

Samoorganizujący się Wszechświat w różnych skalach - miejsce, gdzie nauka spotyka się z filozofią

Marek Szydłowski*

*Centrum Układów Złożonych, Uniwersytet Jagielloński,
Reymonta 4, 30-059 Kraków, Orla 171, Polska*

*Katedra Fizyki Teoretycznej, Katolicki Uniwersytet Lubelski Jana Pawła II,
Al. Racławickie 14, 20-950 Lublin,*

*Centrum Kopernika Badań Interdyscyplinarnych,
ul. Gronostajowa 3, 30-387 Kraków,*

Monika Hereć†

*Katedra Fizyki Teoretycznej, Katolicki Uniwersytet Lubelski Jana Pawła II,
Al. Racławickie 14, 20-950 Lublin,*

*Centrum Kopernika Badań Interdyscyplinarnych,
ul. Gronostajowa 3, 30-387 Kraków,*

Paweł Tambor‡

*Katedra Fizyki Teoretycznej, Katolicki Uniwersytet Lubelski Jana Pawła II,
Al. Racławickie 14, 20-950 Lublin,*

*Centrum Kopernika Badań Interdyscyplinarnych,
ul. Gronostajowa 3, 30-387 Kraków.*

Streszczenie

W pracy dokonujemy przeglądu szerokiej klasy układów samoorganizujących obecnych w przyrodzie. Charakterystyce przedmiotowej tych układów towarzyszy bardzo podstawowa, wstępna refleksja filozoficzna. Wskazujemy na metodologiczne i filozoficzne problemy generowane przez analizę układów samoorganizujących, tj. kauzalność, metodologia interdyscyplinarna, nieliniowość, dyskusja redukcjonizm vs. emergencja, znaczenie wyjaśnień teleologicznych, itp. Pokazujemy, że koncepcja emergencji, jakkolwiek wieloznaczna i rozmyta znaczeniowo, ma szansę dopracowania się bardziej spójnej charakterystyki właśnie w specyficznym kontekście złożonych układów samoorganizujących.

*uoszydlo@cyf-kr.edu.pl

†mherec@kul.lublin.pl

‡pawel.tambor@gmail.com

1 Wstęp. Czym jest samoorganizacja układów złożonych

Przez samoorganizację rozumie się proces spontanicznego formowania się przestrzennych, czasowych oraz czasoprzestrzennych struktur czy też funkcji układu zbudowanego z kilku lub wielu komponentów[15]. Zjawisko to występuje w fizyce, chemii i biologii w układach otwartych w stanach odległych od stanu równowagi termicznej. Jest interesujące, że zjawisko samoorganizacji występuje również w dziedzinach odległych od fizyki, biologii i chemii, a mianowicie można się z nim spotkać w ekonomii, socjologii, naukach medycznych czy też technicznych.

Wiele obiektów otaczającego nas świata jak domy, samochody czy też komputery, jest dziełem ludzkich rąk i ich forma oraz funkcje zostały przez samych ludzi określone. Z drugiej strony spotykamy się głównie w świecie zwierzęcym ze strukturami, które „rosną”, zmieniając tak formę, jak i funkcje niezależnie od nas samych i naszej aktywności. Pierwszym narzucającym się tutaj przykładem mógłby być ludzki umysł, ale także powstające we Wszechświecie formacje gwiazdowe, układy planetarne, galaktyki czy też sama wielkoskalowa struktura Wszechświata.

W przybliżeniu można podać pewne charakterystyczne cechy zjawiska samoorganizacji, które obejmują różnorodność procesów zachodzących we Wszechświecie, w jego różnych skalach czasowych i przestrzennych, a mianowicie:

1. Ewolucja układu odbywa się bez udziału wymuszeń zewnętrznych (choć w układach otwartych) i prowadzi do wytworzenia pewnej formy zorganizowanej.
2. Ewolucja układu jest zmianą jego stanu reprezentowanego przez punkt w przestrzeni stanów zwaną przestrzenią fazową. Ewolucja reprezentowana w przestrzeni fazowej zmierza w kierunku pewnego mniejszego zbioru w tej przestrzeni będącego dla różnych ścieżek ewolucyjnych układu atraktorem (zbiorem przyciągającym).
3. Pojawienie się pewnych korelacji w czasie i przestrzeni manifestujących się poprzez jakiś kształt czy wzór. Początkowo niezależne zmienne stany układu podlegają pewnym regułom wewnętrznym.

Podstawowe pytanie, które rodzi się w kontekście układów samoorganizujących, brzmi: czy istnieją jakieś ogólne prawa, którymi rządzą się te układy. Można to w prosty sposób zilustrować na przykładzie powstawania bańki mydlanej. Naczelną zasadą samoorganizacji tego układu jest *niech każdy dba o siebie na ile potrafi*. Żadna z molekuł wody (czy mydła) nie jest „świadoma”, że uczestniczy w procesie emergencji bańki, na której pojawiają się przy przejściu światła barwy interferencyjne, czy też, że takie bańki mogą się ze sobą połączyć w bardzo skomplikowany sposób. To jedynie, co każda z tych molekuł „wie”, to znaleźć się w stanie minimum energii swobodnej w warunkach działających sił międzymolekularnych. Cały układ, jakim jest bańka mydlana, stanowi układ poszczególnych oddziałujących molekuł dążących do stanu minimum sumarycznej energii swobodnej układu.

Układ cząstek działających kolektywnie poszukuje takiego minimum. Znajdywanie minimum energii swobodnej umożliwiając ruchy termiczne grup molekuł (lub grup atomów) działających w sposób kolektywny.

Analogiczne procesy zachodzą w wielkich aglomeracjach miejskich jak Nowy Jork czy Tokio. Miasta te są pozbawione centralnego planisty, natomiast każdy przedsiębiorca jest planistą dla siebie.

Wiele układów w naturalny sposób wykazuje własność samoorganizacji (galaktyki, planety, związki chemiczne, komórki biologiczne, ale i całe organizmy czy też społeczeństwa). W tym kontekście możemy postawić następujące pytanie: *dłaczego w otaczającym nas świecie nie obserwujemy większej różnorodności struktur i kształtów*. Aby na to pytanie odpowiedzieć, należy pogłębić naszą wiedzę na temat układów samoorganizujących.

Podstawowym wynikiem samoorganizacji układu jest wyłonienie się w nim pewnych własności emergentnych, czyli najogólniej rzecz biorąc, takich własności, które nie przysługiwały poszczególnym elementom zbioru, a pojawiły się w układzie (*emergowały*) po złożeniu tych elementów w pewien zorganizowany układ. Na przykład żadna z wielu części zegarka nie mierzy czasu, a jego funkcja pomiaru czasu wyłania się dopiero po złożeniu tych elementów w zorganizowaną całość. Oczywiście ta funkcja nowo zorganizowanego układu jest jego własnością emergentną.

Kluczowe dla samoorganizacji jest więc wyłonienie się nowej zorganizowanej struktury układu bez zewnętrznego wpływu na układ, chociaż układ cały czas pozostaje układem otwartym. Podkreślimy, że formowanie się kształtu, tak samo jak i nowych funkcji układu jest jego wewnętrzną własnością, która się konstytuuje w układzie jako wynik wzajemnych oddziaływań pomiędzy składowymi układem. Jako efekt sumaryczny uzyskujemy zorganizowaną strukturę. Tak zorganizowana struktura może ewoluować w czasie i być zmienna przestrzennie, ale cały czas zachowywany jest stabilny kształt zorganizowanego układu.

Podstawowym celem nauki o układach samoorganizujących się jest poszukiwanie ogólnych praw i reguł wzrostu i ewolucji tych struktur i kształtów (form), jakie mogą one przyjmować. Dążymy do wypracowania metod pozwalających na programowanie układu i jego przyszłej organizacji warunkowanych przez zmianę komponentów układu.

Teorią naukową, która pozostaje w ścisłym związku z nauką o samoorganizujących się układach jest tzw. teoria złożoności albo teoria układów złożonych, która bada jak komponenty układu oddziałujące w warunkach krytycznych (układy bogate w informacje i niestabilne) mogą się samoorganizować, tworząc potencjalnie ewoluujące struktury¹, posiadające hierarchię własności emergentnych, które rodzą się w układzie (sugerowana wielość poziomów struktury).

Jako miarę stopnia samoorganizacji układu można użyć stosunek miar jego basenu przyciągania (zbioru warunków początkowych prowadzących do atraktora) do miary obszaru atraktora. Układ złożony może posiadać wiele atraktorów, których obecność będzie zależeć od parametrów układu czy też zmiany połączeń wewnętrznych w układzie (mutacje).

Samoorganizacja układu złożonego jest możliwa dzięki przypadkowym zaburzeniom

¹Zmiany w otoczeniu powodują selekcję i mutację atraktorów

(fluktuacjom). Dzięki temu układ niejako *próbkuje* swoje nowe położenia w przestrzeni fazowej, tzn. swój ruch w kierunku atraktora. Wpływ zaburzeń może spowodować, że układ przejdzie z jednego basenu atraktora do innego. Z upływem czasu układ zbliża się do optymalnej organizacji, wykorzystując mechanizm przerzucania się pomiędzy atraktorami. Można więc powiedzieć, że badanie układów samoorganizujących się jest równoważne badaniom dynamicznej struktury atraktorów, ich kształtów.

Atraktory mogą być w przestrzeni fazowej zbiorami punktowymi, krzywymi zamkniętymi (cykle graniczne) albo też zbiorami w pewnej mierze. Trajektorja na atraktorze może być wrażliwa na małe zmiany warunków początkowych, tak że małe ich nieoznaczoności propagują się eksponencjalnie i wówczas mamy do czynienia z tzw. dziwnymi atraktorami.

W wyniku pewnych małych fluktuacji czy też zmiany parametrów układu może on być wypchnięty w obszar zachowania chaotycznego. Można podać pewne typowe scenariusze przejścia układów od zachowań regularnych do chaotycznych². Wspomnijmy jedynie, że przyjmuje się w teorii układów złożonych, że właśnie układy żywe funkcjonują na tzw. krawędzi chaosu. Na tej krawędzi chaosu korelacja pomiędzy odległymi elementami układu jest rozciągnięta na całą objętość układu w długich okresach czasowych, lecz możliwe są również zjawiska lokalne i o krótkim okresie życia. Koegzystencja tych metamorfoz układu jest jego charakterystyczną cechą na krawędzi chaosu. Układ w takim stanie jest dynamicznie stabilny ze względu na pewne zaburzenia i stabilny ze względu na inne.

Bardzo ciekawą własnością złożonych układów samoorganizujących się jest tzw. samoorganizująca się krytyczność (*Self-Organized Criticality*, w skrócie SOC). Jest to pewna zdolność układu do ewolucji w taki sposób, że układ, zbliżając się do punktu krytycznego, sam na trwałe utrzymuje się w nim. Jeśli dopuścimy możliwość mutacji w układzie, to mogą one przenieść układ z pewnej konfiguracji, powiedzmy, bardziej statycznej w kierunku konfiguracji bardziej dynamicznej, o większej zmienności czasowej (w kierunku okupowania mniejszej bądź większej objętości przestrzeni fazowej atraktora). Jeśli pewna struktura dynamiczna jest bardziej optymalna dla układu niż konfiguracja quasi-statyczna, to konfiguracja bardziej zmienna w czasie będzie korzystniejsza dla układu. Jeśli, z drugiej strony, układ znajduje się w konfiguracji podatnej na zmiany, to będzie wybierana mutacja statyczna. Reasumując, sam układ jako taki może ulegać adaptacji w obu kierunkach, zmierzając ku optymalnej charakterystyce dynamicznej.

Podkreślaliśmy już wcześniej, że własności emergentne są własnościami nieredukowalnymi do addytywnych własności części układu. Pojawiające się dodatkowe własności są właśnie przykładem własności emergentnych, wtedy gdy te własności nie są cechą żadnego z elementów z niższego poziomu opisu. Z grubsza biorąc, emergencja polega na pojawieniu się własności nie obserwowalnych wcześniej w zachowaniu układu i niesprowadzalnych do własności poszczególnych jego składników.

W teorii układów złożonych przyjmuje się, że układy samoorganizują się w stany emergentne nie wyprowadzalne wyłącznie z własności jego elementów składowych. Kierunkami badań teorii układów złożonych, które są bezpośrednio powiązane z układami samoorganizującymi, są: sztuczne życie, obliczenia ewolucyjne (algorytmy genetyczne), automaty

²Są to tzw. drogi do chaosu; lecz nie to jest celem tego wykładu.

komórkowe, sieci neuronowe, etc.

W układach samoorganizujących mamy poziomy organizacji – części układu tworzą swoje nadrzędne poziomy organizacji o odmiennych własnościach emergentnych. Różne poziomy organizacji mogą powstawać w układach dzięki samoorganizacji (komórki, organizmy, społeczeństwa) albo mogą być wytworzone, jak samochód.

Typowymi cechami układów samoorganizujących są:

- brak centralnego sterowania (współzawodnictwo),
- dynamiczna zmienność układu (ewolucja czasowa),
- fluktuacje układu (w kierunku znajdowania najlepszej opcji),
- łamanie symetrii (zubożenie symetrii przestrzeni stanów),
- niestabilność, wielokrotność stanów równowagowych (atraktorów),
- krytyczność (przemiany fazowe z efektem progowym),
- uporządkowanie układu obejmujące układ jako całość,
- dyssypacja (pobór lub eksport energii),
- redundancja (odporność na zniszczenia),
- samo-konserwacja (naprawa i wymiana części układu),
- adaptacja (odporność na zmiany otoczenia),
- złożoność (wielość parametrów),
- hierarchiczność (wielokrotność poziomów organizacji).

W dalszej części pracy, po tym obszernym, ale z konieczności niekompletnym wstępie, przejdziemy do omówienia przykładów układów samoorganizujących. Czytelnika zainteresowanego pogłębieniem wiedzy o układach samoorganizujących odsyłamy do niezwykle bogatej literatury przedmiotu. Interesujące uwagi historyczne dopatrujące się korzeni koncepcji badanych przez nas układów w greckiej filozofii starożytnej i u Kanta można znaleźć w [35]. Współczesne zasady układów samoorganizujących były dyskutowane przez Ashby [4] oraz von Foerstera [45]. Na aspekty termodynamiczne układów samoorganizujących zwrócił uwagę Nicolis oraz Prigogine [31]. Ogromne zasługi w kierunku sformułowania matematycznych podstaw opisu samoorganizacji dokonał Haken [14]. Warte polecenia są klasyczne monografie z dziedziny układów złożonych [6] z interesującymi refleksjami filozoficznymi. Układy samoorganizujące były inspiracją dla wielu filozoficznych syntez [17]. Prywatnie rekomendujemy monografię D. Scotta [36].

Celem tej pracy jest nie tyle przedstawienie układów samoorganizujących we współczesnej nauce, co zwrócenie uwagi na problemy filozoficzne, które są generowane poprzez

fakt ich występowania w przyrodzie. Problematyka układów samoorganizujących jest, naszym zdaniem, doskonałym pretekstem dla klasycznych zagadnień filozoficznych, jakimi są na przykład teologiczny opis praw przyrody, kauzalność finalna (*The explanatory priority of final causes of Aristotle* [Stanford Encyclopedia of Philosophy], który to punkt widzenia jest faworyzowany przez kontekst układów samoorganizujących), holistyczny vs. redukcjonistyczny opis praw przyrody [20].

Naszym zdaniem trudno jest pominąć fakt, jakim jest istnienie w przyrodzie układów samoorganizujących dla dyskusji na temat ogólniejszych problemów filozoficznych. I nie chodzi o jakiś rodzaj interpretacji tych faktów, tylko poszukiwanie odpowiedzi na pytanie, czy przyroda działa w sposób celowy, jeśli może być *pokryta* przez układy samoorganizujące opisujące świat w różnych skalach.

Tradycyjnie taka dyskusja toczyła się w kontekście np. zasad wariacyjnych fizyki, z których można wyprowadzić wszystkie fundamentalne prawa fizyki (niejednokrotnie wyprowadzalność tych praw z zasad wariacyjnych i ich fundamentalność są synonimami). Chodzi nam o to, aby problematykę układów samoorganizujących potraktować jako nowe światowidectwo (argument) za teleologicznym punktem widzenia.

Co więcej, jeśli uświadomimy sobie fakt, że fizyczne lagrangiany posiadają własność tzw. lokalności, to równoważność deterministycznego i wariacyjnego opisu staje się trywialna. Tak więc fakt istnienia układów samoorganizujących w świecie w różnych skalach i w odniesieniu do różnych rzeczywistości, tak fizycznej, jak i biologicznej czy społecznej może generować nowe pytania i odpowiedzi, które są filozoficznie interesujące.

Na ile autorzy są świadomi, jest to pierwsza próba włączenia problematyki układów samoorganizujących do dyskusji teleologicznego opisu świata w jego różnych skalach czasowych i przestrzennych.

Pracę kończymy ostatnim rozdziałem, w którym opisujemy próby potraktowania Wszechświata kosmologów jako układu samoorganizującego się, tak w dużej skali, jak i na poziomie kwantowym, gdy on powstawał jako układ kwantowy.

2 Układy samoorganizujące w przyrodzie

2.1 Układy samoorganizujące w biologii

Powszechnie występującym zjawiskiem w przyrodzie jest powstawanie i funkcjonowanie układów i struktur biologicznych zarówno przy braku zewnętrznych, jak i wewnętrznych systemów sterujących. Tworzenie takich struktur jest efektem procesu samoorganizacji i występuje w różnych formach na każdym poziomie organizacji: komórkowym, całych organizmów oraz populacji i ekosystemów. Szczególne zainteresowanie się zjawiskiem samoorganizacji w układach biologicznych, intensywnie badanym wcześniej w fizyce i chemii, wynika z faktu, iż zasadniczym skutkiem tego procesu jest generowanie własności i zjawisk emergentnych, czyli takich, jakich nie mają poszczególne elementy zbioru, ale które pojawiają się po złożeniu tych elementów w zorganizowany układ. Biorąc pod uwagę fakt, że wiele struktur komórkowych, o imponującej złożoności, powstaje w procesie samoporządkowania się organicznych molekuł, pojawia się pytanie czy samoorganizacja mogłaby być

siłą, która prowadziła do ewolucji świata biologicznego z nieożywionej materii? [26].

Współczesne technologie i metody badań umożliwiają zarówno wizualizację wewnętrznej budowy poszczególnych struktur komórkowych, jak i również bezpośrednio monitorowanie dynamiki procesów zachodzących w komórce. Pozwala to naukowcom na zidentyfikowanie struktur komórkowych, powstających w wyniku samoorganizacji molekuł oraz na lepsze zrozumienie mechanizmów rządzących tym zjawiskiem. Wyniki dotychczasowych badań wskazują, iż organizacja komórki w dużej części zależy od dwóch typów procesów: samoorganizacji statycznej i samoorganizacji dynamicznej. Uporządkowane struktury wytworzone w procesie samoorganizacji statycznej są układami znajdującymi się w stanie globalnej lub lokalnej równowagi termodynamicznej i nie rozpraszają energii. Choć ich formowanie może wymagać wkładu energii, jednak raz utworzona struktura jest już stabilna [48]. Ze względu na fakt, że molekularne układy samoorganizujące się powstają wyłącznie dzięki siłom wewnętrznym układu, oddziaływania pomiędzy poszczególnymi cząsteczkami są słabsze od wiązań kowalencyjnych, które utrzymują cząsteczki w całości. Spontaniczne porządkowanie się cząsteczek następuje pod wpływem słabych oddziaływań międzycząsteczkowych, do których należą wiązania wodorowe, wiązania koordynacyjne w ligandach i kompleksach, oddziaływania jonowe, oddziaływania dipolowe, siły van der Waalsa czy oddziaływania hydrofobowe. W uporządkowanych strukturach fluktuacje położenia i orientacji molekuł na skutek ruchów Browna, mają energię porównywalną z energią cieplną. Energia ta ma ważny wpływ w przypadku samoorganizujących się struktur komórkowych, ponieważ słabe niekowalencyjne wiązania są często zrywane i odtwarzane, co umożliwia układowi osiągnąć równowagę termodynamiczną [22]. Na poziomie molekularnym statyczna samoorganizacja jest odpowiedzialna np. za powstawanie kapsomerów wirusów - powłok białkowych o sferycznych i cylindrycznych kształtach otaczających materiał genetyczny wirusa, zaś w komórce między innymi za zwijanie się białek globularnych, parowanie się zasad w łańcuchu DNA czy tworzenie się dwuwarstwy lipidowej [48] opisane szczegółowo poniżej. Traktując komórkę jako obszar, gdzie w tym samym czasie zachodzi wiele różnych reakcji biochemicznych, bardzo ważnym elementem jej budowy staje się struktura, umożliwiająca jej kompartmentację. Taką rolę spełniają błony komórkowe, odpowiedzialne przede wszystkim za odseparowanie komórki od środowiska zewnętrznego, ale także za podział wnętrza komórki na części spełniające różne funkcje. Podstawą systemu błon komórkowych są dwuwarstwy lipidowe uformowane w procesie samoorganizacji odpowiednich, wydłużonych i elastycznych cząsteczek amfifilowych lipidów. Cząsteczki te na jednym końcu posiadają grupy hydrofilowe (tzw. głowy) oddziałujące wyłącznie z rozpuszczalnikami polarnymi, zaś na drugim końcu grupy hydrofobowe (tzw. ogony) rozpuszczalne w rozpuszczalnikach niepolarnych. Istnienie tych domen prowadzi do spontanicznej segregacji cząsteczek, w chwili umieszczenia molekuł lipidów w środowisku wodnym. Molekuły lipidów w takich układach dążą do zminimalizowania kontaktu grup hydrofobowych, które oddziałują między sobą siłami van der Waalsa, z polarnymi cząsteczkami wody, które z kolei tworzą z głowami lipidów wiązania wodorowe. Taki układ jest najkorzystniejszy ze względów energetycznych. W rezultacie gry sił przyciągających i odpychających mogą powstawać płaskie struktury lamelarne czy różnego typu micelle. Rodzaj powstającej struktury jest zdeteminowany wzajemnym stosunkiem sił oddziaływań hydrofobowych i hydrofilowych, co z

kolei wynika z kształtu cząsteczek. Molekuły lipidów wchodzące w skład błony lipidowej, mają kształt cylindryczny, w środowisku wodnym tworzą więc struktury warstwowe, tzw. dwuwarstwy. Cząsteczki lipidów są zorientowane prostopadle do powierzchni błony, przy czym ich hydrofilowe końce mają kontakt z fazą wodną po obu stronach błony, zaś wewnątrz błony jest wypełnione hydrofobowymi łańcuchami węglowodorowymi. Podwójna warstwa lipidowa jest główną częścią błony lipidowej i stanowi jej strukturalne podłoże. Dodatkowo związane są z nią różnego rodzaju proteiny i organiczne cząsteczki makromolekularnych cukrów, polisacharydów spełniających funkcje chemiczne. Zarówno cząsteczki lipidów, jak i białek, mają możliwość wykonywania różnego rodzaju ruchów rotacyjnych i translacyjnych, mogą także przechodzić z jednej monowarstwy lipidowej do drugiej w wyniku tzw. zjawiska "flip-flop". Prosta struktura dwuwarstwy lipidowej sprawia, iż błona komórkowa pełni kluczową rolę w selektywnym transporcie jonów i różnego rodzaju molekuł do wnętrza komórki. Z jednej strony wewnątrz lipidowej warstwy podwójnej nie jest polarne, więc jest ono nieprzepuszczalne dla większości jonów i polarnych molekuł, z drugiej strony wiele białek transmembranowych, przechodzących przez całą dwuwarstwę pełni rolę selektywnych kanałów jonowych. Pozwala to na stworzenie odpowiedniego gradientu jonów wewnątrz i na zewnątrz komórki. Tak więc o ile formowanie podwójnej warstwy lipidowej jest przykładem procesu samoorganizacji statycznej, to naturalna błona komórkowa jest już strukturą o bardzo dużej dynamice. W przypadku samoorganizacji statycznej wysoce uporządkowane stany mogą i wyłaniają się w momencie uzyskania przez układ stanu równowagi termodynamicznej. Inaczej przedstawia się sytuacja w układach otwartych, które otrzymują energię z zewnątrz. Energia ta, przepływając przez nie, może zostać wykorzystana do zmniejszenia entropii układu, co w efekcie prowadzi do generowania porządku. Cząsteczki mogą naturalnie spontanicznie samoorganizować się, tworząc makroskopowo uorganizowane dynamiczne struktury, które zostały nazwane przez Prigogine strukturami dyssypatywnymi [31]. Zdolność utrzymywania niskiego poziomu entropii powoduje jej znaczny wzrost w otoczeniu. Opisany mechanizm przedstawia tzw. samoorganizację dynamiczną, idealną do opisu wielu procesów w żywej komórce, która choć w trakcie migawkowych obserwacji wydaje się być strukturą składającą się ze statycznych organelli, to w rzeczywistości mamy do czynienia w niej z nieustannym przepływem energii i materii. Samoorganizujące się struktury dynamiczne są układami będącymi daleko od stanu równowagi termodynamicznej. Są odporne na powstawanie defektów, gdyż stan, w którym się znajdują, jest stanem stabilnym, wymuszającym pozostawanie poszczególnych składników w tym stanie. Poprzez serię bifurkacji układ może jednak przejść z jednego stabilnego stanu do drugiego w wyniku zmian parametrów układu.

Na poziomie komórki idea samoorganizacji dynamicznej jest bardzo dobrze widoczna w działaniu białek cytoszkieletu komórkowego. Mikrotubule i filamenty aktynowe są odpowiedzialne za kształt, sprężystość, ruchy i polarność komórki, odpowiadają za przemieszczanie organelli i ruchy cytoplazmy oraz za wędrówkę chromosomów do bieguna wrzeciona karinketycznego podczas mitozy. Każda z tych funkcji wymaga struktury sieci cytoszkieletu o odmiennej architekturze, przy czym każda z tych poszczególnych struktur może być wytworzona z ograniczonej liczby składników. Powstaje więc problem, jak z tych samych podstawowych składników cytoszkieletu stworzyć strukturalnie i funkcjonalnie odmienne

formy. Istotne znaczenie ma fakt, iż białka cytoszkieletu są wewnętrznie niestabilne i podlegają ciągłym zmianom. Struktury cytoszkieletu budowane są przez agregaty cząsteczek tych białek: filamenty aktynowe z aktyn, mikrotubule z tubulin. Zapewnia to możliwość szybkiego rozpadu włókien na pojedyncze cząsteczki (monomery lub oligomery) i szybkiego odtwarzania budowanych przez nie złożonych i uporządkowanych układów. Zdolność samoorganizacji sieci mikrotubul jest bardzo dobrze widoczna w badaniach prowadzonych in vitro, polegających na stworzeniu układu złożonego z białka tubuliny, odpowiednich białek silników i dostarczenie do tego układu energii z hydrolizy ATP. W zależności od względnego stężenia poszczególnych składników oraz kinetyki reakcji powstają strukturalnie odmienne wzory: wiry, przypadkowe sieci, astery, które następnie mogą determinować kształt komórki. Przejście pomiędzy poszczególnymi strukturami nie jest stopniowe, lecz bardzo ostre. Wielokrotne stworzenie tych samych warunków początkowych zawsze będzie owocowało tą samą formą końcową [28].

Dynamiczna samoorganizacja związana jest również z różnymi procesami zachodzącymi w jądrze komórkowym, a także reguluje przepływ błon z retikulum endoplazmatycznego do aparatu Golgiego [28]. Istnieje również teoria nowotworów jako samoorganizujących się struktur dyssypatywnych. Zakłada ona, iż w chwili, gdy układ dyssypatywny znajdzie się w punkcie bifurkacyjnym, czeka go albo śmierć, albo przeorganizowanie się w nowy stabilny stan. Ten nowy stan może odpowiadać tworzeniu się nowotworu. Nowy układ może istnieć, zwiększając rozproszenie energii i materii w swoim otoczeniu. Nowotwór jest więc biologiczną strukturą dyssypatywną samoorganizującą się wewnątrz organizmu, alternatywną śmierci jego układów. Jeśli nie zostanie zlikwidowany przez wewnętrzne siły naprawczo-obronne organizmu, to będzie się w nim rozwijał jego kosztem.

2.1.1 Kolektywne zachowania zwierząt

Przeniesienie idei zjawiska samoorganizacji na poziom populacji i grup organizmów żywych pozwala na wyjaśnienie i zrozumienie niektórych kolektywnych zachowań zwierząt i ludzi. W tym przypadku istotą samoorganizacji stają się proste, powtarzalne oddziaływania pomiędzy pojedynczymi osobnikami i środowiskiem, prowadzące do wytworzenia złożonych struktur, układów czy zachowań na poziomie grupy. Opierając się na tej definicji możemy poprzez proces samoorganizacji wyjaśnić np. powstawanie kopców termitów, migracje ryb, gromadzenie się karaluchów czy zachowanie się tłumu lub synchroniczne i asynchroniczne oklaski po przedstawieniu. We wszystkich tych zjawiskach każdy osobnik jest członkiem grupy, lecz żyje w niej własnym życiem. Nie ma on kompletnego obrazu swojej pozycji w całej strukturze, którą tworzy z pozostałymi i nie zdaje sobie sprawy z tego, że rozciąga się ona poza jego obszar. Dobrze wyjaśnionym przykładem samoorganizacji w zachowaniach zwierząt są ścieżki feromonowe tworzone przez mrówki. Wiele gatunków mrówek znaczy trasę od źródła pożywienia do mrowiska, pozostawiając na ścieżce związki chemiczne zwane feromonami. W chwili znalezienia pożywienia mrówka wraca do mrowiska, pozostawiając na drodze w regularnych odstępach nieznaczne ilości feromonów. Następnie kilkakrotnie powtarza tę samą trasę, za każdym razem znacząc ją kolejnymi niewielkimi ilościami feromonów, co w efekcie wzmacnia ślad. Następnie inna mrówka, która wcześniej

nie była świadoma, gdzie znajduje się źródło jedzenia napotyka na swojej drodze pozostawione związki chemiczne i idąc ich śladem, dociera do pożywienia, przy czym, wracając do gniazda, sama również znakuje drogę za pomocą feromonów. Dzięki temu pozytywnemu wzmocnieniu feromonowe ślady wzrastają i w krótkim czasie stają się trwałymi szlakami mrówek biegnącymi pomiędzy źródłem pożywienia a mrowiskiem. Feromonowe szlaki są tworzone wyłącznie na bazie lokalnej informacji. Zostają zapoczątkowane przez pojedyncze osobniki albo niewielkie grupy odpowiedzialne za szukanie źródła pożywienia, a następnie są wzmocniane przez inne mrówki idące ich tropem. Pomimo swojej prostoty w działaniu, ślady feromonowe są idealnym i efektywnym sposobem na dotarcie do źródła pożywienia, tym bardziej, że doświadczenie pokazuje, że w momencie, gdy mrówki mają do wyboru dwa szlaki prowadzące do tego samego miejsca w miarę upływu czasu wzmocniony zostaje tylko jeden - krótszy. Mechanizm samoorganizacji na poziomie populacji dobrze funkcjonuje tam, gdzie koszt wytworzenia centralnego układu sterującego, nie może być skompensowany przez korzyści, które on ze sobą niesie. Taka sytuacja występuje w układach silnie narażonych na stratę swoich jednostek (np. w wyniku ataków drapieżników czy chorób). W układzie, w którym istnieje zewnętrzne sterowanie, strata głównego kierownika może doprowadzić do katastrofy całego układu, w przeciwieństwie do zdecentralizowanych samoorganizujących się układów, ogólnie nie wrażliwych na utratę pojedynczych osobników. Może więc pojawić się pytanie, czy w niektórych sytuacjach system sterujący nie rozwinął się ze względu na różnego rodzaju ograniczenia, czy doświadczenie pokazało, iż korzystniej jest żyć, bazując na zjawisku samoorganizacji.

2.1.2 Rola samoorganizacji w układach biologicznych

Samoorganizacja nie jest uniwersalnym sposobem organizacji, jednak bardzo dobrze funkcjonuje w układach biologicznych, składających się z dużej liczby składników - molekuł tworzących struktury komórkowe, komórek organizmów czy całych organizmów stanowiących grupę - pomiędzy którymi brak jest lub jest bardzo słabo rozwinięty system wzajemnego komunikowania się, niezbędny do sprawowania centralnej kontroli [37]. Brak pewnej centralnej władzy koordynującej działanie układu niesie ze sobą jednak różne zagrożenia. Wśród jednostek takiego układu pojawia się skłonność do stawiania oporu w działaniu, ponieważ reagują one wyłącznie na lokalne zmiany warunków, natomiast nie uczestniczą w tworzeniu globalnej sytuacji systemu jako całości. Brak sterowania z zewnątrz może również ograniczać zdolność układu do szukania optymalnego rozwiązywania problemów, a także może czynić go podatnym na przechodzenie w sytuacje patologiczne. Przykładem mogą tu być ścieżki feromonowe tworzone przez mrówki w kształcie okręgu o średnicy 100 m, po którym mrówki chodziły jedna za drugą, aż do śmierci z całkowitego wyczerpania [37]. Jednak mimo pewnych wad samoorganizacja bardzo dobrze funkcjonuje w układach biologicznych, ponieważ zapewnia ona im dużą strukturalną stabilność bez straty plastyczności, dzięki przejściowej naturze oddziaływań pomiędzy poszczególnymi samoporzadkującymi się składnikami. To idealnie pasuje do budowy i funkcjonowania np. wielu struktur komórkowych, które z jednej strony powinny być architektonicznie stabilne, ale z drugiej strony muszą być bardzo elastyczne i przygotowane na nagłe zmiany [28].

2.2 Układy samoorganizujące w chemii

Koronnym świadkiem występowania samoorganizacji w układach spotykanych w chemii stanowią tzw. reakcje oscylacyjne. Są one szczególnym przypadkiem uporządkowań struktur nierównowagowych znajdujących się w stanach dalekich od równowagi (struktury dysypatywne³). Cechą charakterystyczną takich układów jest spójne zachowanie ich elementów. Oscylacyjne reakcje chemiczne są ważnym przykładem samoorganizacji w układach, ponieważ cykliczne zmiany stężeń różnych substancji są obserwowalne w wielu procesach zachodzących w organizmach żywych (przykładowo regulacji hormonalnej, cyklu komórkowym, glikozie, etc.). Nowo odkryte typy dynamiki reakcji chemicznych, w których manifestują się nieliniowości, z jednej strony istotnie poszerzają naszą wiedzę w dziedzinie kinetyki chemicznej, a z drugiej strony odkryte reakcje chemiczne wykazujące oscylacje czy też złożone zachowanie chaotyczne posiadają swoje głębokie analogie w innych układach biochemicznych, ważnych z biologicznego punktu widzenia.

Odkryte bogactwo dynamicznych zachowań nieliniowych układów daje podstawy wyjaśnienia zjawisk biologicznych na poziomie fizyko-chemicznym. Odkrycie przestrzennie niejednorodnego rozkładu stężeń otwiera możliwości badania na poziomie fizyko-chemicznym różnicowania komórkowego, a także informacji, którą posiada komórka o swoim przestrzennym położeniu w układach innych komórek (w tkance). W pewnym sensie można powiedzieć, że układy chemiczne mogą być użytecznymi kopiami układów biologicznych.

Najprostszym typem reakcji chemicznej, w której manifestują się efekty nieliniowości są tzw. reakcje oscylacyjne (oscylatory chemiczne). Układy te wykazują periodyczne zmiany stężeń produktów przejściowych. Są one przykładem układów dyssypatywnych w stanach dalekich od równowagi termodynamicznej, tj. stanach, w jakich rozgrywają się nieodwracalne przemiany fizyko-chemiczne.

Wzrost zainteresowania tego typu procesami jest całkowicie zrozumiały, jeśli uświadomimy sobie, że w naturalny sposób wszystkie organizmy żywe podlegają rytmom biologicznym. Rytm te odgrywają ważną rolę w adaptacji istot żywych do warunków otoczenia oraz utrzymaniu tych organizmów w dopuszczalnych granicach homeostazy. Zegar biologiczny liczy czas odmierzany wewnętrzną dynamiką procesów cyklicznych. Biologicznymi oscylatorami w organizmach żywych są np. glikoza czy też reakcje enzymatyczne.

Pojawienie się okresowych w czasie stężeń czy też okresowych przestrzennie stężeń jest właśnie przykładem wyłonienia się pewnego porządku w układach samoorganizujących się. Oscylacje mogą pojawić się tylko w układach, w których zachodzą procesy nieodwracalne - dyssypacje [44].

Możliwe jest podanie ogólnych warunków takich, aby przebieg procesów fizykochemicznych przybrał charakter oscylatora:

1. Parametry układu są odległe od stanu równowagi.
2. Równania kinetyki reakcji są równaniami nieliniowymi, np. $\frac{dx}{dt} = f(x)$, f jest funkcją nieliniową x ; x jest wektorem określającym stan układu (powiedzmy zbiór stężeń

³Szerzej w przyrodzie przykładami takich struktur są galaktyki, gromady galaktyk, a także organizmy żywe

substancji biorących udział w reakcji).

3. W mechanizmach reakcji występują pętle sprzężeń zwrotnych (autokataliza, autoinhibicja) [32].

Najbardziej spektakularnym przykładem tzw. homogenicznego układu oscylacyjnego jest reakcja Biełusowa - Żabotyńskiego (w skrócie BŻ). Polega ona na utlenianiu kwasu cytrynowego bromianu (BrO_3^- w obecności katalizatora w środowisku kwaśnym). W doświadczeniu można zaobserwować periodyczne zmiany barwy badanego roztworu.

Można ułożyć równania dynamiczne opisujące ewolucję stężeń substancji biorących udział w reakcji i przeanalizować możliwe ścieżki ewolucyjne układu w przestrzeni stanów układu (przestrzeni fazowej). Wówczas odkryjemy, że periodyczne zachowanie oscylatora jest w tej przestrzeni reprezentowane przez zamkniętą krzywą, która *ściąga* wszystkie trajektorie z otoczenia. Jest to tzw. atraktor zwany cyklem granicznym. Ruch układu po cyklu granicznym jest opisywany przez funkcję okresową w czasie.

Dodajmy, że oscylacje periodyczne w czasie spotykamy również w układach biologicznych oraz biochemicznych. Przykładem mogą być: periodyczna zmiana stężenia ważnych metabolitów, aktywności enzymów, oscylacje zmiany syntezy mRNA i różnych białek. Oscylacjom podlegają różne struktury subkomórkowe. U organizmów wielokomórkowych (także u człowieka) obserwuje się periodyczność w rytmach aktywności behawioralnej.

Reasumując, zachowania typu oscylacyjnego pojawiają się na różnych poziomach począwszy od chemicznego, poprzez komórkowy, tkankowy aż do psychicznego czy populacyjnego.

Z periodycznymi zmianami liczebności populacji gatunków mamy do czynienia także w ekologii. Dynamika tych procesów zmiany liczebności na danym terytorium jest opisywana podobnymi równaniami. Stany finalne zachowania układu są natomiast reprezentowane przez cykle graniczne.

W zakończeniu tej części można poczynić następującą uwagę. Jak wspomnieliśmy wcześniej w przestrzeni fazowej oscylatorów występują bardzo interesujące atraktory zwane cyklami granicznymi. Po pierwsze, tego typu zachowania mogą wystąpić już w bardzo prostych układach dynamicznych dwuwymiarowych. Warunkiem koniecznym jest to, aby układ był nieliniowy (oczywiście nie jest to warunek wystarczający). Cykle graniczne posiadają pewną własność „homeostazy”, mianowicie są odporne na wpływ małych perturbacji układu. Ta swoista własność sprawia, że są one także interesujące: najprostsze manifestacje nieliniowości w układzie, których nie zniszczy mała perturbacja układu. Ostatnio odkryto, że własność strukturalnej stabilności przysługuje układom ekologicznym.

2.3 Układy samoorganizujące w fizyce

Jako typowy samoorganizujący układ fizyki można wymienić laser (*light amplification by simulated emission of radiation*). Aby w pełni zrozumieć działanie lasera, należy użyć teorii kwantów oraz elektrodynamiki kwantowej, generalnie kwantowego opisu pola elektromagnetycznego.

Wszystkie lasery, z grubsza biorąc, działają na podobnej zasadzie, tzw. emisji wymuszonej (podczas takiej emisji elektron z zewnętrznej powłoki elektronowej jest bombardowany przez wcześniej powstały foton, w wyniku czego przechodzi on na niższą powłokę, emitując drugi identyczny foton). Ośrodek czynny w laserze pobudzamy np. przez energię z wyładowania elektrycznego czy też lampy błyskowej. Atomy (cząsteczki czy jony) po pochłonięciu porcji energii przechodzą na krótko do stanu wzbudzonego, by następnie, na skutek emisji spontanicznej powrócić do stanu podstawowego, emitując kwant energii (foton) w formie promieniowania świetlnego. Jeżeli teraz we wzbudzony atom uderzy foton o energii równej energii wzbudzenia, wówczas dany atom przechodzi do stanu podstawowego, emitując taki sam foton poruszający się dokładnie w tym samym kierunku, co foton uderzający. Te dwa fotony mogą wyzwolić kolejne dwa, i tak lawinowo zachodzi akcja laserowa. Dla powstania dostatecznie silnej wiązki promieniowania musi być uwolniona duża liczba fotonów, co zapewnia lustro odbijające, które zawraca fotony do ośrodka czynnego⁴. W ten sposób atomy powracające do ośrodka czynnego wyzwalały kolejne, a reszta przechodzi przez lustro tworzące wiązkę laserową.

Aby ograniczyć ruch elektronu w jednym kierunku, należy go umieścić między dwiema równoległymi barierami potencjału. Praktycznie robi się to, konstruując „kanapkę” z kryształów o identycznej strukturze. W analogiczny sposób ograniczamy ruch elektronu w dwóch wymiarach poprzez wycięcie wiązki elektronowej z kanapki pewnego pasa o szerokości $100 \cdot 10^{-10}$ m. Możemy wreszcie zamknąć elektrony w trzech wymiarach, otaczając kryształ A kryształem B. Wtedy elektrony zostaną zamknięte w pudełku o boku $100 \cdot 10^{-10}$ m. Stan układu jest opisany trzema liczbami kwantowymi n_x, n_y, n_z , a skwantowane będą nie tylko składowe pędu, ale i energia. Sprawia to, że kropkę kwantową nazywa się też sztucznym atomem. Obecnie kropki kwantowe są szeroko wykorzystywane w diagnostyce medycznej, technologii, a laser oparty na ich budowie charakteryzuje się dużą intensywnością.

Sztuczne atomy (kropki kwantowe) są tak naprawdę zbudowane z wielu atomów, ale przypominają pojedynczy atom. Ich zastosowanie w budowie laserów, które zastępują tradycyjne barwnikowe, opiera się na naszej wiedzy dotyczącej samoorganizującego wzrostu tych kropek.

W tym momencie warto wspomnieć o niezwykle ciekawym odkryciu w fizyce, które nazywa się samoorganizującą krytycznością (*self-organized criticality*). Jest to własność w układach dynamicznych, które posiadają punkt krytyczny jako atraktor. Wówczas makroskopowe zachowanie układu charakteryzuje się przestrzenną, czasową niezmiennością względem skali, charakterystyczną dla punktów krytycznych przejść fazowych (bez dostrojenia parametru kontrolnego układu do ściśle określonej wartości [5]⁵). To odkrycie jest traktowane jako jedno z najważniejszych odkryć fizyki ubiegłego wieku. Waga tego odkrycia polega na jego interdyscyplinarności, od zastosowań w geofizyce, kosmologii, biologii ewolucyjnej i ekologii, do ekonomii, kwantowej grawitacji, socjologii, fizyki słońca, plazmy, czy też neurobiologii. SOC jest obserwowalne w wolno wymuszonych nierównowagowych

⁴Dodatkowo mamy drugie lustro, które częściowo odbija, a częściowo przepuszcza promieniowanie.

⁵Koncepcja SOC została zaproponowana przez Per Bakę, Chao Tang i Kurta Wiesenfelda (BTW) w pracy z 1987 z PRL [43].

układach o poszerzonych stopniach swobody (*extended degrees of freedom*) oraz wysokim poziomem nieliniowości.

Z poznawczego punktu widzenia jest to odkrycie praw rządzących układami złożonymi opisywanymi przez fizykę statystyczną⁶.

Nagle odległe obszary badań zostały powiązane i okazało się, że złożoność podlega prostym prawom i nie zależy to od szczególnego dostrojenia parametrów (szczegółów modelu). Ważnym odkryciem BTW było również stwierdzenie faktu, że emergencja złożoności może się pojawić z prostych lokalnych oddziaływań i ma charakter spontaniczny, a co za tym idzie, może być źródłem naturalnej złożoności (a nie tylko pojawić się w eksperymencie laboratoryjnym czy też symulacji numerycznej) [18].

Istnieje szeroka klasa procesów fizycznych, które są traktowane jako samoorganizujące: pierwszego rzędu przejścia fazowe, spontaniczne łamanie symetrii, spontaniczna magnetyzacja, krystalizacja i wzrost kryształów (także ciekłych), laser, nadprzewodnictwo, kondensaty Bosego-Einsteina (makroskopowe manifestacje kwantowej natury świata), przejścia fazowe drugiego rzędu powiązane z punktami krytycznymi, w których w układzie rodzą się struktury niezmiennicze względem skali. Przykładami tych ostatnich jest wspomniana reakcja BŻ, opalescencja cieczy w punkcie krytycznym, perkolacja w losowych środowiskach. Oczywiście, należy tutaj wspomnieć o formacjach struktur w układach termodynamicznych dalekich od równowagi (lasery, turbulencje, konsekwencje niestabilności Bernarda w dynamice cieczy). Należy również wspomnieć o samoorganizujących się układach dynamicznych: układach złożonych zbudowanych z małych prostych jednostek, które są wzajemnie powiązane i realizują samoorganizację.

Mechanika statystyczna daje nam opis zjawisk zachodzących w układach dostatecznie dużych oddziałujących cząstek. Z tego opisu poziomu mikro jest wyprowadzalna termodynamika z pojęciem entropii. Teoria ta doskonale opisuje świat w naszej skali makro; operuje pojęciami ciśnienia i temperatury, etc. Glandsdorff i Prigogine wyprowadzili z głębszego rozumienia poziomu mikroskopowego (inkorporując nieodwracalność) nowe zasady termodynamiki, ignorując klasyczną (lub kwantową) dynamikę.

W konsekwencji stało się możliwe badanie układów termodynamicznie otwartych, takich jak procesy biologiczne, transformujące i rozpraszające chemiczną energię, absorbujące i rozpraszające energię słoneczną, tj. badanie samoorganizujących się układów w stanach dalekich od równowagi.

Laser może być również traktowany jako układ samoorganizujący. Jeśli układ zostanie wytrącony ze stanu termodynamicznej równowagi w dostatecznym stopniu, to górny poziom posiada wyższą liczebność niż dolny (*population inversion phenomena*), i wówczas pojawia się więcej wzbudzonej emisji niż absorpcji, co w konsekwencji prowadzi do koherentnego wzrostu (amplifikacji) fali elektromagnetycznej dla częstości przejścia.

Zjawisko samoorganizującej krytyczności można wyjaśnić stosunkowo prosto. Związa-

⁶Bak, Tang i Wiesenfeld zunifikowali znane wcześniej odkrycia w dziedzinie badań układów złożonych S. Ulama, J. von Neumanna czy też J. Convey w dziedzinie automatów komórkowych, oraz odkrycia Benoit Mandelbrota w dziedzinie fraktali opisujących złożoność świata. Co więcej, w latach 60-tych i 70-tych intensywnie w fizyce pracowano nad przejściami fazowymi, wykazując, jak zjawiska niezmiennicze względem skali (fraktale) oraz prawa potęgowe wyłaniają się w punktach krytycznych między fazami.

ne jest z nim prawo potęgowe. Wyobraźmy sobie, że interesujemy się trzęsieniami ziemi i ich rozkładem. Bardzo często występują, nawet w Polsce, trzęsienia ziemi, ale bez ofiar, o niższej intensywności. Rzadziej, raz na kilkanaście lat, intensywne trzęsienia ziemi powodują, że giną setki czy tysiące ludzi. Okazuje się, że wszystkie pośrednie trzęsienia, ani silne ani słabe, układają się według krzywej wykładniczej, łączącej te dwie skrajne sytuacje. Podobne zjawisko ma miejsce, gdy rozważamy lawiny w górach czy też rozkład własności/cech wśród ludzi. Skrajne sytuacje, to bycie milionerem i bycie biednym. Zgodnie z prawem Pareto 20% ludzi posiada 80% majątku⁷.

Ściślej mówiąc, SOC jest pewnym charakterystycznym stanem krytyczności, który jest tworzony przez samoorganizację w długim okresie przejściowym na granicy stabilności i chaosu. Możemy więc powiedzieć, że leży na granicy tego co przewidywalne i nieprzewidywalne.

Niech S oznacza wielkość lawiny - liczbę miejsc, które objęła. Z analiz numerycznych wynika, że, jeśli piasek dodajemy losowo, to układ wykazuje SOC. Atraktoorem jest stan, w którym dodanie jednego ziarenka może spowodować lawinę o wielkości S , osiągającej nawet cały układ.

Niech $D(S)$ oznacza liczbę lawin o wielkości S . Z analiz numerycznych dostajemy $D(S) \sim S^{-1.0}$, czyli równy szum. Podobnie dostajemy dla czasu życia lawin $D(T) \sim T^{-0.43}$. Bak pokazał, że to zachowanie jest wewnętrzną własnością układu i nie zależy od warunków początkowych. Ponieważ SOC występuje w zasadzie wszędzie, może posłużyć do modelowania: rynków finansowych, ewolucji biologicznej, pożarów lasów, trzęsień ziemi, epidemii, sieci neuronowych, itd. [18].

3 Wszechświat jako układ samoorganizujący

Załóżmy, że Wszechświat jest jako całość układem tzn. jest zbudowany z elementów, które działają jako całość. Pojedyncze elementy tej układanki podlegają prawom, które nie „mówią”, jak mają oddziaływać między sobą. Oczywiście my tych wszystkich praw nie znamy, a nawet gdybyśmy taką wiedzę posiadli, byłaby ona trudna do wykorzystania z uwagi na stopień komplikacji rozwiązań. Żeby Wszechświat był traktowany jako układ, jego indywidualne elementy winny być nierozzerwalną częścią całości i, niejako, *working together*. Przykładem takiej zasady byłaby zasada Macha, zgodnie z którą masa ciała byłaby jego własnością indukowaną przez resztę mas we Wszechświecie. Na pewno jest tak, że te same prawa przyrody rządzą Wszechświatem w skali układu planetarnego, jak i jego wielkoskalową strukturą, tj. powszechny w kosmologii pogląd o jedności praw przyrody. Taki pogląd wyraża się w postaci zasady kopernikańskiej, która głosi, że prawa fizyki rządzące strukturą i ewolucją Wszechświata są niezależne od zajmowanej pozycji we Wszechświecie, jak

⁷Od dawna wiemy, że w układach dynamicznych można zaobserwować struktury samopodobne przestrzennie, tj. fraktale. Tego typu zjawisko występuje nie tylko w przyrodzie, ale i w modelach zjawisk fizycznych procesów deterministycznych – układach dynamicznych. Równym szumem nazywa się sygnał lub proces, którego gęstość widmowa $S(f)$ spełnia prawo potęgowe typu $S(f) \propto \frac{1}{f}^\alpha$; $\alpha > 0$. Z równym szumem mamy do czynienia w procesach naturalnych: trzęsieniach ziemi, lawinach, przepływie rzek, zmianach jasności gwiazd.

i pozostają niezmiennie w czasie kosmologicznym (w szczególności stałe fizyczne są *stałe*).

Tak więc, o ile Wszechświat jest pewnego rodzaju układem, jesteśmy dopiero na początku drogi w poznawaniu wzajemnych powiązań między jego elementami. Jest niezwykle ciekawe, że mówi się dzisiaj nie tylko o ekstrapolacji znanych praw na Wszechświat, ale także o ograniczeniach na parametry tego Wszechświata z obecności w nim np. obiektów astrofizycznych. U podstaw takiego poglądu leży głęboko tkwiące u kosmologów przekonanie o jedności praw przyrody, które nim rządzą. Problem leży w tym, że wykazanie istnienia mechanizmów współdziałania jest trudne z uwagi na to, że efekty są słabe, np. czy efekty grawitacji są istotne dla procesów życiowych.

Co do drugiej kwestii, to można podać pewne argumenty za wzajemnym współdziałaniem elementów. W tym kontekście istotne wydają się być badania w kierunku poznania nielokalności Wszechświata czy unifikacji praw przyrody.

Pozostawiając niejako problem: „czy Wszechświat jest układem, i w jakim sensie⁸, pokażemy przykłady samoorganizujących się struktur we Wszechświecie oraz że pewne kwantowe modele kosmologiczne oparte na kwantowej grawitacji są przykładem samoorganizującego się Wszechświata. Również świadectwo typowości relacji potęgowych spotykanych w astrofizyce wskazuje, że Wszechświat w skali galaktyk, gwiazd jest układem złożonym przemawiającym do nas tymi prostymi relacjami. Przejdźmy teraz do omówienia różnych manifestacji złożoności Wszechświata w kontekście powstawania samoorganizujących się struktur.

3.1 Powstawanie galaktyk i struktur we Wszechświecie

Wydarzenie to miało miejsce od ok 300 tys. do 2 mld lat, licząc od wielkiego wybuchu. W tym przedziale czasu formowały się już struktury, które następnie przekształcały się w galaktyki. O załączkach struktur, w zasadzie już można mówić we wszechświecie inflacyjnym. Wówczas inflacyjna ekspansja przebiegała różnie w jego przestrzeni i pewne jego obszary „rozdeła” do większych, inne do mniejszych rozmiarów. Pewne z nich rozszerzały się wolniej, a inne szybciej. Te wolniejsze charakteryzowały się większą gęstością, pozostałe mniejszą, natomiast siły grawitacyjne przyciągały materię do obszarów o większej gęstości. Później w tych obszarach powstawały galaktyki i struktury bogatsze; ich gromady i supergromady w drodze mechanizmu tzw. grawitacyjnej niestabilności. Kosmologowie potrafią symulować komputerowo proces powstawania wielkoskalowej struktury Wszechświata z charakterystycznymi obszarami pustek, ścian i łańcuchów.

Gdy galaktyki już się pojawiły, skupiły one w sobie większość materii Wszechświata. To jest powodem, dla którego od tego momentu „ewolucja” Wszechświata polegała na zmianach zachodzących w samych wnętrzach gwiazdowych. Na początku galaktyki składały się wyłącznie z wodoru i helu, i dopiero mechanizm grawitacyjnej niestabilności spowodował, że obłoki tego gazu zaczęły się grawitacyjnie zapadać. Powstały pierwsze pokolenia gwiazd. W gwiazdach zachodziły reakcje termojądrowe, które następnie przekształcały jądra wodoru w jądra helu, a później te ostatnie w jądra węgla i tlenu. Mamy

⁸Na przykład pytanie o jego „zamkniętość” czy otwartość jako układu termodynamicznego wydaje się nie być jeszcze zasadnie postawione.

do czynienia z ewolucją chemiczną galaktyk, w której decydującą rolę odgrywają gwiazdy masywne. W końcowych etapach ich ewolucji powstają w nich również jądra innych pierwiastków. Później te gwiazdy kończą swój „życie” wybuchem supernowych. W trakcie takiego wybuchu w części wewnętrznej gwiazdy powstaje gwiazda neutronowa (lub czarna dziura), natomiast zewnętrzne warstwy zostają rozerwane i są transportowane do materii międzygwiazdowej.

Układ Słoneczny powstał ok 5 mld lat temu z obłoku międzygwiazdowego gazu i pyłu pod wpływem sił grawitacji kondensujących materię do obszaru gęstej kuli gazowej. Siły grawitacji wprawiły obłok w ruch wirowy, co doprowadziło do powstania płaskiego dysku wokół centrum. Temperatura w obszarze centralnym wzrosła na tyle, że dało to początek inicjacji reakcji jądrowych. Następnie gazowa kula przeobraziła się w gwiazdę (Słońce), natomiast z materii dysku powstały mniejsze ciała Układu Słonecznego - planety, planetoidy czy komety.

Powstanie Ziemi poprzedza powstanie proto-słońca z ogromnego kompleksu gazowo-pyłowego. Wokół niego powstał dysk proto-planetarny. Gdy temperatura we wnętrzu osiągnęła ok 10 mln K, rozpoczęła się jądrowa przemiana wodoru w hel (proces spalania wodoru). Słońce rozbłysło i powstrzymany został proces grawitacyjnego zapadania. Siły grawitacyjne zostały zbalansowane siłami ciśnienia. Następnie z dysku proto-planetarnego o rozmiarach naszego układu utworzyły się planety. Ziemia zaczęła się kształtować ok 4.6 mld lat temu.

Z tego krótkiego opisu procesów emergencji Ziemi, widzimy, że aby mogła ona powstać, musiały niejako współdziałać zarówno struktury bogatsze, jak i sam Wszechświat, a pierwsze skrzypce w samoorganizacji tych układów odgrywała grawitacja.

3.2 Wielkoskalowe struktury Wszechświata

Struktury fraktalne, które są charakterystyczne dla samoorganizującej się krytyczności, pojawiają się tak w teoretycznych, jak i obserwacyjnych badaniach kosmologicznych. Luciano Pietronero (1987) jako pierwszy podała świadectwa za fraktalnym rozkładem wielkoskalowej materii Wszechświata na podstawie katalogów galaktyk. Ostatnio [24] argumentował, że takie struktury we Wszechświecie są obecne w skalach większych niż 100 Mps. Autorzy uzyskują wymiar fraktalny ok. $2,1 \pm 0,1$ na podstawie danych katalogu SDSS. Obecnie w kosmologii toczy się debata na temat gładkości wielkoskalowego rozkładu materii i przeważający punkt widzenia oparte na SDSS wykazuje, że Wszechświat jest regularny w skalach 100 Mps, a nawet większej [7]. Struktury fraktalne pojawiają się również w kosmologii teoretycznej w kontekście koncepcji Lindego samoreprodukującego modelu chaotycznej inflacji [27]. Linde wykazuje, że fraktalność jest naturalną konsekwencją scenariusza inflacyjnego i powinna się pojawić w skalach obserwowalnego Wszechświata. Struktury fraktalne pojawiają się również w podejściu Alaina Connesa, który proponuje nowy schemat geometrii niekomutatywnej. Koncepcja fraktalna jest również fundamentem tzw. kosmologii fraktalnej, która koncentruje się na fraktalnej architekturze Wszechświata [7]. Jest to próba rezygnacji z zasady kosmologicznej i wypracowania metody kosmologicznej w duchu koncepcji Wszechświata hierarchicznego.

Autorzy zarzucają paradygmat modelu standardowego FRW, mówiąc, nie bez racji, o złudnej prostocie jednorodnej przestrzeni i materii oraz tajemniczych osobliwościach kosmologicznych. Spór między zwolennikami standardowego modelu kosmologicznego oraz kosmologii fraktalnej nie może być inaczej rozwiązany, jak na drodze testowania zasady kosmologicznej [25].

3.3 Fraktalny Wszechświat kwantowej grawitacji

Jednym z wyzwań, które zostało podjęte przez fizyków teoretyków, jest próba zbudowania kwantowego opisu teorii grawitacji Einsteina. Można pokazać, że badania idące w tym kierunku posiadają własność programu badawczego w sensie Lakatosa [42].

Nowe idee Amjorna, Loll i Jurkiewicza spowodowały, że podejście Hartlego-Hawkinga wykorzystujące feynmanowski rachunek całek po trajektoriach (będące programem heurystycznie postępowym, lecz teoretycznie degenerującym) zostało ożywione tak, że dzisiaj jest traktowane jako najbardziej efektywne podejście do kwantowania grawitacji, w którym możliwe są obliczenia nowych efektów przewidywanych przez teorię. Podejście to jest znane jako kwantowa teoria kauzalnych dynamicznych triangulacji (KTDT) [2]. Walorem tego podejścia jest fakt, że jest podejściem nieperturbacyjnym i grawitacyjne stopnie swobody są kwantowane bez wprowadzania jakichś dodatkowych struktur. W tym podejściu można również wyprowadzić semiklasyczny model kosmologiczny [19]. Podejście to cechuje swoista ekonomia myślenia i, przy minimum założeń, udaje się uzyskać spójną teorię kwantowej grawitacji, w której można stawiać interesujące pytania oraz uzyskiwać na nie konkluzywne odpowiedzi. Co więcej, teoria ta odzyskuje działanie dla przypadku rozważanego wcześniej przez Hartlego-Hawkinga (H-H), ale ze zmienionym znakiem. Różnica znaku jest jednak istotna, ponieważ rozwiązuje problem konforemnej niestabilności. Możemy więc na tym przypadku powiedzieć, że podejście to jest emergentne w stosunku do podejścia H-H i jest do niego nieredukowalne. Podstawowe założenia KTDT są następujące:

1. Podstawowym aparatem matematycznym jest rachunek całek po trajektoriach, który jest aplikowany do czasoprzestrzeni.
2. Całka po trajektoriach będąca superpozycją po wszystkich wirtualnych trajektoriach zawiera pełną informację o dynamice kwantowej układu.
3. W całce po wszystkich możliwych historiach uwzględniamy tylko takie, które nie łamią warunku kauzalności⁹.
4. Niezwykle oryginalnym pomysłem autorów jest sposób liczenia całki, tak, aby nie pojawiały się w niej nieskończoności (propozycja regularyzacji w duchu koncepcji Reggego).

⁹Wcześniejsze wieloletnie badania autorów, w których odpowiednia struktura kauzalna Lorentza była zakładana prowadziły do bezsensownych wyników, co może sugerować jej pierwotny charakter.

Geometria takiej przestrzeni jest zbudowana z elementarnych sympleksów - klocków, z których poskładana jest czasoprzestrzeń. Podejście to pozwoliło jego autorom na zbudowanie kosmologii oraz uzyskanie niezwykle interesujących wyników, jak otrzymanie czterowymiarowej geometrii asymptotycznej. W małych skalach kwantowych Wszechświat posiada wymiar spektralny $\simeq 2$, ale ten, co ciekawe, zależy od skali, w której badamy układ. Możemy sobie wyobrazić, że na początkowym etapie ewolucji, kiedy efekty kwantowe są znaczące, czasoprzestrzeń była fraktalem i następnie *wyemergowała* do ciągłego continuum. Otrzymane wyniki są zgodne z innymi opartymi na modelach piany kwantowej (*spin foam model*) [10]. Ostatnio twórcy podejścia KDTD pokazali, że, używając terminologii samoorganizacji, można opisać procesy, w których Wszechświat zbudowany z wielkiej liczby sympleksów konstytuujących elementarne komponenty układu wykazuje kolektywne zachowanie posiadające cechy układu samoorganizującego. Autorzy piszą [3, s. 6]:

Borrowing a terminology from statistical and complex systems, we are dealing with a typical case of “self-organization”, a process where a system of a large number of microscopic constituents with certain properties and mutual interactions exhibits a collective behavior, which gives rise to a new, coherent structure on a macroscopic scale.

Tą emergentną strukturą makroskopową wylaniającą się w czasie z planckowskiej grawitacji, jest czasoprzestrzeń de Sittera.

3.4 Samoorganizujący się Wszechświat Lee Smolina [40]

Dla kosmologii L. Smolina ważna jest obserwacja, że we Wszechświecie istnieje życie, a różnorodność form i ich organizacja nie są czymś przypadkowym. Jest celem kosmologów skonstruowanie takiej teorii globalnego Wszechświata, w której istnieją warunki przyjazne dla życia biologicznego. Smolin obarcza za brak takiej teorii kulturowaną przez ostatnie stulecia platońską koncepcję prawa przyrody lub ogólnie platońską tradycję poznawczą. Smolin proponuje, by koncepcję prawa wyrażonego w języku matematyki - prawa idealnego i wiecznego (np. wyrażonego przez symetrie) zastąpić prawem, które jest kształtowane w procesie ewolucji i samoorganizacji. Jako swoistego poprzednika takiego myślenia uważa Smolin J. Wheelera i znajduje podobieństwo swoich poglądów do tych, które są wyrażane przez P. Baka, P. Daviesa, S. Kauffmaną, A. Lindego, Y. Nambru czy też H. Nielsena. Smolin uważa również, że podobną myśl można odnaleźć na gruncie filozoficznym. I tutaj [40, s. 23] wymienia tych, tuż po Darwinie, którzy doszli do wniosku, że idea ewolucji ma wielkie znaczenie dla budowy modelu kosmologicznego. U Ch. Pierce’a odnajduje myśl, że prawa fizyki należy rozumieć jako wytwór procesu ewolucji, natomiast u Bergsona intuicję, że opis świata jako całości powinien być zbliżony do opisu organizmu żywego. Mamy tutaj do czynienia z transferem idei z filozofii do kosmologii. Zauważmy, że *post factum* doszukujemy się idei filozoficznej tak, jakby ona na nowo była sobie uświadamiana. Smolin słusznie zauważa, że dzisiaj jesteśmy w lepszej sytuacji od Pierce’a i Bergsona, ponieważ dopracowaliśmy się teorii fizycznej opisującej świat w dużej skali i potrafimy badać obiekty, które go wypełniają, jak gwiazdy, galaktyki i ich gromady. Smolin twierdzi, że podstawowy

fakt, który znamy to, że Wszechświat ewoluuje, że w przeszłości był gęstszy i bardziej gorący, że w większości gwiazd powstała większość pierwiastków chemicznych. Innymi słowy zrozumieliśmy, że warunki dogodne do naszego życia biologicznego kształtowały się wraz z ewolucją Wszechświata, a nie były zadane od samego początku. Wszechświat dojrzał niejako do emergencji życia biologicznego. Jeśli Wszechświat nie jest wieczny i posiada swoją historię, to proces ewolucji kosmicznej wyselekcjonował prawa, którym on podlega [40, s. 25]:

Same prawa przyrody, podobnie jak gatunki biologiczne, nie są być może wiecznymi kategoriami, lecz raczej wytworami naturalnych procesów zachodzących w czasie. Może się okazać, że powody, dla których prawa fizyki są takie, jakie są, mają po części naturę historyczną i przypadkową, podobnie jak ma to miejsce w biologii.

Smolin wróży zmierzch myślenia o prawach fizycznych w kategoriach tradycyjnych, a naiwnym i radykalnym atomizmem nazywa pogląd, według którego to cząstki elementarne są nośnikami raz na zawsze zakodowanej informacji, własności niezależnej od historii i historii Wszechświata. Mówi on o naszej tęsknocie za absolutystycznym postrzeganiem świata, który, jego zdaniem, został obalony, gdy została obalona newtonowska koncepcja czasu i przestrzeni.

Smolin jest wyznawcą tzw. relacyjnej koncepcji czasu i przestrzeni nawiązujących do filozoficznych koncepcji Leibniza, w której własności ciał nie są ustalone w sposób absolutny względem jakiegoś niezmiennego tła, lecz są określane ze wzajemnych oddziaływań i związków zachodzących między ciałami we Wszechświecie. Dodajmy, że współczesna fizyka faworyzuje właśnie relacyjną teorię czasu i przestrzeni. Koncepcja Smolina stawia sobie za cel odpowiedź na następujące pytania [40, s. 27]:

1. Dlaczego Wszechświat jest przyjazny dla życia, dlaczego jest wypełniony gwiazdami?
2. Czy istnieje jedna fundamentalna teoria, która określa własności cząstek elementarnych?
3. Czy prawa fizyki też ewoluowały?
4. Czy jest przypadkowe, czy też konieczne, że Wszechświat zawiera różnorodność struktur?
5. W jaki sposób my, którzy żyjemy w tym świecie, potrafimy zbudować kompletny i spójny obraz tego, co nas otacza?

Zgadza się ze Smolinem, gdy pisze [40, s. 191]: „Wszechświat, w którym żyjemy, jest piękny przynajmniej po części z tych samych powodów, które czynią pięknym krajobraz czy miasto - mnóstwo zjawisk zachodzi w nim w wielu różnych skalach ...”. Czemu Wszechświat nie jest bardziej jednorodny, dlaczego bardziej nie przypomina gazu, który równomiernie wypełnia przestrzeń i nie kryje ani struktury, ani porządku, ani piękna?

Wszechświat kryje struktury we wszystkich skalach i to czyni go pięknym w sensie Smolina. Największa możliwa skala (rozmiar Wszechświata) jest około 10^{59} razy większa od długości Plancka (41 rzędów wielkości kryje struktury, czy nie jest to zastanawiające?).

Na początku XX wieku powszechny był pogląd wyprowadzany z II zasady termodynamiki, że Wszechświat nieuchronnie dąży do śmierci cieplnej, która oznacza, że zostanie on pozbawiony struktur i życia - totalna destrukcja struktury. Takie myślenie bazuje na przekonaniu, że przestrzeń absolutna jest całkowicie jednorodna, tymczasem Ogólna Teoria Względności nie przeczy powstawaniu struktur w każdej skali.

Założenie istnienia pewnej skali kosmologicznej, w której Wszechświat jest jednorodny Smolin uważa za powrót do fizyki newtonowskiej i zamiast tego opowiada się za wszechświatem hierarchicznym, zgodnie z którym Wszechświat składa się hierarchii struktur. Taki pogląd w XIX w. był głoszony przez Charliera. Jego zwolennikami są również współcześni kosmologowie, jak Pietroniero, którzy dowodzą fraktalnej struktury rozkładu materii w dużej skali.

Zdaniem Smolina Wszechświat jest układem krytycznym i jest wytworem przejścia fazowego. To tłumaczy posiadanie przez niego struktury rozciągającej się na wiele skal. Czy jest możliwe, że na przykład piękne wzory galaktyk ukształtowały się w procesach analogicznych do tych, które wytworzyły płatki śniegu? Przejścia fazowe mogą wystąpić tylko w ściśle określonych warunkach, a we Wszechświecie istnieje wiele obiektów, które nie mając określonych rozmiarów, nie zostały wygenerowane w przejściu fazowym. Stąd, zdaniem Smolina, takie obiekty powstają samorzutnie bez specyficznych warunków.

Smolin proponuje mechanizm powstawania struktur we Wszechświecie oparty na samoorganizującej się krytyczności w układzie dalekim od równowagi jakim jest Wszechświat. Systemy samoporządkujące z „zakodowanym” mechanizmem samoorganizacji są często systemami krytycznymi, ponieważ proces samoorganizacji jest hierarchiczny. Jeśli raz się rozpocznie pewien ciąg zjawisk, który prowadzi do powstania cykli, sprawiając że składniki systemu staną się wzajemnie powiązane, może on się powielić w większej skali. W ten sposób system może stać się składnikiem większej całości, co prowadzi do wielopoziomości uporządkowania. Każdy z nich jest wewnętrznie powiązany za pomocą cykli oraz wzajemnych zależności, które charakteryzują stabilne systemy samoporządkujące.

Siły grawitacji są przyciągające i posiadają nieskończony zasięg, a więc będzie istnieć naturalna tendencja do porządkowania struktur we Wszechświecie, który powinien mieć postać porządkowania w czasie analogicznego do samoporządkującej się krytyczności odkrytej przez P. Baka i jego współpracowników. Smolin opisuje galaktykę jako samoorganizujący się układ [39], ale widzi problem, czy proponowany mechanizm będzie działał w skalach większych niż galaktyki, czy gromady galaktyk można uznać za systemy samoporządkujące, czy Wszechświat jest takim właśnie układem.

Układy krytyczne zachowują się w niezwykle prosty i uniwersalny sposób. Przyczyna leży w tym, że w tego typu układach nie istnieje żadna charakterystyczna skala czasowa. Znany duński fizyk H. Nielsen był jednym z tych naukowców, którzy zakwestionowali powszechny pogląd, że wyjaśnienie Wszechświata wymaga odwołania się do jakiejś fundamentalnej teorii, ponieważ Wszechświat w małej skali jest układem krytycznym. Nielsen sądzi, że Wszechświat znajduje się pomiędzy dwoma fazami, Wszechświat niejako chwieje

się w punkcie przejścia fazowego i własności cząstek elementarnych nie zależą od fundamentalnych praw fizyki. Nielsen uważa, że ponieważ wszystkie teorie fundamentalne są równouprawnione, można wybrać jedną, zwaną dynamiką losową, w której następuje losowy dobór praw przyrody. Smolin proponuje alternatywny do Nielsena mechanizm wyjaśnienia, dlaczego we Wszechświecie zachodzą zjawiska występujące w różnych skalach - główny, jego zdaniem, problem teorii cząstek elementarnych. Tym mechanizmem jest dobór naturalny. Proponowany przez Smolina mechanizm kosmologicznej selekcji jest więc propozycją wyjaśnienia złożoności Wszechświata. W stosunku do tego mechanizmu zgłoszono różne zastrzeżenia, na które Smolin odpowiada w pracy [41].

Podstawowymi założeniami Smolina są:

1. Osobliwości czarnej dziury odbijają się, prowadząc do nowych ekspandujących regionów czasoprzestrzeni.
2. Kiedy to się wydarzy, bezwymiarowe parametry modelu standardowego nisko energetycznej fizyki nowego regionu różnią się o małą losową wartość od tego regionu, w którym czarna dziura powstała.

Propozycja Smolina jest w pewnym sensie teoretyczną hipotezą uzasadniającą tzw. zasadę antropiczną. Pomijając fakt, że w sformułowaniu hipotezy antropicznej operuje się kategorią życia, którego nie rozumiemy, propozycja Smolina jest pewną koncepcją wyjaśniającą nasz szczególny związek ze Wszechświatem.

Smolin, dziwiąc się popularności zasady antropicznej, upatruje jej powodów w tym, że:

(...) próby stworzenia teorii kosmologicznych opartych na atomistycznych i redukcjonistycznych zasadach zawsze kończą się arbitralnością, z którą musimy sobie poradzić, jeśli chcemy twierdzić, że doszliśmy do teorii ostatecznej..., zostajemy z bogactwem możliwości. Teoria, od której rozpoczęliśmy próby wyjaśnienia Wszechświata, kończy się albo dopuszczeniem, albo wymaganiami istnienia wielkiej liczby alternatywnych wszechświatów. W tych przypadkach często wprowadza się zasadę antropiczną, aby ratować sytuację i wyjaśnić, w jaki sposób nasz Wszechświat został wybrany z tego zbioru.

4 Filozoficzne implikacje układów samoorganizujących

Podstawowym pytaniem natury filozoficznej jest: dlaczego układy te opisują procesy fizyczne, biologiczne i inne, począwszy od korków na autostradach, do opisu zachowania społeczeństw. Podstawowe prawa fizyki są proste, to dlaczego nasz świat jest złożony? Teoria samoorganizującej się krytyczności daje następującą odpowiedź na to pytanie: złożone zachowanie *emerguje* z dynamiki procesów dyssypatywnych poprzez sekwencje metastabilnych stanów do stanu krytycznego, który charakteryzują szerokie korelacje czasowe i przestrzenne. Przytoczmy w tym miejscu pogląd M. Paczuskiego i P. Backa [33, s. 1]:

Minor disturbances lead to intermittent events of all sizes. These events organize the system into a complex state that cannot be reduced to a few degrees of freedom. This type of "punctuated equilibrium" dynamics has been observed in astrophysical, geophysical, and biological processes, as well as in human social activity.

Redukcjonistyczny punkt widzenia w nauce jest niezwykle popularny. Jest to szczególnie irytujące dla humanistów stwierdzenie, że wszystko da się wyjaśnić przez odwołanie do świata cząstek, atomów i rządzących nimi praw przyrody. Naiwny redukcjonizm roztacza wizję „lodowatego Wszechświata”, dla którego istnienie ludzkości pozostaje bez szczególnego znaczenia [29]. Dla ilustracji tego poglądu warto przytoczyć stwierdzenie wybitnego fizyka teoretyka i kosmologa S. Weinberga, który w zakończeniu *Pierwszych trzech minut* [47, s. 178-179] pisze:

Piszę te słowa w samolocie na wysokości 10000 metrów nad Wyoming w drodze z San Francisco do Bostonu. Ziemia wydaje mi się spokojna, piękna, puszyste obłoki, śnieg różowiejący w zachodzącym słońcu, drogi ciągnące się od miasta do miasta. Bardzo trudno wyobrażać sobie, że wszystko to stanowi jedynie maleńki fragment przyniatająco wrogiego Wszechświata. Jeszcze trudniej, że ten Wszechświat powstał w tak niezwykłych warunkach, i że czeka go zagłada w bezgranicznym zimnie lub potwornym żarze. Im bardziej jednak rozumiemy Wszechświat, tym mniej widzimy dla siebie nadziei.

Rzeczywiście, gdyby zaniedbać we Wszechświecie istnienie układów samoorganizujących prowadzących do powstawania struktur (i zmniejszania entropii Wszechświata), to nie będą nas łączyć jakieś szczególne więzi z Wszechświatem; pozostanie on wrogi i bezsensowny.

Nauka o układach złożonych, i to wydaje się bardzo istotne, dostarcza nam jakąś holistyczną perspektywę i, miejmy nadzieję, pozwoli nam lepiej rozumieć wiele niezwykle trudnych pojęć, jak życie, świadomość, inteligencję, wobec rozumienia których bezradni są tak uczeni, jak i filozofowie [11].

S. Kauffman zauważa, że teoria układów złożonych realizuje schemat nauki post-redukcyjnej. Wydaje się kluczową kwestią: czy i jakie prawa rządzą układem złożonym. Jak mogliśmy się o tym przekonać, zjawiska samoorganizacji, zachodzące w tych układach, posiadają nieredukowalnie dużą liczbę stopni swobody. W filozofii i podstawach teorii układów złożonych kluczową rolę odgrywa pojęcie emergencji. Paczuski i Bak karzą sobie wyobrazić Ziemię z bogactwem gór, oceanów, wysp, jezior i wulkanów, z których każdy posiada swoją własną dynamikę. Zachowanie tych układów nie da się wyprowadzić z mniejszych skal poziomów mikro. Po prostu sama dynamika, tak samo jak i wspomniane formy są emergentne. Złożoność musi emergować z samoorganizującej dynamiki – trudno sobie wyobrazić, by mogło być inaczej.

Podójście układów złożonych - samoorganizujących posiada trzy cechy:

1. Jest holistyczne.

2. Jest funkcjonalne.
3. Jest ukierunkowane: procesy „zmierzają” w kierunku stanu zorganizowanego.

Według wielu autorów, podejście to jest bliskie arystotelesowskiej *causality*. Procesy zmierzają w pewnym kierunku i jakby „realizują” jakiś cel, którym jest określona zorganizowana struktura.

To, co jest również niezwykle interesujące w problematyce układów samoorganizujących, to fakt istnienia ogólnych praw opisujących tak odległe dziedziny życia. Wygląda to tak, jakby naszą całą rzeczywistość, szeroko rozumianą, dało się pokryć kawałkami/siecią układów złożonych.

M. Heller argumentuje, że świat jest pokryty siecią struktur matematycznych. Tutaj niczego takiego nie widać, może dlatego, że jeszcze nie potrafimy rygorystycznie dowieść w sposób formalnie ścisły, że układ dąży do samoorganizującej krytyczności, i w tym stanie daje się opisywać przez proste relacje wykładnicze.

Wydaje się nam, że postęp w badaniach nad złożonością kolejny raz chwycie wiarą w potęgę matematycznego opisu świata, który może być ułomny. U podstaw świata leżą struktury fizyczne, np. samoorganizujące się układy. Taki punkt widzenia zdecydowanie poszerza horyzont naszego świata, w którym jest miejsce na badania automatów komórkowych, inteligencji rozproszonej, modelowania zjawisk w układach społecznych czy sieci neuronowych.

Czymś absolutnie nietrywialnym jest, naszym zdaniem, fakt, że nasza rzeczywistość fizyczna, biologiczna czy społeczna daje się modelować i wyjaśniać przez proste relacje potęgowe. Istotnie, to, że świat można wyjaśniać jako wynik procesów samoorganizacji, jest jego (świata) bardzo zadziwiającą własnością.

L. Smolin [40, s. 21] wspomina, że, gdy rozpoczynał studia z fizyki, wyobrażał sobie, że światem rządzą pewne piękne matematyczne prawa. Później, gdy stał się fizykiem, zwątpił w ten pogląd. Dobrze będzie w tym miejscu dokładniej przytoczyć jego pogląd:

Gdy zdałem sobie z tego sprawę, zacząłem wątpić, czy rzeczywiście istotę świata da się uchwycić poprzez odkrycie doskonałego i wiecznego matematycznego prawa. Obecnie uważam, że istnieją dowody świadczące na rzecz alternatywnego poglądu. Zakłada on, iż znaczna część porządku i regularności, jakie dostrzegamy w świecie materialnym, mogła powstać dokładnie w taki sam sposób, jak ukształtowało się piękno przyrody ożywionej, to znaczy w procesie samoorganizacji, poprzez który świat ewoluował w czasie, osiągając w końcu niezwykle złożoną strukturę.

Całkowicie podzielamy pogląd L. Smolina, że świat można zrozumieć nie tyle jako odbicie ustalonego i wiecznego prawa natury, jak po prostu wynik procesów samoorganizacji prowadzących od nauki o częściach Wszechświata do jego całości.

Po przedstawieniu tych ogólnych metateoretycznych uwag, spróbujmy uporządkować grupy problemów natury filozoficznej, które pojawiają się w kontekście rozważań nad układami złożonymi i samoorganizującymi.

4.1 Epistemologia procesów nieliniowych

W literaturze przedmiotu wszelkie filozoficzne analizy układów samoorganizujących się, rozpoczyna się od uznania wagi przejścia od myślenia liniowego do nieliniowego [21].

O ile w odniesieniu do tzw. zasad wariacyjnych można się spotkać z poglądem, że ich interpretacja teleologiczna powstrzymywała rozwój fizyki na setki lat, o tyle w środowisku ludzi pracujących w teorii układów złożonych nie deklaruje się podobnych poglądów. Wręcz odwrotnie, interpretacja arystotelesowska jest naturalna i niejako narzuca się sama przez się. Zauważmy, że cały czas mówimy o procesach deterministycznych, a rozstrzygnięcie między opisem deterministycznym czy teleologicznym nie jest postawione na ostrzu noża. Wydaje się też, że fakt istnienia złożonych układów samoorganizujących ilustruje nam pogląd, że nie jest tak, że świat może być przewidywalny bądź nie. Układy złożone leżą na szwie obu tych układów, i to nie było dla nas wcześniej już takie oczywiste.

Mimo tych zastrzeżeń dotyczących języka teleologicznego, twierdzimy w pracy, że w kontekście układów samoorganizujących, pełni ono bardziej funkcje heurystyczne niż ściśle wyjaśniające. Logika procesów i rozumowań nieliniowych domaga się raczej analizy filozoficznej dotyczącej przyczynowości nieliniowej, dynamiki chaotycznej czy samoorganizacji dyssypatywnej.

Drugą niezwykle istotną kwestią w rozważanym przejściu od myślenia liniowego do nieliniowego, jest konieczne naruszenie, przy konstruowaniu metateorii odnoszącej się do układów samoorganizujących się, równowagi między wyjaśniającą i predyktywną funkcją takiego narzędzia badawczego.

Tradycyjnie mówi się, że działanie badawcze osiąga, przede wszystkim, dwa cele: (1) znajdowanie tych teorii, które najlepiej aproksymują badaną rzeczywistość i (2) konstruowanie hipotez dostarczających najlepszych przewidywań. Wychodzi temu naprzeciw idea selekcji modeli, która także nakierowana jest na wybór modelu najbliższego prawdzie i tego, który charakteryzuje się najlepszą mocą predykcji. W tym kontekście konkurują ze sobą dwa sposoby oceny wartości teorii: prostota z jednej strony i dokładność dopasowania do danych z drugiej. Ten problem można postawić jeszcze inaczej: czy celem modelu jest przede wszystkim predyktywne wykroczenie poza uzyskane dane, czy raczej interpolacja między danymi. W tym sensie prostota zbiega się z zawartością informacyjną teorii czy modelu.

I nie chodzi już tylko w tym kontekście o analizę takich klasycznych problemów, czy liniowa mechanika kwantowa wyjaśnia, czy nie wyjaśnia procesu pomiarowego; czy dokonując generalizacji naukowych w oparciu o indukcję, można im przypisywać prawdopodobieństwo. Być może badanie własności układów złożonych każe nam zrezygnować z tradycyjnego dualizmu metodologicznego [21, s. 9]:

(...) właściwy sposób traktowania problemów nie zawsze polega na liczeniu i określaniu przyszłości. Kiedy mamy do czynienia z losowością, w naszej mocy leży zrozumienie dynamicznych przyczyn, lecz ich prognozowanie jest niemożliwe. Z punktu widzenia praktycznego zachowania, zrozumienie dynamiki układów złożonych jest często ważniejsze niż uzyskanie definitywnych rozwiązań, zwłaszcza gdy okazuje się, iż jest to niemożliwe.

Badanie nieliniowości, zarówno w sensie przedmiotowym, jak i teoretycznym, prowadzi często do gruntownej reorganizacji problematyki naukowej: od rozumienia układów złożonych w kluczu samo-regulacji do samo-organizacji; od badania struktur i stanów do badania procesów i funkcji; od porządku i stabilności do niestabilności i dynamiki chaosu; od redukcjonizmu do emergentyzmu; od analizy „bycia” do analizy „stawiania się”; od pojedynczych ścieżek rozwoju układu do „wiązek” trajektorii; od przewidywalności do przypadkowości.

4.2 Poszukiwanie metodologii interdyscyplinarnej/transdyscyplinarnej

Poznanie praw rządzących złożonością układów samoorganizujących się, zdaje się być, na pierwszy rzut oka, swoistą metodologiczną antytezą dla promowanego wspólnie efektywnego, a zatem i lokalnego wyjaśniania w nauce oraz ma prowadzić do formułowania nowej postaci holizmu w naszym patrzeniu na świat. Zdaniem autorów tej pracy nie jest to jednak kontynuowanie realizacji *marzenia o teorii ostatecznej*, ale próba pogodzenia obu nurtów obecnych we współczesnej metodologii nauk; a zatem spodziewamy się nie tyle zupełnie nowego paradygmatu w sensie Kuhna, ale, jeśli można tak powiedzieć *meta-paradygmatu*.

Optymizm z przełomu XIX i XX wieku, dotyczący ważności twierdzenia o jednolitości nauki i uznania metodologii nauki w sensie *science* za jedyne źródło wartościowej wiedzy, został zachwiany przez odkrycia naukowe i zmiany paradygmatu dziejące się właśnie w obszarze nauk ścisłych. We współczesnej humanistyce natomiast od pewnego czasu coraz bardziej widoczne jest zjawisko zacierania się sztywnych granic między poszczególnymi dyscyplinami. Badacze piszą o polimorficzności nauki, która ujawnia się nie tylko w interdyscyplinarnej współpracy, ale „również w aspekcie hierarchicznym, który funduje typologiczne ramy-metafory denotujące konkretne przypadki rozmaitych relacji zależności pomiędzy dziedzinami nauki” [12, s. 50]. Wydaje się, że sytuacja w ogólnie pojętej nauce współczesnej obala dwa mity:

1. Mit o jednolitej nauce.
2. Mit o teorii ogólnej („niemal eschatologiczna idea ostatecznego poznania prawdy o świecie” [12, s. 47]).

Z metodologicznego punktu widzenia niezwykle ciekawe są próby charakterystyki i niejako porządkowania przedmiotów zainteresowań filozofii nauki widziane w pewnej perspektywie historycznej. Na następujących dwóch przykładach widać doskonale ewolucję, jakiej podlega sama refleksja nad nauką:

Zrozumienie takiej zmiany jest natomiast zależne od semantycznych (zmiana znaczenia) i odniesieniowych (zmiany obiektów) własności teorii traktowanych jako zbiory zdań. Dlatego nie jest już wystarczająca filozofia nauki dominująca przez wiele lat i traktowana jako logika nauki. W tej węziej rozumianej metodologii nauk (m.in. R. Carnap, C. G. Hempel) było jedynie miejsce na zmiany teoretyczne, przedmiotowe z wyłączeniem zmian metodologicznych, a

także filozoficznych. W nurcie radykalnym natomiast (m.in. N. R. Hanson, St. Toulmin, Th. S. Kuhn, P. K. Feyerabend), przeciwnym do racjonalizmu krytycznego, na pierwszy plan wysuwano historyczną zmienność nie tylko teorii naukowych, ale i norm metodologicznych, zadań nauki i innych jej składników, np. problemów pojęciowych oraz empirycznych, czy też takich kategorii, jak confirmacja, adekwatność, świadectwo oraz społeczność ludzi uprawiających naukę [13, s. 12].

Jedną z prób uchwycenia tej dynamiki nauki, o której pisze Z. Hajduk jest porządkowanie zainteresowań metaprzmiotowych według tzw. *units of methodological analysis* ujmowanych specyficznym w aspekcie czasowym rozwoju filozofii nauki¹⁰:

- pojęcia - wiedza jako bezcielesne idee (Platon) lub jako idee po prostu (empiryzm brytyjski);
- zdania i sądy (filozofia analityczna);
- prawa;
- teorie;
- paradygmaty, tradycje badawcze;

lub według działań semiotyki:

- syntaktyka (poziom wyrażenia, dychotomia między terminami teoretycznymi i obserwacyjnymi, logiczny empiryzm);
- semantyka (określenie znaczenia terminów teoretycznych);
- pragmatyka (element „nadawcy” i „odbiorcy” przekazu naukowego, wyjaśnianie, wskazanie kryteriów akceptacji i rejekcji).

Swoistym wyzwaniem dla metodologów, zajmujących się filozoficznymi implikacjami układów samoorganizujących się, jest wyodrębnienie tych *units of methodological analysis*. Z pewnością będą to „pojęcia” i „prawa” funkcjonujące na analizowanych poziomach złożoności czy organizacji; niewątpliwie kluczową rolę będzie pełnić analogia.

Biorąc pod uwagę analizy ściśle metodologiczne, metaprzmiotowe i metateoretyczne badanie własności układów samoorganizujących się może okazać się niezwykle istotne także w analizie ewolucji nauki jako takiej (zmiany paradygmatów, formowania się nowych programów badawczych). Będzie to swoiste antidotum na pewne zjawisko we współczesnej nauce, nazywane przez metodologów: *high speed methodology*. „Szybko zmieniająca się rzeczywistość nie daje badaczom szans na w pełni naukowe analizy, zaś praktykom -

¹⁰Jedną z modnych współcześnie form postrzegania wiedzy jest chwytliwe pojęcie memu. Główne tezy memetyki opierają się na przekonaniu, że wiedza jako taka jest pewnym obiektem oraz że można łatwo wyróżnić jednostki wiedzy i dokonywać na nich operacji: porcjować, przelewać, dodawać, pomnażać.

na oparciu swoich działań na pewnych podstawach.” [46, s. 287]. J. Waszkiewicz, analizując problematykę szybkiego analizowania i prognozowania procesów, dostrzega widoczny wpływ na metodę naukową także całego zbioru czynników:

- Wpływ techniki informatycznej i komunikacyjnej na łatwość wymiany wiedzy.
- Globalizacja wraz z kluczowymi dla nauki mechanizmami: działalność naukowa przebiega w środowisku niestabilnym gospodarczo i politycznie.
- Zjawisko tzw. *supertechniki*: łączenia współczesnej techniki i nauki dla projektów o ogromnym zasięgu i znaczeniu (LHC, Human Genome Project).
- Sposób uprawiania nauki i zdobywania wiedzy narażony jest na wpływ czynników nienaukowych:
 - nacisk czasu wynikły z braku równowagi i proporcji między tym, co wiemy, a tym, co wiedzieć powinniśmy;
 - istnienie ograniczeń finansowych;
 - tworzy się „byty teoretyczne” do rozwiązywania konkretnego problemu („hipoteza (czy teoria) jednorazowego użycia”); „wiedza zanurzona w kontekst działań opartych na prowizorycznych i zmodyfikowanych strategiach sama jest również prowizoryczna.” [46, s. 293]

Uzyskiwana w takim kontekście wiedza staje się lokalna w sensie swojej całkowitej zależności od kontekstu. Wspomniana *high speed methodology* wyraża się w skróceniu czasu na pojawianie się nowych, alternatywnych hipotez, przyspiesza proces propagacji idei naukowych, obecny i twórczy w dyskursie staje się nawet element prowokacji intelektualnej.

Badanie układów samoorganizujących się ma także to szczególne znaczenie dla nauki, że sama nauka (*science*) jest układem samoorganizującym się, który, nawet w tradycyjnych ujęciach, rozumiany jest temporalnie jako twór rozwijający się poprzez okresy stabilności i fundamentalnych zmian.

4.3 Samoorganizacja a emergencja

Słowo „emergencja”, mimo że jest używane przez naukowców w mniej lub bardziej intuicyjnym znaczeniu, jest pojęciem filozoficznym, i jako takie pojawiło się po raz pierwszy (1875) w G. H. Lewes’a *Problems of Life and Mind*¹¹. Rozwój interpretacji i swoista *kariera* filozoficzna pojęcia emergencji nabiera tempa w latach 20-tych ubiegłego wieku głównie dzięki pracom Samuela Alexandra, C.L. Morgana i C.D. Broad’a [1, 30, 9]. Współcześnie do klasyków emergencji można już chyba zaliczyć J. Kima i P. Humphreys’a [23, 16]. Niewątpliwie wśród najnowszych prac ważnych należy wymienić [8, 38].

Nie ma tu miejsca na szczegółową analizę prac wymienionych autorów, niemniej jednak warto zauważyć, że sam rozwój koncepcji emergencji również wykazuje cechy emergentne.

¹¹Używane przez autora w odniesieniu do przemian ewolucyjnych: pojawienia się procesów życiowych i procesów mentalnych jako *emergentnych*.

Na pewno warto zwrócić uwagę na wielość odmian emergencji a związana z nią trudność w metodologicznej analizie badanej relacji wynika, naszym zdaniem, z kilku podstawowych kwestii:

- Istnieją trudności ze wskazaniem na podstawowe konotacje „emergencji” (ontologia, epistemologia czy metodologia). Alexander wykazuje, że emergencja dotyczy nowych jakości, które ujawniają się na nieredukowalnych do siebie poziomach rzeczywistości. Broad dostrzega relację emergencji głównie na poziomie opisu rzeczywistości (na przykład w kontekście pytania: czy chemia jest redukowalna do fizyki, czy nie).
- Wciąż nie rozstrzygniętym pozostaje pytanie o jednostkę (o naturę swobodnego *kwantu*) emergencji. Kandydatami są: nowy efekt, informacja, własność, prawo, struktura, zjawisko.
- Jeśli na jakimś poziomie organizacji pojawią się własności emergentne, często potrzeba zupełnie nowych instrumentów teoretycznych. Emergencja zakłada istnienie możliwych do wyodrębnienia poziomów rzeczywistości. W kontekście prowadzonej w pracy dyskusji metodologicznej dotyczącej układów złożonych warto relację emergencji wykorzystać jako narzędzie, które wyodrębnia już nie *poziomy rzeczywistości*, ale istotnie różne *poziomy opisu* tego samego fragmentu rzeczywistości [8].

For instance, temperature is an example of a feature that is relevant in thermodynamics but irrelevant in Newtonian or statistical mechanics. Light rays are relevant in geometric optics, but they are irrelevant in Maxwell's electrodynamics. The chirality of molecules is relevant in physical chemistry, but it is irrelevant in a Schrödinger-type quantum mechanical description. Nevertheless, there are strategies for implementing the context due to which temperature is relevant in thermodynamics, due to which rays are relevant in geometric optics, a due to which chirality is relevant in physical chemistry, at the level of statistical mechanics, of electrodynamics, and of quantum mechanics respectively.

- Analiza bardziej szczegółowa odsłania coraz to nowe „oblicza” emergencji ujawniające się w zależności od środowiska, w którym użyjemy tej kategorii jako narzędzia wyjaśniającego. Pojęcie emergencji znajduje zatem zastosowanie nie tylko w naukach biologicznych, ale także w matematyce, mechanice kwantowej, teorii chaosu, chemii fizycznej czy filozofii umysłu oraz, co warto podkreślić, pojawiają się prace, które wskazują, że możliwe jest mówienie o emergencji także w *środowisku* czystego systemu logicznego [34].
- Wspomniane trudności wynikające w procesie analizy filozoficznej relacji emergencji pojawiają się także na poziomie refleksji metodologicznej. Obok trudności ze wskazaniem na jednostkę, ścisły przejaw emergencji, w podobnym stopniu trudno wyjaśnić jak emergencja „działa”, jaką naturę ma jej mechanizm; w skrócie: jak „emergują”

nowe poziomy struktur¹². Ponadto analizy wymaga istotna kwestia ściśle filozoficzna: co tak naprawdę emergencja wyjaśnia.

W kontekście rozważań nad układami samoorganizującymi koncepcja emergencji znajduje swoje filozoficzne umocowanie w próbach charakterystyki statusu dynamicznej hierarchii poziomów wyłaniających się w analizowanym procesie. W odniesieniu do badanych w pracy układów złożonych preferujemy zatem dynamiczną strukturalną koncepcję emergencji. Chodzi o pojawienie się w układzie nowej własności, której nie jesteśmy w stanie dedukcyjnie przewidzieć ani wcześniej zaobserwować. Pojawienie się własności emergentnej jest związane z oddziaływaniami między składnikami układu na wyższym poziomie. Samoorganizacja natomiast oznacza pojawienie się nowych struktur w systemie bez specjalnego wpływu czynników zewnętrznych.

4.4 Filozoficzny *słownik* badań nad samoorganizacją

Nasza praca, ze względu na swój głównie heurystyczny charakter, jest raczej pewnym przyczynkiem: zakreśleniem możliwego obszaru badań i refleksji nad fenomenem układów samoorganizujących się oraz zaproponowaniem problematyki metaprzekmiotowej, w tym filozoficznej. Spróbujmy wyliczyć zatem najważniejsze konotacje terminologiczne wymagane do jakiegokolwiek refleksji nad samoorganizacją.

1. **EMERGENCJA** - układ złożony jest czymś więcej niż sumą części składowych, jest układem ewoluującym w taki sposób, że wyłaniające się nowe własności nie dają się zredukować do własności stanów pierwotnych; mimo rozmycia znaczeniowego pojęcia „emergencja”, w badaniu układów samoorganizujących się wspólnym mianownikiem stają się podstawowe, wyróżniające emergentność własności: nieredukowalność, nieprzewidywalność, pojawienie się nowych parametrów i praw (potrzeba nowego języka opisu), implikowana hierarchiczność, itp.,
2. **ZŁOŻONOŚĆ** - układom samoorganizującym się jako układom złożonym przysługują określone własności w różnym znaczeniu:
 - decentralizacja: układy złożone przejawiają własność wielu różnorodnych powiązań między swoimi częściami;
 - w układach złożonych występuje jako takie zjawisko samoorganizacji i emergencji;
 - nawet jeśli znamy własności części składowych danego układu złożonego i relacji między nimi, trudno jest układy złożone modelować i przewidywać ich zachowania;
 - predykat złożoności jest wielokontekstowy, rozważamy go w odniesieniu do rzeczy: w systemach chemicznych, biologicznych, fizycznych a także w kontekstach społecznych;

¹²Celowo w pracy nie posługujemy się polskim odpowiednikiem *nieceleganckiego* czasownika „emergować” - „wyłaniać się”. Mimo wątpliwej poprawności leksykalnej polskiego „emergować”, zdaje nam się, że bez dodatkowych wyjaśnień, lepiej niż „wyłaniać się”, kryje bogaty kontekst relacji emergentnych.

- predykat złożoności jest wieloaspektowy: układy samoorganizujące jako układy złożone badamy przy użyciu tych samych narzędzi poznawczych uwzględniając: wielość elementów, wielość i jakość powiązań między nimi, nie-liniowość, łamanie symetrii, hierarchiczność i emergencję.
3. **SYSTEMOWOŚĆ** - badając zjawisko samoorganizacji, zawsze dokonujemy tego i poruszamy się w obrębie jakiejś całości, a zatem bierzemy pod uwagę specyfikę elementów, relacje między nimi, zachowanie składników i całości, stan systemu oraz jego granice i oddziaływanie z „otoczeniem”.
 4. **KAUZALNOŚĆ** - w zależności od przyjętych narzędzi poznawczych różnie rozumiana: (1) w kontekście teorii dynamicznych swoisty *punkt* pojawienia się przyczyny ulokowany jest w punkcie bifurkacji, w takim punkcie system *wybiera* jedną z dwóch równie prawdopodobnych ścieżek rozwoju; (2) w tradycyjnym filozoficznie ujęciu przyczynowość ujęta w następujący sposób: (a) wpływ starego na nowe równoważny Arystotelesowskiej przyczynie sprawczej, (*causa efficiens*); (b) wpływ nowego na obecne – przyczynie celowej, (*causa finalis*); (c) wpływ składników poziomu -mikro, w układzie, na całościowo rozumiany poziom -makro – przyczynie materialnej, (*causa materialis*); (d) wpływ makro-poziomu na mikro-poziom – przyczynie formalnej, (*causa formalis*); (3) w autonomicznym, współczesnym języku układów złożonych mówi się o *kauzalności cyrkularnej*, która przejawia się w następowaniu sprzężeń zwrotnych między procesami p_1, p_2, \dots, p_n ($n \geq 1$), gdzie p_1 wpływa na p_2 , p_2 na p_3 , ..., p_{n-1} na p_n , oraz p_n na p_1 . Kausalność objawia się w tym, że poziom elementów i poziom struktury są, nie tylko złożone, ale powiązane w sposób przyczynowy.
 5. **NIELINIOWOŚĆ** - własność relacji emergencji rozumianej diachronicznie, przyczyn i skutków nie da się modelować liniowo: podobne przyczyny mogą mieć różne skutki, małe/duże zmiany w przyczynach mogą mieć duże/małe odwzorowanie w skutkach.
 6. **INFORMACJA** - po pierwsze układy samoorganizujące generują informację, po drugie informację można potraktować jako pewien rodzaj relacji procesualnej między składnikami układu, uzyskanej w systemie jako jednostka emergentna.
 7. **HIERARCHICZNOŚĆ** - rozumiana w kontekście układów samoorganizujących dwojako; (1) emergentny poziom wyższy posiada nowe własności w stosunku do poziomu niższego (podejście synchroniczne); (2) hierarchia poziomów rozumiana jest dynamicznie, ewolucyjnie, jako efekt procesu samoorganizacji. Tak rozumiana strukturalna hierarchia posługuje się pojęciami porządku i chaosu. *Porządek* na poziomie B uzyskany z *chaosu* (proszę wybaczyć takie upraszczanie, to tylko „słownik”) na poziomie A , staje się *chaosem* dla nadrzędnego w tej hierarchii w stosunku do B poziomu C .
 8. **OGÓLNOŚĆ/JEDNOŚĆ vs. SPECYFICZNOŚĆ/WIELOŚĆ** - próbując charakteryzować i zestawiać ze sobą różne złożone układy samoorganizujące, możemy obrać dwie alternatywne strategie. Określony typ analizowanych układów posiada cechy odróżniające go od innych typów. Można także wskazywać na istnienie ogólnych zasad i praw,

które cechują układy samoorganizujące się w ogólności. Oba te podejścia znalazły odzwierciedlenie w tej pracy.

9. **METODOLOGIA TRANSDYSCYPLINARNA** - postuluje się przekraczanie granic dzielących poszczególne domeny działań naukowych, niekoniecznie w celu konturowania bardzo ogólnych teorii redukujących lokalne teorie efektywne, bardziej poszukując narzędzi dostarczających podstawy głębszego rozumienia zastanej różnorodności. Podstawowymi jednostkami metodologicznymi są tu: teorie układów dynamicznych, otwarte systemy nieliniowe, teorie układów złożonych i układów samoorganizujących się.
10. **SAMO-PRODUKCJA** - proces regeneracji warunków własnej egzystencji (przykłady: organizm biologiczny, systemy pogodowe, skupiska gwiazd); w samo-produkcji nie chodzi o tworzenie się układu niejako od zera. Systemy samo-produkujące są pojęciem szerszym niż tzw. systemy autopoietyczne, które, w przeciwieństwie do pierwszych cechuje obecność procesów wytwarzania i regeneracji tylko przy użyciu własnych elementów. Układy samo-produkujące mogą być zatem w tym sensie operacyjnie otwarte.
11. **SAMO-PODTRZYMYWANIE** (self-maintenance) - cecha lub proces prowadzący do utrzymania przez układ/organizm pewnej stabilności wewnętrznej, zwłaszcza w warunkach istnienia zaburzeń (przykład: komórki Bernarda);
12. **AUTONOMIA** - rozumiana w tym kontekście jako własność układu złożonego, która niejako koduje jego tożsamość.
13. **UKŁADY SYNERGETYCZNE** - traktując rzecz bardzo intuicyjnie, chodzi o układy zorganizowane, które zdolne są do działań, które wykraczają poza możliwości składników tych układów, wziętych osobno. Układ synergetyczny może, ale nie musi być układem samo-produkującym; natomiast układy samoorganizujące muszą być synergetyczne.
14. **SAMO-REGULACJA** - pojęcie o słabym charakterze teleologicznym, układ, wykorzystując mechanizm sprzężenia zwrotnego, utrzymuje stan swoich parametrów w określonym reżimie wartości (przykład: układ klimatyzacji lub ogrzewania sterowany termostatem).
15. **UKŁAD ANTYCYPUJĄCY** - chodzi o układy posiadające cechę/umiejętność *dostrojenia* swojego stanu, w celu umożliwienia zmiany zachowań w zależności od przyszłych warunków.
16. **SAMO-UKIERUNKOWANIE** - układ ma taką cechę, jeśli wykorzystuje mechanizm sprzężenia zwrotnego do sterowania własnym działaniem.
17. **NIE-LINIOWOŚĆ, NIE-ZAMKNIĘTOŚĆ, NIE-STABILNOŚĆ** - trzy „nie-”, fundamentalne dla rozumienia istoty i dynamiki układów samoorganizujących. *Nie-liniowość* łamie zasadę superpozycji przyczyn w badanym układzie; własność bycia układem złożonym nie jest identyczna z prostym sumowaniem własności jego składników, pojawia

się też ciekawa własność: liczba powiązań między elementami układu rośnie szybciej niż liczba elementów. *Nie-zamkniętość* - każdy badany układ faktycznie może być rozważany jako układ izolowany tylko w ograniczonym przedziale czasowym. Najlepiej bada się tę cechę układów samoorganizujących poprzez analizę wniosków z zasad zachowania stosowanych do układów zamkniętych.

5 Podsumowanie

W pracy dokonaliśmy po pierwsze przeglądu układów samoorganizujących w szerokiej klasie dziedzin badawczych od biologii do kosmologii. Następnie wskazaliśmy na klasę problemów filozoficznych, które one generują.

Badania układów samoorganizujących są ważne dla poznawania natury emergencji. Goldstein definiuje emergencję w następujący sposób:

(...) the arising of novel and coherent structures, patterns and properties during the process of self-organization in complex systems.

Wobec tego *case study* tych układów może wiele wnieść do naszego rozumienia tego pojęcia, które ciągle wymaga doprecyzowania.

Niezwykle interesującymi filozoficznie są pytania dotyczące ontologicznych uwarunkowań samoorganizacji. Interesuje nas problem: jak i dlaczego samoorganizacja jest możliwa w układach złożonych. Corning wymienia następujące charakterystyki emergencji/własności emergentnej:

1. Radykalna nowość (cechy wcześniej nieobserwowane w układzie).
2. Spójność i korelacja (układ tworzy integralną całość przejawiającą cechy trwałe).
3. Istnienie globalnego makropoziomu.
4. Jest produktem dynamicznego procesu.
5. Jest ostensywna, daje się bezpośrednio wykazać.

Złożone samoorganizujące układy spełniają powyższe kryteria. Zauważmy, że w przytoczonych przykładach zawsze mieliśmy do czynienia z jakąś formą, która ulegała metamorfozie.

W pracy podkreślaliśmy, że fakt istnienia układów samoorganizujących w przyrodzie generuje interesujące pytania natury filozoficznej. Na przykład, fakt istnienia układów samoorganizujących w tak wielu odległych od siebie dziedzinach otaczającej nas rzeczywistości każe docenić Arystotelesową koncepcję kauzalności.

W pracy proponujemy również odświeżenie dyskusji nad rolą teleologicznej interpretacji praw przyrody w kontekście samoorganizujących się układów (zamiast tradycyjnego ujęcia w kategoriach wariacyjnych zasad fizyki). Pokazaliśmy spektrum układów złożonych, przebiegając po różnych dziedzinach, ale też różnych skalach Wszechświata, który posiada

cechy układu samoorganizującego, jak to pokazują ostatnie prace Ambjorna, Loll i Jurkiewicza nad kosmologią kwantowej grawitacji (*causal dynamical triangulations*). Przedstawiliśmy również inspirującą ideę Lee Smolina samoorganizującego się Wszechświata, która jest równocześnie propozycją unifikacji kosmologii fizycznej i biologii.

Wymieńmy na koniec kilka, naszym zdaniem, ważnych i inspirujących pytań, natury metodologicznej i filozoficznej, związanych z badaniem układów samoorganizujących:

1. Dlaczego teorii nieliniowych układów złożonych nie da się sprowadzić do poszczególnych praw fizyki (które przecież wywodzą się z tej samej matematyki)?
2. Jaki rodzaj wyjaśniania: antropiczny, teleologiczny, dynamiczno-kausalny powinno się szczególnie badać w kontekście układów samoorganizujących?
3. Jakiego rodzaju odpowiedniości można się doszukiwać między synergetyczną koncepcją porządku/samouporządkowania, a klasycznymi koncepcjami *logosu* Heraklita lub *formy* Arystotelesa?
4. Gdzie tkwi przyczyna stabilności struktury emergentnej, jaką stanowi układ samoorganizujący na danym poziomie?
5. Czy zrozumienie układów samoorganizujących przyczyni się do wypracowania jakis spójnych modeli ewolucji materii?
6. W jakim sensie pojawienie się życia w kontekście samoorganizacji dyssypatywnej i przyczynowości nieliniowej może być traktowane jako coś koniecznego i jako wynik pewnych prawidłowości tkwiących w naturze?
7. Gdy próbujemy zmierzyć się z problemem istnienia układów samoorganizujących się, ważne staje się pytanie: czy jest możliwa do pomyślenia dla nich alternatywa ontologiczna? Być może odpowiedź na to pytanie włączy zupełnie nowy kontekst do dyskusji nad słynnym pytaniem Leibniza: *Dlaczego istnieje raczej coś niż nic*.

6 Summary

We review a broad class of complex self-organizing systems appearing in nature. In the context of these systems we point out philosophical implications for discussion of causality, holism vs. reductionism and emergence. We propose philosophical notion of emergence with emergence investigated in science for deeper and exact formulation and understanding of this concept. We have also stressed out importance of an ontological question: why actually self-organizing systems are possible.

Spis literatury

- [1] S. ALEXANDER, *Space, Time, and Deity*, Macmillan Alexander, London, 1920.

- [2] J. AMBJORN, J. JURKIEWICZ, I R. LOLL, *Semiclassical universe from first principles*, Phys. Lett., B607 (2005), s. 205–213.
- [3] ———, *The Self-Organized de Sitter Universe*, Int. J. Mod. Phys., D17 (2009), s. 2515–2520.
- [4] W. ASHBY, *Principles of the self-organising dynamical system*, J. Gen. Psych., 37 (1947), s. 125–128.
- [5] P. BAK, *How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality*, Copernicus, New York, 1996.
- [6] Y. BAR-YAM, *Dynamics of Complex Systems, Studies in Nonlinearity*, Westview Press, Westview, 2003.
- [7] J. BARYSZEW I P. TEERIKORPI, *Wszechświat - poznawanie kosmicznego ładu*, WAM, Kraków, 2005.
- [8] R. C. BISHOP I H. ATMANSPACHER, *Contextual emergence in the description of properties*, Found. Phys., 36 12 (2006), s. 1757–1777.
- [9] C. BROAD, *The Minds and Its Place in Nature*, Routledge and Kegan Paul, London, 1925.
- [10] F. CARAVELLI I L. MODESTO, *Fractal Dimension in 3d Spin-Foams*, (2009).
- [11] P. CONVENY I R. HIGHFIELD, *Granice złożoności - poszukiwanie porządku w chaotycznym świecie*, Prószyński i S-ka, Warszawa, 1997.
- [12] Ł. M. DOMINIAK, *Strategie interdyscyplinowości w perspektywie naukoznawczej*, w: Granice interdyscyplin-arne w humanistyce, J. Kowalewski, W. Piasek, i M. Śliwa, eds., Colloquia Humaniorum, Olsztyn, 2006, s. 47–59.
- [13] Z. HAJDUK, *Temporalność nauki, Kontrowersyjne zagadnienia dynamiki nauki*, RW KUL, Lublin, 1995.
- [14] H. HAKEN, *Synergetics, introduction and advanced topics*, w: Springer Series in Synergetics, H. Haken, ed., Springer-Verlag, Berlin, 2004.
- [15] ———, Scholarpedia, 3 8 (2008), s. 1401.
- [16] P. HUMPHREYS, *How properties emerge*, Phil. Sci., 64 (1997), s. 1–17.
- [17] E. JANTSCH, *The Self-Organizing Universe: Scientific and Human Implications of the Emerging Paradigm of Evolution*, Pergamon Press, Oxford, 1979.
- [18] H. JENSEN, *Self-Organized Criticality, Emergent Complex Behavior in Physical & Biological Systems*, Cambridge University Press, Cambridge, 1998.

- [19] J. JURKIEWICZ, *Czterowymiarowy wszechświat kwantowy na komputerze*, Postępy fizyki, 54 4 (2006), s. 165–173.
- [20] S. KAUFFMAN, *At Home in the Universe: The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity*, Oxford University Press, Oxford, 1996.
- [21] R. W. KELSALL, I. W. HAMLEY, I M. GEOGHEGAN, *Poznawania złożoności Obliczeniowa dynamika materii umysłu i ludzkości*, Wydawnictwo UMCS, Lublin, 2007.
- [22] ———, *Nanotechnologie*, PWN, Warszawa, 2008.
- [23] J. KIM, *Philos. Stud.*, 95 (1999), s. 3–36.
- [24] F. S. LABINI, N. L. VASILYEV, L. PIETRONERO, I Y. V. BARYSHEV, *Absence of self-averaging and of homogeneity in the large scale galaxy distribution*, *Europhys. Lett.*, 86 (2009), s. 49001.
- [25] O. LAHAV, *Observational Tests of FRW World Models*, *Class. Quant. Grav.*, 19 (2002), s. 3517–3526.
- [26] J. M. LEHN, *Toward self-organization and complex matter*, *Science*, 295 (2002), s. 2400.
- [27] A. LINDE, *The self-reproducing inflationary universe*, *Sci. Am.*, 11 (1994), s. 48–55.
- [28] T. MISTELI, *The concept of self-organization in cellular architecture*, *J. Cell Biol.*, 155 (2001).
- [29] J. MONOD, *Przypadek i konieczność. Esej o filozofii biologii współczesnej*, Głos, Warszawa, 1990.
- [30] C. MORGAN, *Emergent Evolution*, Holt, New York, 1923.
- [31] G. NICOLIS I I. PRIGOGINE, *Self-organization in nonequilibrium system*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1977.
- [32] M. ORLIK, *Reakcje oscylacyjne - porządek i chaos*, Wyd. NT, Warszawa, 1996.
- [33] M. PACZUSKI I P. BAK, *Self-organization of complex systems*, arXiv:9906077, (1999).
- [34] S. PALMQUIST, *Emergence, evolution, and the geometry of logic: Causal leaps and the myth of historical development*, *Found. Sci.*, 12 (2007), s. 9–37.
- [35] F. PASLACK, *Urgeschichte der Selbstorganisation*, Vieweg, Braunschweig, 1991.
- [36] A. SCOTT, *Nonlinear science: emergence and dynamics of coherent structures, 2nd ed.*, Oxford University Press, Oxford, 2003.
- [37] T. D. SEELEY, *When is self-organization used in biological system?*, *Biol. Bull.*, 202 (2002), s. 314–318.

- [38] M. SILBERSTEIN I J. MCGEEVER, *The search for ontological emergence*, *Phil. Quarterly*, 49 (1999), s. 182–200.
- [39] L. SMOLIN, *Cosmology as a problem in critical phenomena*, arXiv:9505022, (1995).
- [40] L. SMOLIN, *Życie Wszechświata, Nowe spojrzenie na kosmologię*, Amber, Warszawa, 1998.
- [41] L. SMOLIN, *Cosmological natural selection as the explanation for the complexity of the universe*, *Physica A*, 340 (2004), s. 705–713.
- [42] M. SZYDŁOWSKI, *Filozofia Nauki*, 16 (2005), s. 9–26.
- [43] C. TANG I K. WIESENFELD, *Self-organised criticality: an explanantion of 1/f noise*, *Phys. Rev. Lett.*, 59 (1987), s. 381–384.
- [44] T. TŁACZATA, *Wiadomości Chemiczne*, 45 (1991), s. 440–445.
- [45] H. VON FOESTER, *Cybernetics*, w: *The Encyclopedia of Artificial Intelligence*, 2nd edition, S. Skapiro, ed., John Wiley and Sons, New York, 1992, s. 309–312.
- [46] J. WASZKIEWICZ, *Szybkobieżna metodologia*, w: *Porozumiewanie się i współpraca uczonych*, J. Goćkowski i M. Sikora, eds., Secesja, Kraków, 1997, s. 287–302.
- [47] S. WEINBERG, *Pierwsze trzy minuty*, Iskry, Warszawa, 1980.
- [48] G. WHITESIDES I B. GRZYBOWSKI, *Self assembly at all scales*, *Science*, 295 (2002), s. 5564.