z rozwiązywaniem matematycznych równań, które opisują zachowanie tego systemu. Układ planetarny jest traktowany jako komputer analogowy, rozwiązujący równania Newtona, czy Keplera. Założenie to, oryginalne i nieortodoksyjne w odniesieniu do nauki współczesnej, przez filozofów, którzy zetknęli się z panteizmem Spinozy, nie powinno być uważane za radykalnie nowatorskie. Jeśli zatem zaaprobować założenie, że wszechświat jest komputerem analogowym, rozwiązującym nieprzerwanie ogromną liczbę równań, to stopień złożoności pewnego «podzespołu wszechświata specjalizującego się w rozwiązywaniu szczegółowego równania» (np. równań opisujących system planetarny) można utożsamiać ze stopniem złożoności programu, przy pomocy którego skonstruowany przez człowieka dyskretny komputer potrafi dokonać symulacji zachowania tego realnego układu fizycznego. Głębokość logiczna obiektu może być więc wyznaczona przez czas użyty przez komputer do dokonania symulacji komputerowej całkowitego procesu rozwoju systemu, przy użyciu wyłącznie elementarnych algorytmów w chwili rozpoczęcia symulacji.

Propozycja Bennetta jest w pewnym sensie komplementarna do definicji analizowanej w punkcie (c). Bennett dla oceny stopnia złożoności obiektu przeprowadza jego komputerowo symulowaną rekonstrukcję, podczas gdy Hogg i Huberman poprzez hierarchizację strukturalną dokonywali — w sposób abstrakcyjny — dekompozycji obiektu. Podobieństwa w typie definicji odbijają się również w podobieństwie zarzutów. Pojawia się zatem zarzut niejednoznaczności: symulacja rozwoju danego obiektu może przebiegać na więcej niż jeden sposób. Nie ma też ogólnej zgody co do zawartości klasy algorytmów elementarnych.

IV

Jak widać z powyższego przeglądu, żadna z powyższych definicji nie jest zadowalająca. Głównym powodem jest niespełnianie przez nie warunku materialnej adekwatności. Jest rzeczą jasną, że bezcelowe byłoby ferowanie wyroku potępiającego paradygmat złożonościowy ze względu na używanie aparatury pojęciowej, która nie spełnia wymagań metodologicznych. Powód jest «brutalnie» pragmatyczny. Werdykt taki nie wpłynąłby w żaden sposób na praktykę naukową. Wypada zatem spojrzeć na obecną sytuację w sposób życzliwy dla «kompleksologów». Zasadności używania pojęcia złożoności, pomimo powyższej krytyki, mogą oni bronić na trzy następujące sposoby:

Sposób pierwszy — to zaapelowanie o większą cierpliwość i oczekiwanie, że zadowalająca definicja złożoności zostanie sformułowana w przyszłości. Z bezowocności dotychczasowych prób nie wynika przecież absolutna niewykonalność zamierzonego przedsięwzięcia.

Sposób drugi — to zbadanie, czy nie istnieją istotne powody, dla których pojęcie to nie może zostać poprawnie zdefiniowane. Powodem takim może okazać się fakt, że nie ma — zgodnej z intuicją złożoności — relacji porządkującej całą klasę systemów znajdujących się pomiędzy doskonałym porządkiem a całkowitym chaosem. Być może np. system o maksymalnej złożoności nie istnieje, bo w miejscu, w którym można byłoby się go spodziewać, występuje osobliwość. W takim wypadku intuicyjne pojęcie złożoności musiałoby zostać zastąpione przez parę pojęć nie dających się w prosty sposób uzgodnić. Jedno z nich stanowiłoby miarę różności od stanu doskonałego porządku, a drugie porównywałoby rozbieżność systemu od stanu kompletnego chaosu. Tego typu pytania dyskutowane są w ramach teorii systemów.

Sposób trzeci używa argumentu historyczno-filozoficznego. Można mianowicie twierdzić, że wymaganie poprawnej definicji od ogólnych pojęć, należących do «szarej» strefy języka, używanego w nauce (pojęć znajdujących się na pograniczu właściwego języka teorii naukowych i filozoficzno-ideologicznej terminologii meta-naukowej) jest postulatem niewykonalnym. W każdej dyscyplinie naukowej używa się pojęć nie należących do języka teorii naukowej w sensie ścisłym, które jednak niezbędne są — przynajmniej we wczesnym etapie formułowania teorii — do wyrażenia preteoretycznych intuicji. Taką rolę odgrywało w dziejach fizyki pojęcie materii, w

dziejach chemii pojęcie substancji, podobnie opisać można obecne użycie pojęcia informacji czy złożoności.

Sformułowanie zadowalającej definicji złożoności, zgodnie z tym poglądem nie jest obecnie możliwe. Przyszły rozwój interdyscyplinarnych badań rozstrzygnie, czy pojęcie to nabierze rangi terminu naukowego w sensie ścisłym, czy też zostanie usunięte poza margines nauki.

Poszukiwanie definicji pojęcia złożoności nie jest jednak zadaniem jałowym. Tak jak analizy pojęcia materii przyczyniły się do uformowania pojęcia masy, tak też analizy pojęcia złożoności dopomóc mogą w skonstruowaniu mierzalnych pojęć, które odpowiadać będą po części intuicjom wyrażanym dziś przez to pojęcie. Ten ostatni argument wydaje mi się najbardziej przekonujący.

Historia nauki dowodzi, że przypadki «niepokoju semantycznego» niejednokrotnie doprowadzały do znajdowania rozwiązań, które historycy nauki uznawali później za przełomowe.

Bibliografia

1. Charles Bennett, „How to Define Complexity in Physics, and Why?”, [w:] W. Żurek (red.) *Complexity, Entropy, and the Physics of Information*, Addison-Wesley, New York 1990, s. 137-147.
2. John Casti, *Complexification*, Harper Collins, New York, 1994.
3. Peter Coveney i Roger Highfield, *Frontiers of Complexity*, Fawcett Columbine, New York 1995.
4. Paul Davies, *The Cosmic Blueprint*, Simon & Schuster, New York 1988.
5. John Horgan, „From Complexity to Perplexity”, *Scientific American*, 1995, VI, s. 104-109.
6. George Kampis, *Self-Modifying Systems in Biology and Cognitive Science*, Pergamon Press, Oxford 1991.
7. Stuart Kauffman, *The Origins of Order*, Oxford University Press, New York 1993.
8. Stuart Kauffman, *At Home in the Universe*, Oxford University Press, New York, 1995.
9. Jurgen Kurths *et al.*, „General Remarks on Complexity”, [w:] H. Atmanspacher, G.J. Dalenoort (red.) *Inside Versus Outside*, Springer, Berlin 1994, s. 219-234.
10. Klaus Mainzer, *Thinking in Complexity*, Springer, New York 1994.