

Mieczysław Chorąży

*Centrum Onkologii – Instytut im. Marii Skłodowskiej-Curie,
Oddział w Gliwicach*

Złożoność i hierarchia organizmów żywych*

COMPLEXITY AND HIERARCHY OF LIVING ORGANISMS

In this essay I presented basic information on complexity of life, starting with general characteristics of complexity. The complexity was explained in terms of quantity of parts, organized by not their summation, but by their ability to self-organization and creation of novelty on the way to the wholeness in a course of evolution. A short review of evolving cell from elementary particles and atoms, through simple chemical molecules and macromolecules, self-organized networks and morphological structures of the cell were presented. All living organisms reveal distinct hierarchical organization from basic level (atoms, molecules) to cells and multicellular individuals. Complexity is increasing with the increased hierarchical levels. However phenomena of life on higher level of hierarchy can not be explained or reduced to characteristics and properties of chemical molecules but by interaction between them and integration of various molecular processes at a lower levels of hierarchy. More detailed view on hierarchical organization of the human, relation between various levels of hierarchy, and emergence of highest human abilities belonging to the broad level of culture are discussed.

Key words: complexity, hierarchy, hierarchical levels, reductionism, human complexity.

Do największych osiągnięć ostatniego stulecia Heller¹ zalicza wniosek, że świat nie jest statyczny, lecz podlega ewolucji. Wniosek ten

* Przedruk za zgodą Redakcji kwartalnika „Nauka” 3(2011), s. 89-112.

¹ M. Heller, *Logika stworzenia*, [w:] *Informacja a rozumienie*, M. Heller (red.), Kraków 2005.

nie dotyczy tylko stale ekspandującego kosmosu, lecz również świata ożywionego na naszej planecie. Powstanie na Ziemi życia i rozwój organizmów żywych z materii nieożywionej aż do form współczesnych jest dowodem na słuszność tego wniosku. Budowa i funkcja istot żywych, zwłaszcza na poziomie molekularnym, są obszarem o tak wielkiej złożoności, że przekracza to naszą wyobraźnię. To swego rodzaju „mikrokosmos”, którego budowę i funkcje znamy jedynie fragmentarycznie i stale nie rozumiemy, jak funkcjonuje w całości. Często opisujemy go w sposób statyczny. Wszystkie systemy żywe są systemami otwartymi i podlegają tym samym cyklom: wyłonienie się, rozwój, uwiad i śmierć. Zjawisko śmierci towarzyszy ewolucji wszystkich organizmów żywych od początku ich powstania. Śmierci nie można uznawać za formę kary nałożonej wyłącznie na człowieka za grzechy prarodzciców. Systemy żywe są złożone ze strukturalnych i funkcjonalnych podjednostek funkcjonujących w czterowymiarowej czasoprzestrzeni.

Współczesna biologia chce uzyskać scaloną wiedzę o strukturze i działaniu złożonych systemów, jakimi są organizmy żywe, wyrobić o nich całościowy, syntetyczny obraz i choćby w części zrozumieć, na czym polega fenomen życia z jego różnymi stanami (np. choroba). Złożony system składa się z wielkiej liczby podjednostek (elementów, części), które współdziałają ze sobą. Powstające u początków życia na Ziemi złożone systemy miały charakter chaotyczny, nieprzewidywalny, choć nie były to zjawiska zupełnie chaotyczne i anarchiczne. Początkowy stan szybko ewoluował w kierunku niechaotycznej, zorganizowanej złożoności. U podstaw tego procesu leży tendencja do samoorganizacji i powstania uporządkowanych systemów złożonych². Złożoność jest immanentną cechą świata żywego, choć jak zauważa Bennett³ takie właściwości życia jak wzrost, rozmnażanie, adaptacja są bardziej zależne od funkcji niż od struktury, gdyż nieżywe ludzkie ciało jest stale jeszcze złożone, choć funkcjonalnie jest już inertne.

Wraz z ewolucją organizmów żywych, złożoność się zwiększała, osiągając swój szczyt u człowieka. Ewolucyjny obraz procesów „kreacji życia” znajduje swoje wsparcie także w fizyce. Ilya Prigogine⁴ wyjaśnił fenomen życia na gruncie drugiej zasady termodynamiki, pokazując jak z chaosu wyłania się porządek. Według niego, układy

² P. Davies, *Introduction: Toward an emergentist worldview*, [w:] *From Complexity to Life*, N. H. Gregersen (red.), Oxford – New York 2003, s. 3-16.

³ Ch. H. Bennett, *How to define complexity in physics, and why*, [w:] *From Complexity...*, dz. cyt., s. 3-16.

⁴ I. Prigogine, *Introduction to thermodynamics of irreversible processes*, Springfield Illinois 1955. Por. także: http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1977/prigogine-lecture.html?print=1

termodynamicznie otwarte – na przykład takie, jak organizmy żywe – wymieniają materię i energię z otoczeniem i mogą lokalnie odwrócić proces wzrostu entropii. W efekcie tego „wyspy” o niskiej entropii – organizmy żywe – osadzone są na „morzu” wysokiej entropii – w swoim środowisku. W przeciwieństwie do organizmów żywych, świat nieożywiony stanowią układy izolowane niezdolne do wymiany energii i materii lub układy zamknięte, zdolne jedynie do wymiany energii.

Złożone fenomeny życia von Bertalanffy⁵ usiłował ująć w „Ogólną Teorię Systemu” (ang. *General System Theory*). Koncepcja zmierzała do znalezienia uniwersalnych zasad dotyczących organizacji, działania i interakcji jednostek składowych, ale w kontekście „całości” i odnosiła się do różnych otwartych i zamkniętych systemów naszej planety.

Złożoność ma znaczący wpływ na postrzeganie świata i poglądy filozoficzne.

Materialiści uznają, że realny świat to świat materialny. Nie ma bytów niematerialnych. Świat ożywiony, nawet tak złożony jak człowiek, jest światem materialnym, zatem można go poznać dogłębnie tylko przez podejście redukcjonistyczne, to jest przez analizę jego części składowych. Po wielkich odkryciach roli DNA i sformułowaniu dogmatu, że istota życia tkwi w genach, pogląd ten ukierunkował na wiele lat problematykę badawczą w biologii, a u niektórych uczonych wzbudził przekonanie o rychłym i pełnym poznaniu zjawiska życia we wszystkich jego wymiarach. Oponenti tego materialistycznego poglądu dowodzą, że wprawdzie wyższe poziomy złożoności wychodzą z poziomów niższych mających charakter fizyczny (materialny), to jednak nie są do nich (np. genów, białek) w pełni redukowalne. Dowodem na to są choćby dwa fakty. Jednojąkowe bliźnięta, mimo posiadania identycznego genomu, nie są w życiu dorosłym identycznymi osobowościami; w skrajnych przypadkach jeden bliźniak może być, na przykład, uosobieniem dobra, a drugi zła, jeden może zapadać na chorobę o cechach choroby genetycznej, a drugi nie. Także znany od dawna fakt kształtowania osobowości człowieka przez dwie różne drogi dziedziczenia: dziedziczenie genetyczne i dziedziczenie kulturowe wskazuje, że najwyższy stan złożoności człowieka (sfera kulturowa w bardzo szerokim znaczeniu⁶) formują także, i to w stopniu zasadniczym, inne elementy (jak np. szeroko pojęte środowisko), a nawet elementy niematerialne.

⁵ L. von Bertalanffy, *General System Theory*, <http://panarchy.org/vonbertalanffy/systems.1968.html>.

⁶ Por. A. Peacocke, *God and Science*, London 1996.

Artykuł wprowadzający do biologii systemów⁷ wymaga uzupełnienia o podstawowe zagadnienia i koncepcje dotyczące: złożoności i hierarchicznej organizacji żywych organizmów, procesu samoorganizacji, zjawiska emergencji i o zasady regulacji między poziomami hierarchicznymi. Obecny esej jest takim częściowym uzupełnieniem.

Podstawowe cechy złożoności

Prosty system liniowy powstaje z dodawania jego podjednostek (części). Zachowanie takiego systemu jest przewidywalne, gdyż wynika z sumowania zmiennych. Systemy biologiczne są systemami złożonymi.

System złożony lub złożoność (ang. *complexity*) ma różne definicje i różne znaczenie w różnych obszarach nauki. W odniesieniu do biologii, system złożony to taki system, który składa się z dużej liczby zwykle blisko związanych podjednostek (części), a oddziaływanie między nimi nie jest proste (nie jest liniowe), lecz podlega złożonym algorytmom. W złożonym systemie całość nie jest zwykłą sumą jego części, a te nie mogą być wydzielone (wyizolowane) z niego bez destrukcji systemu. Złożoność cechuje się brakiem symetrii lub „złamaniem symetrii”; poznanie tylko fragmentu całości nie pozwala odtworzyć całości. Nawet znając właściwości poszczególnych części i reguły rządzące ich interakcją, nie jest sprawą prostą postulować i prognozować zachowanie systemu jako całości.

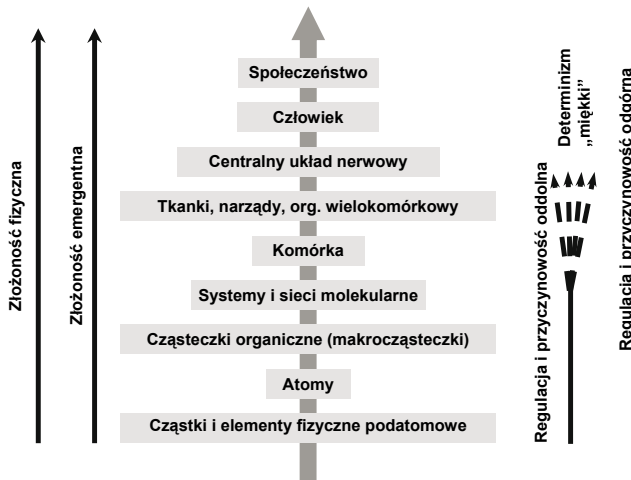
Determinizm głosi, że wszelkie zdarzenia mają swój związek przyczynowo-skutkowy. Ale w systemach żywych złożoność i plastyczność sieci oddziaływujących makrocząsteczek na różnych poziomach hierarchicznych (por. niżej) są tak wielkie i mają nieliniowy charakter, że wnioskowanie deterministyczne ma ograniczone zastosowanie. Wysoce uproszczony ogląd wzrastającej złożoności, od elementów podatomowych do społeczeństwa pokazuje Ryc.1.

Oczywistym jest, że stan i funkcje tak złożonych systemów, jak społeczeństwo lub organizm człowieka (szczególnie mózg) nie mogą być rozpatrywane jako wynik zjawisk bezwzględnie deterministycznych określonych przez poziom atomowy; zatem nie mogą być w pełni poznane przez analizę redukcjonistyczną. Pogląd, że wszelkie stany i zdarzenia łącznie z funkcjami umysłowymi mają swoje przyczyny i podlegają prawom przyrody określamy jako determinizm „twardy” (naukowy). Procesy życiowe przebiegające w skomplikowanych systemach biologicznych rzadko dają się przedstawić w postaci liniowych

⁷ M. Chorąży, *Wprowadzenie do biologii systemów*, „Nauka” 1(2011), s. 59-84.

zależności i są lepiej opisywane przez podejście probabilistyczne i „deterministyczny chaos”⁸. W takich systemach końcowy efekt jest uzależniony od warunków początkowych, a te są wrażliwe nawet na niewielkie zmiany, to znaczy, że nawet drobne zmiany warunków początkowych mogą dać bardzo duże różnice w wynikach końcowych (por. znany „efekt motyla” w prognozowaniu pogody). Wysoce złożone procesy w organizmach żywych, zwłaszcza wyższe funkcje mózgu, w których przyczyna nie jest oczywista, określane są jako determinizm „miękki”.

Także spojrzenie fizyka potwierdza ten ogląd: już zagadnienie trzech ciał (np. trzech zderzających się kul, czy też trzech ciał oddziałujących grawitacyjnie) nie znajduje na gruncie mechaniki klasycznej – teorii deterministycznej – ścisłego rozwiązania i trzeba szukać rozwiązań przybliżonych. Mechanika kwantowa odchodzi więc od determinizmu na rzecz probabilistycznego opisu obiektów i zdarzeń. Dodać jednak trzeba, że niektórzy wybitni uczeni odrzucali pogląd o losowości zdarzeń – brak przekonania, co do jego prawdziwości stał za sławnym powiedzeniem Einsteina, że „Bóg nie gra w kości”.



Ryc. 1. Uproszczony schemat hierarchicznych poziomów organizmów żywych na przykładzie człowieka. Ogólne relacje między poziomami.

Poziom niższy nie determinuje w pełni efektu fenotypowego na poziomie wyższym i, przynajmniej w obecnym stanie naszej wiedzy

⁸ Por. J. Jura, P. Węgrzyn, J. Jura, A. Koj, *Regulatory mechanisms of gene expression: complexity with elements of deterministic chaos*, „Acta Bioch. Pol.” 53(2006), s. 1-9.

i możliwości metodycznych, nie objaśnia zachowań poziomu wyższego. Wynika to z faktu, że w systemach żywych oddziaływania mają nieliniowy charakter, tj. nie ma prostej, liniowej, numerycznej zależności między przyczyną a skutkiem: podobne przyczyny mogą wywoływać różne skutki, a małe przyczyny – duże skutki i odwrotnie. Funkcje regulacyjne biegną w obu kierunkach.

Najniższe poziomy życia (system i sieć cząsteczek w komórce) opisywane przez fizykę i chemię mają kluczową pozycję dla zrozumienia procesów biologicznych. Jednak teoria relacji części do całości (mereologia) w odniesieniu do organizmów żywych również nie jest zależnością prostą. Złożoność wynika z hierarchicznej struktury materii, relacji topologicznych i relacji przyczynowych.

Wyjaśnienie makrozjawisk przez deterministyczny mechanizm, mający początek na niższym poziomie (mikrodeterminacja), jak również zasięg wyjaśnień mikroredukcyjnych w odniesieniu do organizacji wyższych poziomów zjawisk biologicznych jest ograniczony, bowiem w miarę wzrostu złożoności właściwości złożonego systemu podlegają coraz większemu wpływom czynników środowiskowych i kontekstowych⁹.

W miarę rozwijania się złożoności wyłaniają się nie tylko nowe struktury, ale i nowe funkcje, nowe jakości i wartości, które można nazwać ogólnie emergentami. Czym wyższa złożoność systemu, tym większa jego emergentność, cecha również niepodatna analizie redukcjonistycznej.

W biologii złożoność jest znaczeniem trudno uchwytnym, obszarem dociekań badawczych, odnoszącym się do takich problemów jak struktura hierarchiczna (komórki, organizmu, populacji), organizacja, regulacja i działanie systemów i podsystemów. Interesująca nas złożoność systemów żywych jest realnym, fizycznym bytem, wykazuje prawidłowości i cechy układów zorganizowanych. Złożoność powstaje i rozwija się spontanicznie w procesie ewolucji pod wpływem środowiska i w wyniku procesów samoorganizacji.

Stopień złożoności systemu w pierwszym rzędzie zależy od liczby elementów składowych i ich wzajemnych połączeń, a także nieliniowego charakteru ich oddziaływań. Systemy żywe, jako systemy wyłaniające się z procesu samoorganizacji cząsteczek, są zawsze systemami wysoko złożonymi lub nieskończenie złożonymi¹⁰. W ludzkiej komórce liczba części (elementów) składowych jest olbrzymia i niepoliczalna. Weźmy tylko pod uwagę makrocząsteczki. Liczba „genów strukturalnych” szacowana jest na nieco ponad 20 000, liczba sekwencji nukleoty-

⁹ R. Poczobut, *Między redukcją a emergencją*, Wrocław 2009.

¹⁰ A. Koj, przekaz osobisty (2011).

dowych, których rolę i funkcję znamy tylko częściowo, sięga zapewne też wielu tysięcy, liczbę rodzajów białek szacuje się na setki tysięcy, a liczba obecnych w komórce cząsteczek białkowych wynosi zapewne miliony, do tego dochodzą cząsteczki drobne, metabolity, jony itd. Te miriady cząsteczek oddziałują ze sobą i tworzą złożone systemy wewnątrzkomórkowe¹¹. Fizyczna architektura komórki, złożoność tkanek, narządów i organizmów wielokomórkowych buduje się nie w trybie addytywnym, lecz wyłania się (emergencja) z pozornie niezależnych modułów bytujących na poziomie niższym.

Złożoność była rozpatrywana dotychczas jako „komplikacja” (struktury, funkcji). Obecnie uważa się, że zjawisko złożoności wykazuje pewne uniwersalne reguły, które wymagają opisu w rygorach matematycznych¹². Simon¹³ pojmuje złożoność i hierarchię jako „uniwersalne prawo” odnoszące się do struktury wszelkich rzeczy. Wiele informacji o zjawisku złożoności, hierarchii i emergencji w odniesieniu do organizmów żywych znajdzie Czytelnik w cennym dziele Harolda I. Morowitza *The Emergence of Everything*¹⁴, zbiorowym wydawnictwie pod redakcją Nilsa H. Gregersena¹⁵, a w przystępnej i skondensowanej formie w dziele Iruna F. Cohena *Tending Adam's Garden*¹⁶.

Nie można zrozumieć fenomenu życia, zwłaszcza tak złożonego organizmu, jakim jest człowiek z całym jego ładunkiem i bagażem kulturowym, na drodze prostej redukcyjnej analizy organizmu do narządów, komórek i cząsteczek chemicznych, a dalej do atomów i spinów elektronów. Nie należy zatem oczekiwać, że mając pełną charakterystykę fizykochemiczną cząsteczek organicznych na poziomie komórki będziemy w stanie perfekcyjnie przewidywać końcowy efekt fenotypowy na wysokim poziomie złożoności jakim jest organizm. Fakt ten ma wielkie znaczenie praktyczne dla medycyny (rozwój diagnostyki molekularnej i terapii), agrobiologii, a także dla filozofii przyrody. Problemy te są wielkim wyzwaniem dla nauki i znacznie utrudniają szacowanie i prognozowanie zachowania systemu jako całości na podstawie zachowania i właściwości jego części.

Tu rodzą się podstawowe trudności dla dociekań naukowych i praktyki, gdyż nasze analizy mają zwykle charakter redukcjonistyczny. Jako

¹¹ M. Chorąży, *Wprowadzenie...*, dz. cyt.

¹² P. Davies, *Introduction...*, dz. cyt.

¹³ Cyt. za P. E. Agre, *Hierarchy and history in Simons*, „Architecture of Complexity”, „J. Learning Sciences” 12(3), 2003 (<http://polaris.gseis.ucla.edu/pagre/>).

¹⁴ H. J. Morowitz, *The emergence of everything*, Oxford – New York 2002.

¹⁵ *From Complexity to Life*, N. H. Gregersen (red.), Oxford – New York 2003.

¹⁶ I. R. Cohen, *Tending Adam's garden*, San Diego – San Francisco, 2000.

przykład można podać niejednoznaczność, a często nawet sprzeczne interpretacje wyników badań molekularnych we współczesnej biologii i biomedycynie. Badania te dotyczą „dolnych” struktur hierarchicznych (poziomu cząsteczkowego), ale już na tym poziomie stopień złożoności przechodzi naszą wyobraźnię ze względu na wielką liczbę cząsteczek zorganizowanych w sieci, ich wzajemnych oddziaływań i możliwości kombinatoryki¹⁷. A tymczasem podejście redukcjonistyczne szczególnie często bywa stosowane w medycynie, gdzie stale jeszcze zdarzają się raczej ułudne poszukiwania jednego genu „dla” (np. gen dla raka piersi) lub genu odpowiedzialnego „za” (np. agresywność i przerzutowanie raka płuc), podczas gdy wiemy, że z nielicznymi wyjątkami, rak jest chorobą wieloczynnikową. A jeśli odnosimy się do poziomu genów, rak jest chorobą, w której patogenezą, dynamiką wzrostu, agresją i inne właściwości mogą mieć powiązania przyczynowe z wieloma genami, z ich deregulacją, z ich różnorodnymi funkcjami, z zaburzeniami sieci białkowych i innymi zmianami w złożonych strukturach i funkcjach komórki, narządu, organizmu. Cechy fenotypowe są zwykle wynikiem kombinacji funkcji wielu genów (poligenia), a gen pojedynczy może wpływać na wiele cech (plejotropia).

Teoria systemów biologicznych, obejmująca zjawiska od poziomu molekularnego do ekosystemów, wymaga stałej rozbudowy baz danych, doskonalenia metod analitycznych, rozwijania matematycznych modeli i nowych metod symulacji komputerowej. Metoda symulacji jest dobrze ugruntowanym podejściem w badaniach nad wysoce złożonymi procesami, które nadal jeszcze są mało poznane¹⁸. Symulacja komputerowa jest z powodzeniem używana dla interpretacji danych o hierarchicznej strukturze organizmów, o strukturze i funkcji DNA, opisu metabolizmu, aktywności enzymatycznej, regulacji genów, ścieżek sygnałnych, mechanizmów regulacyjnych w obrębie poziomów hierarchicznych i regulacji międzypoziomowej. Zależności, relacje i regulacje międzypoziomowe są przedmiotem intensywnych badań i zainteresowań w ostatniej dekadzie¹⁹.

Przyjęty ogólnie pogląd, że złożoność żywych organizmów i ich komponentów budowała się i rozwijała w wyniku stopniowych procesów ewolucyjnych jest kwestionowany przez kreationistów. Tak np. M. Behe uważa, że złożoność motorów molekularnych (np. układ

¹⁷ M. Choraży, *Wprowadzenie...*, dz. cyt.

¹⁸ A. R. Galper, D. L. Brutlag, *Computational simulations of biological systems*, [w:] *Biocomputing: Informatics and Genome Projects*, New York 1994, s. 269-306.

¹⁹ G. Schwenk, *Interlevel relations and manipulative causality*, „J. Gen. Philosophy of Science” 37(2006), s. 99-110.

napędzający ruch rzęsek u bakterii) jest tak wielka, że nie należy oczekiwać, aby w procesie ewolucji poszczególne ich komponenty stopniowo rozwijały się i dobierały kształtem i funkcją tak, aby tworzyć skomplikowaną, działającą całość. Te złożone systemy zatem prezentują „nieredukowalną złożoność” (ang. *irreducible complexity*). Takie struktury musiały (dowodzi Behe) powstać „od razu”, w wyniku jednoczesowego aktu stworzenia. Z poglądami Behe dysputował Weber²⁰. Jego krytyka opiera się na wiedzy o ewoluowaniu złożoności i pojawianiu się „nowych jakości” (emergencja) w trakcie ewolucji. Weber dowodzi, że nie było konieczności, aby system rzęskowy, obejmujący około 240 białek, powstał od razu, bo np. u *helicobacter pylori* rzęska może już funkcjonować, mając jedynie trzydzieści trzy cząsteczki białkowe.

W dyskusjach nad złożonością zapomina się często o niepojętej wielkości „skali czasoprzestrzeni” w procesie ewolucji, w jakiej zachodziło współdziałanie przypadku, doboru i samoorganizacji systemów²¹. Nauka nie może odtworzyć doświadczalnie rozwoju złożoności systemów żywych, gdyż nauka nie może sobie poradzić z odtworzeniem skali i upływu czasu, jaki miał miejsce w naturalnej ewolucji. Nazywany ewolucją proces samoorganizacji i samokonstrukcji składowych części komórki do postaci coraz lepiej „pasujących” do siebie, coraz bardziej złożonych i nabierających nowych finezyjnych funkcji, a jednocześnie adaptujących się do środowiska (ang. *fitness*), przebiegał miliardy lat. Przejście od komórki do wielokomórkowego organizmu trwało równie długo.

Rozważania nad złożonością świata ożywionego zwykle odnoszą się do poziomu komórki, gdyż jest to poziom wykazujący właściwości życia i – jak nam się zdaje – posiadający najniższą złożoność biologiczną, zatem może służyć jako podstawowe źródło nowych informacji. Na bazie komórek powstają coraz to wyższe poziomy struktur hierarchicznych, rozwija się złożoność i zjawiska emergentne, które tworzą ostatecznie organizm człowieka i jego osobowość. Stąd wydaje się słusznym, aby przedstawić wybrane, podstawowe informacje o złożoności komórki.

Złożoność komórki

Starożytni Grecy uważali, że wszelka materia wszechświata zbudowana jest z małych, niepodzielnych, elementarnych cząsteczek,

²⁰ B. H. Weber, *Irreducible complexity and the problem of biochemical emergence*, „Biol. and Phil.” 14(1999), s. 593-605.

²¹ I. R. Cohen, *Tending Adam's garden...*, dz. cyt.

które nazywali „atomami”. Dzięki pracom fizyków z pierwszej połowy XX wieku (Thomson, Rutheford, Bohr, Chadwick) wiemy, że elementarna jednostka materii – atom współczesny – jest jednak strukturą dalej „podzieloną”, złożoną z plejady mniejszych jednostek fizycznych (cząstek elementarnych): jądra, zawierającego protony i neutrony, wokół którego krążą elektrony. Ale również protony i neutrony nie są ostatecznymi, fundamentalnymi jednostkami materii. Każdy z nich składa się z trzech jeszcze mniejszych cząstek zwanych kwarkami, a występujących w dwóch odmianach: kwark szczytowy czyli górny (up-quark) i kwark denny czyli dolny (down-quark).

We wszechświecie istnieje jeszcze wiele innych cząstek, jak np. neutrino, mion czy taon. Neutrino, cząstka, nie posiadająca ładunku i o masie około milion razy mniejszej od masy elektronu, oddziałuje z innymi cząstkami materii tylko za pomocą tzw. oddziaływań słabych (nie licząc grawitacji), co umożliwia jej penetrację materii nawet o wielkiej gęstości. Mion jest cząstką podobną do elektronu, ale o masie około 200 razy większej. Taon jest także podobny do elektronu, ale jego masa jest około 3000 razy większa od masy elektronu. Obecnie znanych jest ponad 200 takich cząstek²², a większość z nich nie jest już uważana za elementarne.

„Model Standardowy” – podstawowa obecnie teoria współczesnej fizyki – wprowadza dwanaście cząstek, z których zbudowana jest materia, zwanych fermionami i dwanaście cząstek odpowiedzialnych za przenoszenie oddziaływań między innymi cząstkami, zwanych bozonami. Elektron, neutrino elektronowe, kwark denny i szczytowy – cząstki składowe materii trwałej, która nas otacza – tworzą pierwszą z trzech grup cząstek zwanych generacjami. Drugą generację tworzą mion, neutrino mionowe, kwark dziwny i kwark powabny, zaś trzecią taon, neutrino taonowe, kwark denny i kwark szczytowy.

Fizycy utrzymują, że te liczne jednostki elementarne i materia z nich zbudowana jest utrzymana w stałej i skomplikowanej interakcji dzięki czterem podstawowym oddziaływaniom. Są to: oddziaływanie grawitacyjne (przenoszone przez hipotetyczny bozon zwany grawitonem), elektromagnetyczne (przenoszone przez fotony), oddziaływanie silne (przenoszone przez gluony) – odpowiedzialne za wiązanie kwarków w obrębie hadronów, a więc także wewnątrz protonów i neutronów – oraz oddziaływanie słabe, przenoszone za pomocą jednej z trzech masywnych cząstek: bozonów naładowanych (W^+ i W^-) oraz bozonu neutralnego (Z^0), odpowiedzialne między innymi za rozpad beta

²² C. Amsler, *Review of Particle Physics*, „Physics Letters” B667 1(2008) and 2009.

i związaną z nim radioaktywność²³. Trzy z przedstawionych typów oddziaływań – elektromagnetyczne, silne i słabe – wyjaśniane są przez „Model Standardowy”. Grawitacja pozostaje poza modelem, czekając na teorię zunifikowaną – taką jak na przykład teoria superstrun, która wykracza daleko poza ramy współczesnej fizyki, lecz jest niepotwierdzona doświadczalnie (zakłada ona, że elektron i inne cząstki elementarne są obiektami jednowymiarowymi – strunami o długości rzędu 10^{-35} m).

Z tego krótkiego przeglądu widzimy, jak bardzo jest złożona podstawowa materia naszej komórki. Współcześnie znamy ponad sto rodzajów atomów, z których zbudowana jest Ziemia i wszechświat. W skład organizmów żywych naszej planety wchodzi głównie atomy węgla, wodoru, tlenu, azotu oraz mniejsze lub wręcz śladowe ilości innych pierwiastków (np. fosfor, siarka, cynk i in.), a u zwierząt posiadających szkielet kostny – wapń.

Najniższy poziom świata fizycznego komórki obejmuje atomy i podatomowe cząstki elementarne, które są wspólne dla świata żywego i materii nieożywionej. Jest on zbudowany ze stosunkowo małej liczby rodzajów atomów i cząstek elementarnych (protony, neutrony, elektrony). Jest to obszar, którym zajmuje się fizyka. W fizyce koncepcje złożoności ulegają zmianom w czasie, w miarę gromadzenia wiedzy. Jeszcze niedawno podstawową jednostką w fizyce był atom, teraz są nimi cząstki elementarne i siły nimi rządzące.

Cząsteczki chemiczne stanowią następny, wyższy poziom hierarchiczny wchodzący w obszar chemii. Cząsteczka stanowi zbiorowisko atomów powiązanych ze sobą w sieć. To stwierdzenie stanowi kanwę hipotezy molekularnej struktury materii. Jednakże ta hipoteza nie może być wyprowadzona bezpośrednio z praw fizycznych mechaniki kwantowej rządzących ruchem jąder, elektronów i cząstek elementarnych. Zatem już na tym najniższym stopniu złożoności relacje między „częścią a całością” (cząstki elementarne *vs* cząsteczki chemiczne) nie jest prosta.

W materii nieożywionej atomy cząsteczek zajmują stałe miejsce w przestrzeni, tworząc np. uporządkowane sieci krystaliczne lub materiały o strukturze amorficznej, a różnorodność cząsteczek chemicznych jest ograniczona. Natomiast w systemach żywych sytuacja jest inna. Atomy i elektrony często zmieniają swoją pozycję w cząsteczkach chemicznych, jak choćby w układach metabolicznych. W organizmach żywych występuje wielka różnorodność cząsteczek chemicznych i ich kombinacji, które stanowią materiał budulcowy

²³ Por. B. Greene, *Elegant Universe*, London 2000.

struktur komórkowych oraz przejawiają dynamikę i wielkie bogactwo funkcji. Duże, biologiczne cząsteczki (makrocząsteczki), takie jak białka i kwasy nukleinowe, i ich interakcje są uważane za podstawowe elementy komórki.

Komórka (ang. *cell*) jest podstawową jednostką, która ma cechy życia – wykazuje obecność procesów metabolicznych oraz ma zdolność wzrostu i rozmnażania się. Fenomen życia tkwi w komórce. Nie znamy pojęcia „materii żywej” jako „czegoś”, co wykazuje cechy życia, a nie jest zorganizowane w formie komórki. Stwierdzenie Virchowa – *omnis cellula e cellulae* (wszystkie komórki [pochodzą] z komórki) nie traci na aktualności. Komórki bytują jako samodzielne życia lub tworzą złożone roślinne lub zwierzęce organizmy wielokomórkowe.

Sama komórka jest niezwykle złożonym systemem sieci cząsteczek chemicznych, zwykle składa się z różnych subsystemów i modułów w różnych kombinacjach i różnych rearanżacjach²⁴. Odnosi się to nawet do bardzo małych komórek. Z pewnym zdziwieniem grupa Peer Borka donosi, że niewielki jednokomórkowy organizm *Mycoplasma pneumoniae* posiadający tylko sześćset osiemdziesiąt dziewięć genów kodujących białko, jest znacznie bardziej skomplikowany zarówno w swoim transkryptomie, jak również proteomie. Ta komórka ma zaledwie osiem rodzajów czynników transkrypcyjnych, przełączników genu typu „on/off”, a mimo to posiada niezwykłą i „zmyślną” plastyczność, pozwalającą na szybką reakcję na zmiany pożywek lub środowiska. Wynika to z faktu, że białka bakterii nie zawsze wchodzą we wzajemną interakcję, mimo spisania z genów, należących do tego samego operonu, często łączą się z białkami z odległego operonu, a enzymy mają znacznie więcej funkcji niż dawniej sądzono. Wspomniane prace przynoszą również nowe spostrzeżenia o współpracy kompleksów białkowych, a także pokazują mapę topograficzną takich kompleksów (*molecular machines*) w komórce, mapie uzyskanej dzięki technice elektrono-tomografii.

Wszystkie funkcje komórki dzieją się i zmieniają się w czasie życia komórki, w określonych jej przedziałach i wynikają z aktywności i interakcji złożonych kompleksów różnorodnych cząsteczek (białka, DNA, RNA, metabolity itd.). Złożoność na poziomie komórkowym ma szczególne znaczenie w biologii, gdyż w interakcji cząsteczek chemicznych w komórce dopatrujemy się podstawowych zjawisk życia. W wyniku interakcji, cząsteczki chemiczne tworzą wysoce złożone, interaktywne, wielkie dynamiczne sieci i systemy złożone z sieci o różnych funkcjach,

²⁴ H. A. Simon, *The architecture of complexity*, „Proc. Am. Phil. Soc.” 106 (1962), s. 467-482.

z podsięci i z modułów²⁵. Dotychczas poznane wewnątrzkomórkowe sieci makrocząsteczek (białka, RNA) mają rozległe funkcje: sieci metaboliczne, szlaki i sieci przekazywania sygnałów, sieci regulacyjne genów, sieci związane z regulacją cyklu komórkowego, komunikacji międzykomórkowej itd. Sieci te działają w ścisłej kooperacji i powiązaniu z morfotycznymi strukturami komórki (np. ze strukturami błoniastymi, cytoszkieletem), mają swoją topologię i podlegają kompartmentacji. Części składowe systemów złożonych komórki (np. sieć interakcji białko-białko) mają raczej organizację rozproszoną, wieloogniskową, a nie scentralizowaną. Komórka także posiada swoje składowe komponenty o powielonej liczbie (redundancja). Taka organizacja jest jednym z gwarantów pewnej oporności systemu komórkowego na czynniki zewnętrzne, wytrącające system z równowagi. Ocena, czy system złożony posiada architekturę złożoną lub prostą w dużej mierze zależy od sposobu, w jakim staramy się go opisać²⁶.

Na poziomie komórki mamy wiele przykładów powstawania subsystemów mniej lub bardziej złożonych, np. wieloskładnikowych kompleksów enzymatycznych, złożonych układów kontrolnych typu sprzężenia zwrotnego, struktur polimerycznych, takich jak mikrotubule i filamenty, o zupełnie nowych właściwościach emergentnych, odmiennych od właściwości monomerów. Komórka, jako twór o wyższym poziomie złożoności, narzuca pewne ograniczenia swoim niższym poziomom (makrocząsteczki), kanalizuje i harmonizuje ich funkcje. Komórka stanowi środowisko i kreuje kontekst, w którym przebiegają kontrolowane procesy przekazu informacji (transkrypcja, przeróbka informacji wtórnej pierwotnego transkryptu i translacja), regulacja epigenetyczna, modyfikacje potranslacyjne białek itp.

W tym miejscu warto podkreślić, że nasza wiedza o strukturach wyższego rzędu tak istotnych składników komórki, jak np. DNA i chromatyny jest stale jeszcze w początkowym okresie badań. Uprawnione są hipotezy dopatrujące się nowych rodzajów informacji nie tylko w sekwencjach DNA lub RNA, ale także w topologii tych sekwencji i „znaków” na wyższych stopniach struktury²⁷. Struktura przestrzena chromatyny i jej dynamiczna topografia są słabo zbadane, gdyż narzędzia i strategie badawcze są w początkowym stadium rozwoju²⁸.

²⁵ Por. M. Chorąży, *Wprowadzenie...*, dz. cyt.

²⁶ H. A. Simon, *The architecture...*, dz. cyt.

²⁷ K. Scherrer, J. Jost, *The gene and the genon concept: a functional and informationaltheoretic analysis*, „Mol. Systems Biol.” 3: 87(2007); P. Gollnick, A. Antson, *Going for RNA repeats*, „Nature-Struct. & Molec. Biology” 12 (2005), s. 289-290.

²⁸ M. Baker, *Genomes in three dimensions*, „Nature” 470(2011), s. 289-294.

Wiemy natomiast, że trójwymiarowa architektura chromatyny nie jest statyczna. Wręcz przeciwnie, chromatyna ulega dynamicznym procesom, przemieszcza się, ulega sfałdowaniu, wypętla się itd. Procesy te nie są deterministyczne i wobec tego nie wiemy, jak i kiedy jej struktura wpływa na regulację aktywności genów.

Oprócz systemów sieci makromolekuł, sama komórka ma niezwykle złożoną architekturę i wielkie bogactwo struktur morfotycznych: jądro komórkowe, błony i struktury błoniaste, siateczka endoplazmatyczna oraz plejady organelli komórkowych, takich jak mitochondria, chloroplasty, aparat Golgiego, włóknkowe struktury podporowe stanowiące szkielet itd. Z kolei każda struktura błoniasta i wszelkie organelle komórkowe są złożone z wielkiej liczby cząsteczek i wielu ich rodzajów. Te struktury opisujemy w kategoriach przestrzennych zwykle jako stabilne i niezmiennie elementy komórkowe. Tymczasem nowsze badania wskazują, że sama komórka i jej makroskopowe struktury morfologiczne również mają charakter dynamiczny. Stabilne z pozoru struktury morfologiczne, takie jak cytoszkielet zbudowany z mikrotubul, jąderko, przedziały czynnika składania (ang. *splicing factor compartments*, SFCs), kompleks Golgi'ego i jądro mają swoją wewnętrzną dynamikę, wymieniają aktywnie swoje cząsteczki z otoczeniem, i wykazują właściwości systemów samoorganizujących. Dzięki tej właściwości mogą się tworzyć morfotyczne struktury postrzegane przez nas jako struktury „stabilne”. W rzeczywistości są to elementy plastyczne, zapewniające komórce możliwość szybkiego przystosowania do aktualnego kontekstu otoczenia²⁹. Czy ta plastyczność komórki i jej sieci nie odegrały równorzędnej, a może większej roli w ewolucji, przystosowując się do nisz środowiskowych niż postulowane „korzystne mutacje”? Wewnątrzkomórkowe funkcjonalne kompleksy enzymatyczne, sieci utworzone przez cząsteczki białek i innych makromolekuł związane są funkcjonalnie z organellami komórki, które tworzą widoczne, zróżnicowane struktury, zajmujące określone miejsce i zajmujące przestrzeń w większej strukturze, jak rodzyńki w cieście³⁰. Kompleksy białkowe, wykonujące reakcje biochemiczne, wchodzą w interakcje z systemami strukturalnymi komórki, które stanowią dla nich oparcie mechaniczne, podłoże i podstawę do zakotwiczenia.

Lokalizacja i integralność morfologicznych struktur i organelli komórkowych oraz komponentów, takich jak sieci białek i innych

²⁹ T. Misteli, *The concept of self-organization in cellular architecture*, „JCB” 155 (2001), s. 181-186.

³⁰ H. A. Simon, *The architecture...*, dz. cyt.

makromolekuł w komórce, mają istotne znaczenie dla życia. Patrząc na złożoność „od dołu”, mamy już rozpoznanych kilka poziomów hierarchicznych: elementarne cząstki fizyczne, atomy, cząsteczki chemiczne i poziom komórkowy z sieciami i strukturami oraz organelami komórkowymi.

Bakteria, ameba lub pantofelek są przykładem jednokomórkowych organizmów żywych (systemów żywych). Wszystkie organizmy żywe dzielimy na dwie ogólne kategorie: prokarioty (gr. *pro* – przed, *karyon* – jądro) i eukarioty (gr. *eu* – prawdziwy). Pierwsza kategoria to jednokomórkowce (bakterie, pleśnie), nie posiadające jądra komórkowego, druga to wielki, różnorodny świat roślin i zwierząt. Organizmy roślinne lub zwierzęce są zbudowane z bardzo różnej liczby komórek. Niewielkie zwierzęta jak np. częsty obiekt badań laboratoryjnych – nicienie *C. elegans* posiada długość ok. 1-2 milimetrów i tylko około 1 000 komórek. Duże zwierzęta i drzewa zbudowane są z olbrzymiej liczby (wiele miliardów) komórek. Wszystkie żywe organizmy są zbudowane z komórek oraz substancji (produktów) przez nie wytworzonych takich jak kość, muszla, pancerz.

Złożoność systemów żywych znacznie przewyższa złożoność materii nieożywionej, co stwarza zupełnie inne, nowe wyzwania dla badaczy systemów biologicznych. Na tej samej żywej komórce nie można wykonać wielu rodzajów analiz klasycznymi metodami ani powtórzyć ich wielokrotnie, gdyż w większości są one oparte na konieczności uprzedniego zabicia komórki i destrukcji wszelkich jej struktur. Narzędzia i metody badań na żywej komórce, pozwalające śledzić rozmieszczenie i oddziaływania makrocząsteczek bez konieczności zabijania komórki, są dopiero w początkowym stadium rozwoju. Wobec wielkiej złożoności systemów i sieci makromolekuł oraz dynamiki ich wzajemnych oddziaływań, rozwój takich metod będzie napotykać na wielkie trudności i ograniczenia.

Stabilne systemy biologiczne (organizmy żywe) są najbardziej przystosowane do środowiska, adaptują się do niego lub posiadają wielką zdolność do samoorganizacji w stanach dalekich od równowagi termodynamicznej, czyli mających silny atraktor. Systemy biologiczne będą posiadały tym mniejszą entropię, im wyższy będzie poziom ich złożoności. Systemy żywe potrzebują stałej dostawy energii i materii (odżywianie), aby procesy i reakcje chemiczne utrzymać z dala od stanu równowagi termodynamicznej. Wejście w stan równowagi termodynamicznej oznacza osiągnięcie maksymalnej entropii, czyli śmierć. Komórka utrzymuje „wewnętrzny” stabilny stan uporządkowania

(niskiej entropii) również dzięki błonie komórkowej, stanowiącej granicę między „wnętrzem” komórki i środowiskiem zewnętrznym.

W procesie rozwoju występuje progresywne „porządkowanie”, to jest samoorganizacja, czyli zmniejszenie chaosu i generowanie entropii „ujemnej”. Wyjaśnieniem tego pozornego paradoksu jest sprzężenie (integracja) procesów biochemicznych produkujących porządek (niska entropia) z innymi procesami produkującymi chaos (wysoka entropia). Integracja zatem wszelkich procesów molekularnych jest podstawą żywej komórki³¹. Zwykle wszelkie zjawiska i procesy życiowe odnosimy i przypisujemy wprost do właściwości cząsteczek chemicznych. Tymczasem współczesna biologia twierdzi, że funkcje biologiczne nie wynikają bezpośrednio z właściwości indywidualnych cząsteczek, lecz z interakcji cząsteczek³².

W tym miejscu należy zaznaczyć, że poznawanie zjawiska złożoności ma również ważne znaczenie poznawcze i praktyczne. W codziennym życiu mamy bowiem do czynienia z problemami praktycznymi organizmów indywidualnych i zagadnieniami populacyjnymi, to jest z systemami o wielkiej złożoności.

Złożoność i hierarchia

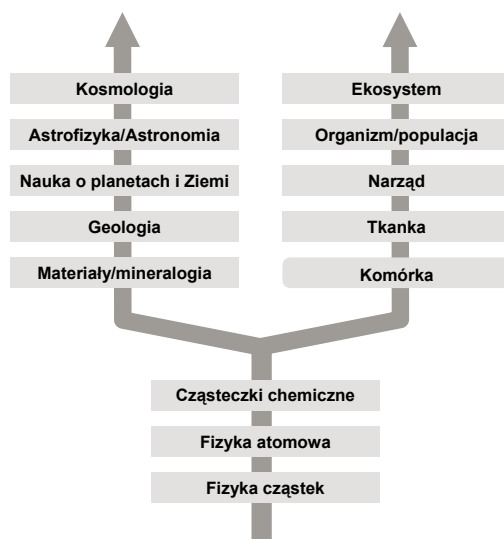
Podstawową cechą złożoności jest jej hierarchiczna organizacja. Hierarchiczna organizacja jest uniwersalna. Hierarchiczną strukturę posiada kosmos oraz nasz najbliższy wszechświat – nasza galaktyka, jak również systemy biologiczne na Ziemi. W kosmosie poziom najwyższy obejmuje wielką liczbę galaktyk, a te z kolei obejmują wszechświaty, niższy poziom stanowią systemy słoneczne i poziom najniższy – planety. Układy hierarchiczne znajdujemy w ekosystemach, zbiorowościach i społecznościach istot żywych. Organizmy żywe mają swój „wewnętrzny” układ hierarchiczny, poczynając od komórki.

Organizm człowieka, podobnie jak wszystkie organizmy żywe, zbudowany jest z zestawu atomów występujących także w materii nieożywionej i obecnych w obiektach wszechświata. Organizmy żywe po śmierci rozpadają się do nieuporządkowanych cząsteczek chemicznych, a następnie do atomów („prochem jesteś i w proch się obrócisz”). Podstawowy poziom złożoności ma zatem uniwersalne, wspólne składniki opisywane przez fizykę. W okresie, gdy rodziło się zjawisko życia

³¹ H. V. Westerhoff, B. O. Palsson, *The evolution of molecular biology into systems biology*, „Nature Biotech.” 22 (2004), s. 1249-1252.

³² A. L. Barabási, Z. N. Oltvai, *Network biology: understanding the cell's functional organization*, „Nat. Rev. Genet.” 5 (2004), s. 101-113.

nie istniał deterministyczny plan dla końcowych form życia wraz ze szczegółowym planem struktur, części i właściwości. Była to według I. Prigogina i M. Eigena raczej gra szans wymuszonych i określonych warunkami środowiska i fizycznymi prawami materii.



Ryc. 2. Hierarchiczna struktura przyrody ożywionej i dziedzin naukowych opisujących wszechświat. Trzy podstawowe poziomy hierarchiczne są wspólne dla świata nieożywionego i organizmów żywych³³.

Holistyczny ogląd człowieka wymaga poznania zarówno struktury, jak i procesów zachodzących na różnych poziomach hierarchicznej złożoności.

Termin „hierarchia” lub „system hierarchiczny” określa taki porządek w systemie złożonym, gdy jakaś jednostka, np. komórka, jest podporządkowana innej jednostce, np. organizmowi. Ta ostatnia zatem jest zwykle bardziej złożona i zajmuje wyższy poziom hierarchiczny niż pierwsza. Systemy hierarchiczne są różne, np. fizyczny, biologiczny, socjalny. Organizacja zjawiska, które nazywamy życiem, ma wyraźne cechy systemu hierarchicznego. W porządku hierarchicznym wyróżniamy poziomy; poziom najniższy nazywamy podstawowym (bazalnym). Porządek hierarchiczny powstawał i rozwijał się od pierwszych prostych interakcji elementów fizycznych (atomów, cząstek elementarnych) do organizmów żywych o wysokiej złożoności swojej struktury

³³ Według G. F. R. Ellis, *Top-down causation and the human brain*, [w:] *Understanding complex systems*, N. Murphy (red.), Berlin 2009, s. 63-81.

i funkcji. Porządek hierarchiczny odnosi się zatem i do struktury i do funkcji, ale oba te komponenty porządku są ze sobą ściśle powiązane.

W systemach żywych, które znajdują się w stanie dalekim od równowagi termodynamicznej, każdy poziom wyższy ma większą złożoność niż poziom niższy i powstaje na jego bazie. Każdy niższy poziom określa, a zatem ma siłę wywołującą fizyczny wpływ sprawczy na to, co będzie się działo na poziomie wyższym. Taką siłą sprawczą przypisywano zwykle genom. Ale to oddziaływanie nie determinuje bezwzględnie i bezwarunkowo cech i właściwości poziomu wyższego.

Wyższe pokłady hierarchiczne trzymają w ryzach poziomy niższe, podobnie jak kryształek śnieżynki zniewala i ogranicza cząsteczki wody, z którego kryształek powstał. Komponenty niższego poziomu są zatem ograniczone, „zniewolone” (ang. *constrained*) i mają mniejszy zakres swobody niż miałyby przed wejściem w system hierarchiczny wyższy³⁴. Wydaje się, że wyższe poziomy jednocześnie „chronią” poziomy niższe przed szkodliwym, bezpośrednim wpływem środowiska.

Wskutek interakcji cząsteczek w sieciach i samoorganizacji cząsteczek, w miarę wzrostu złożoności na każdym wyższym poziomie wyłaniają się nowe, coraz bardziej złożone struktury i nowe dodatkowe cechy (emergenty), jakościowo nieobecne na poziomie niższym. Wyższe, złożone poziomy same są zatem emergentem, co do swej struktury i właściwości (cech), i nie są w pełni redukowalne do elementów poziomu niższego, a zwłaszcza nie są redukowalne do poziomu podstawowego (cząstki elementarne, atomy i cząsteczki chemiczne), choć na nim zostały zbudowane. Wynika z tego, że mimo poznania poziomu bazowego, cechy poziomu wyższego nie są w pełni przewidywalne, przynajmniej na podstawie naszej obecnej wiedzy i możliwości metodycznych.

Zależności w strukturze hierarchicznej objaśniane są następująco³⁵: system hierarchiczny odnosi się do takiego systemu, który składa się z podsystemów wzajemnie powiązanych poprzez strukturę i funkcję, a każdy z nich znowu jest strukturą hierarchiczną w stosunku do systemu z niższego poziomu, aż do momentu, kiedy osiąga się poziom podstawowy (poziom bazowy). Powiązania między poziomami hierarchicznymi mają charakter powiązań strukturalnych i funkcjonalnych, gdzie jeden poziom kontroluje drugi. Takie funkcje kontrolne można

³⁴ R. W. Korn, *The emergence principle in biological hierarchies*, „Biol. Phil.” 20 (2005), s. 137-151.

³⁵ H. A. Simon, *The architecture...*, dz. cyt.; G. A. J. M. Jagers op Akkerhuis, *Analysing hierarchy in the organization of biological and physical systems*, „Biol. Rev.” 83 (2008), s. 1-12.

rozpoznać w systemach zbudowanych z równoważnych modułów. Poziomy hierarchiczne są określane dość arbitralnie, są płynne i dynamiczne, zachodzą na siebie, granice między nimi są zwykle nieostre. Simon uważa struktury hierarchiczne jako systemy „głęboko” naturalne, choć w jego opisie są one stabilne i statyczne w swej naturze.

Na każdym poziomie hierarchicznym systemów biologicznych istnieje wielkie bogactwo cząsteczek chemicznych, prostych nieorganicznych i wielce złożonych cząsteczek organicznych: makromolekuł, takich jak białko, z ich wieloma izoformami i modyfikacjami, kwasów nukleinowych, itd. Poziomy hierarchiczne nie mają między sobą ścisłych granic, nie mają liniowego uporządkowania, a swoją ogólną organizacją upodobią się raczej do „rozgałęzionego drzewa”³⁶. Ta ostatnia cecha, moim zdaniem, odnosi się głównie do organizacji taksonomicznej gatunków („drzewo życia”).

Podstawowy (bazowy) poziom biologiczny struktury hierarchicznej jest umowny. W biologii, w pewnych rozważaniach takim poziomem podstawowym jest komórka, w innych – białko, jeszcze w innych – aminokwas, nukleotyd lub atom. Białka jako jeden z podstawowych składników komórki mają wielorakie funkcje (katalizują reakcje, regulują metabolizm, są receptorami, przekaźnikami sygnałów i sensorami, kontrolują funkcję genów, nadają komórce przestrzenną „sztywność”), posiadają także swoje wewnętrzne poziomy hierarchiczne. Struktura najniższa to liniowe ułożenie aminokwasów, następnie struktura drugorzędowa, w której białko może przyjąć różną przestrzenną aranżację (helisa, beta kartka) stabilizowaną wiązaniami wodorowymi, wyższy poziom stanowi struktura trzeciorzędowa stabilizowana hydrofobową interakcją między niepolarnymi łańcuchami bocznymi lub mostkami dwusiarczkowymi. Jeszcze wyższy poziom zajmują białka multimeryczne zawierające dwa lub więcej łańcuchów polipeptydowych trzymanych wiązaniami niekowalencyjnymi.

Każdy z poziomów hierarchicznych wykazuje zachowania charakterystyczne dla tego poziomu. Złożoność struktur i funkcji, możliwości kombinatoryjne oraz związki przyczynowe komplikują się wraz ze wzrostem poziomów hierarchicznych. Stąd w biologii fenotyp nie wynika wprost z właściwości poziomów niższych. Podobnie jak struktura cząsteczek chemicznych nie wynika bezpośrednio z fizycznych praw

³⁶ R. Poczobut, *System – struktura – emergencja*, [w:] *Struktura i emergencja*, M. Heller (red.), Kraków 2006.

rzządzających ruchem jąder atomowych i elektronów tworzących atomy i wiązania³⁷.

Ewolucja systemów żywych następowała w bardzo długim czasie, ponieważ musiało zajść niezmiernie wiele kombinacji atomów, aby wytworzyć i nagromadzić pewną krytyczną ilość prostych elementów składowych (małych cząsteczek chemicznych), aby z kolei mogły powstać z nich bardziej złożone cząsteczki organiczne stanowiące następne poziomy hierarchiczne. Te znowu wytworzyły pierwotne podzespoły i rozwinęły różne formy interakcji. Złożoność i hierarchia systemów biologicznych w procesie ewolucji wzrastała od dołu, od poziomu bazowego. Coraz to bardziej złożone formy hierarchiczne nie mogłyby się wytworzyć bez istnienia stabilnych pierwotnych podzespołów i sieci makrocząsteczek oraz struktur komórki, zwłaszcza błony komórkowej. Zanim powstała prakomórka, jej elementy składowe organizowały się już w hierarchiczne układy, od najniższego poziomu w następującym porządku czasowym: cząstki elementarne (podatomowe) → atomy → proste cząsteczki chemiczne → makrocząsteczki → kompleksy i sieci makrocząsteczek → błony i pęcherzyki błonowe → pierwotne organelle → prakomórka. W tym procesie wyróżnić można podstawowe „pokłady” hierarchiczne rozwinięte już w prakomórce, a obecne w formie bardziej złożonej w komórce współczesnej.

Wyższe pokłady hierarchiczne nie powstają jako proste agregaty części składowych lub bezładne twory wytworzone w procesie fuzji. Złożone systemy nie powstają z prostego sumowania jednostek (elementów) je tworzących. W procesie tworzenia systemów o coraz wyższej złożoności i w procesie pojawiania się wyższych poziomów hierarchicznych działa proces samoorganizacji, zachodzą przejścia fazowe i różne formy dynamicznej transformacji, a nie proste zjawiska fuzyjne.

Powstające ponad komórką poziomy hierarchiczne można przedstawić w następującym uszeregowaniu: komórka → tkanki → narządy → organizm → populacja organizmów → ekosystem → biosfera. Stopień złożoności tkanek i narządów w swojej strukturze i funkcji różni się w szerokiej skali (por. np. wątroba i mózg).

Człowiek w systemie hierarchicznym

W systemie hierarchicznej organizacji świata żywego szczególne miejsca zajmuje człowiek. Holistyczny ogląd niezwykłego fenomenu człowieka i jego osobowości wykazuje wiele poziomów złożoności,

³⁷ K. Mainzer, *Symmetry and complexity – fundamental concepts of research in chemistry*, „Int. J. Phil. Chem.” 3 (1997), s. 29-49.

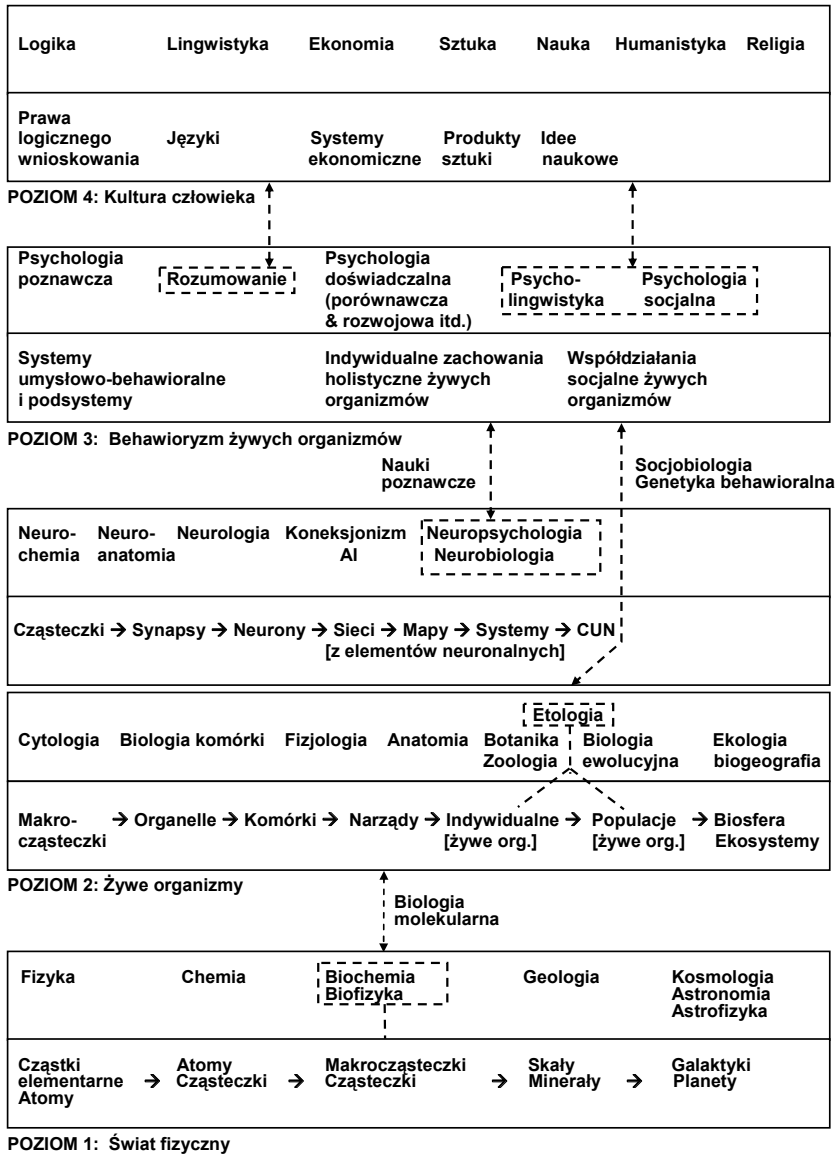
stanowiących obiekt zainteresowań wielu dyscyplin naukowych. Niższe poziomy hierarchiczne człowieka są w swej strukturze i funkcji identyczne lub bardzo podobne do analogicznych poziomów świata zwierząt. Natomiast szczytowe poziomy złożoności hierarchicznej wykazują wielkie różnice i bogactwo cech fenotypowych, emergentnych oraz bytów niematerialnych, nawet w porównaniu do świata najbliższych nam ewolucyjnie Naczelných. Różnice te nie są prostą i wyłączną pochodną różnic w „genach” i DNA, jak to jeszcze niedawno sądzono. Mimo blisko stu procentowej homologii DNA (genów) szympansa i człowieka, fenotyp obu tych gatunków posiada zasadnicze różnice. Złożoność szczytowych poziomów hierarchicznych organizacji istoty ludzkiej wynika z trudnej do ogarnięcia i zrozumienia strukturalnej i funkcjonalnej złożoności mózgu oraz bogactwa zjawisk i wartości emergentnych nieobecnych u innych gatunków, przenoszonych na nowe generacje jako dziedziczenie kulturowe.

Bardziej szczegółowy ogląd poziomów hierarchicznych podaję w oparciu o rozprawę *God and Science* Arthura Peacocke’a, świetnego biochemika, uznanego teologa i filozofa³⁸. Opis Peacocke’a pokazuje w hierarchicznym układzie złożoność współczesnego człowieka i jednocześnie odnosi się do jego ewolucji. Systemy hierarchiczne człowieka, innych systemów żywych, świata nieożywionego i odpowiadających im dyscyplin naukowych opisuje Peacocke w dwóch wymiarach, jak to pokazano na schemacie (Ryc. 3).

W wymiarze pionowym wyróżnia on cztery ogólne poziomy o wzrastającej, idąc od dołu, złożoności: świat fizyczny, żywe organizmy, zachowanie żywych organizmów i kultura człowieka. W wymiarze horyzontalnym uporządkowanie biegnie od części podstawowych do całości, co w odniesieniu do biologii daje poziomy hierarchiczne o wzrastającej złożoności: od cząsteczek i makrocząsteczek do indywidualnych organizmów i ekosystemów. Taka forma przedstawienia „poziomów hierarchicznych” na schemacie Peacocke’a wprowadza pewien dyskomfort w czytaniu schematu, gdyż zwyczajowo nasze pojmowanie „poziomu” ilustrujemy zwykle w wymiarze pionowym.

Główną cechą poziomu pierwszego, bazowego („świat fizyczny”) złożonego z cząstek elementarnych, atomów i cząsteczek chemicznych, jest rozwinięcie przez makrocząsteczki właściwości wspólnych dla wszystkich organizmów żywych: zdolność do replikacji makrocząsteczek „informacyjnych”, zdolność do odtwarzania prostych struktur systemów i sieci oraz podejmowania prostych funkcji przez takie układy. Poziom ten nie posiada cech życia.

³⁸ A. Peacocke, *God and Science*, dz. cyt.



Ryc. 3. Częściowo uproszczony schemat ilustrujący poziomy złożoności i hierarchii świata martwego i żywego według A. Peacock'a. Strzałki poziome ilustrują struktury hierarchiczne typu „od część do całości” świata fizycznego (Poziom 1) i świata żywego (Poziom 2). W Poziomie 2 wyodrębniono dodatkowo hierarchiczną organizację centralnego układu nerwowego (CNU), jako poziom podstawowy dla funkcji behawioryalnych na Poziomie 3 i wyższych funkcji umysłowych człowieka na Poziomie 4 (zmodyfikowana częściowo Ryc. 3 wzięta z: A. Peacock, *God and Science*, London 1996). Za zgodą SCM Press Ltd.).

Poziom drugi („żywe organizmy”) obejmuje dalszą ewolucję procesów z poziomu pierwszego, samoorganizację błon i powstanie komórki z jej złożonymi strukturami morfotycznymi, organizację komórek w tkanki, narządy i organizmy. Skala złożoności „od części do całości” na tym poziomie już jest ogromna. Analiza redukcjonistyczna „w dół”, od komórki do cząsteczek chemicznych, napotyka na ogromne trudności metodyczne, spowodowane choćby tylko złożonością i dynamiką sieci makrocząsteczek w komórce³⁹, a także faktem, że przekaz „informacji genetycznej” (gen → efekt) jest w znacznej części procesem nieliniowym, lecz procesem analogowym⁴⁰.

Złożoność ta została wypracowana w wielkiej skali czasu obejmującego powstanie prakomórki i ewolucję komórki do organizmu. Szacuje się, że proste formy życia (komórki prokariotyczne) pojawiły się ok. 4 miliardy lat temu, proste zwierzęta ok. 600 milionów lat, ssaki – ok. 200 milionów lat, gatunek homo – 2,5 miliona lat, a neandertalczyka – kilkadziesiąt tysięcy lat temu (wymarcie tego ostatniego nastąpiło ponad 25 tys. lat temu)⁴¹. Organizm ludzki pojawia się zatem pod koniec (szacunkowo dziesiątki tysięcy lat temu) niezmiernie długiego (ok. 4 miliardy lat) okresu ewolucji życia na Ziemi.

W odniesieniu do człowieka Peacocke słusznie podkreśla i wydziela na swoim schemacie organizację centralnego układu nerwowego (CUN), jako poziomu podstawowego dla funkcji behawioralnych i wyższych funkcji umysłowych. Struktura i funkcja mózgu człowieka jest tym hierarchicznym poziomem, z którego wyłaniają się wartości umysłowe i duchowe człowieka, jako najwyższe zjawiska emergentne. Złożoność funkcji mózgu, w którym tkwi tajemnica naszej świadomości i inne najwspanialsze właściwości umysłowe jest niepojęta.

Dla ilustracji przytaczam kilka informacji. Szacuje się, że liczba komórek neuronalnych (neuronów) w samej tylko korze mózgowej człowieka wynosi ok. 9 000 000 000. Jeden neuron wyposażony jest w setki wypustek nerwowych (dendrytów), przy pomocy których neuron kontaktuje się z innymi neuronami, co stanowi podstawę funkcjonowania mózgu. Gdyby założyć, że ta liczba neuronów ma tylko połączenia binarne, to liczba różnych możliwych kombinacji takich połączeń parzystych wynosiłaby $10^{2783000}$ ⁴². Jest to tyle zer po liczbie 10, że zapisanie ich

³⁹ Por. M. Chorąży, *Wprowadzenie...*, dz. cyt.

⁴⁰ Por. M. Chorąży, *Wprowadzenie...*, dz. cyt., s. 59-84.

⁴¹ H. J. Morowitz, *The emergence...*, dz. cyt.

⁴² J. Herrick, *Brains of Rat and Man: A survey of the origin and biological significance of the cerebral cortex*, New York 1963. Cyt. według: <http://www.christianaswers.net/q-eden/life-complexity-ref.html>.

zwykłej wielkości czcionką zajęłoby ok. 700 stron! Liczba ta urasta do niepojętych wielkości, gdy zważymy, że poszczególne neurony łączą się swoimi wypustkami nie z jednym, ale z wieloma partnerami, co oznacza gigantyczną liczbę możliwych kombinacji.

Jeśli założymy, że jeden neuron „pomaga zachować” jeden bit pamięci, to kombinacja połączeń między wieloma neuronami w tym samym czasie jest zdolna zachować milion gigabitów⁴³. Szacuje się, że liczba połączeń między neuronami mózgu człowieka sięga 10^{15} , a długość całej sieci neuronalnej ma mieć 10^8 metrów, czyli 100 000 km. Na tę złożoną strukturę nakłada się jeszcze olbrzymia, mierzona w nanosekundach, szybkość przebiegu impulsów w neuronach. Te szacunkowe dane wskazują, że centralny układ nerwowy stanowi układ o najwyższej złożoności. Jednak pytanie, co to jest świadomość, skąd się biorą zachowania altruistyczne, wolna wola, jak powstają dzieła muzyka, malarza lub poety pozostaje otwarte. Na tym poziomie przenikają się dwa porządki tworzące moje „ja”: porządek materialny i porządek duchowy (byty niematerialne).

Również warto wspomnieć w tym miejscu o niezwykle misternym procesie formowania się neuronów w rozwoju osobniczym. Nad prawidłowym ukształtowaniem wypustek nerwowych i ukierunkowaniem ich tak, aby powstały synapsy z wypustkami komórek partnerskich, biorą udział peptydy kodowane przez gen o symbolu *Dsam*, który ma ponad sto eksonów rozrzuconych na wielkim obszarze pasma DNA. Sekwencje eksonowe w mRNA wskutek alternatywnego składania „dają informację” dla syntezy ponad 30 000 peptydów biorących udział w neurogenezie. Niektóre z tych peptydów, jak wspomniano wyżej, są swoistymi „przewodnikami” dla powstających połączeń między neuronami, inne zapobiegają „sklejaniu się” dendrytów w zbite struktury w czasie ich powstawania⁴⁴.

Ta drobna ilość informacji o strukturze i funkcji mózgu, zwłaszcza w konfrontacji z przepełnionym pychą „nowym wspaniałym światem” Kurzweila skłania do pokory.

W układzie Peacocke’a pomosty między „żywymi organizmami”) a „behawioryzmem żywych organizmów” są domeną neurobiologii, neuropsychologii i etologii. Te dyscypliny naukowe objaśniają ogólne zachowania organizmów i wytwarzanie stosunków i więzi społecznych. Najwyższy poziom złożoności odnosi się jedynie do człowieka. Tylko

⁴³ P. Reber [dyskusja z J. Hawes]. „Sci. Am. Cyt.” 10 April 2010. Cyt. według: <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=what-is-the-memory-capacity>.

⁴⁴ S. L. Zipursky, *Driving self-recognition*, <http://www.the-scientist.com/2010/11/1/40/1/>.

człowiekowi przypisuje się wszelkie unikatowe właściwości umysłowe, samoświadomość, altruizm, stosunek do innych ludzi i otoczenia, zdolność logicznego myślenia i wnioskowania, zdolność rozeznania niematerialnych wartości i postaw moralnych, zdolności lingwistyczne, kreatywność gospodarczą i naukową, twórczość w obszarze literatury i sztuki. I tylko, i jedynie człowiek zaczął poszukiwać Boga i zadawać pytania: kim jesteśmy, skąd pochodzimy, po co jesteśmy, co tu robimy, co oznacza otaczający nas świat?

Najwyższy hierarchiczny poziom złożoności życia odnosi się do szeroko rozumianej kultury człowieka. Człowiek jest materialną istotą biologiczną, która osiągnęła najwyższy poziom złożoności, ale poziom ten składa się głównie z realnych, niematerialnych bytów emergentnych. Objaśnienie (przynajmniej częściowe) złożoności tego poziomu jest domeną psychologii, socjologii i neurobiologii.

W tych obszarach również obserwujemy elementy układów i zależności hierarchicznych, tworzących osobowość człowieka, które niejako konstytuują się wokół pięciu poziomów jego potrzeb: potrzeby biologiczne, potrzeba poczucia bezpieczeństwa, potrzeba uczuć wzajemnych, potrzeba szacunku, samorealizacja.

Poznawanie całości przez analizę części i tłumaczenie zjawisk z wyższych poziomów hierarchicznych przez analizę redukcjonistyczną struktury i funkcji poziomów niższych nie zawsze jest w pełni owocne. Jak wspomniałem, całość nie jest prostą sumą części. W miarę osiągania i konstrukcji wyższego poziomu złożoności, powstają nowe jakości i wyłaniają się nowe właściwości strukturalne i funkcjonalne nieobecne w składowych częściach poziomu niższego. Nowe właściwości i nowe jakości nie mają swoich odpowiedników na piętrze niższym, gdyż wynikają z interakcji wielu elementów składowych piętra wyższego. Nie zawsze można tu stosować z powodzeniem analizę redukcyjną do poziomu bazowego. Dla przykładu: nie można w pełni objaśnić zachowania populacji organizmów żywych przez redukcję do biochemii makrocząsteczek komórki.

Próby poszukiwania przyczyn sprawczych dla emergentnych zjawisk kultury człowieka na poziomie świata fizycznego, zwłaszcza redukcja tych zjawisk do poziomu genetycznego, jest uproszczonym oglądem życia. A tymczasem, zaledwie kilka lat temu czytaliśmy o mutacji w pewnym genie, która to mutacja wpływa rzekomo na „religijność”. Doszukiwano się też podłoża genetycznego dla preferencji poglądów politycznych⁴⁵, zdolności do biznesu, preferencji seksualnych, postulo-

⁴⁵ J. R. Alford, C. L. Funk, J. R. Hibbing, *Are political orientations genetically transmitted?*, „Am. Polit. Sci. Review” 99 (2005), s. 153-168.

wano istnienie genów judaizmu, poszukiwano genetycznego podłoża agresji, itp. Występowanie tych zachowań ma szeroko rozumiane podłoże kulturowe i podlega „dziedziczeniu kulturowemu”.

Według West-Eberhard⁴⁶ ewolucja żywych organizmów składa się właściwie z jednej procedury: budowania coraz to bardziej złożonego i lepszego wehikułu dla manifestowania „wewnętrznego świata”. Proces samoorganizacji i samokonstrukcji coraz lepiej pasujących (ang. *fitness*) złożonych wehikułów nazywamy ewolucją. Ewolucja w ścisłym etymologicznym sensie oznacza rozwijanie potencjałów, które były „zwinęte” w poprzednich cyklach bytowania i które oczekiwały na odpowiedni czas i pole (możliwość) ich ekspresji. Ewolucja to rozwinięcie wewnętrznych zdolności, właściwości, mocy i sił oraz znajdowanie pola (niszy) do ich manifestacji. Współcześnie pojmowana ewolucja odsuwa na drugi plan formułę krwawej „walki o przetrwanie” i przystosowanie się poprzez spontaniczne „korzystne mutacje” na rzecz procesów i mechanizmów konstrukcji i samoorganizacji systemów złożonych. Wydaje się, że regułą w ewolucji jest dążenie do coraz większej złożoności. Proces odwrotny – to jest rezygnacja ze złożoności strukturalnej i funkcjonalnej – w ewolucji nie zachodzi. Czy przykładem takiego odwrotnego procesu nie może być jednak stan „odróżnicowania” i rozwój komórek nowotworowych?

W tej pracy przedstawiłem podstawowe informacje o zjawisku złożoności w przyrodzie ożywionej i podałem ogólne reguły hierarchicznej organizacji organizmów żywych. Mam nadzieję, że wiadomości tu przedstawione będą pomocne Czytelnikowi w poznawaniu niektórych aspektów zjawiska życia i uzmysłowią, gdzie uplasować człowieka i jego rozwój w ewolucji. Być może zwrócą też uwagę na trudności w interpretacji zjawisk zachodzących na wyższych, wysoce złożonych poziomach hierarchicznych przez analizę struktury i funkcji na poziomach bazowych. Fragmentaryczna wiedza przedstawiona w tej pracy nakazuje zachowanie pewnej pokory w naukowych dociekaniach i poszukiwaniu odpowiedzi na odwieczne zapytania o naszą istotę, pochodzenie, a także o rozwiązania naszych praktycznych problemów (np. zdrowotnych).

Zagadnienia dotyczące samoorganizacji cząsteczek chemicznych, emergencji i regulacji w układach złożonych są warte osobnego omówienia.

Słowa kluczowe: ewolucja, mikrokosmos, fenomen życia, kreacja życia, skala czasoprzestrzeni, komórka, atom

⁴⁶ M. J. West-Eberhard, *Developmental plasticity and evolution*, Oxford – New York 2003.