

Mirosław Twardowski

Układy biotyczne w interpretacji fizyków

UKŁADY BIOTYCZNE
W INTERPRETACJI FIZYKÓW

Mirosław Twardowski

UKŁADY BIOTYCZNE W INTERPRETACJI FIZYKÓW



WYDAWNICTWO
UNIwersytetu Rzeszowskiego
RZESZÓW 2017

Recenzowali
ks. prof. dr hab. STANISŁAW ZIĘBA
prof. dr hab. TADEUSZ LULEK

Redakcja tekstu i korekta
BERNADETA LEKACZ
BARBARA PAWLIKOWSKA

Redakcja techniczna
EWA KUC

Łamanie
DOROTA KOCZĄB

Projekt okładki
WOJCIECH PĄCZEK

© Copyright by
Wydawnictwo Uniwersytetu Rzeszowskiego
Rzeszów 2017

ISBN 978-83-7996-458-1

1441

WYDAWNICTWO UNIwersYTETU RZESZOWSKIEGO
35-959 Rzeszów, ul. prof. S. Pigonia 6, tel. 17 872 13 69, tel./faks 17 872 14 26
e-mail: wydaw@ur.edu.pl; <http://wydawnictwo.ur.edu.pl>
wydanie I, format B5, ark. wyd. 33,60 ark. druk. 32, zlec. red. 72/2017

Druk: Drukarnia Uniwersytetu Rzeszowskiego

SPIS TREŚCI

Wstęp	7
ROZDZIAŁ I	
Uwarunkowania epistemologiczno-metodologiczne badań nad organizacją życia	13
1.1. Mechanistyczno-redukcyjnoistyczne ujęcie organizacji życia	13
1.2. Organizacja życia w ujęciach pozaredukcyjnoistycznych	42
ROZDZIAŁ II	
Kopenhaska interpretacja układów biotycznych	88
2.1. Punkt wyjścia kopenhaskiej interpretacji układów biotycznych	89
2.2. Aspekty formalne i merytoryczne kopenhaskiej interpretacji układów biotycznych	96
2.3. Recepcja poglądów Bohra na fenomen życia	106
ROZDZIAŁ III	
„Wiedeńska” interpretacja układów biotycznych	180
3.1. Punkt wyjścia „wiedeńskiej” interpretacji układów biotycznych	182
3.2. Aspekty formalne i merytoryczne „wiedeńskiej” interpretacji układów biotycznych	203
3.3. „Wiedeńskie” dziedzictwo w badaniach nad organizacją życia	223
ROZDZIAŁ IV	
Dyskusja wokół „wiedeńskiej” interpretacji układów biotycznych	265
4.1. Ocena „wiedeńskiej” interpretacji układów biotycznych	265
4.2. Dyskusja nad wpływem <i>What is life?</i> Schrödingera na przedmiot i profil badań przyrodników	318
4.3. Kluczowe poglądy Schrödingera na fenomen życia poddane reinterpretacji	337
ROZDZIAŁ V	
Kontekstowy wymiar badań nad organizacją życia	375
5.1. Aspekt formalny kontekstowych badań nad organizacją życia	375
5.2. Aspekt merytoryczny kontekstowych badań nad organizacją życia	397
Zakończenie	466
Bibliografia	471
Indeks osobowy	497
Indeks rzeczowy	503

WSTĘP

W toku odwiecznych zmagañ człowieka nad wyjaśnieniem istoty życia kształtowały się poglądy dotyczące jego organizacji. Na przestrzeni wieków odpowiedzi na pytanie, co to jest życie, przybierały postać konkurujących ze sobą stanowisk. Poglądom mechanistycznym przeciwstawiano poglądy animistyczne, witalistyczne czy organicystyczne¹. Dyskusja między zwolennikami konkurujących ze sobą koncepcji życia toczy się do tej pory na trzech różnych płaszczyznach: ontologicznej, metodologicznej i epistemologicznej². Pierwszą płaszczyznę debaty można nazwać ontologiczną, strukturalną

¹ Jean Gayon wyróżnia trzy główne koncepcje życia, które pojawiły się w historii biologii: życie jako mechanizm, życie jako animacja i życie jako organizacja. Por. J. Gayon, *Defining life: synthesis and conclusions*, „Origins of Life and Evolution of Biospheres”, 40 (2010), s. 236–237. Poza tymi trzema stanowiskami autor wątpi, by cokolwiek nowego pojawiło się od czasu narodzin biologii. Nasze przedstawianie życia pozostaje zorganizowane na bazie konkretnych struktur, z jednej strony w związku z bezpośrednim czy też intuicyjnym pojęciem życia, z drugiej zaś strony przez trzy koncepcje filozoficzne: animacji, mechanizmu i organizacji. Oczywiście naukowcy, którzy obecnie pragną sformułować definicję życia, chcą jej naukowej wersji. „Byłbym jednak bardzo zdziwiony – pisze Gayon – gdyby te ich poszukiwania naukowej definicji nie znajdowały się w jakimś stopniu pod wpływem tych dawnych schematów filozoficznych. Prawdopodobnie większość z nich powiedziałaaby, że oczywiście, czerpią oni z organizacyjnej koncepcji życia, jednak chcą również, aby koncepcja ta była bardziej precyzyjna w zakresie właściwości formalnych i empirycznych, co uczyniłoby ją bardziej przydatną do użytku dla celów naukowych. Niemniej nie jestem przekonany, czy wszyscy naukowcy odrzuciliby definitywnie mechanistyczną bądź animistyczną koncepcję życia. Podobnie nacisk [...] na obecność elementu »kognitywnego« w ich definicji życia, nieodparcie przywodzi mi na myśl arystotelesowską, biopsychiczną koncepcję duszy, ale mogę się mylić. Co jest jednak istotne, to fakt, że współcześni naukowcy [...] muszą być świadomi siły tych trzech modeli życia, które w skrócie przeanalizowałem. Są one wspólnym dziedzictwem, nadającym dogłębną strukturę znacznej części naszej intuicji kulturowej i słownictwu, za każdym razem, kiedy staramy się myśleć o »życiu«”. Tamże, s. 237.

Ze względu na charakter pracy (omawiane są koncepcje życia fizyków) przy pewnym uogólnieniu wprowadzono dwie interpretacje organizacji życia: mechanistyczno-redukcyjnistyczne i pozaredukcyjnistyczne. Połączono mechanicyzm z redukcjonizmem, gdyż trudno ściśle rozgraniczyć obydwie poglądy. Mechanicyzm ma bardziej wymiar treściowy, a redukcjonizm metodologiczny.

² Por. T. Dobzhansky, F.J. Ayala, G.L. Stebbins, J.W. Valentine, *Evolution*, W.H. Freeman & Company, San Francisco 1977, s. 487–488. Por. P. Hoyningen-Huene, 1991, *Theory of antireductionist arguments: the Bohr case study* [w:] E. Agazzi (ed.), *The problem of reductionism in science*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, s. 53. Por. F.J. Ayala, *Ther-*

lub konstytutywną. Głównym roztrząsanym na niej zagadnieniem jest pytanie, czy fizyczno-chemiczne procesy odpowiedzialne są za wszystkie zjawiska związane z życiem? W związku z nim rodzą się wątpliwości: Czy organizmy żywe zbudowane są z tej samej materii, z której zbudowane są układy nieożywione? Czy każda istota żywa jest tylko zbiorem molekuł i atomów? Czy byty ożywione wykazują cechy inne niż cząsteczki i atomy, z których są zbudowane? Drugim polem dyskusji jest płaszczyzna metodologiczna (inaczej proceduralna lub strategiczna). W jej kontekście pytania dotyczą pozyskiwania wiedzy i strategii badań, które należy stosować w poszukiwaniu odpowiedzi na pytania o istotę życia. Zasadniczą kwestią jest wątpliwość – czy problemy biologiczne powinny być zawsze analizowane przez badanie podstawowych (fizycznych) procesów, czy też powinny być analizowane na wyższym poziomie organizacji, takim jak komórka, organizm, populacja czy społeczność. Trzeci typ pytań dotyczy płaszczyzny epistemologicznej, teoretycznej lub wyjaśniającej. Podstawowym zagadnieniem jest samodzielność biologii jako dziedziny nauki bądź jej przynależność do fizyki lub (i) chemii³. Na te i wiele innych pytań próbuje odpowiedzieć niniejsza praca.

Powyższe stanowiska przechodziły różne fazy przemian, których proces do dziś nie został zakończony pomimo coraz głębszego i bardziej wnikliwego badania fenomenu życia, związanego z rozwojem wiedzy przyrodniczej (fizycznej i biologicznej). Aktualnym przykładem braku zgody badaczy w tej dziedzinie są spory w dziedzinie genomiki. Dla niektórych współczesnych naukowców obecny gwałtowny rozwój tego obszaru badań domaga się jedynie odpowiedniej umiejętności analizowania ogromnych ilości danych. Sedno życia sprowadzają oni do obecnego we wszystkich istotach żywych kodu genetycznego. Inni badacze życia wyrażają zgoła odmienne stanowisko, dostrzegając konieczność zrozumienia strukturalnych i interaktywnych właściwości całego badanego układu, swoją uwagę koncentrując zwłaszcza na kategorii informacji jako kluczowej dla zrozumienia procesów życiowych.

modynamics, Information, and Evolution: The problem of reductionism, „History and Philosophy of the Life Sciences”, 1(11) (1989), s. 115–118. Por. T. Nagel, *Reductionism and antireductionism* [w:] G.R. Bock, J.A. Goode (eds), *The limits of reductionism in biology*, Wiley, Chichester 1998, s. 3–10.

³ Theodosius Dobzhansky, Francisco J. Ayala, George L. Stebbins, James W. Valentine uważają, że rozróżnianie wielorakich typów pytań w debacie nad istotą życia jest pierwszym krokiem do znalezienia właściwych rozwiązań. Wiele zamieszania w tym temacie powstało, jak twierdzą, z nieprecyzyjnego formułowania pytań w konkretnym przypadku. Typowe jest przykładowo identyfikowanie przez rzeczników redukcjonizmu antyredukcjonistów z witalizmem, podczas gdy tak naprawdę byli oni często w rzeczywistości redukcjonistami ontologicznymi, a tylko antyredukcjonistami metodologicznymi i epistemologicznymi. Por. T. Dobzhansky, F.J. Ayala, G.L. Stebbins, J.W. Valentine, *Evolution*, s. 488.

Ważną rolę w wielowiekowej debacie nad naturą życia odegrali oprócz biologów i filozofów również fizycy. Niniejsza monografia prezentuje wkład tych ostatnich w wyjaśnianie życia. Podstawą rozprawy są stanowiska wypracowane przez fizyków poczynając od lat trzydziestych XX wieku aż do początków obecnego stulecia, prezentujące określoną strategię badań nad życiem. Wskazano na zewnętrzne i wewnętrzne uwarunkowania każdej z kluczowych koncepcji życia. Niniejsze opracowanie uwydatnia zarówno niezaprzeczalne osiągnięcia, jak również rzucające się w oczy trudności związane z wdrażaniem wybranej strategii badań.

Niniejsza praca często odwołuje się do fizyków operujących mechaniką kwantową, która w latach dwudziestych i trzydziestych ubiegłego wieku znalazła się w centrum uwagi fizyków i rzuciła nowe światło na rozumienie niektórych problemów biologii. Wielu badaczy zaczęło analizować problemy biologiczne. Próbowali zastosować matematyczne i statystyczne narzędzia nowej fizyki do badań nad życiem. Zasadniczy zrab niniejszej pracy rozpoczyna się od analizy poglądów szkoły kopenhaskiej, gdyż dyskusję fizyków nad fenomenem życia w XX wieku zapoczątkowano właśnie w tej szkole. Część monografii została poświęcona koncepcji życia opracowanej przez duńskiego fizyka Nielsa Bohra, a także pozostających pod jej wpływem takich fizyków, jak Max Delbrück, Pascual Jordan, Walter Elsasser i Walter Heitler. Wszyscy oni śladem Bohra podjęli próbę zastosowania zasady komplementarności do rozważań nad życiem. Ze względu na oryginalność spojrzenia i wpływ na dalsze losy rozumienia pojęć pierwsze miejsce w prezentacji i dyskusji zajmuje koncepcja przedstawiona w latach czterdziestych ubiegłego wieku przez jednego z ojców mechaniki kwantowej – Erwina Schrödingera w słynnych wykładach w Kolegium Trójcy Świętej w Dublinie w 1943 roku (będących podstawą opublikowanej rok później pracy *What is life?* [Czym jest życie?])⁴. Podjęta została szczegółowa refleksja zarówno nad koncepcją życia sformułowaną przez austriackiego fizyka, jak również jej wpływem na dalszy rozwój badań biologicznych w drugiej

⁴ Śledząc w czasie rozwój mechaniki kwantowej, należy zauważyć, że Bohr był trochę wcześniej przed Schrödingerem. Duński fizyk jeszcze szukał mechaniki kwantowej: dał podstawy doświadczalne, gromadząc wiele nowych faktów, które się nie zgadzały z fizyką klasyczną. Schrödinger natomiast (razem z Wernerem Heisenbergiem i Paulem Dirakiem) utworzyli mechanikę kwantową. Tak jak dzisiaj to widzimy, to komplementarność jest konsekwencją mechaniki kwantowej, tymczasem gdy Bohr wymyślił ideę komplementarności, mechanika kwantowa *de facto* dopiero się tworzyła. W historii mechaniki kwantowej Bohr był więc wcześniej, a Schrödinger później. Kiedy ten ostatni zagłębiał się w fenomen życia, mechanika kwantowa była na innym etapie swego rozwoju. Innymi słowy, gdy Schrödinger zaczął pisać *What is life?*, miał już obraz mechaniki kwantowej w stadium bardzo zaawansowanym.

połowie XX i w początkach XXI wieku. Przedmiotem zainteresowania stały się także koncepcje życia przedstawione przez innych uczonych (w tym George'a Gamowa), którzy w różnych okresach kariery naukowej w mniejszym czy większym stopniu pozostawali w dziedzinie poglądów na życie pod wpływem austriackiego fizyka.

Dyskusja fizyków nad fenomenem życia nie kończy się na bezpośrednich kontynuatorach Bohra i Schrödingera, ale sięgając do XX i XXI wieku, koncentruje się na autorach, którzy wprowadzili nowe treści do interpretacji organizacji życia. W swych rozważaniach z zakresu rodzącej się na naszych oczach biologii kwantowej współcześni fizycy koncentrują się na kwantowych aspektach życia, zwłaszcza jego początków, są też przez nich podejmowane próby zrozumienia podstawowych funkcji życiowych poprzez badanie kwantowych automatów komórkowych. Niniejsza praca nie ogranicza się tylko do zreferowania stanowisk, lecz na ich tle zasygnalizowano spojrzenie autora na omawiane kwestie.

Refleksje kolejnych pokoleń fizyków XX i XXI wieku ukierunkowanych na fenomen życia nie były jak dotąd przedmiotem dostatecznie wyczerpujących i szczegółowych opracowań, zwłaszcza w języku polskim. Niniejsza praca w zamyśle autora ma przynajmniej w pewnym stopniu wypełnić tę lukę w literaturze. Aby osiągnąć ten cel, zastosowano metodę zapożyczoną z „analizy immanentnej”. Dzięki niej jak gdyby „od wewnątrz” dokonano analizy pojęć, teorii, języka i argumentów przytaczanych przez przywoływanych fizyków w kwestiach dotyczących organizacji życia. Za pomocą tej metody można bowiem wydobywać, uporządkowywać i możliwie rzetelnie przedstawiać główne idee koncepcji życia przedstawione w niniejszej pracy na przykładzie omawianych autorów. Innymi słowy, autor oddaje głos reprezentatywnym fizykom omawianego okresu, aby niejako „od środka” zaprezentować ich idee składające się na koncepcję życia.

Monografia jest zbudowana zasadniczo na dwóch aspektach: formalnym i merytorycznym. Formalny stanowią uwarunkowania epistemologiczno-metodologiczne, zaś aspekt merytoryczny dotyczy strony treściowej analizowanego zagadnienia.

W pierwszym (wprowadzającym) rozdziale zaprezentowano uwarunkowania epistemologiczno-metodologiczne badań nad fenomenem życia. Na początku przedstawiono mechanistyczno-redukcyjno-istotne ujęcie organizacji życia w poglądach niektórych czołowych zwolenników i propagatorów doktryny mechanistycznej, bowiem w pewnym sensie spadkobiercą i kontynuatorem mechanicyzmu stał się współczesny redukcjonizm. Doktrynie tej będą poświęcone kolejne strony książki. W dalszej kolejności omówione zostały pozaredukcyjno-istotne koncepcje życia. By dowiedzieć się, co przyrodniczy

rozumieli pod pojęciem „siła życiowa”, ukazane zostały poglądy głoszone przez wybitnych badaczy ówczesnej epoki. Wielu uczonych, odrzucając witalistyczną koncepcję życia już na przełomie XIX i XX wieku, a zwłaszcza później – w latach dwudziestych i na początku lat trzydziestych ubiegłego wieku, zaprezentowało własne spojrzenie na fenomen życia. Te konkurencyjne względem witalizmu koncepcje nazywano między innymi organicyzmem, holizmem, organizmalizmem, integratywizmem, mnemizmem, gestaltywizmem, umweltywizmem czy kompozycjonizmem. W dalszej części rozdziału zaprezentowano więc kilka tego typu propozycji. W naszych czasach w spojrzeniu na fenomen życia spotykamy także liczną grupę obrońców swoiście rozumianego antyredukcyjizmu, zatem w końcowej części rozdziału scharakteryzowano współczesne stanowiska antyredukcyjistyczne.

Drugi rozdział książki jest próbą zdobycia wiedzy o tym, co fizycy ze szkoły kopenhaskiej w pierwszej połowie XX wieku rozumieli pod pojęciem „życie”. Rozważania o naturze życia pod kątem kopenhaskiej interpretacji mechaniki kwantowej zapoczątkował duński fizyk, laureat Nagrody Nobla, Niels Bohr. Przy prezentacji poglądów tego badacza dotyczących fenomenu życia uwaga została skupiona zarówno na aspektach formalnych (epistemologiczno-metodologicznych), jak i merytorycznych (treściowych). Przedmiotem zainteresowania stały się także koncepcje życia przedstawione przez innych fizyków tego okresu, którzy w mniejszym czy większym stopniu pozostawali pod wpływem poglądów Bohra na życie – jego współpracowników oraz następców. Były to koncepcje takich autorów, jak Pascual Jordan, Werner Heisenberg, Max Delbrück, Walter Elsasser i Walter Heitler. W szczególności przeanalizowano, w jakim sensie sformułowana przez Bohra zasada komplementarności została przez wymienionych fizyków obrona jako droga do rozwiązywania problemów ukierunkowanych na fenomen życia.

W trzecim rozdziale niniejszej rozprawy zaprezentowano oryginalną próbę odpowiedzi na fundamentalne pytanie, co to jest życie, podjętą przez szkołę „wiedeńską” stworzoną przez jednego z najwybitniejszych fizyków XX wieku Erwina Schrödingera. Odwołano się do pierwszych rozważań austriackiego fizyka dotyczących fenomenu życia pochodzących jeszcze z lat trzydziestych. Główna uwaga została jednak skoncentrowana na jego późniejszych spekulacjach biologicznych, zaprezentowanych w książce z 1944 roku *What is life?*; przedstawiono i przeanalizowano główne tezy wyłożone w tej pracy. Podjęta została także próba udzielenia odpowiedzi na pytanie o inspiracje fizyka dla swych poglądów biologicznych. Przedmiotem rozważań stał się także stan genetyki i biochemii w owym czasie. W końcowej części rozdziału została podjęta próba odpowiedzi na pytanie o wkład Schrödingera w biologię molekularną.

W czwartym rozdziale pracy omówiono dyskusję wokół „wiedeńskiej” koncepcji życia. Rozpoczęto od jej oceny (formalnej i merytorycznej), śledząc wybrane pozytywne i krytyczne uwagi czytelników *What is life?* Kolejną część rozdziału stała się próba oceny wpływu Schrödingera na sposób analizowania zagadnień biologicznych przez badaczy po drugiej wojnie światowej. Zasadne jest bowiem zadanie pytania o zakres tego wpływu na badaczy podejmujących zagadnienia biologiczne. W literaturze można bowiem spotkać dwie różne opinie dotyczące tego tematu. Część badaczy w biologicznych spekulacjach austriackiego fizyka dostrzega inspirację dla innych fizyków, chemików i biologów koncentrujących swoje badania wokół fenomenu życia. Według opinii innych autorów wpływ *What is life?* na przyszły profil badań biologicznych był śladowy bądź żaden. W rozdziale wyłuszczone zostały argumenty wysuwane przez obie strony trwającej debaty. W końcowej części zreferowano współczesne reinterpretacje najważniejszych biologicznych tez przedstawionych przez austriackiego fizyka. Współcześni badacze **(i)** próbują uzgodnić idee zawarte w *What is life?* ze współczesną wiedzą o pochodzeniu życia; **(ii)** zastanawiają się nad zasadnością wprowadzania jakiegokolwiek „nowych praw” do rozważań w kontekście życia; **(iii)** szczegółowo konfrontują tezy wyłożone w *What is life?* ze współczesną wiedzą z genetyki; **(iv)** podejmują próby poszerzania sformułowanych przez Schrödingera idei dotyczących termodynamiki w kontekście życia.

W ostatnim rozdziale przeanalizowano koncepcje życia prezentowane przez współczesnych fizyków skoncentrowane na kontekstowym wymiarze badań. Ci fizycy – a wśród nich są Paul C.W. Davies, Nigel Goldenfeld, Carl R. Woese, Evelyn Fox Keller, Bernd-Olaf Küppers, Lebrecht von Klitzing, Alfred Driessen, Hans-Peter Dürr, Howard Wiseman, Jens Eisert, Seth Lloyd, Jim Al-Khalili, Apoorva D. Patel, John Swain, Arun K. Pati oraz Derek Abbott – kontynuują refleksje nad fenomenem życia podejmowane przez znamienitych przedstawicieli „złotej ery” fizyki, przy czym wzięto pod uwagę zarówno aspekt formalny, jak i merytoryczny kontekstowych badań nad życiem. W szczególności przedmiot rozważań objął systemowe zasady organizacji bioukładów oraz kwantowe aspekty życia (uwzględniające między innymi splątanie kwantowe, dekoherencję, kwantową informatykę i automaty komórkowe oraz złożone układy otwarte).

Rozdział I

UWARUNKOWANIA EPISTEMOLOGICZNO-METODOLOGICZNE BADAŃ NAD ORGANIZACJĄ ŻYCIA

Zanim zostanie podjęta analiza formalno-merytoryczna ujęcia organizacji życia przez szkołę kopenhaską, wydaje się nieodzowne zasygnalizowanie zastanych przez jej przedstawicieli poglądów na fenomen życia. Właściwość czy cecha bycia żywym od niepamiętnych czasów pozostaje spornym tematem debat przyrodników⁵. Od wieków umysły licznych wybitnych badaczy zaprzętało pytanie, czym (jeśli w ogóle) różni się materia ożywiona (domena biologii) od materii nieożywionej (domeny fizyki i chemii)? Na przestrzeni dziejów padały różne odpowiedzi na to pytanie. Jak zasygnalizowano we wstępie, ze względu na przedmiot niniejszej rozprawy omówiono dwa ujęcia fenomenu życia: mechanistyczno-redukcjonistyczne i pozaredukcjonistyczne. Pierwsze zawiera zarówno komponent mechanistyczny, jak i redukjonistyczny. W mechanicyzmie akcentowany jest bardziej wymiar treściowy, a w redukjonizmie metodologiczny. W ramach ujęć antyredukjonistycznych uwaga została skupiona na takich koncepcjach życia, jak witalizm, organicyzm czy emergentyzm.

1.1. MECHANISTYCZNO-REDUKCJONISTYCZNE UJĘCIE ORGANIZACJI ŻYCIA

Fizycy na ogół stoją na stanowisku, że prawa fizyki wystarczą do wyjaśnienia organizacji życia. Często stawia się zarzut, że są oni zwolennikami mechanistycznej koncepcji życia. W związku z tym zasadna będzie próba wykazania związku mechanicyzmu z poglądami fizyków XX i XXI wieku.

⁵ O niektórych aspektach sporu wokół natury życia pisałem w następujących pracach: *Koncepcja życia w ujęciu reprezentatywnych przyrodników dwudziestego wieku. Praca doktorska napisana na seminarium filozofii przyrody ożywionej i filozofii ochrony środowiska*

Jakie były główne tezy mechanicyzmu? Mechanistyczna postawa w biologii to przekonanie, że wszystkie procesy życiowe można co do zasady wyczerpująco wyjaśnić na drodze praw, które znajdują zastosowanie w świecie nieożywionym⁶. Wczesne wersje mechanicyzmu opierały się na założeniu, że cała nauka pochodzi od mechaniki, a także wynikającym z tego wniosku, że wszystkie podstawowe funkcje nie są niczym więcej niż mechanizmami, a sam organizm żywy to maszyna⁷. Mechanicyści utrzymywali, że całość może zostać poznana poprzez zsumowanie poszczególnych części⁸. W związku z tym najlepsze zrozumienie życia ma zachodzić wtedy, kiedy zredukuje się je do najniższego poziomu organizacji – poziomu molekuł i atomów.

Ponieważ główny problem pracy dotyczy koncepcji życia według fizyków, zasadne będzie rozpocząć od stanowiska Izaaka Newtona⁹. Angielski

pod kierunkiem Ks. Prof. dra hab. Stanisława Zięby (*Maszynopis*), Katolicki Uniwersytet Lubelski, Lublin 2004; *Krótką (pre)historia sporu o naturę życia* [w:] K. Bałkowski, K. Maciąg (red.), *Filozofia nauki – wybrane zagadnienia*, Fundacja na rzecz Promocji Nauki i Rozwoju Tygiel, Lublin 2015, s. 103–118; *Natura życia we współczesnej dyskusji filozoficzno-biologicznej* [w:] P. Szczepańczyk, A. Kleśta, H. Wiśniewski (red.), *Życie... i o nim interdyscyplinarnie*, Unitas, Warszawa 2015, s. 170–192; *Czym jest życie? – od mniemań do wiedzy*, „Meritum”, 5 (2015), s. 26–38, <http://www.researchgate.net/publication/281455091>.

⁶ Por. R.H. Beyer, *From positivism to organicism: Pascual Jordan's interpretations of modern physics in cultural context*, Harvard University Press, Cambridge 1994, s. 63.

⁷ Por. D.L. Hull, *The philosophy of biological science*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs–New Jersey 1974, s. 129. Por. J. Gayon, *Defining life...*, s. 236.

⁸ Por. G.A. Allen, *Life science in the twentieth century*, John Wiley & Sons, New York, s. xxi. Por. G.G. Simpson, *This view of life. The world of an evolutionist*, Harcourt, Brace & World, New York 1964, s. 22.

⁹ Pierwszych śladów mechanicyzmu można doszukiwać się już u greckiego myśliciela Demokryta z Abdera w jego teorii atomistycznej. Por. G.J.M. De Klerk, *Mechanism and vitalism. A history of the controversy*, „Acta Biotheoretica”, 1(28) (1979), s. 2–3. Demokryt, a wraz z nim inni starożytni greccy myśliciele uczynili pierwszy krok od świata pełnego magii, bóstw i cudów, do świata naukowego. Francuski matematyk, fizyk i filozof René Descartes pisał w duchu nowego mechanistycznego paradygmatu naukowego, że ciało człowieka jest „zaledwie posągiem bądź maszyną [zbudowaną z elementu ziemistego], którą Bóg umyślnie w taki sposób ukształtował, by uczynić ją w najwyższym stopniu do nas podobną tak dalece, iż nie tylko nadał jej barwę i zewnętrzny kształt wszystkich naszych członków, lecz także pomieścił w jej wnętrzu wszystkie niezbędne części, by maszyna ta mogła chodzić, jeść, oddychać i by mogła wreszcie naśladować te wszystkie nasze czynności, o których sądzimy, iż wywodzą się z materii i zależą jedynie od [przestrzennego] układu (disposition) narządów”. R. Descartes, *Człowiek. Opis ciała ludzkiego*, tłum. A. Bednarczyk, PWN, Warszawa 1989, s. 3. Według Kartezjusza, mimo że cieleśną maszynę zamieszkuje dusza, nie ma ona wpływu na to, co się dzieje w ciele; to ostatnie podlega wyłącznie prawom fizyki. Inni badacze podążając tokiem myślenia francuskiego myśliciela, nie dostrzegali istotnej różnicy między ożywioną i nieożywioną materią, kładąc podwaliny problematyki dla przyszłych pokoleń

fizyk stworzył podstawy nowoczesnej (nazywanej dziś klasyczną) fizyki, która opisywała naturę za pomocą praw matematycznych i mechanicznych rządzących ziemskim światem, włączając w to organizmy żywe oraz ciała niebieskie¹⁰. Metodyka tej nowej nauki była na wskroś analityczna: dzieliła każdą z badanych rzeczy na tak wiele części, jak to tylko możliwe, albo na tyle, ile wymagało odpowiednie jej zrozumienie¹¹. W związku z tym próbowano usunąć z myśli naukowej uprzedzenia o charakterze mistycznym bądź antropomorficznym.

W następnym wieku ogromne postępy poczyniono w zakresie anatomii i systematyki¹². Ówczesne środowisko intelektualne zezwalało na eksperymenty na ciele, dzięki czemu możliwe stało się dokładne opisanie struktury organizmu żywego. Procesy mechaniczne, takie jak odruchy, ruchy mięśni czy krążenie krwi, były szczególnie odpowiednie dla badań eksperymentalnych. W erze oświecenia mechanicyzm osiągnął swój punkt szczytowy za sprawą francuskiego lekarza i filozofa Juliena Offraya de La Mettrie¹³. W jednej ze swych prac La Mettrie stwierdza: „człowiek jest maszyną i w całym wszechświecie istnieje tylko jedna substancja, występująca w rozmaitych postaciach”¹⁴.

Największe sukcesy biologia mechanistyczna osiągnęła jednak w ciągu następnych dwóch stuleci. Jednym z jej wielkich dokonań było rozpoznanie chemicznych składników organizmów oraz reakcji, w których biorą one udział, w celu wyjaśniania zjawisk fizjologicznych¹⁵. W 1828 roku niemiec-

wybitnych badaczy próbujących zrozumieć i wyjaśnić zagadkę życia. Por. K. Popowicz, *Lamarckizm społeczny a rasizm i eugenika we Francji*, Wyd. UW, Warszawa 2009, s. 42. Por. E. Mayr, *What makes biology unique? Considerations on the autonomy of a scientific discipline*, Cambridge University Press, Cambridge, s. 22.

¹⁰ Por. G.J.M. De Klerk, *Mechanism and vitalism...*, s. 3.

¹¹ Por. tamże.

¹² Por. tamże, s. 4.

¹³ Por. E. Mayr, *To jest biologia. Nauka o świecie ożywionym*, tłum. J. Szacki, Prószyński i S-ka, Warszawa 2002, s. 21.

¹⁴ J. De La Mettrie, *Człowiek-maszyna*, tłum. S. Rudniański, PWN, Warszawa 1984, s. 91.

¹⁵ Projekt ten faktycznie rozpoczął się już w erze chemii flogistonowej, jednak przybrał zupełnie nową formę wraz z zademonstrowaniem przez francuskiego fizyka i chemika Antoine’a Lavoisiera, że tlen jest jednym z pierwiastków chemicznych. Badacz ten uogólnił swoje stanowisko na inne pierwiastki, z których kilka – między innymi tlen, węgiel i wodór – wskazał jako stanowiące podstawę budowy organizmów żywych. Francuski chemik Claude Louis Berthollet wkrótce dodał do nich azot. Na bazie stosunków podstawowych pierwiastków francuski chemik Joseph Louis Proust zaproponował, a niemiecki chemik Justus von Liebig udoskonalił katalog białek, węglowodanów oraz tłuszczów jako podstawowych rodzajów składników odżywczych zwierząt. W rezultacie wszelkie teorie chemiczne proponowane w XIX wieku dotyczyły albo podstawowych pierwiastków, albo białek, węglowodanów

ki chemik Friedrich Wöhler przeprowadził laboratoryjną syntezę mocznika¹⁶. Tym samym zakwestionował obowiązujący dotąd pogląd, że mocznik powstaje tylko w organizmach żywych pod wpływem działania „siły życiowej”. Stało się jasne, że struktura związków organicznych wytworzonych w laboratorium i powstałych w organizmie jest taka sama; jedne i drugie podlegają tym samym prawom chemicznym. W połowie XIX wieku dziesiątki substancji organicznych zostały wytworzone w probówce¹⁷. Z kolei wykazanie w 1897 roku przez niemieckiego chemika Eduarda Buchnera, że fermentacja może zostać przeprowadzona w środowisku bezkomórkowym, zostało uznane zarówno za jeden z podstawowych elementów współczesnej biochemii, jak również główny eksperymentalny „gwóźdź do trumny” witalizmu¹⁸. Jeszcze jednym z wielkich dokonań biologii mechanistycznej było odkrycie komórek jako podstawowych jednostek życia oraz opracowanie nowych koncepcji mechanistycznych do opisu ich funkcjonowania¹⁹. Wreszcie, w 1861 roku sformułowano ogólną teorię, która czasami określana jest mianem „punktu wyjścia” dla współczesnej biologii²⁰. Od tego momentu

i tłuszczów w odniesieniu do ich roli w zdarzeniach zachodzących w organizmach. Por. W. Bechtel, *Addressing the vitalist's challenge to mechanistic science: dynamic mechanistic explanation* [w:] S. Normandin, Ch.T. Wolfe (eds), *Vitalism and the scientific image in post-enlightenment life science, 1800–2010*, Springer, Dordrecht 2013, s. 348–49.

¹⁶ Por. A. Jurand, *Budowa żywej materii*, „Wiedza Powszechna”, Warszawa 1957, s. 7.

¹⁷ Por. D.E. Wooldridge, *The machinery of life*, McGraw-Hill Book Company, New York 1996, s. 21.

¹⁸ Por. D. Gatherer, *So what do we really mean when we say that systems biology is holistic?*, „BMC Systems Biology”, 4(22) (2010), <http://link.springer.com/article/10.1186/1752-0509-4-22> (25.07.2015).

¹⁹ Prace dotyczące komórek oraz odnoszące się do nich teoretyzacje sięgają czasów angielskiego fizyka, biologa i matematyka Roberta Hooke’a i jego odkrycia komórek (roślinnych) oraz identyfikacji przez holenderskiego przyrodnika Antoniego van Leeuwenhoek’a organizmów jednokomórkowych. Wraz z udoskonaleniem mikroskopu angielski botanik Robert Brown wykrył jądro w komórkach skórki storczyków, co z kolei dało podstawę do twierdzenia niemieckiego badacza Matthiasa Jacoba Schleidena, że tkanki roślinne zasadniczo składają się z komórek. Niemiecki zoolog, fizjolog i histolog Theodor Schwann rozszerzył to stwierdzenie o tkanki zwierzęce oraz stworzył argument teoretyczny przemawiający za tym, że komórki są podstawowymi jednostkami, w których następuje realizacja procesów życiowych. Por. W. Bechtel, *Addressing the vitalist's challenge to mechanistic science...*, s. 349.

²⁰ Wielu przyrodników drugiej połowy XVIII wieku było przekonanych o istnieniu substancji żywej jako podstawowego i nieodróżnionego materiału, który daje początek bardziej uformowanym elementom. Budząca tyle zaciekawienia i tak ważna dla biologów substancja została po raz pierwszy wyróżniona spośród innych substancji śluzowatych, opisana pod względem jej właściwości fizyczno-chemicznych i nazwana „sarkodą” w 1835 roku przez francuskiego zoologa i botanika Félixa Dujardina. Dalsze ogniwo w łańcuchu obserwacji, prowadzących do poznania protoplazmy, tworzą badania czeskiego anatoma i fizjologa Jana Evangelisty Purkiniego. Przeszedł on do historii jako pierwszy badacz, który użył nazwy

substancji znanej jako protoplazma przypisywano wiodące miejsce w dyskusji na wszystkie tematy związane ze zjawiskiem życia. W centrum myśli biologicznej połowy XIX wieku komórkę jako fundamentalną jednostkę życia zastąpiła protoplazma.

Czołowy niemiecki biolog mechanistyczny Ernst Haeckel nie dostrzega żadnej istotnej różnicy między światem przyrody nieożywionej i światem przyrody ożywionej. Píše: „W szczególności podkreślamy przy tym zasadniczą jedność nieorganicznej i organicznej przyrody, z których ta ostatnia stosunkowo późno rozwinęła się z pierwszej. Jak trudno przeprowadzić dokładną granicę pomiędzy tymi dwiema głównymi dziedzinami natury, tak też nie możemy uznać bezwzględnej różnicy między światem roślinnym a zwierzęcym, między światem zwierzęcym a światem ludzkim”²¹. Dla niemieckiego biologa życie jest „określeniem zbiorowym dla sumy bardziej skomplikowanych zjawisk ruchu materii”, podkreśla więc nieodłączny związek między życiem a ruchem materii²².

U schyłku XIX stulecia amerykański bakteriolog Herbert William Conn w książce *The story of the living machine* (Historia żywej maszyny) szczegółowo przedstawił swoją mechanistyczną koncepcję życia. Powołując się na „doktrynę współzależności sił”, twierdzi, że organizm żywy przypomina maszynę przekształcającą jedną formę energii w drugą. Píše: „Parowóz jest napędzany paliwem, które jest jego magazynem energii. Promienie słoneczne padające na świat wieki temu były skwapliwie wykorzystywane przez

protoplazmy jako części składowej komórki zwierzęcej. Od czasu niemieckiego botanika Hugo von Mohla uczeni mieli już spore wyobrażenie o substancji żywej, której nadano nazwę „sarkoda” u zwierząt niższych i „protoplazmy” u roślin, nie było jednak jeszcze wyraźnej wskazówki, że obie te substancje są praktycznie tym samym. Po badaniach Mohla nad „śluzem roślinnym” zrodził się ogólny ruch zmierzający do ustalenia, że sarkoda zoologów i protoplazma botaników jest jedną i tą samą substancją. Dopiero jednak niemiecki zoolog-anatom Maksymilian Schultze na podstawie własnych badań udowodnił tezę o identyczności sarkody zwierzęcej i protoplazmy roślinnej. Por. H.W. Conn, *The story of the living machine*, D. Appleton & Company, New York 1899, s. 74. Por. E. Mayr, *To jest biologia...*, s. 27. Por. W. Locy, *Badacze życia*, tłum. J. Wilczyński, Gebethner i Wolff, Warszawa 1934, s. 271, 284, 288–94. Por. K. Shippen, *Ludzie, którzy badali tajemnice życia*, tłum. C. Lewandowska, T. Zajczkowski, Nasza Księgarnia, Warszawa 1961, s. 101–102. Por. W. Kozuschek, *Jan Ewangelista Purkinje (1787–1869) – pierwszy dyrektor Instytutu Zoologii we Wrocławiu*, „Seminaria Naukowe WTN”, 7(58) (2008), s. 69–70. Por. G.R. Welch, *T.H. Huxley and the ‘Protoplasmic theory of life’: 100 years later*, „Trends in Biochemical Sciences”, 11(20) (1995), s. 481.

²¹ E. Haeckel, *Monizm jako węzeł między religią a wiedzą. (Credo przyrodnika)*, tłum. M. Rosenfeld, Kraków 1906, s. 16.

²² Tenże, *Zasady morfologii ogólnej organizmów*, tłum. J. Nowakowski, F. Piątek, PWN, Warszawa 1960, s. 75.

rosnące rośliny i magazynowane w jej formie potencjalnej w drewnie, które później stało się węglem. To właśnie ten węgiel jest umieszczany w piecu parowozu, dzielony na mniejsze kawałki, wskutek czego przestaje magazynować energię, przemienioną w swoją aktywną formę, jaką jest ciepło. Parowóz pobiera uwolnioną w ten sposób energię i dzięki swojemu specyficznemu mechanizmowi przekształca ciepło w ruch swoich kół zamachowych. Biorąc pod uwagę takie pojmowanie przekształcania energii zastanawiamy się, czy nie jest ono równie prawdziwe dla organizmów żywych, które także są karmione jedzeniem zawierającym zmagazynowaną energię? Czy z uwagi na ten fakt nie powinniśmy uważać organizmu za prostą maszynę przekształcającą energię potencjalną w ruch, ciepło lub jakąkolwiek inną aktywną formę?²³ W innym miejscu dopowie: „Już na pierwszy rzut oka widać, że organizm żywy jest maszyną. Tak jak inne maszyny składa się ze starannie dobranych elementów, które mają do wykonania określone zadania. Ponadto tak jak w przypadku innych maszyn, funkcjonowanie jest zależne od dostosowania elementów. Co więcej maszyna ta nie tworzy ani też nie niszczy energii, lecz jedynie przekształca energię potencjalną dostarczaną jej w pokarmie w inną formę aktywnej energii i – tak jak w przypadku innych maszyn – jej siły zanikają, gdy ulega ona uszkodzeniu”²⁴.

Na początku XX wieku stanowisko mechanistyczne zaprezentowali dwaj biolodzy: cytolog Edmund Beecher Wilson²⁵ i fizjolog Jacques Loeb.

W książce *The physical basis of life* (Fizyczna podstawa życia), nawiązującej do pracy Thomasa Huxleya z 1868 roku, Edmund Wilson nie wahał się porównać organizmu żywego do maszyny składającej się ze skoordynowanych części, będących różnorodnymi „sprytnymi urządzeniami”, harmonijnie współpracującymi w dziedzinie anatomicznej, fizjologicznej czy też chemicznej, dzięki czemu chroniły i utrzymywały cały organizm²⁶. Amerykański biolog zademonstrował swoje wyraźne oddanie mechanizmowi, przekonany, że dzięki temu, iż podążamy za mechanistycznymi metodami i koncepcjami, nasze obserwacje i eksperymenty codziennie

²³ H.W. Conn, *The story of the living machine*, s. 13.

²⁴ Tamże, s. 183.

²⁵ Wilson był jednym z największych biologów przełomu XIX i XX wieku. Jego rozległe badanie struktury i funkcji komórek doprowadziło do wielu kluczowych odkryć, które stworzyły podstawy obecnych teorii. Miał pokaźny wkład w teoretyczne i eksperymentalne aspekty biologii, a także w zgromadzenie wiedzy i edukację w tej dziedzinie. Por. E. Mendelsohn, *Edmund Beecher Wilson* [w:] E. Mendelsohn (ed.), *Life sciences in the twentieth century. Biographical portraits*, Charles Scribner's Sons, New York 2001, s. 177.

²⁶ Por. E.B. Wilson, *The physical basis of life*, Yale University Press, New Haven 1923, s. 32. Szczegółową analizę koncepcji życia amerykańskiego biologa przeprowadziłem w pracy *Koncepcja życia w ujęciu reprezentatywnych przyrodników...*

przyczyniają się do powiększania wiedzy o organizacji życia. Odrzucenie koncepcji mechanistycznej jego zdaniem to jednoznaczne opowiedzenie się po stronie witalistów, a każdy, kto ma nadzieję „posunąć naprzód nasze zrozumienie organizmu żywego”, musi wyrazić swój zdecydowany sprzeciw wobec tego typu alternatywy. „Nie uważam – konkluduje Wilson – by wyznanie naszej niewiedzy nie pozostawiało żadnej innej ucieczki prócz witalizmu. Twierdzić, iż obserwacje i eksperymenty nie przybliżą nas do rozwiązania zagadki, byłoby skokiem w ciemne wieki. [...] Ja ze swej strony uważam za zabawne wypatrywanie dnia, kiedy ta wielka zagadka zdradzi swoją tajemnicę”²⁷.

W 1911 roku Jacques Loeb napisał artykuł *The mechanistic conception of life* (Mechanistyczna koncepcja życia) na I Międzynarodowy Kongres Monistów, zwołany przez Haeckela w Hamburgu²⁸. Artykuł ten, opublikowany w kolejnym roku pod tym samym tytułem jako broszura, był żarliwym wyznaniem wiary Loeba w to, że wszystkie aspekty procesów życiowych mogą zostać zredukowane poprzez badania laboratoryjne do fundamentalnych praw fizyki i chemii. Jego własne badania, między innymi dotyczące sztucznej partenogenezy u zwierząt (stymulowanie jaj, by zaczęły się rozwijać bez uprzedniego zapłodnienia), wzmocniły jego skłonności mechanistyczne. Oto jak streszcza swoje dokonania: „Udało mi się dwanaście lat temu w przypadku niezapłodnionych jaj jeżowca, gdy potraktowałem je wodą morską, której stężenie zostało wzmocnione poprzez dodanie niewielkiej ilości soli lub cukru, rozwinąć w larwy pływające. Jaja zostały umieszczone na dwie godziny w roztworze, w którym ciśnienie osmotyczne zostało podniesione na określoną wysokość. Gdy jaja zostały złożone w normalnej wodzie morskiej, zamieniły się w larwy i część z tych larw wytworzyła jelita i szkielet. [...] Widzimy zatem, że proces aktywacji jaja przez plemnik, który dwanaście lat temu spowijała kompletna ciemność, jest obecnie prawie całkowicie zredukowany do wyjaśnienia fizyczno-chemicznego”²⁹. Jego eksperymenty, w szczególności te dotyczące rozwoju zarodkowego, były podobne w charakterze do działań prowadzonych przez niemieckiego biologa neowitalistę Hansa Driescha, jednak Loeb wyciągnął wniosek, że aktywność życiowa wykazywana przez badane organizmy może być całkowicie wyjaśniona jako konsekwencja procesów

²⁷ E.B. Wilson, *The physical basis of life*, s. 46–47.

²⁸ Por. G.A. Allen, *Life science...*, s. 73. E. Mendelsohn, *Jacques Loeb* [w:] E. Mendelsohn (ed.), *Life sciences...*, s. 110.

²⁹ J. Loeb, *The mechanistic conception of life. Biological essays*, The University of Chicago, Chicago 1912, s. 7.

fizyczno-chemicznych³⁰. W innej pracy postulował, aby wszelkie zjawiska życiowe traktować wyłącznie jako przejaw sił fizycznych i chemicznych³¹. W jego przekonaniu można je ostatecznie sprowadzić do ruchów lub zmian zachodzących w koloidach³².

Mechanistyczne poglądy Loeba zostały ciepło przyjęte przez zgromadzenie monistów w Hamburgu i stały się niezwykle modne wśród biologów w latach dwudziestych XX wieku³³. Mechanicyzm głoszony przez amerykańskiego biologa niemieckiego pochodzenia nie zdołał jednak na długo zdominować nauk biologicznych³⁴. Jednostronna próba, by zredukować wszystkie zjawiska biologiczne do materii w ruchu, w latach trzydziestych napotkała na swej drodze zdecydowany opór ze strony nowego nurtu zaistniałego zarówno w fizyce, jak i w fizjologii na początku XX wieku³⁵. Nurt ten koncentrował swoją uwagę na współzależnościach pomiędzy częściami, a nie samych częściach badanych w izolacji. Potrzebne stały się nowe metody i kryteria dla badania złożonych zjawisk. Postawa ta, już w pewnym stopniu widoczna w pracach Claude'a Bernarda z lat siedemdziesiątych XIX wieku, zajmowała ważne miejsce w badaniach szkockiego fizjologa Johna Scotta Haldane'a, amerykańskiego biochemika Lawrence'a Josepha Hendersona, angielskiego fizjologa Charlesa Scotta Sherringtona oraz amerykańskiego fizjologa Waltera Bradforda Cannona w pierwszych trzech dekadach XX wieku. Nie odrzucając idei, że wszystkie procesy fizjologiczne wiążą się z interakcją atomów, badacze ci zaczęli zauważać, że redukcja wszystkich złożonych procesów do zależności molekularnych rozminęła się z jednym bardzo istotnym punktem w biologii, a mianowicie z tym, że organizmy żywe posiadają wysoki poziom organizacji i nie są po prostu przypadkową zbieraniną molekuł.

Tak więc wielu biologów opowiedziało się za modelem zdającym się być satysfakcjonującą formą wyjaśnienia i nieograniczającym się tylko do mechanizmów molekularnych, przez które poszczególne części organizmu funkcjonowały, ale także ujmującym to, jak te części były zorganizowane (to jest regulującym ich wzajemny wpływ na utworzenie kompletnej, całej formy)³⁶.

³⁰ Por. H. Hein, *The endurance of the mechanism-vitalism controversy*, „Journal of the History of Biology”, 1(5) (1972), s. 171.

³¹ Por. J. Loeb, *Wstęp do fizjologii i psychologii porównawczej*, tłum. Z. Szymanowski, Księgarnia Naukowa w Warszawie, Warszawa 1906, s. 19.

³² Por. tamże, s. 21.

³³ Por. G.A. Allen, *Life science...*, s. 73.

³⁴ Por. tamże.

³⁵ Por. tamże, s. 74.

³⁶ Por. tamże.

Uznali, że dostarczenie wyczerpującego opisu organizmów żywych przekracza możliwości mechanicystów³⁷. Nazbyt uproszczona metodologia mechanistyczna w dużym stopniu ograniczała pełne zrozumienie złożoności organizmów³⁸. Porażka mechanicyzmu w obszarze biologicznym była też konsekwencją upadku samej doktryny mechanistycznej³⁹. W XX wieku stworzono teorię względności i mechanikę kwantową, dzięki czemu okazało się, że mechanika klasyczna ma zastosowanie do stosunkowo niewielkiej liczby zjawisk. Mechanicyzm okazał się niewystarczający do całościowej analizy odznaczającego się ogromną złożonością fenomenu życia. Mechanistyczne postrzeganie życia utrzymało się nawet pomimo tego, że założenie, na którym się opiera, zostało na przełomie wieków XIX i XX zakwestionowane i odrzucone⁴⁰. Zwolennicy mechanicyzmu nadal utrzymywali, że aby zjawiska biologiczne były zrozumiałe, organizmy żywe muszą być interpretowane dosłownie jako maszyny składające się z kół pasowych, przewodów pneumatycznych i tym podobnych elementów.

W pewnym sensie spadkobiercami i kontynuatorami mechanistycznej interpretacji organizacji życia są współcześni redukcjoniści. Główną ideą leżącą u podstaw koncepcji redukcjonizmu jest ta, że można badać i wyjaśniać zjawiska naturalne bądź układy i ich właściwości poprzez badanie i wyjaśnianie ich elementów składowych oraz ich właściwości⁴¹. Innymi słowy, całość jest równoznaczna z sumą bądź z analizą i ostateczną syntezą jego części. W odniesieniu do standardowego modelu hierarchii zjawisk przyrodniczych w redukcjonizmie twierdzi się, że relacja pomiędzy poszczególnymi poziomami hierarchicznymi przejawia się w ruchu skierowanym ku górze, od poziomów niższych ku wyższemu. Mówiąc inaczej, zjawiska na wyższym poziomie mogą być badane oraz wyjaśniane w odniesieniu do zjawisk na poziomach niższych, ponieważ zjawiska na niższym poziomie dają początek bądź powodują inne zjawiska na kolejnych, wyższych poziomach przyczynowości (przyczynowość przesuwana się od

³⁷ Por. E. Mayr, *To jest biologia...*, s. 23.

³⁸ Por. G.E. Allen, *Mechanism, vitalism and organicism in late nineteenth and twentieth-century biology: the importance of historical context*, „Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences”, 36 (2005), s. 280.

³⁹ Por. M. Heller, T. Pabjan, *Elementy filozofii przyrody*, Biblos, Tarnów 2007, s. 82.

⁴⁰ Por. D.L. Hull, *The philosophy of biological science*, s. 130.

⁴¹ Por. J.A. Marcum, *The conceptual foundations of systems biology: an introduction*, Nova Science Publishers, New York 2009, s. 21–22. Por. S. Rose, *What is wrong with reductionist explanations of behaviour?* [w:] G.R. Bock, J.A. Goode (eds), *The limits of reductionism...*, s. 177–178. Por. P. Nurse, *Reductionism and explanation in cell biology* [w:] G.R. Bock, J.A. Goode (eds), *The limits of reductionism...*, s. 93.

poziomów niższych w górę, ku poziomom najwyższym). Dodatkowo geny lub genotyp determinują lub kontrolują cechy oraz zachowanie organizmu bądź jego fenotyp.

Redukcjonizm wywiera silny wpływ na myślenie naukowe⁴². Jeżeli wszystkie układy fizyczne są ostatecznie kombinacjami atomów, świat został już wyjaśniony na poziomie fizyki subatomowej. Pojęcie złożoności traci wówczas większość swojego znaczenia, ponieważ prawdziwa moc wyjaśnień naukowych opiera się na najniższym poziomie opisu. Zatem twierdzenie, że człowiek jest „żywy”, traci swą moc, ponieważ żaden atom w ciele człowieka nie żyje, a ludzkie ciała są niczym innym jak kombinacjami atomów. Jakość „bycia żywym” jest tym samym skutecznie ignorowana. Podobnie – jeśli mózgi są zwykłymi zespołami komórek, które to są z kolei zespołami atomów – umysłowy wymiar myśli, uczuć, wrażeń i tak dalej jest równie bezsensowny. Redukcjonista „z krwi i kości” nie ma żadnego interesu w złożoności, ponieważ złożony system makroskopowy różni się od prostego układu jedynie szczególnym ułożeniem jego części⁴³. Jeśli zaś przyjmiemy, że kierunek wyjaśnienia zawsze prowadzi z dołu do góry, wówczas po wytłumaczeniu najniższego poziomu, wyjaśniona jest całość⁴⁴. Dlatego też zunifikowane teorie końcowe są czasami nazywane „teoriami wszystkiego”.

Niewielu naukowców przyjmuje tak skrajne stanowisko⁴⁵. Większość z nich to pragmatycy – uznają oni, że nawet jeśli fizyka subatomowa może zasadniczo wyjaśnić działanie ludzkiego mózgu, w praktyce nie ma na to nadziei. Niektórzy idą jeszcze dalej i twierdzą, że złożone jakości „bycia żywym”, „myślenia” i tak dalej mają autentyczne znaczenie, którego nie można – nawet z zasady – zredukować do zachowania cząstek elementarnych. Na każdym poziomie opisu – węgla, cząsteczek, komórek, organizmów, społeczeństw i kultur – wyłaniają się autentycznie nowe zjawiska i właściwości, które wymagają praw i zasad właściwych dla tych poziomów. Tacy zwolennicy antyredukcjonizmu odrzucają nieodparty redukjonizm jako „błędny zlepek nic nieznaczących przemyśleń”, który nie wyjaśnia jakości takich jak „bycie żywym”, lecz na drodze ich definiowania „zamiata je pod dywan”.

⁴² Por. D. Davies, *Introduction: toward an emergentist worldview* [w:] N.K. Gregersen (ed.), *From complexity to life. On the emergence of life and meaning*, Oxford University Press, Oxford–New York 2003, s. 4.

⁴³ Por. tamże, s. 4–5.

⁴⁴ Por. tamże, s. 5.

⁴⁵ Por. tamże.

Pojęcia „redukcjonizm” używamy w różnych kontekstach. Najbardziej podstawowe z nich to: ontologiczny, metodologiczny i epistemologiczny. Mimo że argumenty za i przeciw redukcjonizmowi często zawierają mieszankę postulatów uwikłanych w każdy z powyższych kontekstów, to różnice między poszczególnymi znaczeniami redukcjonizmu są znaczące⁴⁶.

1. Redukcjonizm ontologiczny przyjmuje, że każdy poszczególny układ biologiczny składa się wyłącznie z cząsteczek i ich interakcji⁴⁷. W metafizyce idea ta jest często nazywana fizykalizmem, który w kontekście biologicznym zakłada, że każdy proces biologiczny jest identyczny z pewnym konkretnym procesem fizyczno-chemicznym. Zjawiska biologiczne są po prostu pewnymi specjalnymi układami elementów fizyczno-chemicznych⁴⁸. Innymi słowy, organizm biologiczny jest wynikiem strukturyzacji makromolekuł w odniesieniu do specyficznych wzorców. Części organizmu dyktują jego wzorzec strukturalny. Nie ma niczego odrębnego ontologicznie w odniesieniu do zjawisk złożonych czy wyższego rzędu, jeśli zestawimy je ze zjawiskami prostymi niższego poziomu. Łańcuch przyczynowy prowadzi wyłącznie w jednym kierunku, od dołu ku górze hierarchii.

Pojęciem powiązaniem z redukcjonizmem ontologicznym jest determinizm genetyczny (inaczej: genetycyzm, esencjalizm genetyczny, fatalizm genetyczny)⁴⁹. Trzy najważniejsze założenia leżące u podstaw determinizmu genetycznego, to:

- genotyp, czy też system genetyczny organizmu, kształtuje jego fenotyp.
- genotyp determinuje możliwości oraz granice możliwości organizmu i są one niezmiennie.
- genotyp określa pewne tendencje organizmu, w szczególności zaś tendencje fizjologiczne i behawioralne. W przypadku „silnego” determinizmu genetycznego genotyp zawsze dyktuje fenotyp; organizmy i ich zachowanie są jedynie ekspresją genów. W przypadku „słabego” determinizmu genetycznego genotyp czasami dyktuje fenotyp. Determiniści często wyrażają tę formę determinizmu genetycznego w kategoriach potencjału bądź predyspozycji, które geny nakładają na organizm. „Umiarkowany” determinizm genetyczny zajmuje stanowisko pośrednie pomiędzy determinizmem „silnym” a „słabym”.

⁴⁶ Por. I. Brigandt, A. Love, *Reductionism in biology* [w:] E.N. Zalta (ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Fall 2010 Edition)*, <http://plato.stanford.edu/archives/fall2010/entries/molecular-biology> (13.06.2015).

⁴⁷ Por. tamże.

⁴⁸ Por. J.A. Marcum, *The conceptual foundations...*, s. 23.

⁴⁹ Por. tamże, s. 23.

2. Redukcjonizm metodologiczny wychodzi z założenia, że systemy biologiczne najlepiej badać na najniższym możliwym poziomie oraz że badania doświadczalne powinny być ukierunkowane na odkrywanie molekularnych i biochemicznych przyczyn⁵⁰. Typowym przykładem tego typu strategii jest rozkład złożonego systemu na części. Biolog może badać części komórkowe organizmu w celu zrozumienia jego zachowania jako całości albo też badać biochemiczne składniki komórki, aby zrozumieć jej właściwości. Mimo że redukcjonizm metodologiczny często motywowany jest domniemaniami redukcji ontologicznej, nie jest on jej pochodną. W rzeczywistości w przeciwieństwie do idei redukcji ontologicznej redukcjonizm metodologiczny budzi więcej kontrowersji wśród badaczy życia. Twierdzi się, że czysto redukjonistyczne strategie badawcze mogą być systemowo stronnicze i pomijać istotne właściwości biologiczne.

3. Redukcjonizm epistemologiczny przyjmuje, że wiedza na temat jednej dziedziny nauki może być zredukowana do innej⁵¹. Innymi słowy, biolodzy mogą redukować bez straty informacji teorii oraz prawa wykorzystywane do wyjaśniania zjawisk biologicznych bądź też wyprowadzać je od teorii oraz praw wykorzystywanych do wyjaśniania zjawisk chemicznych⁵². I dalej – mogą oni redukować – ponownie bez straty informacji – teorii oraz prawa wykorzystywane do objaśniania zjawisk chemicznych, do wyjaśniania zjawisk fizycznych bądź wyprowadzać je od nich. Ostatecznie zdaniem redukjonistów epistemologicznych nie będzie istnieć hierarchia teorii (praw czy wyjaśnień), gdyż „zawali się” na poziomie fizycznym. Tym samym cała naukowa – jeśli nie ludzka – wiedza jest zasadniczo wiedzą fizyczną.

Choć poparcie dla tej formy redukjonizmu może być motywowane połączeniem ontologicznego i metodologicznego redukjonizmu, jej możliwości nie wynikają z żadnej z nich⁵³. W istocie debaty poświęcone idei redukcji w biologii uznawały ten rodzaj redukcji za najbardziej kontrowersyjny z całej trójki. Krytycy podnosili całą gamę zarzutów i problemów dotyczących redukjonizmu epistemologicznego, twierdząc, że nie można zredukować terminu pochodzącego z teorii bądź prawa wtórnego albo wyprowadzać go z terminów teorii lub praw pierwotnych, ponieważ prawa i teorie pierwotne i wtórne są w stosunku do siebie logicznie niewspółmierne⁵⁴. Innymi słowy, pomiędzy istniejącymi dwiema teoriami czy prawami nie występuje wystarczająca logicznie część wspólna. Należy raczej stwierdzić, że takie

⁵⁰ Por. I. Brigandt, A. Love, *Reductionism in biology*.

⁵¹ Por. tamże.

⁵² Por. J.A. Marcum, *The conceptual foundations...*, s. 24.

⁵³ Por. I. Brigandt, A. Love, *Reductionism in biology*.

⁵⁴ Por. J.A. Marcum, *The conceptual foundations...*, s. 24.

teorie i prawa nie dzielą wspólnych środków pozwalających na ich połączenie bez utraty informacji. Zdaniem krytyków związek pomiędzy różnymi poziomami w hierarchii nie jest tak oczywisty, jak utrzymują redukcjoniści epistemologiczni, z powodu złożoności zjawisk wyższego poziomu oraz ich nieredukowalności do zjawisk niższego poziomu. Podstawą tej niewspółmierności jest złożoność zjawisk wyższego poziomu i ich nieredukowalność do zjawisk niższego poziomu, co stało się ostatecznie punktem spornym pomiędzy redukcjonistami a ich krytykami.

Relacje pomiędzy tymi trzema typami redukcjonizmu są istotne⁵⁵. Redukcjonizm ontologiczny służy jako założenie dotyczące materialnych części składowych tworzących zjawiska naturalne. Na podstawie tego założenia naukowcy wynajdują i rozwijają metody i technologie do badania tych zjawisk w odniesieniu do ich elementów podstawowych. Wykorzystują oni następnie obserwacje oraz uzyskane podczas badań wyniki do redukcji eksplanacji teoretycznych dotyczących zjawisk złożonych oraz do wyjaśnienia teoretycznego ich komponentów elementarnych, konstytuujących złożone zjawiska.

Wielu badaczy akceptuje oraz promuje redukcjonizm z kilku różnych powodów. Streśćmy je za Jamesem A. Marcumem⁵⁶. Pierwszym jest fakt, że redukcjonizm jest bardzo efektywny w odniesieniu do identyfikowania mechanizmów leżących u podstaw zjawisk biologicznych. Część sukcesu redukcjonizmu zawdzięcza upraszczaniu oraz analizie złożonych procesów w odniesieniu do ich części składowych. Poprzez izolowanie oraz identyfikację różnych komponentów złożonego układu oraz jego właściwości redukcjoniści są w stanie złożyć te elementy w całość bądź przeprowadzić syntezę mechanizmu leżącego u podstaw tych procesów. Redukcjonizm zapewnia możliwość prowadzenia prostej, spójnej narracji dotyczącej zjawisk naturalnych oraz ich części składowych, co umożliwia biologom manipulowanie oraz kontrolę nad tego typu zjawiskami. Dodatkowo przynosi on ze sobą silne związki przyczynowe pomiędzy zjawiskami wyższego poziomu oraz ich częściami składowymi w taki sposób, że przyczynowość pociąga za sobą redukcjonizm. Innymi słowy, podmioty niższego poziomu oraz ich właściwości są przyczynowo efektywne (o ile nie wystarczające), w odniesieniu do stworzenia podmiotów wyższego poziomu zapewniają uniwersalne twierdzenia na temat zjawisk złożonych, takich jak organizmy biologiczne i ich procesy z ich właściwościami. Tym samym metoda analizy i syntezy jest skuteczna, jeśli chodzi o badanie oraz wyjaśnianie złożonych

⁵⁵ Por. tamże, s. 22.

⁵⁶ Por. tamże, s. 25–26.

zjawisk. Strategia redukcyjna ma charakter instrumentalny w odniesieniu do identyfikacji podmiotów molekularnych zaangażowanych w metabolizm glukozy, porównywalny dla wielu różnych – o ile nie wszystkich – organizmów. Poniżej przedstawiono kilka współczesnych redukcjonistycznych stanowisk w kwestii organizacji życia⁵⁷.

Dociekania należy rozpocząć od pytania: Czy istnieje „swoistość biologiczna”? Szczególną wagę odkrycia dokonanego w 1953 roku przez Jamesa Watsona i Francis Cricka w celu dogłębnego zrozumienia fenomenu życia podkreślił Kenneth F. Schaffner. Pisze: „Ich model składający się z dwóch przeplatających się prawoskrętnych helis za pomocą sieci szkieletowych fosforanu i cukru, jak i różnych sekwencji zasad purynowych i pirymidynowych baz wewnątrz, nie tylko przetrwał w swojej istocie próbę wielu różnorodnych eksperymentów, ale również odegrał znaczącą rolę w stymulowaniu ogólnego rozwoju ku pełnemu wyjaśnieniu chemicznemu organizmów biologicznych i procesów w nich zachodzących”⁵⁸. Zdaniem badacza rozwój implikacji modelu Watsona i Cricka daje przekonujące naukowe powody by wierzyć, że systemy biologiczne to po prostu układy chemiczne, a biologia jest niczym więcej niż chemią⁵⁹. Przekonuje, że odkrycia współczesnej biologii molekularnej bazujące na modelu Watsona i Cricka uzasadniają ogólną biologiczną zasadę redukcji. Zasadę tę (obowiązującą wszystkie teorie biologiczne) Schaffner formułuje następująco: „w organizmie zbudowanym z chemicznych składników zachowanie organizmu jest funkcją wyizolowanych składników z dodatkiem struktury wewnętrznej tych składników o podłożu topologicznym. (Środowisko musi oczywiście być czasem odpowiednie do tego)”⁶⁰. Pojęcie „struktura wewnętrzna o podłożu topologicznym” ma wskazywać na ułożenie przestrzenne, zarówno chemiczne (ważne w działaniach enzymów), jak i fizyczne (istotne w przypadku efektu dźwigni w kościach oraz wpływu jednej grupy molekuł na inną w systemie enzymów hormonalnych). W przekonaniu autora liczne eksperymenty w zakresie mutagenezy oraz eksperymenty w zakresie syntezy spontanicznej aminokwasów w prymitywnych warunkach ziemskich wskazują, że struktura żywych cząsteczek jest wynikiem współdziałania wielu oddziaływań fizycznych i chemicznych ukła-

⁵⁷ Por. M. Twardowski, *Kategoria redukcji we współczesnej dyskusji filozoficzno-biologicznej* [w:] K. Bałkowski, P. Wiatr (red.), *Filozoficzne problemy nauk przyrodniczych*, Fundacja na rzecz Promocji Nauki i Rozwoju Tygiel, Lublin 2016, s. 56–63.

⁵⁸ K.F. Schaffner, *The Watson-Crick model and reductionism*, „The British Journal for the Philosophy of Science”, 20 (1969), s. 326.

⁵⁹ Por. tamże, s. 327.

⁶⁰ Tamże, s. 345.

dów⁶¹. „Nigdzie – konkluduje Schaffner – nie ma jakiegokolwiek dowodu na to, że istnieje coś jedyne w swoim rodzaju w odniesieniu do tych układów – coś, co uczyniłoby z biologii naukę niezależną, która byłaby nieredukowalna do poziomu fizyki i chemii”⁶².

Główne argumenty antyredukjonistów popierające niezależność biologii jako nauki skrytykował Michael Ruse. Najczęstszym argumentem mówiącym o tym, że biologia na zawsze musi pozostać autonomiczna, jest ten, który opiera się na twierdzeniu, że zjawiska biologiczne są wyjątkowe⁶³. Twierdzi się, że przedmioty badań biologicznych, komórki, organizmy, grupy – wszystkie one są unikalne, nieznane w naukach fizykalnych. Uważa się także, że nauki fizykalne mogą zajmować się jedynie powtarzalnymi, nieunikalnymi zjawiskami, a tym samym, że nauka o życiu nie może nigdy być całkowicie fizyczno-chemiczna. Ruse wskazuje, że pozorna siła tego argumentu opiera się na zacieraniu kilku sensów „niepowtarzalności”. Stoi na stanowisku, że w pewnym sensie zjawiska biologiczne są unikatowe, i znów – w pewnym sensie – teorie fizyczno-chemiczne nie mogą uporać się z wyjątkami, ale wyjątkowość zawarta w tych dwóch przypadkach jest różnego rodzaju. Jeśli spojrzeć na tę kwestię z jednej perspektywy, wszystko jest wyjątkowe, jeżeli wszystko ma swoje własne współrzędne czasoprzestrzenne. Nauki fizykalne rozważają tylko właściwości dzielone przez więcej niż jedną rzecz. Jednak, jak zauważa Ruse, także sami biolodzy abstrahują od unikalnego i rozważają także nieunikalne aspekty. Odwołując się do przykładu genu klasycznego Mendla, pisze: „Jedną z uderzających cech genu jest to, że szczególny przypadek może być powielany nieskończoną ilość razy, a wszystkie przypadki są niemal identyczne. Jeśli przekażę synowi gen implikujący niebieskie oczy, genetyka klasyczna stwierdza, że jego i mój gen są tego samego gatunku. Nie są one mniej lub bardziej podobne, raczej tak jak dwa atomy wodoru są nie do odróżnienia (nawet dla Boga). Jak widzimy, paradoksalnie, biolodzy molekularni rozróżniają geny nierozróżniane przez genetykę klasyczną (ale rozróżniane jako struktury genetyki)”⁶⁴. W związku z tym wyjątkowość zjawisk biologicznych w rzeczywistości nie hamuje w żaden sposób możliwej molekularyzacji biologii.

Inny krytykowany przez Ruse’a argument antyredukjonistów koncentruje się na historycznej naturze zjawisk organicznych⁶⁵. Z jednej strony

⁶¹ Por. tamże, s. 344.

⁶² Tamże, s. 345.

⁶³ Por. M. Ruse, *The philosophy of biology*, Hutchinson University Library, London 1973, s. 210.

⁶⁴ Tamże.

⁶⁵ Por. tamże, s. 211–212.

podkreśla on, że nie można zanegować wspólnego elementu historycznego koncepcji biologicznych, którego nie znajdujemy w koncepcjach fizyki i chemii. Ruse pisze: „Aby powiedzieć, że coś jest wodą, (zazwyczaj) nie mówi się o historii wody. Nie wiemy, na przykład, czy została uzyskana przez spalanie wodoru w tlenie lub metanu w tlenie, lub w jakikolwiek inny sposób. Z innej strony powiedzieć, że coś jest zygota, to powiedzieć nam coś o jej historii. Jest to komórka powstała poprzez połączenie dwóch innych komórek, które pochodzą z dwóch różnych organizmów. Jeśli nie powstała w ten sposób, nie jest zygota”⁶⁶. Stąd może się wydawać, że jedynie biologia (nie fizyka i chemia) stara się brać pod uwagę historyczny wymiar rzeczy, które analizuje. Ruse nie zgadza się z twierdzeniem, że pojęcia fizyki nigdy nie kierują się ku przeszłości⁶⁷. Rozważa jako przykład zjawisko zwane „histerezą”. Gęstość strumienia pierścienia Rowlanda w materiale ferromagnetycznym ma funkcję nie tylko natężenia pola magnetycznego w danym momencie, ale także dawną historię pierścienia. Aby powiedzieć coś o gęstości strumienia i natężeniu pola magnetycznego, należy powiedzieć coś o historii pierścienia. Według autora nie ma żadnego logicznego powodu, by uważać, że jedynie obszar biologiczny badań ma wymiar historyczny.

Uzupełnieniem tego argumentu jest kolejny mówiący, że nawet biolodzy wydają się rozważać niehistoryczne aspekty zjawisk biologicznych⁶⁸. Przykładem jest zygota, gdzie aspekt historyczny mógłby zostać całkowicie porzucony. Zamiast tego będzie wymagany biochemiczno-morfologiczny opis komórki w pytaniu, co odróżnia zygotę od innych komórek. „Jeśli taki opis zostanie zapewniony – pisze Ruse – nie sądzę, że biolodzy poczną się szczególnie oszukiwać przez ich własne stare koncepcje, szczególnie jeśli na przykład stworzona zostanie sztuczna zygotopodobna komórka, nieodróżnialna od zygot wyprodukowanych naturalnie. Dlatego też [...] w przyszłości może istnieć teoria biorąca pod uwagę jedynie niehistoryczne aspekty zjawisk biologicznych, a jednak oparta na dzisiejszej biologii, wciąż przygotowana na rozważanie tego aspektu, jeśli pojawi się taka potrzeba”⁶⁹. Ruse uważa, że można oczekiwać spotkania dzisiejszej niehistorycznej fizyki i chemii z dzisiejszą dość historyczną biologią⁷⁰. Podkreśla, że molekula DNA jest w pewnym sensie czysto chemiczna i dlatego w tym samym sensie niehistoryczna. Jednakże żadna cząsteczka DNA nie została zsyntezowana w całości bez pomocy innych

⁶⁶ Tamże, s. 212.

⁶⁷ Por. tamże.

⁶⁸ Por. tamże, s. 212–213.

⁶⁹ Tamże, s. 213.

⁷⁰ Por. tamże.

cząsteczek. Dlatego powiedzieć, że coś jest DNA, to w innym sensie powiedzieć coś o jego przeszłości, a mianowicie to, że inna cząsteczka DNA była zaangażowana w proces jej tworzenia.

W opinii wielu współczesnych przyrodników czołowym propagatorem redukcjonizmu jest Edward O. Wilson⁷¹. Amerykański entomolog i ewolucjonista, jeden z twórców współczesnej socjobiologii, był osobą przekonaną o tym, że fenomen życia daje się ostatecznie sprowadzić do najbardziej podstawowych składników materii rządzonych przez odwieczne prawa fizyki. Według Wilsona biologia po trzystu latach istnienia niedawno (dzięki owocnemu korzystaniu z osiągnięć fizyki i chemii) stała się „dojrzałą nauką”, a dzięki „biegłemu opanowaniu sztuki redukcjonizmu [biolodzy] zaczęli odnosić sukcesy w postaci częściowej syntezy na poziomie cząsteczek i organelli”⁷². Biolodzy wiedzą teraz, że „organizm jest maszyną” i do zbudowania sztucznego życia „wystarczą prawa fizyki i chemii”⁷³.

Kolejne pytanie, które należy postawić brzmi: Czy fenomen życia można wyjaśnić za pomocą praw fizyki i chemii?

Wyraźne przywiązanie do strategii redukcjonistycznej w wyjaśnianiu fenomenu życia deklaruje Francis Crick. Píše: „Ostatecznym celem nowoczesnego ruchu w biologii jest, prawdę mówiąc, wyjaśnienie całości biologii w oparciu o terminy fizyczne i chemiczne. Istnieje ku temu bardzo dobry powód. Od czasu rewolucji w fizyce w połowie lat dwudziestych mamy teoretyczną bazę chemiczną i znaczące części fizyki”⁷⁴. Crick jest przekonany, że ostatecznie wszystkie zjawiska życiowe dają się sprowadzić do najbardziej podstawowego poziomu, na którym mogą być w pełni wyjaśnione. „Nieomal wszystkie aspekty życia – pisze – tworzone są na poziomie molekularnym, bez zrozumienia molekuł możemy jedynie mieć bardzo dalekie pojęcie o samym życiu. Wszystkie koncepcje wyższego poziomu są niepewne, dopóki nie potwierdzi się ich na poziomie molekularnym”⁷⁵.

Jednym z najbardziej głośnych i żarliwych zwolenników stosowania w badaniach metodologii redukcjonistycznej był Jacques Monod. W swej książce *Le hasard et la nécessité* (Przypadek i konieczność) w kontekście

⁷¹ Analizie niektórych aspektów redukcjonistycznej koncepcji życia amerykańskiego biologa poświęciłem osobną pracę (*Kategoria redukcji w refleksji filozoficzno-biologicznej Edwarda O. Wilsona* [w:] K. Kropiwiec, M. Szala (red.), *Nauka, filozofia, kultura – rozważania interdyscyplinarne*, Wyd. Naukowe Tygiel, Lublin 2016, s. 106–119).

⁷² E.O. Wilson, *Konsiliencja. Jedność wiedzy*, tłum. J. Mikos, Zysk i S-ka, Poznań 2002, s. 139.

⁷³ Tamże, s. 139.

⁷⁴ F. Crick, *Of molecules and men*, Prometheus Books, New York 2004, s. 22.

⁷⁵ Tenże, *Szalona pogoń. W poszukiwaniu tajemnicy życia*, tłum. P. Golik, Wyd. MA-RABUT–Oficyna Wydawnicza VOLUMEN, Gdańsk–Warszawa 1996, s. 85.

osiągnięć biologii molekularnej snuje rozważania nad „sekretem życia” i argumentuje, że życie jest w pełni wytłumaczalne jako zjawisko fizyczno-chemiczne. Przekonuje, że dzięki biologii molekularnej tajemnica życia jest dziś w przeważającej części odsłonięta. „Niczego podobnego – pisze – nie było w nauce w okresie poprzedzającym powstanie biologii molekularnej. »Tajemnica życia« mogła się wtedy wydawać niedostępna w samej swej istocie. Dzisiaj jest ona w znacznej części poznana”⁷⁶. Istota życia ma tkwić w strukturze cząsteczek białka.

Francuski biolog proponuje redukcjonistyczny program, który próbuje tłumaczyć epigenetyczny rozwój organizmu, odwołując się do struktury globularnego białka i jego własności stereospecyficznych. Program składa się z następujących kroków⁷⁷:

- zwijanie polipeptydu, aby dostarczyć struktur globularnych, posiadających właściwości oddziaływań stereoskopowych,
- asocjacyjne interakcje pomiędzy białkami albo pomiędzy białkami a pewnymi innymi elementami w celu utworzenia organelli komórkowych,
- interakcje między komórkami, aby utworzyć tkanki i organy,
- na wszystkich etapach ma miejsce koordynacja i różnicowanie chemicznych aktywności przez interakcje typu allosterycznego.

Monod pisze: „Na wszystkich tych etapach pojawiają się struktury wyższego rzędu o nowych funkcjach, które jako rezultaty spontanicznych oddziaływań między produktami etapu poprzedzającego wykazują [...] ukryte możliwości poziomów poprzednich. Cały determinizm zjawiska ma ostatecznie swoje źródło w informacji genetycznej reprezentowanej przez sumę interpretowanych lub ściślej filtrowanych przez warunki początkowe sekwencji polipeptydowych”⁷⁸.

Gerald J. Wanjohi, chociaż sam deklaruje oddanie redukcjonizmowi, nie zgadza się z twierdzeniem Monoda, że tajemnica życia kryje się w białkach globularnych. „Nieważne – pisze Wanjohi – jak »poznawcze« albo »demoniczne« te białka mogą wydawać się w swoich katalitycznych, regulatorowych i epigenetycznych funkcjach, one tylko pożyczyły albo przekazały moce. Najważniejszym źródłem właściwości tych białek jest DNA, dlatego ma ono przybliżyć nas w sposób właściwy do problemu statusu obecnej wiedzy o DNA i informacji genetycznej, aby zobaczyć, czy tak naprawdę życie zredukowano do poziomu fizycznego i chemicznego. Jest to tym bardziej niezbędne, ponieważ zgodnie z »centralnym dogmatem« biologii mo-

⁷⁶ J. Monod, *Przypadek i konieczność. Esej o filozofii biologii współczesnej*, tłum. J. Bukowski, Biblioteka Głosu, Warszawa 1979, s. 4.

⁷⁷ Por. tamże, s. 63.

⁷⁸ Tamże.

lekularnej tłumaczenie informacji genetycznej jest ukierunkowane z DNA do białek, a nie odwrotnie”⁷⁹.

Redukcjonizm za najbardziej owocne podejście w eksperymentalnych badaniach biologicznych uważa Nils Roll-Hansen. Opowiada się za strategią analizy w badaniu fenomenu życia, której celem jest możliwie najgłębszy podział organizmów żywych na części i wyjaśnienie ich zachowań na podstawie właściwości i strukturalnych relacji tak otrzymanych elementów⁸⁰. Stoi na stanowisku, że najbardziej fundamentalne wytłumaczenie dla charakterystycznych, cyklicznych, morfologicznych i behawioralnych „form” organizmów można znaleźć w strukturach stabilnych, a nie procesach. Redukcjonizm w tym sensie Roll-Hansen traktuje jako perspektywę ontologiczną poszerzoną o wnioskowanie metodologiczne, jakie z niej wynika. Nie zaprzecza, że całość może mieć właściwości, jakich nie posiada żadna z jej części. Zakłada jedynie, że można wyjaśnić takie cechy w odniesieniu do części i ich strukturalnych relacji. Nie umyka jego uwadze również fakt, że na zachowania organizmów żywych składa się coś więcej niż same ich komponenty i struktury. Zachodzą również procesy, w których znajduje charakterystyczne, cykliczne prawidłowości form i zachowań organizmów żywych, mające kluczowe znaczenie dla nauk biologicznych. Redukcjonizm w ujęciu Roll-Hansena nie oznacza, że badania powinno się zawsze zaczynać od części, przechodząc do całości. Każde badanie biologiczne musi obierać pewne zachowania organizmów żywych za punkt wyjścia, do którego wszystkie wyniki muszą się ostatecznie odnosić.

Michael Ruse krytykował argument antyredukjonistów, że metody fizyczno-chemiczne „nie radzą sobie” z porządkiem biologicznym. Zjawiska biologiczne, od genów na chromosomie, do członków gatunków, są wysoce zorganizowane⁸¹. Wielu autorów podchwyciło ten fakt i stwierdziło, że stanowi to zbyt wielkie wyzwanie dla fizyki oraz chemii, dlatego biologia na zawsze musi pozostać nauką autonomiczną. W odpowiedzi na te argumenty Ruse zauważył, że fizyka i chemia także zwracają uwagę na porządek, jako przykład rozważał działanie odbiorników radiowych⁸². Ich części, aby mogły działać, muszą pozostawać w specjalnym ze sobą związku. Na przykład w obwodzie radia nie można tylko przekręcić pokręteł, włączyć głośników i oczekiwać, że nie będzie różnicy w odtwarzaniu. Porządek jest wyraźnie czymś, co odgrywa istotną rolę w myśleniu fizyków – konkluduje.

⁷⁹ G. Wanjohi, *Monod's biological reductionism*, „Thought and Practice”, 2 (1975), s. 70–71.

⁸⁰ Por. Roll-Hansen N., *Reductionism in biological research. Three historical case studies*, Institute for Studies in Research and Higher Education, Oslo 1979, s. 1.

⁸¹ Por. M. Ruse, *The philosophy of biology*, s. 214–215.

⁸² Por. tenże, *Two biological revolutions*, „Dialéctica”, 25 (1971), s. 27.

Ruse nie widzi przeszkód, by metodami fizyczno-chemicznymi badać uporządkowane zjawiska biologiczne⁸³. Podkreśla, że genetyka musiała odejść od pomysłu, że geny mogą być traktowane jak koraliki losowo nawiązane na nitkę. Okazało się, że właściwości fizyczne są funkcją nie tylko szczególnych jednostek dziedziczenia, genów, ale i sposobu, w jaki są one ustawione w komórce⁸⁴. Wykazano niezbicie, że kolejność genów w komórce ma fundamentalne znaczenie⁸⁵. Nie można jednak, jak podkreśla Ruse, twierdzić, że fizyka i chemia, a szczególnie biologia molekularna, są niewrażliwe na ten porządek. „Biologia molekularna – pisze badacz – bada porządek materiału dziedzicznego komórki aż do pojedynczej pary nukleotydów. Jak możemy zauważyć, najważniejszym założeniem genetyki molekularnej jest to, iż cząsteczka DNA zawiera cztery rodzaje zasad, a fantastyczna ilość informacji może zostać spakowana do cząsteczki DNA ze względu na niemal nieskończoną ilość kolejności, w jakich te zasady mogą zostać ułożone w cząsteczce. Stąd temu samemu porządkowi więcej uwagi poświęci biolog molekularny aniżeli biolog niemolekularny”⁸⁶. Zdaniem Ruse’a jakiegokolwiek wyjaśnienie porządku w pewnym momencie musi zawierać informacje o porządku w czasie przeszłym. Tak długo, jak biologia molekularna się rozwija, możliwe będzie wyjaśnienie obecnego porządku biologicznego poprzez teorię fizyczno-chemiczną odnoszącą się do wcześniejszych układów – konkluduje.

Inny rzecznik metodologii redukcjonistycznej, Addy Pross, stoi na stanowisku, że możliwe jest dogłębne wyjaśnienie wyjątkowych cech życia, takich jak na przykład zorganizowana złożoność, celowy charakter, charakter dynamiczny, różnorodność, natura chiralna⁸⁷. Droga do tego ma prowadzić poprzez zbadanie szczegółowe, krok po kroku, procesu jego powstawania. W tym celu, konieczne jest ustalenie praw rządzących procesem powstawania złożoności, od prostego układu chemicznego, do złożonych systemów biologicznych⁸⁸. Aby wyjaśnić fenomen życia, zdaniem izraelskiego chemika konieczne jest znalezienie źródeł chemicznych organizacji biologicznej, bo chociaż życie jest niezwykle złożonym zjawiskiem, zasada życia jest zaskakująco prosta.

⁸³ Por. tenże, *The philosophy of biology*, s. 215.

⁸⁴ Por. tenże, *Two biological revolutions*, s. 27.

⁸⁵ Por. tenże, *The philosophy of biology*, s. 215.

⁸⁶ Tamże, s. 215.

⁸⁷ Por. A. Pross, *What is life? How chemistry becomes biology*, Oxford University Press, Oxford 2012, s. xi. Szczegółową analizę koncepcji życia izraelskiego chemika zawiera moja praca *Fenomen życia w oczach chemika Addy’ego Prossa*, „Chemik”, 12 (2013), s. 1162–1172. Opublikowałem także recenzję książki Prossa *What is life? How chemistry becomes biology* (Czy biologia jest chemią?, „Zagadnienia Filozoficzne w Nauce”, 52 (2013), s. 203–221).

⁸⁸ Por. A. Pross, *What is life?...*, s. 123.

Pross pisze: „Życie jest jedynie siecią wynikłą z reakcji chemicznych, która powstaje z ciągłego cyklu replikacji, mutacji, procesu zwiększania złożoności i selekcji, opierającą swoje działanie na konkretnych cząsteczkach przypominających łańcuch. W przypadku życia na Ziemi są to kwasy nukleinowe. Jest możliwe, że inne układy chemiczne również przejawiają tę własność, jednakże dotychczas kwestia ta nie została zbadana eksperymentalnie. Stąd życie jest skutkiem chemicznym wynikającym z siły wzrostu wykładniczego działającego na podstawie replikujących się układów chemicznych”⁸⁹. Teoria Darwina przy takim podejściu byłaby zintegrowana z bardziej fundamentalną chemiczną teorią materii. W efekcie otrzymalibyśmy poszerzoną teorię ewolucji, łączącą w sobie zarówno biologiczne, jak i prebiologiczne systemy. Dalej pisze: „przepaść dzieląca biologię i chemię może być pokonana [...] teoria Darwina może być zintegrowana w bardziej ogólną chemiczną teorię materii [...] biologia jest jedynie chemią lub też uściślając, podjednostką chemii. Pomimo rozpowszechnionych wątpliwości w stosunku do metodologii redukcjonistycznej w biologii, kwestia organizacji może być rozwiązana dzięki analizie redukcjonistycznej”⁹⁰.

Według Edwarda O. Wilsona redukcjonizm stanowi główną procedurę przy badaniu komórki jako podstawowej jednostki życia. „Z pomocą zasad redukcjonizmu stosowanego w fizyce i chemii – pisze – biolodzy z imponującą precyzją zdołali wyjaśnić strukturę i funkcjonowanie komórki, nie pozostawiając wiele miejsca dla teorii konkurencyjnych. Oczekują, że z czasem uda im się wyjaśnić wszystkie zjawiska dotyczące dowolnego rodzaju komórek: będą rozkładać po kolei wszystkie organelle na elementy składowe, a następnie holistycznie składać je z powrotem”⁹¹. Wilson twierdzi, że aby w swych badaniach biolodzy mogli posuwać się do przodu, muszą najpierw dokonać pełnego opisu złożonej struktury komórki, a następnie rozłożyć ją na najprostsze elementy składowe, to znaczy komórki na organelle, a te na cząsteczki. Procedurę polegającą na rozłożeniu jakiegoś zjawiska na elementy proste biolog ten określił jako „poszukiwanie konsilencji za pomocą redukcji”. Z kolei następującą po niej procedurę zmierzającą do odтворzenia zjawiska pierwotnego i przewidzenia, jak ono powstało, na podstawie wiedzy uzyskanej dzięki redukcji, nazywał „poszukiwaniem konsilencji na drodze syntezy”. Na zaproponowaną przez Wilsona procedurę redukcjonistyczną stosowaną w badaniu przyrody ożywionej składały się więc dwie fazy: analiza (od poziomu większej złożoności ku niższym poziomom) i synteza (ruch w przeciwnym kierunku).

⁸⁹ Por. tamże, s. 164.

⁹⁰ Tamże, s. 122.

⁹¹ E.O. Wilson, *Konsilientja...*, s. 104.

Przez ostatnie dekady wielu badaczy debatowało nad ograniczeniami redukcjonizmu biologicznego zarówno w jego wersji ontologicznej, jak i metodologicznej – poniżej przedstawiono główne wątki tej debaty.

Paul Davies podkreśla, że w latach czterdziestych XX wieku wielu naukowców było przekonanych, że tajemnica życia zostanie niebawem rozwiązana⁹². Biolodzy odkryli, że klucz do tej zagadki znajduje się wśród składników molekularnych wewnątrz komórki⁹³. Fizycy poczynili w międzyczasie imponujące postępy w celu poznania struktury materii na poziomie atomowym. Wszystko wskazywało na to, że wkrótce uda się wyjaśnić odwieczną zagadkę: co to jest życie? Organizmy żywe, jak się wówczas wydawało, miały okazać się niczym więcej jak złożonymi maszynami z elementami mikroskopijnymi, które mogą być badane przy użyciu technik fizyki doświadczalnej. Wszystko, czego potrzebowała ówczesna nauka, to „instrukcja montażu”, i problem byłby rozwiązany. Dziś jednak obraz komórki jako tylko i wyłącznie bardzo skomplikowanego mechanizmu wydaje się bardzo naiwny. Chociaż nie należy podważać faktu, że biologia molekularna

⁹² Por. P. Davies, *The fifth miracle. The search for the origin and meaning of life*, Simon & Schuster, New York 1999, s. 32.

⁹³ Stąd nazwa „biologia molekularna”. Termin padł po raz pierwszy w 1938 roku z ust Warrena Weavera w raporcie wewnętrznym Fundacji Rockefellera. Weaver wspomina: „Wkrótce po tym, jak zostałem wybrany w 1932 roku na dyrektora ds. nauk przyrodniczych w Fundacji Rockefellera, namawiałem Powierników z pełnym poparciem ówczesnego prezydenta Fundacji Rockefellera Maxa Masona, by program naukowy fundacji przesunąć z wcześniejszego zainteresowania naukami fizycznymi w stronę podstawowych problemów biologicznych oraz zastosowania technik, procedur doświadczalnych i metod analizy tak skutecznie opracowanych w naukach fizycznych. Wniosek ten został przyjęty i zatwierdzony przez Powierników Fundacji Rockefellera, a postęp w programie był wystarczająco szybki i obiecujący tak, że kiedy sporządziłem sprawozdanie sekcji »nauki przyrodnicze« zamieszczone w rocznym sprawozdaniu Fundacji Rockefellera za rok 1938, sekcja ta rozpoczęła się szesnastoma stronami (203–219) z nagłówkiem dużą czcionką oznajmującym »biologia molekularna« oraz pierwszym zdaniem: »Wśród badań, którym Fundacja udziela wsparcia, jest seria w stosunkowo nowej dziedzinie, którą można nazwać biologią molekularną, w której delikatne nowoczesne techniki są wykorzystywane w celu zbadania coraz drobniejszych szczegółów niektórych procesów życiowych«. Tak więc myślę, że trzeba przyznać, że dziedzina ta miała nazwę, kiedy Sir Lawrence został dyrektorem Cavendish w 1938 roku”. W. Weaver, *Molecular biology: origins of the term*, „Science”, 170 (1970), s. 582. Ta powstała z połączenia pracy nad wspólnym problemem genetyków, fizyków i chemików strukturalnych dziedzina biologii zajmuje się studiowaniem makromolekuł oraz mechanizmów makromolekularnych, odkrywanych w organizmach żywych, takich jak natura molekularna genu czy też jej mechanizmy w odniesieniu do replikacji, mutacji i ekspresji genów. Por. S. Sarkar, *Genomics, proteomics, and beyond* [w:] S. Sarkar, A. Plutynski (eds), *A Companion to the philosophy of biology*, Blackwell, New York 2008, s. 58. Por. L. Darden, J. Tabery, *Molecular biology* [w:] E.N. Zalta (ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Fall 2010 Edition)*, <http://plato.stanford.edu/archives/fall2010/entries/molecular-biology/> (20.11.2014).

osiągnęła oszałamiające sukcesy, to naukowcy do dziś nie są w stanie wskazać, co dokładnie oddziela organizm żywy od innych rodzajów bytów materialnych. Definicja mechanistyczna jest ważną częścią rozumienia życia, nie mówi jednak wszystkiego⁹⁴. Wiedza o białkach i podstawie układów żywionych składającej się z kwasów nukleinowych nadal jest zdobywana, i to w coraz szybszym tempie, a zsekwencjonowanie genomu ludzkiego było kamieniem milowym na tej ścieżce naukowej⁹⁵. „Samoreplikujące się DNA” stało się główną metaforą takiego rozumienia życia. Zgodnie z nią świat jest podzielony na replikatory, które są postrzegane jako fundamentalne (i które kontrolują rozwój, będąc zasadniczym poziomem działania selekcji naturalnej) oraz na interaktory, molekuly i struktury kodowane przez replikatory. Nie wszyscy akceptowali taką skrajnie redukcjonistyczną wizję życia, z wyraźnym naciskiem na replikację kwasów nukleinowych. W szczególności teoretycy systemów rozwojowych opowiadali się za pluralizmem przyczynowym w biologii rozwojowej i ewolucyjnej.

„Redukcjonizm ontologiczny ma niewielką biologiczną siłę przebicia – pisze Jeffrey S. Wicken – organizmy są tu całościami zorganizowanymi, nie zaś sumami części molekularnych”⁹⁶. Krytycy redukcjonizmu ontologicznego podkreślają, że fenomen życia stanowi złożoną, zintegrowaną strukturę, której części są funkcjonalnie powiązane z całością i koordynowane przez nią, oraz że całość biologiczna ma właściwości, których nie można zredukować do właściwości jej poszczególnych komponentów⁹⁷. Komórka albo organizm są w rzeczywistości unikalną organizacją komponentów pozostających w specjalnych wzajemnych relacjach⁹⁸.

Pier L. Luisi podkreśla, że kwestia właściwości to główny punkt sporu między redukcjonistami i antyredukcjonistami. Zdaniem tego autora zasadniczo nie byłoby nic złego w redukcjonizmie, gdyby zatrzymywał się on na poziomie struktury, a nie dotykał kwestii właściwości. Pisze: „wszyscy możemy chyba zgodzić się co do tego, że woda składa się z wodoru i tlenu. Problem z redukcjonizmem polega na stwierdzeniu, że właściwości wody można sprowadzić do właściwości wodoru i tlenu, zaś właściwości wodoru

⁹⁴ Por. P. Davies, *The fifth miracle...*, s. 33.

⁹⁵ Por. B. Weber, *Life* [w:] E.N. Zalta (ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Fall 2014 Edition)*, <http://plato.stanford.edu/archives/fall2014/entries/life/> (20.11.2014).

⁹⁶ J.S. Wicken, *Evolution, thermodynamics, and information. Extending the darwinian program*, Oxford University Press, New York–Oxford 1987, s. 10.

⁹⁷ Por. R.C. Looijen, *Holism and reductionism in biology and ecology: the mutual dependence of higher and lower level research programmes*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht 2000, s. 37.

⁹⁸ Por. J.A. Marcum, *The conceptual foundations...*, s. 30.

i tlenu można, na tej samej zasadzie, sprowadzić do właściwości ich cząstek elementarnych”⁹⁹. Formacja cząsteczki wody dogłębnie wpływa na właściwości swoich składników gazowych, tlenu i wodoru¹⁰⁰. W chemii zależność oznacza interakcję, a każda forma interakcji chemicznej modyfikuje właściwości poszczególnych składników. Luisi zauważa, że na wielu poziomach rosnącej złożoności (od atomów do cząsteczek, od cząsteczek do genów i enzymów, aż do komórek i narządów) za każdym razem pojawiają się nowe właściwości niewystępujące na niższym poziomie złożoności. „Tak więc – pisze – można by powiedzieć, że na kwiat róży składają się atomy i cząsteczki, jednak istota (esencja) róży nie może być interpretowana w kategoriach atomów i cząsteczek, chyba że – przyjmując skrajnie redukcjonistyczne stanowisko – właściwości każdego poziomu złożoności można wyjaśnić za każdym razem w odniesieniu do właściwości niższego poziomu. Niemniej to właśnie ten argument redukcjonistyczny bardzo trudno jest obrońić”¹⁰¹. Zdaniem autora lepszym podejściem do istoty życia byłoby opisanie przynajmniej różnych poziomów hierarchicznej złożoności strukturalnej i odpowiadających im właściwości emergentnych – od komórek i organelli komórkowych, przez tkanki, docierając wreszcie do historii ewolucji biologicznej¹⁰². „Jest to z pewnością – konkluduje Luisi – bardziej całościowy sposób na postrzeganie róży, stanowiący odejście od uproszczonego redukcjonistycznego podejścia, które widzi wszystko w kontekście atomów”¹⁰³.

Dwa zasadnicze pytania w kontekście redukcjonizmu: czy życie fizyczno-chemicznie jest wyjątkowe oraz czy życie (jako takie) jest wyjątkowe stawia David L. Abel. Na pierwsze pytanie odpowiada: „nie”, na drugie: „tak”¹⁰⁴. W uzasadnieniu szczegółowo charakteryzuje swoiste cechy życia. Pisze: „Życie przejawia niezliczone formalizmy, które nie mogą być wytworzone lub wytłumaczone przez samą fizykodynamikę. Życie realizuje tysiące biologicznie funkcjonalnych celów, jednym z nich jest utrzymanie się przy życiu. Ani fizykodynamika, ani ewolucja, nie realizują celów. Życie jest w dużej mierze dyrygowane przez liniowe programowanie cyfrowe i informację preskrypcyjną (PI, inaczej: informację nakazową) widoczną szczególnie w fizykodynamicznie nieokreślonym sekwencjonowaniu nukleotydów. Epigenomiczne czynniki kontrolne jedynie zespala

⁹⁹ P.L. Luisi, *The emergence of life. From chemical origins to synthetic biology*, Cambridge University Press, Cambridge 2010, s. 117.

¹⁰⁰ Por. tamże, s. 119.

¹⁰¹ Tamże, s. 117.

¹⁰² Por. tamże, s. 126.

¹⁰³ Tamże.

¹⁰⁴ Por. D.L. Abel, *Is life unique?*, „Life”, 2(1) (2012), s. 106.

wyrafinowanie tych formalizmów. Życie wykorzystuje – nazwijmy to – reprezentacjonalizm poprzez wykorzystanie systemów symboli. Życie wykazuje autonomię, homeostazę daleką od równowagi w najtrudniejszych warunkach, dodatnie i ujemne mechanizmy sprzężenia zwrotnego, profilaktykę i korektę własnych błędów, a także organizację swoich komponentów w ciągle układy funkcjonalne (ang. skrót SFS). Przypadkowość i konieczność – agitacja cieplna i determinizm przyczynowo-skutkowy porządku świata naturalnego – nie są w stanie wytworzyć formalizmów takich jak matematyka, język, systemy symboli, kodowanie, dekodowanie, logika, organizacja (nie mylić ze zwykłą zdolnością do samoorganizacji), integracja obwodów, obliczeniowy sukces oraz dążenie do funkcjonalności. Wszystkie te cechy życia są formalne, a nie fizyczne”¹⁰⁵.

Z kolei Ernst Mayr przekonuje, że istnieją pewne fundamentalne różnice pomiędzy organizmami żywymi a układami nieożywionymi. Układy ożywione charakteryzuje niezwykła złożoność organizacji, która nadaje im zdolność reagowania na bodźce zewnętrzne, wiązania i uwalniania energii (metabolizm), wzrostu i replikacji¹⁰⁶. Niezwykłe właściwości, jakie posiadają systemy biologiczne, wynikają – jak twierdzi – głównie z faktu, że są układami otwartymi, które utrzymują równowagę „wejść” i „wyjść”. Ta homeostaza jest możliwa dzięki wytworzeniu mechanizmów zwrotnych, nieobecnych w jakimkolwiek układzie nieożywionym. Za jedną z najbardziej charakterystycznych cech organizmu żywego Mayr uważa kompleksowość¹⁰⁷. Choć cechę kompleksowości dostrzega również w układach nieożywionych, nie ma żadnych wątpliwości, że w porównaniu z nimi układy ożywione są o wiele bardziej złożone. „W rzeczywistości – pisze – kompleksowość sama w sobie nie jest fundamentalną różnicą pomiędzy żywymi i nieożywionymi układami. Światowy system pogodowy lub jakakolwiek galaktyka są również wysoko złożonymi układami. Przeciwnie jednak układy ożywione są dużo bardziej złożone ze względu na kilka więcej rzędów wielkości aniżeli te w układach nieożywionych. Nawet na poziomie molekularnym makromolekuły charakteryzujące istoty żywe nie różnią się zasadniczo od molekuł o niższej wadze cząsteczkowej, które są regularnymi składnikami przyrody nieożywionej, ale są dużo większe i dużo bardziej złożone. Ta złożoność nadaje im niezwykle właściwości nie do odnalezienia w materii bezwładnej”¹⁰⁸.

¹⁰⁵ Tamże, s. 106.

¹⁰⁶ Por. E. Mayr, *Toward a new philosophy of biology. Observations of an evolutionist*, Harvard University Press, Cambridge 1988, s. 14.

¹⁰⁷ Por. tamże.

¹⁰⁸ Tamże.

Mayr dostrzega złożoność układów ożywionych na każdym poziomie, od jądra, komórki, organu, poprzez organizm, aż do gatunku, ekosystemu i biosfery włącznie¹⁰⁹. Struktura hierarchiczna w obrębie pojedynczego organizmu wynika z faktu, że przedmioty na jednym poziomie są połączone w nowe przedmioty na następnym, wyższym – komórki w tkanki, tkanki w organy, a organy w układy funkcjonalne. Wskazuje na dwie właściwości, które mają układy ożywione na każdym poziomie hierarchii: zachowują się jak całości, a ich właściwości nie można wywnioskować z najbardziej kompletnej wiedzy o składnikach wziętych osobno lub w innych związkach¹¹⁰. Píše: „gdy taki układ jest tworzony z jego składników, pojawiają się nowe cechy całości, które nie mogły zostać przewidziane z wiedzy o składnikach. Takie pojawienie się nowych właściwości występuje także w świecie nieożywionym, ale jedynie organizmy pokazują tak drastyczne pojawianie się nowych cech na każdym hierarchicznym poziomie systemu”¹¹¹. Za najbardziej interesujące cechy całości Mayr uważa to, że mogą one stać się systemami wysokopoziomowymi oraz że mogą wpływać na komponenty na niższych poziomach¹¹².

Redukcjonistyczna metoda rozbioru systemów biologicznych na części składowe okazywała się skuteczna w wyjaśnianiu chemicznej podstawy wielu procesów życiowych¹¹³. Mimo to wielu biologów z biegiem czasu zdało sobie sprawę, że podejście to osiągnęło swój limit. Systemy biologiczne są wysoce złożone i mają własności emergentne, które nie mogą być wyjaśnione ani nawet przewidziane na drodze badania ich poszczególnych części. Krytycy redukcjonizmu metodologicznego twierdzą, że czysto analityczne strategie badawcze narażone są na pominięcie istotnych właściwości biologicznych¹¹⁴. Twierdzą, że warto badać organizmy na wyższych niż fizyczno-chemiczny poziomach, gdyż szczególnie one mogą być pożyteczne dla biologa¹¹⁵. Strategie redukcjonistyczne dostarczyły szeroką wiedzę o wielu elementach, z których składają się układy ożywione, jednak okazały się one nieużyteczne do wyjaśnienia fenomenu życia jako systemu dynamicznego¹¹⁶. By zrozumieć,

¹⁰⁹ Por. tamże.

¹¹⁰ Por. tamże, s. 15.

¹¹¹ Tamże.

¹¹² Por. E. Mayr, *The growth of biological thought. Diversity, evolution, and inheritance*, The Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge–London 1982, s. 64.

¹¹³ Por. M.H.V. Van Regenmortel, *Reductionism and complexity in molecular biology*, „European Molecular Biology Organization”, 5(11) (2004), s. 1016.

¹¹⁴ Por. E. Mayr, *The growth of biological thought...*, s. 64.

¹¹⁵ Por. Th. Dobzhansky, F.J. Ayala, G.L. Stebbins, J.W. Valentine, *Evolution*, s. 490.

¹¹⁶ Por. J. Dupré, *Processes of life. Essays in the philosophy of biology*, Oxford University Press, Oxford 2014, s. 85.

czym jest życie w swej istocie, nie wystarczy zrozumienie samych sekwencji genetycznych¹¹⁷.

Na ograniczenia strategii redukcjonistycznej wskazuje Sydney Brenner. Powód takiego stanu rzeczy wynika – jak twierdzi – z podstawowej właściwości wspólnej dla wszystkich układów ożywionych¹¹⁸. Są one bowiem całkowicie odmienne od wszystkich innych układów złożonych występujących w przyrodzie, ponieważ zawierają wewnętrzny zapis samych siebie ulokowany w genach. „Jest to zapis – pisze Brenner – przekazywany z pokolenia na pokolenie, z którego organizm jest »obliczany«. Jeśli porównamy to przykładowo do pogody, okaże się, że nie istnieje coś takiego jak wewnętrzny zapis pogody, który moglibyśmy fizycznie oddzielić od samego zjawiska pogody. W przypadku pogody potrzebujemy fizyki materii i energii, jednak istnienie DNA sugeruje coś nowego”¹¹⁹.

Marc H.V. Van Regenmortel podkreśla, że podejście redukcjonistyczne – choć cieszyło się powodzeniem we wczesnych latach biologii molekularnej – lekceważy właściwości emergentne i dlatego coraz bardziej negatywnie wpływa na wiele obszarów badań biologicznych¹²⁰. Píše: „Obecnie jest jasne, że specyfika złożonej aktywności biologicznej nie wynika ze specyfiki poszczególnych zaangażowanych cząsteczek, gdyż składniki te często odgrywają rolę w wielu różnych procesach. I tak na przykład: geny, które mają wpływ na formację pamięci u muszki owocowej, kodują białka w cykliczne AMP (cAMP) sygnalizujące szalki, które nie są specyficzne dla pamięci. Jest tu szczególnie udział komórki i środowiska, w którym uwalniany jest przekaźnik drugiego rzędu – taki jak cAMP – co pozwala produktowi genomu mieć unikatowy efekt. Specyficzność biologiczna wynika ze sposobu, w jaki te składniki się gromadzą i razem funkcjonują [...]. Interakcje pomiędzy częściami, jak również wpływy środowiskowe, prowadzą do powstania nowych właściwości, takich jak zachowania sieciowe [...], które nie występują u pojedynczych składników”¹²¹. Odejście od redukcjonistycznego punktu widzenia i redukcjonistycznych narzędzi uważa cytowany autor za priorytet dla badań biologicznych¹²².

Według innego krytyka redukcjonistycznej strategii badawczej Roberta J.P. Williamsa życie jest właściwością określonego połączenia procesów

¹¹⁷ Por. S. Sarkar, *Genomics proteomics, and beyond* [w:] S. Sarkar, A. Plutynski (eds), *A companion to the philosophy of biology*, s. 69.

¹¹⁸ Por. S. Brenner, *Biological computation* [w:] G.R. Bock, J.A. Goode (eds), *The limits of reductionism...*, s. 107.

¹¹⁹ Tamże, s. 107.

¹²⁰ Por. M.H.V. Van Regenmortel, *Reductionism and complexity...*, s. 1016.

¹²¹ Tamże, s. 1016.

¹²² Por. tamże, s. 1020.

dynamicznych wiążących się z chemicznym i energetycznym przepływem w zamkniętej przestrzeni¹²³. Proces ten musi być koordynowany przez komunikację zachodzącą pomiędzy tymi przepływami, która daje początek zorganizowanej strukturalnie całości organicznej. Stąd też, aby móc zrozumieć, czym jest życie, musi się zbadać naturę omawianej właściwości, a także towarzyszących jej procesów. „Projekt genomu – konkluduje Williams – jest podejściem redukcjonistycznym i chciałbym podkreślić, że nie ma badania analitycznego oddzielonych pojedynczych cząsteczek, które byłoby na wystarczająco dobrym poziomie deskrypcji, bym mógł opisać ową szczególną właściwość, jaką jest życie”¹²⁴.

Hans Mohr, inny badacz życia, wskazuje na praktyczne ograniczenia redukcjonizmu, które wyrażają się w ignorowaniu bogactwa świata ożywionego. Píše: „Nikt zajmujący się poważnie badaniami nie oczekuje, że badania dotyczące zawiesiny mitochondriów – organelli produkujących energię – dadzą odpowiedzi dotyczące zasad homeostazy energetycznej w komórce. Nie oczekujemy też, aby nawet najbardziej wymyślne badania molekularne kultur zawiesiny komórek roślinnych powiedziały coś na temat praw rządzących homeostazą rozwojową w embriogenezie roślin. Badając fibroblasty, nie oczekujemy odkrycia współistnienia praw, na których opiera się stabilność mechaniczna ludzkiego ciała i tak dalej”¹²⁵.

Z kolei Sahotra Sarkar dostrzega ograniczenia strategii redukcjonistycznej w badaniu procesów rozwojowych. Uważa, że dla wyjaśnienia morfogenezy tak samo jak poznanie poszczególnych interakcji molekularnych konieczne jest poznanie właściwości systemowych rozwijającego się organizmu, na przykład liczebności lub frekwencji poszczególnego zespołu molekularnego w rozwijającej się tkance¹²⁶.

Anatolii L. Buchachenko skrajnie redukcjonistyczną deklarację Cricka, że „ostatecznym celem współczesnego ruchu w biologii jest wyjaśnienie całej biologii w odniesieniu do fizyki i chemii”, uważa za nazbyt optymistyczną, choć równocześnie przyznaje, że jest atrakcyjna, gdyż nawołuje do

¹²³ Por. R.J.P. Williams, *Emergent properties of biological molecules and cells* [w:] M.H.V. Van Regenmortel, D.L. Hull (eds), *Promises and limits of reductionism in the biomedical sciences*, John Wiley & Sons, Hoboken 2002, s. 15.

¹²⁴ Tamże.

¹²⁵ H. Mohr, *Is the program of molecular biology reductionistic?* [w:] P. Hoynin-gen-Huene, F.M. Wuketits (eds), *Reductionism and systems theory in the life sciences. Some problems and perspectives*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht–Boston 1989, s. 142.

¹²⁶ Por. S. Sarkar, *Genes versus molecules: how to, and how not to, be a reductionist* [w:] M.H.V. Van Regenmortel, D.L. Hull (eds), *Promises and limits of reductionism...*, s. 203–204.

nowych odkryć¹²⁷. Podkreśla, że tak samo, jak nie jesteśmy w stanie zredukować chemii do fizyki, tak nie możemy zredukować biologii do chemii. Stoi na stanowisku, że w hierarchii nauk, to biologia zajmuje najwyższe miejsce. Píše: „Oczywiście maszyny molekularne, w których potencjał elektryczny ulega przekształceniu w ruch mechaniczny molekuł, są obecne również w chemii, są one tam jednak wyłącznie epizodycznymi strukturami i zjawiskami. W biologii stały się one wysoce zorganizowane, systemowe i funkcjonalne. Chemii brakuje tak wyszukanych narzędzi, jak polimeraza DNA, rybosomy i synapsy. [...] W chemii istnieją pewne procesy zgodnie usystematyzowane w czasie i przestrzeni. Jednakże poziom tej zgodności, taki jak w przypadku skurczu mięśni, który jest wynikiem zgodnej syntezy i rozkładu adenozynotrójfosforanu, czy taki jak w przypadku myślenia i procesów zapamiętywania, które są wynikiem zgodnego wydzielania neuroprzekazników oraz zgodnej reakcji synaps i neuronów, nie jest dla chemii osiągalny. Biologia jest w tym zakresie wyjątkowa i niespotykana”¹²⁸.

Istnienia obiektywnych ograniczeń dla strategii redukcjonistycznej przy badaniu organizmu żywego dowodzi Jonathan Jacobs. Twierdzi, że całościowy systemowy dobrostan organizmu jest jego właściwością, która posiada zasadnicze miejsce w wyjaśnianiu części składowych i procesów stanowiących organizm w czasie i ponad czasem¹²⁹. Podkreśla, że złożoność sama w sobie nie jest argumentem przeciwko redukcjonizmowi¹³⁰. Wiele procesów zachodzących w organizmie żywym uważa za możliwe do sprecyzowania w uwarunkowaniach fizyczno-chemicznych. Niemniej stoi na stanowisku, że prawidłowości fizyczno-chemiczne nie uwzględniają faktu, że pewne procesy stawiają wymogi natury systemowej. „Objaśnienie o charakterze redukcjonistycznym [...] niezliczonych zachowań biologicznych eksplikuje składową podstrukturę bez objaśniania natury danych zachowań czy rodzajów układów, w których one występują”¹³¹ – konkluduje Jacobs.

Wreszcie Carl R. Woese uważa redukcjonistyczną perspektywę za najbardziej szkodliwy aspekt nowej biologii molekularnej. W jego ocenie ta perspektywa zaczęła przenikać biologię, całkowicie zmieniając jej koncepcję układów ożywionych i prowadząc ostatecznie do zmiany postrzegania bio-

¹²⁷ Por. A.L. Buchachenko, *Reductionism is a criterion of truth but not a road to the temple*, „Herald of the Russian Academy of Sciences”, 6(83) (2013), s. 540.

¹²⁸ Tamże.

¹²⁹ Por. J. Jacobs, *Teleology and reduction in biology*, „Biology and Philosophy”, 1(4) (1986), s. 389.

¹³⁰ Por. tamże, s. 396.

¹³¹ Tamże, s. 396.

logii przez społeczeństwo¹³². Holistyczne problemy biologii, niewspółmierne z nową perspektywą molekularną, pozostawały względnie lub całkowicie nierozstrzygnięte, co przełożyło się na zaburzony rozwój biologii w XX wieku. Woese pisze: „Myślę, że era molekularna XX wieku przejdzie do historii jako konieczny i nieunikniony etap przejściowy w ogólnym rozwoju biologii: niezbędny, ponieważ tylko poprzez przyjęcie mocno redukcjonistycznej orientacji i technologii fizyki klasycznej można było rozwikłać pewne zagadki biologiczne; przejściowy, ponieważ biologia widziana oczami fundamentalistycznego redukcjonizmu jest biologią niekompletną. Znać części pojedynczych podmiotów to za mało. Najlepiej wyraża to muzyczna metafora: biologia molekularna potrafiła czytać nuty w partyturze, ale nie słyszała samej muzyki. Puchar molekularny jest dziś pusty. Nadszedł czas, aby zastąpić redukcjonistyczną perspektywę »spuszczonej głowy« nową, prawdziwie holistyczną wizją świata ożywionego, która garściami czerpie z ewolucji, emergentyzmu i wrodzonej złożoności będącej nieodzowną częścią biologii”¹³³. W innym miejscu dodaje: „W efekcie, biologia molekularna, ze swoją fundamentalistyczną, redukcjonistyczną i mechanistyczną wizją, stała się przed trudnym – o ile nie niemożliwym – zadaniem opracowania kompletnego zrozumienia biologii. Nie widząc lasu dla swoich drzew [...], biologia molekularna zrobiła jedyne, co mogła w takiej sytuacji zrobić, to jest przestała szukać lasu. Innymi słowy, zrezygnowano z tych wszystkich aspektów biologii, których nie można było zrozumieć lub z którymi nie można było sobie poradzić”¹³⁴. W opinii amerykańskiego fizyka i mikrobiologa biologia XXI wieku będzie zajmować się wielkimi „niereducjonistycznymi” problemami biologii XIX wieku, jakie biologia molekularna pozostawiła w XX wieku nietknięte¹³⁵. Wszystkie one są różnymi aspektami jednego z wielkich wyzwań nauki w ogóle, a mianowicie natury organizacji.

1.2. ORGANIZACJA ŻYCIA W UJĘCIACH POZAREDUKCJONISTYCZNYCH

Po przedstawieniu mechanistyczno-reducjonistycznych ujęć organizacji życia należy teraz przejść do zaprezentowania ujęć pozareducjonistycznych.

¹³² Por. C.R. Woese, *A new biology for a new century*, „Microbiology and Molecular Biology Reviews”, 2(68) (2004), s. 174.

¹³³ Tamże, s. 175.

¹³⁴ Tamże.

¹³⁵ Por. tamże.

Główną alternatywą dla mechanicyzmu był witalizm, który określa się jako tradycyjną i uporczywą wiarę w to, że prawa fizyki (mechaniki), które opisują świat nieożywiony, nie wystarczą do wyjaśnienia fenomenu życia: witalizm = elementy + organizacja + zasada życiowa układu ożywionego¹³⁶. W witalizmie zasada życiowa jest „zewnątrzna” wobec elementów i ich organizacji. To pochodzenie „z zewnątrz” zasady życiowej tworzy fundamentalny ontologiczny dualizm między życiem i nieżyciem, stanowiący podstawę do stwierdzenia braku możliwości zredukowania biologii do fizyki i chemii. Witaliści twierdzili, że organizmy żywe różnią się diametralnie od układów nieożywionych¹³⁷. Procesy w nich zachodzące nie są w żaden sposób redukowalne do prostych interakcji materialnych komponentów. Witaliści podkreślali, że całość to coś więcej niż tylko suma swoich części, gdyż w jakiś tajemniczy sposób kierowana jest nieznaną siłą, *vis vitalis* (stąd nazwa „witalizm”)¹³⁸.

Korzenie nowożytnego witalizmu sięgają doktryny animizmu¹³⁹ autorstwa niemieckiego chemika i fizyka Georga Ernesta Stahla, jednego ze współtwórców teorii zakładającej występowanie w ciałach palnych substancji zwanej flogistonem¹⁴⁰. W XVIII wieku witalizm rozwijali i propagowali we Francji uczeni związani z uniwersytetem w Montpellier, wśród nich między innymi botanik François Boissier de Sauvages, lekarze Théophile de

¹³⁶ Por. A. Plamondon, *Contemporary reconciliation of mechanism and organicism*, „Dialéctica”, 4(29) (1975), s. 214. Por. R. Mitchell, *Experimental life: vitalism in romantic science and literature*, The Johns Hopkins University Press, Baltimore 2013, s. 1.

¹³⁷ Por. G.A. Allen, *Life science...*, s. xxii. P. Godfrey-Smith, *Philosophy of biology*, Princeton University Press, Princeton–Oxford 2014, s. 26.

¹³⁸ Por. G.A. Allen, *Life science...*, s. xxii; P. Godfrey-Smith, *Philosophy of biology*, s. 10.

¹³⁹ Animizm jest najstarszą koncepcją życia, wyjaśniającą je na bazie duszy. Koncepcja życia jako animacji przyjmuje, że istoty żywe mają cechy, które odróżniają je od innych bytów, a tym samym wymagają specjalnego rodzaju wyjaśnienia. Jedną z pierwszych wersji tej koncepcji przedstawił Arystoteles. Jego najważniejsze spostrzeżenie zawiera się w stwierdzeniu, że dusza jest przyczyną życia w tym sensie, że jest skoordynowanym stymulatorem pobudzającym organizm do działania. Dusza – jak twierdził Arystoteles – jest dla ciała tym, czym wzrok jest dla oka. Dusza jest więc zarówno zespołem funkcji, jak i ich koordynacją. Z czasem pojawiło się wiele innych wersji animizmu: dusza bywała w nich całkowicie immanentną siłą (jak u Arystotelesa), czasami nawet niezależną, która reguluje ciało w bardziej platoński sposób (jak w myśleniu Stahla). Por. J. Gayon, *Defining life...*, s. 236.

¹⁴⁰ Por. A. Bednarczyk, *Filozofia biologii europejskiego Oświecenia. Albrecht von Haller i jego współcześni*, PWN, Warszawa 1984, s. 46. Por. S. Zięba, *Rozwój mechanistycznej koncepcji życia w piśmiennictwie francuskim XX wieku*, RW KUL, Lublin 1986, s. 43. Por. K. Szewczyk, *Biologia i sens. Studium witalizmu Jacoba von Uexküll’a*, Zakład Etyki i Filozofii Medycyny AM w Łodzi, Łódź 1993, s. 1.

Bordeu oraz Philippe Pinel, anatom i fizjolog Marie François Xavier Bichat oraz lekarz i fizjolog Paul Joseph Barthez¹⁴¹.

Najprostsza wersja witalizmu głosi, że organizmy żywe jakościowo różnią się od układów nieożywionych, ponieważ składają się z innej substancji¹⁴². Substancja, z której zbudowane są organizmy żywe, nie może być zredukowana lub wytworzona z substancji tworzącej układy nieożywione¹⁴³. „Substancja witalna” jakościowo różni się od tej, z której zbudowane są układy nieożywione. Nieco bardziej złożona wersja witalizmu głosi, że wszystko składa się z tego samego rodzaju substancji, a tym, co odróżnia organizmy żywe od układów nieożywionych jest to, że dodatkowo zawierają one również „substancję witalną”¹⁴⁴.

Od czasów Newtona „substancja witalna” była najczęściej określana mianem fluidu w analogii do energii cieplnej, flogistonu¹⁴⁵. Tak jak ciepło było postrzegane jako fluid przepływający z ciał ciepłych do ciał zimnych, tak w życiu dopatrywano się obecności „fluidu witalnego” przekazywanego dalej w procesie reprodukcji i ulatującego w momencie śmierci¹⁴⁶. Przyjęcie koncepcji życia jako „fluidu witalnego” pociągało za sobą dwie konsekwencje. Po pierwsze oznaczało to, że organizmy żywe nie mogły powstawać z układów nieożywionych, a po drugie, że życie nie może być stworzone przez człowieka w laboratorium. Na poparcie tego stanowiska wysuwano

¹⁴¹ Chociaż witalizm jako termin został po raz pierwszy użyty przez francuskiego fizjologa Paula Josepha Bartheza dopiero w 1778 roku, niektórzy pierwszych jego śladów doszukują się już w poglądach Arystotelesa. Ten starożytny grecki myśliciel opracował holistyczną i teleologiczną koncepcję przyrody. W odróżnieniu jednakże od późniejszych witalistów poglądy Stagiryty odnosiły się do natury jako całości, a nie tylko do istot żywych. Świat Arystotelesa był rodzajem superorganizmu, zarządzanego przez prawa teleologiczne. Na każde ciało składały się materia pierwsza i forma substancjalna. Ta ostatnia ożywia ciało i jest jego siłą życiową. W wieku XIII włoski myśliciel Tomasz z Akwinu uzgodnił poglądy Arystotelesa z doktryną chrześcijańską. W ten sposób Stagiryta stał się dla całego świata chrześcijańskiego niekwestionowanym autorytetem w zakresie nauki i filozofii. Jeszcze w XVI wieku wiedza pozostawała w zasadniczej części eklektyczną mieszaniną filozofii starożytnej, scholastyki, magii, obserwacji i wnioskowania przyczynowego. Organizmy żywe postrzegano jako powstałe w wyniku implantacji duszy w materię. Por. G.J.M. De Klerk, *Mechanism and vitalism...*, s. 3. Por. M. Heller, T. Pabjan, *Elementy filozofii przyrody*, s. 186. Por. K. Szewczyk, *Biologia i sens...*, s. 1. Por. R. Zaniewski, *Teorie o pochodzeniu i rozwoju życia a naturalizm chrześcijański*, Katolicki Ośrodek Wydawniczy „Veritas”, Londyn 1953, s. 26.

¹⁴² Por. D.L. Hull, *The philosophy of biological science*, s. 127.

¹⁴³ Por. tamże.

¹⁴⁴ Por. tamże, s. 127–128.

¹⁴⁵ Por. tamże.

¹⁴⁶ Por. tamże, s. 128.

następujące argumenty: jeśli życie jest „fluidem witalnym”, a Ziemia była pierwotnie go pozbawiona, to organizmy żywe nie mogły powstać na niej w sposób naturalny. Podobnie biochemik może połączyć wszystkie właściwe elementy fizyczne w prawidłowej kolejności, ale nie jest w stanie stworzyć życia w probówce, jeśli nie doda do tych składników „fluidu witalnego”. Ponieważ biochemik nie będzie wiedział, jak go pozyskać, nigdy nie będzie w stanie stworzyć organizmu żywego. Większość biologów z biegiem czasu porzuciło pojęcie „fluidu witalnego”, ponieważ nie prowadziło ono do postępu w ich badaniach, a także z uwagi na fakt, iż sformułowano inne teorie (między innymi teorię ewolucji), które nie pozostawały z nim w zgodzie¹⁴⁷. Jeśli prawdą jest, że w zamierzchłej przeszłości organizmy żywe powstawały spontanicznie z materii nieożywionej, wtedy wykluczone jest, by życie mogło być „fluidem witalnym”. W związku z powyższym, stworzenie życia w probówce jest przynajmniej teoretycznie możliwe.

Inni rzecznicy witalizmu twierdzili, że życie nie jest „fluidem witalnym”, lecz „siłą witalną”¹⁴⁸. Byli przekonani, że w materii ożywionej aktywne są siły, nieobecne w materii nieożywionej¹⁴⁹. Ich wniosek był następujący: tak jak ruch planet i gwiazd kontrolowany jest przez tajemną, niewidzialną siłę, nazwaną przez Newtona grawitacją, tak ruchy i inne przejawy życia w organizmach kontrolowane są przez niewidzialną siłę, zwaną *Lebenskraft* lub *vis vitalis*. Jeśli owe siły zinterpretujemy w substancjalny sposób, to w efekcie wydawały się one wielu ówczesnym biologom tak samo odpychające jak pojęcie „fluidów witalnych”, co w konsekwencji doprowadziło do odrzucenia ich z tych samych przyczyn¹⁵⁰.

W drugiej połowie XIX wieku nastąpiło odrodzenie idei witalistycznych na gruncie biologii (zwłaszcza morfogenezy i embriologii). Neowitaliści znajdowali inspirację szczególnie w badaniach nad procesami rozwoju¹⁵¹. Wzrost od komórki jajowej po dorosły organizm może zostać wyjaśniony poprzez dwie odmienne teorie. Zgodnie z poglądami preformacjonistów (łac. *prae* – przed, *formatio* – kształt), zarodek zawiera wszystkie części ciała w miniaturze; każda z tych części po prostu rośnie, nie pojawia się nic nowego. Teoria epigenezy natomiast wychodzi z założenia, że różnicowanie ciała następuje stopniowo¹⁵². Obie z tych hipotez były już znane i rozpatry-

¹⁴⁷ Por. tamże.

¹⁴⁸ Por. tamże.

¹⁴⁹ Por. G.J.M. De Klerk, *Mechanism and vitalism...*, s. 3.

¹⁵⁰ Por. D.L. Hull, *The philosophy of biological science*, s. 128–129.

¹⁵¹ Por. G.J.M. De Klerk, *Mechanism and vitalism...*, s. 6.

¹⁵² Por. tamże, s. 6–7.

wane przez starożytnych Greków¹⁵³. Demokryt był preformacjonistą, natomiast Arystoteles zwolennikiem epigenezy. Oczywiście są powiązania pomiędzy epigenezą i witalizmem, podobnie jak pomiędzy preformacjonizmem i mechanicyzmem. Dla preformacjonistów rozwijanie się dorosłego organizmu jest wynikiem automatycznego i mechanicznego wzrostu już zróżnicowanego jajeczka. Zwolennicy epigenezy zakładali istnienie siły witalnej, dzięki której organizm zyskuje zróżnicowane organy w sterowanym teleologicznie procesie wzrostu. W połowie XVIII wieku niemiecki fizjolog i embriolog Caspar Friedrich Wolff po badaniach mikroskopowych wyciągnął wniosek, że zarodek rozwija się epigenetycznie pod wpływem *vis essentialis*¹⁵⁴. Inny niemiecki przyrodnik Karl Ernst von Baer doszedł do identycznych wniosków na podstawie bardzo podobnych obserwacji – witalizm umożliwił więc rozwój teorii epigenetycznej.

Jednym z twórców embriologii doświadczalnej był Wilhelm Roux¹⁵⁵. Studiował on mechanikę rozwoju embrionalnego i przeprowadzał stosowne eksperymenty. Doszedł do wniosku, że każdy organ dorosłego organizmu pochodził od określonej części zarodka. W odróżnieniu od starego preformacjonizmu nie widział on jednakże podobieństwa pomiędzy tymi częściami. Zwolennikiem szkoły embriologicznej *Entwicklungsmechanik* Rouxa był Hans Driesch¹⁵⁶. W 1891 roku przeprowadził kilka eksperymentów na zarodkach jeżowca, które zdawały się nie zgadzać z tym modelem. Widząc to, wysunął tezę, że rozwój organizmu jest regulowany przez „harmonijny system ekwipotencjalny”, który koordynuje części organizmu w samodzielnie równoważącą się całość. Ostatecznie niemiecki biolog uznał, że ta „ekwipotencjalność harmonijna” organizmu wynika z niefizycznego, niemożliwego do zlokalizowania, acz przyczynowo efektywnego pośrednictwa, które nazwał „entelechią”, zapożyczając ten termin od Arystotelesa. Driesch, wyjaśniając, co rozumie przez to pojęcie, precyzował: „Także entelechia, w swych różnych formach, jest teraz pewną stałą, równocześnie intensywną różnorodnością najwyższego rodzaju: przypisać ciału entelechię oznacza więc przypisać mu uosobienie możliwości, które jako czynnik natury jest niepodzielne, ale może zostać umiarkowanie myślowo wyrażone tylko poprzez długie zdanie”¹⁵⁷. W innym miejscu dodaje: „Słowo »entelechia« oznacza autonomię istot żywych, w szerszym znacze-

¹⁵³ Por. tamże, s. 7.

¹⁵⁴ Por. tamże.

¹⁵⁵ Por. tamże.

¹⁵⁶ Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 72.

¹⁵⁷ H. Driesch, *Der Vitalismus als Geschichte und als Lehre*, J. Barth, Leipzig 1905, s. 238.

niu rzeczywiście, elementarny czynnik natury [przyrody], który się w nich przejawia”¹⁵⁸.

Driesch był ostatnim znanym biologiem, który postulował istnienie siły życiowej¹⁵⁹. Doktryna witalistyczna ostatecznie została poddana surowej

¹⁵⁸ Tamże, s. 242.

¹⁵⁹ Chociaż witalizm w pierwszych dekadach XX wieku przeszedł do historii, to jednak idee witalistyczne (choć sporadycznie i często w zakamuflowanej postaci) były nadal głoszone przez pojedynczych dwudziestowiecznych biologów. Por. E. Mayr, *What makes biology unique?*..., s. 9. Francis Crick mówi nawet o odrodzeniu idei witalistycznych w połowie XX wieku. Por. F. Crick, *Of molecules and men*, ix, 22. Przykład zainteresowania witalizmem Crick znalazł między innymi w poglądach Petera T. Mora zawartych w jego artykule z 1963 roku o prowokacyjnym tytule *Urge and molecular biology* (Pragnienie i biologia molekularna). Autor zastanawia się, czy wykorzystywane obecnie podejścia molekularne są wystarczające, by doprowadzić nas do zrozumienia różnicy pomiędzy organizmami żywymi i układami nieożywionymi. To, co ma decydować o tej różnicy, zawiera się w jego wyrażeniu „pragnienie biologiczne” (ang. *biological urge*). Zdaniem Mora fizyka i chemia nie są w stanie wyjaśnić „pragnienia biologicznego”. Dla ilustracji przywołajmy dwa cytaty z tego artykułu, w których pojawia się to wyrażenie. „Jednostki żywe na wszystkich poziomach i niemal we wszystkich swoich formach charakteryzują się ukierunkowaną, nieustępliwą i samolubną naturą. Wiąże się to z dążeniem do zachowania istnienia, a także stałego pragnienia dominowania nad otoczeniem, czerpania korzyści ze wszystkich okoliczności, a także dostosowania się do nowych warunków. Pragnienie to jest tym większe, im większa jest witalność organizmu żywego”. P.T. Mora, *Urge and molecular biology*, „Nature”, 199(4890) (1963), s. 212. I dalej: „Jeśli chodzi o jakąkolwiek indywidualną jednostkę żywą, to wszystkie te pragnienia i działania są oczywiście doczesne. Zmniejszają się z wiekiem i kończą w momencie śmierci. Niemniej ich występowanie odróżnia jednostki żywe od przedmiotów nieożywionych”. Tamże, s. 22. W wyrażeniu „pragnienie biologiczne” Crick dostrzega echo dawnej „siły życiowej”. Podsumowując poglądy Mora przedstawione w przywoływanym artykule, stwierdza: „Artykuł sam w sobie zawiera bardzo szczegółową wiedzę odnośnie do biologii molekularnej, która jest jak najbardziej poprawna, mimo to pozostawia w czytelniku mieszane uczucia”. F. Crick, *Of molecules and men*, s. 23. Otwarcie do witalizmu już w XXI wieku przyznawał się Piotr Lenartowicz (konceptę życia polskiego badacza przedstawiłem w pracy *Neowitalistyczna koncepcja życia Piotra Lenartowicza*, „Studia z Historii Filozofii”, 2(6) (2015), s. 83–100). W jego neowitalistycznej koncepcji życia odpowiednikiem siły życiowej jest pojęcie „genomu dynamicznego”. Por. Z. Wróblewski, *Rozmowa z Piotrem Lenartowiczem SJ* [w:] J. Koszteyn (red.), *Vivere et Intelligere. Wybrane prace Piotra Lenartowicza SJ wydane z okazji 75-lecia jego urodzin*, WAM, Kraków 2009, s. 34. Por. P. Lenartowicz, *Sens i zakres pojęcia informacji genetycznej* [w:] J. Koszteyn (red.), *Vivere et Intelligere...*, s. 135–136. Genom dynamiczny w przeciwieństwie do genomu strukturalnego decyduje o całościowym rozwoju organizmu żywego. Por. Z. Wróblewski, *Rozmowa z Piotrem Lenartowiczem SJ*, s. 44–45. Lenartowicz pisze: „minimalny układ funkcjonalny, który składa się przynajmniej z dwóch części [...] żeby powstał [...] musi zawierać (liczbowo) znacznie więcej elementów sprawczych, które przeprowadziłyby surowiec materii mineralnej w stan dopasowania tych dwóch części do siebie z możliwością ekonomicznego przekazu energii. Ten schemat musi być ściśle kontrolowany w przestrzeni i ściśle kontrolowany w czasie. Czyli wymaga kontroli ponadczasowej i ponadprzestrzennej”. Tamże, s. 45. Genom dynamiczny – podsumowuje Le-

krytyce i przeszła do historii. Ponieważ witalizm przyjmował, że istota życia jest poza wyjaśnieniem lub że tłumaczona jest przez siły niematerialne, dlatego też był jałowym środkiem na drodze do postępu¹⁶⁰. Istniały w szczególności dwie przyczyny, dla których witalizm przeszedł do historii: po pierwsze porażka tysięcy eksperymentów przeprowadzonych po to, aby udowodnić istnienie tajemniczej siły życiowej, dzięki której funkcjonują organizmy żywe; po drugie – realne kształty zaczęły przybierać genetyka i biologia molekularna. Były to dwie dziedziny wyjaśniające to, co wcześniej przypisywano tajemniczej sile życiowej¹⁶¹. Jej istnienie stało się zbędne.

Innymi słowy, witalizm został wykluczony z nauki, ponieważ nie spełniał wymagań hipotezy naukowej¹⁶². Nie podlegał weryfikacji empirycznej, dlatego też prowadził do bezowocnych obserwacji i eksperymentów. Co więcej, wszystkie dostępne dowody wskazywały, że funkcjonowanie organizmów i procesy życiowe mogą być wyjaśnione bez odwoływania się do niezależnych układów niematerialnych. Siły życiowe są niewykrywalne, nie są przedmiotem kontroli badawczej i wszystko, do czego są potrzebne, można wyjaśnić w inny sposób – niewymagający zaangażowania sił niematerialnych¹⁶³. Krótko mówiąc, witalizm okazał się nieprzydatny w badaniach naukowych, gdyż twierdzenie, że w istotach żywych są obecne czynniki pozaempiryczne, nie może być zweryfikowane zgodnie z metodologią naukową.

Witalizm nie był jedyną możliwą alternatywą dla mechanicyzmu. Już na przełomie XIX i XX wieku (a zwłaszcza później, w latach dwudziestych i na początku lat trzydziestych ubiegłego wieku) coraz częściej słychać było wśród biologów głosy sprzeciwu zarówno dla mechanistycznej, jak i witalistycznej wizji życia¹⁶⁴. Pojawiły się pierwsze próby wypracowania koncepcji życia, która byłaby alternatywą zarówno dla mechanicyzmu, jak i witalizmu. Te nowe poglądy odrzucające obie wcześniejsze teorie określano między innymi jako organicyzm, holizm, organizmalizm, integratywizm, mnemizm,

nartowicz – nie jest więc zależny od parametrów przestrzeni i czasu (nie ma wymiaru materialnego). Podobnie jak dusza, nie jest konkretnym materiałem, ale tym, co ten materiał kształtuje. Por. tamże, s. 46. Por. P. Lenartowicz, *Trzy koncepcje dynamiki biologicznej: arystotelesowska, neo-darwinowska, inteligentnego projektu* [w:] J. Koszteyn (red.), *Vivere et Intelligere...*, s. 289–293.

¹⁶⁰ Por. W.S. Beck, K.F. Liem, G.G. Simpson (eds), *Life. An introduction to biology*, Harper Collins, New York s. 28.

¹⁶¹ Por. E. Mayr, *What makes biology unique?*..., s. 23. Por. P. Abir-Am, *Themes, genres and orders of legitimation in the consolidation of new scientific disciplines: deconstructing the historiography of molecular biology*, „History of Science”, 23 (1985), s. 73.

¹⁶² Por. T. Dobzhansky, F.J. Ayala, G.L. Stebbins, J.W. Valentine, *Evolution*, s. 488.

¹⁶³ Por. M. Ruse, *The philosophy of biology*, s. 209.

¹⁶⁴ Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 59.

gestaltizm, umweltyzm, kompozycjonizm¹⁶⁵. Dla wygody na określenie stanowisk odrzucających zarówno mechanicyzm, jak i witalizm, użyto w niniejszej książce zamiennie nazw „organicyzm” i „holizm”.

Głównymi pojęciami składającymi się na organicystyczny styl myślenia były: całość (niem. *Ganzheit*), wzór (niem. *Gestalt*), forma, integracja, totalność, hierarchia i oczywiście organizm¹⁶⁶. Strategia organicystyczna, wychodząca naprzeciw poglądom mechanicystów i witalistów, nie była kompromisem między dwoma skrajnymi stanowiskami. Przeciwnie, zwolennicy organicyzmu nieprzychylnie spoglądali zarówno na mechanistyczną redukcję sprowadzającą wszystkie procesy życiowe do materii w ruchu, jak i na wprowadzanie przez witalistów pozamaterialnego elementu do układów ożywionych. Łącznikiem wszystkich tych koncepcji było uznanie, że organizmy żywe są zdolne do działań, które nie mają odpowiednika w świecie maszyn: samoreplikacji, celowej i uporządkowanej odpowiedzi na bodźce, rozbudowanej możliwości samoregulacji i niezwyklej wydajności transdukcji energii¹⁶⁷. Aby zrozumieć te skomplikowane interaktywne procesy, trzeba było wyjść poza poszczególne części i spojrzeć na cały układ lub proces. W ramach opozycji do myślenia mechanistycznego organicyści przed przystąpieniem do zbadania odrębnie każdego poziomu podkreślali znaczenie rozróżnienia pomiędzy poziomami organizacji w złożonym układzie. Podejście to nie wyklucza rozpoczęcia badania przez analityczny rozkład kompleksowego układu na czynniki, ale podkreśla, że jest to niewystarczające. Dla organicystów złożone układy wykazują właściwości swoiste, które są produktem poszczególnych części oraz interakcji między nimi¹⁶⁸. Dla nich osobliwe właściwości nie były mistyczne, ponieważ wynikały z materialnej interakcji pomiędzy częściami całości w każdym układzie. Nie można przewidzieć tych właściwości, znając tylko poszczególne składniki tworzące dany układ. Wyjaśnienia dotyczące danego poziomu musiały pochodzić z badań danego poziomu, a nie tylko poprzez wyizolowanie jego składników niższego poziomu. Innymi słowy, badacze stwierdzają, że opisanie części składowych i ich formalnego związku zachodzącego między nimi nie wystarczy¹⁶⁹.

¹⁶⁵ Por. tamże, s. 62. Stanisław Zięba używa zamiennie nazw „organicyzm” i „witalizm minimalny” na oznaczenie kierunku, dla którego materia ożywiona odznacza się zdolnością do specjalnych właściwości. Por. S. Zięba, *Życie. System biologiczny*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 2016, s. 402.

¹⁶⁶ Por. R.H. Beyer, *From positivism to organicism...*, s. 73.

¹⁶⁷ Por. G.E. Allen, *Mechanism, vitalism and organicism...*, s. 267.

¹⁶⁸ Por. tamże, s. 268.

¹⁶⁹ Por. H. Hein, *Molecular biology vs. organicism: the enduring dispute between mechanism and vitalism*, „Synthese”, 2(20) (1969), s. 245.

Przede wszystkim, wzór opisowy jest zasadą, która organizuje części w odniesieniu do całości, której są częścią. Zasada ta jednak nie jest dostępna dla analitycznych i eksperymentalnych metod biologii.

Twierdzenie, że „całość jest większa od sumy swoich części” jako pierwszy sformułował w 1890 roku jeden z założycieli i prekursorów psychologii postaci (niem. *Gestalt psychology*), austriacki myśliciel Christian von Ehrenfels¹⁷⁰. Pojęcie „organizmalizm” wprowadził amerykański zoolog William Emerson Ritter¹⁷¹. Pojęciu temu przeciwstawia on pojęcie „elementaryzm”. Doktrynę organicyzmu rozwijał południowoafrykański polityk, filozof i wojskowy Jan Christian Smuts, który w latach dwudziestych XX wieku głosił, że całość organizmu żywego to nie tylko suma części składowych, gdyż istotne są wewnętrzne relacje między elementami¹⁷². „Naturalne całości – pisze Smuts – zawsze składają się z części; w rzeczywistości całość nie jest czymś dodatkowym z punktu widzenia części, lecz jest jedynie zsyntezowanymi częściami, które mogą być fizyczno-chemiczne, organiczne, psychiczne lub osobowe. Jako że holizm jest procesem twórczej syntezy, powstałe całości nie są statyczne, lecz dynamiczne, ewolucyjne, twórcze”¹⁷³. W innym miejscu dodaje: „Całość wydaje się zatem oznaczoną mocą regulacji i koordynacji, zarówno w odniesieniu do struktury, jak i funkcjonowania części. Prawdopodobnie najbardziej uderzającą właściwością organizmów jest to, że obejmują one zrównoważoną korelację narządów i funkcji. Wszelkie działania różnych części i narządów wydają się nakierowane na centralne cele; istnieje zatem współpraca i ujednolicone działanie organizmu jako całości, nie zaś oddzielne, mechaniczne działania części. Całość staje się synonimem zjednoczonej (lub holistycznej) aktywności”¹⁷⁴. Jako jeden z pierwszych Smuts skonstatował, że redukcja za sprawą prostego mechanicznego związku przyczynowego nie wystarcza, aby wyjaśnić złożone układy ożywione¹⁷⁵. „Wyjaśnienie przyrody – pisze – nie może zatem być czysto mechaniczne. Mechanistyczna koncepcja przyrody ma swoje miejsce i uzasadnienie jedynie w szerszym kontekście holizmu, szczególnie w jej organicznym zastosowaniu. »Całość« będzie znacznie bardziej przydatnym

¹⁷⁰ Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 73.

¹⁷¹ Por. W.E. Ritter, *The unity of the organism or the organismal conception of life*, Richard G. Badger, Boston 1919, s. 2, 27–29.

¹⁷² Por. J.C. Smuts, *Holism and evolution*, MacMillan and Co., London 1927, s. 88. Por. S. Ślaga, *Charakterystyka koncepcji organizmalnej*, „Roczniki Filozoficzne”, 3(16) (1968), s. 110.

¹⁷³ J.C. Smuts, *Holism and evolution*, s. 89.

¹⁷⁴ Tamże, s. 125.

¹⁷⁵ Por. E.O. Voit, *Reductionism in the biomedical sciences*, „Drug Discovery Today”, 2(8) (2003), s. 66.

pojęciem w nauce od »życia« i uczyni panującą mechanistyczną interpretację w dużej mierze zbłądną»¹⁷⁶.

Bardziej rozbudowaną wersję organicyzmu można znaleźć w poglądach Johna Scotta Haldane'a¹⁷⁷, który dowodzi, że istnienie organizmów żywych nie daje się wyjaśnić w terminach fizyczno-chemicznych¹⁷⁸. Pisze: „Okazało się, że w przypadku życia fakty są niezgodne z fizyczno-chemicznym opisem zjawisk. Nie możemy przyjąć w związku z tym postawy, że niezależnie od tego, jaka jest ostateczna prawda o wszechświecie, zwykłe hipotezy robocze fizyki i chemii są wystarczające w kontekście bezpośrednich celów naszej pracy jako fizjologów»¹⁷⁹. Haldane podkreśla, że żywa struktura jest wyraźnie zorganizowana, to znaczy każda jej część ma określony związek z pozostałymi częściami¹⁸⁰. Ponieważ jednak struktura jest wynikiem aktywności metabolicznej, wyprowadza z tego wniosek, że aktywność metaboliczna w organizmie żywym również jest zorganizowana, gdyż każdy jej aspekt odnosi się do pozostałych aspektów¹⁸¹. Zależność organizmu żywego i jego środowiska jest w oczach szkockiego fizjologa nie mniej osobliwa i specyficzna od zależności między wewnętrznymi częściami i aktywnością samego organizmu. „Między organizmem a środowiskiem – pisze Haldane – ma miejsce stała i aktywna wymiana. Wymiana ta jednak, nie mając żadnego znaczenia fizjologicznego, zawsze jest określana w odniesieniu do pozostałej aktywności organizmu żywego. To, czy materiał ma zostać pobrany lub wydzielony, czy i w jakim stopniu organizm ma odpowiedzieć na dany bodziec – wszystko to jest określane w stosunku do życia organizmu jako całości. Organizm żywy i jego środowisko fizjologiczne stanowią organiczną całość, przy czym jego części nie mogą być pojmowane w izolacji»¹⁸². Dla szkockiego fizjologa organizm żywy jest autonomiczną, aktywną całością¹⁸³. Pisze dalej: „Idea, że może być on mechanizmem składającym się z oddzielnych

¹⁷⁶ J.C. Smuts, *Holism and evolution*, s. 89.

¹⁷⁷ John Scott Haldane jest znany głównie ze swojej pracy nad fizjologią oddychania. Opracował różne procedury dla badań fizjologii oddychania oraz krwi, a także analizy różnych zachodzących w ciele wymian gazów. Haldane był także filozofem nauki próbującym opracować filozoficzną podstawę biologii i ustalić jej relacje do innych nauk. Por. E. Mendelsohn, *John Scott Haldane* [w:] E. Mendelsohn (ed.), *Life sciences...*, s. 79.

¹⁷⁸ Por. D. Favrholt, *Introduction* [w:] D. Favrholt (ed.), *Niels Bohr. Collected works. Vol. 10. Complementarity beyond physics (1928–1962)*, Elsevier, Amsterdam 1999, s. [5].

¹⁷⁹ J.S. Haldane, *Mechanism, life and personality. An examination of the mechanistic theory of life and mind*, John Murray, London 1921, s. 76.

¹⁸⁰ Por. tamże, s. 78.

¹⁸¹ Por. tamże, s. 78–79.

¹⁸² Tamże, s. 79–80.

¹⁸³ Por. tamże, s. 80.

części i napędzanym przyczynami zewnętrznymi, jest dla nas całkowicie nienaturalna i staje się tym bardziej nienaturalna, im większą wiedzę posiadamy o organizmach. Koncepcja, jakiej używamy, diametralnie różni się od wszelkich koncepcji fizykalnych, gdyż uznając coś za żywe, nie oddzielamy materii bądź struktury od jej aktywności. Sama struktura jest pomyślana jako aktywna, czynna – a tym samym jako żywa”¹⁸⁴.

Rzecznikiem organicyzmu był niemiecki myśliciel Adolf Meyer-Abich (nazwiskiem Meyer-Abich zaczął posługiwać się dopiero po 1936 roku; wcześniej podpisywał się Meyer)¹⁸⁵. W artykule z 1926 roku zadeklarował, że problem mechanicyzm–witalizm jest możliwy do rozwiązania jedynie w ramach filozofii, „matki wszystkich nauk interpretacyjnych”. Decyzję o wyższości mechanicyzmu nad witalizmem (lub odwrotnie) można by podjąć jedynie wtedy, kiedy będziemy mieć pełny obraz „ogólnej sytuacji biologii teoretycznej i nauk przyrodniczych w ogóle”, które z kolei są powiązane z historią samej filozofii. Dla tego badacza dogłębna znajomość historii i filozofii nauki jest konieczna, aby móc przebić się przez gąszcz opinii opowiadających się za mechanicyzmem i witalizmem lub przeciw nim. Dla niemieckiego myśliciela to całość jest tym, co określa wszystkie swoje części, posiadając logiczne pierwszeństwo przed swoimi członami¹⁸⁶. Ten nowy „naukowo-przyrodniczy ideał poznawczy” autor nazywa holizmem (w nawiązaniu do Smutsa)¹⁸⁷. Holistyczna idea jest w zamyśle autora syntezą pozytywnych tendencji zawartych w mechanicyzmie i witalizmie przy odrzuceniu ich „dogmatycznych uprzedzeń”¹⁸⁸. Holizm, nowoczesna forma arystotelizmu, zakłada ogólną planowość lub teleologię całej rzeczywistości jako całości¹⁸⁹. Jednak holizm nie używa teleologii jako konstytutywnej zasady wyjaśnienia, jak to robią witaliści. „Teleologia – pisze Meyer-Abich – jest dla holizmu bardziej zadaniem poznania, problematyką i tematyką badań, którą trzeba ciągle na nowo poznawać, ponieważ bez teleologii jako założenia i tematu poznania nie jest możliwe także rzeczywiście konstytutywne tworzenie teorii. Dotychczasowy tok poznania natury usprawiedliwia

¹⁸⁴ Tamże.

¹⁸⁵ Por. A. Meyer[-Abich], *Das Mechanismus-Vitalismusproblem im Lichte neuerer logischer Forschung*, „Biologisches Zentralblatt”, 46 (1926), s. 213–214. Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 82.

¹⁸⁶ Por. A. Meyer[-Abich], *Krisenepochen und Wendepunkte des biologischen Denkens*, Gustav Fischer, Jena 1935, s. 37.

¹⁸⁷ Por. tenże, *Die Überwindung des Mechanismus durch den Holismus* [w:] *Actes Du Huitième Congrès International de Philosophie à Prague (2–7 Septembre 1934)*, Kraus Reprint Limited, Nendeln 1968, s. 43.

¹⁸⁸ Por. tamże.

¹⁸⁹ Por. tamże, s. 45.

jednak w pełni to, aby mówić o ogólnej planowości natury i sensownej całości rzeczywistości. Jeżeli widzimy w aksjomatyce idealne przedstawienie poznania danego obszaru, wówczas możemy sformułować ten stan rzeczy także w następujący sposób: tym, co musi dojść jeszcze do aksjomatów danego obszaru i zawsze koniecznych logicznych lub matematycznych twierdzeń – aby móc zrealizować aksjomatyczną budowę obszaru rzeczywistości – jest idea ogólnej i szczególnej planowości tego obszaru. Poprzez to realizuje się nowy ideał poznawczy holizmu, jakim jest na nowo postawione pytanie: W jaki sposób możliwe jest poznanie natury?”¹⁹⁰

Własną koncepcję organicyzmu opracował austriacki biolog Ludwig von Bertalanffy. Zasłynął jako teoretyk systemowy, a rozpoczął karierę naukową jako zwolennik nowej, niemechanistycznej (lecz jednocześnie niewitalistycznej) „biologii teoretycznej”¹⁹¹. Od przełomu lat 1927/1928 prowadził kampanię na rzecz organicyzmu jako reakcji przeciwko podejściom mechanistycznym i witalistycznym¹⁹². Odrzucał tradycję Kartezjusza, Haeckela i Loeba, wątpiąc, by analizy fizyczna i chemiczna mogły same w sobie wyjaśnić właściwości teleologiczne istot żywych. Witalizm również nie był realną alternatywą dla Bertalanffy’ego, jawiąc się mu jako spekulatywna metafizyka zbudowana na ostatecznie mechanistycznym fundamencie¹⁹³. Witalizm rozpoznaje przejawy organicznej całości, wyjaśnia je jednak czynnikami metafizycznymi i psychicznymi, a przez to rezygnuje z wyjaśnienia naukowego¹⁹⁴.

Pierwszym krokiem przy opracowywaniu nowej, organicystycznej teorii życia miało być wyzbycie się mechanistycznych i witalistycznych uprzedzeń, „oddzielenie się od nich murem”¹⁹⁵. Właśnie dlatego Bertalanffy postawił sobie za zadanie opracowanie nowoczesnej „biologii teoretycznej”, która stanowiłaby alternatywę zarówno dla mechanicyzmu, jak i witalizmu¹⁹⁶. „Konieczne będzie zatem – pisze – dążenie do uzasadnienia nowego ujęcia życia, które – wobec dotychczasowego mechanicyzmu – jest w stanie sprostać całości organicznej. Ta jednak – w przeciwieństwie do witalizmu –

¹⁹⁰ Tamże, s. 45–46.

¹⁹¹ Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 92.

¹⁹² Por. tamże, s. 97.

¹⁹³ Por. tamże. O „mechanistycznym fundamencie” witalizmu pisze: „Widzieliśmy dokładnie, że także witalizm ostatecznie w maszynowej teorii życia ma swój początek. Nie pokonuje on fikcji maszynowej, lecz uzupełnia ją tylko poprzez swoje czynniki witalne”. L. von Bertalanffy, *Theoretische Biologie. Erster Band: Allgemeine Theorie, Physikochemie, Aufbau und Entwicklung des Organismus*, Verlag von Gebrüder Borntraeger, Berlin 1932, s. 80.

¹⁹⁴ Por. tenże, *Theoretische Biologie. Erster Band...*, s. 80.

¹⁹⁵ Por. tenże, *Kritische Theorie der Formbildung*, Verlag von Gebrüder Borntraeger, Berlin 1928, s. 177.

¹⁹⁶ Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 93.

udostępnia badania naukowo-przyrodnicze. Chcielibyśmy nazwać alternatywę dla mechanicyzmu i witalizmu »biologią organizmalną«¹⁹⁷.

W spojrzeniu na życie austriacki biolog jako na istotne i znamienne wskazuje dwa elementy – całościowość i historyczność¹⁹⁸. Zarówno całościowy, jak i historyczny charakter życia nie mogą zostać wyjaśnione w ujęciu sumatywno-fizyczno-chemicznym. Fundamentalnymi koncepcjami nowej biologii teoretycznej byłyby więc forma i celowość. Bertalanffy przyznaje, że analiza fizyczno-chemiczna jest pożądana, ale nie można się ograniczyć tylko do niej¹⁹⁹. Píše: „Życie [...] jest w pierwszej kolejności problemem formy. [...] Wzór chemiczny nigdy nie wyczerpuje istoty życia”²⁰⁰. W przeciwieństwie do atomistycznego podejścia nauk fizykalnych nauki biologiczne muszą traktować organizm jako formę (*Gestalt*) posiadającą własności niewynikające bezpośrednio ze zwykłego zsumowania części²⁰¹. Austriacki biolog myśli o „celowości” jako o kategorii, w ramach której pojęte mogły być niektóre swoiste cechy życia²⁰². Argumentuje, że pojęcie finalizmu nie jest pod żadnym względem bardziej mistyczne bądź antropomorficzne od przyczynowości²⁰³. Píše: „Oczywiście, jeżeli sobie wyobrazimy, że w ciele organicznym tkwi celowa siła, entelechia, która powoduje działanie *A* na *B*, będziemy antropomorficzni. Wówczas musimy w sposób konsekwentny założyć w jednokomórkowcu świadomą i nieświadomą duszę, która wyobraża sobie *B* i następnie poprzez *A* kieruje swoją wolą. Odnośnie do tego panpsychizmu można przytoczyć taką samą liczbę argumentów za, jak i przeciw. Jednak w czystym pojęciu finalności [...], wyobrażenie [...] na temat *B* jest tu tak samo mało widoczne jak w czystym pojęciu przyczynowości działanie antropomorficzne. Finalność nie mówi o niczym innym niż to, że obecne *A* stoi w prawowitym stosunku do przyszłego *B*”²⁰⁴.

Bertalanffy podkreśla, że to, co charakterystyczne dla organizmalnego ujęcia życia, to nie pojedyncze, nawet najbardziej skomplikowane procesy

¹⁹⁷ L. von Bertalanffy, *Theoretische Biologie. Erster Band...*, s. 80.

¹⁹⁸ Por. tamże, s. 64.

¹⁹⁹ Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 95–96.

²⁰⁰ L. von Bertalanffy, *Kritische Theorie der Formbildung*, s. 69.

²⁰¹ Por. tamże, s. 69. Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 96.

²⁰² Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 96. Kategorii „celowości” w wyjaśnianiu fenomenu życia poświęciłem osobną pracę (*Kategoria „celowości” we współczesnej dyskusji filozoficzno-biologicznej* [w:] K. Bałkowski, K. Maciąg (red.), *Filozofia nauki – wybrane zagadnienia*, s. 49–66).

²⁰³ Por. L. von Bertalanffy, *Studien über theoretische Biologie*, „Biologisches Zentralblatt”, 47 (1927), s. 225.

²⁰⁴ Tamże, s. 225–226.

(jak na przykład oddychanie komórkowe i fermentacja, kształtowanie form, procesy w układzie nerwowym), ale swoista i specyficzna forma porządku części i procesów, którą nazywa organizacją i której badanie uważa za właściwy cel biologii²⁰⁵. W ujęciu organizmalnym organizm żywy nie jest sumą pojedynczych części i procesów, ale też nie jest układem działającym na własnych prawach²⁰⁶. We wszystkich obszarach biologii musimy postrzegać organizm nie jako sumę części, lecz jako całościowy układ²⁰⁷. W związku z powyższym austriacki biolog precyzuje, co rozumie przez organizm żywy: „Organizm żywy jest układem zorganizowanej w hierarchicznym porządku dużej liczby różnych elementów, w którym to układzie duża liczba procesów uporządkowana jest tak, że poprzez ich ciągłe wzajemne relacje w obrębie dalekich granic przy ciągłej zmianie substancji bazujących na systemie i energii, jak i przy zaburzeniach uwarunkowanych innymi zakłóceniami system pozostaje zachowany w swoim własnym stanie”²⁰⁸. Ponieważ podstawą życia, charakterystyką procesów życiowych jest ich porządek, dlatego badanie pojedynczych substancji i procesów w organizmie, ich nawet najbardziej wnikliwa, fizyczno-chemiczna analiza, nie może oznaczać pełnego wyjaśnienia fenomenu życia²⁰⁹. Takiemu podejściu umyka istotny aspekt życia, a mianowicie to, że procesy w organizmie są tak uporządkowane, że gwarantują zachowanie całości. Systemowa prawidłowość organizmu nie może zostać sformułowana w sposób fizyczno-chemiczny, konieczne jest ujęcie biologiczne.

Przedstawicielem organicyzmu był szwajcarski lekarz Paul Eugen Bleuler. Był on zwolennikiem mnemizmu (od słowa „mnem”, pochodzącego od greckiej bogini Mneme, muzy pamięci), opartego na teorii niemieckiego zoologa i biologa ewolucyjnego Richarda Semona²¹⁰. Semon rozwinął mnemizm w pierwszej dekadzie XX wieku, czerpiąc z pojęć wprowadzonych przez niemieckiego fizjologa Ewalda Heringa w roku 1870²¹¹. Hering z kolei wskazywał na podobieństwa między dziedzicznością, zwyczajami i pamięcią, sugerując, że wszystkie wynikają z jednego i tego samego atrybutu materii ożywionej. Semon doprecyzował sugestię niemieckiego fizjologa w ramach bardziej złożonego schematu. Według niego przy odpowiednich

²⁰⁵ Por. tenże, *Vom Molekül zur Organismenwelt. Grundfragen der modernen Biologie*, Akademische Verlagsgesellschaft Athenaion, Potsdam 1944, s. 3–4.

²⁰⁶ Por. tamże, s. 4.

²⁰⁷ Por. tamże, s. 5.

²⁰⁸ Tenże, *Theoretische Biologie. Erster Band...*, s. 83.

²⁰⁹ Por. tamże, s. 115.

²¹⁰ Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 98.

²¹¹ Por. tamże, s. 99.

warunkach bodziec pozostawia po sobie „permanentny zapis” w formie piśmnej lub wyrzyty w „materii pobudliwej”. Semon nazywał zdolność materii ożywionej do wytwarzania takich ukrytych zapisów bodźców „mnemem”; same zapisy określał zaś mianem engramów. Zacytujmy odnośny fragment z pracy niemieckiego zoologa i biologa ewolucyjnego: „W bardzo wielu przypadkach można udowodnić, że drażliwa substancja organizmu, niezależnie od tego, czy należy do królestwa protistów, roślin, czy zwierząt, jest na stałe zmieniona po działaniu i ponownym zakończeniu działania bodźca oraz po ponownym wkroczeniu we wtórny stan obojętności. Określam to jako działanie engramiczne bodźców, ponieważ wpisuje się ono w substancję organiczną. W ten sposób spowodowaną zmianę substancji organicznej określam jako engram danego bodźca, a sumę engramów, które posiada organizm, jego zasobem engramów, przy czym należy rozróżnić odziedziczony indywidualnie zasób engramów. Zjawiska, które wynikają w organizmie z obecności określonego engramu bądź też sumy engramów, określam jako zjawiska mnemiczne”²¹². Ponieważ raz jeszcze przy odpowiednich warunkach engramy mogły być przekazywane na drodze dziedziczenia, teoria mnemowa stanowiła w pewnym sensie rodzaj neolamarizmu²¹³. Mnemizm – jak twierdził Semon – okazuje się bazować wyłącznie na przyczynowości i nie wymaga pomocy ze strony witalizmu ani teleologii²¹⁴.

Bleuler, podobnie jak Semon, próbował uczynić z mnemizmu alternatywę zarówno dla witalizmu, jak i mechanicyzmu²¹⁵. Jego zdaniem mnemizm jako teoria, a nie mechanicyzm czy witalizm, wyjaśnia wszystko z zakresu zjawisk życiowych²¹⁶. „Dzięki pojęciu obiektywnego mnemu – pisze – można zrozumieć zasadę, która decyduje o tym, co w aspektach biologicznych kryje się za czysto fizyczno-chemicznymi procesami, wszelkie cele, to, co napędza w rozwoju indywidua i gatunki oraz w końcu psychikę z rozumem, popędami, wolą i świadomością, a w pewnym sensie także samo życie. Wszystko to tworzy całościowy kompleks zjawisk, który przeciwstawia się, jako specyficzna funkcja życia, nieorganicznym zdarzeniom pozbawionym pamięci. Wzajemne relacje pomiędzy ciałem a duchem, które dla wszystkich innych teorii pozostają tajemnicą, stają się w jej świetle oczywi-

²¹² R. Semon, *Die Mneme als Erhaltendes Prinzip im Wechsel des Organischen Geschehens*, Verlag von Wilhelm Engelmann, Leipzig 1920, s. 15.

²¹³ Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 99.

²¹⁴ R. Semon, *Die Mneme als Erhaltendes Prinzip...*, s. 407.

²¹⁵ Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 100.

²¹⁶ Por. P.E. Bleuler, *Mechanismus-Vitalismus-Mnemismus*, Julius Springer, Berlin 1931, s. 142.

stością”²¹⁷. Siły fizyczno-chemiczne nie mogą wyjaśnić fenomenu życia. Szwajcarski lekarz twierdzi, że „prawdopodobieństwo, że życie, nawet jeżeli już powstało, trwa tylko poprzez przypadek kombinacji fizyczno-chemicznych, to znaczy bez zasadniczo celowej, utrzymującej życie funkcji i rozwijało się za pomocą doboru do istniejących form organizacji, jest niemal jak jeden do nieskończoności. Nieuzasadnione jest uwzględnianie go, czy też, jak jest w przypadku mechanicyzmu, całkowite na nim bazowanie”²¹⁸. Podobnie jak mechanicyzm, również witalizm Bleuler uznaje za zbyteczny przy wyjaśnianiu natury życia. Píše: „Witalizm, który chciał wyjaśnić celowość funkcji życiowych przez element skonstruowany *ad hoc*, mający charakter psychiczny i istniejący poza organizmem, którego nie można ująć w sposób pojęciowy, stał się niepotrzebny za sprawą mnemizmu, który może dać rzeczywiste wyjaśnienie. Właściwości takie jak absolutna celowość, które niektórzy przypisywali temu elementowi, są bezpodstawnymi spekulacjami. Także teorie związane z witalizmem na temat powiązania psychoidy ze zdarzeniami w świecie lubżywieniem atomowym czy światowym, inteligencją kosmiczną [...] są przynajmniej na ten moment w pełni oddalane”²¹⁹.

Tak jak Semon, również Bleuler nie potrafił wyjaśnić materialnej natury engramów²²⁰. Geny były ściśle związane z engramami, lecz nie były jednym i tym samym, przeciwnie – engramy współpracowały z substancją genetyczną i poprzez nią. Lokalizacja engramów w chromosomach wydawała się analogiczna do lokalizacji funkcji psychicznych w mózgu: istniały *loci* dla określonych funkcji, ale brał w nich udział cały mózg. „Nie mam możliwości wyobrażenia sobie w tym momencie – pisał – jaka zmiana istnieje w substancji życiowej i co określamy jako engramy. Jeżeli powiemy, że genowe engramy są zlokalizowane w chromosomach, wówczas można to rozumieć podobnie jak lokalizowanie funkcji mowy w pewnych częściach kory mózgowej: jest ona funkcją całej kory mózgowej, ma jednak swoje miejsce w pewnej lokalizacji, w której można ją całościowo zniszczyć. Siły genów muszą się oczywiście w pewnych okolicznościach uaktywnić z protoplazmy komórkowej. Całościowo lub głównie w plazmie funkcjonalnej będziemy musieli wyobrazić sobie engramy komórek organizmu, z wyjątkiem tych odpowiedzialnych za rozmnażanie, które oczywiście mają swoje

²¹⁷ Tenże, *Die Mneme als Grundlage des Lebens und der Psyche*, „Die Naturwissenschaften”, 5–7 (1933), s. 101.

²¹⁸ Tenże, *Mechanismus-Vitalismus-Mnemismus*, s. 142.

²¹⁹ Tamże, s. 144.

²²⁰ Por. tamże, s. 40, 94, 100. Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 100–101.

wyłączne miejsce w chromosomach. Engramy wydają się całkowicie niezależne od jakości masy swojego podmiotu. W najmniejszej części substancji może się oczywiście znajdować dowolna liczba engramów”²²¹. Bleuler utożsamiał mnem z wzorcami lub układami energii i materii w organizmie, nie zaś lokalizowalnymi jednostkami fizycznymi²²². Chociaż nie rozumiał materialnej podstawy mnemu, wykluczał (podobnie jak Semon) jego identyfikację z duszą, inteligencją lub siłą zewnątrzpochodną względem organizmu.

Ku organicyzmowi skłaniał się również brytyjski biochemik Joseph Needham. Według niego organicyzm daje skuteczną alternatywę zarówno dla mechanistycznej, jak i witalistycznej koncepcji życia. Needham pisze: „Ten impas [pomiędzy mechanicyzmem i witalizmem], który w różnej postaci przebiegał przez całą historię myśli ludzkiej, może zostać zakończony, gdy zdamy sobie sprawę, że każdy poziom organizacji ma swoje własne prawa i zasady, których nie da się zredukować do niższego poziomu zasad ani zastosować do wyższego poziomu, a które nie są nieprzeniknione i odporne na naukową analizę i poznanie”²²³. Zdaniem Needhama obecność specjalnego rodzaju organizacji w układach ożywionych nie ma nic wspólnego z witalizmem, który zakłada istnienie pewnego odrębnego podmiotu względem relacji organizacyjnych²²⁴. „Nieredukowalność” kategorii biologicznych może uzyskać zupełnie inną interpretację. „W naszej gestii – pisze – leży badanie natury tej organizacji biologicznej i nieoddawanie jej w ręce metafizyki, gdyż zasady fizyki zdają się nie mieć do niej zastosowania”²²⁵.

Warto wspomnieć, że zwolennikami organicyzmu byli także między innymi Edward Stuart Russell oraz Joseph Henry Woodger. Obaj kształcili się jako biolodzy eksperymentalni i przez pewien czas czynnie prowadzili badania w tej dziedzinie²²⁶. Później w swej pracy koncentrowali się na kluczowych problemach z zakresu biologii teoretycznej. Pomimo różnic w poglądach Russell i Woodger połączyli siły w szerokiej antymechanistycznej koalicji. Obaj odrzucili teoretyczne spekulacje biologii mechanistycznej, stojąc na stanowisku, że zjawiska biologiczne powinny być postrzegane z zewnątrz, a nie wyjaśniane przez tworzenie dla nich mechani-

²²¹ P.E. Bleuler, *Mechanismus-Vitalismus-Mnemismus*, s. 146.

²²² Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 101.

²²³ J. Needham, *Metamorphoses of scepticism* [w:] J. Needham, *Time, the refreshing river: essays and addresses, 1932–1942*, Allen & Unwin, London 1943, s. 18.

²²⁴ Por. tenże, *Order and life*, Cambridge University Press, Cambridge 1936, s. 17.

²²⁵ Tamże, s. 17–18.

²²⁶ Por. N. Roll-Hansen, *E.S. Russell and J.H. Woodger: The failure of two twentieth-century opponents of mechanistic biology*, „Journal of the History of Biology”, 3(17) (1984), s. 408.

zmów fizyczno-chemicznych. Idea konkretnych genów, swego rodzaju złożonych molekuł umiejscowionych na chromosomach, była dla nich obu daleką od naukowej teorii spekulacją. Obaj podkreślali heurystyczną wyższość holizmu nad mechanicyzmem. Obaj w końcu stwierdzili również, że postępy biologii w przyszłości mogą nastąpić dzięki podejściu holistycznemu.

Russel odrzucał zarówno mechanistyczne, jak i witalistyczne koncepcje życia. Te pierwsze nie mają – jak twierdził – właściwego zastosowania dla wielu szerszych problemów biologii ogólnej – adaptacji, zachowań, czynników ewolucji²²⁷. Z kolei koncepcja entelechii nie ma w jego ocenie żadnego praktycznego zastosowania w biologii²²⁸. „Organizmalna teoria bytów żywionych”, za którą opowiadał się Russel, stoi w wyraźnej opozycji do wyżej wymienionych koncepcji życia²²⁹. W myśl teorii, za którą opowiada się badacz, w organizmach żywych nie istnieją tak naprawdę żadne oddzielne części ani oddzielne procesy, dlatego też żadnych z nich nie da się odpowiednio scharakteryzować (z wyjątkiem sytuacji, gdy obejmiemy je całościowym kontekstem)²³⁰. Píše: „Właściwie żywa tkanka-komórka jest nierozzerwalnie związana w wyniku aktywności funkcjonalnej z sąsiednimi komórkami, a za sprawą *milieu intérieur* i układu nerwowego także z ogólnymi działaniami, do jakich dąży organizm. Tkanka-komórka bierze udział w działalności całości i uzależnia swoje dalsze istnienie od wielorakich relacji funkcjonalnych z ową całością. Gdybyśmy wyróżnili ją jako samodzielną jednostkę lub składnik, siłą rzeczy abstrahowalibyśmy od pełnej rzeczywistości, pomijając koneksje funkcjonalne lub powiązania z całością i tworząc dla niej uproszczoną i statyczną koncepcję”²³¹.

W organizmie żywym nie ma żadnych rozdzielnych i niezależnych części, i zdaniem autora, uznając je za niezależne jednostki, sztucznie upraszczamy ich definicję, nie biorąc pod uwagę ich permanentnych relacji z aktywnością organizmu jako całością²³². W przeciwieństwie do maszyny, która ma oddzielne części i może być podzielona i ponownie złożona, a jej elementy mogą być odpowiednio scharakteryzowane pod względem ich własnej struktury, niezależnie od związków z maszyną jako całością, w organizmie żywym części mogą być odpowiednio scharakteryzowane jedynie pod

²²⁷ Por. E.S. Russell, *The interpretation of development and heredity. A study in biological method*, The Clarendon Press, Oxford 1930, s. 165.

²²⁸ Por. tamże.

²²⁹ Por. tamże, s. 132.

²³⁰ Por. tamże, s. 145.

²³¹ Tamże, s. 146.

²³² Por. tamże.

względem powiązań funkcjonalnych z organizmem jako całością. Działanie całości nie może być w pełni wyjaśnione w kategoriach działania części odizolowanych przez analizę i wyjaśnienie; będzie to tym mniej precyzyjne, im bardziej wyodrębnione będą poszczególne części²³³. Części nie mogą być pojmowane bez kontekstu całości. Żadna część jakiegokolwiek jednostki żywej i żaden pojedynczy proces dowolnej złożonej aktywności organicznej nie mogą być w pełni zrozumiane w oderwaniu od struktury i aktywności całego organizmu. Żadna część lub narząd nie prowadzi całkowicie niezależnego życia, mogąc istnieć i spełniać swoją właściwą funkcję tylko w najbliższym uzależnieniu i koordynacji z resztą organizmu²³⁴. Wszystkie części i narządy są wzajemnymi środkami i celami, gdzie każda część wnosi coś do życia całego organizmu. Tak samo jest z narządami ciała: tworzą one jedną harmonijną i nierozzerwalną całość. Życie organizmu jest zasadniczo jednolitym funkcjonalnym lub dynamicznym procesem, w którym istnieją nierozzerwalnie powiązane ze sobą „całość” i „części”²³⁵. Obie są wyrazem życia jednostki.

Russel w podsumowaniu swoich rozważań nad naturą życia stwierdza: „Zgadza się, że biologia jest przede wszystkim badaniem pojedynczych organizmów żywych; że pojedynczy organizm – tak samo jednokomórkowy, jak i wielokomórkowy – to jednostka, do której muszą odnosić się wszystkie biologiczne koncepcje i prawa. Organizm jest w zasadzie ciągłą jednością, a wszystkie jego działania zmierzają w kierunku celów, jakimi są rozwój, zachowanie i reprodukcja; te z kolei nawiązują do przyszłości i przeszłości organizmu i nie mogą być zrozumiane bez uwzględnienia relacji czasowych. Działania organizmu cechuje pewna jednolitość i całościowość, co czyni je nieredukowalnymi do procesów niższego poziomu; aktywność organizmu jako całości nie jest zatem całkowicie możliwa do wyjaśnienia pod kątem aktywności jego części, a tym bardziej nie w kontekście aktywności fizyczno-chemicznej”²³⁶.

Woodger w swojej koncepcji życia koncentruje się na problemie organizacji, który (jak twierdzi) pozwala nam odróżnić maszynę od organizmu²³⁷. W opinii brytyjskiego biologa organizmy różnią się od maszyn w następujących aspektach²³⁸:

²³³ Por. tamże, s. 147.

²³⁴ Por. tamże, s. 148.

²³⁵ Por. tamże, s. 149.

²³⁶ Tamże, s. 173.

²³⁷ Por. J.H. Woodger, *Biological principles. Reissued, with a new introduction*, Routledge & Kegan Paul, London 1967, s. 451.

²³⁸ Por. tamże, s. 451–452.

- części organizmów po oddzieleniu ich od całości posiadają odmienne właściwości, stąd bycie częścią żywej całości jest wewnętrzną relacją organizacyjną,
- wzajemne relacje części w całości i całości względem środowiska są takie, że w typowym środowisku, w którym organizm zazwyczaj występuje w przyrodzie, poprzez zmienianie samego siebie utrzymuje się przy życiu pomimo zmian środowiskowych,
- nic nie wskazuje na to, by organizmy uzależniały swoje istnienie od jakiegokolwiek umysłu, w tym ludzkiego, dlatego organizm nie posiada (z natury) relacji względem ludzkich potrzeb, pragnień lub celów,
- dany organizm jest wynikiem ewolucyjnego procesu w sensie biologicznym,
- organizmy są genetycznie podobne do siebie.

Woodger wymienia i analizuje trzy fundamentalne rodzaje „całości” lub „indywidualnie zorganizowanych rzeczy”²³⁹:

1. Nieorganiczne:

- a) dostrzegalne: kryształy, Układ Słoneczny,
- b) niedostrzegalne: atomy, cząsteczki.

2. Biologiczne: organizmy żywe.

3. Artefakty:

- a) sztucznie syntetyzowane związki organiczne,
- b) maszyny, narzędzia i wszelkiego rodzaju ludzkie konstrukcje,
- c) dzieła sztuki, instytucje społeczne.

Sposób organizacji w tych różnych podmiotach znacząco się zmienia²⁴⁰. Należące do grupy 2. są egzystencjalnie uzależnione od tych z grupy 1., podczas gdy te z grupy 3. są na podobnej zasadzie uzależnione od tych z grupy 2. Tym samym mechanistyczne wyjaśnienie w fizyczno-chemicznym znaczeniu oznacza interpretację 2. względem 1., a więc nie powoduje przejścia od niższego do wyższego rodzaju organizacji. Jednocześnie, mechanistyczne wyjaśnienie w sensie teorii maszynowej polega na przejściu od wyższego do niższego rodzaju organizacji. Innym rozwiązaniem byłoby zbadanie organizacji typu 2. jako sposobu organizacji *sui generis*, wyrażonej w adekwatnych dla niej terminach. Czyniąc to, możliwe stałoby się porównanie praw odpowiednich dla tego typu organizacji z prawami innych typów organizacji. „W ten sposób – konkluduje Woodger – do naszej listy [...] powodów, by sądzić, że poświęcanie w biologii uwagi wyłącznie temu, co kryje się pod nazwą wyjaśnienia mechanistycznego, nie jest pożądane – oraz

²³⁹ Por. tamże, s. 452.

²⁴⁰ Por. tamże.

pamiętając, że witalizm nie jest jedyną alternatywą – możemy dodać [...] powód, który można opisać jako zależny od faktu, że organizmy żywe wykazują [...] »celowość wewnętrzną«²⁴¹.

Woodger wskazuje na relacje, które mają szczególne znaczenie w biologii²⁴². Do najważniejszych należą:

- czasoprzestrzenne,
- przyczynowe,
- genetyczne,
- „organiczne” lub „celowościowe” (inaczej „teleologiczne”²⁴³).

Brytyjski biolog rozważa trzy ostatnie z wyżej wymienionych. Mówiąc o relacjach przyczynowych, ma na myśli stosunki wzajemnej zależności, odnoszące się do niektórych rodzajów zmian. Mówiąc o relacjach genetycznych, ma z kolei na myśli relacje, w których dwa organizmy można powiązać z racji sposobu wyprowadzania jednego z drugiego albo obu z nich od wspólnego przodka. Przez „organiczne” lub „celowościowe” rozumie zaś relacje wielu złożonych stosunków wewnętrznych między częściami organizmu, na mocy których organizm zachowuje swoją jednostkowość pośród strumienia nieprzewidzianych zdarzeń środowiskowych. Trzy ostatnie rodzaje relacji są odpowiedzialne za to, co „energiczne”, „historyczne” i „organizmalne”. „To właśnie istnienie tych trzech różnych sposobów odnoszenia się do organizmu – pisze Woodger – jest odpowiedzialne za heterogenność wiedzy biologicznej, gdyż bardzo trudno jest znaleźć dla nich wszystkich wspólną płaszczyznę. Wydaje się, że nie ma powodu, by sądzić, że te różne metody rozważania organizmu wykluczają się wzajemnie ani że możemy bezpiecznie korzystać z jednej z nich przy jednoczesnym wyłączeniu pozostałych”²⁴⁴.

Podsumowując, główne twierdzenia organicyzmu dają się streścić w następujących punktach²⁴⁵:

²⁴¹ Tamże, s. 452–453.

²⁴² Por. tamże, s. 456.

²⁴³ W obszarze nauk fizykalnych odwoływanie się do kategorii celu, aby opisać pewne zjawiska i procesy, wydaje się współczesnym fizykom całkowicie nieuzasadnione. Por. M. Ruse, *Teleology redux* [w:] J. Agassi, R.S. Cohen (eds), *Scientific philosophy today. Essays in honor of Mario Bunge*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht 1982, s. 301. Niektórzy współcześni biolodzy deklarują zdecydowaną niechęć do kategorii celowości również w opisie zjawisk przyrody ożywionej. Takie stanowisko przyjmuje polski biolog Henryk Szarski. „Nie wydaje mi się – pisze Szarski – aby ten termin [teleonomia] pozwalał na lepszy opis rzeczywistości, a jak każde nowe wyrażenie może być źródłem nieporozumień. W istocie zarówno teleologia, jak i teleonomia sugerują błędny obraz procesu ewolucyjnego”. H. Szarski, *Mechanizmy ewolucji*, Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Wrocław 1976, s. 183.

²⁴⁴ J.H. Woodger, *Biological principles...*, s. 456–457.

²⁴⁵ Por. A. Plamondon, *Contemporary reconciliation...*, s. 215.

1. Organizmy są czymś więcej niż sumą swoich elementów fizyczno-chemicznych.
2. Zrozumienia organizmu nie można osiągnąć poprzez pełne zrozumienie fizyczno-chemicznych wyizolowanych części organizmu.
3. Organizm determinuje naturę swoich fizyczno-chemicznych części.
4. Złożoność i organizacja hierarchiczna organizmu uniemożliwiają jego właściwe zrozumienie za pomocą metod analitycznych.

Organicystyczne tezy nie zyskały powszechnej akceptacji badaczy życia. Organicyzm był często postrzegany przez jego krytyków jako tylko pewne przekształcenie witalizmu, pozbawionego swoich elementów transcendentnych²⁴⁶. „W rzeczy samej – piszą Scott F. Gilbert i Sahotra Sarkar – naukowcy i filozofowie dokonali sporego rozłamu. Albo było się mechanycystą albo witalistą [...], dopiero w połowie XX wieku stało się możliwe rozróżnienie organicyzmu od witalizmu”²⁴⁷. Poza tym termin „organicyzm” wielu kojarzy się z czymś nienaukowym. Często używany jest w retoryce New Age, aby opisać spirytualizację materii i życia. „Istnieje nawet – piszą Gilbert i Sarkar – »organicystyczny« [...] podręcznik embriologii, który omawia gastrulację, neurulację i organogenezę jako narodzenie kosmosu i stworzenie duchowego wszechświata. Pierwsze trzy gruczóły są endodermiczne: krtań wpływa na wzrost i osobowość solarną; trzustka wpływająca na trawienie powiązana jest z Księżycem, a tarczycza, kierująca oddychaniem, powiązana jest z Merkurym”²⁴⁸. Ciężko uznać ten opis – konkludują – za zjednujący organicyzmowi sympatię wśród naukowców. Z kolei Nils Roll-Hansen zwraca uwagę na naukową nieefektywność organicyzmu w badaniach biologicznych²⁴⁹. W jego ocenie brak jest wyraźnych dowodów na to, że organicyzm się im przysłużył. Sugeruje on, że pogląd ten pozostał w dużej mierze na płaszczyźnie filozoficznej i nie miał większego wpływu na wiedzę biologiczną.

Wielu współczesnych badaczy, odżegnując się od redukcjonizmu, w swych rozważaniach nad fenomenem życia odwołuje się do koncepcji emergencji²⁵⁰. Końcowa część niniejszego rozdziału została poświęcona emergentyzmowi jako współczesnej formie antyredukcjonizmu w biologii.

²⁴⁶ Por. E. Gagliasso, *The metamorphosis of holism* [w:] V. Benci, P. Cerrai, P. Freuglia, G. Israel, C. Pellegrini (eds), *Determinism, holism, and complexity*, Springer Science+Business, New York 2003, s. 344.

²⁴⁷ S.F. Gilbert, S. Sarkar, *Embracing complexity: organicism for the 21st century*, „Developmental Dynamics”, 1(219) (2000), s. 4.

²⁴⁸ Tamże, s. 5.

²⁴⁹ Por. N. Roll-Hansen, *E.S. Russell and J.H. Woodger...*, s. 403.

²⁵⁰ Kategorii „emergencji” w biologii poświęciłem jedną z moich prac (*Krótko o roli emergencji w biologii* [w:] K. Kropiwek, M. Szala (red.), *Nauka, filozofia, kultura...*, s. 7–22).

Stuart A. Kauffman zauważa, że według naukowego światopoglądu redukcjonistycznego, pod hegemonią którego przez wiele lat żyliśmy, wszechświat jest pozbawiony sensu, a organizmy (podobnie jak skała) są „niczym więcej”, jak poruszającymi się cząsteczkami²⁵¹. Ten pogląd naukowy na otaczającą nas rzeczywistość zdaniem amerykańskiego biologa należy porzucić na rzecz emergentyzmu. Ten ostatni akcentuje sprawczość (ang. *agency*) życia. „Wraz ze sprawczością – pisze – poza zwykłymi zdarzeniami, przychodzi znaczenie, wartość i działanie. Więcej organizmów jest świadomych. Nie łamie to żadnych praw fizyki, jednak nie można zredukować tego do fizyki. Emergencja jest prawdziwa, a tygrys goniący gazelę jest prawdziwą częścią wszechświata”²⁵².

Podobnie Denis Noble przekonuje, że na obecnym etapie naszej eksploatacji życia, wymaga się nowego sposobu myślenia o nim. Odnosząca przez lata spektakularne sukcesy strategia redukcjonistyczna coraz bardziej odsłania swą niewystarczalność²⁵³. Brytyjski biolog opowiada się za strategią, która wymaga zupełnie innego myślenia o całości i jej częściach. „Chodzi o składanie części razem – pisze – zamiast ich rozebrania, o integrację, a nie o redukcję. Zaczyna się tym, czego nauczyliśmy się od podejścia redukcjonistycznego, a potem przechodzi dalej. Wymaga to od nas opracowania sposobów myślenia o integracji, które są tak rygorystyczne, jak nasze procedury redukcjonistyczne, ale inne. Jest to istotna zmiana, która ma znaczenie wykraczające poza czystą naukę. Oznacza to zmianę naszego myślenia, w pełnym znaczeniu tego słowa”²⁵⁴.

Do współczesnych sympatyków swoiście rozumianej i interpretowanej idei emergencji, oprócz wyżej wymienionych, zaliczyć należy między innymi Konrada Lorenza²⁵⁵. Austriacki zoolog i ornitolog używa dwóch bliskoznacznych terminów: „fulguracja” i „emergencja”. „Fulguracja” (od łac. *fulguratio* – błyskawica) oznacza akt stworzenia, a więc powstanie czegoś nowego, nieistniejącego wcześniej w jakiegokolwiek postaci, zaś „emergencja” (od łac. *emergere* – wynurzać się, wyłaniać się) – wyłanianie się czegoś,

²⁵¹ Por. S. Kauffman, *Beyond reductionism: reinventing the sacred*, „Zygon”, 4(42) (2007), s. 903.

²⁵² Tamże.

²⁵³ Por. D. Noble, *The music of life. Biology beyond genes*, Oxford University Press, Oxford 2008, s. x–xi.

²⁵⁴ Tamże, s. xi.

²⁵⁵ Por. K. Lorenz, *Odwrotna strona zwierciadła. Próba historii naturalnej ludzkiego poznania*, tłum. K. Wolicki, Państwowy Instytut Wydawniczy, Warszawa 1977, s. 74–75. Por. R. Poczobut, *Między redukcją a emergencją. Spór o miejsce umysłu w świecie fizycznym*, Wyd. Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław 2009, s. 72.

co wcześniej już jakoś istniało. Pierwszy termin w jego przekonaniu lepiej opisuje naturę procesów ewolucyjnych, gdyż oznacza proces pojawiania się całkiem nowych własności systemowych, na których to pojawienie się nic wcześniej nawet nie wskazywało. Zaproponowane przez Lorenza rozróżnienie nie zyskało większego uznania wśród biologów.

Pojęcie emergencji nie jest jednak wymysłem współczesnych autorów, jego korzenie sięgają bowiem daleko w głąb historii biologii. Na wstępie należy więc dokonać krótkiej historycznej rekonstrukcji pojęcia emergencji.

Korzeni tej koncepcji różni autorzy doszukują się już w arystotelesowskim pojęciu entelechii²⁵⁶. Badania biologiczne Arystotelesa doprowadziły go do przyjęcia wewnętrznej zasady wzrostu organizmów (entelechii), odpowiedzialnego za cechy bądź formy, które pojawiają się później²⁵⁷. Drugiego prekursora teorii emergencji niektórzy znajdują w osobie Plotyna, który doktrynę emanacji zaproponował już w III wieku naszej ery. Zgodnie z jego koncepcją cała hierarchia bytu wyłania się z Jedni w procesie emanacji.

Współczesny emergentyzm swymi korzeniami sięga przełomu XIX i XX wieku²⁵⁸. W tym czasie toczył się zażarty spór między mechaniczami a witalistami. Ruch emergentystyczny pojawił się w odpowiedzi na oczywiste problemy związane zarówno z mechanicyzmem, jak i witalizmem. Przedstawiciele tego ruchu w toczącym się sporze o naturę życia próbowali znaleźć „złoty środek”, z jednej strony odzégnując się od niedostępnej dla empirii siły życiowej, a z drugiej – w pewnym sensie – akceptując nieredukowalne cechy lub procesy zachodzące w organizmie żywym²⁵⁹. Brytyjscy zwolennicy emergentyzmu z przełomu XIX i XX wieku, chociaż nie byli pierwszymi, którzy uznawali tę koncepcję, jako pierwsi wypracowali jej kompleksowy obraz.

Pierwsza faza formowania się koncepcji emergencji miała miejsce jeszcze w XIX stuleciu i obejmowała między innymi prace angielskich myślicieli Johna Stuarta Milla i George’a Henry’ego Lewesa²⁶⁰. Myśliciele ci prze-

²⁵⁶ Por. J.A. Marcum, *The conceptual foundations...*, s. 43.

²⁵⁷ Por. P. Clayton, *Conceptual foundations of emergence theory* [w:] P. Clayton, P. Davies (eds), *The re-emergence of emergence. The emergentist hypothesis from science to religion*, Oxford University Press, Oxford 2009, s. 5.

²⁵⁸ Por. J.A. Marcum, *The conceptual foundations...*, s. 44.

²⁵⁹ Por. T. O'Connor, H.Y. Wong, *Emergent properties* [w:] *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (First published Tue Sep 24, 2002; substantive revision Wed Jun 3, 2015), E.N. Zalta (red.), <http://plato.stanford.edu/entries/properties-emergent/> (21.07.2015).

²⁶⁰ Por. A. Stephan, *Emergence – a systematic view on its historical facets* [w:] A. Beckermann, H. Flohr, J. Kim (eds), *Emergence or reduction? – Essays on the prospects*

analizowali różne przypadki tak zwanych kompozycji przyczyn (ang. *composition of causes*), składających się na różnice między emergentnymi i wynikowymi prawami i efektami (ang. *resultant laws and effects*).

Chociaż Mill nie używał słowa „emergencja”, w powszechnej opinii uznaje się go za tego, który zainicjował emergentyzm brytyjski²⁶¹. W *A system of logic* (System logiki) (1843 rok) twierdził, że niektóre właściwości fizyczne i chemiczne (na przykład właściwości wody) są nieredukowalne do swoich części składowych oraz ich właściwości ani do prostszej kombinacji tych części (właściwości wodoru i tlenu)²⁶². Podobnie jest z organizmem żywym: właściwości całości nie są prostą sumą cech poszczególnych części. Píše Mill: „Wszelkie ciała organiczne składają się z części, które są podobne do tych, z jakich składa się przyroda nieożywiona i jakie istniały w stanie nieorganicznym. Jednakże zjawiska życia, które wynikają z powiązania tych części w pewien określony sposób, nie wykazują żadnej analogii do skutków, jakie by powstały przy działaniu złożonych substancji, rozważanych jako proste czynniki fizyczne. Bez względu na to, jak nasza wiedza o własnościach różnych składników organizmu żywego będzie rozszerzana i udoskonalana, jest rzeczą pewną, że żadne proste sumowanie oddzielnych działań tych elementów nigdy nie będzie równoznaczne z poznaniem działania całego organizmu żywego”²⁶³.

Analizując takie zjawiska, Mill wprowadza pojęcie efektu heteropatycznego oraz pomocniczy termin prawa heteropatycznego²⁶⁴. Czyni to poprzez kontrastowe zestawienie dwóch trybów skojarzonego działania przyczyn, trybu „mechanicznego” i „chemicznego”. Twierdzi, że istotą trybu mechanicznego jest to, że łączny efekt wspólnego oddziaływania kilku przyczyn jest identyczny do tego, który byłby sumą rezultatów poszczególnych przyczyn, oddziałujących osobno. Nazywa tę zasadę „składaniem przyczyn”. W odróżnieniu od trybu mechanicznego, tryb chemiczny połączanego działania przyczyn charakteryzowany jest poprzez niezgodność z zasadą składa-

of nonreductive physicalism, Walter de Gruyter, Berlin–New York 1992, s. 25. Por. W. Strawiński, *Brytyjski emergentyzm*, „Przegląd Filozoficzny”, 1(41) (2002), s. 133–135.

²⁶¹ Por. J.A. Marcum, *The conceptual foundations...*, s. 44.

²⁶² Por. J.S. Mill, *System logiki dedukcyjnej i indukcyjnej*. T. I, Ks. III, Rozdz. X, § I, tłum. Cz. Znamierowski, PWN, Warszawa 1962, s. 682–685. Por. J.A. Marcum, *The conceptual foundations...*, s. 44.

²⁶³ J.S. Mill, *System logiki dedukcyjnej i indukcyjnej*. T. I, Ks. III, Rozdz. VI, § I, s. 576–577.

²⁶⁴ Por. tenże, *System logiki dedukcyjnej i indukcyjnej*. T. I, Ks. III, Rozdz. VI, § I–III, s. 574–586; Ks. III, Rozdz. X, § I–III, s. 672–704. Por. T. O'Connor, H.Y. Wong, *Emergent Properties*.

nia przyczyn: połączone działanie wielu przyczyn działających w trybie chemicznym nie jest sumą efektów przyczyn działających pojedynczo. Produkty reakcji chemicznej w żadnym sensie nie są sumą efektów indywidualnych substratów. Są to „efekty heteropatyczne”, a prawa przyczynowe, które je obejmują, są „prawami heteropatycznymi”. Prawa i efekty heteropatyczne odpowiadają klasie praw i efektów, które późniejsi brytyjscy emergentyści nazwali „emergentnymi”. Mill wierzył w istnienie praw heteropatycznych w chemii i biologii.

Po raz pierwszy termin „emergencja” został użyty przez Lewesa’a w *The problems of life and mind* (Problemy życia i umysłu) (1875 rok)²⁶⁵. Lewes twierdził, że redukcjonizm nie jest w stanie uchwycić kompletności czy też całości zjawiska i wprowadził termin „emergentny”, odnoszony do własności całości, która nie jest własnością żadnej z jej części, w odróżnieniu od mechanistycznego pojęcia „wynikowy” (ang. *resultant*), odnoszącego się do własności całości, która jest również w posiadaniu niektórych jej części²⁶⁶. Lewes pisze: „Dalej, każdy wynikowy oznacza »możliwy bez trudu do wyśledzenia w swoich częściach składowych«, ponieważ są one homogeniczne oraz współmierne. [...] Emergentny tak bardzo różni się od swoich komponentów, że stają się one niewspółmierne, nie może więc zostać zredukowany do ich sumy bądź różnicy”²⁶⁷.

Druga faza debaty nad koncepcją emergencji, która miała miejsce w latach dwudziestych XX wieku obejmuje próbę zaoferowania alternatywy zarówno dla mechanicyzmu, jak i witalizmu²⁶⁸. Zwolennicy emergentyzmu próbowali znaleźć złoty środek, odrzucając „istotę” witalistów, ale jednocześnie zaprzeczając, że wszystkie właściwości organizmów żywych można zredukować w całości do mechaniki ich elementów składowych²⁶⁹. Zgodnie z tym przekonaniem w pełni uzasadnione jest mówienie o jakości „bycia żywym”, nawet jeśli żaden pojedynczy atom organizmu nie jest żywy. Postaciami, które szczególnie przyczyniły się do rozwoju emergentyzmu w tym okresie, są: filozof Samuel Alexander, biolog Conwy

²⁶⁵ S. Zięba, *Życie. Koncepcja emergentystyczna*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 2013, s. 277.

²⁶⁶ Por. J.A. Marcum, *The conceptual foundations...*, s. 44–45. Por. M. Mahner, M. Bunge, *Foundations of biophilosophy*, Springer-Verlag, Berlin–New York 1997, s. 29.

²⁶⁷ G.H. Lewes, *The problems of life and mind. Vol. II*, James R. Osgood & Company, Boston 1875, s. 369.

²⁶⁸ Por. A. Stephan, *Emergence – a systematic view...*, s. 25. Por. W. Strawiański, *Brytyjski emergentyzm*, s. 135–139.

²⁶⁹ Por. P. Davies, *Preface* [w:] P. Clayton, P. Davies (eds), *The re-emergence of emergence*, s. x.

L. Morgan oraz filozof Charlie D. Broad. Wszyscy trzej przedstawiciele emergentyzmu brytyjskiego w swych rozważaniach nawiązują do idei Mila i Lewesa. Alexander wyłożył swoją koncepcję emergentyzmu w dziele *Space, time and deity* (Przestrzeń, czas i bóstwo) (1920 rok), będącym zapisem wygłoszonych wcześniej przez niego wykładów giffordowskich²⁷⁰. Zdaniem autora w organizmie żywym, na wyższych poziomach organizacyjnych, z pewnej liczby połączonych między sobą wewnętrznie cech, wynurzają się „nowe emergentne właściwości życia”²⁷¹. Podobne poglądy głosił Morgan w swej pracy *Emergent evolution* (Ewolucja emergentna) (1923 rok), będącej owocem jego wykładów giffordowskich. Według Morgana „emergentny” oznacza pozostający w kontraście do „mechaniczny”. Píše: „Istotną cechą mechanicznej lub jeśli to lepsze określenie, mechanistycznej interpretacji jest to, iż bierze ona pod uwagę wyłącznie efekty wynikowe, możliwe do wyliczenia w wyniku dodawania algebraicznego. Ignoruje coś więcej, co musi zostać zaakceptowane jako emergentne”²⁷².

Najbardziej dojrzałą wersję doktryny emergentyzmu brytyjskiego stworzył Broad²⁷³. W pracy *The mind and its place in nature* (Umysł i jego miejsce w naturze) (1925 rok) podaje on definicję cechy emergentnej („Cecha emergentna z grubsza to ta, która należy do kompleksu jako całości, a nie do jej części”²⁷⁴) oraz dowodzi, że swoistych cech całości nie da się wydedukować na podstawie nawet najbardziej kompletnej wiedzy dotyczącej jej elementów składowych, badanych osobno lub w innych konfiguracjach²⁷⁵. Broad jako monista uznaje, że „istnieje tylko jeden zasadniczy rodzaj tworzywa” (substancja materialna)²⁷⁶. Niemniej opowiada się za stratyfikacją rodzajów substancji („agregatami [materii] różnych rzędów”), w której różne rodzaje należą do różnych rzędów, czy też poziomów²⁷⁷. Każdy poziom charakteryzuje się pewnymi fundamentalny-

²⁷⁰ Por. J.A. Marcum, *The conceptual foundations...*, s. 45. Por. R.I. Markus, *Aleksander's philosophy; the emergence of qualities*, „Philosophy Phenomen Research”, 11(1951), s. 58.

²⁷¹ Por. S. Alexander, *Space, Time and deity*, The Humanities Press, New York 1950, s. 61–67. Por. J.A. Marcum, *The conceptual foundations...*, s. 45.

²⁷² C.L. Morgan, *Emergent evolution*, Williams & Norgate, London 1927, s. 8.

²⁷³ Por. J.A. Marcum, *The conceptual foundations...*, s. 45. Por. T. O'Connor, H.Y. Wong, *Emergent properties*.

²⁷⁴ C.D. Broad, *The mind and its place in nature*, Harcourt, Brace & Company–Taylor & Kegan Paul, Trench, Trubner, New York–London 1923, s. 23.

²⁷⁵ Por. J.A. Marcum, *The conceptual foundations...*, s. 45.

²⁷⁶ Por. C.D. Broad, *The mind and its place in nature*, s. 77.

²⁷⁷ Por. tamże, s. 77–79. Por. T. O'Connor, H.Y. Wong, *Emergent properties*.

mi, nieredukowalnymi własnościami, które wyłaniają się z własności niższego rzędu.

Pojęcie emergencji od połowy lat trzydziestych XX wieku praktycznie przestało być przedmiotem znaczących biologicznych dyskusji²⁷⁸. W następnych kilku dekadach na kategorię emergencji w swych rozważaniach wciąż jednak powoływali się pojedynczy badacze (wśród nich węgiersko-brytyjski fizyk Michael Polanyi^{279, 280}). W połowie XX wieku byliśmy świadkami spektakularnych osiągnięć w dziedzinie fizyki i biologii, w szczególności wyjaśnienia fundamentalnej struktury materii i molekularnych podstaw biologii²⁸¹. Postęp ten znacznie umocnił redukcjonistyczne podejście, wyjaśniając wiele właściwości materii w zakresie fizyki atomowej i wiele właściwości życia w kategoriach mechanizmów molekularnych²⁸². Dla wielu naukowców emergentyzm stał się wówczas w najlepszym razie nieistotnym anachronizmem, a w najgorszym – pozostałością witalizmu. Christophe Malaterre podaje kilka konkretnych powodów, dla których na kilka dziesięcioleci koncepcja emergencji znacząco straciła na znaczeniu²⁸³. Poważne przeciwności, które napotkała doktryna emergencji po swojej „złotej erze” w latach trzydziestych ubiegłego stulecia, wiązały się z ważnymi odkryciami naukowymi tego okresu: nadejściem mechaniki kwantowej oraz jednoczesnym rozwojem biologii molekularnej oraz chemii prebiotycznej.

Malaterre przypomina, że okres formułowania się mechaniki kwantowej przypada na lata dwudzieste i początek lat trzydziestych ubiegłego wieku²⁸⁴. Przeprowadzonych zostało wiele eksperymentów potwierdzających zarówno korpuskularną, jak i falową naturę światła, a mechanika kwantowa zyskała wiele potwierdzeń o charakterze eksperymentalnym. Mechanika kwantowa pozwoliła wydedukować określone właściwości chemiczne związków molekularnych z właściwości fizycznych ich atomowych elementów składowych oraz ich organizacji²⁸⁵. To właśnie w tym momencie koncepcja emergencji natrafiła na swoją pierwszą naukową przeszkodę. W roku 1927 niemieccy

²⁷⁸ Por. P. Clayton, *Conceptual foundations...*, s. 14.

²⁷⁹ Koncepcję życia węgiersko-brytyjskiego fizyka przedstawiłem i przeanalizowałem w pracy *Krótko o antyredukcjonistycznej filozofii biologii Michaela Polanyi'ego* [w:] K. Kropi-wiec, M. Szala (red.), *Nauka, filozofia, kultura...*, s. 120–131.

²⁸⁰ Por. J.A. Marcum, *The conceptual foundations...*, s. 46.

²⁸¹ Por. P. Davies, *Preface*, s. x–xi.

²⁸² Por. tamże, s. xi.

²⁸³ Por. Ch. Malaterre, *Life as an emergent phenomenon: from an alternative to vitalism to an alternative to reductionism* [w:] S. Normandin, Ch.T. Wolfe (eds), *Vitalism and the scientific image...*, s. 163.

²⁸⁴ Por. tamże.

²⁸⁵ Por. tamże.

fizycy Walter Heitler i Fritz W. London stworzyli kwantowy model cząsteczki wodoru, przewidzieli stabilizację energetyczną molekuly oraz wyjaśnili powstawanie wiązania pomiędzy dwoma atomami wodoru, tworzącymi cząsteczkę. Kilka lat później przeprowadzono pierwsze oszacowanie energii wiązania chemicznego na podstawie modelu kwantowego. W ten sposób stało się jasne, że mechanika kwantowa pozwala przewidywać właściwości chemiczne związków molekularnych w oparciu o właściwości fizyczne ich atomowych elementów składowych. Przewidywania te przemawiały przeciwko teorii emergencji – właściwości chemiczne molekuł mogły zostać wydedukowane z właściwości fizycznych atomów²⁸⁶. Zastosowanie mechaniki kwantowej w chemii zaowocowało powstaniem w połowie XX wieku nowej dyscypliny, nazwanej chemią kwantową. Metody obliczeniowe były w dalszym ciągu rozwijane oraz poprawiane²⁸⁷. Podejście Heitlera i Londona zostało rozwinięte przez amerykańskich fizyków Johna C. Slatera i Linusa Paulinga i stało się znane pod nazwą „metody wiązań walencyjnych” [ang. *Valence-Bond (VB) method*] lub „metody Heitlera-Londona-Slatera-Paulinga” [ang. *Heitler-London-Slater-Pauling (HLSP) method*]²⁸⁸. Jednocześnie powstało kolejne podejście obliczeniowe o nazwie „metoda orbitali molekularnych”, stworzone przez fizyków Friedricha Hunda i Roberta S. Mullikena. Z powodu złożoności i uciążliwości obliczeń chemicznych trzeba było czekać na wprowadzenie komputerów w latach pięćdziesiątych ubiegłego stulecia, aby możliwe stało się rozszerzenie kalkulacji kwantowych na nieco bardziej skomplikowane układy molekularne, włączając w to układy zawierające do 24 atomów. Obliczenia te nazywano „*ab initio*”, jako że prowadzone w oparciu wyłącznie o formalizm mechaniki kwantowej, wkrótce zostały uzupełnione o obliczenia „półempiryczne”, których podstawą była swoista mieszanina obliczeń czysto kwantowych oraz pomiarów empirycznych z chemii eksperymentalnej. Zastosowanie koncepcji emergencji w chemii stało się tym samym poważnie zagrożone.

Malaterre podkreśla, że kolejną przeszkodę o charakterze naukowym emergentyzm napotkał w połowie XX wieku w związku z jednoczesnym powstaniem i rozwojem biologii molekularnej i chemii prebiotycznej²⁸⁹. W roku 1953 opublikowane zostały dwa artykuły naukowe o nieocenionym znaczeniu dla chemicznych podstaw życia: jeden w czasopiśmie „Nature”, napisany przez Jamesa Watsona i Francis Cricka i dotyczący struktury

²⁸⁶ Por. tamże.

²⁸⁷ Por. tamże, s. 163–164.

²⁸⁸ Por. tamże, s. 164.

²⁸⁹ Por. tamże.

DNA, drugi – pióra Stanleya Millera – ukazał się w „Science” i dotyczył abiotycznej syntezy aminokwasów. Odkrycie struktury podwójnej helisy, z komplementarnymi parami nukleotydów, niemal natychmiast dało początek biologii molekularnej i zasugerowało możliwy mechanizm replikacji. Zasada dziedziczności (dla wielu „sekret życia”), która wydawała się być poza zasięgiem możliwości wyjaśnienia, zyskała możliwość wytłumaczenia funkcjonowania organizmów żywych oraz ich rozmnażania w odniesieniu do założeń chemii molekularnej. Dzięki poznaniu trójwymiarowej struktury molekuly DNA oraz wyjaśnieniu mechanizmów replikacji i przekazywania informacji genetycznej otworzyły się zupełnie nowe obszary badawcze dla biologów. Wraz z narodzinami biologii molekularnej ideał eksplanacyjny zjawiska życia zaczął oznaczać wyjaśnienia sformułowane na poziomie molekularnym – czyli chemicznym. Tym samym koncepcja emergencji, zgodnie z którą właściwości biologiczne nie mogą być wydedukowane z właściwości fizyczno-chemicznych, okazała się mało interesującym anachronizmem.

Jak zauważył Malaterre, od początku XIX wieku wiadano, że niektóre substancje uważane za „organiczne” (takie jak mocznik) mogą zostać otrzymane bez jakiegokolwiek udziału organizmów żywych, w wyniku syntezy składników całkowicie nieorganicznych, oraz w oparciu o prawa i reguły znane jako „chemia syntetyczna”²⁹⁰. W połowie XX wieku stało się jasne, że wiele z takich substancji organicznych, między innymi aminokwasy, może spontanicznie formować się na drodze syntezy z najbardziej podstawowych i powszechnie występujących rodzajów molekuł, takich jak woda, wodór czy amoniak (w warunkach podobnych do tych, jakie występowały na Ziemi cztery miliardy lat temu, nim pojawiło się na niej życie)²⁹¹.

Prace amerykańskiego chemika i biologa Stanleya Millera z lat pięćdziesiątych XX wieku stanowiły przełom i uznawane są za narodziny nowej dyscypliny naukowej – chemii prebiotycznej²⁹². Pod nadzorem swojego dyrektora badań, amerykańskiego chemika Harolda Ureya Miller stworzył urządzenie eksperymentalne, składające się ze szklanych kolb połączonych rurkami w obwód zamknięty. Pierwsza kolba wypełniona była wrzącą wodą i symulowała pierwotny ocean oraz jego opary, w drugiej – wyposażonej w elektrody wytwarzające wyładowania elektryczne do wnętrza gazu – znajdowała się mieszanina gazów zawierająca metan, wodór i amoniak, symulując prymitywną atmosferę, z jej burzami i błyskawicami. Po kilku dniach przepływu płynów i gazów w obwodzie z jednej kolby do drugiej

²⁹⁰ Tamże, s. 165.

²⁹¹ Por. tamże.

²⁹² Por. tamże.

urządzenie zostało zatrzymane, a zawartość płynów poddana analizie. Wyniki wskazały na zaskakującą obecność wielu związków organicznych, z których niektóre (takie jak aminokwasy) znalazły się w centrum zainteresowania biologów. Praca Millera okazała się mieć dalekosiężne wpływy. Pokazała, że proste reakcje chemiczne w warunkach abiotycznych mogą dać początek relatywnie złożonym molekułom organicznym. Eksperyment ten pozwolił na próbę akceptacji różnych scenariuszy pochodzenia życia, takich jak te zaproponowane (niezależnie od siebie) w latach dwudziestych przez rosyjskiego biochemika Aleksandra Oparina (1924 rok) i brytyjskiego biologa Johna B.S. Haldane'a (1929 rok). Scenariusze takie, wcześniej uznawane za wysoce spekulatywne, stały się obiektem programów badawczych. Od tamtego czasu obszar chemii prebiotycznej rozwinął się znacząco, razem z całą gamą dyscyplin zajmujących się pytaniem o pochodzenie życia z różnych uzupełniających się perspektyw, a mianowicie: biochemią, filogenetyką, biologią molekularną, chemią systemową, astrobiologią²⁹³. W tych nowych kierunkach badawczych wszelkie kwestie związane z naturą życia i jego pochodzeniem rozpatrywano w ścisłym powiązaniu z naukami fizyczno-chemicznymi²⁹⁴. Proponowane wyjaśnienia znacząco różniły się z tymi, które wysuwali rzecznicy emergentystycznych koncepcji życia²⁹⁵.

Pomimo poważnych przeszkód napotykanych przez tę koncepcję w obszarze nauk biologicznych, pojęcie emergencji nie wyszło całkowicie z użytku, a pod koniec ubiegłego wieku teorie te ponownie stały się wiodącym tematem dyskusji biologicznych²⁹⁶. Ich współczesne odrodzenie jest w dużej mierze wynikiem rozwoju między innymi teorii chaosu²⁹⁷. Teoria chaosu dotyczy dynamiki układów chaotycznych²⁹⁸. Układ chaotyczny, choć przestrzega praw dynamiki Newtona i tym samym jest układem deterministycznym, jest wysoce wrażliwy na warunki początkowe i to tak bardzo, że jego przyszłe zachowanie w dłuższym okresie nie może zostać przewidziane. Błędy w wiedzy o warunkach początkowych namnażają się wykładniczo, sprawiając, że przewidywanie przyszłości jest coraz mniej

²⁹³ Por. tamże, s. 175.

²⁹⁴ Por. tamże, s. 165.

²⁹⁵ Por. tamże, s. 166.

²⁹⁶ Por. P. Clayton, *Conceptual foundations...*, s. 15. Por. Ch. Malaterre, *Life as an emergent phenomenon...*, s. 170.

²⁹⁷ Por. J.A. Marcum, *The conceptual foundations...*, s. 46.

²⁹⁸ Por. A. Goswami, *The physicists' view of nature. Part 2. The quantum revolution*, Springer Science+Business Media, New York 2001, s. 252–253. Por. J.P. Crutchfield, J. Doyne Farmer, N.H. Packard, R.S. Shaw, *Chaos*, „Scientific American”, 12 (254), http://csc.ucdavis.edu/~chaos/courses/ncaso/Readings/Chaos_SciAm1986/Chaos_SciAm1986.html (15.07.2014).

dokładne. Inną ważną cechą dynamiki układów chaotycznych jest to, że działając z dala od położenia równowagi, układy te mogą wykazywać niemal cykliczne zachowania czy też wzorce form, jednak w każdej z takich form jest coś wyjątkowego (nie ma dwóch dokładnie takich samych form). Tak więc chaos mimo swej nieprzewidywalności zawiera w sobie również porządek, samoorganizację pochodzącą ze sprzężenia zwrotnego, wbudowanego w dynamikę. Aspekty te przypominają nieco właściwości organizmów żywych. Mówi się, że ekstremalna wrażliwość układów chaotycznych na warunki początkowe oraz emergencja porządku wewnątrz chaosu nadaje układom chaotycznym autonomię. Teoria chaosu staje się również odpowiednia do myślenia o ewolucji biologicznej. „Układy chaotyczne – pisze Amit Goswami – mogą osiąść w określonym porządku, oczarowane tym, co matematycy pieszczotliwie nazywają »atraktorem«. Jednak kiedy zmienia się parametr dynamiki, układ jest zdolny do wyskoczenia z basenu jednego atraktora tylko po to, by wpaść do nowego basenu nowego atraktora. Proces ten nazywany jest bifurkacją, a jego podobieństwo do ewolucji jest oczywiste. Stary porządek genetyczny załamuje się z powodu powielania błędu, mutacji. Układ wyskakuje z basenu atraktora do innego. Nowy porządek genetyczny daje początek nowym gatunkom, które zajmują swoje miejsca”²⁹⁹. Teoria chaosu wykracza także poza konwencjonalną biologię molekularną, dając lepszy opis hipostazy komórkowej, mogący obejmować również autonomię³⁰⁰. Jeśli przyjrzymy się samoorganizującym się automatom przez pryzmat teorii chaosu, to uzyskamy zachowanie, które wydaje się autonomiczne. Takie samoorganizujące się układy mogą sprawiać wrażenie autonomicznych, a autonomia jest jedną z istotnych cech życia.

Współczesne dyskusje wokół pojęcia emergencji wyrastają także na gruncie sukcesów i porażek związanych z wdrażaniem w biologii strategii redukcjonistycznej³⁰¹. Współczesne teorie zakładają, że niegdyś popularny projekt całkowitej redukcji wyjaśniającej (czyli takiej, która wyjaśniałaby zjawiska występujące w realnym świecie na gruncie obiektów i praw fizyki) jest ostatecznie niemożliwy do realizacji.

Malaterre zwraca uwagę na ciekawą okoliczność towarzyszącą ponownemu zainteresowaniu wśród naukowców koncepcją emergencji. Podkreśla mianowicie, że koncepcja ta powróciła pod koniec XX wieku w naukach, które wcześniej zapewniły jedno z pierwszych argumentów empirycznych przemawiających przeciwko niej – naukach fizykalnych³⁰². To nowe pole

²⁹⁹ A. Goswami, *The physicists' view of nature...*, s. 253.

³⁰⁰ Tamże.

³⁰¹ Por. Ch. Malaterre, *Life as an emergent phenomenon...*, s. 170.

³⁰² Por. tamże.

badawcze koncentruje się na układach złożonych, będących układami fizycznymi, a w ich przypadku uważa się, że ich cechy charakterystyczne skutkują niemożnością rozróżnienia podstawowych elementów składowych układu, bądź niemożnością opisaną relacji pomiędzy nimi w zwięzły sposób. Przykłady paradygmatyczne obejmują płyny, które (w określonych warunkach) dają początek zjawiskom niestabilności bądź turbulencji, takim jak pojawienie się cieplnych komórek konwekcyjnych Rayleigha-Bénarda w ogrzanej płynie bądź podobnych zjawisk w nieliniowych układach optycznych, między innymi w laserach. Inne przykłady obejmują układy chemiczne, które dają początek zaskakującym zjawiskom, takim jak tworzenie czoła fali reakcja-dyfuzja (jak ma to miejsce w dwuwymiarowym zjawisku chemicznym Biełousowa-Żabotyńskiego). Ponieważ koncepcja emergencji w założeniu ma mieć zastosowanie do układów wykazujących szerokie właściwości, uznawane za nowe i nieoczekiwane w porównaniu z właściwościami ich elementów składowych, w sposób idealny charakteryzuje ona zaskakujące właściwości układów złożonych³⁰³. Nowe pole badań nad układami złożonymi niezwykle często wykorzystuje koncepcję emergencji. Chociaż powstają coraz bardziej skomplikowane modele obliczeniowe (w celu rozliczania takich nagle pojawiających się właściwości czy przejść fazowych), to wielu badaczy określa takie zjawiska mianem „emergentnych”. Jest tak szczególnie w przypadku złożonych sieci formalnych specyficznych układów chaotycznych, zarządzanych przez skomplikowane atraktory, bądź poszczególnych cech automatów komórkowych, takich jak „szybowce” w „grze o życie” angielskiego matematyka Johna Conwaya czy stada ptaków w „algorytmie stada” amerykańskiego informatyka Craiga Reynoldsa.

Malaterre podkreśla, że z polem badań nad układami złożonymi powiązane jest, szczególnie poprzez perspektywy obliczeniowe, pole „sztucznego życia” (nazywane w skrócie *ALife*)³⁰⁴. Sztuczne życie to kolejny obszar, w którym koncepcja emergencji jest często wykorzystywana. Koncepcja ta jest centralnym elementem w tym obszarze badawczym, jako że właściwości przypominające życie wykazywane przez programy komputerowe, maszyny lub nawet układy fizyczno-chemiczne są niezwykle często etykietowane jako „emergentne”. Idea leżąca u podstaw sztucznego życia jest taka, że badanie jego kluczowych właściwości i ich przejawów w układach początkowo pozbawionych życia, może być prowadzone niezależnie od węglowo-organicznego budulca, formującego podstawy życia na Ziemi. Stąd też jed-

³⁰³ Por. tamże, s. 171.

³⁰⁴ Por. tamże. Sztuczemu życiu poświęciłem osobną pracę (*Czy możliwe jest sztuczne życie?*, „Studia Sandomierskie”, 20 (2013), s. 191–208).

nym z podstawowych celów tej dyscypliny jest identyfikacja uniwersalnych praw dotyczących sztucznego życia, które istnieje na przecięciu kilku strumieni badawczych, w tym studiów nad samobudową i samoorganizacją, wzrostem i rozwojem, dynamiką ewolucyjną i ekologiczną, a nawet ewolucją społeczną i kulturową. Tego rodzaju ścieżki badawcze polegają w znacznej mierze na modelach i symulacjach, z których niektóre wykazywać mogą pewne nieoczekiwane i zaskakujące właściwości: pojawienie się cech przypominających życie (takich jak reprodukcja, ewolucja, wzrost, rozwój), pojawienie się form strukturalnych, uzewnętrznienie nagłej zmiany z rodzaju zjawisk przejścia fazowego oraz wiele innych. Tym samym koncepcja emergencji wydaje się idealnie dopasowana do takiej nowości, niespodziewanego charakteru i nieprzewidywalności takich właściwości.

Zasadne będzie zatrzymanie się na definicji emergencji i podstawowych kategoriach emergentyzmu. Okazuje się bowiem, że w literaturze przedmiotu można spotkać wiele określeń i kategorii emergencji.

Cel współczesnych emergentystów jest taki sam jak ten, który reprezentowały wcześniejsze pokolenia emergentystów, to znaczy znalezienie podejścia, które pozwoli na uniknięcie zarówno Scylli witalizmu, jak i Charybdy mechanicyzmu (redukcjonizmu)³⁰⁵. Chociaż nie istnieje żadna uzgodniona definicja współczesnego pojęcia emergencji, w literaturze dostępnych jest wiele jej określeń. Na przykład Henri Atlan przez pojęcie emergencji rozumie nie tylko to, że całość jest więcej niż sumą swoich części, ale także, że właściwości sumaryczne (strukturalne i funkcjonalne) są jakościowo różne i nie można ich przewidzieć w pełnej szczegółowości na podstawie właściwości indywidualnych składników³⁰⁶. Z kolei Pier L. Luisi pisze: „Termin »emergencja« opisuje pojawienie się nowych właściwości, które powstają, gdy wyższy poziom złożoności zostaje utworzony na bazie komponentów o mniejszej złożoności, gdzie właściwości te nie są pierwotnie obecne»³⁰⁷. Zdaniem tego autora na każdym poziomie coraz większej złożoności przechodzącej od atomów/molekuł do całego organizmu istnieją nowe właściwości, których nie można opisać na podstawie niższych części składowych, a tym samym właściwości organizmu żywego nie można interpretować w oparciu o atomy i cząsteczki³⁰⁸. Luisi objaśnia definicję emergencji, od-

³⁰⁵ Por. J.A. Marcum, *The conceptual foundations...*, s. 46.

³⁰⁶ Por. H. Atlan, *Intentional self-organization: emergence and reduction. Toward a physical theory of intentionality* [w:] S. Geroulanos, T. Meyers (eds), *Henri Atlan. Selected writings. On self-organization, philosophy, bioethics, and Judaism*, Fordham University Press, New York 2011, s. 69.

³⁰⁷ Por. P.L. Luisi, *The emergence of life...*, s. 112.

³⁰⁸ Por. tamże, s. 119.

wołując się do konkretnego przykładu: „Przechodząc do bardziej złożonej struktury chemicznej, takiej jak mioglobina, specyficzne właściwości wiązaniowe wobec grupy hemowej oczywiście nie występują w postaci pojedynczych aminokwasów – wiązaniowa specyfika jest właściwością emergentną konkretnego zespołu cząsteczek. Przechodząc od mioglobiny do hemoglobiny, natrafiamy na wyższy poziom struktury hierarchicznej, gdzie hemoglobinę tworzą cztery łańcuchy, przy czym każdy z nich jest bardzo podobny do łańcucha mioglobiny. W tym przypadku z tego zespołu powstaje nowa jakość, przy czym wiązanie tlenu z mioglobiną przynosi normalną hiperboliczną krzywą nasycenia (na przykładzie hemoglobiny ssaków wiążącym izotermem jest sigmoid). Odchylenie to stanowi podstawę funkcji oddychania u ssaków i jest wynikiem współpracy czterech łańcuchów w hemoglobinie, co można postrzegać jako własność emergentną powstającą z interakcji tych czterech łańcuchów”³⁰⁹.

Luisi podaje także inne przykłady, gdzie wzrostowi złożoności towarzyszy wystąpienie wyrafinowanych właściwości emergentnych. Jednym z nich jest „*quorum sensing*” (dosł. „wyczuwanie kworum”) ³¹⁰. Jest to komórkowy, zależny od zagęszczenia, mechanizm sygnalizacyjny stosowany przez wiele gatunków bakterii. Powyżej pewnego progu zagęszczenia komórek w kolonii pojawiają się nowe kolektywne właściwości, które nie są obecne w komórkach o niższym zagęszczeniu. „*Quorum sensing*” kontroluje wiele ważnych funkcji w różnych gatunkach bakterii, w tym produkcję czynników wirulencyjnych i formację błony biologicznej, a także zdolność do kolonizacji wyższych organizmów, na przykład *Pseudomonas aeruginosa*, jak również pojawienie się bioluminescencji u *Vibrio fischeri*. Jest to zasadniczo międzykomórkowy system sygnalizacji oparty na produkcji specjalnych cząsteczek aktywujących geny, które z kolei wytwarzają specjalne białka. „Uważam za szczególnie fascynujące – pisze Luisi – wyłonienie się bioluminescencji u *v. fischeri* powyżej pewnego progu zagęszczenia komórek, stosowane jako mechanizm rozpoznawczy dla członków tych samych gatunków, które sprzyjają grupowaniu i parowaniu. Co jednak dziwne, zjawisko to zwykle nie jest uwzględniane w kontekście emergencji lub złożoności, mimo że po raz kolejny mowa jest tu o pojawieniu się właściwości zbiorowych, wynikających – w tym przypadku – z wyraźnego sygnału chemicznego. We wszystkich tych przypadkach regularne schematy samoorganizacji są realizowane bez zewnętrznie narzuconych reguł. Istnieją złożone wzory samoorganizacji, ale miejscowe ośrodki organizacyjne

³⁰⁹ Tamże, s. 114.

³¹⁰ Por. tamże, s. 124.

nie mogą być ustanowione w żadnym miejscu”³¹¹. Inne przykłady własności emergentnych to:

- dopasowanie antykodonów i aminokwasów przez enzymy syntetazy aminoacylo-tRNA pojawiające się u pierwszych form życia,
- ujemne sprzężenie zwrotne w inhibicji produktu końcowego, po raz pierwszy występujące u mikroorganizmów,
- pamięć u zwierząt,
- apikalne komórki u roślin³¹².

Emergentyści utrzymują, że nowe właściwości są przy tym w odniesieniu do nich innowacyjne i nieredukowalne (nie są obecne w odrębnych elementach układu)³¹³. Innymi słowy, kiedy procesy sięgają pewnego konkretnego poziomu kompleksowości strukturalnej, pojawiają się właściwości zupełnie nowe, takie które wcześniej nie istniały³¹⁴. Właściwości te nazywamy własnościami emergentnymi, a charakteryzują one agregaty strukturalne. Nie są one jedynie „wynikowymi”, to jest addatywnymi kombinacjami składników. James A. Marcum wyjaśnia je w następujący sposób: „właściwość wyższego rzędu złożonego przedmiotu (*E1*) jest emergentna, jeśli jest możliwe do wyobrażenia, że inny złożony przedmiot (*E2*) może być pozbawiony tej nowej właściwości, nawet jeśli *E2* jest zbudowany z tych samych części, co *E1* i nawet jeśli części te tworzą taką samą strukturę, jak w przypadku *E1*”³¹⁵. Życie jest często traktowane jako klasyczny przykład zjawiska emergentnego: żaden z atomów w ciele nie jest żywy, lecz mimo to całe ciało jest żywe³¹⁶. Organizmy biologiczne są uzależnione od procesów zachodzących w ich częściach składowych, jednak wykazują względem nich pewien stopień autonomii.

Choć poszczególne terminy czy sformułowania różnią się znacząco między sobą, badacze zgadzają się zazwyczaj, że dwudziestowieczne teorie

³¹¹ Tamże, s. 124.

³¹² Por. R.W. Korn, *The emergence principle in biological hierarchies*, „Biology and Philosophy”, 1(20) (2005), s. 137.

³¹³ Por. T. O'Connor, H.Y. Wong, *Emergent properties*. Por. S. Zięba, *Emergentyzm* [w:] A. Maryniarczyk (red.), *Powszechna encyklopedia filozofii*, t. VIII, Polskie Towarzystwo Tomasza z Akwinu, Lublin 2007, s. 133. Por. A. Urbanek, *Emergentyzm* [w:] Z. Cackowski, J. Kmita, K. Szaniawski, P.J. Smoczyński (red.), *Filozofia a nauka. Zarys encyklopedyczny*, Ossolineum, Warszawa 1987, s. 141. Por. R. Poczobut, *System – struktura – emergencja* [w:] M. Heller, J. Mączka (red.), *Struktura i emergencja*, PAU–OBI–Biblos, Kraków–Tarnów 2006, s. 14. Por. P.C.W. Davies, *Emergent biological principles and the computational properties of the universe*, „Complexity”, 2(10) (2004), s. 11.

³¹⁴ Por. O. Markič, *Causal emergentism*, „Acta Analytica”, 19(33) (2004), s. 69.

³¹⁵ Por. J.A. Marcum, *The conceptual foundations...*, s. 46.

³¹⁶ Por. P.C.W. Davies, *Emergent biological principles...*, s. 11.

emergencji można podzielić na dwie zasadnicze kategorie: „słabe” i „silne”³¹⁷. Philip W. Clayton dodaje, że przymiotniki „słabe”/„silne” odnoszą się do stopnia emergencji, a nie do jakości rzeczowej samego stanowiska. Układ „silnie” emergentny to taki, w którym wyższe poziomy złożoności mają siły przyczynowe nieobecne w jego częściach składowych³¹⁸. Oznacza to, że całości mogą wykazywać własności i prawa, których nie można zredukować do skumulowanego efektu własności i praw poszczególnych elementów. „Silne” teorie emergencji utrzymują, że w toku historii ewolucyjnej wytwarzają się całkowicie nowe czynniki bądź procesy przyczynowe³¹⁹. Implikacją „silnej” emergencji jest „przyczynowość odgórna”, czyli taka, gdzie całości przyczynowo wpływają na części³²⁰. „Silni” emergentyści postrzegają świat fizyczny jako w całości składający się ze struktur fizycznych, prostych lub złożonych³²¹. Jednak struktury złożone nie są zawsze po prostu agregatami jednostek, istnieją bowiem warstwowo ułożone strefy czy też poziomy obiektów, opierające się na ich rosnącej kompleksowości. Każda nowa warstwa jest konsekwencją wystąpienia zakresu interakcji „nowych właściwości”. Nowość ich nie jest też całkowicie czasowa, nie jest to też pierwszy przypadek konkretnie określonej cechy spośród znanych cech możliwych do określenia. Jest to natomiast zupełnie nowy, fundamentalny typ właściwości, typ „niestukturalny” w tym sensie, że wystąpienie właściwości nie jest w żadnym stopniu powiązane z wystąpieniem własności bardziej fundamentalnych oraz związków pomiędzy poszczególnymi częściami obiektu. Co więcej, nowość własności w tym znaczeniu pociąga za sobą nowe, pierwotne siły, odzwierciedlane w prawach, które łączą złożone struktury fizyczne z cechami emergentnymi. Innymi słowy, własność emergentna całości jest niewytłumaczalna, to znaczy nie można jej wywnioskować z właściwości części tej całości³²². „Silne” koncepcje emergencji wśród emergentystów brytyjskich prezentowali Mill i Broad³²³.

Z kolei obrońcy „słabej” emergencji stoją na stanowisku, że pomimo wyłonienia się w toku historii zupełnie nowych wzorców, fundamentalne procesy przyczynowe ostatecznie i w dalszym ciągu mają charakter fizyczny³²⁴. Większość podobnych, popularnych obecnie koncepcji emergencji

³¹⁷ Por. P. Clayton, *Conceptual foundations...*, s. 7.

³¹⁸ Por. P.C.W. Davies, *Emergent biological principles...*, s. 11.

³¹⁹ Por. P. Clayton, *Conceptual foundations...*, s. 7.

³²⁰ Por. P.C.W. Davies, *Emergent biological principles...*, s. 11.

³²¹ Por. T. O'Connor, H.Y. Wong, *Emergent properties*.

³²² Por. P.L. Luisi, *The emergence of life...*, s. 118.

³²³ Por. T. O'Connor, H.Y. Wong, *Emergent properties*.

³²⁴ Por. P. Clayton, *Conceptual foundations...*, s. 7.

wywodzi się raczej od poglądów Alexandra³²⁵. Zwolennicy „słabej” emergencji przyjmują, że mogą występować różne rodzaje interakcji przyczynowych w celu zdominowania wyższych poziomów rzeczywistości³²⁶. Podkreślają jednakże przy tym, że nasza niezdolność do rozpoznania w tych wyłaniających się wzorcach nowych przejawów tych samych fundamentalnych procesów jest w dużej mierze wynikiem ograniczeń ludzkiej wiedzy w odniesieniu do układów złożonych – technicznych trudności takich, jak brak mocy obliczeniowej, lub niedostatecznego poziomu zaawansowania ludzkich umiejętności. Paul Davies precyzuje, że układ „słaboemergentny” to taki, w którym dynamika przyczynowa całości jest całkowicie określana przez dynamikę przyczynową części, jednak nie można przewidzieć dla niej kompletnych i szczegółowych zachowań bez efektywnego przeprowadzenia symulacji jeden do jednego³²⁷. Tak więc: układ „słaboemergentny” to taki, który nie ma żadnych „skrótów” „wyjaśnieniowych” ani skróconych opisów i dlatego jest algorytmicznie niezrozumiały. Najszybszym symulatorem układu jest jego własna dynamika. W takich teoriach emergencja jest zasadniczo kategorią epistemologiczną, nie ontologiczną³²⁸. Z tego też powodu „słabą” emergencję nazywa się emergencją „epistemologiczną”³²⁹. Dwoma najbardziej powszechnymi jej wersjami są³³⁰:

- emergencja predykcijna: właściwości emergentne są cechami systemowymi układów kompleksowych, których nie można przewidzieć w stadium przedemergentnym pomimo dogłębnej wiedzy dotyczącej cech poszczególnych części oraz rządzących nimi praw,
- emergencja nieredukowalnego wzorca: właściwości i prawa emergentne są cechami systemowymi układów złożonych, którymi rządzą prawdziwe uogólnienia przypominające prawa wyrażone w obrębie nauki specjalistycznej, które nie mogą zostać zredukowane do fundamentalnych teorii fizycznych ze względów konceptualnych (makroskopowe wzorce nie mogą zostać ujęte w zakresie koncepcji i dynamiki fizyki)³³¹.

Clayton zauważa, że pomiędzy „silną” i „słabą” emergencją jest bardzo szeroka luka, która dotyczy zarówno motywacji stosowanych w obu tych koncepcjach, jak i argumentacji wykorzystywanej na jej poparcie, co czasami

³²⁵ Por. T. O'Connor, H.Y. Wong, *Emergent properties*.

³²⁶ Por. P. Clayton, *Conceptual foundations...*, s. 7.

³²⁷ Por. P.C.W. Davies, *Emergent biological principles...*, s. 11.

³²⁸ Por. T. O'Connor, H.Y. Wong, *Emergent properties*. Por. P.L. Luisi, *The emergence of life...*, s. 118.

³²⁹ Por. P. Clayton, *Conceptual foundations...*, s. 7.

³³⁰ Por. T. O'Connor, H.Y. Wong, *Emergent properties*.

³³¹ Por. P.C.W. Davies, *Emergent biological principles...*, s. 11.

powoduje wrażenie ich zupełnie niewspółmierności³³². Z kolei Luisi podkreśla, że częściej niż rzadziej „słaba” emergencja jest nierozróżnialna od „silnej” emergencji. Píše: „Osobiście uważam, że rozróżnienie kwestii zasady (»silna« emergencja) i kwestii praktycznych trudności (»słaba« emergencja) nie zawsze jest możliwe, a może i nie zawsze ma sens. Weźmy przypadek mioglobiny i jej 143 reszt aminokwasowych. Czy właściwości mioglobiny można przewidzieć na podstawie właściwości dwudziestu aminokwasów? Istnieje 20 143 możliwości zbudowania łańcucha ze 143 reszt. Składające i następnie wiążące właściwości każdej z tych różnych sekwencji można by obliczyć, a zatem i przewidzieć, z tym że zajęłoby to miliardy lat – pomijając fakt, że tak naprawdę nie wiemy do końca, jak dokonać takich rachunków. W związku z tym nie chodzi wyłącznie o czas, ale także o nasze ograniczenia intelektualne. Czy niemożność przewidzenia właściwości mioglobiny jest więc kwestią zasady (»silna« emergencja), czy raczej kwestią praktycznej niemożności (»słaba« emergencja)? Wierzę, że nie można dokonać takiego rozróżnienia w jednoznaczny sposób”³³³. W związku z powyższym autor uważa, że w ten sposób możemy również zaakceptować ideę „silnej” emergencji, jeśli sprecyzuje się, że nie implikuje ona występowania tajemniczych sił, lecz po prostu odzwierciedla granice naszych ludzkich możliwości³³⁴.

Lynn J. Rothschild wymienia jeszcze jedną kategorię, którą nazywa emergencją pragmatyczną³³⁵. Autor ten twierdzi, że emergencja może uzyskać bardziej praktyczne zastosowanie. Emergentyzm pragmatyczny oznacza strategię badawczą, wykorzystywaną w badaniach biologicznych, która może okazać się o wiele skuteczniejsza od podejścia redukcjonistycznego. „Tak więc – pisze Rothschild – gdy redukcjoniści skupiają się na poszczególnych elementach, interaktywne aspekty i – co ważniejsze – znaczenie powstałego procesu na poziomie układu wypadają z rachuby. Biologia traci swoją przejrzystość bez zrozumienia interakcji, sprzężeń zwrotnych, historii, statystyk i innych podobnych zjawisk”³³⁶.

W opinii autora koncepcja emergencji ma kluczowe znaczenie przy rozpatrywaniu najbardziej fundamentalnego w biologii pytania: co to jest życie?³³⁷ Nie ma on wątpliwości, że z punktu widzenia biologii życia nie można pojmować jako jedynie sumy reakcji chemicznych. „Niewykluczone, że

³³² Por. P. Clayton, *Conceptual foundations...*, s. 7.

³³³ P.L. Luisi, *The emergence of life...*, s. 118.

³³⁴ Por. tamże, s. 119.

³³⁵ Por. L.J. Rothschild, *The role of emergence in biology* [w:] P. Clayton, P. Davies (eds), *The re-emergence of emergence...*, s. 162.

³³⁶ Tamże, s. 164.

³³⁷ Por. tamże.

życie – pisze – to nic więcej jak suma reakcji chemicznych – stanowisko aż za dobrze znane z zajęć biochemii. Na poziomie materialnym – czemu by nie. Jednak postęp w naukach biomedycznych znacząco straciłby na rozmachu, jeśli każde pytanie rozpatrywane byłoby wyłącznie na poziomie biochemicznym. Biologia zależy od traktowania wielu właściwości jako emergentnych wyłącznie dlatego, że na dzień dzisiejszy takie pytania są bardziej przystępne. Tak czy owak, znaczenie życia jest całkowicie odmienne od poszczególnych reakcji chemicznych, co sugeruje, że życie nigdy nie będzie mogło być zrozumiane jedynie z perspektywy redukcjonistycznej”³³⁸.

Rothschild podaje przykładową listę zjawisk emergentnych: pochodzenie samoreplikacji, pochodzenie ścieżek metabolicznych, pochodzenie życia, pochodzenie i natura płci, pochodzenie komórek eukariotycznych, pochodzenie organizmów wielokomórkowych, poziomy selekcji, egzaptacje, funkcje biologiczne, zachowanie, *fitness*³³⁹. „Mimo że każdy przypadek traktowany w biologii jako emergentny może tracić tę właściwość w ujęciu filozoficznym – konkluduje – emergencja pragmatyczna może być najbardziej bezpośrednią ścieżką do naukowego oświecenia”³⁴⁰.

Jakie są cechy współczesnego emergentyzmu? Autorzy na podstawie różnych definicji emergencji proponują i wyliczają cały ich zestaw. Oto niektóre z nich, szczególnie popularne we współczesnej literaturze³⁴¹.

1. Ważną cechą współczesnego emergentyzmu jest naturalizm. Oznacza to, że jedynie czynniki naturalne odgrywają rolę przyczynową w rozmaitych zjawiskach zachodzących w organizmie żywym. Nie ma w nich żadnych sił nadnaturalnych ani przedmiotów. Ta cecha odróżnia emergentyzm od witalizmu.
2. Kolejną cechą jest nowość, bardzo często wyrażana za pomocą twierdzenia, że cechy emergentne nie mogą zostać wyjaśnione bądź wyprowadzone od właściwości bardziej podstawowych. Emergenty mają cechy, które nie były obserwowane wcześniej w złożonym układzie i nie jest możliwe ich przewidzenie, zanim faktycznie się nie ujawnią. Gdy agregaty cząstek materii osiągają odpowiedni poziom złożoności organizacyjnej, w układach pojawiają się nowe jakości. Nowe nieprzewidziane właściwości mogą wynikać z utworzenia złożoności. To, że nie możemy przewidzieć nowych, emergentnych właściwości, oznacza również, iż istnieć może ogromny ar-

³³⁸ Tamże, s. 162.

³³⁹ Por. tamże, s. 163.

³⁴⁰ Tamże, s. 164.

³⁴¹ Por. tamże, s. 47, 50–51. Por. P. Clayton, *Conceptual foundations...*, s. 2. Por. R.C. Richardson, A. Stephan, *Emergence*, „Biological Theory”, 1(2) (2007), s. 92–94. Por. P.L. Luisi, *The emergence of life...*, s. 117–127.

senal nieprzewidywalnych właściwości mogących wyłaniać się w wyniku nieoczekiwanego zestawienia elementów składowych.

3. Emergent jest właściwością systemową, która jest nieredukowalna, niededukowalna i dynamiczna. Z właściwością systemową mamy do czynienia wtedy, kiedy układ ma tę właściwość, jednak nie ma jej żadna z części tego układu. Właściwość systemowa jest też niededukowalna – brak jest możliwości wydedukowania zasad organizacyjnych z leżących u ich podstaw praw fizycznych. Wreszcie, właściwość systemowa jest dynamiczna, gdyż wraz z upływem czasu ewoluuje i rozwija się.
4. Inną cechą emergentyzmu jest organizacja hierarchiczna układów. Odnosi się ona do segmentacji zjawisk naturalnych na niższe (*micro*) i wyższe (*macro*) poziomy organizacji. Emergeny pojawiają się podczas przemieszczania w górę hierarchii, od poziomów niższych ku wyższym.
5. Ważną cechą emergentyzmu jest także interakcja między przedmiotami poziomu wyższego a przedmiotami poziomu niższego, przybierająca postać tak zwanej przyczynowości skierowanej w dół (ang. *downward causation*). Jednostki wyższego rzędu przyczynowo wpływają na swoje elementy znajdujące się na niższym poziomie. Innymi słowy, w rozwoju właściwości emergentnych bierze udział odgórny strumień przyczynowości. Oznacza to, że wyższy poziom hierarchiczny wpływa na właściwości niższych elementów.
6. W celu wyjaśnienia interakcji między komponentami oraz właściwościami układu, emergentyści korzystają z pojęcia synergii. Właściwości wyższego poziomu nie są ulokowane w układzie w częściach, w ich sumie czy też w relacjach przestrzennych między nimi. Wzorce są powodowane przez coś innego niż siły działające w częściach. Innymi słowy, synergia to dwa połączone skutki, będące produktem dwóch lub więcej elementów, części lub organizmów, które nie mogłyby zostać osiągnięte w inny sposób. Właściwości emergentne komórek są wynikiem interakcji synergistycznych pomiędzy komponentami molekularnymi a unikalną strukturą komórkową. Interakcje synergistyczne są odpowiedzialne za struktury wyższego poziomu, wykazujące przyczynowość skierowaną w dół.
7. Życie samo w sobie może być postrzegane jako właściwość emergentna. Składniki jednokomórkowe (na przykład DNA, białka, cukry, lipidy, witaminy) lub nawet organelle komórkowe (na przykład liposomy, rybosomy) same w sobie są substancjami nieożywionymi. Z tych struktur nieożywionych po zdefiniowaniu organizacji przestrzenno-czasowej powstaje życie komórkowe. Założenie, że życie jest własnością emergentną, nadaje temu pojęciu szczególne znaczenie. Żadna siła transcendentna nie jest przywoływana jako „iskra życiowa”.

Koncepcja emergencji w biologii została poddana szerokiej dyskusji i równie szeroko była krytykowana. „Silny” emergentyzm, zakładający, że zasady na poziomie mikroskopowym najczęściej nie są przydatne do opisu zachowania układu jako całości, jest stanowiskiem dużo bardziej kontrowersyjnym aniżeli jego słaba wersja. Nie ulega wątpliwości, że większość naukowców nie będzie spierać się z twierdzeniem, że życie jest przynajmniej „słaboemergentnym” zjawiskiem. Tego samego nie można powiedzieć o „silnej emergencji”, którą najczęściej odrzuca się jako niezgodną z właściwościami przyczynowymi mikroświata³⁴². Uważa się, że normalne prawa fizyki działające na poziomie mikroskopowym całkowicie wystarczają do określania zachowań układu i tym samym „nie ma na dole miejsca” dla dodatkowych praw biotonicznych lub zasad organizacji, mogących realizować przyczynowość odgórną na częściach. Krytycy „silnego” emergentyzmu twierdzą, że nie istnieją możliwe do utrzymania argumenty na poparcie tezy o istnieniu cech emergentnych, które nie byłyby podatne na wyjaśnienia redukcyjne³⁴³. Istotne elementy wyjaśnienia całości wyższego rzędu zawsze mogą zostać opisane w odniesieniu do warunków molekularnych poziomu niższego. Do współczesnych krytyków „silnego” emergentyzmu zaliczyć można między innymi Nilsa Roll-Hansena, Philipa Claytona i Tudora M. Baetu.

Nils Roll-Hansen przekonuje, że jeśli zinterpretujemy „cechy” substancji chemicznej jako wyłączenie te, które widać, to argumenty emergentystów nie mają żadnego sensu³⁴⁴. „Z obserwacji tlenu i wodoru – pisze – nie możemy powiedzieć nic o cechach wody”³⁴⁵. Innym, powiązaniem – jak twierdzi Roll-Hansen – źródłem dogmatycznych twierdzeń emergentystów jest zbyt sceptycyzm, który prowadzi ich do łączenia niekompletnej lub błędnej wiedzy z niewiedzą. „Istnieje zawsze prawdopodobieństwo – pisze – że pierwiastek w nowych warunkach wykaże właściwości nieprzewidywalne, ale nie wyklucza to faktu, że wiele z potencjalnych właściwości można z powodzeniem przewidzieć”³⁴⁶.

W swej krytyce „silnej” wersji emergentyzmu Philip Clayton podkreśla, że emergencja może być interesująca tylko o tyle, o ile akceptuje zasadę ekonomii myślenia (sformułowaną pierwotnie przez Williama Ockhama), wprowadzając nie więcej superstruktur metafizycznych, niż wymagają tego

³⁴² Por. P.C.W. Davies, *Emergent biological principles...*, s. 11–12.

³⁴³ Por. T.M. Baetu, *Emergence, therefore antireductionism? A critique of emergent antireductionism*, „Biology and Philosophy”, 27 (2012), s. 435.

³⁴⁴ Por. N. Roll-Hansen, *E.S. Russell and J.H. Woodger...*, s. 405.

³⁴⁵ Tamże.

³⁴⁶ Tamże.

dane same w sobie³⁴⁷. Tymczasem, wprowadzanie poziomów emergentnych jako produkujących nowe substancje oznacza nadanie najsilniejszego możliwego statusu ontologicznego całościom w odniesieniu do ich części³⁴⁸. Strategia odwołująca się do substancji emergentnych kłóci się z monizmem, którego broni Clayton. „Tak długo – pisze – jak każdy z kompleksów relacyjnych wykazuje właściwości unikalne bądź moc przyczynową, nie trzeba się opierać na wątpliwych koncepcjach substancji, aby go opisać”³⁴⁹. Zdaniem przywoływanego autora teoria emergencji, która miałaby być przydatna w spekulacjach naukowych, powinna akceptować jakąś formę zasady ekonomii myślenia: przedmioty i poziomy emergentne nie powinny być mnożone bez potrzeby³⁵⁰.

Tudor M. Baetu nie zgadza się, by twierdzenie, że całości molekularne charakteryzują się właściwościami emergentnymi miało jednoznacznie wspierać antyredukcjonizm (całości w biologii charakteryzują się właściwościami emergentnymi, których nie stwierdza się na poziomie ich molekularnych składników i z tego powodu mogą być zrozumiane poprzez odwołanie się do zasobów wyjaśnień nauk, mających zastosowanie w odniesieniu do przedmiotów wyższego rzędu, w tym przypadku do embriologii i biologii rozwojowej)³⁵¹. W odróżnieniu od redukjonistów Baetu nie dyskutuje z faktem, że w naukach biologicznych istnieją właściwości emergentne, i nie argumentuje, że wszystkie (albo przynajmniej większość) zjawiska biologiczne są najlepiej wyjaśniane z perspektywy molekularnej³⁵². Twierdzi, że przykłady emergencji w naukach biologicznych nie wspierają twierdzeń antyredukjonistycznych, iż właściwości emergentne mogą być zrozumiane jedynie z perspektywy koncepcji, teorii i wyjaśnień, dotyczących przedmiotów wyższego rzędu. Przekonuje, że nie ma związku opartego na logicznym wnioskowaniu pomiędzy pojęciem emergencji a doktryną antyredukcjonizmu. Dla tego autora emergencja i antyredukcjonizm w biologii są dwiema odrębnymi kwestiami³⁵³. „Zgadzam się, że przynajmniej na płaszczyźnie epistemologicznej – konkluduje – wiele całości w sensie biologicznym jest charakteryzowanych przez właściwości emergentne i że konieczny jest szerszy kontekst w celu zrozumienia tych właściwości. Zgadzam się również, że nie wszystkie zjawiska biologiczne są wyjaśniane w sposób najlepszy za

³⁴⁷ Por. P. Clayton, *Conceptual foundations...*, s. 12.

³⁴⁸ Por. tamże, s. 13.

³⁴⁹ Tamże.

³⁵⁰ Por. tamże, s. 14.

³⁵¹ Por. T.M. Baetu, *Emergence, therefore antireductionism?*..., s. 433, 435.

³⁵² Por. tamże, s. 435.

³⁵³ Por. tamże, s. 436.

pomocą wyjaśnień o charakterze molekularnym bądź ogólnie wyjaśnień niższego rzędu. Nie jest jednak jasne dlaczego i w jaki sposób te właściwości emergentne mogą być zrozumiane jedynie z perspektywy wyższych przedmiotów, koncepcji, teorii i wyjaśnień. Jestem przeciwny stosowaniu niejednoznacznego terminu »poziom molekularny« [...], brakowi rygorystycznego podziału na przewidywania i wyjaśnienia [...], pomieszaniu »całości wyższego rzędu« z »przedmiotami wyższego rzędu« [...], nieuwzględnieniu wyjaśnień mechanistycznych, które dotyczą całości, jednak nie odnoszą się do przedmiotów wyższego rzędu [...], oraz nie doceniają wagi i znaczenia opisów funkcjonalnych kontekstów molekularnych”³⁵⁴.

* * *

Podsumowując i akcentując najważniejsze treści niniejszego rozdziału, należy podkreślić, że toczące się od niepamiętnych czasów dyskusje dotyczące wyjaśnienia fenomenu życia mieszczą się w ramach stanowisk mechanistyczno-redukcyjnych i pozaredukcyjnych. W pierwszej części zostały omówione poglądy mechanistów i redukjonistów, w drugiej stanowiska witalistów, organicystów i emergentystów. Chociaż w swych detalach konkurujące ze sobą stanowiska wraz z rozwojem zarówno biologii (od czysto opisowej nauki, ograniczającej się do zbierania opisów roślin i zwierząt, poprzez badania żywych komórek i analizę chemiczną makromolekuł organicznych – możliwe dzięki odkryciu mikroskopu – aż do współczesnej, bardziej przypominającej nauki ścisłej, biologii molekularnej z jej spektakularnymi odkryciami struktury DNA, genomu i kodu genetycznego), jak również fizyki (od dziewiętnastowiecznej, skrajnie deterministycznej mechaniki klasycznej badającej prawa mechaniki dzięki odkryciom Galileusza i Newtona, poprzez sformułowanie zasad termodynamiki i elektrodynamiki Maxwella, aż po dwie wielkie dwudziestowieczne rewolucje w fizyce: teorię względności Einsteina, która zakwestionowała dotychczasowe wyobrażenia fizyków o czasie i geometrii czasoprzestrzeni, oraz mechanikę kwantową, która zastąpiła prosty intuicyjny opis układów fizycznych skomplikowanym mało intuicyjnym opisem stanów kwantowych i operatorów w przestrzeni Hilberta), zmieniały się (argumenty zwolenników każdej z opcji stawały się coraz to bardziej pogłębione), istota sporu pozostała ta sama: czy fenomen życia nie różni się od materii nieożywionej i podlega prawom fizyki, czy też należy go postrzegać w kategoriach swoistego nieredukowalnego złożonego układu, niepodlegającego prawom fizyki? W toku przeprowadzonych analiz

³⁵⁴ Tamże, s. 447.

przekonano się, że całe meritum dyskusji wokół życia jest wciąż sprawą otwartą. Zamiarem autora niniejszej pracy nie było marginalizowanie wkładu mechanicyzmu, redukcjonizmu, witalizmu, organicyzmu czy emergentyzmu w poznawanie fenomenu życia, wręcz przeciwnie – autor docenia wkład, jaki te stanowiska wniosły w wyjaśnianie sekretów życia. Ukazano ich mocne i słabe strony, dzięki którym koncepcje mechanistyczno-redukcjonistyczne i pozaredukcjonistyczne wciąż będą miały swoich zwolenników, jedynie ich wersje skrajne nie wytrzymują krytyki i muszą zostać odrzucone.

W kontekście rozważań nad fenomenem życia trzeba mieć na uwadze także to, o czym pisze Garland A. Allen. Twierdzi on, że naukowiec nigdy nie jest w swoim myśleniu w stu procentach mechanycystą, redukcjonistą, witalistą czy też holistą: „Osoba – pisze – która jest powszechnie określana mianem mechanicysty, może myśleć mechanistycznie przez większość czasu, ale może również w podejściu do pewnych kwestii myśleć w sposób holistyczny”³⁵⁵. Ponadto, jak zauważa inny współczesny badacz fenomenu życia, David Hull, terminy metateoretyczne, takie jak mechanicyzm i witalizm, redukcjonizm i holizm, używane dla scharakteryzowania dwóch stron odwiecznego sporu, wraz z upływem czasu zmieniały swoje znaczenie, stąd nie jest do końca jasne, co należy przez nie rozumieć³⁵⁶. „Żadna ze stron – pisze Hull – nie wydaje się używać ich w ten sam sposób. Do tego chaosu terminologicznego dochodzi jeszcze łatwość, z jaką jedna strona z radością karykaturuje poglądy drugiej, a następnie krzyczy oburzona, ponieważ jej własne poglądy zostały opacznie zrozumiane. Wydaje się jak gdyby jedyne możliwe do przyjęcia alternatywami w tym sporze były bezkrytyczna akceptacja albo całkowite odrzucenie – i ja nie skłaniam się ku żadnej z nich. Na domiar złego, jak tylko ktoś wypowie właściwe slogany i nazywa się organicystą albo redukcjonistą, potępienie przez przeciwnika jest gwarantowane, podobnie jak przynajmniej kulturalne milczenie ze strony sojuszników”³⁵⁷.

Zdaniem Hulla zasadniczym pytaniem jest to, w jakim stopniu obie strony sporu opierają się w swych argumentach na faktach empirycznych, a w jakim na przyjętej metafizyce³⁵⁸. W pewnych okresach historii spór był prowadzony w taki sposób, jak gdyby prawda mogła być ustalona przez uciekanie się do faktów empirycznych. Przeprowadzano serie eksperymen-

³⁵⁵ G.A. Allen, *Life science...*, s. xxii.

³⁵⁶ Por. D.L. Hull, *The philosophy of biological science*, s. 125.

³⁵⁷ Tamże, s. 125–126.

³⁵⁸ Por. tamże, s. 126.

tów, prowadzono testy, syntetyzowano substancje organiczne. W innych okresach debaty wydawały się w dużej mierze teoretyczne, na przykład mechanicyzm był zwykle interpretowany jako pogląd, że cała nauka daje się ostatecznie zredukować do mechaniki jako gałęzi fizyki. Okazało się jednak, że do mechaniki nie daje się sprowadzić nie tylko całej nauki, ale nawet samej fizyki. Można by sądzić, że rozwój nauk przyrodniczych zadał poważny cios programowi mechanistycznemu. Okazuje się jednak, że wcale tak się nie stało. Myślano, że opracowanie teorii ewolucyjnej w XIX wieku i odkrycie molekularnych podstaw dziedziczenia w XX wieku ostatecznie przesądzi, kto ma rację w odwiecznej debacie wokół natury życia. Tak się jednak nie stało. Z jednej strony niektórzy antyredukcyjniści podważali wartość syntetycznej teorii ewolucji jako będącej redukcjonistycznym dogmatem, traktującym organizmy jak gdyby były jedynie stosem molekuł. Z drugiej, część organicystów postrzegała teorię ewolucyjną jako główną barierę dla mechanistycznego redukcjonizmu. Zdaniem Hulla nie trzeba zbyt obszernie studiować historii sporu o naturę życia, żeby przekonać się, że niczego na temat świata nie można ustalić ani jedną, ani drugą metodą.

Rozdział II

KOPENHASKA INTERPRETACJA UKŁADÓW BIOTYCZNYCH

Największym wyzwaniem stojącym przed fizykami zainteresowanymi problemami biologicznymi w latach trzydziestych XX wieku było zrozumienie natury życia. Odpowiedzi na odwieczne pytanie, co to jest życie, poszukiwali, korzystając z narzędzi „nowej fizyki”, jaką była sformułowana w pierwszych dekadach XX wieku mechanika kwantowa. W 1927 roku Niels Bohr zaproponował nowe ramy pojęciowe dla opisu natury w aspekcie atomowym, które nazwał „komplementarnością”³⁵⁹. Zasada komplementarności – dopuszczająca dwa opisy, które wzajemnie się wykluczają, są jednakowo poprawne – jest podstawowym uwarunkowaniem od strony epistemologiczno-metodologicznej, na które autor chciał zwrócić uwagę. Zasada ta stała się podstawą esencjalną tego, co nazywamy kopenhaską interpretacją mechaniki kwantowej³⁶⁰. Celem Bohra było wyklarowanie opisu przyrody, który wyprowadzał z odkrycia kwantu działania przez Maxa Plancka w 1900 roku³⁶¹. Duński fizyk zakwestionował determinizm fizyki klasycznej oraz przedstawił komplementarne podejście do rzeczywistości, podział pomiędzy obserwatorem i obserwowanym światem³⁶². Bohr był przekonany, że nowa fizyka, na drodze której on ją interpretował (w zgodzie z zasadą komplementarności i zasadą nieoznaczoności Heisenberga), nie tylko uczyniła możliwym, ale pożądanym nowe podejście do szerszego zakresu obszarów wiedzy, w tym biologii³⁶³. Pod wpływem Bohra wielu fizyków zainteresowało się zagadnie-

³⁵⁹ Por. H.J. Folse, *Complementarity and the description of nature in biological science*, „Biology and Philosophy”, 5 (1990), s. 211.

³⁶⁰ Por. L. Joaquim, O. Freire Jr., Ch.N. El-Hani, *Quantum Explorers: Bohr, Jordan, and Delbrück venturing into biology*, „Physics in Perspective”, 3(17) (2015), s. 239.

³⁶¹ Por. D. Fleming, *Émigré physicists and the biological revolution* [w:] D. Fleming, B. Bailyn (eds), *The intellectual migration. Europe and America, 1930–1960*, Cambridge, Mass, 1969, s. 165.

³⁶² Por. M. Morange, *A history of molecular biology*, Harvard University Press, Cambridge 1998, s. 71.

³⁶³ Por. L. Joaquim, O. Freire Jr., Ch.N. El-Hani, *Quantum explorers...*, s. 239.

niami biologicznymi (Pascual Jordan, Walter Elsasser i Walter Heitler), a niektórzy zaczęli nawet owocnie prowadzić własne badania w tej dziedzinie (Max Delbrück)³⁶⁴. Wszystkich łączyło przeświadczenie, że podstawowe problemy w gruncie rzeczy w mechanice kwantowej zostały wyjaśnione i dlatego warto ją wykorzystać w innych obszarach badań, w tym biologii³⁶⁵. Badaczy przyciągnęła zagadka materii ożywionej³⁶⁶. Kierowało nimi pragnienie zastosowania metod i praktyk zakorzenionych w fizyce do stawiania czoła problemom biologicznym. Bohr zastanawiał się nad problemem, jak dalece wyniki osiągnięte w fizyce mogą wpływać na nasze poglądy o życiu. Delbrück, Jordan, Elsasser i Heitler podążali za ideami Bohra w kontekście mechaniki kwantowej, jak również jego tendencji rozszerzania wyników kopenhaskiej interpretacji biologii.

W tej części książki zaprezentowano interpretację organizacji życia zaproponowaną przez fizyczną szkołę kopenhaską. Niniejszy rozdział podzielono na dwie zasadnicze części. W pierwszej ze względu na oryginalność i nowatorskie spojrzenie autor zajął się analizą koncepcji życia Bohra (zarówno formalną, jak i merytoryczną). W drugiej uwaga została skoncentrowana na recepcji jego koncepcji w środowisku fizyków.

2.1. PUNKT WYJŚCIA KOPENHASKIEJ INTERPRETACJI UKŁADÓW BIOTYCZNYCH

Należy stwierdzić, że związki między fizyką a biologią były przeważnie trudne, a czasami burzliwe. Jednym z powodów jest to, że przedmiot zainteresowania i metody badawcze obu nauk wydają się znacząco różnić. Fizyk pojmuje świat zjawisk fizycznych, z którymi ma na co dzień do czynienia, jako rządzone jasno określonymi prawami, w którym najmniejsze nawet zdarzenie jest skutkiem jakiejś przyczyny, która sama jest skutkiem innej przyczyny i tak dalej, aż do cząstek elementarnych i podstawowych reguł wszechświata³⁶⁷. Wszystko nieubłagalnie podąża za prawami i zachowaniem cząstek³⁶⁸. W naukach biologicznych jest inaczej. Wielu biologów jest prze-

³⁶⁴ Por. A. Urbanek, *Biologia XX wieku – główne nurty rozwoju*, „Kosmos”, 3 (2000), s. 308. Por. A. Gare, *Approaches to the question what is life?: reconciling theoretical biology with philosophical biology*, „Cosmos and History: The Journal of Natural and Social Philosophy”, 1–2(4) (2008), s. 59.

³⁶⁵ Por. L. Joaquim, O. Freire Jr., Ch.N. El-Hani, *Quantum explorers...*, s. 237.

³⁶⁶ Por. tamże, s. 236.

³⁶⁷ Por. D.E. Wooldridge, *The machinery of life*, s. 4.

³⁶⁸ Por. tamże, s. 5.

konanych, że istnieje zasadnicza różnica między zjawiskami biologicznymi i fizycznymi w stopniu możliwości ich naukowego wyjaśnienia. Wielu może też odnieść wrażenie, że prawa zarządzające materią ożywioną różnią się w dogłębnym szczegółach od tych, którym podlega materia nieożywiona. Biolog, którego przedmiot badań jest nieporównywalnie bardziej złożony od tego, którym zajmuje się fizyk, miał o tyle większą potrzebę odnoszenia się do rzeczy nadprzyrodzonych, by wesprzeć podstawy swej nauki³⁶⁹. Częstki i prawa fizyki wydawały się nieodpowiednie do tego celu. W organizmach żywych wydawały się istnieć ukryte siły napędowe i służące pewnemu celowi, których natura całkowicie odchodziła od pojęcia przyczyny/skutku. Pojęcia „siły życiowe” i „witalizm” powstały, by opisać wiele aspektów życia, których, jak wierzano, nigdy nie będzie można wyjaśnić naukowo. Dla wielu istniała wyraźna granica między fizyką i biologią.

Niemniej wraz ze wzrostem wiedzy na temat nauk fizycznych i biologicznych coraz trudniej było utrzymać granicę między nimi³⁷⁰. Biologia i fizyka miały tendencję do łączenia się w jedną całość. Już odkrycie krążenia krwi przez Williama Harveya w 1628 roku było dla wielu demonstracją działania zasad hydrotechniki³⁷¹. W ciągu 350 lat od odkrycia Harveya, aspekty biologii, jeden po drugim, które pierwotnie uznawano za skazane na zależność od witalizmu w celu ich wyjaśnienia, były przez licznych biologów tłumaczone przez odwołanie do prostych praw fizyki³⁷². Metodami fizycznymi można było zbadać nie tylko ogólne funkcje organów, ale i szczegóły ich budowy i działania. Nawet substancje składowe tkanek i komórek organizmów żywych okazały się zawdzięczać swoją budowę i właściwości tym samym prawom fizyki, którym podlega materia nieożywiona.

Wyraźny wpływ fizyki na biologię dało się zauważyć w pierwszych dekadach XX wieku³⁷³. W latach dwudziestych i trzydziestych ubiegłego wieku w centrum uwagi znalazła się mechanika kwantowa³⁷⁴. Stosunkowo prosta struktura aksjomatyczna tej teorii stała się miarą porównania innych dyscyplin. Jeśli okazały się mniej ogólne w swoim zamierzonym zakresie i wykorzystywały różne kryteria surowości, zakładano, że są pożądane. Dzięki mechanice kwantowej możliwe było zrozumienie zjawisk zachodzą-

³⁶⁹ Por. tamże, s. 6.

³⁷⁰ Por. tamże, s. 6. Por. A. Urbanek, *Rewolucja naukowa w biologii*, Wiedza Powszechna, Warszawa 1973, s. 17.

³⁷¹ Por. D.E. Wooldridge, *The machinery of life*, s. 6–7.

³⁷² Por. tamże, s. 7.

³⁷³ Por. G. Allen, *Life science...*, s. xxiii.

³⁷⁴ Por. S. Sarkar, *Philosophy, history, and molecular biology – introduction* [w:] S. Sarkar (ed.), *The philosophy and history of molecular biology: new perspectives*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht–Boston–London 1996, s. 1.

cych w mikroświecie, co zaowocowało wieloma osiągnięciami technicznymi, takimi jak tranzystory, mikroprocesory i rozwój energetyki jądrowej³⁷⁵. Wszystkie wielkie osiągnięcia chemii i elektroniki wywodzą się z teorii kwantowej. Pozwoliła ona lepiej rozumieć budowę wiązań chemicznych, a nawet rzuciła światło na rozumienie niektórych problemów współczesnej kosmologii. Mechanika kwantowa ustanowiła nową erę nie tylko dla fizyki, ale również dla innych nauk przyrodniczych, w tym biologii³⁷⁶. Fizyka w pewnym sensie stała się nauką wzorcową dla innych dyscyplin, również dla biologii.

Fizycy mają tendencję do oceniania biologów zgodnie ze skalą wartości zależną od zakresu, w jakim biolog korzystał z praw, pomiarów, eksperymentów i innych aspektów badań naukowych cenionych wysoko w naukach fizykalnych³⁷⁷. Znamienne jest to, że począwszy od lat trzydziestych XX wieku sami fizycy zaczęli skupiać swoją uwagę także na kluczowych problemach biologicznych, i to pomimo braku wykształcenia biologicznego³⁷⁸. Co zaskakujące, nie pracowali w porozumieniu z biologami, zamiast tego wybrali swoje własne projekty badawcze i rozwijali „efekty uboczne” swoich badań³⁷⁹.

Z całą pewnością czynnikiem motywującym fizyków do zainteresowania się biologią był już sam urok próby zrozumienia życia³⁸⁰. André Lwoff zauważa, że fizyk zadaje w kontekście życia dwa pytania: czym jest organizm i jaka jest specyficzna właściwość organizmów żywych, która nie istnieje w świecie nieożywionym, czyniąc ją tym samym cechą charakterystyczną życia?³⁸¹ Organizmy żywe są układami maksymalnie złożonym, dlatego też fizycy czują pokusę zastosowania swojego fizykalnego podejścia w celu rozwikłania tej kompleksowości³⁸². Fizycy posiadają przewagę praktyczną – zdolność do zastosowania narzędzi eksperymentalnych – takich jak dyfrakcja rentgenowska czy wnioskowanie ilościowe – opartych na narzę-

³⁷⁵ Por. J. Simmons, *Niels Bohr (1885–1862) i atom* [w:] J. Simmons, *100 najwybitniejszych uczonych wszech czasów*, tłum. P. Amsterdamski, Świat Książki, Warszawa 1997, s. 25.

³⁷⁶ Por. L. Joaquim, O. Freire Jr., Ch.N. El-Hani, *Quantum Explorers...*, s. 236–237. Por. D.S. Thaler, *Paradox as Path: Pattern as Map* [w:] S. Sarkar (ed.), *The philosophy and history of molecular biology...*, s. 245.

³⁷⁷ Por. E. Mayr, *The growth of biological thought...*, s. 14.

³⁷⁸ Por. A. Urbanek, *Biologia XX wieku...*, s. 308.

³⁷⁹ Por. M. Morange, *A history of molecular biology*, s. 67.

³⁸⁰ Por. A. Jogalekar, *Physicists in biology; and other quirks of the genomic age*, „Scientific American”, 10 December (2012), <http://blogs.scientificamerican.com/the-curious-wavefunction/physicists-in-biology-and-other-quirks-of-the-genomic-age/> (16.07.2015).

³⁸¹ Por. A. Lwoff, *Biological order*, MIT Press–Massachusetts Institute of Technology, Cambridge–Massachusetts 1962, s. 3.

³⁸² Por. A. Jogalekar, *Physicists in biology...*

dziach matematycznych i statystycznych, które pozwalają nadać sens danym biologicznym. To ten powód doprowadził do znacznego napływu do nauk biologicznych fizyków prowadzących badania ilościowe.

Wkroczenie fizyków do biologii nie tylko poszerzyło grono badaczy życia o grupę wybitnych naukowców³⁸³. Wielu z nich, z długą i wybitną karierą w fizyce, zdecydowało się całkowicie zmienić dziedzinę i analizować biologię³⁸⁴. „Etos fizyki nuklearnej – pisze Siddhartha Mukherjee – obejmujący dążenie do odkrywania niepodzielnych elementów, uniwersalnych mechanizmów i systemowych wyjaśnień, przeniknął wkrótce całą biologię, prowadząc do wybierania nowych metod i stawiania nowych pytań. Jego skutki dawały o sobie znać przez wiele kolejnych dekad. Fizycy [...] zwrócili się ku biologii, pragnęli bowiem rozpatrywać istoty żywe w kategoriach chemicznych i fizycznych, w kategoriach cząsteczek, sił, struktur, akcji i reakcji”³⁸⁵.

Istnieją konkretne przyczyny migracji intelektualnej fizyków. Wymieńmy za Michaeliem Morange najważniejsze z nich. Przed drugą wojną światową niektórzy młodzi fizycy byli zawiedzeni dziedziną, której się uczyli³⁸⁶. Nie chodziło o to, że fizyka, pławiąca się w blasku podwójnej rewolucji mechaniki kwantowej i teorii względności, nie była prestiżową nauką, bowiem każdego niemal dnia teorie te doprowadzały do nowych odkryć. Rzecz w tym, że fizyka wkroczyła w fazę, którą Thomas Kuhn określił mianem „normalnej nauki”, w której największe działanie wiąże się z „rozwiązywaniem zagadek”, a nie kwestionowaniem podstaw samej nauki. Dla najbardziej ambitnych młodych fizyków sprawdzanie starszych modeli albo w najlepszym razie ich ulepszanie nie było niczym inspirującym. Co więcej – zmieniała się również struktura badań fizykalnych. Odizolowani od siebie badacze byli zastępowani przez grupy naukowców skupiających się wokół dużych projektów lub ogromnych urządzeń, takich jak akcelerator cząstek. W tego typu badaniach opartych na współpracy grupy badaczy, rola i wkład każdego z nich są mniejsze, a przynajmniej trudniej je określić. Niektórzy naukowcy są zbyt wielkimi indywidualistami, by być jedynie anonimowymi członkami dużej wielodyscyplinarnej drużyny.

Wraz z rozpoczęciem drugiej wojny światowej pojawiły się kolejne pobudki, które sprawiły, że niektórzy fizycy odsunęli się od fizyki (swojej dziedziny wiedzy)³⁸⁷. Wielu amerykańskich i brytyjskich fizyków związało

³⁸³ Por. M. Morange, *A history of molecular biology*, s. 67.

³⁸⁴ Por. tamże.

³⁸⁵ S. Mukherjee, *Gen. Ukryta historia*, tłum. J. Dzierzgowski, Czarne, Wołowiec 2017, s. 144.

³⁸⁶ Por. M. Morange, *A history of molecular biology*, s. 69.

³⁸⁷ Por. tamże.

się blisko z badaniami militarnymi. Po raz pierwszy w historii (z wyjątkiem roli naukowców zorganizowanych w ramach armii Pierwszej Republiki we Francji) zostali oni wezwani do pomocy armii. Dzięki temu stworzyli radar i sonar, ulepszyli komunikację, rozszyfrowali wiadomości, a także skonstruowali potężne kalkulatory, z których później powstały komputery. Jednak negatywne konsekwencje udziału fizyków w wojnie (rozumianego jako konstruowanie i ulepszanie broni masowego rażenia) sprawiły, że niektórzy z nich pragnęli uciec od czegoś, co według nich było formą poboru³⁸⁸. Naukowcy chcieli położyć kres poczuciu winy, jakie czuli na skutek bycia powiązanych z różnymi operacjami militarnymi, które w znaczny sposób zmieniły to, co przez długi czas wydawało się walką pomiędzy dobrem i złem. Przykładowo bombardowanie Drezna przez aliantów, które zostało przedstawione jako reakcja na bombardowanie Coventry, doprowadziło do śmierci wielu niewinnych cywilów. W przeciwieństwie do programu Manhattan bomby atomowe zrzucone na Hiroszimę i Nagasaki nie mogły być uzasadnione potencjalnym zagrożeniem nuklearnym ze strony Japończyków i przypominały naukowcom, że motywy i cele armii i polityków były zupełnie odmienne od ich własnych; ponadto nie mogli na nie w żaden sposób wpływać. Biologia pojawiła się jako nowa dziedzina oddzielona od spraw politycznych i chroniona przed potencjalnym wykorzystaniem jej dla celów militarnych. Inną przyczyną migracji fizyków do biologii było to, że wydawała się ona siedliskiem wielu podstawowych, nierozwiązanych jeszcze problemów³⁸⁹. Wydawało się, że fizyka kwantowa, a także nowa chemia, która się z niej rozwinęła, jest w stanie dostarczyć narzędzi i pojęć koniecznych do zrozumienia tajemnic biologii.

Badaczem, który brał udział w samym tworzeniu teorii kwantów i który też zwrócił uwagę na sposób poznania życia, był Niels Bohr³⁹⁰. Zainteresowanie kwestiami biologicznymi sięgają czasów młodości Bohra, który dora-

³⁸⁸ Por. tamże, s. 70.

³⁸⁹ Por. tamże.

³⁹⁰ Niektóre aspekty koncepcji życia duńskiego fizyka przedstawiłem w następujących pracach: *Koncepcja życia w ujęciu reprezentatywnych przyrodników...*; *Nielsa Bohra koncepcja życia*, „Roczniki Filozoficzne”, 1 (2006), s. 161–178; *Kontrowersje wokół natury życia w pismach fizyków dwudziestego wieku* [w:] K. Bałkowski, K. Maciąg (red.), *Filozofia nauki – wybrane zagadnienia*, s. 91–92; *Determinizm biologiczny w centrum debaty fizyków lat trzydziestych i czterdziestych dwudziestego wieku*, „Studia Sandomierskie”, 22 (2015), s. 278–280. Poza tym przetłumaczyłem z języka angielskiego na język polski i opublikowałem streszczające biologiczne poglądy Bohra fragmenty pracy Fina Aaseruda zatytułowanej: *Redirecting science: Niels Bohr, philanthropy, and the rise of nuclear physics*, Cambridge University Press, Cambridge 1990. Zob. M. Twardowski, *Nauka przekierowana: Niels Bohr, filantropia, i narodziny fizyki jądrowej (Fragmenty)*, „Roczniki Filozoficzne”, 1 (2011), s. 51–78.

stał w atmosferze dyskusji filozoficznych o podstawach biologii³⁹¹. Jego ojciec, Christian Bohr, profesor fizjologii na Uniwersytecie w Kopenhadze³⁹² obszernie wypowiadał się o relacjach biologii, fizyki i filozofii w rozmowach z naukowcami z różnych dziedzin, których gościł u siebie w domu, a którym to rozmowom młody Bohr uważnie się przysłuchiwał. Dyskusje w naukowym kręgu ojca wywarły silny wpływ na tworzenie się naukowych i filozoficznych poglądów młodego Bohra³⁹³.

Jednym z głównych tematów dyskusji była celowość w świecie ożywionym. Duński fizjolog przez cały okres swojej kariery utrzymywał, że badanie życia nie może opierać się na samej fizyce i chemii³⁹⁴. Zwracał uwagę na niedoskonałość czysto mechanistycznej koncepcji przyrody, nie biorąc pod uwagę możliwości powrotu do prymitywnych poglądów na temat siły życiowej³⁹⁵. Był wyraźnie zafascynowany predyspozycjami cząsteczki hemoglobiny do bycia transporterem tlenu³⁹⁶. Ta predyspozycja wyrażona jest w kształcie litery S przyjmowanym przez hemoglobinę, gdy wiąże się ona z tlenem. To właśnie takie drobne szczegóły ujęły Bohra i przekonały go do „celowości funkcji organicznych”. Twierdził, że fizjologia jako gałąź nauk biologicznych musi „zbadać zjawiska specyficzne dla organizmu”³⁹⁷. To, co sprawia, że organizm jest więcej niż tylko układem fizycznym, jest przejawem jego celowego zachowania. Duński fizjolog miał zwyczaj dyskutowania tych kwestii z Haraldem Høffdingiem³⁹⁸ i innymi duńskimi intelektualni-

³⁹¹ Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 104. Por. P. Hoyningen-Huene, *Niels Bohr's argument for the irreducibility of biology to physics* [w:] J. Faye, H.J. Folse (eds), *Niels Bohr and contemporary philosophy*, Springer Science+Business Media, Dordrecht 1994, s. 231. Por. M. Morange, *A history of molecular biology*, s. 71.

³⁹² Głównym polem w akademickiej biografii Bohra stała się fizjologia oddychania. Zdobył sławę w całej Europie dzięki swoim badaniom dotyczącym funkcji transportowej krwi ludzi i zwierząt. Był pierwszym, który korzystał z terminu „pojemności tlenowej” (ang. *oxygen capacity*) i „funkcji oddechowej krwi” (ang. *respiratory function of the blood*), które z czasem weszły do powszechnego użytku w literaturze naukowej. Por. L.I. Irzhak, *Christian Bohr. (On the occasion of the 150th anniversary of his birth)*, „Human Physiology”, 3(31) (2005), s. 366–367.

³⁹³ Por. N. Roll-Hansen, *The application of complementarity...*, s. 419.

³⁹⁴ Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 104. Por. R. Nadeau, M. Kafatos, *Non-local universe: the new physics and matters of the mind*, Oxford University Press, Oxford 2001, s. 105.

³⁹⁵ Por. M. Morange, *A history of molecular biology*, s. 71.

³⁹⁶ Por. R. Olby, *The path to the double helix. The discovery of DNA*, Dover Publications, INC., New York 1994, s. 230.

³⁹⁷ Por. H.J. Folse, *Complementarity and the description...*, s. 212.

³⁹⁸ Niels Bohr był słuchaczem wykładów Høffdinga na Uniwersytecie w Kopenhadze oraz uczestnikiem prowadzonych przez niego seminariów. Por. F. Selleri, *Wielkie spory w fizyce kwantowej*, tłum. B. Lange, Wyd. Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk 1999, s. 161.

stami, którzy podzielali jego reakcję na mechanistyczny materializm redukcjonistów³⁹⁹.

Starszy Bohr zaszczerpił w swoim synu romantyczne pragnienie odnalezienia ulotnego „sekrety życia”⁴⁰⁰. Niels Bohr wspomina o tych spotkaniach w swojej publikacji z roku 1957. Po zacytowaniu długiego fragmentu pracy swojego ojca poświęconej teleologii, powstałej w 1910 roku badacz pisze: „Przytoczyłem te uwagi wyrażające poglądy otoczenia, w którym wyrosłem i którego dyskusji słuchałem w młodości, ponieważ te poglądy stanowią właściwy punkt wyjścia przy badaniu miejsca należnego organizmom żywym w opisie przyrody”⁴⁰¹. Podobnie jak ojciec, przyjmował on stanowisko alternatywne zarówno wobec witalizmu, jak i mechanicyzmu⁴⁰². Przyznawał, że nie ma żadnej siły życiowej funkcjonującej w organizmie żywym, której byłyby pozbawione jego nieożywione części⁴⁰³. Z drugiej strony był przekonany, że dotychczasowe formy mechanicyzmu bardzo niejasno tłumaczyły złożoność życia.

Niels Bohr był pierwszym współczesnym fizykiem głęboko świadomym wyzwań stawianych przez organizmy żywe⁴⁰⁴. Uważał, że aby je opisać musimy ustalić ramy koncepcyjne zasadniczo odmienne z jednej strony od klasycznej fizyki i chemii, z drugiej różne od mechaniki kwantowej⁴⁰⁵. Ab-

Por. S. Butryn, *Wpływ poglądów filozoficznych Nielsa Bohra na charakter kopenhaskiej interpretacji mechaniki kwantowej*, „Zagadnienia Naukoznawstwa”, 4(162) (2004), s. 700. Por. P.R. Sloan, *How was teleology eliminated in early molecular biology?*, „Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences”, 43 (2012), s. 141.

³⁹⁹ Christian Bohr i Harald Høffding byli kolegami na Uniwersytecie w Kopenhadze, obaj należeli do Royal Danish Academy of Science and Letters, byli też przyjaciółmi. Bohr, Høffding, fizyk Christian Christiansen oraz filolog Vilhelm Thomsen spotykali się po posiedzeniach akademickich w swoich domach. Tam omawiali tematy kulturalne, naukowe i filozoficzne. Por. J. Faye, *The Bohr-Høffding relationship reconsidered*, „Studies in History and Philosophy of Science”, 1(19) (1988), s. 322. Por. F. Selleri, *Wielkie spory w fizyce kwantowej*, s. 161.

⁴⁰⁰ Por. Allen, *Life science...*, s. 224.

⁴⁰¹ N. Bohr, *Fizyka a zagadnienie życia* [w:] N. Bohr, *Fizyka atomowa a wiedza ludzka*, tłum. W. Staszewski, S. Szpikowski, A. Teske, PWN, Warszawa 1963, s. 141.

⁴⁰² Por. A. Urbanek, *Biologia XX wieku...*, s. 307. Por. J. Faye, *The Bohr-Høffding relationship reconsidered*, s. 322.

⁴⁰³ Por. G.A. Allen, *Life science...*, s. 227.

⁴⁰⁴ Por. A.J. Libchaber, *Biology and the flow of molecular information*, „Pramana”, 1(53) (1999), s. 86.

⁴⁰⁵ Prace Bohra dotyczące biologii są nieliczne i raczej krótkie w porównaniu z tymi, gdzie z wielką uwagą skoncentrował się na problemach generowanych przez rozwój fizyki kwantowej. Por. N. Roll-Hansen, *The application of complementarity to biology: from Niels Bohr to Max Delbrück*, „Historical Studies in the Physical and Biological Sciences”, 30 (2000), s. 421.

strakcyjne i oparte na spekulacjach prace Bohra dotyczące biologii tworzą integralną część ogólnych rozważań nad biologią rozpoczętych pod koniec lat dwudziestych XX wieku⁴⁰⁶.

2.2. ASPEKTY FORMALNE I MERYTORYCZNE KOPENHASKIEJ INTERPRETACJI UKŁADÓW BIOTYCZNYCH

Pierwszy raz Bohr wyraził ideę komplementarności w wykładzie wygłoszonym na międzynarodowej konferencji ku pamięci Alessandro Volty w Como w 1927 roku⁴⁰⁷. Dokument ten, często zwany *Como paper*, został opublikowany pod tytułem *The quantum postulate and the recent developments of atomic theory* (Postulat kwantu i ostatnie postępy w teorii atomowej). Na czym polega idea komplementarności autorstwa duńskiego fizyka?

W mechanice kwantowej za pojęcie pierwotne należy przyjąć układ kwantowy (na przykład atom) oraz wielkości fizyczne (własności) tego układu (na przykład położenie, pęd czy moment pędu elektronu). Te ostatnie podlegają pomiarowi, z nieuniknionym błędem pomiaru. Oprócz praw Newtona⁴⁰⁸, w mechanice kwantowej obowiązuje zasada nieoznaczoności Heisenberga – dzięki niekontrolowanej interakcji kwantowej między instrumentem obserwacji a jego obiektem, jednostka nigdy nie może dokładnie zmierzyć jednocześnie położenia i pędu elektronu (lub dowolnej innej cząstki) – ograniczeniem dokładności jest stała Plancka⁴⁰⁹. Heisenberg sugerował, że położenie i pęd cząstki elementarnej są komplementarnymi aspektami opisu. Na poziomie atomowym te dwa opisy są uznawane za komplementarne, ponieważ nie można jednocześnie uzyskać absolutnej pewności co do obu wartości. Całkowita pewność co do jednej wielkości realizowana jest kosztem kompletnej niepewności co do drugiej⁴¹⁰. Ograniczeń, o których mówił Heisenberg, nie można usunąć, stosując bardziej pomysłowych metod pomiarów lub lepszego sprzętu, a wynikają one z podstawowej nierozdziel-

⁴⁰⁶ Por. tamże, s. 421.

⁴⁰⁷ Por. N. Bohr, *The quantum postulate and the recent development of atomic theory* [w:] N. Bohr, *Atomic theory and the description of nature*, Cambridge University Press, Cambridge 1961, s. 52–91.

⁴⁰⁸ Należy podkreślić, że fizyka newtonowska wynika z mechaniki kwantowej. To, czy obowiązuje fizyka newtonowska, czy też mechanika kwantowa, zależy od skali wielkości: jeśli brana jest pod uwagę skala wielkości „nano”, obowiązuje mechanika kwantowa, jeśli „makro”, to już rządzi fizyka newtonowska. W pewnym sensie bioukłady sytuują się między „nano” i „makro”, czyli w skali „mezo”.

⁴⁰⁹ Por. H.J. Folse, *Complementarity and the description...*, s. 216.

⁴¹⁰ Por. A.T. Domondon, *Bringing physics...*, s. 437.

ności obserwatora i obserwowanego obiektu. Zasada nieoznaczoności Heisenberga była fizycznym odpowiednikiem epistemologicznej komplementarności stworzonej przez Bohra. Zasada komplementarności stanowiąca kluczowy element kopenhaskiej interpretacji mechaniki kwantowej głosi, że o przebiegu procesów zachodzących w mikroświecie decydują warunki obserwacji: procesy te w pewnych warunkach możemy opisać tak samo, jak zjawiska falowe w mechanice klasycznej, natomiast w innych – jak zjawiska korpuskularne⁴¹¹. Innymi słowy, zasada Bohra mówi, że w układzie kwantowym istnieją własności komplementarne jednakowo realne, ale wzajemnie wykluczające się. Relacja komplementarności utrzymuje się pomiędzy różnymi „aspektami rzeczywistości”, gdzie każdy wyraża ważną cechę zjawiska⁴¹². „Ważność” takich cech leży w fakcie, że są one niezbędne w dokładnym opisie. Obydwa opisy – falowy i korpuskularny – są tylko z pozoru sprzeczne, gdyż odnoszą się do różnych warunków obserwacji⁴¹³. Traktowane łącznie, dostarczają pełnej wiedzy o układzie atomowym, dlatego noszą nazwę opisów komplementarnych. Zgodnie z „zasadą komplementarności” przykładowo pole elektromagnetyczne w zależności od konkretnej sytuacji można uważać za fale lub cząstki, chociaż nie można jednocześnie zaobserwować jego własności falowych i korpuskularnych⁴¹⁴. Mimo że układy atomowe (fale i cząstki) można określać we wzajemnie sprzeczny sposób, dla pełnego opisu zjawisk zarówno jedna, jak i druga cecha są niezbędne⁴¹⁵. Bohr pisze: „Istotnie przestrzenne kontinuum naszego obrazu rozchodzenia się światła, a z drugiej strony ziarnistość efektów świetlnych są uzupełniającymi się »komplementarnymi« aspektami w tym sensie, że zdają sprawę z równie ważnych cech zjawisk świetlnych; nie ma między nimi sprzeczności *in actu*, gdyż ich dokładna analiza pojęciami mechanicznymi żądałaby wzajemnie wyłączających się zestawów doświadczalnych”⁴¹⁶. Fale i cząstki są uzupełniającymi się drogami do zrozumienia rzeczywistości, z których żadna nie jest bardziej rzeczywista od drugiej⁴¹⁷. Właściwości fal i cząstek muszą być rozpatrywane jako uzupełniające się aspekty rzeczywistości o tyle,

⁴¹¹ Por. J. Misiek, *Komplementarności zasada* [w:] Z. Cackowski, J. Kmita, K. Szaniawski, P.J. Smoczyński (red.), *Filozofia a nauka. Zarys encyklopedyczny*, s. 305–306. Por. S. Zięba, *Bohr Niels* [w:] A. Maryniarczyk (red.), *Powszechna encyklopedia filozofii*, t. 1, Polskie Towarzystwo Tomasza z Akwinu, Lublin 2000, s. 620.

⁴¹² Por. P. Hoyningen-Huene, *Niels Bohr's argument...*, s. 241.

⁴¹³ Por. J. Misiek, *Komplementarności zasada*, s. 306.

⁴¹⁴ Por. J. Simmons, *Max Delbrück (1906–1981) i bakteriofagi* [w:] J. Simmons, *100 najwybitniejszych uczonych...*, s. 237.

⁴¹⁵ Por. tenże, *Niels Bohr (1885–1862) i atom*, s. 27.

⁴¹⁶ N. Bohr N., *Światło i życie* [w:] N. Bohr, *Fizyka atomowa a wiedza ludzka*, s. 15.

⁴¹⁷ Por. L. Joaquim, O. Freire Jr., Ch.N. El-Hani, *Quantum explorers...*, s. 239.

że każda wyraża ważne cechy zjawiska światła i atomów. Bohr wbrew tradycyjnemu pogładowi akceptowanemu w fizyce klasycznej opiera swoją zasadę komplementarności na założeniu, że nie można pomijać oddziaływania pomiędzy obiektem atomowym i przyrządem pomiarowym⁴¹⁸.

Duński fizyk sytuował ideę komplementarności w kontekście ograniczeń fizyki klasycznej⁴¹⁹. W szczególności zauważył, że fizyka klasyczna ma ograniczone zastosowanie w rozumieniu zjawisk atomowych, ponieważ zakłada, że zjawisko i obserwator tego zjawiska są rozdzieleni. Takie założenie jest jednak problematyczne na poziomie atomowym. Bohra akceptacja postulatu kwantu stanowiła akceptację poglądu na naturę, zgodnie z którym całkowicie niemożliwie jest rozróżnianie zjawiska atomowego i aparatury obserwacyjnej⁴²⁰. Obserwowane zjawisko atomowe i aparatura pomiarowa tworzą nierozdzielalną całość⁴²¹. Niemożliwy jest pojęciowy rozdział pomiędzy nimi. W konsekwencji nie istnieje rzeczywistość mikroskopowa istniejąca niezależnie od obserwatora. Zjawisko atomowe jest ściśle połączone z opisem aparatury użytej do jego obserwacji. Według duńskiego naukowca celem fizyki nie jest więc odkrycie rzeczywistej istoty zjawisk, ale znalezienie relacji między różnymi aspektami spostrzeżeń.

Należy mocno podkreślić, że komplementarność Bohra jest po prostu konsekwencją ogólniejszej teorii – mechaniki kwantowej Schrödingera, Heisenberga i Diraca. Nie jest to więc żadna hipoteza, ale ścisły wniosek logiczny wysnuty z ogólniejszej, już sprawdzonej teorii. Można więc mówić o parze wielkości wzajemnie komplementarnych: położenie – pęd (sprzężonych przez zasadę nieoznaczoności Heisenberga).

W Kopenhadze wokół Bohra utworzyła się mała grupa skupiająca się na dokładnym zbadaniu konsekwencji nowej teorii⁴²². Zasada komplementarności od początku była jednak poddawana surowej krytyce przez wielu fizyków. Za główną jej słabość uznano to, iż zamiast umożliwiać usunięcie sprzeczności w naszej wiedzy, jedynie ułatwiała pogodzenie się z nimi⁴²³. Pomimo krytyki zasada komplementarności pozostała fundamentem „ducha kopenhaskiego” i jest ona do dziś podstawą fizyki⁴²⁴.

⁴¹⁸ Por. J. Misiek, *Komplementarności zasada*, s. 306.

⁴¹⁹ Por. tamże, s. 53–55. Por. A.T. Domondon, *Bringing physics to bear on the phenomenon of life: the divergent positions of Bohr, Delbrück, and Schrödinger*, „Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences”, 37 (2006), s. 437.

⁴²⁰ Por. F. Selleri, *Wielkie spory w fizyce kwantowej*, s. 104.

⁴²¹ Por. tamże, s. 105.

⁴²² Por. M. Morange, *A history of molecular biology*, s. 71.

⁴²³ Por. J. Misiek, *Komplementarności zasada*, s. 312.

⁴²⁴ Por. J. Simmons, *Niels Bohr (1885–1862) i atom*, s. 28.

Z czasem Bohr coraz częściej myślał o komplementarności jako zasadzie uniwersalnej⁴²⁵. Choć oczywiście jest, że głównym zamiarem duńskiego fizyka było rozwiązanie pozornych paradoksów objętych teorią kwantową, praktycznie od ogłoszenia po raz pierwszy swego „punktu widzenia” jasno wyrażał przekonanie, że w jego ramach można rozwiązać koncepcyjne problemy związane z opisem przyrody również w innych dziedzinach nauki, w tym biologii⁴²⁶. Bohr był przekonany, że zasada ta dotyczy zarówno świata nieorganicznego, jak i organicznego. Istotny krok Bohra (i następców) w kierunku biologii polegał więc na przypuszczeniu (hipotezie naukowej): a może tu też niektóre własności są parami komplementarne? Otworzyło się tu pole do sprawdzania różnych hipotez.

Wiadomo, że część fizyków – w tym sam Albert Einstein⁴²⁷ – długi czas uważała mechanikę kwantową za teorię tymczasową, poszukując „zmiennych ukrytych” w celu ominięcia konsekwencji zasady nieoznaczoności. Bohr, Heisenberg i ich sukcesorzy poszukiwali właśnie takich hipotez, w których komplementarność stanowiłaby istotny element konstrukcji logicznej.

Omawiając zatem zasadę komplementarności, należy odpowiedzieć na pytanie, jak wpłynęła ona na interpretację organizacji życia przez duńskiego fizyka. W dalszej kolejności przedstawiono dyskusję nad komplementarnością prowadzoną w gronie związanych z Bohrem fizyków.

15 sierpnia 1932 roku Bohr wygłosił wykład inauguracyjny na International Congress of Light Therapy (Międzynarodowym Kongresie Terapii Światłem) w Kopenhadze. Tytuł wykładu brzmiał: *Light and life* (Światło i życie), a jego celem było zwrócenie uwagi na implikacje epistemologiczne dla nauk o życiu, będące wynikiem fundamentalnych zmian, jakie teoria kwantów przyniosła w odniesieniu do koncepcji prawa przyrody⁴²⁸. (Duńska wersja zapisanego odczytu – wygłoszonego po angielsku – różniła się od oryginału jedynie kilkoma formalnymi poprawkami pojawiła się w 1933 roku w „*Naturens Verden*”, a wersje angielska i niemiecka zostały opublikowane w „*Nature*” i „*Die Naturwissenschaften*” w tym samym roku⁴²⁹). W wykładzie tym autor najpierw skupił swoją uwagę na czysto fizycznej stronie zjawisk świetlnych, a dopiero później poruszył kwestię, „w jakiej

⁴²⁵ Por. D. Fleming, *Émigré physicists...*, s. 165.

⁴²⁶ Por. H.J. Folse, *Complementarity and the description...*, s. 211.

⁴²⁷ Bohr wziął na siebie ciężar dyskusji z Einsteinem. Ten ostatni uważał, że gdy zajrzemy bardziej w głąb struktury materii, dowiemy się wszystkiego, co istotne. Bohr był przeciwnego zdania.

⁴²⁸ Por. G.S. Stent, *Light and life: Niels Bohr's legacy to contemporary biology*, „*Genome*”, 31(1) (1989), s. 11.

⁴²⁹ Por. P. Hoyningen-Huene, *Niels Bohr's argument...*, s. 234–235.

mierze rezultaty osiągnięte w fizyce, a więc w jednej tylko dyscyplinie, mogą wpłynąć na nasze poglądy dotyczące miejsca organizmów żywych w naukach przyrodniczych w ogóle⁴³⁰. Bohr szczególnie mocno w tym wykładzie akcentuje pozostawianie biologii w podobnej relacji do fizyki jako całości (klasyczna fizyka plus mechanika kwantowa), jak teoria kwantów do mechaniki klasycznej⁴³¹. Według duńskiego naukowca nowa fizyka (fizyka klasyczna plus mechanika kwantowa) i chemia nie mogą wyjaśnić typowych zjawisk biologicznych.

W jakim sensie fizyczne i chemiczne wyjaśnienia dotyczące osobliwych funkcji życia są uważane za niemożliwe? Argument Bohra co do niezrozumiałości typowo biologicznych zjawisk przez fizykę i chemię jest analogiczną dedukcją: jak w oparciu o fizykę (klasyczną) nie możemy wytłumaczyć stabilności atomów, tak analogicznie nie da się, odwołując do fizyki i chemii, wyjaśnić osobliwych cech życia. „Rzeczywiście – pisze – zasadnicza niemożność analizy stabilności atomu w mechanicznych terminach wykazuje ścisłą analogię do niemożliwości fizycznego lub chemicznego wyjaśnienia swoistych funkcji charakterystycznych dla życia⁴³². Innymi słowy, obydwa rezultaty analizy fizyczno-chemicznej z jednej strony i opisu biologicznego z drugiej strony chociaż są teoretycznie niemożliwe do pogodzenia, to razem wzięte uchwyciły podstawowe aspekty organizmów żywych⁴³³. Według Bohra ta analogia jest wsparta tym, że dwa obszary zbiegają się w jeden aspekt, który poddaje nam porównanie. Nazywa ten aspekt „esencją analogii”. „Nie będę dalej wchodził – jak orzeka Bohr – „w te czysto terminologiczne rozważania, dodam tylko, że istotą omawianej analogii jest jawne wyłączenie się z jednej strony typowych cech życia, takich jak samozachowanie i reprodukcja indywiduów, z drugiej – podziału na prostsze elementy koniecznego przy jakiegokolwiek fizycznej analizie⁴³⁴.

Szczegółowa aplikacja zasady komplementarności Bohra do biologii wygląda następująco: **założenie 1**: wyjaśnienie stabilności atomów w rozumieniu mechaniki klasycznej jest niemożliwe, jeśli weźmiemy pod uwagę pokrewieństwo komplementarności, która rządzi takim wyjaśnieniem; **założenie 2**: wyjaśnienie charakterystycznych biologicznych funkcji przez

⁴³⁰ N. Bohr, *Światło i życie*, s. 12.

⁴³¹ Por. J.L. Heilbron, *The earliest missionaries of the Copenhagen spirit* [w:] E. Ullmann-Margalit (ed.), *Science in Reflection. The Israel Colloquium: Studies in History, Philosophy, and Sociology of Science. Volume 3*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 1988, s. 213.

⁴³² N. Bohr, *Światło i życie*, s. 21.

⁴³³ Por. P. Hoyningen-Huene, *Niels Bohr's argument...*, s. 149.

⁴³⁴ N. Bohr, *Światło i życie*, s. 23.

fizykę jest rządzone przez to samo pokrewieństwo komplementarności; **wniosek:** wyjaśnienie charakterystycznych biologicznych funkcji przez fizykę jest niemożliwe⁴³⁵. Dla Bohra mechanika, która w tym kontekście obejmuje fizykę klasyczną (włączając elektrodynamikę), jest niewystarczająca zarówno dla wyjaśnienia stabilności atomów, jak i „osobliwych cech życia”⁴³⁶. „Istotnie – pisze w innym miejscu – musimy uznać, że w badaniach biologicznych wymaganiom stawianym obiektywnemu opisowi czynimy lub staramy się czynić zadość w charakterystyczny, komplementarny sposób, stosując z jednej strony argumenty czerpane z obfitych zasobów nauk fizycznych i chemicznych, z drugiej zaś – pojęcia, odnoszące się wprost do integralności organizmu i przekraczające zasięg fizyki i chemii”⁴³⁷. Chociaż duński fizyk uważał, że perspektywa obejmująca komplementarność była konieczna zarówno do badania zjawisk atomowych, jak i fenomenu życia, widział także zasadniczą różnicę między tymi dwiema dziedzinami⁴³⁸. „Musimy jednak przy tym pamiętać – podkreśla Bohr – że warunki w fizycznych i w biologicznych badaniach nie są bezpośrednio porównywalne, ponieważ konieczność utrzymywania przy życiu obiektu będącego przedmiotem badania nakłada ograniczenia na te badania, co nie ma odpowiednika w fizyce”⁴³⁹.

Bohr stoi twardo na stanowisku, że opisy teleologiczne nie mogą być wyeliminowane z opisu układów ożywionych⁴⁴⁰. Pisze: „W samej rzeczy [...] postawy poznawcze, jak mechanistyczna i finalistyczna, nie wyrażają sprzecznych poglądów na problemy biologiczne, ale raczej podkreślają warunki obserwacji wzajemnie się wyłączające, a jednak równie konieczne w naszych usiłowaniach coraz pełniejszego opisu procesów życiowych”⁴⁴¹. Duński fizyk twierdzi, że obydwa opisy, mechanistyczny i teleologiczny, muszą być traktowane jako komplementarne przy eksploracji organizmu żywego: „Niewątpliwie, dopóki ze względów praktycznych czy epistemologicznych opisujemy życie, będą stosowane tego rodzaju terminy teleologiczne jako uzupełnienie (dopełnienie) terminologii biologii molekularnej”⁴⁴². Jednak stanowisko Bohra zdecydowanie różniło się od starszego teleologicznego

⁴³⁵ Por. P. Hoyningen-Huene, *Niels Bohr's argument...*, s. 240–241.

⁴³⁶ Por. tamże, s. 238.

⁴³⁷ N. Bohr, *Jedność wiedzy* [w:] N. Bohr, *Fizyka atomowa a wiedza ludzka*, s. 116.

⁴³⁸ Por. N. Roll-Hansen, *The application of complementarity...*, s. 439.

⁴³⁹ N. Bohr, *Światło i życie*, s. 20–21.

⁴⁴⁰ Na konieczność uwzględniania teleologicznych opisów przy wyjaśnianiu układów ożywionych szczególną uwagę zwracał Immanuel Kant.

⁴⁴¹ N. Bohr, *Fizyka a zagadnienie życia*, s. 150–151.

⁴⁴² Tenże, *Light and life revisited* [w:] D. Favrholt (ed.), *Niels Bohr. Collected works. Vol. 10...*, s. [167].

argumentu wyjaśniania głoszonej przez witalistów⁴⁴³. Wyrażnie odrzucał witalistyczne przekonanie, że jeśli dwa opisy różnią się zasadniczo swoimi pojęciami opisowymi tak, że nie mogą być zredukowane do innych (tak jak w przypadku opisów celowościowych i mechanistycznych), to opisy te muszą odnosić się do odrębnych obiektów. Odrzucał metafizyczną obronę nieredukowalności teleologicznego opisu w biologii, akceptując możliwość, że jedna i ta sama rzeczywistość może wymagać więcej niż jednego rodzaju opisu⁴⁴⁴.

Co uderza w koncepcji życia duńskiego fizyka? Z całą pewnością sam autor nie akceptował do końca redukcjonizmu. Centralne antyredukcjonistyczne twierdzenie Bohra jest następujące: życie lub dokładniej funkcje osobliwe dla życia nie mogą być wyjaśnione za pomocą samej fizyki czy chemii⁴⁴⁵. Przez fizyczne lub chemiczne wyjaśnienie rozumie on to, w którym bardziej złożone zjawiska są redukowane do zjawisk prostszych. Dostrzega analogię, jaka zachodzi pomiędzy kwantem działania a pojęciem życia. Stwierdza: „Z tego punktu widzenia istnienie życia musimy uważać w biologii za elementarny fakt, tak jak istnienie kwantu działania przyjmujemy jako coś pierwotnego, co nie może być wyprowadzone ze zwykłej mechaniki”⁴⁴⁶. W innym miejscu pisze: „W tym sensie istnienie życia należałoby uważać zarówno co do jego definicji, jak też obserwacji za podstawowy postulat biologii, niepoddający się dalszej analizie, podobnie jak istnienie kwantu działania wraz z atomistyczną strukturą materii jest elementarną podstawą fizyki atomowej”⁴⁴⁷.

⁴⁴³ Por. D. Fleming, *Émigré physicists...*, s. 218.

⁴⁴⁴ Według wszelkiego prawdopodobieństwa Bohr przejął to spojrzenie od Høffdinga, który uważał, że w biologii można oczekiwać gruntownego postępu w przyczynowo-fizycznym wyjaśnieniu, niemniej zawsze pozostaną niewyjaśnione podstawowe fakty „życia” symbolizujące elementarną autonomię, czy też brak możliwości zredukowania biologii do fizyki. W trakcie swojej kariery Høffding konsekwentnie powtarzał, że kompletny opis rzeczywistości można osiągnąć tylko za pomocą wielu punktów widzenia. Terminem, jaki przypisał do tych różnych perspektyw opisu doświadczenia, była „analogia”. Uważał „holistyczny” opis za niezbędny i niesprowadzający się do mechaniki, ale też odrzucał witalistyczne podejście do układów ożywionych akcentujące ich ontologiczną odrębność od układów nieożywionych. Stosował wiele „analogii”, przez które opisywał systemy biologiczne, gdyż stał na stanowisku, że całościowy opis jest niezbędny do ukazania zjawisk występujących w układach ożywionych. Por. D. Fleming, *Émigré physicists...*, s. 213–214. Por. N. Roll-Hansen, *The application of complementarity...*, s. 420–421. Por. N. Roll-Hansen, *Niels Bohr and Max Delbrück: balancing autonomy and reductionism in biology* [w:] P.R. Sloan, B. Fogel (eds), *Creating a physical biology. The Three-Man Paper and early molecular biology*, The University of Chicago Press, Chicago–London 2011, s. 153–154.

⁴⁴⁵ Por. P. Hoyningen-Huene, *Niels Bohr's argument...*, s. 236.

⁴⁴⁶ N. Bohr, *Światło i życie*, s. 21.

⁴⁴⁷ Tenże, *Biologia a fizyka atomowa* [w:] N. Bohr, *Fizyka atomowa a wiedza ludzka*, s. 37.

Bohr był bardzo sceptyczny co do tego, że chemia zapewni jakiegokolwiek wyjaśnienia pogłębiające nasze rozumienie życia⁴⁴⁸. Pisze: „analogie wzięte ze zwykłych chemicznych zjawisk, jak na przykład porównanie przez starożytnych życia do ognia, nie prowadzą oczywiście do bardziej zadowalającego wyjaśnienia organizmów żywych niż ich podobieństwo do czysto mechanicznego urządzenia, jakim jest zegar” (jest to nawiązanie do mechanicyzmu kartezjańskiego)⁴⁴⁹. Duński fizyk sugeruje, że chemia nie zapewnia lepszego wytłumaczenia niż mechanistyczne modele wyjaśniające fenomen życia. Uważa chemiczne wyjaśnienie za niewystarczające, ponieważ skład chemiczny organizmu żywego podlega ciągłym zmianom dzięki interakcji ze środowiskiem. Wyraża to w następujący sposób: „Dla badań biologicznych natomiast jest typowe – mimo ważności cech atomistycznych – że nie możemy nigdy ustalić zewnętrznych warunków, którym podlegają pojedyncze atomy, w takim stopniu, jaki jest możliwy w doświadczeniach fizyki atomowej. W samej rzeczy, nie możemy nawet powiedzieć, które z poszczególnych atomów rzeczywiście znajdują się w żyjącym organizmie, gdyż każdej funkcji życiowej organizmu towarzyszy wymiana materii, w wyniku której jedne atomy dostają się do organizmu, a inne są przezeń wydalone”⁴⁵⁰. Bohr utrzymuje, że do gruntowanej analizy organizmu żywego metodami fizyki i chemii konieczne są szczegółowe eksperymenty, których efektem jest doprowadzenie organizmu do śmierci⁴⁵¹. Warunki, pod którymi organizm staje się odpowiednim obiektem dla fizyki i chemii, są w związku z tym niekompatybilne z kontynuowaniem przez organizm życia⁴⁵². Ponadto warunki, pod którymi organizm jest odpowiednim obiektem do badań biologicznych, to jest te, pod którymi wzrastają charakterystyczne zjawiska życia, czynią użycie konceptów fizycznych niemożliwymi⁴⁵³. Wyniki analizy fizycznej układów ożywionych i ich opis w znaczeniu charakterystycznych zjawisk biologicznych są teoretycznie niemożliwe do pogodzenia⁴⁵⁴. Bohr stwierdza: „Gdybyśmy na przykład usiłowali prowadzić badania narządów zwierząt tak dokładnie, by móc określić znaczenie pojedynczych atomów w funkcjach życiowych organizmu, musielibyśmy niewątpliwie zabić zwierzę. W każdym doświadczeniu na żyjących organizmach musi więc wystąpić pewna nieoznaczoność fizycznych warunków, którym organizm podlega; stąd na-

⁴⁴⁸ Por. N. Roll-Hansen, *The application of complementarity...*, s. 439.

⁴⁴⁹ N. Bohr, *Światło i życie*, s. 18.

⁴⁵⁰ Tamże, s. 21–22.

⁴⁵¹ Por. F. Selleri, *Wielkie spory w fizyce kwantowej*, s. 117.

⁴⁵² Por. P. Hoyningen-Huene, *Niels Bohr's argument...*, s. 250.

⁴⁵³ Por. tamże, s. 250–251.

⁴⁵⁴ Por. tamże, s. 249.

suwa się myśl, że ta minimalna swoboda pozostawiona organizmowi jest właśnie dostatecznie duża, by organizm mógł – że tak powiem – ukryć przed nami swój najtajniejszy sekret”⁴⁵⁵.

Dlaczego Bohr nie szukał wyjaśnienia fenomenu życia w kontekście chemii? W rzeczywistości przywoływany wyżej fragment, w którym mówi on o niemożliwości chemicznego wyjaśnienia, jest jednym z nielicznych w jego publikacjach poświęconych kwestiom biologicznym, w których chemia pojawia się w tym kontekście. Najczęściej zwyczajnie mówi o fizyce, nie wspominając o chemii. Pomijanie przez Bohra chemii nie wynika z prostego uprzedzenia do tej nauki jako gorszej, ale z głębokich rozważań teoretycznych⁴⁵⁶. Nie uważał on, że chemia jest niezależnym źródłem pojęć teoretycznych czy twierdzeń ontologicznych⁴⁵⁷. Wraz z nadejściem fizycznej teorii atomu chemia w zasadzie stała się nauką wywodzącą się z fizyki⁴⁵⁸. Bohr i inni współcześni mu fizycy mieli tendencję do postrzegania chemii jako dyscypliny posiadającej w stosunku do fizyki małą lub żadną autonomię. Stąd było mało prawdopodobne, by chemia miała mieć ważny wkład w sformułowanie wniosków dotyczących materialnej podstawy życia.

Bohr zasugerował występowanie dodatkowych, ale jeszcze nieodkrytych praw fizyki. Innymi słowy, poszukiwał dalszych uogólnień mechaniki w celu zrozumienia fenomenu życia. Stanowisko duńskiego fizyka w tej kwestii jest jednak bardzo niejednoznaczne⁴⁵⁹. Z jednej strony z pewnością zakłada możliwość, że istnieją pewne ważne aspekty fenomenu życia, które nie są jeszcze odkryte. Píše: „Rozpoznanie istotnego znaczenia cech atomistycznych w mechanizmie organizmów żywych nie jest jednak wystarczające do systematycznego wyjaśniania zjawisk biologicznych. Powstaje zatem pytanie, czy nie brak nam jeszcze pewnych istotnych w strukturze przyrody elementów, koniecznych do zrozumienia życia na podstawie doświadczeń fizycznych”⁴⁶⁰. Z drugiej strony trudności w zrozumieniu stanowiska Bohra wynikają z niejasności tego, co miał na myśli, mówiąc o „cechach obcych materii nieożywionej”⁴⁶¹ oraz tego, w jakim sensie są „przed” fizycznym doświadczeniem⁴⁶². Bohr zdecydowanie odrzuca możliwości, że badania nad mate-

⁴⁵⁵ N. Bohr, *Światło i życie*, s. 21.

⁴⁵⁶ Por. N. Roll-Hansen, *The application of complementarity...*, s. 440.

⁴⁵⁷ Por. tamże, s. 424.

⁴⁵⁸ Por. P. Hoyningen-Huene, *Niels Bohr's argument...*, s. 237.

⁴⁵⁹ Por. N. Roll-Hansen, *The application of complementarity...*, s. 424, 440.

⁴⁶⁰ N. Bohr, *Światło i życie*, s. 20.

⁴⁶¹ Por. tamże, s. 20.

⁴⁶² Por. N. Roll-Hansen, *The application of complementarity...*, s. 457.

riałem biologicznym ujawnią siłę życiową, która jest niewytłumaczalna w kategoriach fizycznych. Stwierdza: „Z jednej strony zadziwiające cechy obficie odkrywane w badaniach fizjologicznych i tak bardzo różne od tego, co jest znane w materii nieożywionej, prowadzą biologów do przekonania, że należyte zrozumienie istotnych aspektów życia nie jest możliwe na gruncie czysto fizycznym. Z drugiej strony pogląd zwany witalizmem nie znajduje chyba swego jednoznacznego wyrazu w założeniu, że całym życiem organicznym rządzi specjalna, nie znana fizyce siła witalna”⁴⁶³. Badacz przy tym sugeruje, że klucz do zrozumienia życia ma swoje podstawy w badaniu organizacji materii ożywionej, a nie jej składu⁴⁶⁴. Tu zdaje się leżeć meritum koncepcji życia Bohra. Nie widział on różnic pomiędzy składem ożywionej i nieożywionej materii. Zamiast tego namawiał innych do badania, jak materia jest zorganizowana w organizmach żywych. Píše: „Nie ulega bowiem wątpliwości, że istotnych cech życia należy szukać w pewnej szczególnej organizacji, w której przeplatają się własności dostępne zwykłej analizie mechanicznej z cechami typowo atomowymi w rozmiarze nie spotykanym w materii nieożywionej”⁴⁶⁵. W jego opinii, jeśli jest coś nowego do odkrycia w badaniach nad życiem, można to znaleźć w sposobie, w jaki są zorganizowane jego składniki materialne⁴⁶⁶.

W dyskusjach o redukcjonizmie, w których biorą udział biolodzy, dokonuje się rozróżnienia pomiędzy epistemologicznym, ontologicznym i metodologicznym redukcjonizmem. Jak zatem można scharakteryzować stanowisko Bohra w wyżej wymienionych kwestiach? Jego podejście generalnie sugeruje epistemologiczny antyredukcjonizm w odniesieniu do relacji pomiędzy fizyką a biologią⁴⁶⁷. Jest to wynik twierdzenia, że typowe biologiczne zjawiska nie mogą być wstecznie śledzone przez fizyczne koncepcje i prawa, co skutkuje tym, że takie koncepcje i prawa są co do zasady niewystarczające dla dedukcyjnego wyprowadzenia typowych praw biologicznych. Na płaszczyźnie ontologicznej stanowisko Bohra jest wyraźne: twierdzi, że życie może naprawdę być zrozumiałe na czysto fizycznych podstawach. „Myślę bowiem – pisze – że wszyscy zgadzamy się z poglądem Newtona, w myśl którego podstawą nauki jest oczekiwanie, że w przyrodzie w tych samych warunkach występują te same efekty. Gdybyśmy zatem mogli posunąć analizę mechanizmu organizmów żywych tak daleko, jak analizę zjawisk atomowych, to nie powinniśmy spodziewać się, że znajdziemy jakieś

⁴⁶³ N. Bohr, *Światło i życie*, s. 20.

⁴⁶⁴ Por. N. Roll-Hansen, *The application of complementarity...*, s. 457.

⁴⁶⁵ N. Bohr, *Światło i życie*, s. 18–19.

⁴⁶⁶ Por. N. Roll-Hansen, *The application of complementarity...*, s. 440.

⁴⁶⁷ Por. P. Hoyningen-Huene, *Niels Bohr's argument...*, s. 239.

cechy obce materii nieożywionej”⁴⁶⁸. Stanowisko duńskiego fizyka pociąga za sobą metodologiczny antyredukcjonizm – w fizyce niewystarczające jest wyjaśnienie typowych biologicznych zjawisk, takie zjawiska muszą być również badane na poziomie wyższym niż molekularny⁴⁶⁹.

2.3. RECEPCJA POGLĄDÓW BOHRA NA FENOMEN ŻYCIA

Biologiczne poglądy Bohra nie spotkały się z uznaniem większości biologów⁴⁷⁰. Herman Joseph Muller, jeden z najwybitniejszych genetyków, określił poglądy Bohra jako „beznadziejnie witalistyczne”⁴⁷¹. Z kolei Otto Fritz Meyerhof, niemiecki biochemik⁴⁷², pogląd Bohra mówiący, że fizjologiczna i biochemiczna analiza były naukowo bezzasadne (ponieważ proces obserwacji zaburzał lub niszczył tę samą rzecz, do jakiej obserwacji dążył), uznał za podważający wszystkie eksperymentalne badania procesów życiowych⁴⁷³. Meyerhof pisze: „Fizjologia ogólna zmierza dokładnie do tego, aby uczynić możliwym to, co zgodnie z przypuszczeniem fizyków powinno być niemożliwe do zrobienia; jednocześnie zbadać i zachować niezmiennym proces życia”⁴⁷⁴. Na poparcie swego stanowiska Meyerhof odwołuje się do szeregu przykładów, na przykładzie własnych badań oraz prac swojego nauczyciela Otto Warburga⁴⁷⁵. W przypadku organizmów jednokomórkowych badania mogły być przeprowadzane z zachowaniem odwracalności skutków – na przykład pomiary zużycia tlenu przez komórkę drożdży mogły być dokonane bez zakłócania normalnego życia i wzrostu tej komórki. Pisze: „Zajmując się przykładowo jako materiałem badawczym komórką drożdżową, nie potrzebujemy żadnych metod wyodrębniania. Proces życiowy przebiega w probówkach laboratoryjnych bez zakłóceń i ewentualny pomiar

⁴⁶⁸ N. Bohr, *Światło i życie*, s. 20.

⁴⁶⁹ Por. P. Hoyningen-Huene, *Niels Bohr's argument...*, s. 240.

⁴⁷⁰ Por. D. Favrholt, *Introduction*, s. [15]. Por. F. Aaserud, *Redirecting science...*, s. 97.

⁴⁷¹ Por. N. Roll-Hansen, *The application of complementarity...*, s. 426.

⁴⁷² Meyerhof odkrył podstawowe reakcje chemiczne w mięśniach, które przemieniają węglowodany w kwas laktowy i energię. Jego praca umożliwiła innym naukowcom oszacowanie wydajności mięśni jako maszyny napędzanej paliwem chemicznym. Badacz poświęcił się także idei pełnego opisu procesów biologicznych przez chemię i fizykę. Meyerhof miał olbrzymi wpływ na rozwój biochemii. W 1922 roku za swoją pracę otrzymał wraz z sir Archibaldem Vivanem Hillem Nagrodę Nobla w dziedzinie fizjologii. Por. E. Mendelsohn, *Otto Fritz Meyerhof* [w:] E. Mendelsohn (ed.), *Life sciences...*, s. 116.

⁴⁷³ Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 136.

⁴⁷⁴ O. Meyerhof, *Betrachtungen über die naturphilosophischen Grundlagen der Physiologie*, „Die Naturwissenschaften”, 20 (1934), s. 311.

⁴⁷⁵ Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 136.

zużycia tlenu daje się tak urządzić, że samo pobieranie tlenu nie ulega zmianie. Jeśli podejmiemy tego rodzaju zmianę po prostu w takim celu, aby na przykład wyjaśnić [proces] oddychania i wprowadzimy substancję chemiczną w formie roztworu obcą danej komórce, czynimy tak, zakładając, że oddziaływanie tej substancji jest odwracalne, to znaczy, że oddychanie wraz z wydalaniem substancji uzyskuje swoje pierwotne parametry. Upewniliśmy się przez to, że proces życiowy nie będzie zniekształcany [nie będzie się mu szkodzić] w sposób niekontrolowany. Tak więc tego rodzaju oddziaływanie było nieco podobne do odchyłania się igły magnetycznej pod wpływem magnesu, który przybliżyliśmy do niej, zaś gdy go odsuniemy, to igła powraca na swoje dawne położenie”⁴⁷⁶. Chociaż badanie narządów wyższych organizmów prowadziło ostatecznie do ich śmierci, jednak często po czasie pozwalającym na zbadanie reakcji takiego organizmu na przykład na bodźce elektryczne⁴⁷⁷. „Jeśli chodzi o funkcje związane z organizmami wyższego rzędu – pisze Meyerhof – to badamy je w miarę możliwości, studiując organ podtrzymywany przy życiu. Znany fakt jest to, iż wraz ze śmiercią zwierzęcia jako całości, będącą przede wszystkim śmiercią centralnego układu nerwowego, nie wszystkie organy umierają jednocześnie. Najłatwiej potrafimy utrzymać przy życiu organy zwierząt zimnokrwistych, które mogą przeżyć jeszcze wiele godzin. Tak więc wyizolowany mięsień kurczy się wraz z łączącym go nerwem, na skutek pobudzenia elektrycznego, tak samo jak to ma miejsce w momencie naturalnego pobudzenia nerwowego i kurczenia się mięśnia. Z pewnością niektóre z funkcjonujących wcześniej mechanizmów regulacyjnych przestały istnieć i tego nie można pominąć, ale istotny proces życiowy, który chcielibyśmy zbadać (w naszym przykładzie dotyczy to kurczenia się mięśni), jeszcze przebiega. W innych przypadkach nie zachodzi potrzeba takiego wydzielenia (jakiegoś narządu) z ciała. Ewentualne badanie elektrycznej aktywności jakiegoś nerwu funkcjonującego przy naturalnym pobudzeniu pozwoli na dokładne studia, tylko wtedy, gdy ten nerw zostanie wyizolowany nieco poza organizm i dokonana zostanie ingerencja w celu zbadania naturalnej fali pobudzenia, przechodzącej przez nerwy, nie wywoła w nim żadnych zmian”⁴⁷⁸. Zdaniem Meyerhofa w po-

⁴⁷⁶ O. Meyerhof, *Betrachtungen über die naturphilosophischen...*, s. 311.

⁴⁷⁷ Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 136.

⁴⁷⁸ O. Meyerhof, *Betrachtungen über die naturphilosophischen...*, s. 311. Podobnego zdania jest Edgar Zilsel, który nie zgadza się z tym, że każda żyjąca istota musiałaby być zabita przy obserwacji jej mikrostanu. Badacz twierdzi: „Również każdy pracujący generator prądu zmiennego musi zostać wyłączony i rozebrany na części, jeżeli ma być stwierdzony jego stan początkowy – przebieg uzwojenia. Nikt nie wyciągnie z tego wniosku, że funkcjonowanie pracującego generatora jest »zasadniczo« nieprzewidywalne. Jednak zdekompletowany generator można łatwo ponownie uruchomić po jego złożeniu, podczas gdy ożywieniu

równaniu do produktywności badań fizjologicznych aplikujących zwykle terminy przyczynowego, fizyczno-chemicznego wyjaśnienia, mówienie o biologicznej roli „niekompletnie określonych procesów elementarnych” jawi się jako „czyste spekulacje”⁴⁷⁹. Biochemicy i fizjologowie wiedzieli już, jak „układać swoje puzzle” i nie potrzebowali do tego rad „fizycznej strony” reprezentowanej przez Bohra.

Biologiczne spekulacje Bohra nie spotkały się także z uznaniem części filozofów.

Kenneth F. Schaffner uważa, że zasada komplementarności Bohra nie znajduje uzasadnienia w świetle rozwijających się technik współczesnej biologii molekularnej⁴⁸⁰. „Chociaż dość często – twierdzi Schaffner – dochodzi do uśmiercenia organizmu i analizy jego zawartości chemicznej, to biolog molekularny może z powodzeniem zastosować swą wiedzę w innych, podobnych organizmach. Co więcej, sztucznie zszyte chemikalia o znanej z góry strukturze mogą zostać »podane« istotom żywym i wykorzystane do pozyskania licznych informacji na temat funkcjonowania ich procesów chemicznych”⁴⁸¹.

Także fizycy, tacy jak przykładowo Howard Hunt Pattee, nie zgadzali się z koncepcją Bohra. Pattee zauważa, że wielu fizyków ma poważne wątpliwości co do możliwości wyjaśnienia materii ożywionej w kontekście mechaniki kwantowej⁴⁸². W szczególności przypomina, że Bohr często spekulował, że zasada komplementarności uniemożliwia jednoczesny opis fizyczny i biologiczny, zaś stan życia powinien być traktowany jako nieredukowalny – zarówno w definicji, jak i obserwacji. Ani klasyczne, ani statystyczne, termodynamiczne bądź kwantowomechaniczne prawa nie wystarczą same w sobie do opisania kluczowych właściwości życia. Pattee jest innego zdania. Stoi na stanowisku, że będzie można zinterpretować proces dziedziczności w kategoriach podstawowych praw fizycznych poprzez

rozłożonego organizmu stoją na przeszkodzie trudności nie do przezwyciężenia. Zakładając jednak, że trudności te byłyby »zasadniczo« wyłączone, to właśnie w sposób oczywisty wymaganie, które ma być przez cały tok myśli dopiero udowodnione, nazywałoby się witalistyczno-niefizykalną specyfiką żyjących istot. Argument dotyczący związanego z obserwacją, niezbędnego zabicia życia nie udowadnia tym samym tezy witalistycznej, lecz ją z góry zakłada”. E. Zilsel, *P. Jordans Versuch, den Vitalismus Quantenmechanisch zu Retten*, „Erkenntnis”, 5 (1935), s. 61.

⁴⁷⁹ Por. O. Meyerhof, *Betrachtungen über die naturphilosophischen...*, s. 311. Por. R.H. Beyer, *From positivism to organicism...*, s. 136.

⁴⁸⁰ Por. K.F. Schaffner, *Antireductionism and molecular biology*, „Science”, 157 (1967), s. 645.

⁴⁸¹ Tamże, s. 645.

⁴⁸² Por. H.H. Pattee, *Quantum mechanics, heredity and the origin of life*, „Journal of Theoretical Biology”, 3(17) (1967), s. 414.

asocjację opisu molekularnego procesu dziedziczności z opisem pomiaru w układzie kwantowomechanicznym⁴⁸³. Sugeruje, że w pewien sposób molekularne procesy dziedziczne są powiązane z kwantową teorią pomiaru⁴⁸⁴. Stoi więc na stanowisku, że najbardziej ogólny i formalnie precyzyjny język opisujący molekularne zachowania to mechanika kwantowa⁴⁸⁵.

Współczesny autor, Józef Misiek, pozytywnie ocenia zasadę komplementarności jedynie w obrębie fizyki. Przez znaczną część XX wieku fizyka była uważana za podstawową naukę przyrodniczą⁴⁸⁶. Redukcjonizm (a więc pogląd, według którego wszystkie właściwości nieożywionej i ożywionej materii mogą być zrozumiane odpowiednio jedynie dzięki podstawowym pojęciom fizyki) miał ogromny wpływ na fizyków. Zastrzeżenia, jakie miał Bohr w stosunku do ekstremalnego redukjonizmu, były nie wycofaniem się z podstawowego statusu fizyki w naukach przyrodniczych, lecz wyrazem jego wiary w ostateczne ograniczenia wyjaśnienia fizyczno-chemicznego. Misiek twierdzi, że Bohr nie chciał (jak neopozytywiści) zredukowania biologii do fizyki i odrzucenia z niej wszystkiego, co do fizyki zredukować się nie dało⁴⁸⁷. Bohr myślał o unifikacji wyłącznie w kategoriach metodologicznych, a nie merytorycznych. Poza tym sprzeczności w nauce, które postuluje zasada komplementarności, mogą być czymś pozytywnym w wymiarze heurystycznym. Misiek pisze: „logiczna zasada sprzeczności jest niewątpliwie prawdziwa, ale dotyczy wiedzy gotowej. Droga do takiej wiedzy prowadzi często przez etapy, w których sprzeczności mogą występować”⁴⁸⁸. Autor krytycznie ocenia zasadę komplementarności poza fizyką, w tym w obszarze rozważań biologicznych⁴⁸⁹. Jego zdaniem idea ta nie miała żadnego przełożenia na jakiegokolwiek sukcesy w tych naukach, dlatego w zasadzie komplementarności poza fizyką widzi jedynie powierzchowną analogię, która w żaden sposób nie wskazuje na nowe drogi poznania.

Lily E. Kay także wyraża swoje krytyczne stanowisko względem koncepcji życia sformułowanej przez Bohra. Twierdzi, że porównanie, jakiego dokonał pomiędzy strukturami w pomiarach biologicznych a tymi powiązanymi ze zjawiskami atomowymi, a także analogia jednostek życia z kwan-

⁴⁸³ Por. tamże.

⁴⁸⁴ Por. tenże, *The physical basis of coding and reliability in biological evolution* [w:] C.H. Waddington (ed.), *Towards a theoretical biology. Vol. 1*, Edinburgh University Press, Edinburgh 1968, s. 79.

⁴⁸⁵ Por. tenże, *Physical problems of heredity and evolution* [w:] C.H. Waddington (ed.), *Towards a theoretical biology. Vol. 2*, Edinburgh University Press, Edinburgh 1969, s. 281.

⁴⁸⁶ Por. N. Roll-Hansen, *The application of complementarity...*, s. 418.

⁴⁸⁷ Por. J. Misiek, *Komplementarności zasada*, s. 312.

⁴⁸⁸ Tamże, s. 312.

⁴⁸⁹ Por. tamże.

tem działania są bardzo zagmatwane⁴⁹⁰. Zdaniem Kay wynika to z faktu, iż Bohr dokonał połączenia dwóch odmiennych argumentacji. Zgodnie ze słabszym argumentem, w biologii nie da się zredukować opisów teleologicznych do mechanicznych. Oznacza to, że są one komplementarne. Drugi, silniejszy argument opiera się na zasadzie komplementarności w fizyce oraz na założeniu, że narzędzia kolidują z organizmem, a więc wiążą się z koniecznością uśmiercenia go w trakcie eksperymentu. Drugi argument Bohra, w którym usiłował stwierdzić podobieństwo z sytuacją kwantową, nie był – jak twierdzi Kay – prawdziwą analogią, ponadto utrzymanie organizmu przy życiu w trakcie badania biochemicznego nie prowadziło do powstania żadnego rodzaju fizycznego impasu właściwego układowi kwantowemu. „Tak właściwie – konkluduje Kay – to radioizotopy wykorzystywane na Uniwersytecie Kopenhaskim przez Augusta Krougha i Georga von Heveseya od lat dwudziestych XX wieku umożliwiały wykonywanie cząsteczkowych opisów procesów metabolicznych zachodzących w organizmach żywych. Bohr wiedział o tych badaniach”⁴⁹¹.

Wobec idei biologicznych Bohra nie przeszli jednak obojętnie niektórzy znani chemicy, jak Fryderyk Donnan, który doceniał niezwykłą precyzję, z jaką duński fizyk analizował fenomen życia. Donnan pisze: „Jeśli przyznamy, że naukowe wyjaśnienie zjawisk opiera się w ostateczności na logicznym lub matematycznym sformułowaniu relacji wśród mierzalnych lub obserwowalnych ilości, pogląd, jaki możemy przyjąć bez redukowania naszych wyjaśnień naukowych do czysto pozytywistycznego formalizmu – jak z dużą precyzją wykazał Bohr – dotyczyłby tego, że formuła matematyczna nie może zawierać rzeczy lub zbioru rzeczy, które są zasadniczo (»teoretycznie«) niezdolne do dokonania dokładnego pomiaru. [...] W kilku swoich ostatnich publikacjach Bohr stosował nieco analogiczne rozumowanie dla biosystemów (organizmów żywych). Nie jest to kwestia ograniczenia ze względu na istnienie stałej Plancka h , co raczej ograniczenie ze względu na szczególną funkcjonalność życia. Innymi słowy, jeśli chcemy zmierzyć równocześnie wszystkie parametry niezbędne do uzyskania dokładnego fizycznego opisu organizmu żywego, musimy siłą rzeczy taki organizm uśmiercić [...]. Zewnętrzny obiekt nadal będzie istniał, niemniej jego wewnętrzno-zewnętrzne zależności funkcjonalne ulegną zmianie. Możemy w istocie nazwać tę nową ideę Bohra zasadą nieokreśloności funkcjonalnej. W pomiarze układu nieożywionego możemy pobrać tak wiele identycznych próbek, jak wymaga tego przeprowadzenie i finali-

⁴⁹⁰ Por. L.E. Kay, *Quanta of life: atomic physics and the reincarnation of phage*, „History and Philosophy of the Life Sciences”, 14 (1992), s. 7.

⁴⁹¹ Tamże, s. 7–8.

zacja wszystkich możliwych pomiarów. Ta repetycja identycznych próbek pozwala wykluczyć czynnik czasu w technice pomiaru. Tyle że organizm żywy żyje w czasie. Nie możemy przywrócić go w czasie ani też »pobrać« (wykreować) serii identycznych próbek. Być może to właśnie ten swoisty, powiązany z czasem (historyczny) charakter organizmu żywego stanowi źródło nowej zasady sformułowanej przez Bohra. W organizmie żywym przeszłość wydaje się dosięgać i obejmować przyszłość. Opis »ewolucji« nie wydaje się więc sprowadzać do czysto różnicowej analizy czasu, ale wymaga również zasadniczego zaangażowania integralnej zależności czasowej, czyli inaczej integralnej analizy czasowej. Pozwalając sobie zasięgnąć terminologii filozoficznej, wydaje się istnieć znaczny stopień holizmu w odniesieniu do czasu (»chronoholizm«)⁴⁹².

Także wielu współczesnych autorów docenia wkład Bohra w rozumienie procesów życiowych. Historyk nauki Robert Nadeau i fizyk Menas C. Kafatos przekonują, że formułując swoje antyredukjonistyczne argumenty w biologii, wykazał się on niezwykłą ponadczasową zdolnością przewidywania⁴⁹³. Podkreślają, że fizyczny opis wszystkich mechanizmów cząsteczki DNA wcale nie stanowi kompletnego opisu. Piszą: „Jakość życia powiązana ze znanym mechanizmem replikacji DNA występuje poza uprzedmiotowionym opisem w ciągłej interakcji organizmu z środowiskiem, w którym się znajduje. Sugeruje to, że musimy, tak jak zrobił to Bohr, wywnioskować, że prawa natury wyjaśniające regularności biologiczne lub zachowania, które wiążemy z życiem, nie są jedynie prawami fizyki matematycznej. Nie pozbylibyśmy się tego problemu, nawet gdybyśmy byli w stanie zreplikować wszystkie podstawowe mechanizmy życia poprzez manipulowanie materią nieożywioną w laboratorium. W celu udowodnienia, że w tym eksperymencie nie biorą udziału żadne inne prawa poza prawami fizyki matematycznej, musielibyśmy stworzyć życie bez wykorzystania interakcji ze środowiskiem, w którym utrzymuje się lub z którym komunikuje się forma życiowa”⁴⁹⁴. Nadeau i Kafatos przekonują, że mechanizmy biologiczne nie mogą być całkowicie wyjaśnione zgodnie z prawami fizyki⁴⁹⁵. Specyficzna ścieżka ewolucyjna organizmów żywych jest wyjątkowa i nie może być opisana całościowo na podstawie ogólnego zastosowania praw fizyki.

Barbara Góra, polska biolog, stoi na stanowisku, że zasada komplementarności jako nowy sposób naukowego myślenia miała duży wpływ na roz-

⁴⁹² F.G. Donnan, *Integral analysis and the phenomena of life*, „Acta Biotheoretica”, 2 (1936), s. 1–2.

⁴⁹³ Por. R. Nadeau, M. Kafatos, *Non-local universe...*, s. 106.

⁴⁹⁴ Tamże.

⁴⁹⁵ Por. tamże, s. 107.

wój biologii⁴⁹⁶. W szczególności autorka odnosi zasadę komplementarności do morfologii i fizjologii, w ramach których istotne są wzajemne stosunki między formą, typem i funkcją. Góra pisze: „Komplementarność w morfologii i fizjologii, a więc w odniesieniu do struktury i funkcji oznacza wzajemną, logiczną niezależność jednej i drugiej bądź niemożność wyprowadzenia jednej kategorii z drugiej. Morfologię interesuje na przykład różnorodność układów i organów w organizmie, fizjologię natomiast same procesy, na przykład proces krążenia krwi w organizmie, pracy serca, oddychania, wydalania itp. Na tym polega podstawowa różnica między morfologią i fizjologią. Morfologia jest dla fizjologii reprezentantem wyłącznie »żywej substancji«, a fizjologia dla morfologii jest jedynie ogólnym obrazem działania form, który bynajmniej nie jest z nimi nierozłącznie związany. Można stwierdzić, iż ani fizjologia nie może stać się teoretyczną częścią morfologii, ani morfologia teoretyczną częścią fizjologii, gdyż obie są od siebie niezależne i stanowią samodzielne dyscypliny biologiczne, obejmujące łącznie całość biologii, każda we właściwy dla siebie sposób. Znaczy to, że forma i funkcja wzajemnie się uzupełniają, a więc są komplementarnymi kategoriami biologicznymi, a morfologia i fizjologia – komplementarnymi dyscyplinami. Komplementarność formy – struktury i funkcji obejmuje wzajemne stosunki między dwiema podstawowymi dyscyplinami biologicznymi, jest pierwszym rodzajem komplementarności stwierdzonym w naukach biologicznych»⁴⁹⁷. Zasada komplementarności może dotyczyć także stosunku między światem zewnętrznym i wewnętrznym organizmu⁴⁹⁸. Przez środowisko rozumiemy w tym kontekście nie fizyczne otoczenie organizmu (środowisko wodne czy lądowe), ale środowisko biologiczne danej formy organicznej. Otoczenie fizyczne i ich własne środowiska biologiczne, w obrębie których żyją organizmy, jakościowo różnią się od siebie. „W tym samym środowisku fizycznym – pisze autorka – żyją na przykład lis i zając, ale oba zwierzęta żyją jednocześnie w odmiennych, sobie właściwych specyficznych środowiskach biologicznych. Biologicznie odmienne środowiska zależą również od wewnętrznej organizacji pewnego organizmu, a odmienne środowisko wpływa również na odmienny świat wewnętrzny organizmów. [...] zewnętrzne i wewnętrzne środowiska stanowią kategorie komplementarne. Środowisko oddziałuje bezpośrednio na całość organizmu, a nie na jego poszczególne organy i układy. Całość organizmu przedstawia aktywną i twórczą siłę, która sprawuje czynną kontrolę nad działaniem narządów

⁴⁹⁶ Por. B. Góra, *Struktury biologiczne w nauce i nauczaniu. Studium z biologii teoretycznej i dydaktyki biologii*, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1975, s. 132.

⁴⁹⁷ Tamże, s. 132–133.

⁴⁹⁸ Por. tamże, s. 133.

i układów wewnętrznych, jak również nad powiązaniem organizmu ze środowiskiem. Środowisko i świat wewnętrzny są komplementarnymi kategoriami biologicznymi w obrębie fizjologii”⁴⁹⁹. Góra dostrzega także komplementarność zachodzącą między zjawiskami dziedziczności i adaptacją, którą uważa za jeden z najważniejszych typów komplementarności we współczesnej biologii, porównywalny z tym zachodzącym między cząstkami i falami w mechanice kwantowej. Dziedziczności nie uważa za logicznie podporządkowaną adaptacji. Obie kategorie traktuje jako dwa powiązane z sobą, lecz jednocześnie różne aspekty tego samego biologicznego układu stosunków. Wszystkie powyższe typy komplementarności biologicznej, morfologia–fizjologia, środowisko–świat wewnętrzny, dziedziczność–adaptacja, badaczka postrzega jako dopełniające się aspekty tego samego podmiotu, współdziałające ze sobą z jednej i przeciwstawiające się sobie z drugiej strony, a w sumie dopełniające się wzajemnie, a przez to umożliwiające życie⁵⁰⁰.

Zasadne będzie teraz przejść do kluczowego pytania: w jaki sposób prace biologiczne Bohra zainspirowały fizyków powiązanych z rozwojem teorii kwantowej do zwrócenia uwagi na fenomen życia?

Koncepcję życia duńskiego przyrodnika aprobował wybitny niemiecki fizyk Werner Heisenberg⁵⁰¹. Autor zasady nieoznaczoności uczestniczył w spotkaniach organizowanych przez Bohra w jego domu w Tisville, w czasie których dyskutowano między innymi kwestie biologiczne⁵⁰². Owocem tych dyskusji był artykuł, który jest w dużej mierze komentarzem do biologicznych spekulacji Bohra. Powołując się na poglądy duńskiego fizyka, Heisenberg podkreśla między innymi, że wszystkie prawa fizyczno-chemiczne w organizmie powinny funkcjonować „bez luk”⁵⁰³. Wszędzie tam, gdzie w organizmie żywym dochodzi do zmian mechanicznych lub chemicznych, w celu ich wytłumaczenia wystarczy odwołać się do zasad fizyczno-chemicznych. W tych przypadkach te zasady fizyczno-chemiczne w pełni obowiązują. Swoją pogląd ilustruje przykładem z genetyki: „W zapłodnionej komórce jajowej pętli rdzeniowe układają się obok siebie w taki sposób, że chromosom ojca oraz chromosom matki łączą się w pary, połączenie to musi dać się wytłumaczyć albo na przykład za pomocą sił elektrycznych bądź chemicz-

⁴⁹⁹ Tamże.

⁵⁰⁰ Por. tamże, s. 133–134.

⁵⁰¹ Niektóre aspekty biologicznych poglądów niemieckiego fizyka przedstawiłem w pracach: *Koncepcja życia w ujęciu reprezentatywnych przyrodników...*; *Kontrowersje wokół natury życia w pismach fizyków...*, s. 96–98.

⁵⁰² Por. W. Heisenberg, *Część i całość. Rozmowy o fizyce atomu*, tłum. K. Napiórkowski, Państwowy Instytut Wydawniczy Warszawa 1987, s. 137.

⁵⁰³ Por. tenże, *Gesammelte Werke. Collected Works. Abteil. C. Allgemeinverständliche Schriften. Band IV. Biographisches und Kernphysik*, Piper, München 1942, s. 264.

nych koligacji lub też innych procesów fizyczno-chemicznych⁵⁰⁴. Metody fizyczno-chemiczne obowiązują jednak do momentu, gdy badanie eksperymentalne zakłóci proces i go zmieni⁵⁰⁵. „To, że badania te zakończyć się muszą w tym punkcie – pisze dalej Heisenberg – jest niewykluczone: w przeciwnym wypadku przeważająca częstotliwość procesów, które w oparciu o całość organizmu mają zastosowanie, może zostać niezrozumiana”⁵⁰⁶. Podobnie jak Bohr, Heisenberg nie uważa, że prawa biologiczne da się w pełni wydedukować z praw fizyczno-chemicznych. Stoi on na stanowisku, że fizyka i chemia nie wystarczają, aby wyjaśnić czym życie jest ze swej istoty. Stwierdza: „Organizm z punktu widzenia dotychczasowej teorii atomowej jawi się jako niezwykle mało prawdopodobna struktura, nieprawdopodobny twór – podobnie jak mało prawdopodobne jest z punktu widzenia mechaniki klasycznej istnienie niezliczonej ilości atomów tego samego rodzaju będących częścią substancji”⁵⁰⁷. W pełni podziela pogląd Bohra, że prawa biologiczne pozostają w relacjach komplementarnych z prawami fizyczno-chemicznymi⁵⁰⁸.

Wobec idei biologicznych Bohra nie przeszli obojętnie także inni wybitni fizycy, tacy jak Max Delbrück, Pascual Jordan, Walter Elsasser czy Walter Heitler. Ich koncepcje życia stanowią po części rozwinięcie koncepcji duńskiego naukowca, a po części oryginalne poglądy.

Spekulacje biologiczne Bohra na przełomie lat dwudziestych i trzydziestych XX wieku powiązane były z jego poszukiwaniami nowych tematów i nowych źródeł dochodu dla jego instytutu po tym, jak stracił impet po wcześniejszym chwalebnym okresie⁵⁰⁹. Sam fizyk nigdy nie planował rozpoczęcia pracy w biologii eksperymentalnej. Zdawał sobie doskonale sprawę ze swoich braków w tej dziedzinie. Był jednak zainteresowany motywowaniem młodych fizyków, takich jak Max Delbrück⁵¹⁰, by spróbowali szczęścia

⁵⁰⁴ Tamże.

⁵⁰⁵ Por. tamże, s. 264–265.

⁵⁰⁶ Tamże, s. 265.

⁵⁰⁷ Tamże, s. 264–265.

⁵⁰⁸ Por. tamże, s. 265.

⁵⁰⁹ Por. N. Roll-Hansen, *Niels Bohr and Max Delbrück...*, s. 154.

⁵¹⁰ Max Delbrück urodził się 4 września 1906 roku we wpływej niemieckiej rodzinie, na przedmieściu Berlina, zmarł 10 marca 1981 roku. Był najmłodszym z siedmiorga rodzeństwa oraz prawnukiem światowej sławy niemieckiego chemika Justusa von Liebiga i synem wybitnego niemieckiego historyka, profesora na Uniwersytecie Berlińskim, Hansa Delbrücka, a także siostrzeńcem teologa Adolfa von Harnacka, sekretarza Kaiser Wilhelm Gesellschaft (Towarzystwa imienia Cesarza Wilhelma). Jako student Delbrück kilkakrotnie zmieniał uczelnie. Początkowo studiował astronomię na uniwersytecie w Tybindze, by w końcu osiąść w Getyndze, skupiając zainteresowania na teorii kwantów. Zniechęcony niepowodzeniami w pisaniu pracy magisterskiej w tej dziedzinie, zmienił kierunek studiów na fizykę teoretycz-

we własnych badaniach nad procesami metabolicznymi zachodzącymi w organizmach żywych.

Doświadczenia z lat szkolnych sprawiły, że biologia była dla Delbrücka niekończącymi się klasyfikacjami roślin i zwierząt, a więc czynnościami wymagającymi niewielkiego wysiłku intelektualnego, dlatego Bohr był niezwykle zaskoczony faktem, iż udało mu się zainteresować Delbrücka zastosowaniem swojej zasady komplementarności w tej dziedzinie⁵¹¹. Działo się to w 1931 roku, kiedy Delbrück przyjechał do Kopenhagi⁵¹². Jako stypendysta Fundacji Rockefellera nawiązał bliskie relacje z duńskim fizykiem⁵¹³. Jak się okazało, Bohr wywarł wielki wpływ na jego sposób myślenia, co wspominał po latach⁵¹⁴: „Tak więc kiedy padło pytanie o to, jaką posadę przyjmę po tym roku spędzonym w Kopenhadze z Bohrem i w Zurychu u Pauliego [...], a ja miałem możliwość jechać do Berlina i zostać asystentem fizyczki Lise Meitner w Kaiser Wilhelm Institut für Chemie (Instytucie Chemicznym imienia Cesarza Wilhelma) albo pozostać w Zurychu jako asystent Pauliego, wybrałem wyjazd do Berlina, z powodu bliskości Instytutu Biologii KW”⁵¹⁵.

Dyskusje o kwestiach biologicznych, które niemiecki fizyk prowadził z Bohrem, a zwłaszcza wykład tego drugiego zatytułowany *Light and life*, którego Delbrück wysłuchał jako dwudziestosześcioletni członek gościnny

na. Jako temat pracy wybrał teorię o wiązaniach kowalencyjnych w cząsteczce litu, uszczegóławiając teorię Heitlera-Londona. Promotorami pracy byli Max Born i Walter Heitler. Doktorat z fizyki teoretycznej obronił w 1930 roku. Por. Kay L.E., *Quanta of life...*, s. 6. Por. B.-O. Küppers (ed.), *Leben = Physik + Chemie? Das Lebendige aus der Sicht bedeutender Physiker*, München, Piper 1987, s. 253. Por. W. Hayes, *Max Delbrück and the birth of molecular biology*, „Journal of Genetics”, 1(64) (1985), s. 71. Por. J. Simmons, *Max Delbrück (1906–1981) i bakteriofagi*, s. 266. Por. A.T. Domondon, *Bringing physics...*, s. 435. Por. R. Olby, *The path to the double helix...*, s. 228. Por. W. Beese, *Max Delbrück: a physicist in biology* [w:] W.R. Woodward, R.S. Cohen (eds), *World views and scientific discipline formation: science studies in the German Democratic Republic*, Springer Science+Business Media, Dordrecht 1991, s. 417. Por. G. Allen, *Life science...*, s. 195. Niektóre aspekty koncepcji życia niemieckiego fizyka przedstawiłem w pracach: *Fenomen życia w oczach fizyka Maxa Delbrücka* [w:] K. Kropiwiec, M. Szala (red.), *Nauka, filozofia, kultura...*, s. 47–58; *Koncepcja życia w ujęciu reprezentatywnych przyrodników...*; *Kontrowersje wokół natury życia w pismach fizyków...*, s. 92–93.

⁵¹¹ Por. L.E. Kay, *Quanta of life...*, s. 5. Por. G. Allen, *Life science...*, s. 195.

⁵¹² Por. G. Allen, *Life science...*, s. 195.

⁵¹³ Por. D.J. McKaughan, *The influence of Niels Bohr on Max Delbrück: revisiting the hopes inspired by „Light and Life”*, „Isis”, 96 (2005), s. 508. Studiując w instytucie Nielsa Bohra w Kopenhadze, Delbrück prowadził też badania wspólnie z Georgem Gamowem. Por. J. Simmons, *Max Delbrück (1906–1981) i bakteriofagi*, s. 267.

⁵¹⁴ Por. L. Moss, *What genes can't do*, MIT Press, Cambridge 2003, s. 54.

⁵¹⁵ C. Kopp, *Oral history: Max Delbrück-how it was*, „Engineering and Science”, 5(43), (1980), s. 25–26.

instytutu Bohra w Kopenhadze, zainspirowały go do zajęcia się biologią⁵¹⁶. Wykład duńskiego fizyka zainicjował proces przemiany Delbrücka, stopniowo przeobrażającego się z fizyka teoretyka w biologa eksperymentalistę⁵¹⁷. O tym przełomowym dla jego przyszłej kariery naukowej wydarzeniu wspominał z detalami po latach: „Przyjechałem do Berlina jesienią w roku 1932, jednak podczas tamtego lata wybrałem się ponownie z krótką wizytą do Kopenhagi, ponieważ słyszałem, że Bohr wygłosi w Riksdagu obszerny wykład, otwierający kongres lekarzy zajmujących się terapią światłem. Pojechałem więc tam i po tym, jak pięć innych osób uroczyście powitało to szacowne, kilkusetosobowe zgromadzenie, wywołano w końcu Bohra, który miał wygłosić wykład otwarcia. Wstał, niemal natychmiast zgubił drogę do mównicy, jednak ostatecznie trafił do pulpitu. W zwykłym swoim stylu zaczął szeptać, niemal niedosłyszalnie, trudno więc było stwierdzić, czy mówi po angielsku, czy po duńsku, poza tym strasznie się kręcił i wiercił. Po tym, jak mówił przez chwilę, cały czas się kręcąc, musiał w jakiś sposób aktywować mechanizm hydrauliczny, który uniósł pulpit tak, że stopniowo Bohr zniknął całkowicie, powoli nim zasłonięty – przypominało to filmy z Charlie Chaplinem. Trwało to na tyle długo i działo się w wystarczająco wolnym tempie, żeby zostało zauważone przez następcę tronu, który dał kuksańca w żebra premierowi – wszyscy patrzyli zafascynowani, jak to się wszystko skończy; Bohr ostatecznie chwycił, wcisnął przełącznik na pulpicie i kontynuował wykład. Oczywiście od tego momentu wszyscy byli na nim bardzo skupieni, zastanawiając się, czy sytuacja taka powtórzy się jeszcze raz. To był wspaniały wykład zatytułowany *Light and life*, który jakiś czas później został opublikowany. W wykładzie tym sam wpakował się w kłopoty, ponieważ mówił o komplementarności z takim przekonaniem i tak dokładnie, że później można było stwierdzić, że jego przewidywania okazały się błędne. Jednak bardzo dobrze, że tak zrobił, ponieważ to w rzeczywistości skłoniło mnie do potraktowania tej sprawy poważnie i ugruntowało moją motywację do zajęcia się biologią”⁵¹⁸. Nieścisłości pojawiające się w wykładzie Bohra nie zmniejszyły wrażenia, jakie wywarł on na młodym fizyku⁵¹⁹. Z pytań epistemologicznych, konkretnie z sugestii Bohra odnośnie do sytuacji

⁵¹⁶ Por. M. Morange, *A history of molecular biology*, s. 39. Por. D. Fleming, *Émigré physicists...*, s. 168.

⁵¹⁷ Por. D. Depew, W. Weber, *Darwinism evolving. Systems dynamics and the genealogy of natural selection*, A Bradford Book The MIT Press, Cambridge, Massachusetts–London 1995, s. 343.

⁵¹⁸ C. Kopp, *Oral history...*, s. 26. Por. M. Delbrück, *Light and Life III*, „Carlsberg Research Communications”, 6(41) (1976), s. 299.

⁵¹⁹ L.E. Kay, *Quanta of life...*, s. 8.

komplementarności w biologii analogicznej do tej w fizyce, wywodziła się nadzieja Delbrücka na znalezienie „innych praw fizyki” w biologii. „To właśnie dzięki Delbrückowi – pisze Gunther S. Stent – epistemologia Bohra stała się intelektualną infrastrukturą biologii molekularnej, co doprowadziło do jej hegemonii w naukach przyrodniczych w XX wieku. Dla biologów molekularnych stała się przewodnikiem, prowadzącym ich pomiędzy Scyllą redukcjonizmu biochemicznego zainspirowanego dziewiętnastowieczną fizyką i Charybda obskuranckiego witalizmu mającego swoje korzenie w dziewiętnastowiecznym romantyzmie”⁵²⁰. Intelektualna i psychologiczna więź, jaką Delbrück nawiązał z Bohrem, trwała przez całą biologiczną karierę niemieckiego przyrodnika⁵²¹. Chociaż sama koncepcja filozoficzna Bohra, jak się później okazało, była błędna, wywarła niezwykle wpływ na Delbrücka⁵²². Głównym celem, jaki mu przyświecał, było odnalezienie dokładnej analogii zasady komplementarności w biologii⁵²³. To, co starszy kolega-fizyk osiągnął w fizyce w drugiej dekadzie XX wieku, niemiecki fizyk chciał osiągnąć w biologii. Za pomocą metod stosowanych przez fizyków prowadził badania nad organizmami żywymi ukierunkowane na odkrycie komplementarności biologicznej⁵²⁴.

Według Delbrücka to właśnie wyzwanie, jakie stawiała przed nim biologia, zainspirowało go jeszcze w 1932 roku do rozpoczęcia pracy asystenta austriackiej fizyczki Lise Meitner w Instytucie Chemii im. Cesarza Wilhelma w Berlinie-Dahlem znajdującego się w sąsiedztwie Instytutu Biologii, gdzie prowadzono badania nad genami⁵²⁵. Publikując dalsze prace w dziedzinie fizyki, coraz śmielej zajmował się problemami biologicznymi

⁵²⁰ Por. G.S. Stent, *Introduction and overview* [w:] M. Delbrück, *Mind from matter. An essay on evolutionary epistemology*, Blackwell Scientific Publications, Victoria 1986, s. 2.

⁵²¹ Por. L.E. Kay, *The molecular vision of life. Caltech, the Rockefeller Foundation, and the rise of the new biology*, Oxford University Press, New York–Oxford 1993, s. 133. Gdy Delbrück wyjechał do Kopenhagi w 1931 roku, wciąż zmagał się ze śmiercią ojca sprzed dwóch lat, co wyjaśniałoby po części relacje na zasadzie ojciec–syn, mentor–uczeń, jakie rozwinął później z Bohrem. Podczas długiego wywiadu dla niemieckiej telewizji w 1980 roku, gdy był już u kresu życia, poproszono go, by wspomniał, co Bohr dla niego znaczył. Niechętnie podchodził do odpowiedzi, w końcu jednak opisał go, jako osobę, którą „chciałoby się mieć za ojca, zwłaszcza gdy miało się kiepskie relacje z własnym ojcem”. Por. G. Segrè, *Ordinary geniuses. Max Delbrück, George Gamow, and the origins of genomics and big bang cosmology*, Viking Penguin, London 2011, s. 49.

⁵²² Por. J. Simmons, *Max Delbrück (1906–1981) i bakteriofagi*, s. 267.

⁵²³ Por. E.P. Fischer, C. Lipson, *Thinking about science. Max Delbrück and the origins of molecular biology*, W.W. Norton & Company, New York–London 1988, s. 83–84.

⁵²⁴ Por. D. Depew, W. Weber, *Darwinism evolving...*, s. 343.

⁵²⁵ Por. L.E. Kay, *Quanta of life...*, s. 8. Współpracując z Meitner prowadził badania między innymi nad rozpraszaniem światła oraz w zakresie termodynamiki z punktu widzenia mechaniki statystycznej i teorii kwantów. Por. J. Simmons, *Max Delbrück (1906–1981) i bakteriofagi*, s. 267.

mi⁵²⁶. Pracując jako asystent Meitner, poznał rosyjskiego genetyka Nikołaja W. Timofiejewa-Riesowskiego z Wydziału Genetyki Instytutu Badań nad Mózgiem w Berlinie-Buch, a także Karla G. Zimmera, fizyka zajmującego się promieniotwórczością w szpitalu Cecilienhaus w Berlinie-Charlottenburgu⁵²⁷. Timofiejew-Riesowski i Zimmer zwrócili jego uwagę na zjawisko dziedziczenia⁵²⁸. Długie dyskusje prowadzone z nimi zainspirowały Delbrücka do opisanie eksperymentów przeprowadzanych przez nich, dotyczących radiologicznej zmienności muszki owocowej⁵²⁹. Praca Delbrücka stała się później częścią teoretyczną wspólnej niemieckojęzycznej publikacji zatytułowanej *Über die Natur der Genmutation und der Genstruktur* (O naturze mutacji genu i strukturze genu), znanej z powodu trzech współautorów jako *Praca trzech* lub też jako *Zielona broszurka* (od koloru okładki jej przedruku). Była to próba zaoferowania tego, co ówczesna fizyka kwantowa mogłaby wnieść do zrozumienia dziedziczności⁵³⁰. Chociaż próba okazała się z dzisiejszej perspektywy niesatysfakcjonująca, przejawem oryginalności pracy były: idea genu jako cząsteczki, interdyscyplinarne podejście oraz przeniesienie fizycznych idei i sposobu myślenia – nie tylko metod – do biologii. Publikacja ta odegrała znaczącą rolę w historii biologii molekularnej.

W 1937 roku Delbrück przeniósł się do Stanów Zjednoczonych, gdzie przebywał do końca życia⁵³¹. Kierował California Institute of Technology (Kalifornijskim Instytutem Technologicznym – Caltech) w Pasadenie i stacją badawczą Cold Spring Harbor. Tam szybko odkrył, że fagi były odpowiednimi obiektami badań dla jego filozoficznego podejścia. Z czasem stał się jednym z najbardziej wpływowych biologów swego okresu⁵³². Wspólnie z amerykańskim genetykiem Alfredem D. Hersheyem i amerykańskim mikrobiologiem pochodzenia włoskiego Salvadorem E. Lurią prowadził pionierskie badania nad genetyką bakteriofagów (wirusów infekujących bakterie), opisując ich budowę i wyjaśniając ich zdolność do replikacji⁵³³. W 1969 roku za swoje odkrycie trzech badacze otrzymali Nagrodę Nobla.

⁵²⁶ Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 163.

⁵²⁷ Por. D.J. McKaughan, *The influence of Niels Bohr on Max Delbrück...*, s. 508.

⁵²⁸ Por. W. Beese, *Max Delbrück: A physicist in biology*, s. 417.

⁵²⁹ Por. R. Olby, *The path to the double helix...*, s. 232.

⁵³⁰ Por. W. Beese, *Max Delbrück: a physicist in biology*, s. 417.

⁵³¹ Por. tamże, s. 417.

⁵³² Por. V. Nanjundiah, *Delbrück's publications in biology*, „Resonance”, 11 (1999), s. 35.
Por. L.E. Kay, *Quanta of life...*, s. 3–4. Por. W. Hayes, *Max Ludwig Henning Delbrück (1906–1981). A biographical memoir*, National Academy of Sciences, Washington 1993, s. 68.

⁵³³ Por. G. Godula, *Delbrück Max* [w:] Z. Otałęga (red.), *Encyklopedia biologiczna*, t. II, Opres, Kraków 1998, s. 359.

Delbrück wpłynął na wielu młodszych fizyków, w tym Leo Szilarda⁵³⁴, którzy przyczynili się do ujednolicenia eksperymentów na powiększającym się polu genetyki molekularnej⁵³⁵. Obecność fizyków w stacji badawczej Cold Spring Harbor zwiększała prestiż biologii, której akademicki status, w szczególności w czasie wojny, pozostawał daleko za naukami fizycznymi⁵³⁶. Tym samym mechanika kwantowa, która dała nam tranzystory i przyniosła rewolucję w dziedzinie technologii informacyjnej, przyczyniła się również do rewolucji w genetyce⁵³⁷.

Celem poniższych analiz jest szczegółowa prezentacja ukierunkowanych na fenomen życia idei niemieckiego fizyka i dyskusja nad nimi. Osią rozważań stała się recepcja zasady komplementarności Bohra w spekulacjach biologicznych Delbrücka. W tym celu należy odwołać się do kilku publikacji tego autora, ocierających się o biologię molekularną, do której powstania znacząco się przyczynił, a w których odnajdujemy interesujące nas wątki, będące próbą odpowiedzi na odwieczne pytanie o naturę życia.

Pierwsze i w pewien sposób najistotniejsze zasługi na polu biologicznym, jakie położył Delbrück, to zastosowanie mechaniki kwantowej w gene-

⁵³⁴ Jako twórca atomowej reakcji łańcuchowej Szilard odegrał kluczową rolę w rozpoczęciu programu Manhattan, który miał na celu skonstruowanie pierwszej bomby atomowej. Węgierski fizyk był również jednym z pierwszych naukowców, który przeciwstawił się militarnemu wykorzystaniu tej bomby. Rozczarowany pojawieniem się energii jądrowej i militaryzacją fizyki, oddalił się od „nauki śmierci” na rzecz „nauki życia”, dążąc do wyhamowania wyścigu zbrojeń. Jesienią 1946 roku rozpoczął pracę jako profesor biofizyki w Instytucie Radiobiologii i Biofizyki w Chicago University. Nawiązując współpracę z chemikiem Aaronem Novickiem, jego młodszym kolegą z czasów wojennych prac nad projektem energii atomowej na Chicago University, Szilard szkolił się w biologii poprzez letnie kursy Delbrücka poświęcone fagom i letni kurs Corneliusa van Niela z zakresu biochemii bakteryjnej. Szilard i Novick opublikowali wiele nowatorskich artykułów dotyczących genetyki fagów i mutacji bakteryjnych. Szilard współpracował również z genetykiem Mauricem Foxem w zakresie opracowania urządzenia do tworzenia populacji bakterii w niezmiennych środowiskach, a w latach pięćdziesiątych interesował się również problemem kodowania. Por. L.E. Kay, *Who wrote the book of life? A history of the genetic code*, Stanford University Press, Stanford 2000, s. 166–167. Por. W. Hayes, *Max Delbrück and the birth...*, s. 75–76. Por. M. Morange, *A history of molecular biology*, s. 67. Por. D. Fleming, *Émigré physicists...*, s. 156–163. Por. G. Segrè, *Ordinary geniuses...*, s. 137. Por. A. Rapoport, *Discussion* [w:] H.P. Yockey, R.L. Platzman, H. Quastler (eds), *Symposium on information theory in biology (Gatlinburg, Tennessee, October 29–31, 1956)*, Pergamon Press, London/New York/Paris/Los Angeles 1958, s. 196.

⁵³⁵ Por. M. Wilkins, *The third man of the double helix. The autobiography of Maurice Wilkins*, Oxford University Press, Oxford 2005, s. viii–ix. Por. D.J. McKaughan, *The influence of Niels Bohr on Max Delbrück...*, s. 510. Por. L.E. Kay, *The molecular vision of life...*, s. 247.

⁵³⁶ Por. L.E. Kay, *The molecular vision of life...*, s. 247.

⁵³⁷ Por. M. Wilkins, *The third man...*, s. x.

tyce⁵³⁸. Zainspirowany przez Hermanna J. Mullera⁵³⁹, wspólnie z (wspomnianymi już) Timofiejewem-Riesowskim i Zimmerem prowadził badania nad procesami fizycznymi biorącymi udział w mutacjach genetycznych⁵⁴⁰. Pomysł stojący za tymi badaniami pochodził z fizyki nuklearnej⁵⁴¹. Fizycy nie mogli bezpośrednio badać jądra komórkowego – musieli bombardować je cząsteczkami. W ten sposób za pomocą zróżnicowanego rozmiaru i energii cząsteczek, a także porównując zróżnicowanie z wynikami bombardowania, byli w stanie określić pewne cechy celu, w tym przypadku jądra komórkowego. Badacze postanowili wykorzystać to samo podejście w badaniach nad genem.

Współpraca między Delbrückiem, Timofiejewem-Riesowskim i Zimmerem zaowocowała wyjaśnieniem powiązania pomiędzy działaniem genu i jego strukturą poprzez zbadanie wpływu promieniowania jonizującego na tempo mutacji⁵⁴². Wszyscy trzej dowiedli, że mutacje mogą zostać wywołane przez napromieniowanie⁵⁴³. Aby objaśnić zarówno samorzutne, jak i indukowane napromieniowaniem procesy mutacyjne badacze ci przyjęli, że mutowanie genów jest elementarnym procesem w rozumieniu teorii kwantowej, polegającym na określonych zmianach w złożonej atomowej konfiguracji⁵⁴⁴. Wyniki swoich badań opublikowali w 1935 roku we wspólnej pracy zatytułowanej *Über die Natur der Genmutation und der Genstruktur*⁵⁴⁵. Artykuł zawiera część empiryczną, podsumowującą prawie czterdzieści lat badań nad genetycznymi skutkami promieniowania, oraz rozbudowaną część

⁵³⁸ Por. D. Fleming, *Émigré physicists...*, s. 171.

⁵³⁹ W 1926 roku pokazał on, że promieniowanie rentgenowskie wywołuje mutacje u *Drosophila*. Jego klasyczne eksperymenty odnośnie do wpływu radiacji na powodowanie mutacji otworzyły mu drogę do Nagrody Nobla w 1946 roku w dziedzinie fizjologii. Por. E. Mendelsohn, *Hermann Joseph Muller* [w:] E. Mendelsohn (ed.), *Life sciences...*, s. 124. Por. R. Hausmann, *To grasp the essence of life. A history of molecular biology*, trans. C. and R. Hausmann, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 2002, s. 56.

⁵⁴⁰ Por. L.E. Kay, *Quanta of life...*, s. 8.

⁵⁴¹ Por. M. Morange, *A history of molecular biology*, s. 40.

⁵⁴² L.E. Kay, *Quanta of life...*, s. 8.

⁵⁴³ N. Symonds, *Schrödinger and Delbrück: their status in biology*, „Trends in Biochemical Sciences”, 13 (1988), s. 233.

⁵⁴⁴ Por. M. Delbrück, N. Timofiejew-Riesowski, K. Zimmer, *O prirode gennyh mutacij i strukture gena*, trans. V. Korogodinoj [w:] N. Timofiejew-Riesowski, *Izbrannye trudy*, Medicina, Moskva 1996, s. 144.

⁵⁴⁵ Streszczenie pracy Delbrücka, Timofiejewa-Riesowskiego i Zimmera zamieściłem w publikacjach: *Koncepcja życia w ujęciu reprezentatywnych przyrodników...*; „Praca trzech” – niezwykle owoce współpracy biologa z fizykami z filozofią w tle [w:] K. Bałkowski P. Wiatr (red.), *Prawda i byt – między filozofią a nauką*, Wyd. Naukowe Tygiel, Lublin 2016, s. 125–137.

teoretyczną⁵⁴⁶. Zadaniem Timofiejewa-Riesowskiego było określenie liczby mutacji wywołanych u *Drosophila* poprzez napromieniowanie ich różnymi rodzajami energii w różnych temperaturach⁵⁴⁷. Zimmer zamieniał dawki promieniowania w liczbę uformowanych par jonowych (zakładano, że pary jonowe były odpowiedzialne za efekt mutacji). Na podstawie tych eksperymentów Delbrück określił, że rozmiar genu wynosi kilka tysięcznych milimetra.

Praca *Über die Natur der Genmutation und der Genstruktur* składa się z czterech części. Pierwsza część, *Niektóre rezultaty badania mutacji*, pióra Timofiejewa-Riesowskiego, składająca się na połowę całości, zawiera podsumowanie ówczesnego stanu badań eksperymentalnych na genach i mutacjach⁵⁴⁸. Wiele z tych badań zostało bezpośrednio przeprowadzonych samodzielnie przez Timofiejewa-Riesowskiego albo też przy współpracy z Zimmerem. Autor opisuje efekty mutageniczne wywierane przez promienie rentgenowskie oraz gamma na muszce owocowej *Drosophila melanogaster*, idealnym (jak twierdził) obiekcie dla dokładnego ilościowego zbadania procesu mutacyjnego⁵⁴⁹. Stara się on usprawiedliwić metodologię radiacyjną, podkreślając, że eksperymentalnie wywołane mutacje nie różnią się jakościowo od tych powstałych samorzutnie⁵⁵⁰, a napromieniowywanie jest lepszym rozwiązaniem niż inne wyzwalacze ze względu na możliwość starannego dawkowania⁵⁵¹. Co ważniejsze, promienie rentgenowskie oraz promienie gamma łatwo docierają do jądra komórki, sprawiając, że ich działanie na materiał genetyczny jest dużo bardziej bezpośrednie od działania innych wyzwalaczy, na przykład chemicznych. Autor udowadnia, że efekty wyzwalające mutację są wprost proporcjonalne do użytej dawki i nie zależą ani od długości fali, ani od rozdzielenia dawki w czasie, ani od temperatury w czasie napromieniowania⁵⁵². Promienie jonizujące zwiększają częstość mutacji

⁵⁴⁶ Por. W.C. Summers, *Physics and genes: from Einstein to Delbrück* [w:] P.R. Sloan, B. Fogel (eds), *Creating a physical biology...*, s. 39. Por. M. Cobb, *Największa tajemnica życia. Jak rozszyfrowano kod genetyczny*, tłum. A. Tuz, Prószyński i S-ka, Warszawa 2017, s. 23.

⁵⁴⁷ Por. W.C. Summers, *Physics and genes...*, s. 40.

⁵⁴⁸ Por. M. Delbrück, N. Timofiejew-Riesowski, K. Zimmer, *O prirode gennych mutacij...*, s. 105–129. Por. B. Fogel, *Translator's preface* [w:] P.R. Sloan, B. Fogel (eds), *Creating a physical biology...*, s. 214.

⁵⁴⁹ Por. M. Delbrück, N. Timofiejew-Riesowski, K. Zimmer, *O prirode gennych mutacij...*, s. 107. Por. M.F. Perutz, *Physics and the riddle of life*, „Nature”, 326 (1987), s. 556.

⁵⁵⁰ Autor pisze: „Dla każdego obiektu typowy charakter samorzutnego procesu mutacyjnego zbiega się z indukowanym napromieniowaniem, dlatego nie mamy podstaw, aby robić pryncypialne różnice pomiędzy »samorzutnymi« i »radiacyjnymi« mutacjami”. M. Delbrück, N. Timofiejew-Riesowski, K. Zimmer, *O prirode gennych mutacij...*, s. 112.

⁵⁵¹ Por. B. Fogel, *Translator's preface*, s. 214.

⁵⁵² Por. M. Delbrück, N. Timofiejew-Riesowski, K. Zimmer, *O prirode gennych mutacij...*, s. 121.

jako funkcja liniowa dawki niezależna od dystrybucji czasowej, długości fali i temperatury podczas napromieniowywania⁵⁵³. Co najważniejsze proporcjonalność wskaźnika mutacji w zależności od dawki sugeruje, że radiacja nie wpływa bezpośrednio na geny, ale raczej pośrednio poprzez jonizację okolicznej materii⁵⁵⁴.

W drugiej, relatywnie krótszej części pracy, *Teoria celu i jej skutki w zastosowaniu do problemu mutagenезy*, Zimmer koncentruje się na „teorii celu” – kluczowej koncepcji w badaniach skutków promieniowania, próbując ją zastosować w genetyce⁵⁵⁵. Zgodnie z tą teorią, promienie X wywołują losowo mutacje, podobnie jak pociski trafiają w najrozmaitsze cele⁵⁵⁶. Bombardowanie komórki promieniami rentgenowskimi miało wykazać, jaka jest częstość pojawiania się różnych mutacji w zależności od danej częstotliwości i konkretnego natężenia promieniowania⁵⁵⁷. Sądzone, że tą drogą będzie możliwy wgląd w fizyczne parametry genu („celu”), w szczególności w jego rozmiar i skład. Zimmer określa trzy drogi zmierzające do osiągnięcia „trafienia w cel” genu, gdzie użyte zostały promienie X:

- kwant radiacji może trafić bezpośrednio w gen,
- gen może być trafiony przez drugi elektron, który został przeniesiony z sąsiedniego atomu poprzez kwant radiacji,
- para jonów powstałych przez zadziaływanie na drugi elektron może doprowadzić do interakcji z genem⁵⁵⁸.

Każda z tych możliwych dróg trafienia w cel prowadzi do różnych prognoz empirycznych w zależności od różnych cech poszczególnych radiacji. Zimmer konkluduje, że w celu spowodowania mutacji genu przy działaniu napromieniowania rentgenowskiego lub napromieniowania gamma, wystarczy jedno trafienie⁵⁵⁹. To trafienie powoduje powstanie jednej pary jonów lub jednego wzbudzenia.

Trzecia część, *Atomowo-fizyczny model mutacji genowych*, koncepcyjnie najbardziej interesująca spośród wszystkich czterech, jest autorstwa Del-

⁵⁵³ Por. M.F. Perutz, *Physics and the riddle of life*, s. 556.

⁵⁵⁴ Por. B. Fogel, *Translator's preface*, s. 215.

⁵⁵⁵ Por. M. Delbrück, N. Timofiejew-Riesowski, K. Zimmer, *O prirode gennyh mutacij...*, s. 129–134. Por. B. Fogel, *Translator's preface*, s. 215. Por. M. Cobb, *Największa tajemnica życia...*, s. 23.

⁵⁵⁶ Por. C.B. Krimbas, D.B. Paul, *Mikolaj W. Timofiejew-Riesowski*, tłum. A. Hoffman, „Świat Nauki”, 4 (1992), s. 62.

⁵⁵⁷ Por. M. Cobb, *Największa tajemnica życia...*, s. 23.

⁵⁵⁸ Por. M. Delbrück, N. Timofiejew-Riesowski, K. Zimmer, *O prirode gennyh mutacij...*, s. 130–131. Por. B. Fogel, *Translator's preface*, s. 215.

⁵⁵⁹ Por. M. Delbrück, N. Timofiejew-Riesowski, K. Zimmer, *O prirode gennyh mutacij...*, s. 134.

brücka⁵⁶⁰. Autor najpierw stara się usprawiedliwić użycie koncepcji fizycznych w genetyce⁵⁶¹. Nie podziela poglądu, że genetyka jest „niezależna” od fizyki. Genetyka była dla Delbrücka bez wątpienia nauką ilościową, ale jednostki, które należało w niej policzyć, nie były ani masą, ani ładunkiem, ani prędkością, lecz indywidualnymi organizmami, posiadającymi pewne cechy, co czyniło genetykę częściowo niezależną od fizyki⁵⁶². W takim razie, jak zjednoczyć genetykę z fizyką? Delbrück twierdził, że nie może się to stać za pośrednictwem chemii, uzasadniając to faktem, iż niemożliwe jest znalezienie wystarczającej ilości materiału w dokładnie takiej samej postaci cząsteczkowej, by określić go precyzyjnie w analizie chemicznej⁵⁶³. Zwrócił też uwagę na brak wystarczającej wiedzy na temat sposobu chemicznego zachowania genu w przebiegu katalizy. Powołując się na konkretne eksperymenty, przekonuje, że geny są przestrzennie zlokalizowane i mogą zostać wysłedzone i przebadane jako obiekty fizyczne, nawet jeśli mechanika ich ekspresji nie jest znana⁵⁶⁴. Rozmiar genów jest zbliżony do dużej molekuly. Istotną ich cechą jest specyficzna stabilność – fakt, że utrzymują swoją tożsamość przez dłuższy czas. Niezależnie od otaczającego je środowiska, które na nie oddziałuje, geny w ciągu stosunkowo długiego czasu pozostają stabilne. Na tej podstawie Delbrück formułuje następujący wniosek: „Dlatego, jeśli mówimy o genach jako o molekułach, należy myśleć nie tyle o identyczności ich zachowania, ile o wspólnocie ich struktury atomowej, to jest o tym, że identyczność dwóch genów sprowadza się do tego, że u nich jednakowe atomy są stabilnie uporządkowane jednakowym, niezmiennym sposobem. Stabilność konfiguracji powinna być szczególnie duża względem reakcji chemicznych, zwykle zachodzących w żywej komórce; w wymianie substancji geny powinny brać udział tylko jako katalizatory”⁵⁶⁵. Ściśle rzecz biorąc, Delbrück zamiast określania genów jako rodzaju molekuł wybiera bardziej ogólny termin *Atomverband*, tłumaczony w niniejszej pracy jako „zbiór atomów”⁵⁶⁶. Stara się odróżnić pojęcie molekuly jako relatywnie ścisłej struktury od bardziej abstrakcyjnej substancji tworzącej pewne dostrzegalne właściwości w chwili, kiedy zbierze się w wystarczająco dużych ilo-

⁵⁶⁰ Por. tamże, s. 135–144.

⁵⁶¹ Por. tamże, s. 135–136. Por. B. Fogel, *Translator's preface*, s. 216.

⁵⁶² Por. R. Olby, *The path to the double helix...*, s. 233.

⁵⁶³ Por. M. Delbrück, N. Timofiejew-Riesowski, K. Zimmer, *O prirode gennyh mutacij...*, s. 136–137. Por. R. Olby, *The path to the double helix...*, s. 233.

⁵⁶⁴ Por. M. Delbrück, N. Timofiejew-Riesowski, K. Zimmer, *O prirode gennyh mutacij...*, s. 137. Por. B. Fogel, *Translator's preface*, s. 216–217.

⁵⁶⁵ M. Delbrück, N. Timofiejew-Riesowski, K. Zimmer, *O prirode gennyh mutacij...*, s. 137.

⁵⁶⁶ Por. B. Fogel, *Translator's preface*, s. 217.

ściach. To drugie jest bezużyteczne w genetyce, gdzie geny „produkują” dostrzegalne właściwości tylko w jednej lub dwóch (nie zaś w licznych) kopiach odnajdywanych w chemii. Wybór „zbioru atomów”, a nie „molekuły” ma przewagę w tym, że pozwala myśleć o genie jako o jednej części większej struktury czy zbioru. W drugiej części pracy Delbrück bada różne drogi, którymi zbiór atomów może zapoczątkować zmianę oraz skupia się na reorganizacji elementów składowych atomów w różne stabilne konfiguracje, które są jedynymi rodzajami zmiany wpływającej na chemiczny charakter zbioru (niosący ze sobą przypuszczenie, że informacja genetyczna jest przechowywana chemicznie). Ostatnia część, *Teoria mutacji genowych i struktury genu*, zawiera ogólne streszczenie poszczególnych części⁵⁶⁷. Autorzy krytykują punkt widzenia prezentowany przez niektórych ówczesnych biologów, zgodnie z którym „najważniejszą jednostką życia” jest gen, a nie komórka⁵⁶⁸. Zgadza się, że geny są „jednostkami fizyczno-chemicznymi”, jednak obstają przy twierdzeniu, że geny nie mogą być odpowiedzialne za wytwarzanie wszystkich substancji morfogenetycznych używanych w procesie rozwojowym. W zamian proponują odmienne sformułowanie: wspólne formy genomu są wyłącznie podstawą dla procesów rozwojowych przystosowanych przez dziedziczenie. Autorzy proponują kwantowy model genu, zgodnie z którym, jest on jednolitą pod względem fizyczno-chemicznym strukturą atomową, wewnątrz której może zachodzić zdarzenie mutacyjne⁵⁶⁹. Gen przedstawia pewien „blok atomów, w którym może zająć mutacja – przestawienie atomów lub dysocjacja związków (wywołana wahaniami energii cieplnej lub przekazem energii z zewnątrz) i który jest autonomiczny w swoich właściwościach i oddziaływaniach na inne geny”⁵⁷⁰. Postrzegając gen jako układ kwantowy charakteryzujący się kilkoma stałymi stanami energii, autorzy zinterpretowali mutacje wywołane promieniowaniem jako przejście z jednego stanu do innego⁵⁷¹. Dla nich gen stanowił niepodzielną jednostkę fizyczno-chemiczną o rozmiarach molekularnych, której natura i dokładna wielkość pozostały nieznane, a mutacja była zmianą wiązań chemicznych w obrębie tej molekuly⁵⁷².

Praca Timofiejewa-Riesowskiego, Zimmera i Delbrücka została opublikowana w 1935 roku w Niemczech w czasopiśmie o małym nakładzie, nie-

⁵⁶⁷ Por. M. Delbrück, N. Timofiejew-Riesowski, K. Zimmer, *O prirode gennych mutacij...*, s. 145–150.

⁵⁶⁸ Por. tamże, s. 150. Por. B. Fogel, *Translator's preface*, s. 219.

⁵⁶⁹ Por. M. Delbrück, N. Timofiejew-Riesowski, K. Zimmer, *O prirode gennych mutacij...*, s. 147.

⁵⁷⁰ Tamże, s. 148.

⁵⁷¹ Por. L.E. Kay, *Quanta of life...*, s. 8.

⁵⁷² Por. M. Cobb, *Największa tajemnica życia...*, s. 24.

mniej nie uszła uwadze Erwina Schrödingera, który poświęcił *Pracy trzech* znaczną część swojej książki zatytułowanej *What is life?*⁵⁷³. Salvador Luria, fizyk pracujący w laboratorium Enrico Fermiego w Rzymie, który później również nawiązał bliską współpracę z Delbrückiem, także słyszał o tej pracy. Podobne podejście zostało wykorzystane lub będzie w przyszłości przez kolejne grupy badawcze w badaniach nad strukturą genu i naturą mutacji, jednakże brak danych o chemicznej strukturze genów spowodował trudność w zinterpretowaniu wyników⁵⁷⁴. Chociaż model mutacji na skutek jonizacji Delbrücka okazał się błędny, w rzeczywistości stał się „pomyślną porażką”⁵⁷⁵.

W opinii Williama C. Summersa praca Timofiejewa-Riesowskiego, Zimmera i Delbrücka była kamieniem milowym na drodze do uformowania się biologii molekularnej⁵⁷⁶. Autor ten wskazuje na dwa znaczące aspekty w tym opracowaniu, które poruszyły wyobraźnię naukowców. Po pierwsze, była to jawna próba podjęcia zagadnień biologicznych przy użyciu nowych narzędzi, czyli instrumentów fizyki kwantowej. Po drugie, przedstawiono świadomą współpracę pomiędzy genetykiem, biofizykiem oraz fizykiem atomowym. Taka współpraca postrzegana była przez jej trzech uczestników jako okazja przeniesienia perspektyw z różnych dziedzin w celu rozwiązania wspólnego problemu. Timofiejew-Riesowski, genetyk, pokazał biologiczny problem: czym jest natura procesu mutacji i co ona mówi o genach; Zimmer, biofizyk, przedstawił podejście do struktury genów przy użyciu fizyki eksperymentalnej, bazując na odkrytym w tym czasie wpływie promieni X na mutacje, zaś Delbrück użył dowodu i pojęć z eksperymentów „teorii celu”, aby skonstruować model mutacji, a następnie teorię mutacji genu i struktury, które określamy mianem „kwantowomechanicznego modelu genu”⁵⁷⁷. Praca zespołowa, zwłaszcza pomiędzy specjalistami z różnych dziedzin, nie była powszechna w tamtym czasie w Niemczech⁵⁷⁸. Zgodna współpraca genetyka, biofizyka i fizyka zaowocowała nowatorskim jak na owe czasy modelem mutacji, a następnie nie mniej nowatorską teorią struktury genu⁵⁷⁹. „Mimo iż dzisiaj – pisze Summers – wydaje się logiczne, że radiacja była »odpowied-

⁵⁷³ Por. M. Morange, *A history of molecular biology*, s. 41.

⁵⁷⁴ Por. tamże, s. 41–42.

⁵⁷⁵ Por. tamże, s. 42.

⁵⁷⁶ Por. W.C. Summers, *Physics and genes...*, s. 39. Podobnego do Summersa zdania są: Vadim A. Ratner [*Nikolay Vladimirovich Timofiejew-Riesowski (1900–1981): twin of the century of genetics*], „Genetics”, 158 (2001), s. 935] oraz Elof A. Carlson [*An unacknowledged founding of molecular biology: H.J. Muller's contributions to gene theory*], „Journal of the History of Biology”, 4 (1971), s. 151].

⁵⁷⁷ W.C. Summers, *Physics and genes...*, s. 40.

⁵⁷⁸ Por. tamże, s. 39.

⁵⁷⁹ Por. tamże.

nim narzędziem» do badania mutacji genu i jego struktury w latach trzydziestych, to jednak nie był to wtedy jedyny dostępny wybór. Wyjątkowa współpraca pomiędzy fizykiem i biofizykiem, obydwoma zainteresowanymi i będącymi na bieżąco z fizyką promieni X oraz fizyką cząstek, z genetykiem, który był zainteresowany mutacją jako pojedynczym »punktem« doprowadziła do konkretnego rezultatu w tej przełomowej pracy naukowej⁵⁸⁰. Nie oni pierwsi docenili siłę zastosowania kluczowej teorii, mieli jednak wyjątkowo jasną wizję jej zastosowania oraz logicznych konsekwencji, które następowały po niedawnym fizycznym zrozumieniu fizyki promieni X jako cząstek (fotonów), które tworzyły jonizacje umiejscowione w przestrzeni oraz zastosowanie zmian molekularnych jako kluczowych w tej pracy naukowej⁵⁸¹. Relacje ilościowe pomiędzy zależnościami reakcji na dawkę a two-rzeniem jonizacji umożliwiły szczegółowe kalkulacje, które nadały tej pracy dużą wartość⁵⁸².

Chociaż artykuł *Über die Natur der Genmutation und der Genstruktur*, który był debiutem niemieckiego fizyka w biologii, został stosunkowo dobrze przyjęty przez ówczesnych fizyków, a także genetyków, i stał się podstawą interdyscyplinarnej konferencji zorganizowanej przez Bohra w 1936 roku w Kopenhadze i wspieranej przez Fundację Rockefellera, Delbrück osobiście nie był zadowolony ze swoich badań⁵⁸³. Jego głównym celem było bowiem odkrycie zasady komplementarności w biologii⁵⁸⁴. Badania nad *Drosophila*, a także prace w dziedzinie genetyki radiacyjnej nie zaspokoili „ambicji epistemologicznej” Delbrücka⁵⁸⁵. Aby zrealizować swoje najważniejsze cele, niemiecki fizyk potrzebował najprostszego układu, najczystsze-go przypadku replikacji jako odpowiednika atomu wodoru w biologii. Z metodycznej perspektywy Delbrücka *Drosophila* była zbyt złożonym organizmem, a promieniowanie zbyt destruktywne, by można było zbadać replikację w jej naturalnym stanie. Ponadto uważał, że techniczne słownictwo genetyki *Drosophila* było „zbyt kłopotliwe” dla elegancji jego modeli matematycznych.

W 1937 roku Delbrück dzięki stypendium otrzymanym z Fundacji Rockefellera przeniósł się z Niemiec do Stanów Zjednoczonych⁵⁸⁶. Odwiedził

⁵⁸⁰ Tamże.

⁵⁸¹ Tamże.

⁵⁸² Tamże, s. 56.

⁵⁸³ Por. L.E. Kay, *The molecular vision of life...*, s. 133–134. Zob. tenże, *Quanta of life...*, s. 8.

⁵⁸⁴ Por. tenże, *Quanta of life...*, s. 8–9.

⁵⁸⁵ Por. tenże, *The molecular vision of life...*, s. 134.

⁵⁸⁶ Por. L. Joaquim, O. Freire, Ch.N. El-Hani, *Quantum explorers...*, s. 243.

najważniejsze amerykańskie laboratoria genetyczne⁵⁸⁷. W Kalifornijskim Instytucie Technologii (ang. Caltech) w Pasadenie wraz z grupą badawczą Thomasa Hunta Morgana zajął się badaniami nad *Drosophila*⁵⁸⁸. Jak wspomniano wyżej, Delbrück był zawiedziony *Drosophila* jako systemem modelowym⁵⁸⁹. Doszedł do wniosku, że system ten był zbyt skomplikowany, by ujawnić sekret życia. Od czasu spotkania z Bohrem był bowiem przekonany, że aby odkryć ten sekret, należy wykorzystać najprostsz system biologiczny. Zasady mechaniki kwantowej zostały odkryte dopiero, gdy zbadano materię na jej najbardziej podstawowym poziomie, a więc na poziomie atomu i jego elementów składowych. Ta sama zasada powinna być jego zdaniem zostać wykorzystana w biologii. Sprzeczne eksperymenty i paradoksy, które dla fizyka są punktem startowym dla nowych teorii, powstają jedynie wtedy, gdy bada się proste układy. Gdy Delbrück przekonał się, że *Drosophila* jako system modelowy jest zbyt skomplikowana, by ujawnić oczekiwany „sekret życia”, poważnie rozważał swój powrót do Niemiec. Szczęśliwie spotkał jednak biochemika Emory’ego Ellisa, który na tym samym co Morgan wydziale Caltechu badał bakteriofagi w połączeniu z guzami nowotworowymi u myszy⁵⁹⁰. Delbrück, świeżo zainteresowany wirusem mozaiki tytoniu (z ang. TMV, *tobacco mosaic virus*), zafascynowany prostotą i elegancją metod Ellisa, zdecydował się z nim współpracować. Dla niemieckiego fizyka bakteriofagi były prostym systemem biologicznym, którego poszukiwał. Jak się miało okazać właśnie badania nad fagami miały ogromne znaczenie dla rozwoju biologii molekularnej⁵⁹¹.

Bakteriofagi były wcześniej dokładnie badane przez wielu naukowców. Już w 1915 roku Frederick W. Twort zauważył istoty, które kontynuują infekowanie i zabijanie bakterii nawet po przejściu przez najlepsze porcelanowe filtry⁵⁹². Twort przerwał swoją pracę nad tymi osobliwymi bytami, gdyż problemy finansowe nie pozwoliły mu na prowadzenie dalszych badań. Felix d’Hérelle, związany z Instytutem Pasteura w Paryżu, odkrył podstawowe fakty dotyczące infekcji fagami. Zaobserwował, że punkt końcowy cyklu infekcyjnego został osiągnięty, kiedy bakteria uwalniała dużą liczbę jednostek infekujących. Fagi stały się ogromnie popularnym materiałem do badania bakteriologicznego w latach dwudziestych XX wieku w dużej mierze

⁵⁸⁷ Por. M. Morange, *A history of molecular biology*, s. 42.

⁵⁸⁸ Por. N. Roll-Hansen, *The application of complementarity...*, s. 426.

⁵⁸⁹ Por. M. Morange, *A history of molecular biology*, s. 42.

⁵⁹⁰ Por. L.E. Kay, *Conceptual models and analytical tools: the biology of physicist Max Delbrück*, „Journal of the History of Biology”, 2(18) (1985), s. 231.

⁵⁹¹ Por. J. Simmons, *Max Delbrück (1906–1981) i bakteriofagi*, s. 267.

⁵⁹² Por. V. Nanjundiah, *Delbrück’s publications in biology*, s. 39.

z powodu szeroko rozreklamowanego twierdzenia d'Hérelle'a, że są one głównymi czynnikami naturalnej odporności i zapewniają panaceum dla chorób bakteryjnych⁵⁹³. We wczesnych latach trzydziestych z problemem genu próbowali się zmierzyć Frank Macfarlane Burnet i Max Schlesinger. Ich praca zwiastowała rozwój genetyki molekularnej⁵⁹⁴. Burnet był pierwszym, który dostrzegł prawdziwą naturę bakterii lizygeniczych i wysunął pojęcie, które André Lwoff nazwał później „profagiem” jako niezakaźnym zarodkiem fagu. Burnet zapoczątkował genetykę fagów, kiedy odkrył wirusa mutanta, który utracił trwale i dziedzicznie zdolność do przenoszenia się jako profag. Z kolei Schlesinger pierwszy zastosował metody chemiczne i fizyczno-chemiczne do badania fagów. Za ich pomocą był w stanie dokonać dokładnego pomiaru rozmiaru cząsteczki fagu i pokazał, że cząsteczka składa się głównie z białka i DNA, w mniej więcej równych proporcjach.

Niemniej natura fagów i ich powiązanie z bakterią pozostały nie do końca jasne, przez co stały się tematem powszechnej debaty⁵⁹⁵. Niektórzy naukowcy uważali, że bakteriofagi były prawdziwymi cząsteczkami zakaźnymi. Inni, tak jak na przykład Albert Krueger i John Northrop, postrzegali namnażanie się fagów jako dowód na to, że autokatalityczna transformacja nieaktywnego prekursora białkowego była obecna w komórkach bakteryjnych przed zainfekowaniem ich fagiem. Zgodnie z tym powszechnie zaakceptowanym modelem, replikacja bakteriofagów była analogiczna do autokatalitycznej aktywacji enzymów, takich jak tripsyna. Wirusy zdawały się sytuować na granicy między życiem i nieżyciem. Wydawały się najprostszą formą życia, rozmnażającą się podczas infekowania organizmów bakteryjnych⁵⁹⁶. W 1935 roku Wendell M. Stanley z Instytutu Rockefellera dokonał ekscytującego odkrycia, że wirus mozaiki tytoniu może być oczyszczony i wykrystalizowany jako białko bez utraty swojej zdolności do zarażania roślin tytoniowych i replikacji wewnątrz nich, co zasugerowało, że geny mogą być białkami⁵⁹⁷. Badając wywołaną przez wirusy chorobę mozaiki tytoniu, Stanley dokonał krystalizacji obecnych w soku zakażonej rośliny cząsteczek

⁵⁹³ Por. G.S. Stent, *Max Delbrück, 1906–1981* [w:] J. Cairns, G.S. Stent, J.D. Watson (eds), *Phage and the origins of molecular biology*, Cold Spring Harbor Laboratory Press, New York 2007, s. 366.

⁵⁹⁴ Por. tamże, s. 367.

⁵⁹⁵ Por. M. Morange, *A history of molecular biology*, s. 43.

⁵⁹⁶ Por. N. Roll-Hansen, *The application of complementarity...*, s. 427.

⁵⁹⁷ Por. W. Hayes, *Max Delbrück and the birth of molecular biology*, s. 71–72. Krystalizacja wirusa zbudowanego z białka dokonana przez Stanleya umocniła powszechne wówczas białkowocentryczne spojrzenie na geny. Przypuszczano, że te tajemnicze obiekty mogą być genami. Ponieważ zaś w wirusach wykryto strukturę białkową, zakładano, że geny także zbudowane są z białka. Por. M. Cobb, *Największa tajemnica życia...*, s. 26.

zdolnych do zainfekowania zdrowych roślin. Delbrück, tak jak wielu innych ówczesnych naukowców, był pod ogromnym wrażeniem tego odkrycia⁵⁹⁸. W 1937 roku on, Timofiejew-Riesowski i Muller zostali zaproszeni do Kopenhagi przez Bohra, by omówić te nowe fakty, które wydawały się bardzo pomocne w zgłębianiu fenomenu życia⁵⁹⁹. Czy replikacja była autonomiczną własnością cząsteczki wirusa, czy może infekcja wzbudziła metabolizm gospodarza do wyprodukowania wirusowych białek? Oczywiście nie było wówczas wiadomo, że cząsteczki wirusowe zawierają kwas nukleinowy (RNA) pokrywający ich białko. Wniosek płynący z tych dyskusji był taki, że wirusy powinny być przedstawiane jako molekuły, a ich replikacja jako esencjalnie autonomiczna, zaś gospodarz udziela tylko pożywne środowiska. Dla niemieckiego fizyka wirus jako cząsteczka białkowa i zarazem najprostsza forma życia zdawał się być niepodzielną, elementarną jednostką życia, której poszukiwał⁶⁰⁰. W jego ocenie możliwe stało się badanie replikacji w jej najczystszej formie, „nienaruszonej” złożonością organizmów (takich jak *Drosophila*) czy też „zakłóconej” skutkami promieniowania rentgenowskiego. Bakteriofag zdawał się najprostszym przypadkiem replikacji zachodzącej w komórce, podstawowej jednostce życia, podobnie jak atom wodoru reprezentuje najprostszy przypadek ruchu elektronów wokół jądra⁶⁰¹. Delbrück założył, że w tak prostym systemie można prowadzić analizę fizyko-matematyczną na tyle daleko, że możliwe będzie odkrycie zasady komplementarności. Określił zagadkę życia (replikowanie się fagów) jako zamkniętą w „czarnej skrzynce” komórki (bakteria będąca żywicielem)⁶⁰². Biochemia nie miała żadnego znaczenia dla jego programu: nie trzeba otwierać skrzynki, aby przeanalizować replikację. Postrzegając komórki bakteryjne zasadniczo jako „czarną skrzynkę” ukrywającą zagadkę życia, a zachodzące wewnątrz niej dzielenie się fagów jako proces statystyczny, Delbrück wydedukował, że potrzebuje jedynie matematycznie powiązać w prawidłowo określonych warunkach wkład fagów z wynikami, jakie przyniosą, by powstałe w ten sposób równanie „zdradziło” ukryte mechanizmy replikacji fagów⁶⁰³. Takie matematyczne podejście zminimalizowałoby potrzebę manipulacji biologicznych i interwencji mechanicznych, którym niemiecki fizyk zdecydowanie się sprzeciwiał. Chciał, aby fizjologiczny stan organizmu pozostał „nienaruszony”.

⁵⁹⁸ Por. L.E. Kay, *Quanta of life...*, s. 6.

⁵⁹⁹ Por. W. Hayes, *Max Delbrück and the birth...*, s. 72.

⁶⁰⁰ Por. L.E. Kay, *Quanta of life...*, s. 6.

⁶⁰¹ Por. tamże, s. 10.

⁶⁰² Por. tenże, *The molecular vision of Life...*, s. 135.

⁶⁰³ Por. tenże, *Quanta of life...*, s. 11.

Bakteriofag – lub też wirus bakteryjny – od razu wydał się Delbrückowi idealny do badań nad kluczową charakterystyką życia, to jest samoreplikacją⁶⁰⁴. Bakteriofagi infekują bakterie i szybko się w nich dzielą, w końcu niszcząc organizm gospodarza i dając początek generacji nowych wirusów⁶⁰⁵. Wirus poza organizmem gospodarza wydaje się martwy⁶⁰⁶. Gdy dostaje się do wnętrza bakterii, uaktywnia się i rozpoczyna cykl wirusowej reprodukcji. Ponieważ wirusy te żyją kosztem zainfekowanej bakterii, stąd noszą nazwę „bakteriofagów” czy w skrócie „fagów”⁶⁰⁷. Ponadto wydają się podstawowymi cząsteczkami biologicznymi: mają mniej niż jedną tysięczną milimetra długości, co oznaczało, że (zgodnie z wcześniejszym badaniem Delbrücka) są mniejsze od genów⁶⁰⁸. Niemiecki fizyk podkreśla, że proces wirusowej reprodukcji jest bez porównania bardziej złożony niż reprodukcja komórkowa, gdyż z jednej komórki mogą powstać dwie, a w przypadku wirusa z jednego elementu powstaje nawet kilkaset⁶⁰⁹.

Owoce wspólnych badań Ellisa i Delbrücka prezentuje publikacja *The growth of bacteriophage* (Dorastanie bakteriofagów). Praca rozpoczyna się od stwierdzenia: „Niektóre duże białkowe molekuly (wirusy) posiadają zdolność mnożenia się wewnątrz organizmów żywych”⁶¹⁰. Autorzy przechodzą następnie do scharakteryzowania procesu jako takiego, który „jest jednocześnie obcy dla chemii i fundamentalny dla biologii”⁶¹¹. Przedmiotem analiz jest sposób, w jaki wirus bakteryjny lub bakteriofag (fag) rośnie. Badacze pokazali, że rozmnażanie się bakteriofagów to proces nieregularny, zajmujący określony czas i wiążący się z cyklem etapów⁶¹². Ich eksperyment zademonstrował, że po tym, jak cząsteczka fagu zaraża swojego gospodarza bakteryjnego, upływa półgodzinny utajony okres, podczas którego rodzicielski fag mnoży się, żeby mogło powstać kilkaset potomków⁶¹³. Fagi szybko przyłączają się do nowych żywicieli, infekują je, a po trzydziestu minutach

⁶⁰⁴ Por. M. Morange, *A history of molecular biology*, s. 42.

⁶⁰⁵ Por. M. Delbrück, M.B. Delbrück, *Bacterial viruses and sex*, „Scientific American”, 7 (1948), s. 110.

⁶⁰⁶ Por. tamże, s. 111.

⁶⁰⁷ Por. D. Depew, B. Weber, *Darwinism evolving...*, s. 343. Termin „bakteriofagi” oznacza dosłownie „zjadacze bakterii” (od greckiego *phagein* „jeść”). Por. tamże.

⁶⁰⁸ Por. M. Morange, *A history of molecular biology*, s. 42.

⁶⁰⁹ Por. M. Delbrück, *A physicist looks at biology*, Yale University Press, New Haven 1949, s. 180.

⁶¹⁰ E.L. Ellis, M. Delbrück, *The growth of bacteriophage*, „The Journal of General Physiology”, 22 (1939), s. 365. Por. V. Nanjundiah, *Delbrück's Publications in Biology*, s. 38.

⁶¹¹ E.L. Ellis, M. Delbrück, *The growth of bacteriophage*, s. 365.

⁶¹² Por. M. Morange, *A history of molecular biology*, s. 61.

⁶¹³ Por. G.S. Stent, *Max Delbrück, 1906–1981*, s. 367.

dochodzi do kolejnego gwałtownego wzrostu ich liczby⁶¹⁴. Zarówno gwałtowność, z jaką bakteriofagi oddziałują na bakterię, jak i występowanie nieciągłej krzywej wzrostu są zjawiskami wcześniej nieobserwowanymi. Delbrück uświadomił sobie, że zakażona fagiem bakteria przedstawia idealny system eksperymentalny do badania samoreplikacji⁶¹⁵.

Stypendium, które niemiecki fizyk otrzymał od Fundacji Rockefellera, zostało przedłużone w 1938 roku⁶¹⁶. Wybuch wojny w 1939 roku zapobiegł powrotowi Delbrücka do Berlina i sprawił, że przyjął on posadę wykładowcy fizyki na Uniwersytecie Vanderbilta w Nashville w stanie Tennessee, z klauzulą zezwalającą mu poświęcać połowę swojego czasu na badania biologiczne⁶¹⁷. Dzięki stałej posadzie Delbrück był w stanie prowadzić dalsze badania nad fagami⁶¹⁸. Jego współpracownik, Ellis, musiał przerwać prace nad fagami i ponownie zająć się badaniami nad rakiem⁶¹⁹. Mimo to przez następne siedem lat kontynuował swoje badania nad genetyką wirusów bakteryjnych w stacji badawczej Cold Spring Harbor Laboratory w Long Island Sound⁶²⁰. Bakteriofagi okazały się najprostszą jednostką biorącą udział w pewnego rodzaju dziedzicznym transferze informacji⁶²¹. Fag składa się jedynie z dwóch rodzajów makrocząsteczek biologicznych, a dokładnie białek i kwasu nukleinowego (DNA).

W połowie lat czterdziestych XX wieku Oswald Avery i współpracownicy z Rockefeller Institute wykazali, że DNA wywiera wpływ na wywołaną przez bakteriofagi transformację komórek bakteryjnych; a więc to DNA, a nie białko zawiera informacje genetyczne⁶²². Jednakże głównie ze względu na to iż wydawało się, że DNA nie zawiera wiele informacji, wyniki badań Avery'ego i jego współpracowników przeszły bez większego echa⁶²³. W porównaniu z białkami, które składają się z dwudziestu różnych podjednostek monomerycznych (aminokwasów), DNA składa się jedynie z czterech jednostek. Dlatego też Delbrück uznał za bardziej prawdopodobne to, że to białka są podstawą informacji dziedzicznej. Dla lidera informacyjnego obozu fizyków-biologów molekularnych heurystyka „informacji” odbiegała od DNA i „ścieżki do podwójnej helisy”.

⁶¹⁴ Por. M. Morange, *A history of molecular biology*, s. 43.

⁶¹⁵ Por. G.S. Stent, *Max Delbrück, 1906–1981*, s. 367.

⁶¹⁶ Por. M. Morange, *A history of molecular biology*, s. 43.

⁶¹⁷ Por. W. Hayes, *Max Delbrück and the birth...*, s. 73–74.

⁶¹⁸ Por. M. Morange, *A history of molecular biology*, s. 43.

⁶¹⁹ Por. tamże, s. 44.

⁶²⁰ Por. L.E. Kay, *Quanta of life...*, s. 12.

⁶²¹ Por. L. Moss, *What genes can't do*, s. 54.

⁶²² Por. tamże, s. 54. Por. J. Simmons, *Max Delbrück (1906–1981) i bakteriofagi*, s. 267.

⁶²³ Por. L. Moss, *What genes can't do*, s. 55.

Intelekt i charyzma Delbrücka sprawiły, że Kalifornijski Instytut Technologii i stacja badawcza Cold Spring Harbor stały się dla biologii molekularnej magnesami przyciągającymi setki naukowców (biologów, chemików i fizyków). Brali oni udział w kursach biologii fagowej w Cold Spring Harbor⁶²⁴. Określano ich jako członków „Grupy Fagowej” (ang. *Phage Group*), a ich głównym celem była analiza uniwersalnego zjawiska życia – replikacji genetycznej – w jej najprostszej z możliwych form, a co za tym idzie – odkrycie mechanizmów umożliwiających cząsteczkom odtwarzanie się z tak niezwykłą dokładnością. Członkowie „Grupy Fagowej” wierzyli, że tak dokładny proces kopiowania się cząsteczek musi wiązać się z działaniem nieznanymi jeszcze praw fizyki, a tradycyjne prawa fizyki uważali za niewystarczające⁶²⁵. Grupa ta nie uważała tradycyjnych praw fizyki za wystarczające, by wyjaśnić kwestie związane z genetyką i stąd była zdania, że równie dobrze analiza procesu genetycznego może prowadzić do powstania nowych praw fizyki⁶²⁶.

Najpierw w 1941 roku do Delbrücka dołączył Salvador Luria, który rozpoczął badania nad fagiem we Włoszech na tych samych co Delbrück ogólnych założeniach. Delbrück i Luria zdecydowali się pracować wspólnie nad efektami infekowania bakterii jednocześnie dwoma różnymi rodzajami fagów⁶²⁷. Aby mieć pod kontrolą doświadczenia, Luria wyizolował bakteryjne odmiany odporne na każdy z dwóch fagów. Zrodziło się wówczas pytanie, czy odporność tę zawdzięczały mutacji czy lamarkowskiemu przystosowywaniu się stałych dawek bakterii, wywołanemu przez kontakt z fagiem (pogląd szeroko utrzymywany w tym czasie, ponieważ uważano, że bakterie nie posiadają zorganizowanego systemu genetycznego). Luria stworzył ideę mówiącą, że jeżeli serie szczepów są napoczęte tylko w kilku komórkach, niektóre wywołają mutacje wcześniej, inne później (ponieważ mutacje pojawiają się spontanicznie i przypadkowo), nastąpi więc znaczne wahanie pomiędzy końcową liczbą mutacji w skądinąd identycznych szczepach. Dla kontrastu, jeśli odporność pojawia się wskutek przyjmowania stałych dawek komórek w szczepach, liczba odpornych komórek, ustalona przez ich zdolność do tworzenia szczepów w obecności fagów, nie powinna

⁶²⁴ Por. R. Olby, *The path to the double helix...*, s. 225. Por. L.E. Kay, *Quanta of life...*, s. 4.

⁶²⁵ Por. R. Olby, *The path to the double helix...*, s. 225. Por. L.E. Kay, *Quanta of life...*, s. 4. Członkowie tej grupy byli silnie motywowani w swoich pracach fizyką kwantową. Por. J.A. Fuerst, *The role of reductionism in the development of molecular biology: peripheral or central?*, „Social Studies of Science”, 1(12) (1982), s. 252.

⁶²⁶ Por. R. Olby, *The path to the double helix...*, s. 226.

⁶²⁷ Por. W. Hayes, *Max Delbrück and the birth...*, s. 74.

się wahać, ale leżeć w granicach oczekiwanych przy losowym pobieraniu próbek. Luria napisał o swoim pomysle do Delbrücka, który odpowiedział manuskrypcem zawierającym teorię matematyczną jako podstawę dla doświadczeń, które wykazały, że bakterie zyskują odporność na fagi dzięki mutacji. Wyniki swoich badań Luria i Delbrück opublikowali w 1943 roku w artykule *Mutations of bacteria from virus sensitivity to virus resistance* (Mutacje bakterii, od wrażliwości wirusów do ich odporności), który był punktem wyjściowym dla biologii molekularnej, ponieważ to w nim pierwszym pokazano, że bakterie posiadają geny, tak jak komórki wyższych organizmów. Artykuł wprowadził w badania nad genetyką bakteryjną, która stała się jednym z głównych narzędzi badania molekularnego podłoża życia. W 1943 roku do Delbrücka i Lurii dołączył Alfred D. Hershey⁶²⁸. Mniej więcej w tym czasie wszyscy trzej nawiązali współpracę z Thomasem F. Andersonem, który odkrył anatomię fagów, otaczających swojego gospodarza w liczbie około tysiąca. Wyglądem przypominały one kijanki z kanciastymi główkami i wąskimi rurkowatymi ogonami, za pomocą których przyłączały się do ścian komórkowych bakterii⁶²⁹.

Delbrück, Luria i Hershey swoimi badaniami nad fagami nadali fundamentalnie nowy wymiar genetyce, porównywalny z wcześniejszym opracowaniem Morgana i jego szkoły skupionej na *Drosophila*⁶³⁰. Co więcej, genetyka fagów stała się trampoliną dla biologii molekularnej. Dzięki swoim pracom poświęconym bakteriofagom Delbrück odniósł sukces, stając się jednym z najbardziej znanych biologów na świecie. W stacji badawczej Cold Spring Harbor zainicjował wakacyjny „Kurs na temat fagów” dzięki poparciu dyrektora Milislava Demereca, genetyka ds. *Drosophila*, którego również przekierował na genetykę bakteryjną⁶³¹. Ogólnie odbyło się tam 26 kursów, poczynając od 1945 roku, a Delbrück był głównym wykładowcą przez pierwsze trzy lata. Udział w nich wymagał zdania przedwstępnego egzaminu

⁶²⁸ Por. D. Fleming, *Émigré physicists...*, s. 178. Por. L. Moss, *What genes can't do*, s. 54.

⁶²⁹ Delbrück, Luria i Hershey tworzyli grupę badawczą, powszechnie znaną jako „Grupa Fagowa”. Ściśle rzecz biorąc określenie „Grupa Fagowa” odnosi się do wszystkich naukowców, którzy w latach 1940–1960 wykorzystywali wirusy bakteryjne („bakteriofagi”) jako systemy modelowe w badaniach nad funkcjonowaniem organizmów. Grupa ta nigdy nie miała określonej struktury, ani też oficjalnie nie istniała. Badania prowadzone przez jej członków różniły się od siebie, zmieniając się z biegiem lat. To, co nadało grupie jej tożsamość, było sposobem myślenia, a także nowym podejściem do problemów biologicznych. W dużej mierze był to wpływ Delbrücka, którego powszechnie uważano za założyciela i siłę napędową „Grupy Fagowej”. Por. M. Morange, *A history of molecular biology*, s. 39.

⁶³⁰ Por. D. Fleming, *Émigré physicists...*, s. 178.

⁶³¹ Por. W. Hayes, *Max Delbrück and the birth...*, s. 75.

potwierdzającego biegłość w matematyce i metodach statystycznych. Szkolenia stały się popularne i przez lata uczestniczyło w nich ponad czterystu kursantów, w tym wielu zagranicznych, od doktorantów do starszych naukowców, z których wielu kontynuowało prace nad tematem fagów lub genetyki bakteryjnej. Warto wspomnieć, że z Delbrückiem i innymi członkami „Grupy Fagowej” związał się James Watson. Brał on udział w letnich kursach fagowych prowadzonych w stacji badawczej Cold Spring Harbor⁶³². Niemiecki fizyk organizował również coroczne „Spotkania Fagowe” (ang. *Phage Meetings*), podobne do tych z Cold Spring Harbor. Pierwsze odbyło się w 1947 roku w Nashville⁶³³. Trzecie spotkanie zostało przeprowadzone w Cold Spring Harbor i odbywały się tam bez przerwy aż do 1981 roku. Za każdym razem gromadziły one setki uczestników. Po wojnie Delbrück odegrał rolę we wprowadzeniu genetyki molekularnej do niemieckiej nauki, pomagając zorganizować nowy Institute of Genetics w Kolonii, oparty na współpracy (co było bardzo odmienne od tradycyjnego hierarchicznego niemieckiego systemu), oficjalnie otwarty w 1961 roku⁶³⁴. Delbrück pozostawał jego dyrektorem do 1962 roku, kiedy to wrócił do Caltechu. Przez kilka następnych lat odwiedzał Kolonię prawie co rok, by wygłaszać wykłady rozszerzające tematykę obowiązujących programów nauczania.

Jak wyglądał antyredukcyjny program badawczy Delbrücka? Aby odpowiedzieć na to pytanie, sięgnijmy do dwóch jego prac z lat czterdziestych: serii wykładów zatytułowanych *Problems of modern biology in relation to atomic physics* (Problemy współczesnej biologii w powiązaniu z fizyką atomową) wygłoszonych w 1944 roku w Vanderbilt University School of Medicine oraz wykładu wygłoszonego pięć lat później w Connecticut Academy of Arts and Sciences, o tytule *A physicist looks at biology* (Spojrzenie fizyka na biologię). Stworzony przez niemieckiego fizyka program genetyki opierał się na idei Bohra z 1932 roku⁶³⁵. Tematyka wykładów w znacznej mierze pokrywa się, jednakże można zaobserwować w nich wyraźną zmianę polegającą na narastającej świadomości różnic pomiędzy fizyką i biologią⁶³⁶.

Podobnie jak Bohr – Delbrück odrzuca zarzut bycia witalistą i podkreśla, że fizyka i chemia „stabilizują” biologię⁶³⁷. Ożywione i nieożywione obiekty zbudowane są dokładnie z tych samych pierwiastków i podlegają

⁶³² Por. tamże, s. 77.

⁶³³ Por. tamże, s. 75.

⁶³⁴ Por. tamże, s. 80.

⁶³⁵ Por. N. Roll-Hansen, *The application of complementarity...*, s. 430.

⁶³⁶ Por. tamże, s. 428.

⁶³⁷ Por. D. Fleming, *Émigré physicists...*, s. 168–169.

zasadzie zachowania energii⁶³⁸. Nie oznaczało to jednak, że niemiecki fizyk identyfikował się z poglądami redukcjonistów. Podczas gdy Bohr rozważał nietknięty organizm żywy jako nieredukowalną jednostkę biologii, Delbrück miał tendencję do „skalowania w dół”. Teoria, zgodnie z którą, dziedziczność jest kontrolowana przez geny ułożone liniowo wzdłuż chromosomów, może sprawiać wrażenie, że problem reprodukcji da się zredukować do reprodukcji genów⁶³⁹. Delbrück utrzymywał, że nie jest to prawda, „ponieważ, z wyjątkiem genu znajdującego się wewnątrz nienaruszonej funkcjonalnej komórki, nie zaobserwowano reprodukcji genów. Mamy więc powód, by przypuszczać, że ta zależność od nienaruszonej komórki odgrywa znaczącą rolę”⁶⁴⁰. Geny nigdy nie zostały podzielone poza „nietkniętą funkcjonalną [żywą] komórką”⁶⁴¹. Innymi słowy, niemiecki fizyk twierdzi, że nie możemy oczekiwać rozmnażania się kiedykolwiek genów *in vitro* w bezkomórkowej pożywce znajdującej się w próbówce⁶⁴².

Delbrück uważa, że większość gałęzi biologii świetnie radzi sobie bez żadnego udziału chemii czy fizyki. „Zwyczaje roślin i zwierząt – pisze – rozmnażanie i ewolucja, i relacje do symbiontów i do ich wrogów, mogą być w całości opisane i analizowane z bardzo małym odniesieniem do koncepcji fizyki i chemii”⁶⁴³. Genetykę uznaje on za najbardziej niezależną z gałęzi biologii i charakteryzuje ją w następujących słowach: „genetyka [...] w swojej czystej postaci bazuje na »czynnikach dziedzicznych« i »cechach fenotypowych«, w doskonale logicznym systemie, bez konieczności zajmowania się procesami, na drodze których »postaci powstają z czynników«. Sedno tej nauki tkwi w istnieniu naturalnych jednostek, to jest poszczególnych organizmów, które w genetyce odgrywają bardzo podobną rolę, co atomy i cząsteczki w chemii”⁶⁴⁴. Niemiecki fizyk wyjaśnił więc komplementarność biologiczną, opierając się na analogii pomiędzy organizmami żywymi a atomami i molekułami⁶⁴⁵. Organizmy jako całość nie mogą być wyjaśnione poprzez fizykę czy chemię, tak jak chemia nie może być wyjaśniona przez fizykę klasyczną⁶⁴⁶. Delbrück spodziewał się, że w genetyce pojawi się paradoks podobny do tego, jaki Bohr znalazł w fizyce w 1913 roku, w swoim

⁶³⁸ Por. tamże, s. 169.

⁶³⁹ Por. M. Delbrück, *A physicist looks at biology...*, s. 180.

⁶⁴⁰ Tamże.

⁶⁴¹ Tamże.

⁶⁴² Por. N. Roll-Hansen, *The application of complementarity...*, s. 428.

⁶⁴³ M. Delbrück *A physicist looks at biology...*, s. 184.

⁶⁴⁴ Tenże, *Problems of modern biology in relation to atomic physics. A series of lectures given at the Vanderbilt University School of Medicine April and May 1944*, Nashville 1946, s. 1.

⁶⁴⁵ Por. N. Roll-Hansen, *The application of complementarity...*, s. 429.

⁶⁴⁶ Por. tamże, s. 429–430.

modelu atomu wodoru⁶⁴⁷. Duński fizyk wyjaśnił wiązanie chemiczne, a także promieniowanie spektralne poprzez wprowadzenie stałych orbit dla elektronów i nie-klasycznych przeskoków pomiędzy orbitami. Delbrück miał nadzieję doprowadzić do analogicznego przełomu w genetyce, a mianowicie „konfliktu pomiędzy oddzielnymi zakresami doświadczenia, które stopniowo zaostwiają się, by stworzyć paradoks i muszą być rozwiązane poprzez całkowicie nowe podejście”⁶⁴⁸.

Delbrück zagłębiał się w bogate możliwości „konfliktu między odmiennymi obszarami doświadczenia, stopniowo przechodzącymi w paradoks”⁶⁴⁹. Pisał: „w przypadku żywej komórki wiemy, że wiele zależy od szczegółowych właściwości »struktury«. Przez pojęcie »struktura« mamy na myśli odpowiednie niejednorodności w składzie komórek. Te istotne niehomogeniczności docierają aż do samej skali atomowej. W celu uzyskania wiedzy na temat tych drobnych detali wystarczy wprowadzić optymalne, kwantowo-mechaniczne obliczenia. Dokonane musiałyby być tak finezyjne obserwacje, jak rozdmuchnięcie żywej komórki na części, podobnie jak w celu znalezienia elektronu w atomie rozdmuchujemy go z jego stanu stacjonarnego. Zgodnie z tym poglądem można spodziewać się, że pewne cechy żywej komórki będą komplementarne dla jej opisu w ramach fizyki atomowej. Mówiąc możliwie najprościej: możemy dowiedzieć się, gdzie znajdują się atomy w komórce, ale robiąc to, uśmiercimy komórkę. Trzeba być wówczas przygotowanym na znalezienie takich cech żywej komórki, które nie są redukowalne do fizyki atomowej, na tej samej zasadzie, na jakiej znajdujemy właściwości atomu, to jest jego stabilność, których nie można zredukować do mechaniki”⁶⁵⁰. Powyższa idea, pochodząca od Bohra, stawia relację między fizyką i biologią na zupełnie nowej płaszczyźnie. Delbrück pisze: „Zamiast celować w całość zjawisk wykazywanych przez żywą komórkę, możemy teraz spodziewać się znaleźć naturalne granice, a tym samym nowe dziewicze terytoria rządzone przez prawa niezależne od praw fizyki, ze względu na fakt, że odnoszą się one do zjawisk, których występowanie jest uwarunkowane niedokonywaniem obserwacji niezbędnych do zastosowania fizyki atomowej. Dla fizyka – a być może i dla biologa – staje się niezwykle interesujące dowiedzieć się, jak daleko fizyka atomowa prowadzi nas w zrozumienie zjawisk żywej komórki”⁶⁵¹. Badacz stoi na stanowisku, że replikacja komórek (i w związku z tym genów) jest jednym z najlepszych

⁶⁴⁷ Por. tamże, s. 430.

⁶⁴⁸ M. Delbrück, *A physicist looks at biology...*, s. 186.

⁶⁴⁹ D. Fleming, *Émigré physicists...*, s. 170.

⁶⁵⁰ M. Delbrück, *Problems of modern biology...*, s. 4.

⁶⁵¹ Tamże, s. 4–5.

miejsc do poszukiwania „wzajemnie się wykluczającego związku” między biologią komórkową a mechaniką kwantową⁶⁵².

Wyniki kluczowych badań „Grupy Fagowej” – badań nad replikacją bakteriofagów – okazały się raczej nieistotne⁶⁵³. Nie doszukano się żadnych paradoksów, wręcz przeciwnie – udowodniono, że proces replikacji DNA jest zależny od tradycyjnych praw fizyki i chemii strukturalnej, co doprowadziło do powstania czysto molekularnego opisu tego procesu⁶⁵⁴. Marzenie Delbrücka, by zrozumieć replikację jako proste zjawisko, bez konieczności otwierania biochemicznej „czarnej skrzynki” okazało się złudzeniem⁶⁵⁵.

W 1942 roku Thomas Anderson wykorzystał w badaniach nad bakteriofagami mikroskop elektronowy⁶⁵⁶. Okazało się, że nie są one podstawowymi cząsteczkami biologicznymi, lecz złożonymi organizmami o wysokiej organizacji i strukturze (podobne obrazy zostały uzyskane w 1941 roku w Niemczech przez Ernsta Ruske). Badań przeprowadzonych po tym odkryciu (w których zakłócano replikację bakteriofagów różnego rodzaju działaniami fizycznymi, w szczególności promieniowaniem) nie można określić jako sposobu charakteryzowania różnych etapów replikacji. Dlatego pierwotny projekt badawczy „Grupy Fagowej” okazał się porażką. Nie tylko nie doprowadzono do odkrycia nowej zasady fizyki, ale też nie odkryto żadnego paradoksu. Badania nad bakteriofagami znalazły się pod wpływem biochemii, której nie doceniał Delbrück.

Osiągnięcia w dziedzinie biologii zostały uhonorowane w 1969 roku Nagrodą Nobla⁶⁵⁷. Niemiecki fizyk dzielił ją z dwoma mikrobiologami, Salvadorem Lurią i Alfredem Hersheyem. Większość współpracowników „Grupy Fagowej” nie podzielała wiary Delbrücka w „obserwacyjną komplementarność” biologii, analogiczną do komplementarności występującej w fizyce. Luria kwestionował jej istnienie, a Hershey opisał ją jako pustosłowie. Powojenne badania pokazały niezbicie, że biologiczne mechanizmy nawet najprostszych jednostek biologicznych są o wiele bardziej skomplikowane niż mechanizmy działające w fizyce, w której występowała zasada komplementarności⁶⁵⁸. Na początku lat pięćdziesiątych dzięki Jamesowi Watsonowi i Francisowi Crickowi stało się jasne, że odpowiedź dotycząca replikacji jest ukryta w strukturze DNA, co było kamieniem milowym

⁶⁵² Por. tenże, *A physicist looks at biology...*, s. 19.

⁶⁵³ Por. M. Morange, *A history of molecular biology*, s. 44.

⁶⁵⁴ Por. R. Olby, *The path to the double helix...*, s. 225.

⁶⁵⁵ Por. M. Morange, *A history of molecular biology*, s. 44–45.

⁶⁵⁶ Por. tamże, s. 45.

⁶⁵⁷ Por. N. Roll-Hansen, *The application of complementarity...*, s. 440.

⁶⁵⁸ Por. L.E. Kay, *Quanta of life...*, s. 13–14.

w rozwoju biologii molekularnej⁶⁵⁹. Odkrycie to stanowiło także inspirację dla ogromnej liczby badań biochemicznych, które pozwoliły zdefiniować DNA jako cząsteczkę informacyjną⁶⁶⁰. Kombinacja poparcia eksperymentalnego i teoretycznego rozwoju modelu Watsona i Cricka doprowadziła do „złamania” kodu genetycznego oraz wyjaśnienia „mechanizmu”, dzięki któremu informacja zakodowana w DNA kieruje syntezą białek⁶⁶¹. Podwójna helisa zdawała się ostatecznie podważać twierdzenie, iż życie nie może zostać zredukowane do zasad fizyki klasycznej⁶⁶². Nie pojawiło się nic, co mogłoby przeczyć temu twierdzeniu. W ciągu następnych lat szczegółowa wiedza dotycząca kodu genetycznego, syntezy białek i tym podobnych wyeliminowała jakiegokolwiek spekulacje dotyczące paradoksów w genetyce molekularnej⁶⁶³. W miarę upływu czasu Delbrück zdał sobie sprawę, że podwójna helisa była przełomem w chemicznym wyjaśnianiu dziedziczności⁶⁶⁴. Idea fizycznej komplementarności nie sprawdziła się w badaniach genetycznych. Komplementarność stała się martwą kwestią, bez której genetyka molekularna mogła się obyć⁶⁶⁵.

Mimo porażki w próbach poszukiwania paradoksów w genetyce Delbrück postrzegał aplikację zasady komplementarności do biologii jako „niekończoną sprawę”, dlatego też porzucił genetykę na rzecz fizjologii zmysłów (tak jak wcześniej porzucił astrofizykę dla fizyki atomowej, a później fizykę atomową dla genetyki) w poszukiwaniu zasady komplementarności⁶⁶⁶. Tym razem przedmiotem jego badań stało się ustalenie fundamental-

⁶⁵⁹ Por. tamże, s. 14. Por. M. Ruse, *Introduction* [w:] M. Ruse (ed.), *Philosophy of biology*, Macmillan Publishing Company, New York 1989, s. 17. Victor K. McElheny twierdzi, że odkrycie Watsona i Cricka było „szczęśliwym trafem” opartym na danych zdobytych przez innych naukowców. Por. V.K. McElheny, *Watson and DNA. Making a scientific revolution*, Basic Books, New York 2004, s. xi. W teorii podwójnej helisy DNA Watsona i Cricka „komplementarność” stała się pojęciem całkowicie chemicznym, a zasada komplementarności odnosiła się do parowania zasad azotowych w DNA poprzez wiązania wodorowe. Por. U. Deichmann, *A brief review of the early history of genetics and its relationship to physics and chemistry* [w:] S. Wenkel, U. Deichmann (eds), *Max Delbrück and Cologne. An early chapter of German molecular biology*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., New Jersey–London 2007, s. 7–8.

⁶⁶⁰ Por. J. Lederberg, *What the double helix (1953) has meant for basic biomedical science* [w:] S. Sarkar, *The philosophy and history of molecular biology...*, s. 15.

⁶⁶¹ Por. K.F. Schaffner, *Theories and explanations in biology*, „Journal of the History of Biology”, 2 (1969), s. 22.

⁶⁶² Por. E.P. Fischer, C. Lipson, *Thinking about science...*, s. 84.

⁶⁶³ Por. N. Roll-Hansen, *The application of complementarity...*, s. 437. Por. P. Kitcher, *1953 and all that. A tale of two sciences*, „The Philosophical Review”, 3(93) (1984), s. 335.

⁶⁶⁴ Por. N. Roll-Hansen, *The application of complementarity...*, s. 432.

⁶⁶⁵ Por. E.P. Fischer, C. Lipson, *Thinking about science...*, s. 84.

⁶⁶⁶ Por. tamże, s. 84. Por. L.E. Kay, *Quanta of life...*, s. 14.

nego mechanizmu, za pomocą którego organizmy żywe reagują na środowisko⁶⁶⁷. W pewnym sensie jego nowy projekt z epistemologicznego punktu widzenia mógł być postrzegany jako kolejne wcielenie projektu fagowego⁶⁶⁸. Ponownie zdecydował się zbadać najprostszy organizm fototropowy – mało znanego grzyba *Phycomyces* jako model umożliwiający zrozumienie zajmowania się sygnałem na poziomie molekularnym⁶⁶⁹. W swojej fazie wzrostu ciało grzyba przejawia dużą różnorodność zachowań, zwłaszcza ruchów. Wydają się one prymitywnymi wersjami zachowań motorycznych, towarzyszącymi stymulacji wyższych organizmów przez bodźce sensoryczne⁶⁷⁰. Delbrück miał nadzieję, że *Phycomyces* mimo braku odpowiednika układu nerwowego może stać się „bakteriofagiem” biologii sensorycznej i zapewnić wejście w zasadę przetwarzania informacji czuciowych u bardziej złożonych organizmów. W końcu udało mu się znaleźć zjawisko biologiczne, w którym proces pomiaru sam w sobie był wystarczająco podobny do sytuacji kwantowej, by wywołać ograniczenie procesu pomiaru w myśl zasady nieoznaczoności Heisenberga⁶⁷¹. Miał nadzieję, że dzięki zbadaniu procesu, za pomocą którego kwanty powodowały odpowiedzi sensoryczne, będzie w końcu mógł stanąć wobec mechanizmu całkowicie odmiennego od tych już poznanych w biologii⁶⁷². Ostatecznie jednak i ten program zakończył się porażką⁶⁷³.

Herman Muller, jeden z najwybitniejszych genetyków tego okresu, w przeciwieństwie do stanowiska wobec poglądów Bohra, które określił jako „beznadziejnie witalistyczne”, rozmowy z Delbrückiem na tematy biologiczne uważał za niezwykle interesujące⁶⁷⁴. Paradoxy komplementarności biologicznej pozostały jednak nieuchwytnie⁶⁷⁵. Alternatywny program badawczy oparty na ustalonej fizyce i chemii okazał się lepszy w swojej zdolności do generowania dających się przetestować hipotez i nowej wiedzy. Kariera naukowa niemieckiego fizyka pokazuje, że sukces badań biologicznych może być czasem niezależny od poprawności przyjmowanych założeń filozoficznych⁶⁷⁶.

⁶⁶⁷ Por. W. Beese, *Max Delbrück: a physicist in biology*, s. 421.

⁶⁶⁸ Por. L.E. Kay, *Quanta of life...*, s. 14.

⁶⁶⁹ Por. tamże, s. 14–15.

⁶⁷⁰ Por. V. Nanjundiah, *Delbrück's publications in biology*, s. 47.

⁶⁷¹ Por. L.E. Kay, *Quanta of life...*, s. 15.

⁶⁷² Por. tamże, s. 16.

⁶⁷³ Por. M. Delbrück, *A physicist's renewed look at biology: 20 years later*, „Science”, 168 (1970), s. 1313.

⁶⁷⁴ Por. N. Roll-Hansen, *The application of complementarity...*, s. 426.

⁶⁷⁵ Por. tamże, s. 430.

⁶⁷⁶ Por. tamże, s. 441.

Innym fizykiem zainteresowanym poglądami biologicznymi Bohra był autor kwantowej teorii życia – Pascual Jordan⁶⁷⁷. Bohr był dla Jordana (podobnie jak dla Delbrücka) ważnym mentorem⁶⁷⁸. Jordan szybko stał się entuzjastycznym zwolennikiem idei duńskiego fizyka w kontekście debat nad interpretacją mechaniki kwantowej i kontynuatorem jego kwantowo-mechanicznego myślenia w innych dziedzinach wiedzy, w tym biologii⁶⁷⁹. W publikacjach Jordana zasada komplementarności nie tylko nadała sens nowej fizyce, ale również mogła zrewolucjonizować całokształt naukowego myślenia. Podczas corocznego wielkanocnego spotkania fizyków teoretyków w Instytucie Bohra w 1929 roku rozpoczął z Bohrem dyskusję wokół możliwości interdyscyplinarnego zastosowania zasady komplementarności⁶⁸⁰. Po wspólnych rozmowach z okazji kopenhaskiej konferencji fizycznej w 1931 roku Jordan wysłał Bohrowi rękopis o zastosowaniu teorii kwantowej do biologii i psychologii – szkic, który miał stać się pierwszą biologiczną pu-

⁶⁷⁷ Pascual Jordan (1902–1980) był niemieckim pionierem fizyki kwantowej. Studiował fizykę w Technische Hochschule w Hanowerze i na uniwersytecie w Getyndze. W 1924 roku, mając zaledwie dwadzieścia dwa lata, otrzymał tytuł doktora. Współpraca z promotorem pracy Maxem Bornem oraz Wernerem Heisenbergiem zaowocowała stworzeniem w 1925 roku podstaw tak zwanej mechaniki macierzowej, będącej pierwszym pełnym i spójnym opisem mechaniki kwantowej. W tym samym roku Jordan opublikował pracę *Zur Quantenmechanik* (O mechanice kwantowej). Dalsza część jego pracy została opublikowana rok później wspólnie z Bornem i Heisenbergiem pod tytułem *Zur Quantenmechanik II* (O mechanice kwantowej II). Praca ta znana jako *Dreimännerwerk* (Dzieło trzech ludzi) miała fundamentalne znaczenie dla historii mechaniki kwantowej, będąc kamieniem milowym w jej rozwoju. Jordan otrzymał postdoktoranckie stypendium umożliwiające mu naukę w Instytucie Fizyki Teoretycznej Nielsa Bohra w Kopenhadze latem i jesienią 1927 roku. Por. D. Fleming, *Émigré physicists...*, s. 187. Por. P.R. Sloan, *Biophysics in Berlin: the Delbrück club* [w:] P.R. Sloan, B. Fogel (eds), *Creating a physical biology...*, s. 64. Por. Al-Khalili J., McFadden J., *Życie na krawędzi. Era kwantowej biologii*, tłum. T. Krzysztoń, Prószyński i S-ka, Warszawa 2016, s. 64. Por. L. Joaquim, O. Freire Jr., Ch.N. El-Hani, *Quantum explorers...*, s. 241.

⁶⁷⁸ Por. R.H. Beyler, *Exporting the quantum revolution: Pascual Jordan's biophysical initiatives* [w:] J. Ehlers et al. (eds), *Pascual Jordan (1902–1980): Mainzer Symposium zum 100. Geburtstag*, Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte, Berlin 2007, s. 70.

⁶⁷⁹ Por. L. Joaquim, O. Freire Jr., Ch.N. El-Hani, *Quantum explorers...*, s. 241. Niektóre aspekty koncepcji życia niemieckiego fizyka przedstawiłem w pracach: *Koncepcja życia w ujęciu reprezentatywnych przyrodników...*; *Kontrowersje wokół natury życia w pismach fizyków...*, s. 98–100; *Kwantowa teoria życia Pascuala Jordana. Rekonstrukcja i krytyka* [w:] K. Bałkowski, P. Wiatr (red.), *Prawda i byt...*, s. 112–124.

⁶⁸⁰ Por. P.R. Sloan, *Biophysics in Berlin*, s. 64–65. W rezultacie tych dyskusji Bohr i Jordan nawiązali korespondencję, której tematem były wzajemne powiązania biologii i fizyki. Korespondencja trwała od maja do czerwca 1931 roku i doprowadziła do publikacji artykułu Jordana poświęconego relacji biologii do fizyki, inspirowanego poglądami duńskiego fizyka. Por. tamże, s. 65. Por. R.H. Beyler, *Targeting the organism: the scientific and cultural context of Pascual Jordan's quantum biology, 1932–1947*, „Isis”, 2(87) (1996), s. 248.

blikacją niemieckiego fizyka⁶⁸¹. Po korekcie opartej na krytyce Bohra, opublikował artykuł w „Die Naturwissenschaften” w listopadzie 1932 roku. Jak się jednak okaże, odpowiedź Jordana na krytykę Bohra była niewystarczająca w oczach tego drugiego.

Jordan zastosował ideę komplementarności Bohra jako teoretyczną metodę rozważania problemów biologicznych⁶⁸². Podszedł do ogromnego zbioru tematów biologicznych, popierając relacje komplementarne w bardziej zaangażowany sposób niż sam duński fizyk, jako że doszukiwał się silniejszych połączeń pomiędzy poziomami atomowym i makroskopowym⁶⁸³. Niemiecki fizyk uznał za „dogmatyczne przesady” zasługujące na wyeliminowanie z nauki biologiczne koncepcje zawarte w dziedzictwie takich postaci, jak Julien de La Mettrie, Pierre Laplace, i Emil du Bois-Reymond⁶⁸⁴. W swym projekcie „kwantowej teorii życia” chciał uzgodnić cele organicystyczne – odrzucenie teorii mechanistycznych – z koncepcjami i metodami współczesnej fizyki⁶⁸⁵. Jego celem była koncepcyjna i metodologiczna synteza między fizyką i antymechanistyczną biologią, a wizja życia w wielu punktach różniła się od głoszonej przez innych czołowych fizyków tamtego okresu, takich jak Erwin Schrödinger, Niels Bohr czy Max Delbrück, którzy przeszli do historii biologii molekularnej⁶⁸⁶. Nieprzypadkowo ta trójka sformułowała swe teorie biologiczne po części jako repliki do koncepcji Jordana.

Jordan opowiadał się za rozszerzeniem rewolucji kwantowej na nauki biologiczne⁶⁸⁷. Jako fizyk chciał, by pośrednikiem tej transformacji były odkrycia i metodologie jego własnej dyscypliny. Dla niego jako z kolei zde-

⁶⁸¹ Por. R.H. Beyler, *Exporting the quantum revolution...*, s. 72. Jordan był dość dobrze zaznajomiony z mechanistyczno-witalistyczno-organicystycznym dyskursem od najmłodszych lat. Jako nastolatek oscylował pomiędzy żywym zainteresowaniem i całkowitym odrzuceniem neolamarizmu. Neolamarizm chociaż nie pokrywa się dokładnie ani z witalizmem, ani z organicyzmem, to jednak przez niektórych mógł być z tymi kierunkami kojarzony, podobnie jak w Niemczech z początku XX wieku darwinizm stanowił na ogół oczywisty przykład mechanistycznej biologii. Jordan rozczarował się jednak z czasem perspektywami neolamarowskich teorii. Biorąc pod uwagę wieloletnie zainteresowanie Jordana biologią, nie dziwi, że wybrał zoologię jako jeden z kierunków uzupełniających studia na uniwersytecie w Getyndze. Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 80–81.

⁶⁸² Por. E.P. Fischer, C. Lipson, *Thinking about science...*, s. 85.

⁶⁸³ Por. L. Joaquim, O. Freire Jr., Ch.N. El-Hani, *Quantum explorers...*, s. 241. Por. R.H. Beyler, *Targeting the organism...*, s. 248.

⁶⁸⁴ Por. R.H. Beyler, *Exporting the quantum revolution...*, s. 69.

⁶⁸⁵ Por. tenże, *Targeting the organism...*, s. 248.

⁶⁸⁶ Por. tamże, s. 249. Należy także dodać, że w odróżnieniu od innych pionierów mechaniki kwantowej Jordan nie tylko że nie dystansował się, ale wprost sympatyzował z ideologią nazistowską. Por. J. Al-Khalili, J. McFadden, *Życie na krawędzi...*, s. 64.

⁶⁸⁷ Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 57.

klarowanego pozytywisty kluczowym zagadnieniem było, by transformacja ta opierała się na doświadczeniu (była wolna od metafizyki). Sposób, w jaki Jordan widział ową transformację, był następujący: biologia, dopiero teraz zaczynająca wyzbywać się filozoficznych uprzedzeń, potrzebowała doświadczenia i ukierunkowania przez fizykę, która miała ten etap za sobą⁶⁸⁸. Cel Jordana był jasny: podobnie jak w mikrofizyce, obalony miał zostać mechanistyczny determinizm. Od czasów przełomu XIX i XX wieku, a zwłaszcza później – w latach dwudziestych i na początku lat trzydziestych XX wieku, coraz częściej słychać było głosy, że mechanistyczne podejście w biologii dobiegało końca⁶⁸⁹. Zgadzano się co do tego, że mechanicyzm powinien zostać „zdetronizowany”, jednak nie wiedzano, czym dokładnie można by go zastąpić. Jordan był antagonistycznie nastawiony do mechanistycznej biologii i miał nadzieję nadać teorii kwantowej główną rolę w zmianie ówczesnego *status quo*.

Poniżej dokonano rekonstrukcji sformułowanej przez niemieckiego fizyka w latach trzydziestych ubiegłego wieku kwantowej teorii życia. Przedstawiono także kluczowe zarzuty wysuwane wobec ukierunkowanych na fenomen życia poglądów analizowanego autora.

Począwszy od 1932 roku Jordan opublikował serię artykułów biologicznych jako wkład do organicystycznej koncepcji świata przyrody ożywionej⁶⁹⁰. Podążał w nich za ideami wypracowanymi przez Bohra⁶⁹¹. Wcześniejsze dyskusje zmotywowały obydwu, Bohra i Jordana, do sprecyzowania własnych spekulacji na temat życia. Rozumienie przez duńskiego fizyka relacji między fizyką kwantową i naukami o życiu miało wiele podobieństw z tokiem rozumowania Jordana, chociaż przemyślenia obu dzieliły także istotne różnice⁶⁹². W dużym uproszczeniu można powiedzieć, że zainteresowanie Bohra tematem zależności fizyka–biologia było przede wszystkim epistemologiczne, natomiast Jordan bardziej skupiał się na ontologicznych aspektach powiązań tych dwóch dziedzin nauki. W reakcji na krytykę, w 1937 roku i w następnych latach Jordan poszerzył swoją perspektywę o motywy zaczerpnięte z biofizycznej „teorii celu”⁶⁹³.

Wyraźnie zainspirowany przez duńskiego fizyka, Jordan w kilku publikacjach szczegółowo przedstawił swoje stanowisko w kwestii relacji biologii do fizyki. Twierdził, że redukowalność praw biologii do praw fizyki kła-

⁶⁸⁸ Por. tamże, s. 58.

⁶⁸⁹ Por. tamże, s. 59.

⁶⁹⁰ Por. R.H. Beyler, *Targeting the organism...*, s. 249.

⁶⁹¹ Por. L. Joaquim, O. Freire Jr., Ch.N. El-Hani, *Quantum explorers...*, s. 236.

⁶⁹² Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 103.

⁶⁹³ Por. L. Joaquim, O. Freire Jr., Ch.N. El-Hani, *Quantum explorers...*, s. 236.

sycznej jest relatywnie ściśle ograniczona⁶⁹⁴. W związku z tym podkreślał, że fenomen życia nie może być wyczerpująco wyjaśniony jedynie na podstawie praw fizyki klasycznej. Píše: „Organizm nie jest maszyną. Nie funkcjonuje on jedynie według praw fizyki makroskopowej. Działania zgodne z mikrofizyką konsekwentnie wpływają na zjawiska biologiczne. [...] Jest naturalne dla organizmów żywych – i mogłoby służyć zdefiniowaniu fenomenu życia pod kątem fizyki – niebycie ani w pełni makrofizycznym, ani czysto mikrofizycznym, a należenie do obu poziomów fizycznych, wypełniających poprzez hierarchie struktur i funkcji granicę izolującą »świat mniejszy« – mikrofizyczny od »świata większego« – makrofizycznego. Życie wybrzmiewa począwszy od świata cząstek większych (makrofizycznego), gdzie króluje przyczynowość, do »nieprzyczynowości« świata mikrofizycznego: efekt zanurzenia korzeni w świecie mikrofizycznym i efekt wynurzenia w świecie makrofizycznym, zarówno jeden, jak i drugi, w równej mierze kształtują cechy charakterystyczne i esencjalne”⁶⁹⁵.

Niemiecki fizyk wyraża przekonanie, że teoria kwantów w porównaniu do fizyki klasycznej jest w stanie przybliżyć nam zrozumienie fenomenów biologicznych o krok do przodu⁶⁹⁶. Całkowite zredukowanie praw biologicznych do fizyki kwantowej nie jest jednak możliwe. „Odnosnie do zależności biologii od fizyki – pisze – zgadzam się z N. Bohrem: możliwość wyjaśnienia zasad biologii za pomocą fizyki klasycznej jest względnie ograniczona mimo godnych podziwu wyników, jakie osiągnęli fizjolodzy w tym zakresie. Natomiast dzisiejsza fizyka atomowa i kwantowa mogłyby umożliwić znacznie głębsze ujęcie zjawisk biologicznych. Całkowite uzasadnienie zasad biologii za pomocą dzisiejszej fizyki mogłoby jednak także nie być możliwe. Jest to kwestia terminologii, czy określa się przyszłe ujęcie praw biologii wykraczające poza możliwości stworzone przez mechanikę kwantową jako nowy rozdział w dziedzinie fizyki, czy też jako dyscyplinę stojącą obok fizyki”⁶⁹⁷.

Jordan zastanawiał się, w jaki sposób fizyka kwantowa mogłaby zostać zastosowana do dziedziny biologii. W związku z tym zaadresował do biologów następujące pytanie: czy struktura organiczna, na przykład człowiek,

⁶⁹⁴ Por. P. Jordan, *Ergänzende Bemerkungen über Biologie und Quantenmechanik*, „Erkenntnis”, 5 (1935), s. 349.

⁶⁹⁵ Tenże, *La physique et le secret de la vie organique*, Albin Michel, Paris 1959, s. 150–151.

⁶⁹⁶ Por. tenże, *Über die Rolle atomphysikalischer Einzelprozesse im biologischen Geschehen*, „Radiologica”, 1 (1937), s. 21.

⁶⁹⁷ Tenże, *Anschauliche Quantentheorie. Eine Einführung in die Moderne Auffassung der Quantenerscheinungen*, Verlag von Julius Springer, Berlin 1936, s. 293.

może być ujmowana jako struktura atomowa?⁶⁹⁸ Sam udzielił jednoznacznej odpowiedzi: „Dokładnie takie reakcje organiczne, którymi kierują się reakcje makroskopowe ciała ludzkiego lub zwierzęcego [...] często cechują się wieloraką precyzją sięgającą aż po wymiar atomowy – stąd więc już nie podlegają deterministycznej przyczynowości”⁶⁹⁹. Niemiecki fizyk zauważył, że nie wszystkie znaczące procesy w organizmie są makroskopowe, w związku z tym nie są one w pełni procesami przyczynowo zdeterminowanymi⁷⁰⁰. Potencjalni kandydaci, zgodnie z ówczesnym stanem wiedzy fizjologicznej mogli obejmować postrzeganie zmysłowe i procesy reprodukcji komórek. Jordan zaproponował model organizmu żywego jako struktury, w której nieprzyczynowe zdarzenia kwantowe „kierują” lub „sterują” procesami makroskopowymi⁷⁰¹. Innymi słowy, makroskopowa struktura organizmu żywego przyjmuje zdarzenia pojawiające się na poziomie atomowym i wzmacnia je do rangi procesów makroskopowych – jak w przypadku licznika Geigera czy komory Wilsona (inaczej komory kondensacyjnej lub komory mgłowej)⁷⁰². Najdrobniejsze reakcje, charakteryzujące się wielkością typową dla fizyki atomowej, „sterują” w szerokim zakresie reakcjami biologicznymi za pomocą tego typu oddziaływań wzmacniających⁷⁰³. Stwierdza: „Czymś znaczącym dla świata organicznego jest to, że nieprzyczynowość określonej reakcji atomowej ulega wzmocnieniu aż po nieprzyczynowość przejawiającą się makroskopowo”⁷⁰⁴.

Jordan miał nadzieję zjednoczyć fizykę kwantową z biologią poprzez dociekanie możliwych powiązań pomiędzy skalą mikro- a makroskopową⁷⁰⁵.

⁶⁹⁸ Tenże, *Die Quantenmechanik und die Grundprobleme der Biologie und Psychologie*, „Die Naturwissenschaften”, 45 (1932), s. 819.

⁶⁹⁹ Tamże, s. 819.

⁷⁰⁰ Por. R.H. Beyler, *Exporting the quantum revolution...*, s. 72.

⁷⁰¹ Por. tenże, *Targeting the organism...*, s. 261.

⁷⁰² Por. tenże, *Exporting the quantum revolution...*, s. 72. Por. P. Jordan, *Über die exobiologische Hypothese* [w:] B.-O. Küppers (ed.), *Leben = Physik + Chemie?*..., s. 173. Atutem wspomnianych urządzeń (licznik Geigera i komora Wilsona) dla Jordana było to, że chociaż działały one w sposób całkowicie przyczynowy, generowały oczywiste zdarzenia, które zdawały się nie podlegać prawom przyczynowym. Układy atomowe były poddawane nieprzyczynowym wariacjom. W jakiś sposób oddziałując na amplifikator, aktywowały one jego przyczynowy zdeterminowany mechanizm, czego efekt wyrażany był w widzialnej i słyszalnej dla każdego sferze makroskopowej. Por. tenże, *Die Physik und das Geheimnis des Organischen Lebens*, Friedr. Vieweg and Sohn, Braunschweig 1948, s. 84–85. Por. tenże, *Über die exobiologische Hypothese*, s. 173. Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 116.

⁷⁰³ Por. P. Jordan, *Über die Rolle atomphysikalischer Einzelprozesse...*, s. 23.

⁷⁰⁴ Tenże, *Die Quantenmechanik und die Grundprobleme...*, s. 820.

⁷⁰⁵ Por. L. Joaquim, O. Freire Jr., Ch.N. El-Hani, *Quantum explorers...*, s. 242.

Zaproponował „teorię wzmacniacza” (niem. *Verstärkertheorie*, ang. *amplifier theory*) do oszacowania drogi, na której układy ożywione mogą być zdolne do wzmacniania (potęgowania) sygnałów tak, by kwantowe zdarzenia wewnątrz komórki mogły wywołać zdarzenia makroskopowe. Korzysta z terminu „amplifikator” nie w sensie stosowanym zazwyczaj w inżynierii, ale związanym z licznikiem cząstek w fizyce nuklearnej, gdzie jedna cząstka może uruchomić reakcję łańcuchową⁷⁰⁶. „Teoria wzmacniacza” opiera się na założeniu, że nieprzyczynowe zachowania poszczególnych atomów w mikroświecie mogą być powielane przez „strukturę” cząsteczek organicznych i większych układów celem „kontrolowania” lub „sterowania” ich odpowiednimi zachowaniami w makroświecie, tym samym przenosząc nieprzyczynowość do poziomu organizmu jako całości⁷⁰⁷. Ulubionym jego przykładem jest radioaktywna dezintegracja, która podąża za ścisłym prawem statystycznym na poziomie całości, ale jest nieprzyczynowa na poziomie poszczególnych atomów. Jordan zasugerował, że organizmy żywe zawierają wzmacniacze, które przenoszą nieprzyczynowe zachowanie poszczególnych atomów i molekuł w zachowanie na poziomie makroskopowym. Zgodnie z „teorią wzmacniacza”, nieprzyczynowe zdarzenia z poziomu atomowego ulegają „wzmocnieniu” aż do poziomu makroskopowego⁷⁰⁸. A zgodnie z zaproponowaną przez niemieckiego fizyka teorią, występuje widoczna różnica w zachowaniu między jednostkami natury nieorganicznej a organizmami żywymi⁷⁰⁹. „Organizm według tej teorii – pisze Jordan – w konkretnych procesach jest rządzony nieprzyczynowo i tym sposobem istotnie odróżnia się od struktur nieorganicznych”⁷¹⁰. W innym miejscu dodaje: „Omawiane doświadczenia eksperymentalne i ich teoretyczne opracowanie pokazują wyraźnie, że faktyczna organizacja żywej komórki odpowiada naszemu zasadniczemu założeniu: poszczególne przejścia kwantowe określonych pojedynczych molekuł komórki sterują w sposób decydujący wszystkimi funkcjami życiowymi. Można powiedzieć, nie przesadzając, że zawarta w tym zdaniu idea o teorii wzmacniacza organizmów jest dziś tak samo potwierdzonym prawem biologicznym, jak nauka o komórkach lub teoria o micelach”⁷¹¹.

⁷⁰⁶ Por. W.M. Elsasser, *Reflections on a theory of organisms: holism in biology*, John Hopkins, Baltimore 1998, s. 106.

⁷⁰⁷ Por. M.N. Wise, *Pascual Jordan: quantum mechanics, psychology, national socialism* [w:] M. Renneberg, M. Walker (eds), *Science, technology and national socialism*, Cambridge University Press, Cambridge 1994, s. 238.

⁷⁰⁸ Por. L. Joaquin, O. Freire Jr., Ch.N. El-Hani, *Quantum explorers...*, s. 242.

⁷⁰⁹ Por. P.R. Sloan, *Biophysics in Berlin*, s. 65.

⁷¹⁰ P. Jordan, *Die Quantenmechanik und die Grundprobleme...*, s. 820.

⁷¹¹ Tenże, *Die Verstärkertheorie der Organismen in ihrem gegenwärtigen Stand*, „Die Naturwissenschaften”, 33(38) (1938), s. 545.

W oparciu o fakt, iż geny przeszły mutacje na skutek absorpcji pojedynczego fotonu rentgenowskiego, Jordan wyprowadził wniosek, że to właśnie one dostarczają najbardziej przekonujących dowodów empirycznych dla „Verstärkertheorie”⁷¹². Geny wyglądały na duże cząsteczki białek zawierających spore ilości atomów, które były jednak kontrolowane przez pojedyncze zdarzenia atomowe. Struktura genu jako całości powinna być w związku z tym podatna na opis mechaniki kwantowej. Niemiecki fizyk wysunął twierdzenie, że stabilność i nieciągłość genetyczna ujawniona przez prawa Mendla pozostają w pełnej zgodzie z jego „teorią wzmacniacza”⁷¹³. Dostrzegł te same podstawy fizyczne, na których opierają się nieciągłość kwantowa i nieciągłość genetyczna. Ponadto twierdził, że – odwołując się do mechaniki kwantowej – możemy wyjaśnić, w jaki sposób ukryta przyczynowość może być zasadniczo statystyczna, a nie klasycznie deterministyczna, a pomimo tego może prowadzić do dającej się zaobserwować nieciągłości w genetyce. Pisał: „brak istnienia ciągłych przejść w nieciągłym ustopniowaniu cech dziedziczności może niewątpliwie oznaczać, że proste, już dalej niepodzielne poszczególne geny przedstawiają pojedyncze (także gdy są bardzo duże) molekuly. Dostrzegamy więc w teorii dziedziczenia przekonującą i najszerszą empiryczną przesłankę tezy, że organizmy nie są układami makrofizycznymi, lecz mikrofizycznymi. Nieciągłości cech dziedzicznych warunkują (całkowicie analogicznie do atomowo-kwantowych nieciągłości w fizyce) konieczność wprowadzenia pojęć statystycznych. Już same prawa dziedziczenia Mendla są prawami statystycznymi”⁷¹⁴. Dla Jordana statystyczna interpretacja fizyki kwantowej stanowiła podstawę statystycznej przyczynowości genetyki. „Bez naszej współczesnej wiedzy – pisze – jaką posiadamy o nieciągłej zmienności czynników dziedzicznych, istnieje przypuszczenie, że potomstwo odziedziczy bardzo słabe i wąskie modyfikacje. Lecz ponieważ z racji [zachodzącej] nieciągłości może zdarzyć się zmiana genotypu bynajmniej nie »dowolnie« mała, to raczej istnieją tylko dwie możliwości: albo nie ujawni się żadna zmiana, albo dokona się znacząca modyfikacja, tak że winna ujawnić się słabość [danego] efektu w takiej formie, że właśnie prawdopodobieństwo tego rodzaju mutacji jest bardzo małe, bardzo rzadko więc powinien ujawnić się pozytywny wynik eksperymentu”⁷¹⁵.

Aby potwierdzić, że istotne procesy życiowe miały rzeczywiście charakter mikrofizyczny, Jordan zagłębił się w biofizykę. Doszedł do wniosku, że

⁷¹² Por. M.N. Wise, *Pascual Jordan...*, s. 240.

⁷¹³ Por. P.R. Sloan, *Biophysics in Berlin*, s. 67.

⁷¹⁴ P. Jordan, *Quantenphysikalische Bemerkungen zur Biologie und Psychologie*, „Erkenntnis”, 4 (1934), s. 238.

⁷¹⁵ Tamże, s. 240.

genetyczne zmiany nieciągłe, mutacje i tym podobne były związane z nieciągłością mikrofizyczną⁷¹⁶. Biofizyka stała się więc dla niemieckiego fizyka kluczowym polem, w którym należało szukać dowodów empirycznych na poparcie „teorii amplifikatora”. W ciągu kilku lat przesunięcie w kierunku bardziej zorientowanego eksperymentalnie i specyficznego metodologicznie podejścia do biofizyki zostawiło wyraźne ślady w strukturze publikacji Jordana. Do 1937 roku biologiczne teksty jego autorstwa pojawiały się w ogólnych czasopismach, takich jak „Erkenntnis” i „Die Naturwissenschaften”. Od tego czasu, chociaż nadal pisał dla szerokiego grona odbiorców, jego biologiczne teksty często publikowane były w specjalistycznych technicznych czasopismach biologicznych, takich jak „Radiologica” (gdzie pracował także w redakcji), „Archiv für die Gesamte Virusforschung”, „Biologisches Zentralblatt” lub „Zeitschrift für Immunitätsforschung”. Innymi słowy, Jordan próbował teraz przekonać praktykujących biologów do wagi jego biofizycznych teorii.

Jednocześnie poczynawszy od połowy lat trzydziestych pojawiła się w jego życiu i karierze współpraca z naukowcami zajmującymi się genetyką radiacyjną, fizjologią zmysłów, onkologią i immunologią⁷¹⁷. Być może najważniejsze dla rozwoju biofizyki Jordana były kontakty z naukowcami z Wydziału Genetyki Kaiser Wilhelm Institut für Hirnforschung (Instytutu Badań nad Mózgiem imienia Cesarza Wilhelma) mieszczącego się na przedmieściach Berlina w Buch, którzy prowadzili badania kierowane przez Timofiejewa-Riesowskiego⁷¹⁸. Niemiecki fizyk często korespondował i uczestniczył w konwersacjach z rosyjskim genetykiem i związanymi z nim badaczami, zwłaszcza dwoma fizykami: wspomnianym już Zimmerem i Robertem Rompem⁷¹⁹. W 1935 roku Timofiejew-Riesowski, Zimmer i Delbrück opublikowali wspomniany już artykuł nazywany *Dreimännerarbeit* genetyki (echo tytułu artykułu o mechanice macierzowej z 1925 roku autorstwa Borna, Heisenberga i Jordana), który okazał się pierwszą rozstrzygającą eksperymentalną demonstracją cząsteczkowej wielkości genu⁷²⁰. Jordan uważał pracę Timofiejewa-Riesowskiego, Zimmera i Delbrücka za najwyraźniejszy dowód przemawiający za słusznością „teorii amplifikatora”. Eksperymentalna biologia promie-

⁷¹⁶ Por. R.H. Beyler, *Exporting the quantum revolution...*, s. 74.

⁷¹⁷ Por. tamże.

⁷¹⁸ Por. P. Jordan, *Über die exobiologische Hypothese*, s. 185. R.H. Beyler, *Exporting the quantum revolution...*, s. 74.

⁷¹⁹ Por. R.H. Beyler, *Targeting the organism...*, s. 266. Jordan i Zimmer planowali napisać razem tekst o biologii kwantowej, ale wybuch wojny doprowadził do odłożenia tych planów (jak się okazało na czas nieokreślony). Por. tenże, *Exporting the quantum revolution...*, s. 74.

⁷²⁰ Por. tenże, *Exporting the quantum revolution...*, s. 74.

niowania, jak utrzymywał, zademonstrowała empirycznie, że niedeterministyczne zdarzenie kwantowofizyczne (jonizacja w strukturze cząsteczkowej stanowiącej gen) może zmieniać inne, większe, organiczne struktury w taki sposób, by uzyskać makrofizyczne skutki fizjologiczne mutacji.

Przez następne lata Jordan zagłębiał się w „teorię celu” (niem. *Treffertheorien*, ang. *target theory*), w której znalazł konkretne dowody dla swojej kwantowej teorii życia⁷²¹. „Teoria celu” była metodologią statystyczną służącą do analizy wpływu promieniowania lub innych środków fizycznych na organizmy⁷²². Zakładała ona istnienie submikroskopowych „celów”, na które wpływ miało „trafienie” padającym promieniowaniem. „Teoria celu” została sformułowana na początku lat dwudziestych ubiegłego wieku – między innymi przez pioniera biologii kwantowej Friedricha Dessauera i grupę jego współpracowników: Jamesa A. Crowthera, Fernanda Holwecka i Antoine Lacassagne’a⁷²³. Opierając się na nowym modelu promieniowania kwantowego i za pomocą technik statystycznych znanych fizykom, Dessauer w swojej teorii zakładał, że po naświetleniu przez promieniowanie organizmy wchłaniają energię nie w sposób ciągły, ale w oddzielnych pakietach, to jest jonizacjach. Analiza statystyczna eksperymentalnie wygenerowanych krzywych odnoszących dawki promieniowania do zakresu wywołanych zgonów, mutacji i tym podobnych wykazała, że wiele takich absorpcji pozostaje bez istotnego wpływu. Dzieje się tak dlatego, iż tylko ułamek jonizacji występuje we wrażliwej strefie w organizmie lub strefie wrażliwej w danej komórce, generując w ten sposób zauważalne szkody. Absorpcje poza tymi strefami pozostały bez znaczącego wpływu na organizm. Analogią był rozrzut strzałów w kierunku celu, z których niektóre trafiały, inne zaś chybiały. Analiza statystyczna „trafionych” i „nietrafionych” strzałów w połączeniu ze zrozumieniem fizjologicznych procesów odgrywających w tej sytuacji istotną rolę dałyby obraz wielkości, charakteru lub struktury wrażliwego obszaru „celu” w organizmie⁷²⁴. Holweck i Lacassagne określili tę technikę mianem „ultramikroskopii statystycznej”⁷²⁵. Teoretycy mieli nadzieję na uzyskanie informacji o strukturze organicznej w najmniejszej możliwej skali. Choć „teoria celu” przeszła znaczące modyfikacje w latach dwudziestych, jej rdzenne idee pozostały takie same.

Niemiecki fizyk szybko stał się jednym z głównych zwolenników „teorii celu”, której używał dla precyzyjniejszego opisu swojej kwantowej teorii

⁷²¹ Por. tamże, s. 70.

⁷²² Por. tenże, *Targeting the organism...*, s. 249.

⁷²³ Por. tenże, *Exporting the quantum revolution...*, s. 70.

⁷²⁴ Por. tamże, s. 70–71.

⁷²⁵ Por. tamże, s. 71.

życia⁷²⁶. „Cały materiał badań nad dziedziczeniem genów pokazuje – pisze – że gen nie jest zdolny do ciągłych zmian, lecz może przyjąć tylko pewien szereg subtelnych stanów (praktycznie finalny i to niewielki). Są już znane pojedyncze przykłady około 10–20 różnych stanów tego samego genu. Oczywiście, w rzeczywistości powinno ich być o wiele więcej, jednakże należy zasadniczo i definitywnie przyjąć, że gen zdolny jest do przyjmowania tylko nietrwałych, zmiennych stanów. To zasadnicze zjawisko wymaga dokładnej i prostej interpretacji – fizyczna struktura genu musi być tak zbudowana, że dopuszcza tylko nietrwałe zmiany stanu. Bliską interpretacją okazuje się w sposób oczywisty następujące stwierdzenie: gen stanowi pojedynczą molekułę. Mutacja genu ma pochodzenie kwantowe”⁷²⁷. W szczególności „teorię celu” Jordan wykorzystywał jako dowód prawdziwości „teorii wzmacniacza”⁷²⁸. Opracował teoretyczne modele „celu” dla różnorodnych zjawisk fizjologicznych, takich jak reakcje immunologiczne, percepcja zmysłowa, działanie hormonów i trucizn. W ten sposób interpretował eksperymenty polegające na zabijaniu bakterii *coli* światłem ultrafioletowym i innymi rodzajami promieniowania, by wykazać, że zawierają niewielkie „miniaturowe jądra” genetyczne, niewidoczne dla zwyczajnej mikroskopii; „trafienia” promieniowania w jądra były śmiertelne dla bakterii⁷²⁹. Badacz pisał: „próby napromieniowania bakterii otwierają obiecujące dojście do wielkości procesów biologicznych, nieosiągalnych dla fizjologii »makrofizycznej«”⁷³⁰. Nawet wpływ niektórych leków na komórki interpretował w kontekście „teorii celu” jako dowód na „Verstärkertheorie”⁷³¹.

Na dodatkowym etapie teoretyzowania o fizycznych implikacjach będących podstawą zjawisk z „teorii celu” Jordan zaproponował model rezonansu kwantowego replikacji genów⁷³². W różnorodnych publikacjach od 1938 do 1940 roku twierdził, że mechanika kwantowa wskazała, że identyczne makromolekuły charakteryzowały się specjalnym rodzajem przyciągania kwantowomechanicznego, które mogło pomóc w zrozumieniu mechanizmu replikacji genu i synapsy cząsteczek na nitkach homologicznych chromosomów w procesie mejozy⁷³³. Omawiał możliwości replikacji genów i innych

⁷²⁶ Por. tamże, s. 74.

⁷²⁷ Tenże, *Biologische Strahlenwirkung und Physik der Gene*, „Physikalische Zeitschrift”, 39 (1938), s. 359.

⁷²⁸ Por. R.H. Beyler, *Targeting the organism...*, s. 266.

⁷²⁹ Por. P. Jordan, *Über die Elementarprozesse der biologischen Strahlenwirkung*, „Radiologica”, 2 (1938), s. 34. Por. tenże, *Über die exobiologische Hypothese*, s. 170–173.

⁷³⁰ Tenże, *Über die Rolle atomphysikalischer Einzelprozesse...*, s. 23.

⁷³¹ Por. tenże, *Über die Elementarprozesse...*, s. 184.

⁷³² Por. R.H. Beyler, *Exporting the quantum revolution...*, s. 75.

⁷³³ Por. E.P. Fischer, C. Lipson, *Thinking about science...*, s. 128.

biologicznych molekuł poprzez rodzaj ustabilizowanego przyciągania między identycznymi molekułami (proces „autokatalitycznej reprodukcji”)⁷³⁴. Innymi słowy, wysunął ideę o istnieniu kwantowomechanicznej interakcji stabilizującej, działającej preferencyjnie między identycznymi lub niemal identycznymi molekułami, co jest ważne w procesach biologicznych takich, jak reprodukcja genów⁷³⁵. Powołał się w tym celu na fenomen „rezonansu” w mechanice kwantowej⁷³⁶. Twierdził, że istnieje stabilizacja rezonansu interakcji między dwoma identycznymi lub prawie identycznymi cząsteczkami, lub częściami cząsteczek na tyle silna, by doprowadzić do powstania wiązania między nimi, które to wiązanie nie byłoby możliwe w przypadku bardziej odmiennych cząsteczek⁷³⁷.

Delbrück od samego początku nie wierzył w istnienie sił parowania, które występują pomiędzy identycznymi strukturami⁷³⁸. W kilku listach, które w 1938 roku wymienił z Jordanem, dotyczących powiązania fizyki i biologii pisał, że nie był w stanie dostrzec żadnego eksperymentalnego dowodu na istnienie takich hipotetycznych sił. W 1940 roku Delbrück poinformował o tej pracy (i o trzech wcześniejszych, jakie Jordan napisał na ten sam temat) Linusa Paulinga⁷³⁹. Pauling wspominał po latach: „Podkreśliłem, że liczba stabilizacji rezonansu pomiędzy identycznymi cząsteczkami jest w rzeczywistości zbyt mała w stosunku do energii termicznej agitacji, by móc cokolwiek zdziałać w ten sposób. W istocie dopiero co skończyłem wtedy pisać pracę o strukturze przeciwciał i charakterze oddziaływań między przeciwciałami i antygenami, co doprowadziło mnie do wniosku – potwierdzonego później na drodze doświadczeń – że faktycznie istnieje szczegółowa komplementarność struktur u przeciwciał i antygenów. Później sugerowałem, że gen może składać się z dwóch wzajemnie uzupełniających się łańcuchów, z których każdy może działać jako matryca dla syntezy innych. Obecnie nie ma już żadnych wątpliwości, że mechanizm specyficzności biologicznej jest szczegółową komplementarnością struktur interakcji cząsteczek”⁷⁴⁰. Wspólna analiza publikacji Jordana zaowocowała nowatorską pracą opublikowaną

⁷³⁴ Por. D. Fleming, *Émigré physicists...*, s. 187.

⁷³⁵ Por. M.F. Perutz, *Physics and the riddle of life*, s. 557. Zob. tenże, *Erwin Schrödinger's 'What is life?' and molecular biology* [w:] C.W. Kilmister (ed.), *Schrödinger: centenary celebration of a polymath*, Cambridge University Press, Cambridge 1989, s. 239.

⁷³⁶ Por. D. Fleming, *Émigré physicists...*, s. 187.

⁷³⁷ Por. P. Jordan, *Die Verstärkertheorie der Organismen...*, s. 545. Por. D. Fleming, *Émigré physicists...*, s. 187.

⁷³⁸ Por. E.P. Fischer, C. Lipson, *Thinking about science...*, s. 128.

⁷³⁹ Por. L. Pauling, *Schrödinger's contribution to chemistry and biology* [w:] C.W. Kilmister (ed.), *Schrödinger: centenary celebration of a polymath*, s. 231.

⁷⁴⁰ Tamże, s. 231–232.

26 lipca 1940 roku, będącą atakiem na jego koncepcję. Pauling i Delbrück podkreślili, iż efektem „dobrze rozpoznanych” interakcji dwóch molekuł (innych niż w wyniku rezonansu) jest stabilność układu dwóch molekuł z komplementarnymi strukturami w zestawieniu, a nie z dwiema molekułami z identycznymi strukturami⁷⁴¹. Badacze udowodnili, że – z punktu widzenia mechaniki kwantowej – właściwie wykluczona jest rezonansowa interakcja między identycznymi molekułami. Komplementarność należy przede wszystkim uwzględnić w dyskusji na temat specyficznego przyciągania między molekułami oraz ich syntezy enzymatycznej.

Jak kwantowa teoria życia Jordana została przyjęta w ówczesnym środowisku naukowym? Chociaż na jej temat nie brakowało pozytywnych opinii, to jednak większość badaczy bardzo krytycznie oceniła propozycje niemieckiego fizyka; w niniejszej pracy zreferowano argumenty wysuwane przez obie strony dyskusji.

Publikacja pierwszej biologicznej pracy Jordana w jednym z najbardziej prestiżowych niemieckich czasopism wywołała debatę o powiązaniu fizyki i biologii, która odbiła się szerokim echem w środowisku przyrodników w latach trzydziestych XX wieku⁷⁴². Antymechanistyczne twierdzenia niemieckiego fizyka okazały się atrakcyjne dla wielu obrońców doktryny holistycznej, w tym wspomnianych już von Bertalanffy’ego i Meyera-Abicha⁷⁴³. Technicznie dopracowane publikacje Jordana dotyczące „teorii celu” w wielu artykułach spotkały się z pozytywnymi opiniami innych badaczy tej teorii⁷⁴⁴. Nawet niektórzy biolodzy sceptyczni wobec „teorii celu” nie ukrywali swojego zaciekawienia rozstrzygnięciami w tym temacie. Na przykład, frankfurcki immunolog Richard Prigge wątpił, by produkcja antyciał liczyła się jako efekt „jednego trafienia” i zaplanował wraz z Jordanem serię eksperymentów, by to rozstrzygnąć, zostały jednak one odroczone z uwagi na wybuch wojny. Większość naukowców jednak od początku zdecydowanie krytykowała kwantową teorię życia autorstwa Jordana, postrzegając ją jako zagrożenie dla autonomii biologii⁷⁴⁵.

Wyraźnie sceptyczny względem rozumienia kwestii biologicznych przez Jordana był Bohr. Dał temu wyraz w jednym ze swoich listów – z 23 czerw-

⁷⁴¹ Por. L. Pauling, M. Delbrück, *The nature of the intermolecular forces operative in biological processes*, „Science”, 92 (1940), s. 77–79. Por. M.F. Perutz, *I wish I'd made you angry earlier. Essays on science, scientists, and humanity*, Oxford University Press, Oxford–New York 1998, s. 183. Por. D. Fleming, *Émigré physicists...*, s. 187.

⁷⁴² Por. P.R. Sloan, *Biophysics in Berlin*, s. 65.

⁷⁴³ Por. R.H. Beyler, *Targeting the organism...*, s. 261.

⁷⁴⁴ Por. tamże, s. 266.

⁷⁴⁵ Por. tamże, s. 262.

ca 1931 roku, pisząc, że głównych swoich zainteresowań nie kieruje w stronę pracy badawczej w obszarze biologii jako takiej, ale w stronę wyłącznie jej heurystycznych czy epistemologicznych aspektów⁷⁴⁶. Tym ostatnim stwierdzeniem Bohr wyraźnie zakomunikował niemieckiemu fizykowi, iż zasadniczo nie zgadza się z jego próbą zredukowania procesów życiowych do mechaniki kwantowej. Natomiast Delbrück, wówczas młody fizyk pracujący w sekcji fizycznej Lise Meitner w Kaiser Wilhelm Institut für Chemie, zwrócił Bohrowi uwagę [po wykładzie Jordana w Gesellschaft für Wissenschaftliche Philosophie (Towarzystwie Wiedzy Filozoficznej) z 1934 roku], że wygłaszane przez niemieckiego naukowca prelekcje o implikacji zasady komplementarności jedynie wprowadzają zamęt wśród pozostałych naukowców, którzy mogą być zainteresowani tym tematem⁷⁴⁷. Delbrück nalegał, aby Bohr wyjaśnił sprawę. Odpowiedź Bohra pojawiła się w 1937 roku w wykładzie zatytułowanym *Biology and atomic physics* (Biologia a fizyka atomowa), w którym to krytycznie odniósł się bezpośrednio do samej „teorii wzmacniacza”. Krytykuje w nim, „jako nieodpowiednie, wszelkie porównywanie organizmów żywych z maszynami, a więc zarówno z względnie prostymi konstrukcjami dawnych jatro-fizyków, jak też z współczesnymi urządzeniami wzmacniającymi, choćby najbardziej subtelnymi, których bezkrytyczne przecenianie mogłoby nas słusznie narazić na uszczypliwy przydomek »jatro-kwantystów«”⁷⁴⁸. Bohr podejrzewał, że w teorii Jordana redukcjonizm przechodzi z mechaniki klasycznej do kwantowej⁷⁴⁹. Przesłoniłoby to jego główne twierdzenie na temat relacji między fizyką i biologią – zakładające istnienie komplementarnej relacji między ich poszczególnymi typami opisów. Zdaniem duńskiego fizyka zapal Jordana do nadania zjawiskom kwantowym znaczenia organicznego naruszył dyscyplinarną integralność biologii.

Dla Bohra zasada komplementarności wyznaczyła granicę między badaniami fizycznymi i biologicznymi, oznaczając autonomię biologii względem fizyki⁷⁵⁰. Sedno ukierunkowanych na fenomen życia rozważań tego fizyka miało więc wyraźnie epistemologiczny wyraz⁷⁵¹. Bohr odkrył pouczające analogie między komplementarnym tokiem rozumowania w fizyce i biologii.

⁷⁴⁶ Por. *Letter from Bohr to Jordan, 23 June 1931, 1999* [w:] D. Favrholt (ed.), *Niels Bohr. Collected works. Vol. 10...*, s. [527].

⁷⁴⁷ Por. R.H. Beyler, *Exporting the quantum revolution...*, s. 73. Por. E.P. Fischer, C. Lipson, *Thinking about science...*, s. 85.

⁷⁴⁸ N. Bohr, *Biologia a fizyka atomowa*, s. 37.

⁷⁴⁹ Por. R.H. Beyler, *Targeting the organism...*, s. 262.

⁷⁵⁰ Por. tamże, s. 260.

⁷⁵¹ Por. tenże, *From positivism to organicism...*, s. 124.

O wiele bardziej interesowało go ugruntowanie biologicznego rodzaju opisu, który byłby niezależny od fizyki, niż wprowadzanie fizycznych metafor do nauk biologicznych. Z kolei podejście Jordana do biologii było wypełnione nadzieją połączenia kwantowych i makroskopowych sfer i zrewolucjonizowania biologii, wzorowanego na wielkich zmianach w fizyce⁷⁵². Podobnie jak Bohr, widział on zasadę komplementarności jako sposób myślenia potencjalnie dający się zastosować w innych naukach⁷⁵³. Jordan z drugiej strony kładł nacisk na znaczenie samych procesów atomowych w zjawiskach życiowych. Twierdził, że u podstaw procesów życiowych leżą nieprzyczynowe, mikrofizyczne procesy, które koordynują reakcje makrofizyczne organizmu⁷⁵⁴. Zgodnie z tym ujęciem organizmy powinny być układami mikrofizycznymi, a nie makrofizycznymi. Bohr wyraźnie odrzucał pomysł Jordana, że kwantowomechaniczne zachowania atomów mogą wyjaśnić naturę procesów biologicznych⁷⁵⁵. Chciał bronić przyczynowego opisu poprzez włączenie go w komplementarną relację z nieprzyczynową fizyką, podczas gdy Jordan był zainteresowany wykazaniem indeterministycznej, nieprzyczynowej jakości samych zjawisk organicznych⁷⁵⁶.

Niektórzy biolodzy byli jeszcze bardziej niż Bohr sceptyczni względem rozumienia przez Jordana kwestii biologicznych. Krytykę w stronę empirycznych dowodów, jakie niemiecki fizyk zastrzegał dla „teorii amplifikatora”, skierował Erwin Bünning⁷⁵⁷. Zdaniem Bünninga, który sam był pozytywistą, jedynie w niewielu przypadkach nie jest wykluczone, że ważne procesy biologiczne podlegające zasadom fizyki kwantowej mogłyby być nieprzyczynowe⁷⁵⁸. Nieprzyczynowe efekty atomowe były, w ocenie Bünninga, w najlepszym razie tylko drugorzędne, a jeśli ważne, wówczas najprawdopodobniej szkodliwe. „W organizmie – pisze Bünning – nieprzyczynowa oscylacja przechodząca do [domeny] makroskopowej musi prowadzić, przynajmniej zasadniczo, do choroby lub śmierci”⁷⁵⁹. Biologia i fizjologia zwykle operowały wiedzą w całości opartą na prawach makrofizycznych –

⁷⁵² Por. L. Joaquim, O. Freire Jr., Ch.N. El-Hani, *Quantum explorers...*, s. 242.

⁷⁵³ Por. R.H. Beyler, *Targeting the organism...*, s. 260.

⁷⁵⁴ Por. M. Hartmann, *Die Kausalität in Physik und Biologie* [w:] M. Hartmann, *Gesammelte Vorträge und Aufsätze. II. Naturphilosophie*, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart 1956, s. 154.

⁷⁵⁵ Por. M.N. Wise, *Pascual Jordan...*, s. 239.

⁷⁵⁶ Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 164.

⁷⁵⁷ Por. tenże, *Targeting the organism...*, s. 262. Por. tenże, *From positivism to organicism...*, s. 165.

⁷⁵⁸ Por. E. Bünning, *Sind Organismen mikrophysikalische Systeme? (Entgegnung an P. Jordan)*, „Erkenntnis”, 5 (1935), s. 346. Por. R.H. Beyler, *Targeting the organism...*, s. 262.

⁷⁵⁹ E. Bünning, *Sind Organismen mikrophysikalische Systeme?...*, s. 339.

podkreślał Bünning, na przykład w badaniu metabolizmu komórkowego⁷⁶⁰. Na podobnej zasadzie zakwestionował zasadność genetyki dla argumentacji Jordana⁷⁶¹. Rozwój ontogenetyczny zdawał się być regulowany deterministycznymi prawami makroskopowymi⁷⁶². Co więcej, nie było potrzeby porzucenia tego wniosku, nawet jeśli geny są pojedynczymi molekułami, ponieważ rozwój ontogenetyczny nie jest pojedynczym zdarzeniem, lecz złożonym procesem składającym się z wielu zdarzeń. Doświadczenie Bünninga jako fizjologa skłoniło go do postrzegania integracji i samozachowania organizmów jako spowodowanych takimi właśnie złożonymi układami fizjologicznymi. Podsumowując swoje zarzuty wobec rozumienia fenomenu życia według Jordana, stwierdza: „Oczywiście Jordan znacznie przecenił znaczenie przypadków, w których najbardziej zbliżamy się do warunków jego teorii. Powód widzę w fakcie, że niebędący biologiem Jordan w obserwacjach biologicznych myśli o najbliższym mu organizmie i przede wszystkim o najważniejszych dla niego procesach, mianowicie o procesach w obrębie własnego organizmu. Być może Jordan może uznawać za błąd to, że tak dużo mówiłem o procesach biologicznych, której wydają mu się mniej »centralne«. Dlatego chciałbym na koniec podkreślić, że podane przeze mnie przykłady związane są z problemami, z którymi spotykamy się nie tylko w świecie zwierząt i roślin i które są bardziej biologiczne, i że w badaniu najważniejszych dokonań każdej dowolnej komórki zwierzęcej i roślinnej jesteśmy do nich prowadzeni. Jordan natomiast wskazał jedynie na niektóre specjalne przypadki, których nie spotyka się w każdym organizmie. Jego teoria, że »istota organiczności« polega na występowaniu następstw wzmacniających, powinna zostać obalona»⁷⁶³. Bünning przekonuje, że życie polega właśnie na przyczynowo-skutkowych zależnościach między organizmem a jego środowiskiem naturalnym i że organizmy podtrzymują życie poprzez oddziaływanie przyczynowe z otoczeniem⁷⁶⁴. Importowanie mikrofizyki do biologii naruszałoby integralność dyscyplinarną tej drugiej za sprawą zaniedbania integralności organizmów żywych stanowiących przedmiot jej badań⁷⁶⁵.

Max Hartmann, niemiecki biolog, sformułował podobne zarzuty⁷⁶⁶. W przeciwieństwie do Jordana twierdzi, że procesy kwantowofizyczne nie

⁷⁶⁰ Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 165.

⁷⁶¹ Por. E. Bünning, *Sind Organismen mikrophysikalische Systeme?*..., s. 337–339; R.H. Beyler, *Targeting the organism...*, s. 262.

⁷⁶² Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 165–166.

⁷⁶³ E. Bünning, *Sind Organismen mikrophysikalische Systeme?*..., s. 346–347.

⁷⁶⁴ Por. R.H. Beyler, *Exporting the quantum revolution...*, s. 73.

⁷⁶⁵ Por. tenże, *From positivism to organicism...*, s. 166.

⁷⁶⁶ Por. R.H. Beyler, *Targeting the organism...*, s. 262.

mogą zostać wykorzystane do wyjaśnienia zasadniczych zjawisk życiowych, ponieważ znaczące procesy biologiczne są rodzaju makrofizycznego⁷⁶⁷. W jego ocenie hipoteza niemieckiego fizyka dotycząca nieprzyczynowości biologicznej „nie została udowodniona najmniejszym eksperymentalnym faktem biologicznym, a powody, które Jordan [...] szczegółowo przytacza, nie są przekonujące”⁷⁶⁸. Na poparcie swojego stanowiska odwołuje się do konkretnego przykładu⁷⁶⁹. W trakcie fotosyntezy cztery kwanty mogą zredukować molekułę kwasu węglowego, czyli procesy atomowe mogą ingerować w sferę biologiczną, jednak spowodowane tym przemiany molekularne, redukcja kwasu węglowego i synteza cukru, są ściśle zdeterminowanymi przyczynowymi zmianami molekularnymi czy procesami makrofizycznymi. W ocenie Hartmanna posługiwanie się przez Jordana zjawiskami dziedziczenia dla jego teorii bazuje na niezrozumieniu tych zasad. „Przy dziedziczeniu – pisze Hartmann – jak już wcześniej wyjaśniano, wszystkie zdarzenia następują najpierw makrofizycznie, a procesy te można wyjaśnić ściśle przyczynowo-mechanicznymi procesami, jak pokazała dobitnie najnowsza chromosomowa teoria dziedziczenia poprzez analizę chromosomów jąder gruczołów ślinowych *Drosophila*. Mikrofizyczna teoria wzmocnień organizmów jest tym samym nieuzasadniona i w dużej mierze nieprawdopodobna”⁷⁷⁰. W opinii Hartmanna wszystkie eksperymentalne wyniki biologiczne, na które Jordan powołuje się w uzasadnieniu swojej nieprzyczynowej teorii wzmocnień w biologii, są niewystarczająco przeanalizowanymi szczególnymi przypadkami, a nie jak zapewnia fizyk, typowymi przypadkami z bogatego i obszernego materiału doświadczalnego⁷⁷¹. Biolog pisze: „My jako biolodzy eksperymentalni możemy tylko ocenić i omówić znaczenie wyników przekazanych przez Jordana, zwłaszcza że wszystkie dokładnie przeanalizowane znaczące procesy w komórkach, jak asymilacja węgla przez światło słoneczne w komórkach roślin zielonych, oddychanie komórkowe, a także zaskakujące, nowe wyniki procesów tworzenia się form spowodowanych przez geny, okazały się ściśle przyczynowymi, uwarunkowanymi, makrofizycznymi procesami chemicznymi”⁷⁷². Na to, że procesy tworzenia się form istot żywych są ściśle przy-

⁷⁶⁷ Por. M. Hartmann, *Die Kausalität in Physik und Biologie*, s. 154.

⁷⁶⁸ Tenże, *Philosophie der Naturwissenschaften* [w:] M. Hartmann, *Gesammelte Vorträge...*, s. 119–120.

⁷⁶⁹ Por. tamże, s. 120.

⁷⁷⁰ Tamże, s. 120.

⁷⁷¹ Por. tenże, *Quantenphysik und Biologie* [w:] M. Hartmann, *Gesammelte Vorträge...*, s. 189.

⁷⁷² Tamże.

czynowymi, makrofizycznymi procesami, ma wskazywać już ich ściśle uporządkowany przebieg⁷⁷³.

Kwantowa teoria życia sformułowana przez Jordana była też przedmiotem krytyki szwajcarskiego psychiatry Paula E. Bleulera. Ten zanany lekarz w swoim publicznym odczycie w Naturforschende Gesellschaft w Zurychu w czerwcu 1933 roku (opublikowanym później w formie artykułu) ostro zaatakował niemieckiego fizyka i innych naukowców próbujących poszerzać niektóre pojęcia fizykalne poza fizykę, w tym wprowadzanie ich w obszar rozważań biologicznych⁷⁷⁴. Bleuler uważał, że fizycy mieli skłonność czerpać pewne terminy z różnych nauk i przebudowywać ich znaczenie, co doprowadziło do poważnych nieporozumień przy odnoszeniu takich pojęć do innych dziedzin⁷⁷⁵. Miał w szczególności na myśli traktowanie przez fizyków pojęcia przyczynowości⁷⁷⁶. Oskarżał Jordana o stworzenie „karykatury ścisłej przyczynowości”, niemającej nic wspólnego z praktyczną biologią, oraz następnie „zbezczeszczenie jej” za pomocą teorii kwantów. Definicja przyczynowości, jaką widział Jordan – wymagająca pełnej wiedzy o wszystkich istotnych warunkach wstępnych – była „wymysłem współczesnej fizyki” i czymś zupełnie innym od tego, co naukowcy z innych dziedzin rozumieli przez przyczynowość. W biologii funkcjonowała bardziej „naturalna” koncepcja przyczynowości, bazująca na uogólnieniach formowanych z obserwowanych prawidłowości. Dla Bleulera regularność statystyczna i pojęcie przyczynowości nie wykluczały się wzajemnie, lecz były raczej częścią tego samego spektrum „naturalnej praworządności”, skrytykował więc stwierdzenie Jordana, że nieprzyczynowe i tylko statystyczne powinny być wszystkie zjawiska życiowe⁷⁷⁷. „Nie do przyjęcia – pisze Bleuler – wydaje mi się [...] pogląd, że w organizmie [...] nieprzyczynowość reakcji atomowych powiększa się do nieprzyczynowości makroskopowej (do wolnych działań, mutacji i tak dalej). [...] Makrofizyczne funkcje życiowe są nadzwyczaj skomplikowane [...]; jak takie cechy, nazwane akurat »dyrygującymi funkcjami«, mogą należeć do nieprzyczynowości małej grupki atomów?”⁷⁷⁸ Jako konkretny przykład Bleuler przytoczył prawa kierujące mu-

⁷⁷³ Por. tenże, *Prozeß und Gesetz in Physik und Biologie* [w:] M. Hartmann, *Gesammelte Vorträge...*, s. 232.

⁷⁷⁴ Por. P.R. Sloan, *Biophysics in Berlin*, s. 65.

⁷⁷⁵ Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 134–135.

⁷⁷⁶ Por. tamże, s. 135.

⁷⁷⁷ Por. P.E. Bleuler, *Die Beziehungen der neueren physikalischen Vorstellungen zur Psychologie und Biologie*, „Viertel Jahrschrift der naturforschenden Gesellschaft in Zurich”, 78 (1933), s. 169.

⁷⁷⁸ Tamże, s. 171.

tacjami⁷⁷⁹. Eksperymenty wykazały istnienie proporcjonalności pomiędzy dawką promieniowania i tempem sztucznie wywołanych mutacji, ukazując również kulminacyjny efekt mutacji na przestrzeni kilku pokoleń. Szwajcarski lekarz pisze: „całkiem niedawno Hanson i Heys potwierdzili, że tempo mutacji genetycznej powstającej u *Drosophili* na skutek działania promieniowania radu jest bezpośrednio proporcjonalne do zastosowanej dawki”⁷⁸⁰. Bleuler zadaje więc pytanie retoryczne: czy nie są to związki przyczynowe?⁷⁸¹

Do krytyki kwantowej teorii życia autorstwa Jordana przyłączył się Paul M. Jensen, czego efektem był obszerny artykuł opublikowany w „Erkenntnis” w 1934 roku. Krytyka Jensena była jednak przede wszystkim oparta na ogólnych rozważaniach w ramach „spójnego pozytywizmu”⁷⁸². Pomimo wspólnego pozytywistycznego gruntu Jensen proponował alternatywną definicję określoności wykraczającą poza zakres znaczeniowy idei Jordana⁷⁸³. Obok „określoności sukcesywnej”, która dotyczy relacji między zdarzeniami oddzielonymi od siebie czasowo, do której odwołuje się fizyk, istnieje także „określoność równoczesna”, w której obserwowany przedmiot można opisać jako funkcję innych czynników obserwowanych w tym samym czasie. Jak zauważa Jensen druga z wymienionych teorii jest bliższa biologom niż fizykom. Zważywszy na tę koncepcję sposobu, w jaki biolodzy myśleli o określoności w organizmie, fizyk chciał „trzymać się determinizmu tak długo, dopóki nie zostanie wykazane na drodze niepodważalnych powodów, że jest to niemożliwe”⁷⁸⁴. Tego, uważa Jensen, nie udało się Jordanowi wykazać.

Edgar Zilsel podejmowane przez Jordana próby rozszerzenia mechaniki kwantowej do biologii umieszcza poza granicami myśli naukowej, sytuując je w ramach witalizmu⁷⁸⁵. Zdaniem Zilsela każda teoria wykorzystująca antropomorficzne sposoby opisu lub nieanalizująca koncepcyjnie wpływu wielkoskalowych zjawisk biologicznych na małe procesy fizyczne była witalistyczna. „Fizyka przed rokiem 1870 – pisze – uważała cząstki elementarne za bile do gry w bilard, natomiast mechanika kwantowa traktuje je od 1927 roku jako kości do gry. W kwestii witalizmu jest to całkowita zmiana. Mimo

⁷⁷⁹ Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 135.

⁷⁸⁰ P.E. Bleuler, *Die Beziehungen der neueren physikalischen...*, s. 176.

⁷⁸¹ Tamże, s. 177.

⁷⁸² Por. P. Jensen, *Kausalität, Biologie und Psychologie*, „Erkenntnis”, 4 (1934), s. 177.

Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 140.

⁷⁸³ Por. P. Jensen, *Kausalität, Biologie und Psychologie*, s. 167–168. Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 140–141.

⁷⁸⁴ P. Jensen, *Kausalität, Biologie und Psychologie*, s. 175.

⁷⁸⁵ Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 155.

to znani fizycy, zwłaszcza P. Jordan, interpretują mechanikę kwantową na korzyść witalizmu”⁷⁸⁶. Zisel dostrzega jednak istotną różnicę między zwykłym witalistycznym podejściem Driescha i podejściem Jordana. Przyznaje, że (w przeciwieństwie do Driescha) Jordan nie opierał „osobliwej stabilności” organizmu na przyczynach witalnych, lecz mikrofizycznych⁷⁸⁷. Podkreśla jednak, że efekt, jaki otrzymali obaj badacze, był taki sam. „W zasadzie obie teorie – konkluduje Zisel – mają ten sam cel: obie pragną w jakiś sposób uratować dla nauki nieprzewidywalne dążenie, wolną wolę, nieobliczalne »ożywienie« organizmów [...]. Jeżeli dwie różne teorie starają się udowodnić jedną, zasadniczo zgodną tezę, stosując w tym celu przeciwstawne argumenty i jeśli, o czym można głośno powiedzieć, argumenty obu stron nie są w stanie oprzeć się krytyce, to dają to do myślenia”⁷⁸⁸.

W dalszej części pracy austriacki badacz krytycznie ocenia podjętą przez Jordana próbę rozszerzenia na genetykę „teorii wzmacniacza”, a także twierdzenie, że badania nad mutacją popierały jego interpretację nieokreśloności kwantowej „we wzmocnionej stałej strukturze organicznej, chromosomie, na granicy pomiędzy mikroskopowym i makroskopowym układem”⁷⁸⁹. W odpowiedzi na te twierdzenia Zisel odwołał się do pracy Hermanna Mullera nad przyczynowymi powiązaniem mutacji i radiacji. Jego zdaniem przedstawione w badaniach Mullera przewidywalne powiązanie pomiędzy promieniowaniem rentgenowskim i wzrostem temperatury wraz ze wzrostem tempa mutacji było dobrym kontrprzykładem. Ponadto proces rozwoju był wystarczająco przewidywalny. „W normalnych warunkach – pisze Austriak – wszystkie kijanki przeobrażają się w żaby, wszystkie pobudzone mięśnie drgają, wszystkie drzewa obrastają w liście. To, że takie procesy życiowe, gdy larwa, mięsień, drzewo już są, podczas gdy komórka jajowa i plemnik zaliczają się już do przeszłości, regulowane są dalej przez jedno jedyne jądro komórkowe, jeden jedyny chromosom, jest tylko prawdopodobne. W przypadku najczęstszych i właśnie charakterystycznych form życia analogia wzmacniacza pozostaje całkowicie zbyteczna”⁷⁹⁰.

Walter Elsasser krytykuje „amplifikującą teorię życia organicznego”, jak nazywa tę Jordana. Píše: „Wydaje mi się, że podejście Jordana ponosi porażkę w rozwiązaniu dowolnego epistemologicznego dylematu, przed jakim stajemy, chcąc zmierzyć się z problemami obejmującymi naturę organizmu”⁷⁹¹.

⁷⁸⁶ E. Zisel, *P. Jordans Versuch...*, s. 57.

⁷⁸⁷ Por. tamże, s. 64. Por. P.R. Sloan, *Biophysics in Berlin*, s. 69.

⁷⁸⁸ E. Zisel, *Jordans Versuch...*, s. 64.

⁷⁸⁹ Tamże, s. 61–62. Por. P.R. Sloan, *Biophysics in Berlin*, s. 69.

⁷⁹⁰ E. Zisel, *Jordans Versuch...*, s. 62.

⁷⁹¹ W.M. Elsasser, *Reflections on a theory of organisms...*, s. 106.

Jako witalistyczne określał biologiczne poglądy Jordana Hans Winterstein. Witalizm porównuje on do hydry – na miejscu odciętych głów rosną nowe⁷⁹². Podkreśla, że najnowsza głowa tej hydry jest najbardziej oryginalna spośród wszystkich, które dotąd nosiła. Píše: „Podczas gdy wszystkie dotychczasowe koncepcje próbowały uzasadnić brak możliwości wyjaśnienia zjawisk życiowych niemożliwością zastosowania zasad natury nieożywionej, nowy witalizm, który powołuje się na idee Nielsa Bohra i przeplata się z koncepcją Pascuala Jordana, wyprowadza je z natury nieożywionej i czerpie swe argumenty z fizyki atomowej i mechaniki kwantowej”⁷⁹³. Winterstein ten nowy rodzaj witalizmu określa jako witalizm „mikrofizyczny”⁷⁹⁴. Nie szczędzi ostrych słów krytyki pod adresem nowej wersji doktryny witalistycznej: „Stary witalizm był »faute de mieux«, »deus ex machinae« lub lepiej »ex nonmachina«, wynaleziony w celu rozwiązania problemów, których nie można rozwiązać przy zastosowaniu tradycyjnych metod. Mikrofizyczny witalizm to bóstwo, które chce zabronić badań naukowych. Zadaniem nauki jest, powtarzam to bez przerwy, oddawać spostrzeżenia w sposób najbardziej oszczędny i najprostszy. Wszystkie hipotezy, które do tej pory postawiono, powstały w tym celu. Jordan robi to w przeciwnym kierunku: z dużym zaangażowaniem i przenikliwością wymyśla skomplikowany system, którego zadaniem jest myślowe naśladowanie zdarzeń, a mianowicie zdarzeń życiowych, poprzez rozszerzenie relacji nieokreśloności do gigantycznych rozmiarów, aby zapobiegać i uniemożliwiać!!!”⁷⁹⁵

Otto Neurath oskarża Jordana o stosowanie zagmatwanych i nieuzasadnionych analogii w próbie scalenia ze sobą „pewnych tez tradycyjnej szkoły filozoficznej”, z dużą liczbą sformułowań metafizycznych, z „czystą teorią kwantową”⁷⁹⁶. Efekt owego „scalenia” w ocenie Neuratha jest mało wartościowy i całkowicie pozbawiony „głębi” sugerowanej przez Jordana. Neurath píše: „Oczywiście nie można zaprzeczyć, że w dzisiejszych bardzo metafizycznych problemach prawdopodobnie tkwi ziarno nauki i będziemy wdzięczni temu, kto takie ziarno odkryje. Zapewne często będziemy spotykać się z takimi problemami. Jednak metoda łączenia dobrej, nowej fizyki z przestarzałą metafizyką, stosowana przez Jordana, nie służy wyjaśnieniu, do którego dążymy. Z tego powodu musimy odrzucić ten rodzaj starań”⁷⁹⁷.

⁷⁹² Por. H. Winterstein, *Der mikrophysikalische Vitalismus*, „Erkenntnis”, 7 (1938), s. 81.

⁷⁹³ Tamże, s. 81.

⁷⁹⁴ Por. tamże, s. 81.

⁷⁹⁵ Tamże, s. 86.

⁷⁹⁶ O. Neurath, *Jordan, Quantentheorie und Willensfreiheit*, „Erkenntnis”, 5 (1935), s. 180. Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 157.

⁷⁹⁷ O. Neurath, *Jordan, Quantentheorie und Willensfreiheit*, s. 181.

O ile Bleuler i Jensen postrzegali idee Jordana jako zagrożenie dla niezależności biologii, Moritz Schlick w swym artykule zatytułowanym *Ergänzende Bemerkungen über P. Jordan's Versuch einer quantentheoretischen Deutung der Lebenserscheinungen* (Uwagi uzupełniające na temat prób P. Jordana odnośnie do kwantowoteoretycznych interpretacji przejawów życia) krytykował niemieckiego fizyka za coś zupełnie przeciwnego, a mianowicie za to, że zakładał ostateczną niezależność biologii względem praw fizyki⁷⁹⁸. Schlick pisze: „Do podstawowego filozoficznego problemu przejawów życia należy kwestia, czy prawa biologii można bez reszty sprowadzić do praw fizyki lub czy świat organiczny posiada swoje własne prawa, czy jest autonomiczny w stosunku do fizyki. W tej kwestii Jordan wykazuje pewne uprzedzenie na korzyść autonomii życia, ponieważ uznaje on z góry samodzielność biologii. Nie czyniłby on tego z pewnością wobec na przykład chemii, postulując jej redukcję do fizyki”⁷⁹⁹. „Teorię wzmacniacza” Jordana uważa za błędną i niepraktyczną. Podaje konkretne argumenty za swoją krytyczną oceną tej teorii. Zasadniczym powodem braku akceptacji „teorii wzmacniacza” przez Schlicka jest to, iż nie jest ona (w jego ocenie) zgodna ze statystycznym charakterem fizycznej nieoznaczoności. Twierdzi: „jej pomysłowe sumowanie sprzeciwiałoby się zwalczanym przez fizykę nieregularnościom (tzn. teoria ta nie jest niemożliwa, ale nadzwyczaj nieprawdopodobna) i potrzebowanoby czegoś takiego jak demon Maxwella, który dokona wyboru odpowiednich występujących po sobie przypadkowości. Tego rodzaju pogląd nie może być zaakceptowany, ponieważ jest rzeczą jasną, że w związku z tym można całkowicie oderwać się od rzeczywistości, w której Jordan niewątpliwie chciałby pozostać”⁸⁰⁰. Schlick konkluduje, że zaproponowana przez Jordana kwantowa teoria życia w żaden sposób nie może być uznana za użyteczną dla zrozumienia fundamentalnych przejawów życia. „Często wskazuje się – pisze – że wolność działania, odpowiedzialność, poczytalność tak daleko sięgają, jak daleko sięga przyczynowość; kończą się tam, gdzie pojawia się przypadek. Kto więc – podobnie jak zwolennik teorii wzmacniacza – uznaje wyższy stopień nieprzyczynowości za charakterystykę tego co organiczne, to wówczas nie mówi nic innego jak to, że żywe twory przyrody charakteryzują się większą przypadkowością przejawiania się działania w nich i wyższym stopniem braku odpowiedzialności. Nie jestem w stanie sobie wyobrazić, że ktoś, kto przeoczy te konsekwencje, może twierdzić, że wyniki teorii kwantowej w zapropo-

⁷⁹⁸ Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 157.

⁷⁹⁹ M. Schlick, *Ergänzende Bemerkungen über P. Jordan's Versuch einer quantentheoretischen Deutung der Lebenserscheinungen*, „Erkenntnis”, 5 (1935), s. 181.

⁸⁰⁰ Tamże, s. 182.

wany przez Jordana sposób mogłyby uczynić coś pożytecznego dla zrozumienia przejawów życia”⁸⁰¹.

Sprzecznosc na temat niezaleznosci biologii jako nauki w argumentacji Jordana wykryl Philipp Frank. Niemiecki fizyk przyznawal, ze w teorii kwantowej nic nie wspieralo idei autonomicznej, teleologicznej biologii, z drugiej strony wydawal sie sadzic, ze mozliwosc tego wsparcia byla wieksza w nowej fizyce niz w starej⁸⁰². Ostatecznie „teoria amplifikatora” nie wnosila zadnego „za” ani „przeciw” wobec niezaleznosci biologii wzgledem fizyki, a raczej starala sie przesunac owczesna fizyke do nauk biologicznych, co nieraz mialo miejsce w historii nauki. Piszze: „Lecz to, co mi w wywodach P. Jordana dotyczacych znaczenia teorii kwantowej dla biologii nie wydaje sie zupelnie jasne, brzmi nastepujaco: chociaz dodaje on, ze z teorii kwantowej nie daja sie wyprowadzic w zadnym wypadku wnioski na rzecz »autonomicznej«, »niezaleznej«, »teleologicznej« biologii, to jednak zaznacza, ze istnieja blizsze perspektywy dotyczace takiej koncepcji biologii [zbudowanej] na fundamencie teorii kwantowej niz te opierajace sie na starej fizyce. Lecz wydaje mi sie trudne do zrealizowania sformulowanie w jezyku »radikalnego pozytywizmu« przychylnej oceny dla tego rodzaju perspektyw, ktore dostrzega sam P. Jordan i »Wiener Kreis« (Kolo Wiedeńskie), jako [bédace] jezykiem samej nauki”⁸⁰³.

Hans Reichenbach, wspóredaktor „Erkenntnis”, byl najbardziej poblázliwy wobec teorii Jordana, co nie jest zaskoczeniem, gdyz sam wyrazal idee bardzo podobne do jego koncepcji⁸⁰⁴. W eseju opublikowanym w lutym 1932 roku w znanym czasopiśmie medycznym Reichenbach zajal sie znaczeniem pojecia prawdopodobienstwa dla biologii⁸⁰⁵. Podobnie jak niemiecki fizyk, Reichenbach twierdzi, ze badacze nie powinni miec zadnych skrupóów w stosowaniu teorii prawdopodobienstwa w biologii. „Po tym – pisze – jak w fizyce, ktora cechuje sie najwieksza precyzja spośród wszystkich nauk przyrodniczych, rozpoznano zasadnicza granice idei przyczynowosci, nie ma dalej powodu, aby nauki biologiczne traktowaly w dalszym ciagu przyczynowosc jako konieczny aprioryczny postulat. To, czy pozostale ujęcia przyczynowosci mozna stosowac w biologii, nie wymaga rozwiázania kwestii zwiázanych z teoria filozoficzna; o tym moga w wiekszym stopniu zadecydowac badania biologiczne. Bédá one mogly umozliwic podjecie decyzji, jesli uwolnia sie od domniemanych apriorycznych koniecznosci

⁸⁰¹ Tamże, s. 183.

⁸⁰² Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 157.

⁸⁰³ P. Frank, *Jordan und der radikale Positivismus*, „Erkenntnis”, 5 (1935), s. 184.

⁸⁰⁴ Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 158.

⁸⁰⁵ Por. tamże, s. 125–126.

i jeżeli jednocześnie rozpoznają obiektywny charakter pojęcia prawdopodobieństwa”⁸⁰⁶. Obrona tej kategorii przez Reichenbacha opiera się między innymi na hipotezie, która była podobna do teorii Jordana na temat amplifikatora⁸⁰⁷. Badacz pisze: „Podobnie jak przypadkowy błąd krystalizacji w metalowym skrzydle samolotu może doprowadzić do śmierci ludzi albo pyłek kurzu, który wpadnie kierowcy w oko może spowodować katastrofę i śmierć kierowcy i pasażerów, tak samo nieokreśloność procesu atomowego może niekiedy ingerować w elementy makroskopowe, jeżeli mają miejsca odpowiednie połączenia”⁸⁰⁸. W innym artykule Reichenbach przestrzegał przed nadmiernym potępianiem Jordana, którego pozytywizm – jak wierzył niemiecki badacz – zasługiwał na pewne uznanie⁸⁰⁹. Przekonuje, że ten fizyk w żadnym momencie nie odwoływał się do metafizyki, ale zawsze do werdyktu faktyczności, i zawsze jego teoria musiała zostać zweryfikowana empirycznie. „Uważam to za niewłaściwe – pisze Reichenbach – aby stosować wobec idei Jordana zarzut, iż są to spekulacje metafizyczne, bowiem ciągle stara się on, aby realizować delikatne idee w oparciu o jasne, empiryczne fakty. Nie mówi nic, co przekraczałoby zakres tego, co jest sprawdzalne empirycznie i akcentuje nawet wyraźnie pokrewieństwo z naszym kierunkiem filozoficznym”⁸¹⁰.

Uderzające były zbieżności między wizją Jordana i Reichenbacha w zakresie znaczenia fizyki dla nauk biologicznych, ale równie uderzające były dzielące je różnice. W teorii Jordana amplifikacyjne struktury stanowiły istotną część modelu organizmu żywego⁸¹¹. Posiadając minimum dowodów, fizyk był przekonany o ich faktycznym istnieniu w organizmie. Reichenbach z kolei prezentował swoje „specjalne, wzajemne powiązania” jako w dużej mierze hipotetyczne. Kwestia powszechności ich występowania w organizmach żywych pozostawała otwarta, a wyniki przyszłych badań miały ją potwierdzić lub odrzucić. Badacz pisze: „Jednakże wydaje się przedwczesne snucie takich przypuszczeń. Odpowiedź należy pozostawić dziedzinie mikrochemii”⁸¹².

Włoski fizyk Gino Segrè zestawia poglądy biologiczne Jordana z odnośnymi poglądami Delbrücka⁸¹³. Zauważa, że ilekroć zwracał się ku biologii, Jordan szukał w mechanice kwantowej idei, które można by było rozszerzyć, jednak – w przeciwieństwie do Delbrücka – robił to, nie zadając sobie trudu,

⁸⁰⁶ H. Reichenbach, *Kausalität und Wahrscheinlichkeit in der Biologie*, „Klinische Wochenschrift”, 11 (1932), s. 252.

⁸⁰⁷ Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 127.

⁸⁰⁸ H. Reichenbach, *Kausalität und Wahrscheinlichkeit...*, s. 252.

⁸⁰⁹ Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 158.

⁸¹⁰ H. Reichenbach, *Metaphysik bei Jordan?*, „Erkenntnis”, 5 (1935), s. 178–179.

⁸¹¹ Por. R.H. Beyler, *From positivism to organicism...*, s. 128.

⁸¹² H. Reichenbach, *Kausalität und Wahrscheinlichkeit...*, s. 252–253.

⁸¹³ Por. G. Segrè, *Ordinary geniuses...*, s. 55.

by poznać szczegóły nowej dziedziny. „W przeciwieństwie do Jordana – pisze Segrè – Max [Delbrück] był zwolennikiem tak zwanego podejścia oddolnego, a nie odgórnego: najpierw dowiedz się, jaki jest problem w nowej dziedzinie, poznaj w szczegółach dane eksperymentalne, a następnie sprawdź, czy nowe idee dla poznanej dziedziny mogą się okazać przydatne. Nie zaczynaj od ustalonych wcześniej przekonań, że coś jest właściwe. Okazało się, że podejście to jest mądre i przemyślane”⁸¹⁴.

Reasumując krytycy kwantowej teorii życia Jordana uważali, że indeterminizm kwantowofizyczny nie miał większego znaczenia dla praktyk w naukach biologicznych⁸¹⁵. Zdaniem krytyków hipoteza amplifikatora w najlepszym razie wynikała z nieznanego obecnego stanu wiedzy o biofizycznych, biochemicznych i fizjologicznych badaniach. W najgorszym – mogło to oznaczać nieuzasadnioną próbę włączenia nauk biologicznych do teorii kwantowej, zatem potencjalne lub rzeczywiste poparcie dla teorii głoszonych przez Jordana było co najwyżej fragmentaryczne.

Do poglądów biologicznych Bohra w swych spekulacjach ukierunkowanych na fenomen życia odwoływał się Walter Elsasser⁸¹⁶. Szukając odpowiedzi na historyczne pytanie, co to jest życie, w swych licznych publikacjach poświęconych biologii fizyk ten nabrał przekonania o nieadekwatności współczesnej fizyki pełnego wyjaśnienia fenomenu życia⁸¹⁷. Stał niewzruszenie na stanowisku, że istnieje radykalna odmienność struktury praw biologii i praw fizyki, a tym samym i teorii tychże nauk⁸¹⁸. Szczególnie akcentował wyjątkową złożoność i niehomogeniczność (niejednorodność) struktury układów ożywionych, obecnej na wszystkich poziomach organizacji biologicznej, niespotykanej w porównywalnym stopniu w układach nieożywionych⁸¹⁹. Poniżej

⁸¹⁴ Tamże, s. 56.

⁸¹⁵ Por. R.H. Beyer, *From positivism to organicism...*, s. 143.

⁸¹⁶ Walter Elsasser (1904–1991) – urodzony w Niemczech amerykański fizyk – prowadził pionierskie badania w dziedzinie fizyki nuklearnej i geofizyki, jak również żywo interesował się problematyką biologiczną. Por. F. Seitz, *Elsasser* [w:] W.M. Elsasser, *Reflections on a theory of organisms...*, s. xxi. O niektórych aspektach koncepcji życia amerykańskiego fizyka pisałem w pracach: *Koncepcja życia w ujęciu reprezentatywnych przyrodników...*; *Kontrowersje wokół natury życia w pismach fizyków...*, s. 95–96; *Waltera Elsassera koncepcja życia* [w:] K. Bałkowski, P. Wiatr (red.), *Prawda i byt...*, s. 199–212.

⁸¹⁷ Por. A. Urbanek, *Redukcjonizm* [w:] Z. Cackowski, J. Kmita, K. Szaniawski, P.J. Smoczyński (red.), *Filozofia a nauka. Zarys encyklopedyczny*, s. 574. Zob. tenże, *Redukcjonizm we współczesnej biologii*, „Nauka Polska”, 11(173) (1979), s. 95.

⁸¹⁸ Por. Sz.W. Ślaga, *Eigena fizyczny model ewolucji prebiotycznej* [w:] K. Kłósak (red.), *Z zagadnień filozofii przyrodznawstwa i filozofii przyrody*, t. III, Wyd. ATK, Warszawa 1979, s. 144.

⁸¹⁹ Por. W.M. Elsasser, *Synopsis of organismic theory*, „Journal of Theoretical Biology”, 1(7) (1964), s. 53–54. Por. S. Zięba, *Rozwój mechanistycznej koncepcji życia...*, s. 133. Zob.

zawarto krótką prezentację poglądów Elsassera ukierunkowanych na fenomen życia. Dla pełniejszego obrazu przedstawione zostały także krytyczne uwagi wysuwane przez kilku wybranych anglojęzycznych autorów pod adresem jego koncepcji życia.

Elsasser w swych publikacjach biologicznych podejmował próby wykazania istotnych różnic międzyżywioną i nieożywioną materią, a w konsekwencji między biologią i fizyką. Powoływał się przy tym bardzo często na poglądy Bohra. Odwołując się do zasady nieoznaczoności Heisenberga, pisze: „Wiadomo na podstawie mechaniki kwantowej, że jeśli badacz eksperymentujący w fizyce atomowej próbuje odszukać orbitę prostej cząstki, przykładowo elektronu, musi użyć sondy takiej, jak kwant światła, albo inny elektron i we wzajemne oddziaływanie tych dwóch wprowadzić elementy nieprzewidywalne, które wykluczą i uniemożliwią odszukanie nieprzerwanej i przyczynowo stwierdzonej orbity dla wszystkich wzajemnie oddziałujących na siebie cząstek. Cząstka komplementarna, która właśnie jest innym wyrazem dobrze znanych niezgodnych relacji mówi nam, że szczegółowa wiedza o położeniu cząstek wyklucza uzyskanie precyzyjnej informacji o ich pędzie; odwrotnie – szczegółowa informacja o pędzie uniemożliwia wskazanie precyzyjnego położenia”⁸²⁰. Powyższą zasadę stosuje Elsasser następnie do organizmu żywego, w którym dostrzega wysoce złożony układ dynamiczny z ogromną liczbą wzajemnych połączeń między jego aktywnymi chemicznie komponentami⁸²¹. Aby go w pełni zrozumieć, konieczne jest wielokrotne przeprowadzenie skomplikowanych pomiarów w skali molekularnej, co skutkuje poważną zmianą wewnętrznej dynamiki układu ożywionego, prowadzącą nawet do śmierci organizmu.

Elsasser w swych rozważaniach biologicznych nawiązuje do programu „uogólnionej komplementarności” Bohra, zgodnie z którą, adekwatny opis systemów kompleksowych, które nazywamy organizmami, może zostać osiągnięty wyłącznie ze stratą szczegółowych i kompletnych analiz fizyczno-chemicznych⁸²². Stara się wyrazić ów program w ramach własnej koncepcji. Stwierdza między innymi: „biotoniczne rodzaje zachowania nie mogą być badane w kategoriach skumulowanych pomiarów szczegółów mikroskopowej budowy organizmu. Wszelkie tego typu pomiary zakłócają to, co

tenże, *Analiza filozoficzna bioelektronicznej koncepcji życia*, „Roczniki Filozoficzne”, 3 (1982), s. 88.

⁸²⁰ W.M. Elsasser, *The physical foundation of biology. An analytical study*, Pergamon Press, London 1958, s. 147–148.

⁸²¹ Por. tamże, s. 148.

⁸²² Por. tenże, *Physical aspects of non-mechanistic biological theory*, „Journal of Theoretical Biology”, 2(3) (1962), s. 165. Zob. tenże, *Reflections on a theory of organisms...*, s. 9.

dzieje się w organizmie na tyle, iż procesy biotoniczne ulegają modyfikacji i przestają działać w normalny sposób, zanim owe pomiary osiągną stopień dokładności, który pozwoliłby określić naturę procesów biotonicznych w kategoriach indywidualnych oddziaływań molekularnych. I odwrotnie, jeśli będziemy obserwować zachowania biotoniczne w organizmie bez poddawania go szczegółowemu badaniu pomiarami mikroskopowymi, zrezygnujemy z wiedzy o indywidualnych procesach molekularnych, a zatem z możliwości wyrażenia biotonicznych rodzajów zachowania w kategoriach działań molekularnych”⁸²³. Metodę duńskiego fizyka postrzega jako przeciwieństwo tradycyjnej metody kartezjańskiej. Przypomina, na czym polega ta metoda⁸²⁴. Zakłada ona, że powinniśmy zajmować się kompleksowymi systemami poprzez rozbitcie ich na mniejsze i prostsze komponenty i przebadac je indywidualnie, zbierając na koniec razem. W tradycyjnej fizjologii „redukujemy” skurcze mięśni do kurczliwych właściwości białek budujących mięśnie. Zdaniem Elsassera metoda kartezjańska jest nieadekwatna w stosunku do związków komplementarnych mechaniki kwantowej.

Przyjmując idee Bohra za punkt wyjścia, amerykański fizyk tworzy podstawy własnej „kwantowej teorii organizmów”⁸²⁵. Utrzymuje, że klasy jednostek w mechanice kwantowej są homogeniczne, co oznacza, że nie da się ściśle odróżnić jednej od drugiej⁸²⁶. Wszystkie jednostki klasy homogenicznej w tym samym stanie kwantowym są nieodróżnialne, identyczne i każda z nich będzie zachowywała się tak, jak kolejna. Elsasser twierdzi, że w przeciwieństwie do mechaniki kwantowej w biologii klasy jednostek są heterogeniczne, niepowtarzalne, unikatowe⁸²⁷. „Organizmy – pisze – są strukturalnie i dynamicznie tak złożone, że można zawsze znaleźć indywidualne różnice, co najmniej mikroskopowe [...], między jakimikolwiek dwoma jednostkami takiej samej klasy”⁸²⁸. Biologia różni się od fizyki obecnością klas heterogenicznych.

Elsasser stoi na stanowisku, że prawa fizyki same w sobie są niewystarczające, aby wyjaśnić zwiększającą się ilość informacji w rozwijającym się

⁸²³ Tenże, *The physical foundation of biology*..., s. 148–149.

⁸²⁴ Por. tenże, *Reflections on a theory of organisms*..., s. 101.

⁸²⁵ Por. tamże, s. 102.

⁸²⁶ Por. tenże, *Synopsis of organismic theory*, s. 54. Zob. tenże, *Quanta and the concept of organismic law*, „Journal of Theoretical Biology”, 1(1) (1961), s. 38–39. Por. D.L. Hull, *The philosophy of biological science*, s. 137.

⁸²⁷ Por. Elsasser W.M., *The transition from theoretical physics into theoretical biology* [w:] A.D. Breck, W. Yourgrau (eds), *History, and natural philosophy*, Plenum Press, New York 1974, s. 159.

⁸²⁸ Tenże, *Quanta and the concept of organismic law*, s. 38.

organizmie⁸²⁹. Rządzi tym specyficzne prawo, które nazywa się „biotonicznym”. Odnosi się ono do organizmów żywych i jest zgodne z prawami fizyki, jednak w żaden sposób nie da się go wydedukować, wyprowadzić jako pochodnego z praw fizycznych⁸³⁰. Dla tego badacza życie organiczne to coś więcej niż nagromadzenie mechanizmów. Píše: „można się spodziewać, że istnieje coś więcej niż zbudowane z tkanki organicznej urządzenia lub procesy wyrażające zdolność materii ożywionej do wykraczania poza mechanistyczny determinizm. Jeśli takie procesy istnieją, muszą mieć kluczowe znaczenie dla życia organicznego”⁸³¹.

Amerykański fizyk wyróżnia trzy ważne cechy biosystemów, które przekraczają możliwości opisu fizyczno-chemicznego. Za najważniejszą uważa ich strukturalną oraz dynamiczną kompleksowość⁸³². „Ta kompleksowość – pisze – jest tym, co nas powstrzymuje przed analitycznym przebadaniem organizmu, przeprowadzanym w sposób podobny do rozłożenia zegarka na czynniki pierwsze, które ma na celu wykorzystanie w ten sposób zdobytej wiedzy, aby przewidzieć jego zachowania w przyszłości”⁸³³. Dzięki dużej kompleksowości molekularnych struktur organizmu ogromna liczba dostępnych wzorów ma wpływ na zachowanie organizmu⁸³⁴. Szczegóły tego wpływu nie mogą jednak zostać zredukowane do praw fizyki, gdyż taka redukcja wymagałaby dużej liczby obserwacji oraz eksperymentów, a takie nie są dostępne. Elsasser podkreśla za Bohrem, że im bardziej ingeruje się w żywe struktury, tym bardziej szczątkowe są wyniki badania⁸³⁵. „W efekcie – pisze – organizm jest tak bardzo poddany manipulacji, że osiąga punkt, w którym przestaje być żywy, zanim ustalony zostanie bieg fizycznej przyczynowości na poziomie molekularnym”⁸³⁶. Wniosek z powyższej konstatacji

⁸²⁹ Por. tenże, *Physical aspects of non-mechanistic...*, s. 165. Por. M.W. Wolkensztejn, *Biologia i fizyka*, tłum. J. Bielewicz, „Problemy”, 6 (1974), s. 44.

⁸³⁰ Por. W.M. Elsasser, *The physical foundation of biology...*, s. 146.

⁸³¹ Tenże, *Reflections on a theory of organisms...*, s. 102.

⁸³² Por. tenże, *Eine Kritik am Reduktionismus* [w:] B.-O. Küppers (ed.), *Leben = Physik + Chemie?*..., s. 226. Z powyższym stwierdzeniem Elsassera w pełni identyfikuje się Ernst Mayr. Píše on: „Podczas niedawnego sympozjum fizyk Elsasser oświadczył, że »cechą wyróżniającą wszystkich organizmów jest ich prawie nieograniczona złożoność strukturalna i dynamiczna«. Stwierdzenie to jest bez wątpienia słuszne. Każdy układ organiczny jest tak niezwykle bogaty w reakcje, mechanizmy homeostatyczne i potencjalne wielorakie ścieżki rozwoju, że całkowite jego scharakteryzowanie jest niemożliwe. Ponadto jego analiza wymagałaby zniszczenia tego układu, a więc konsekwentnie byłaby bezcelowa”. E. Mayr, *Toward a new philosophy of biology...*, s. 34.

⁸³³ W.M. Elsasser, *Eine Kritik am Reduktionismus*, s. 226.

⁸³⁴ Por. tamże, s. 225.

⁸³⁵ Por. tamże, s. 228.

⁸³⁶ Tamże.

cji ukazuje, że nie da się wskazać dokładnego stanu molekularnego organizmu żywego bez „poświęcenia” istoty żywej.

Drugą cechą biosystemów jest ich „kreatywność”, czyli zdolność organizmów do generowania wielokrotnie struktur lub procesów, które są kompatybilne z prawami fizyczno-chemicznymi (prawami mechaniki kwantowej), ale nie są przez nie w pełni określone⁸³⁷. Zdolność ta obejmuje proces kreatywnej selekcji między ogromną liczbą konkurencyjnych stanów i procesów. Dla Elsassera oczywiste jest, że *locus* kreatywności znajduje się w życiu organicznym⁸³⁸. Píše: „Kreatywność, jak mówimy, jest możliwa ze względu na fakt, że dzięki granicom obserwacji postawionym przez mechanikę kwantową wynikające zmiany morfologiczne nie mogą być zawsze śledzone w przyczynowym szczególe. Możemy powiedzieć, że organizm modyfikuje swoją konfigurację zbyt szybko, abyśmy mogli to śledzić za pomocą jakichkolwiek środków, do których mamy dostęp”⁸³⁹. Kreatywność życia domaga się zdaniem amerykańskiego fizyka konieczności zmniejszenia surowości mechaniki kwantowej. Píše dalej: „Ponieważ nigdy nie dojdziemy do »udowadniania« istnienia podobnych kreatywnych tendencji przez stosowanie metody kartezjańskiej, polegającej na rozbijaniu kompleksowych sytuacji na prostsze, musimy sprecyzować kreatywność w sposób, który upewni nas, że nie stanie nigdy w sprzeczności z prawami mechaniki kwantowej; musimy »zmniejszyć«, surowość tych praw”⁸⁴⁰. Elsassier dostrzega więc potrzebę modyfikacji mechaniki kwantowej w celu przystosowania jej do warunków biologicznych⁸⁴¹. Podkreśla przy tym, że podstawowy formalizm teorii kwantowej (specyficznych operatorów i funkcji falo-wej) jest tak niezwykle spójny wewnętrznie i tak dokładnie zweryfikowany przez obserwacje, że każda próba zmiany wydaje się niezwykle trudna. Z drugiej jednak strony układ wzorów kwantowomechanicznych, i ich interpretacja może być traktowana z dużo większą swobodą. „Większość ludzi lubi mieć prosty wzór – píše badacz – niekoniecznie dla specjalnego zastosowania, ale po prostu w celu bycia zdolnym do zapamiętania tego, do czego zmierzają. W tym celu kreatywność w organizmie może być przede wszystkim interpretowana na poziomie chemicznym, to znaczy jako wynik metabolizmu: w żywej tkance elektrony i protony poruszają się przez prawie cały czas, a wiązania chemiczne ciągle są łamane i tworzone. Kreatywność jest

⁸³⁷ Por. tenże, *Reflections on a theory of organisms...*, s. 106.

⁸³⁸ Por. tenże, *Acausal phenomena in physics and biology, a case for reconstruction*, „American Scientist”, 57 (1969), s. 503.

⁸³⁹ Tamże, s. 504.

⁸⁴⁰ Tenże, *Reflections on a theory of organisms...*, s. 106.

⁸⁴¹ Por. tenże, *Acausal phenomena in physics and biology...*, s. 504.

możliwa ze względu na fakt, że dzięki granicom obserwacji postawionym przez mechanikę kwantową, wynikające zmiany morfologiczne nie mogą być śledzone w przyczynowym szczególe. Możemy powiedzieć, że organizm modyfikuje swoją konfigurację zbyt szybko, abyśmy mogli to śledzić za pomocą jakichkolwiek środków, do których mamy dostęp”⁸⁴². Poszukiwanie sposobu na zmniejszenie surowości mechaniki kwantowej doprowadziło Elsassera do dwóch fenomenów, które osłabiają przewidywania oparte na prawach mechaniki kwantowej⁸⁴³. Jednym z nich jest heterogeniczność; drugim – właściwość mechanicznej stabilności lub niestabilności na poziomie molekularnym⁸⁴⁴. Badacz przyjmuje, że tkanka organiczna jest mieszaniną stabilnych i marginalnie niestabilnych komponentów. Biologia jest więc królestwem zjawisk naturalnych, zdominowanym przez pojęcie kreatywności⁸⁴⁵. Wyraźnie odróżnia to biologię od fizyki, która jest i zawsze była nauką deterministyczną.

Trzecią cechą, jaką obdarzony jest biosystem, Elsasser nazywa „pamięcią holistyczną”, która jest zdolnością układu do utrzymywania wewnętrznego uporządkowania przez wiele pokoleń biologicznych pomimo naturalnej tendencji układów fizycznych do zmian w kierunku wzrastającej entropii⁸⁴⁶. Cecha ta jest nieodłącznie związana z układami żywionymi. Jej zrozumienie wykracza poza metody fizyczno-chemiczne.

Jakie były główne zarzuty wysuwane pod adresem koncepcji życia Elsassera? Wielu recenzentów poszczególnych prac Elsassera identyfikuje poglądy biologiczne amerykańskiego badacza wprost z doktryną witalistyczną. Za taką oceną opowiada się Ann Plamondon, która wbrew temu, co pisze niemiecki fizyk (nazywający swoje stanowisko organicyzmem) klasyfikuje go jako witalistę⁸⁴⁷. Podobnego zdania jest Marjorie Grene, która twierdzi, że „biotoniczne prawa” Elsassera, niewytłumaczalne za pomocą praw fizyki czy chemii, wprowadzają do naturalnego porządku nieciągłość⁸⁴⁸. Ernst Peter Fischer i Carol Lipson dostrzegają wyraźne podobieństwa między poglądami biologicznymi Elsassera a odnośnymi poglądami Jordana. Poglądy obydwu fizyków postrzegają jako wyraźnie kontrastujące

⁸⁴² Tamże, s. 504.

⁸⁴³ Por. tenże, *Reflections on a theory of organisms...*, s. 106–107.

⁸⁴⁴ Por. tamże, s. 107.

⁸⁴⁵ Por. tamże, s. 106.

⁸⁴⁶ Por. F. Seitz, *The science matrix. The journey, travails, triumphs*, Springer-Verlag, New York–Berlin–Heidelberg–London–Paris–Tokyo–Hong Kong–Barcelona–Budapest 1992, s. 105.

⁸⁴⁷ Por. A. Plamondon, *Contemporary reconciliation...*, s. 214.

⁸⁴⁸ Por. M. Grene, *The logic of biology* [w:] *The logic of personal knowledge. Essays presented to Michael Polanyi on his seventieth birthday, 11th March 1961*, Routledge & Kegan Paul, London 1961, s. 199.

z rozstrzygnięciami Delbrücka. „Jordan i Elsasser również – piszą Fischer i Lipson – odpowiedzieli na wyzwanie Bohra i starali się zastosować analizę epistemologiczną w biologii. [...] mylili oni zasadę komplementarności z pojęciem witalizmu. [...] ich wkład w biologię był zerowy (lub negatywny, jeśli policzymy zamęt, jaki wprowadzili wśród niektórych swoich czytelników i słuchaczy)”⁸⁴⁹. Michail W. Wolkensztejn również spekulacje o „biotonicznych” prawach uważa za „nowoczesną modyfikację witalizmu”⁸⁵⁰. Dlatego też wszystkie dyskusje o prawach „biotonicznych”, które wyprowadził Elsasser są (w ocenie tego badacza) z zasady całkowicie niekonstruktywne⁸⁵¹. „Rozwój biologii – pisze Wolkensztejn – obala te pojęcia. Okazują się one bezpodstawne również w świetle analizy przeprowadzonej na podstawie fizyki cząstek elementarnych i teorii informacji. Współczesna biologia jest nieodłącznie związana z fizyką i chemią, nie pozostawiając witalizmowi żadnych szans”⁸⁵². Wolkensztejn zamieszcza kilka krytycznych uwag pod adresem prawa „biotonicznego”. W jego ocenie, Elsasser w swej koncepcji nie uwzględnił faktu, że ilość informacji w komórce lub organizmie nie jest aż tak istotna; istotny jest program informacyjny rozwoju⁸⁵³. „Poza tym – pisze dalej – ilość informacji jest pojęciem uzupełniającym entropię i dlatego twierdzenie »biotoniczne« – to właściwe twierdzenie utrzymujące, że organizmy żywe nie podporządkowują się drugiej zasadzie termodynamiki. Pomijając to, że organizm żywy jest układem otwartym, należałoby go uważać za szczególnego rodzaju *perpetuum mobile*”⁸⁵⁴. Za skrajnie witalistyczne uważa poglądy Elsassera angielski biochemik Francis Crick. Jego zdaniem ukierunkowane na fenomen życia spekulacje amerykańskiego fizyka są „pięknym przykładem zamieszania, które może być wynikiem ignorancji”⁸⁵⁵. O głębokim przywiązaniu Elsassera do doktryny witalistycznej świadczy zwłaszcza – jak twierdzi Crick – koncepcja „praw biotonicznych”. „Dr Elsasser – pisze angielski fizyk – jak podejrzewam, nie chciałby być sklasyfikowany jako witalista, chociaż przyznaje, że »zblżyliśmy się do doktryny witalistycznej«. Być może bardziej słuszne byłoby nazwać go »neowitalistą«: to jest, człowiekiem, który wierzy w idee witalistyczne, przy jednoczesnym zaprzeczeniu, że jest tak w istocie! Jego argumenty byłyby może prze-

⁸⁴⁹ E.P. Fischer, C. Lipson, *Thinking about science...*, s. 129.

⁸⁵⁰ Por. M.W. Wolkensztejn, *Physical approaches to biological evolution*, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg 1994, s. 34.

⁸⁵¹ Por. tamże, s. 25.

⁸⁵² Tenże, *Biologia molekularna*, tłum. M. Bogdasarian, K. Berens, PWN, Warszawa 1969, s. 16.

⁸⁵³ Por. tenże, *Biologia i fizyka*, s. 44.

⁸⁵⁴ Tamże, s. 44.

⁸⁵⁵ F. Crick, *Of molecules and men*, s. 19.

konujące trzydzieści lat temu, dzisiaj jednak żaden biolog molekularny nie bierze ich na poważnie. Szczegółowa wiedza, jaką zebraliśmy na przestrzeni ostatnich lat [...] pokazała, jak zwodnicze mogą być ogólne argumenty, kiedy nie są bezpiecznie oparte na gruntownej wiedzy naukowej. Kiedy fakty wchodzą drzwiami, witalizm z wraskiem wyskakuje przez okno”⁸⁵⁶.

Sformułowany przez Elsassera argument o istnieniu klas heterogenicznych jedynie w biologii krytykuje fiński badacz Kari Y.H. Lagerspetz. Dowodzi on, że klasy heterogeniczne mają zastosowanie również w określonych układach nieożywionych⁸⁵⁷. „Jeśli zawężymy dyskusję – twierdzi – do systemów ziemskich, kilka geofizycznych i geologicznych obiektów wydaje się osiągnąć kryteria wystarczającej złożoności i indywidualności. Indywidualne morskie prądy, obiekty atmosferyczne, takie jak cyklony, oraz skały krystaliczne są tego rodzaju indywiduami. Istnieje kilka typów lokalnych skał krystalicznych złożonych z kwarcu, miki, skaleni oraz śladów innych minerałów w różnych stosunkach i przestrzennych konfiguracjach. Liczby możliwych złożów takich systemów są ogromne. Każde wystąpienie takiej skały i każdy pojedynczy kamień takiego materiału jest indywidualny. Precyzyjny opis złożenia próbki struktury skały na poziomie atomowym koniecznie pociąga za sobą jej zniszczenie. Jest również możliwe wyczerpanie klasy skał”⁸⁵⁸. Lagerspetz wyciąga z powyższego wniosek, że geologia jest nauką odnoszącą się do klas heterogenicznych i w tym aspekcie stoi na pozycji podobnej do biologii⁸⁵⁹.

Amerikanin David Hull nie podziela stanowiska Elsassera, że biologia koniecznie musi zajmować się każdym organizmem w całej jego złożoności⁸⁶⁰. „Tak jak wszyscy naukowcy – pisze – również biolodzy próbują zauważyć znaczące właściwości organizmów żywych, które mogą być wcielo-
ne do naukowych praw i teorii. Znalezienie prawidłowych właściwości i połączenie ich we właściwy sposób jest głównym zadaniem biologa teoretyka. Na przykład w ewolucji znacząca jest właściwa liczba organizmów w gatunku, gęstości względne czy liczba różnych prezentowanych gatunków. Jednym z kluczowych pytań w biologii jest, czy stopień precyzji potrzebnej w specyfikacji genetycznej charakteryzującej populację jest tak wysoki, żeby uniemożliwić sformułowanie o nich każdego prawa ewolucyjnego”⁸⁶¹.

Holenderski biolog Wim J. van der Steen uważa z kolei, że tezy biologiczne Elsassera nie mogą pociągać za sobą twierdzenia, że biologia nie

⁸⁵⁶ Tamże, s. 21–22.

⁸⁵⁷ Por. K.Y.H. Lagerspetz, *Individuality and creativity...*, s. 256.

⁸⁵⁸ Tamże, s. 256.

⁸⁵⁹ Por. tamże, s. 257.

⁸⁶⁰ Por. Hull D.L., *The philosophy of biological science*, s. 139.

⁸⁶¹ Tamże, s. 139.

może zostać zredukowana do fizyki lub chemii⁸⁶². W szczególności zauważa, że z faktu, iż układy ożywione odznaczają się kompleksowością i heterogenicznością, nie musi wynikać, że redukcja biologii do fizyki i chemii nie jest możliwa. Pisz: „To jednak mogłoby być inhibitorem redukcji tylko po przyjęciu założenia, że wyjaśnienie i przewidywanie są »symetryczne«. Jednakże [...] teoria symetrii nie jest powszechnie obowiązująca. Elsasser odnosił się do pozornej rozbieżności między biochemiczną stabilnością a nieokreślonością mikrofizyczną”⁸⁶³.

Rażące nieścisłości czy wręcz sprzeczności w spekulacjach biologicznych Elsassera zauważa amerykański fizyk noblista Eugene P. Wigner⁸⁶⁴. Z jednej strony przyjmuje on, że istnieją prawa biotoniczne niewchodzące w skład praw fizyki, z drugiej zaś twierdzi, że nie umniejszają one ważności praw mechaniki kwantowej⁸⁶⁵. Jako że mechanika kwantowa z założenia ma zastosowanie do wszystkich istotnych przewidywań, wobec tego stwierdzenie, że prawa biotoniczne nie umniejszają ważności praw mechaniki kwantowej jest, w ocenie Wignera, z nią całkowicie sprzeczne⁸⁶⁶.

W ocenie amerykańskiego biologa teoretyka Stuarta Kauffmana Elsasser nie osiąga zamierzonego celu, jakim jest wykazanie, że organizmy przejawiają regularności, które w zasadzie nie mogą być wyabstrahowane z mechaniki kwantowej⁸⁶⁷. „To, co następuje [...] – pisze badacz – to to, że istnieją regularności, których opis nie jest ani sprawdzalny, ani możliwy do podważenia. Ale nie oznacza to, że te opisy nie są możliwe do wydedukowania z mechaniki kwantowej”⁸⁶⁸. Dodaje przy tym: „Naszym celem z pewnością nie jest zdolność wydedukowania wszystkich prawdziwych stwierdzeń odnośnie do regularności w organizmach – jest nim natomiast wyjaśnienie, jak organizm działa”⁸⁶⁹.

Nie wszyscy autorzy są tak surowi w swych ocenach spekulacji biologicznych Elsassera. Fizyk O. Hall we wprowadzeniu do jednej z książek

⁸⁶² Por. W.J. Van der Steen, *The relation of biology to physics and chemistry. An evaluation of some recent issues in the philosophy of science*, „Acta Biotheoretica”, 3(19) (1970), s. 207.

⁸⁶³ Tamże, s. 205.

⁸⁶⁴ Por. E.P. Wigner, *The probability of the existence of a self-reproducing unit [w:] The logic of personal knowledge...*, s. 231.

⁸⁶⁵ Por. tamże, s. 231–232.

⁸⁶⁶ Por. tamże, s. 232.

⁸⁶⁷ Por. S. Kauffman, *Elsasser, generalized complementarity, and finite classes: a critique of his antireductionism* [w:] K.F. Schaffner, R. Cohen (eds), *Proceedings of the 1972 biennial meeting philosophy of science association*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht/Boston 1974, s. 57.

⁸⁶⁸ Tamże, s. 61.

⁸⁶⁹ Tamże, s. 64–65.

Elsassera podkreśla, że analityczne i epistemologiczne metody, które zostały zaprojektowane w nowoczesnej fizyce, mogą z umiarkowanym wysiłkiem umysłowym również zostać zastosowane do szerokiej tablicy danych biologicznych⁸⁷⁰. Hall przekonuje, że praca badawcza Elsassera ma na celu pokazanie, że można osiągnąć nowe, czysto poznawcze rezultaty, dążąc w tym właśnie kierunku. Podobnego zdania jest Amerykanin Frederick Seitz, który pisze: „Proszę zrozumieć, że w pracy Elsassera nie ma próby zaoferowania żadnego mistycznego punktu widzenia na te kwestie [...]. Nie zajmuje się wiedzą tajemną, ale głównym ograniczeniem użycia powszechnego typu analiz fizycznych, próbując zastosować je do systemów biologicznych. Wydaje się, że zajmuje się tym, co może być określone wyrażeniem »niezwykłym«, zamiast »nie do poznania«”⁸⁷¹.

Trudno nie zgodzić się z ostatnimi uwagami. Oskarżenia wobec Elsassera o wspieranie przez niego witalizmu należy traktować z takim samym dystansem, jak w przypadku podobnych, równie krzywdzących i nieuzasadnionych kalumnii wysuwanych w XX wieku pod adresem innych wybitnych fizyków, zainteresowanych problematyką biologiczną, jak choćby Bohr czy Polanyi. Mimo zauważalnych braków i nieścisłości w spekulacjach Elsassera ukierunkowanych na fenomen życia, niekwestionowany pozostaje bez wątplenia intelektualny wkład tego badacza w podejmowane od stuleci próby odpowiedzi na historyczne pytanie, co to jest życie, wciąż skrywające wiele tajemnic.

Kończącą część niniejszego rozdziału poświęcono analizie relacji pomiędzy organizmem żywym a prawami fizyki i chemii autorstwa Waltera Heitlera⁸⁷². Niemiecki fizyk kwantowy wspomina o Bohrze właśnie w kontekście rozważań zogniskowanych wokół pytania: „czy organizm żywy jest uwarunkowany oraz opisywany przez te same prawa fizyki oraz chemii?”. Odpowiadając na nie, Heitler rozróżnia trzy różne stanowiska⁸⁷³:

1. Fizyka oraz chemia prowadzą w organizmie nieograniczone działania oraz wyznaczają całkowicie zachowanie organizmu; nie ma żadnych jednoznacznych praw biologicznych.

2. W organizmie działają własne prawa biologiczne, które są dodatkiem do praw fizyczno-chemicznych, oraz w pewnym sensie kierują one pro-

⁸⁷⁰ Por. O. Hall, *Preface* [w:] W.M. Elsasser, *Reflections on a theory of organisms...*, s. xxvii.

⁸⁷¹ F. Seitz, *The science matrix...*, s. 106.

⁸⁷² Walter Heitler (1904–1981) – niemiecki fizyk kwantowy i chemik, który wraz z Fritzem Londonem w 1927 roku podał wyjaśnienie wiązania homopolarnego w cząsteczce wodoru.

⁸⁷³ Por. W. Heitler, *Über die Komplementarität von lebloser und lebender Materie* [w:] B.-O. Küppers (ed.), *Leben = Physik + Chemie?*..., s. 189.

cesami fizyczno-chemicznymi w organizmie; prawa fizyki oraz chemii są aktualne.

3. Organizm kieruje się swoimi własnymi prawami; prawa fizyczno-chemiczne są pozbawione w pewnym sensie mocy i zastępowane czymś ogólniejszym.

Zdaniem Heitlera pierwsze stanowisko reprezentowane jest przez niektórych mikrobiologów, którzy wierzą, że mechanika kwantowa obejmuje całą biologię łącznie z powstaniem życia⁸⁷⁴. Rzut oka na bardziej rozwinięte organizmy ukazuje, że nie ma ono racji bytu. Stanowisko drugie jest reprezentowane przez wielu biologów często nieświadomie. W ocenie niemieckiego fizyka jest ono błędne, gdyż fizyka całkowicie określa zachowanie i nie pozwala sobą „kierować”. Według Heitlera pozostaje tylko stanowisko trzecie. „Stajemy tutaj – pisze badacz – przed problemem, w jaki sposób procesy fizyczne i chemiczne różnią się od siebie. [...] Naturalnie nie możemy tutaj mówić, że fizyka jest nieważna, dowodzą tego: działanie sił, osmoza, siła ciężenia, kapilarność, chemiczne przemiany i tak dalej. W tym przypadku może chodzić o wzajemne odgraniczanie się. Granica, która nie jest wyraźna, powinna się znajdować prawdopodobnie w ramach granic molekularnych”⁸⁷⁵.

Heitler sytuuje Bohra w ramach trzeciego stanowiska i mówi: „Już w latach trzydziestych Niels Bohr zajmował się tym zagadnieniem. Obfitość myślowa nowo odkrytej mechaniki kwantowej dała możliwości postawienia hipotezy, według której odgraniczenie to ujmowała w całkiem nowy sposób. Chodzi o fundamentalne dla mechaniki kwantowej pojęcia komplementarności oraz nieokreśloności, które obecnie doświadczyły rozszerzania oraz uogólniania. Hipoteza ta już wtedy wydawała się dość logiczna i zyskała nawet dzisiaj. Tok myślowy Bohra nie był wtedy kontynuowany i nawet dziś nie jest on rozpatrywany przez biologów. Czas powojenny popychał badania bardziej w kierunku fizykalizmu [...]. Dziś uznanie samodzielności praw biologicznych powinno mieć przynajmniej swój początek w sprzeciwie wobec stanowiska drugiego, tak że pozostaje tylko stanowisko trzecie”⁸⁷⁶. Celem analiz Heitlera jest rozwijanie niektórych idei biologicznych Bohra oraz zebranie argumentów, które świadczą na ich korzyść⁸⁷⁷.

Według niemieckiego fizyka organizmy żywe wykazują uwarunkowania, sposoby zachowań oraz całkowicie nowe właściwości, które nie mogą

⁸⁷⁴ Por. tamże, s. 190.

⁸⁷⁵ Tamże, s. 190.

⁸⁷⁶ Tamże.

⁸⁷⁷ Por. tamże, s. 191.

wynikać z fizyki⁸⁷⁸. Procesy fizyczne w organizmie żywym nie mają zastosowania⁸⁷⁹. Zauważa istotne różnice między nieożywioną i ożywioną materią. Zwraca też uwagę na charakterystyczną postać wszystkich organizmów żywych, dzięki której można zidentyfikować gatunki⁸⁸⁰. Pojęcie postaci w fizyce oraz chemii się nie pojawia, bowiem nie może zostać wyprowadzone z praw fizyki oraz chemii. Materia nieożywiona zawsze jest masą, która może istnieć w małych lub wielkich ilościach, które daje się policzyć⁸⁸¹. Mimo że w trakcie swego trwania ciągle oddziałuje z otoczeniem (jest z nim w pewnym sensie w równowadze), to i tak w większości przypadków jest możliwe do oddzielenia to, co do niej należy, a co nie należy (korzenie rośliny są jej częścią, a ziemia już nie). Pomimo że materia w organizmie jest ciągle wymieniana, to jego kształt oraz rozmiar pozostają zachowane. Zachowanie kształtu oraz definitywnego rozmiaru organizmu wymaga całkiem innego rodzaju praw niż te istniejące w fizyce. Prawa, które działają w organizmie, są takie same jak w innych organizmach tego samego gatunku, lecz dotyczą tylko jednego organizmu. Jest to przeciwieństwo praw fizyki oraz chemii, ponieważ one dotyczą całej materii, dlatego w każdym organizmie musi istnieć organ centralny, który kształtuje jego rozwój na podstawie planu budowy oraz zajmuje się jego stabilizowaniem lub jego regeneracją. „Ten organ – pisze Heitler – nie jest naturalnie czymś materialnym, czymś, co można zobaczyć. Zastępuje on w pewnym sensie oraz odzwierciedla [...] prawa fizyczne. Dlatego też nie jest niczym »mistycznym«, tak jak nie jest nim na przykład pole przyciągania ziemskiego, które naturalnie jest również niewidoczne. Zawiera on pewnego rodzaju inne prawa niż te fizyczne, na przykład takie, które prowadzą według nietypowego planu budowy do ontogenezy. Organ centralny musi się znajdować nawet w zapłodnionej komórce, ponieważ to właśnie tutaj ma swój początek ontogeneza. Substancją materialną, którą w pierwszej kolejności atakuje, jest rdzeń komórki. Później dochodzi do opanowania całego organizmu, możliwe, że przy udziale organów podporządkowanych»⁸⁸².

Heitler zauważa także, że zwierzęta oraz człowiek posiadają odczucia oraz uczucia, które (choć powiązane z mózgiem) jednak nie są identyczne z żadnym fizycznym procesem w tym organie⁸⁸³. Odczucia oraz uczucia są kategoriami ontologicznymi, które znajdują się całkowicie poza układem

⁸⁷⁸ Por. tamże, s. 195.

⁸⁷⁹ Por. tamże, s. 196–197.

⁸⁸⁰ Por. tamże, s. 191.

⁸⁸¹ Por. tamże, s. 192.

⁸⁸² Tamże, s. 192–193.

⁸⁸³ Por. tamże, s. 194.

pojęciowym fizyki. Ból nie jest impulsem elektrycznym oraz żadnym skutkiem chemicznym. Bólu nie da się wyprowadzić z fizyki i chemii. Chociaż uczucia są powiązane z fizycznymi procesami w układzie nerwowym, to jednak procesy te nie „produkują” uczuć, gdyż należą do innego poziomu ontologicznego.

Niemiecki fizyk podkreśla, że bardzo duża liczba procesów biologicznych działa w organizmie w określony sposób⁸⁸⁴. Jest to fakt występujący na wszystkich możliwych biologicznych poziomach (począwszy od procesów wewnątrz żywej komórki aż do świadomego działania człowieka), czego podaje wybrane przykłady. W mitochondriach mają miejsce procesy pozyskiwania energii. Poruszają się one wzdłuż i wszerz przez komórkę, do miejsc, w których znajduje się energia do wykonania określonych działań. Przy zastosowaniu czystych praw fizykalnych ruchy tych organelli byłyby przypadkowe i przypominałyby ruchy cząsteczek koloidowych Browna. „Nawet gdyby odkryto – pisze Heitler – jakiegoś rodzaju »mechanizm« fizyczno-chemiczny, który ustawiałby mitochondria w miejscach, gdzie akurat powstaje energia, to mechanizm ten znajdowałby się tam z jakiegoś zamierzonego powodu”⁸⁸⁵. Następny przykład, jaki podaje Heitler, to gojenie się ran⁸⁸⁶. Wiele różnych rodzajów obrażeń (na przykład złamania kości, przecięcia skóry, oparzenia) wymagają różnych procesów leczenia. Procesy są po to, by ponownie osiągnąć kompletność organizmu, a tymczasem prawa fizyki oraz chemii nie znają ukierunkowania celowego. Badacz wyprowadza stąd wniosek, że ukierunkowane celowością uwarunkowania nie mogą zostać wyprowadzone z fizyki.

Heitler dostrzega nieokreśloności w materii ożywionej⁸⁸⁷. Próbuje odpowiedzieć na pytanie, gdzie te nieokreśloności mogą się znajdować. Niczego, co dotyczyłoby nieokreśloności, nie zauważa w obszarze makroskopowym⁸⁸⁸. Przepływ krwi w krwiobiegu czy mechanizm nawadniania drzew z całą pewnością podlegają prawom fizyki klasycznej. W poszukiwaniu nieokreśloności przechodzi od większych do mniejszych jednostek organizmu⁸⁸⁹. Píše: „chemiczna forma strukturalna wielu z tych molekuł jest znana: w tym przypadku nie ma tu niczego, co byłoby nieokreślone. [...] Nie możemy sobie praktycznie wyobrazić, że chemiczna struktura makromolekuł w organizmie żywym może rzeczywiście być nieokreślona. Przeciwnie temu świadczą przecież wielkie osiągnięcia biochemii. Przyjmujemy więc,

⁸⁸⁴ Por. tamże, s. 193.

⁸⁸⁵ Tamże.

⁸⁸⁶ Por. tamże, s. 194.

⁸⁸⁷ Por. tamże, s. 201.

⁸⁸⁸ Por. tamże.

⁸⁸⁹ Por. tamże, s. 202.

że chemiczna forma strukturalna występuje również w organizmach żywych, lecz z drugiej strony nic nie świadczy przeciwko, a wiele za, że struktura elektronowa makromolekuł organicznych do pewnego stopnia pozostaje nieokreślona⁸⁹⁰. Oznacza to, że funkcja falowa elektronów w makromolekułach organicznych jest fizycznie nieokreślona, a nieokreśloność jest warunkiem życia⁸⁹¹. Makromolekuły z określoną funkcją falową są materią nieożywioną. Przy przyjęciu nieokreśloności struktury elektronowej możemy zrozumieć, że reakcje biochemiczne mogą być kierowane poprzez organ biologiczny⁸⁹². Materia ożywiona jest w innym stanie niż określona fizycznie materia nieożywiona, aż do pewnego stopnia jest nieokreślona i dlatego mogą na nią działać prawa biologiczne⁸⁹³.

Badacz przypomina, że Bohr określił stany – ożywiony oraz nieożywiony materii – jako komplementarne⁸⁹⁴. Komplementarnym (w poszerzonym znaczeniu) nazywa stan, w którym dwa stany obiektu wzajemnie się wykluczają. W tym sensie stan ożywiony oraz martwy materii organicznej są komplementarne. Heitler zwraca uwagę także na inne przeciwieństwa występujące w wielu przypadkach w biologii, które można określić mianem komplementarnych⁸⁹⁵. Organizm żywy można jego zdaniem rozpatrywać pod różnymi kątami. Dwa ekstremalnie sprzeczne kierunki to: biochemiczno-biofizyczny oraz morfologiczny, oba wykluczają się nawzajem. Heitler pisze: „Już podczas podziału w obrębie komórek kompletność zostaje utracona, a co dopiero w przypadku analizy biochemicznej. Odwrotnie, morfologia nie zawiera wiedzy dotyczącej wewnętrznych procesów mających miejsce w organizmie. Niestety w obecnych czasach w nawyk weszło używanie tylko metody analitycznej, a nawet jest ona określana mianem »jedynej uzasadnionej naukowo«, co często prowadzi do niepostrzegania formy. Tylko synteza obu metod może prowadzić do uznania organizmu żywego”⁸⁹⁶. Niemiecki fizyk konkluduje: „Dziś pomiędzy tymi rezultatami znajduje się jeszcze niepokonana luka. Synteza na poziomie podporządkowanym jeszcze nie nastąpiła i prawdopodobnie każe na siebie dość długo czekać”⁸⁹⁷.

* * *

⁸⁹⁰ Tamże.

⁸⁹¹ Por. tamże.

⁸⁹² Por. tamże, s. 203.

⁸⁹³ Por. tamże, s. 205.

⁸⁹⁴ Por. tamże, s. 206.

⁸⁹⁵ Por. tamże, s. 207.

⁸⁹⁶ Tamże.

⁸⁹⁷ Tamże.

Czy fenomen życia w zasadniczy sposób różni się od obiektów nieożywionych? To fundamentalne pytanie wraz z rozwojem mechaniki kwantowej stało się ważnym przedmiotem debat fizyków. W rozdziale zaprezentowano próbę odpowiedzi na postawione pytanie udzielone przez kilku protagonistów kwantowej rewolucji: Nielsa Bohra, Maxa Delbrücka, Pascuala Jordana, Waltera Elsassera i Waltera Heinricha Heitlera. Wszyscy popierali kopenhaską interpretację mechaniki kwantowej. Kluczowy element tej interpretacji stanowiła stworzona przez Bohra zasada komplementarności; badacze wierzyli, że może ona wznieść rewolucję w biologii. Ich wspólnym programem było skonfrontowanie zasady komplementarności z procesami biologicznymi jako drogi zbliżenia fizyki do biologii. Łączyło ich przekonanie, że mechanika kwantowa może być skutecznie wykorzystana przy rozwiązywaniu kluczowych problemów biologicznych.

Zasada komplementarności głosi, że pomiędzy różnymi aspektami rzeczywistości zachodzi relacja komplementarności, w której każdy element wyraża ważną cechę zjawiska. Istotność tych cech leży w fakcie, że są one niezbędne w dokładnym opisie. Odnośnie do rozróżnienia pomiędzy falami i cząstkami Bohr zaproponował, by właściwości fal i cząstek były rozpatrywane jako uzupełniające się aspekty rzeczywistości o tyle, że każda wyraża ważne cechy zjawiska światła. Swoją zasadę komplementarności zastosował do opisu przyrody także w innych dziedzinach nauki, w tym biologii. Twierdził, że opis fizyczno-chemiczny i opis biologiczny, chociaż są teoretycznie niemożliwe do pogodzenia, to – razem wzięte – pozwalają wychwycić podstawowe aspekty organizmów żywych.

Biologiczne idee opracowane przez duńskiego fizyka znajdowały zarówno zwolenników, jak i przeciwników, jednak nikt nie może kwestionować niezwyklej precyzji, z jaką analizowały one fenomen życia. Dzięki temu wzbudził u innych fizyków zainteresowanie tym niezwyklej zjawiskiem. Największy wpływ miał na Maxa Delbrücka, który w dużej mierze dzięki niemu przeobraził się z fizyka teoretyka w biologa eksperymentalistę. Jest to wyjątkowy przypadek ogromnego wpływu, jaki mentor może wywrzeć na ucznia pracującego dotąd w innej dziedzinie badawczej. Bohr uświadomił Delbrückowi istnienie epistemologicznych i metodologicznych wyzwań w badaniach biologicznych, a także wyczulił go na różnice pomiędzy układami ożywionymi i nieożywionymi. Delbrück podjął wyzwanie odnalezienia potrzeby zastosowania zasady komplementarności w biologii, które postawił przed nim duński fizyk. Mimo ostatecznej porażki w próbach poszukiwania paradoksów w genetyce i fizjologii zmysłów, wciąż postrzegał zasadę komplementarności jako „niedokończoną sprawę”. Do końca swojego życia spodziewał się, że w końcu uda mu się odnaleźć „paradoksy” biologii.

Bohr był ważnym autorytetem także dla innego czołowego fizyka tamtych czasów, Pascuala Jordana. Niemiecki fizyk próbował rozszerzyć rewolucję kwantowoteoretyczną na obszar biologii. U boku Bohra badał stosowanie w biologii zasady komplementarności. Doszukiwał się silnych połączeń pomiędzy poziomami atomowym i makroskopowym, twierdząc, że u podstaw procesów życiowych leżą nieprzyczynowe, mikrofizyczne procesy, które koordynują reakcje makrofizyczne organizmu. Zgodnie ze stanowiskiem Jordana, organizmy są układami mikrofizycznymi. Podkreślał on, że kwantowomechaniczne zachowania atomów wystarczą do wyjaśnienia procesów życiowych, dążąc do wykazania indeterministycznej, nieprzyczynowej jakości zjawisk organicznych.

Biologicznymi implikacjami zasady komplementarności żywo interesował się też Walter Elsasser. Ten urodzony w Niemczech amerykański fizyk powoływał się na poglądy Bohra, aby wykazać niewystarczalność analiz fizyczno-chemicznych do zrozumienia procesów zachodzących w organizmie żywym. Podobnie jak duński fizyk, Elsasser twierdził, że adekwatny opis biosystemów może zostać osiągnięty wyłącznie ze stratą szczegółowych i kompletnych analiz fizyczno-chemicznych. Wyrazem antyredukcjonistycznego programu w biologii jest wprowadzona przez Elsassera koncepcja „prawa biotonicznego”. To specyficzne biologiczne prawo „rządzi” zwiększającą się ilością informacji w rozwijającym się organizmie. „Prawo biotoniczne”, chociaż pozostaje w zgodności z prawami fizyki, jest niemożliwe do wyprowadzenia z tychże praw.

Walter Heitler, wyraźnie zainspirowany biologicznymi spekulacjami Bohra, przedstawia własne stanowisko, zgodnie z którym organizm żywy kieruje się swoimi własnymi prawami, przy czym prawa fizyczno-chemiczne są pozbawione w pewnym sensie mocy i zastępowane czymś ogólniejszym. Badacz stoi na stanowisku, że w organizmie żywym pojawiają się nowe właściwości, które nie mogą być wytłumaczone za pomocą metod fizyczno-chemicznych. Wychodzi on bowiem z założenia, że materia organizmu żywego jest z punktu widzenia fizycznego w pewnym stanie nieokreślona. Badacz koncentruje się na parze komplementarnej, która odnosi się do metodyki naukowej: Organizm żywy można badać dwoma wzajemnie wykluczającymi się sposobami: biochemiczno-biofizycznym oraz morfologicznym. Obie metody, chociaż wykluczają się wzajemnie, pozostają względem siebie w relacji komplementarnej, dostarczając pełnego opisu badanego zjawiska.

Poziom zainteresowania się tematami ukierunkowanymi na fenomen życia był różny u każdego z omawianych fizyków. Heitler w swych pracach zajmował się głównie chemią i fizyką kwantową, a bardzo okazjonalnie zwracał się ku zagadnieniom biologicznym. Bohr znacznie bardziej zaanga-

żowany był w kwestie biologiczne, chociaż podejmował je głównie na marginesie swojego głównego nurtu badawczego, jakim były problemy implikowane przez mechanikę kwantową. Jordan i Elsasser wykazali się większym zaangażowaniem w biologię, chociaż nigdy nie przestali publikować artykułów z dziedziny fizyki i chemii. Delbrück był najbardziej zaangażowany w nauki biologiczne. Fizyk ten dosłownie przeniósł się na nowe pole badawcze, próbując rozwikłać jego odwieczne zagadki. Wpływ przywoływanych tu fizyków na biologię był nierówny. Nic dziwnego, że spektakularny sukces, zwieńczony Nagrodą Nobla, odniósł tylko Delbrück.

Rozdział III

„WIEDEŃSKA” INTERPRETACJA UKŁADÓW BIOTYCZNYCH

W poprzednim rozdziale obok skoncentrowania się na koncepcji życia Nielsa Bohra ukazano również, jak wyglądała kontynuacja jego poglądów przez grono fizyków związanych bezpośrednio czy pośrednio ze szkołą kopenhaską. Trudno ustalić granicę wyraźnego odejścia od tego typu myślenia o fenomenie życia, z tej racji że wielu autorów wraca w sposób bezpośredni lub pośredni do poglądów duńskiego fizyka. W latach czterdziestych XX wieku w debatę wokół istoty życia zaangażował się Erwin Schrödinger, współtwórca mechaniki falowej⁸⁹⁸. Niniejszy rozdział poświęcono temu austriackiemu fizykowi⁸⁹⁹. Powstaje pytanie: czy Schrödinger prezentuje

⁸⁹⁸ Krótką charakterystykę koncepcji życia austriackiego fizyka przedstawiłem w pracach: *Koncepcja życia w ujęciu reprezentatywnych przyrodników...*; *Kontrowersje wokół natury życia w pismach fizyków...*, s. 87–91; *Czym jest życie? – od mniemań do wiedzy*.

⁸⁹⁹ Erwin Schrödinger urodził się w Wiedniu 12 sierpnia 1887 roku. Był jedynym dzieckiem Rudolfa, właściciela wytwórni linoleum i Georginy, córki profesora chemii. W 1906 roku, na krótko po samobójczej śmierci Ludwiga Boltzmanna, austriacki fizyk rozpoczął studia z fizyki i matematyki w Uniwersytecie Wiedeńskim. Tam dostał się pod wpływ Friedricha Hasenöhrla, następcy Boltzmanna i naukowca wspierającego go w konflikcie z Ernstem Machem. Hasenöhrl stał na stanowisku, że fizyka musi być rozpatrywana w kontekście filozoficznym. W tamtym okresie Schrödinger wykazywał nie tylko głębokie zainteresowanie fizyką i matematyką, ale też żywo interesował się filozofią (Schrödinger w czasach studenckich wczytywał się w pisma europejskich myślicieli, takich jak Baruch Spinoza czy Ernst Mach. W kręgu jego zainteresowania znalazły się także filozoficzne kwestie podejmowane przez naukowców takich, jak Gustav Theodor Fechner czy Richard Semon, interesował się również indyjskimi filozofami mistycznymi). Ze swej edukacji w Wiedniu wyniósł przywiązanie do statystycznego podejścia Boltzmanna (zachowanie pojedynczych cząsteczek jest nieprzewidywalne; przewidywalne są jedynie zachowania dużych liczb), a także gotowość do podejmowania problemów filozoficznych generowanych przez teorie fizyczne. Po odbyciu krótkiej służby wojskowej, podczas I wojny światowej zamieszkiwał w Jenie, Stuttgarcie i Wrocławiu. W 1921 roku przeprowadził się do Zurychu, gdzie objął stanowisko profesora fizyki teoretycznej, które zajmował niegdyś sam Albert Einstein. Międzynarodowe uznanie zyskał dzięki swym pracom nad matematycznym sformułowaniem mechaniki falowej, wykorzystującej równanie nazwane wkrótce na jego cześć równaniem Schrödingera. Swoje pomysły zaprezentował w czterech klasycznych tekstach opublikowanych w „Annalen der Physik”.

nową orientację w podejściu do fenomenu życia, czy też jest do pewnego stopnia kontynuatorem? Już na wstępie należy zaznaczyć, że chociaż wyrażnie się nie odwoływał do poglądów Bohra, jednak kwestia, na ile fizyka może wyjaśnić fenomen życia, jest przez niego podejmowana.

Podczas lektury poprzedniego, jak i tego rozdziału może się wydawać, że praca jest poświęcona Bohrowi oraz Schrödingerowi, gdyż skupiono się na poglądach tych autorów. Należy jednak zaznaczyć, że dla autora niniejszej rozprawy zarówno Bohr, jak i Schrödinger są to tylko tak zwane wiodące postacie rozwijające dany kierunek. Podobnie jak Bohr stworzył szkołę kopenhaską i dochował się swoich kontynuatorów, Schrödinger również stworzył własną szkołę i wykształcił następców. Innymi słowy, można stwierdzić, że wokół Bohra czy Schrödingera rozwijała się koncepcja, w której uczestniczyło wielu fizyków różnych orientacji. W związku z powyższym rozdział zatytułowano *Wiedeńska interpretacja układów*

W 1927 roku w dowód uznania za osiągnięcia w dziedzinie mechaniki kwantowej objął katedrę fizyki teoretycznej na Uniwersytecie Fryderyka Wilhelma w Berlinie, wcześniej zajmowaną przez Maxa Plancka. W 1933 roku wspólnie z Paulem A.M. Dirakiem otrzymał Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki za „odkrycie nowych, produktywnych form teorii atomowej” (Schrödinger zdołał stworzyć matematyczną formułę mechaniki falowej, która dała podstawy do dalszego rozwoju teorii mechaniki kwantowej). W proteście przeciwko nazistowskim prześladowaniom żydowskich kolegów w tym samym roku porzucił profesorskie stanowisko na Uniwersytecie Berlińskim i z pomocą Fredericka A. Lindemanna wyjechał z Niemiec do Oxfordu, gdzie w latach 1933–1935 wykładał na tamtejszym uniwersytecie. W 1936 roku powrócił do swojej ojczyzny, prowadził wykłady na Uniwersytecie w Grazu, wkrótce jednak został pozbawiony stanowiska. Opuścił ojczyznę w 1937 roku i po dwuletnim pobycie w Oxfordzie w 1939 roku przeniósł się do Irlandii. W 1940 roku przyjął zaproszenie premiera Irlandii Éamona de Valera, z wykształcenia matematyka, do kierowania nowo utworzonym w Dublinie Institute for Advanced Studies (DIAS) (Instytucie Studiów Zaawansowanych), który obejmował (poza Wydziałem Studiów Celtyckich) Szkołę Fizyki Matematycznej. DIAS został formalnie otwarty pod koniec 1940 roku, a Schrödinger został pierwszym dyrektorem Szkoły Fizyki Matematycznej. Pozostawał tam aż do swojej emerytury w 1956 roku, następnie powrócił do rodzinnego Wiednia, gdzie zmarł w 1961 roku. Por. E. Yoxen, *Where does Schrödinger's 'What is life?' belong in the history of molecular biology?*, „History of Science”, 17 (1979), s. 31–32. Por. J. Simmons, *Erwin Schrödinger (1887–1961) i mechanika falowa* [w:] J. Sions, *100 najwybitniejszych uczonych...*, s. 87. Por. S. Sarkar, *Erwin Schrödinger's excursus on genetics* [w:] O. Harman, M.R. Dietrich (eds), *Outsider scientists: routes to innovation in biology*, The University of Chicago Press, Chicago/London 2013, s. 93–95. Por. M. Perutz, *Erwin Schrödinger's 'What is life?'...*, s. 239–240. Por. B.-O. Küppers (ed.), *Leben = Physik + Chemie?...*, s. 255. Por. D. Fleming, *Émigré physicists...*, s. 172. Por. J. Pietzsch, *The Nobel Prize in physiology or medicine 1962 – perspectives*, http://www.nobel-prize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/1962/perspectives.html (16.07.2015). Por. K. Hussey, *Schrödinger's contributions to molecular biology*, „Dartmouth Undergraduate Journal of Science”, 2(4) (2002), s. 20. Por. K.R. Dronamraju, *Erwin Schrödinger and the origins of molecular biology*, „Genetics”, 153 (1999), s. 1071. Por. N. Mukunda, *Linking life to the quantum – Schrödinger's views revisited*, „Journal of Genetics”, 1(78) (1999), s. 71.

biotycznych, przez co autor pragnął zaznaczyć, że nie ogranicza się ściśle do Schrödingera, a chce na jego przykładzie ukazać rozwój badań nad życiem, a w szczególności rozwój biologii molekularnej, w drugiej połowie XX wieku.

Trzeci rozdział książki rozpoczyna się od zaprezentowania wczesnych spekulacji biologicznych austriackiego fizyka sięgających początku lat trzydziestych. Bardziej szczegółową uwagę tym kwestiom poświęcił dopiero dziesięć lat później. W 1943 roku w Trinity College (Kolegium Trójcy Świętej) w Dublinie wygłosił cykl wykładów zatytułowany *What is life?* poświęcony naturze życia oraz dziedziczenia. Rok później ukazała się praca pod tym samym tytułem, którą fizyk napisał na podstawie wykładów wygłoszonych w Dublinie. W rozdziale przeanalizowano zarówno aspekty formalne (epistemologiczno-metodologiczne), jak i merytoryczne (treściowe) koncepcji życia tego autora przedstawione we wzmiankowanej jego publikacji, podjęto też próbę odpowiedzi na pytanie o stan genetyki i biochemii w czasie, kiedy Schrödinger pisał swoją pracę. Na koniec przedstawiono wpływ spekulacji biologicznych austriackiego fizyka na późniejszy rozwój badań nad życiem.

3.1. PUNKT WYJŚCIA „WIEDEŃSKIEJ” INTERPRETACJI UKŁADÓW BIOTYCZNYCH

Zainteresowanie szerszymi aspektami fizyki kwantowej u austriackiego fizyka pojawiło się już w jego latach studenckich na Uniwersytecie w Wiedniu. To właśnie tam razem ze swoim najbliższym przyjacielem, biologiem Franzem Frimmelem, rozczytywał się we wpływowej książce Richarda Semona *Die Mneme als erhaltendes Prinzip* (Mnem jako zasada zachowania) (1904 rok)⁹⁰⁰. Jako dynamiczne połączenie teorii Haeckela, Lamarcka i Darwina praca ta wyjaśniała zagadkę materialnej organizacji i psychicznej egzystencji organizmów poprzez pojęcie mnemu (rodzaj zapisu pamięci komórkowej regulujący wszystkie zjawiska biologiczne). Wierzone, że mnem – stanowiąc sumę wszystkich organizmalnych engramów, to jest śladów wrodzonych i nabytych bodźców – kontroluje dziedziczność, zróżnicowanie, regenerację, rozwój, instynkt, zachowania, ruch i świadomość. Wcześniejsza praca Semona zapewne pomogła mu w pewnym stopniu usystematyzować dociekania na temat fenomenu życia. W 1932 roku Schrödinger po raz pierwszy skierował uwagę w stronę genetyki. W szczególności zaintereso-

⁹⁰⁰ Por. L.E. Kay, *Who wrote the book of life?* ..., s. 62.

wał się problemem rozmiaru i wewnętrznej spójności genu⁹⁰¹. W liście do Karla Przibrama napisanym w listopadzie 1932 roku poprosił swojego dawnego kolegę z Wiednia o szczegółowe informacje o genie⁹⁰². Swoje przemyslenia na ten temat zawarł w mowie wygłoszonej w 1933 roku w Pruskiej Akademii Nauk pod tytułem *Warum sind die Atome so klein?* (Dlaczego atomy są tak małe?)⁹⁰³. W 1935 roku pionier fizyki kwantowej wydał zbiór esejów pod tytułem *Science and the human temperament* (Nauka i ludzki temperament). W jednym z nich zajął się termodynamiką organizmów żywych; zasugerował, że ich tendencja do stawania się w miarę rozwoju coraz bardziej strukturalnie złożoną możliwa jest gdzie indziej przez ogólny wzrost entropii⁹⁰⁴. Pisał: „Zajmujemy się tutaj bardzo ogólnym prawem, znanym pod nazwą drugiej zasady termodynamiki, czyli inaczej zasadą lub prawem entropii. Jesteśmy przekonani, iż prawo to reguluje wszystkie procesy fizyczno-chemiczne, nawet jeśli prowadzą one do możliwie najbardziej złożonych i splątanych zjawisk, takich jak życie organiczne, geneza złożonego świata organizmów – począwszy od prymitywnych początków, powstanie i rozwój ludzkich kultur. [...] Nie chcemy stwierdzać niczego, co wykraczałoby poza to, że łączny bilans nieporządku w przyrodzie stale wzrasta. W poszczególnych częściach wszechświata albo w określonych układach materialnych może równie dobrze występować tendencja w kierunku wyższego stopnia porządku, możliwa za sprawą występowania odpowiedniej kompensacji w innych układach. Zgodnie z tym, co fizyk nazywa »porządkiem«, ciepło przechowywane w Słońcu stanowi wspaniały przepis na porządek w tym sensie, że ciepło nie zostało jeszcze rozpraszane równomiernie po całym wszechświecie, koncentrując się zamiast tego w jego niewielkiej części. Promieniowanie ciepła słonecznego, którego dociera do nas niewielka część, to proces kompensacyjny umożliwiający różnorodne formy życia i ruchu na Ziemi, często wykazujące właściwości rosnącego porządku. Niewielka część ogromnego rozproszenia wystarcza do podtrzymania życia na Ziemi, dostarczając odpowiedniej ilości »porządku«, ale oczywiście dopóty, dopóki marnotrawny rodzic – w swojej gorączkowej nieekonomiczności – wciąż będzie w stanie pozwolić sobie na luksus plane-

⁹⁰¹ Por. E. Yoxen, *Where does Schrödinger's...*, s. 32.

⁹⁰² W liście tym odniósł się krytycznie do artykułu Jordana, *Die Quantenmechanik und die Grundprobleme der Biologie und Psychologie* (Mechanika kwantowa i zasadnicze zagadnienia biologii i psychologii). Jordan wyraził pogląd, że zasada nieoznaczoności Heisenberga zapewniła model działania wolnej woli. Ideę tę Schrödinger krytykował w całej rozciągłości. Por. tamże, s. 32.

⁹⁰³ Opublikowany zapis wspomnianej mowy jest bardzo podobny do wstępu późniejszej pracy *What is life?*

⁹⁰⁴ Por. E. Yoxen, *Where does Schrödinger's...*, s. 32.

ty usłanej chmurami, wiatrem, rwącymi rzekami, spienionymi morzami, wspaniałą mozaiką flory i fauny oraz staraniami milionów ludzi”⁹⁰⁵.

Edward J. Yoxen podaje kilka możliwych inspiracji odnośnie do organizacji życia, którymi kierował się Schrödinger w latach trzydziestych. Sugeruje, że biologiczne spekulacje Schrödingera w tym czasie mogły być zainspirowane pragnieniem odzyskania twierdzeń termodynamiki zaanektowanych przez szkołę witalistyczną⁹⁰⁶. Być może wynikały one z dyskusji, którą prowadził z chemikiem Herbertem Freundlichem, na temat zastosowania termodynamiki statystycznej do biologicznych koloidów, opublikowanej przed 1924 rokiem, a z którą Schrödinger zapoznał się na początku lat trzydziestych⁹⁰⁷. Yoxen sugeruje też, że być może intencją Schrödingera było ponowne zdefiniowanie fizyki teoretycznej dla potrzeb badań biologicznych po komentarzach do tej kwestii dokonanych przez Bohra i Jordana⁹⁰⁸. Możliwe zainteresowanie austriackiego fizyka zostało sprowokowane dyskusjami między naukowcami, które odbywały się w Berlinie w późnych latach dwudziestych i wczesnych trzydziestych na temat uaktualnionej wersji *Handbuch der Physik* (Podręcznika fizyki). Kwestie te muszą pozostać otwarte z powodu braku dowodów, bezdyskusyjne jest natomiast to, że Schrödinger nad niektórymi ideami dotyczącymi fenomenu życia zastanawiał się na dziesięć lat przed publikacją *What is life?*⁹⁰⁹. Należy także pamiętać, że ojciec Schrödingera jako amator zajmował się botaniką, pisał artykuły na temat filogenezy i genetyki roślin⁹¹⁰, a matka była córką Alexandra Bauera, profesora chemii w Vienna Hochschule i dlatego wydaje się oczywiste, że został wprowadzony w arkana chemii i biologii przez swoją najbliższą rodzinę⁹¹¹.

Jaka była geneza *What is life?* Schrödingera? Na początku lat czterdziestych Paul P. Ewald, niemiecki krystalograf pracujący wówczas w Queen's University w Belfaście, zwrócił uwagę Schrödingera na publikację Timofiejewa-Riesowskiego, Zimmera i Delbrücka z 1935 roku *Über die Natur der Genmutation und der Genstruktur*⁹¹². Ewald, który studiował

⁹⁰⁵ E. Schrödinger, *Science and the human temperament*, trans. J. Murphy, George Allen & Unwin LTD, London 1935, s. 39–40.

⁹⁰⁶ Por. E. Yoxen, *Where does Schrödinger's...?*, s. 37.

⁹⁰⁷ Por. tamże, s. 37. Por. H. Freundlich, *Kolloidchemie und Biologie*, „Die Naturwissenschaften”, 22 (1924), s. 233–239.

⁹⁰⁸ Por. E. Yoxen, *Where does Schrödinger's...?*, s. 37.

⁹⁰⁹ Por. tamże, s. 32.

⁹¹⁰ Por. J. Simmons, *Erwin Schrödinger (1887–1961)...?*, s. 87.

⁹¹¹ Por. R. Olby, *Schrödinger's problem: what is life?*, „Journal of the History of Biology”, 1(4) (1971), s. 123.

⁹¹² Por. N. Mukunda, *Linking life to the quantum...*, s. 71. Por. E. Yoxen, *Where does Schrödinger's...?*, s. 33.

w Getyndze przed pierwszą wojną światową, wręczył Schrödingerowi wspomnianą pracę, jako że austriacki fizyk był zainteresowany tym tematem już od jakiegoś czasu⁹¹³. Publikacja ta urzekła go tak bardzo, że na krótki czas porzucił swoje badania fizyczne w Dublinie, aby zająć się kwestiami biologicznymi⁹¹⁴.

W tym czasie obowiązkiem DIAS było organizowanie dorocznych publicznych wykładów⁹¹⁵. Swoje przemyślenia Schrödinger postanowił poświęcić naturze życia i dziedziczenia. Cykl trzech wykładów, zatytułowany *What is life?*, wygłosił w lutym 1943 roku w amfiteatrze Wydziału Fizyki w Trinity College w Dublinie pod patronatem DIAS⁹¹⁶. Tytuł był prowokacyjny i przyciągnął sporą widownię⁹¹⁷. Tak wspomina po latach o tym wydarzeniu: „Książeczka ta zrodziła się z publicznych wykładów wygłoszonych przez fizyka teoretyka dla około czterystu wytrwałych, jak się okazało, słuchaczy, których z góry uprzedziłem, że temat jest trudny i że choć nie będę korzystał z wywodów matematycznych, niełatwo będzie te prelekcje nazwać popularnymi. Rzecz nie w tym, że przedmiot był tak prosty, iż mogłem się obejść bez wzorów, przeciwnie, był zbyt skomplikowany, aby w pełni dawał się ująć matematycznie. Złudzenie »popularności« sprawiał też mój zamiar jasnego wyłożenia fizykom i biologom jednej zasadniczej idei dotyczącej zarówno fizyki, jak i biologii. Istotnie bowiem, mimo iż temat zmusza do poruszania różnych kwestii, całe przedsięwzięcie ma na celu przekazanie jednej tylko idei, będącej przyczynkiem do rozważań nad ważnym i rozległym problemem”⁹¹⁸. Później wyjaśniał, że był zainspirowany potrzebą zachowania uniwersalności wiedzy⁹¹⁹. Uważał, że w wieku wielkiej specjalizacji raz na jakiś

⁹¹³ Tematem tym zainteresował się po wysłuchaniu wykładu przeprowadzonego w Berlinie w 1935 roku przez Maxa Delbrücka. Por. L. Moss, *What genes can't do*, s. 54.

⁹¹⁴ W. McCrea, É. de Valera, *Erwin Schrödinger and the Dublin Institute* [w:] C.W. Kilmister (ed.), *Schrödinger: centenary celebration of a polymath*, s. 133. Por. M. Perutz, *Erwin Schrödinger's 'What is life' ...*, s. 234. Por. E. Yoxen, *Where does Schrödinger's...*, s. 35. Por. A. Urbanek, *Biologia XX wieku...*, s. 307.

⁹¹⁵ Por. N. Mukunda, *Linking life to the quantum...*, s. 71.

⁹¹⁶ Por. W. McCrea, É. de Valera, *Erwin Schrödinger and the Dublin Institute*, s. 133. Por. M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger's ghost. Reflections on 'What is life?' and its surprising relevance to cancer biology* [w:] H.U. Gumbrecht, R.P. Harrison, M.R. Hendrickson, R.B. Laughlin, *What is life? The intellectual pertinence of Erwin Schrödinger*, trans. L.A. Villareal, Stanford University Press, Stanford 2011, s. 47. Por. K. Hussey, *Schrödinger's contributions...*, s. 20.

⁹¹⁷ W. Moore, *Schrödinger: life and thought*, Cambridge University Press, Cambridge 1993, s. 394.

⁹¹⁸ E. Schrödinger, *Czym jest życie? Fizyczne aspekty żywej komórki. Umysł i materia. Szkice autobiograficzne*, tłum. S. Amsterdamski, Prószyński i S-ka, Warszawa 1998, s. 15.

⁹¹⁹ Por. N. Mukunda, *Linking life to the quantum...*, s. 71.

czas ktoś, kto był profesjonalistą w jakiejś dziedzinie, powinien dążyć do budowania połączeń z innymi dziedzinami, na przykład fizyki z biologią, nawet kosztem oskarżenia o zbyt małą wiedzę w nie swojej dziedzinie.

Bazując na rozstrzygnięciach Timofiejewa-Riesowskiego, Zimmera i Delbrücka, analizował tempo mutacji spowodowanej działaniem promieni rentgenowskich na przykładzie muszki owocowej *Drosophila melanogaster*⁹²⁰. Wiedział, że absorpcja jednego kwantu promieniowania X może spowodować mutację w jednym miejscu w chromosomie⁹²¹. Zaczął rozważać konsekwencje tej hipotezy dla fizyczno-chemicznego mechanizmu dziedziczenia, a także to, w jaki sposób mechanizm ten musi być ograniczony przez prawa termodynamiki statystycznej, kinetyki chemicznej i mechaniki kwantowej. W swoich wykładach Schrödinger wprowadził pojęcie „kryształ aperiodyczny”, który miał stabilność strukturalną (stąd „kryształ”) oraz „bogactwo kombinatoryczne” (stąd „aperiodyczny”) i miał zawierać plan niezbędny do rozwoju i funkcjonowania form żywych⁹²². W efekcie zmolekularyzował klasyczny gen. Dodatkowo zakładał istnienie „zakodowanego scenariusza”, który pośredniczy w wydobyciu z materiału genetycznego instrukcji kierujących rozwojem organizmu i jego funkcjami.

W opinii Yoxena idee struktury genu Schrödingera były prawdopodobnie jedynie przypadkowym produktem ubocznym zajmującego go problemu – porządku, rozważanego w tym przypadku jako problem związany z życiem⁹²³. Yoxen twierdzi, że austriacki fizyk postrzegał w organizmie żywym typ porządku, który uważał za ważny i interesujący ze względu na światło, jakie mógł rzucić na ogólny problem natury praw fizycznych⁹²⁴. Źródła inspiracji wskazują na to, że Schrödingera interesował bardziej problem zgodności z prawem w systemach biologicznych niż struktura genu⁹²⁵. Yoxen nie widzi powodów, by zakładać, że austriacki fizyk postrzegał swoją uwagę dotyczącą „zakodowanego scenariusza” jako coś więcej niż drugorzędną część swojej naukowej argumentacji.

Walter Moore szczegółowo opisuje wykłady prowadzone przez Schrödingera: „Pierwszy wykład odbył się w piątek wieczorem, 5 lutego 1943 roku; pozostałe dwa – w dwa kolejne piątki. Uczestniczył w nich De Valera razem z innymi notablami Kościoła i państwa, ministrami, dyplomatami,

⁹²⁰ Por. W. Moore, *Schrödinger: life and thought*, s. 394.

⁹²¹ Nazwa „chromosomy” oznacza w dosłownym przełożeniu „zabarwione ciała”, gdyż są one stosunkowo duże i łatwe do zabarwienia. Por. A. Lwoff, *Biological order*, s. 15.

⁹²² Por. M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger's ghost...*, s. 47.

⁹²³ Por. E. Yoxen, *Where does Schrödinger's...*, s. 37.

⁹²⁴ Por. tamże, s. 36–37.

⁹²⁵ Por. tamże, s. 36.

artystami i znanymi osobistościami. Liczba ludzi starających się dostać do sali wykładowej Trinity była tak wielka, że trzeba było powtórzyć wykłady w poniedziałki dla tych, którzy nie zmieścili się za pierwszym razem. Łączną widownię oszacowano na ponad 400 osób, przy czym liczba ta nie zmniejszyła się między pierwszym a ostatnim wykładem. Nawet magazyn »Time« poświęcił rubrykę wydarzeniom z Dublina i opublikował artykuł na temat wykładów Schrödingera w numerze z 5 kwietnia. [...] Na początku marca doznał on paskudnego ataku grypy i musiał zмагаć się, aby dać ostatnie dwa wykłady. Kiedy dobiegły końca, był wyczerpany i tęsknił za wakacjami, jednak zamiast tego zaczął pisać swoją »książeczkę« z zamiarem jej publikacji⁹²⁶. Moore szczegółowo omówił także kwestie związane z wydaniem samej książki: „Schrödinger uzgodnił, że publikacją *What is life?*, razem z dodanym kontrowersyjnym rozdziałem, zajmie się Cahill & Co, szanowany dubliński wydawca. Negocjacjami Schrödingera z wydawcą zajmował się dyrektor zarządzający, John J. O’Leary. Kompozycja, korekta i układ stron były nadzorowane przez kierownika publicznego, Basila Clancy’ego, który wspominał, że autor zawsze przybywał do biura firmy z rozczochranymi włosami i na rowerze. Książka była w końcowej fazie przygotowania, gdy ktoś zwrócił uwagę O’Leary’ego na kontrowersyjne rozdziały. Być może był to Paddy Browne – który pomagał autorowi z angielskim, a kiedy doszedł do epilogu, był wściekły, zwłaszcza że jego pomoc nie została uznana w przedmowie. Tak więc Schrödinger chciał opublikować obraźliwe uwagi na temat Kościoła, lecz jednocześnie dziękował prałatowi w Maynooth, centrum szkoleniowemu dla irlandzkich księży, za współpracę. Przypomina się tu list otwarty, jaki Schrödinger (uchodzący za przeciwnika Hitlera) napisał w Grazu w 1938 roku, kiedy władzę nad Austrią przejęli Niemcy, w którym chwalił faszystów za Anschluss – ten sam list, którego nie chciał się wyrzec nawet wtedy, gdy wiedział, że utrudni to sytuację jego przyjaciółom spośród naukowców-uchodźców. »To, co napisałem, napisałem«, miał powiedzieć Schrödinger w Oksfordzie, używając zresztą podobnych słów w Dublinie. Konsekwencją było to, że O’Leary odmówił publikacji książki. Erwin Schrödinger i Paddy Browne pozostali przyjaciółmi, ale nigdy nie wrócili do ciepłych pełnych zaufania relacji, jakie cechowały ich we wcześniejszych latach, gdy pracowali razem w Instytucie. W październiku Schrödinger wysłał kopię rękopisu pracy do znajomego w Londynie, chemika Fryderyka Donnana⁹²⁷, który polecił mu Cambridge University

⁹²⁶ W. Moore, *Schrödinger: life and thought*, s. 395.

⁹²⁷ Do jednej z prac Dannona odwołał się Schrödinger wyraźnie w swoim artykule z 1936 roku: *Indeterminism and free-will* (Indeterminizm i wolna wola). W pracy tej austriacki fizyk przekonywał, że w życiu nie występuje nic takiego jak funkcja ϕ . Twierdził bowiem,

Press jako odpowiedniego wydawcę. Książka finalnie trafiła do druku pod koniec 1944 roku [...] *What is life?* zostało przetłumaczone na siedem języków, a nakład książki oszacowano na około sto tysięcy egzemplarzy. Autor nie dorobił się specjalnie na jej sprzedaży – dla przykładu na pięćdziesięciotyśięcznym nakładzie japońskiej edycji zarobił 17,12 funta”⁹²⁸.

W 1943 roku w „The Irish Times” ukazały się trzy streszczenia wykładów Schrödingera. W pierwszym jego autor przypomniał między innymi, że austriacki fizyk w inauguracyjnym z serii swoich trzech wykładów na temat fizycznego aspektu życia komórki powiedział, że najistotniejszą częścią żywej komórki jest coś, co nazwał „kryształem aperiodycznym”⁹²⁹. Fizyka dotychczas zajmowała się wyłącznie „periodycznymi kryształami” (czyli kryształami okresowymi), które są nad wyraz proste w porównaniu z kryształami aperiodycznymi, przypominającymi wyszukane gobeliny. Autor streszczenia za austriackim fizykiem zwrócił uwagę na dający do myślenia fakt, iż liczba atomów, która wystarcza do funkcjonowania mikroskopijnych organizmów, może w niektórych przypadkach sięgać rzędu tysięcy jednostek, w innych setek, a w jeszcze innych czterech, sześciu lub ośmiu. „Istnieją pewne bakterie i inne drobne organizmy – pisał autor streszczenia – które posiadają względnie niewielką liczbę atomów, lecz mimo to wykazują tendencję do realizowania szybkich i chaotycznych ruchów, jakimi podążają na przykład drobne cząsteczki mgły podczas mieszania się z powietrzem lub cząsteczki stałe podczas dyfuzji przez ciecz”⁹³⁰. W zrozumieniu powyższego faktu ważną rolę odegrała teoria kwantów.

W streszczeniu kolejnego wykładu Schrödingera autor stwierdził za austriackim fizykiem, że największym cudem natury jest fakt, iż cały skład biologiczny pojedynczej komórki może być przekazywany z pokolenia na

że: „Materialne jednostki, które określają procesy życiowe, zdają się być na tyle duże, by możliwie – a nawet prawdopodobnie – ochraniać zasadniczy przebieg tych procesów przed jakimkolwiek wyczuwalnym, bezpośrednim i natychmiastowym przejawem nieoznaczoności Heisenberga”. E. Schrödinger, *Indeterminism and free-will*, „Nature”, 138 (1936), s. 13. Schrödinger wyjaśniał, że do podjęcia powyższego tematu wyraźnie zainspirowała go cytowana już wcześniej książka Donnana „Integral analysis and the phenomena of life”. Pisał: „Profesor Donnan nie odnosi się do kwestii wolnej woli *per se*. Jego idea jest taka, że organizm jest »historycznym« układem, którego reakcje w danej chwili nie są ustalane jedynie przez jego otoczenie i chwilowy stan, ale także przez to, czego ów organizm doświadczył w określonym okresie poprzedzającym. Jest to bardzo atrakcyjny pogląd i jego matematyczne potraktowanie zaproponowane przez profesora Donnana okazuje się silnie sugestywne, nawet jeśli ktoś nie byłby szczególnie skłonny przystać na pogląd [...], że niektóre z historycznych śladów nie są nakreślone w chwilowym stanie inaczej niż poprzez zmianę jego reaktywności”. Tamże, s. 14.

⁹²⁸ W. Moore, *Schrödinger: life and thought*, s. 402–403.

⁹²⁹ [Anon.], *The living cell and the atom*, „The Irish Times”, (6 February 1943), s. 4.

⁹³⁰ Tamże.

pokolenie przez setki lat⁹³¹. Schrödinger wyjaśnił, że wyłącznie „odchylenie od normalności” umożliwia jakąkolwiek kontynuację życia. Skonstatował, że Darwin mylił się w punkcie dotyczącym małego, przypadkowego „odchylenia od normalności”, na którym w rzeczywistości bazuje teoria doboru naturalnego. Ze streszczenia dowiadujemy się, że Hugo de Vries, holenderski botanik, wykazał, że u potomstwa występują małe, acz zdecydowane „przeskoki-przerwy dziedziczności” zwane „mutacjami”⁹³². To odkrycie przywołuje na myśl teorię kwantową. Mutacja poszczególnego osobnika wynikałaby zatem z kwantowego przeskoku cząsteczki genu.

Wreszcie w streszczeniu ostatniego z serii wykładów Schrödingera podkreśla się, że austriacki fizyk wydał „ostrzeżenie przed obchodzeniem się z promieniami rentgenowskimi”⁹³³. Fizyk powiedział: „Strzeżmy się promieni rentgenowskich szczególnie przy obchodzeniu się z nimi regularnie. Są szkodliwe, ponieważ powodują szkodliwe mutacje. Zwykle środki ostrożności przed skutkami promieniowania są wystarczające, aby zapobiec osobistej krzywdzie każdej osoby z nich korzystającej. Niemniej jestem pewien, że tacy ludzie przekazują szkodliwe mutacje swemu potomstwu i w szerszej perspektywie może to być bardzo szkodliwe dla całej rasy [ludzkiej]”⁹³⁴. Ze streszczenia dowiadujemy się, że odkryto, iż możliwe jest wywoływanie mutacji w genie, podobne do tych, które występują w naturze. Te szkodliwe „defekty” same w sobie nie niosą nic złego, ale byłyby szkodliwe, gdyby proporcjonalnie przekroczyły liczebnością geny prawidłowe. Nieszkodliwe mutacje są mimo wszystko przekazywane potomstwu i kilka pokoleń później mogą stać się szkodliwe. Autor streszczenia przypomina, że omawiając po wykładzie to zagadnienie z reporterem „The Irish Times”, Schrödinger powiedział, że nie chce straszyć ludzi fotografią rentgenowską. Zacytujmy tę wypowiedź austriackiego fizyka: „Nie istnieje jakiekolwiek niebezpieczeństwo spowodowane promieniowaniem rentgenowskim dla osób, które są fotografowane, gdyż są one naświetlane promieniowaniem tylko przez kilka sekund. Nie chcę też alarmować radiologów, gdyż ani oni sami, ani ich dzieci, nie są w niebezpieczeństwie. Patrząc na to wszystko w szerszej perspektywie wielkie niebezpieczeństwo wynika natomiast z faktu, że setki młodych dziewcząt, rekrutowanych spośród najzdrowszych w kraju, obsługuje aparaty rentgenowskie, których promieniowanie bez wątpienia spowoduje defekty w przyszłych pokoleniach rasy [ludzkiej]. Pragnę podkreślić raz jeszcze, że

⁹³¹ Por. [Anon.], *What is life: quantum theory of biology*, „The Irish Times”, (13 February 1943), s. 3.

⁹³² Por. tamże.

⁹³³ Por. [Anon.], *X-rays harmful to the race*, „The Irish Times”, (20 February 1943), s. 1.

⁹³⁴ Tamże.

nie ma żadnego niebezpieczeństwa dla poszczególnych osób. Gdyby ludzie chcieli zapytać, skąd wiemy, co się wydarzy za kilka pokoleń, odpowiedź brzmi, że nasze eksperymenty wykonywane są na gatunku muszki owocowej *Drosophila*, której szybkie właściwości reprodukcyjne umożliwiają naukowcom obserwowanie efektów zachodzących u niej mutacji na przestrzeni setek pokoleń”⁹³⁵.

Pracę nad *What is life?* Schrödinger zaczął najwcześniej w 1942 roku⁹³⁶. Materiał wykorzystany do zapisu wykładów przedstawiony jest w zachowanych notatkach austriackiego fizyka, zatytułowanych *Biologica I*⁹³⁷ (lista książek zamieszczona jest pod koniec notatek), które obejmują trzy podręczniki o tematyce genetycznej autorstwa Johna B.S. Haldane’a⁹³⁸, Edmunda Ware Sinnotta i Lesliego Clarence’a Dunna⁹³⁹ oraz Cyrila D. Darlingtona⁹⁴⁰, zbiorczy artykuł o strukturze genu pióra Timofiejewa-Riesowskiego, Zimmera i Delbrücka⁹⁴¹ oraz wykłady Charlesa Scotta Sherringtona⁹⁴². Możemy za Yoxenem zapytać, czy idea „kodu dziedzicznego” Schrödingera ma jakieś oczywiste źródła w materiałach, z których korzystał. Zarówno Sinnott, Dunn, jak i Darlington pisali o konieczności zrozumienia struktury genu na poziomie molekularnym i pozytywnym wpływie, jaki fizyka może mieć na ten obszar badań, zwłaszcza w związku z mutagenezą promieniowaniem X⁹⁴³. Haldane idzie dalej, starając się opisać mechanizm replikacji i zdemontować w związku z tym znaczenie fizyki. „Okazuje się zatem – pisze Yoxen – że wprowadzenie do biologii nowoczesnych idei fizykalnych pozwala nam rzucić nieco światła na biologiczne zjawisko dziedziczności. Istnieje pewien sens w tym, że dwie cząsteczki mogą być potomkiniami podobnej cząsteczki. Istnieje również sens, w którym dwie cząsteczki mogą obie być rodzicami dwóch podobnych cząsteczek. W każdym przypadku mechanika kwantowa sugeruje kompromis pomiędzy biologiczną ideą zrównoważonej dziedziczności a chemiczną ideą braku dziedziczności. Kompro-

⁹³⁵ Tamże.

⁹³⁶ Por. J.A. Witkowski, *Schrödinger’s ‘What is life?’: entropy, order and hereditary code-scripts*, „Trends in Biochemical Sciences”, 6(11) (1986), s. 266.

⁹³⁷ Por. E. Schrödinger, *Biologica I [notebook]* [w:] *Archive for history of quantum physics, Schrödinger scientific papers, post-1928, 1942, Microfilm no. 42, Section 10*.

⁹³⁸ J.B.S. Haldane, *New paths in genetics*, Allen & Unwin, London 1941.

⁹³⁹ E.W. Sinnott, L.C. Dunn, *Principles of genetics*, McGraw Hill, London 1939.

⁹⁴⁰ C.D. Darlington, *The evolution of genetic systems*, Cambridge University Press, Cambridge 1939.

⁹⁴¹ M. Delbrück, N. Timofiejew-Riesowski, K. Zimmer, *O prirode gennyh mutacji...*, s. 105–150.

⁹⁴² Ch. Sherrington, *Man on his nature: Gifford lectures, 1937–8*, Cambridge University Press, Cambridge 1940.

⁹⁴³ Por. E. Yoxen, *Where does Schrödinger’s...*, s. 33.

mis ten opiera się na tym, że para genów w bliskiej odległości – zaraz po reprodukcji genów lub gdy geny z dwojga różnych rodziców się zjednoczą – tworzy poniekąd zdegenerowany układ”⁹⁴⁴. W ocenie Yoxena książkę Sherringtona Schrödinger cenił najbardziej i możliwe, że to właśnie ona stanowiła model stylistyczny dla *What is life?*, jako że zapewnia dużo dokładniejsze podejście do problemu kodowania struktury białek⁹⁴⁵.

Yoxen zauważa, że podejście Schrödingera do problemu porządku zostało przedstawione w specyficznym okresie rozwoju nauk biologicznych⁹⁴⁶. To, co biolodzy odkryli od lat trzydziestych XX wieku, to duża liczba zawiłych, zorganizowanych systemów w komórce na poziomie molekularnym i supramolekularnym nieznanym Schrödingerowi, gdy rozpoczynał swoje rozważania. Materia ożywiona nie przejawia zorganizowanej kompleksowości ponad tę kojarzoną z wcześniejszymi pojęciami protoplazmy. Pracę Schrödingera można uznać za należącą do tej samej grupy co inne omawiające uporządkowanie w tym okresie, takie jak te Josepha Needhama (który działał w czasie pojawienia się publikacji *What is life?*) czy Cyrila N. Hinshelwooda⁹⁴⁷. W późnych latach trzydziestych wymienieni naukowcy, bliżsi głównemu nurtowi badań biologicznych (i dużo lepiej poinformowani co do pracy, która położyła fundamenty pod biologię molekularną) również byli zainteresowani problemem uporządkowania⁹⁴⁸.

W eseju pióra Needhama, *Integrative levels; a revaluation of the idea of progress* (Poziomy integracji; przeszacowanie idei rozwoju), przedstawiona jest analiza różnic między życiem i nieżyciem, a uwaga autora koncentruje się na kategorii porządku. „Zatem między ożywioną i nieożywioną materią – stwierdzał Needham – krystaliczny wymiar reprezentuje najwyższy stopień organizacji, do jakiego zdolna jest ta druga forma. Dość znacząco zbliża się ona również do krainy życia pod postacią zjawisk przedstawianych przez tak zwane »ciekłe kryształy«, stany materii pośrednie między przypadkową orientacją cieczy a niemal całkowitą sztywnością prawdziwego kryształu. Te »parakryształy«, nazwijmy je, ze swoją wewnętrzną strukturą i kierunkowymi właściwościami, są ściśle powiązane z układami ożywionymi. Bioukłady prawie na pewno zawierają w rzeczywistości wiele składników o charakterze parakrystalicznym. Wirusy, drobne ultramikroskopijne cząsteczki, z dużym prawdopodobieństwem reprezentują tę lub inną formę pośrednią

⁹⁴⁴ J.B.S. Haldane, *Quantum mechanics as a basis for philosophy*, „Philosophy of Science”, 1(1) (1934), s. 84–85.

⁹⁴⁵ Por. E. Yoxen, *Where does Schrödinger's...?*, s. 33.

⁹⁴⁶ Por. tamże, s. 37.

⁹⁴⁷ Tamże, s. 38.

⁹⁴⁸ Por. tamże, s. 39.

między życiem i nieżyciem. Niemniej im lepiej poznamy te formy istnienia, tym lepiej będą one mogły posłużyć do wydobywania zasadniczo nowych elementów wyższego porządku, które są charakterystyczne dla formy organizacji, jaką nazywamy życiem”⁹⁴⁹. W eseju *Evolution and thermodynamics* (Ewolucja i termodynamika), zamieszczonym w tym samym tomie, Needham proponuje terminologię wymyśloną przez Willarda Gibbsa, skupioną wokół definicji entropii jako „wymieszania” (ang. *mixed-up-ness*). Píše: „Wróćmy teraz do podstawowej definicji Willarda Gibbsa – entropia to wymieszanie, której najbliższym odpowiednikiem jest bezładność. Przeciwnostwem wymieszania jest rozdzielanie (ang. *separatedness*), czyli fakt bycia rozdzielonym, nie zaś organizacja. Patrząc od tej strony można zauważyć, że na wczesnych etapach rozwoju naszego świata wszystkie cząstki elementarne fizyki były w rzeczywistości oddzielone od siebie, a energia swobodna znajdowała się wówczas w swoim zenicie. Niemniej, w miarę upływu czasu temperatura spadała i wzrastała bezładność – czas upływał właśnie dlatego, że wzrastała bezładność. Podstawowe niedociągnięcie na jakie rzucamy tu światło, dotyczy tego, że bezładność niekoniecznie oznacza chaotyczność i może, wręcz przeciwnie, oznaczać bezładność postępującą według określonego wzoru. W istocie trudno jest zrozumieć, jak mogłyby kiedykolwiek powstać najbardziej złożone wzorce, gdyby nie wiele różnych elementów, z których mogły zostać utworzone. Świat życia maluje pełną paletą barw, a nie monochromatycznie. Jeśli to zaakceptujemy, musimy dokonać wyraźnego rozróżnienia między termodynamicznym porządkiem (rozdzieleniem) a biologiczną organizacją (wymieszanie postępujące według wzoru/wzorca)”⁹⁵⁰. Needham podejmuje wprost temat – druga zasada termodynamiki a życie – przekonując, że nie ma między nimi konfliktu: „Jednym z powodów, dla których pozorna sprzeczność pomiędzy drugą zasadą i procesem ewolucji nie zrodziła większego zamieszania, jest fakt, że uwaga niewielu z tych naukowców, którzy próbują ujednolicić światopogląd nauki, została w dużej mierze skierowana na kwestię istnienia dysentropicznej fazy w samej materii ożywionej. Z dostępnego wówczas opisu drugiej zasady termodynamiki musiało dość jasno wynikać, że to uogólnienie posiada statystyczną podstawę, a co za tym idzie – że gdybyśmy mieli do czynienia z naczyniami tak małymi, że poszczególne »złożoności« mogły być rozdzielone, prawo statystyczne obowiązujące dla szeregu takich naczyń nie we wszystkich przypadkach by się sprawdziło. Dysentropiczne, »nietypowe« fluktu-

⁹⁴⁹ J. Needham, *Integrative levels; a revaluation of the idea of progress* [w:] J. Needham, *Time: the refreshing river (essays and addresses, 1932–1942)*, George Allen & Unwin Ltd, London 1943, s. 235.

⁹⁵⁰ Tamże, s. 226–227.

acje mogłyby wówczas – z pomocą amplifikacji – opisywać takie zjawiska wysokiego poziomu organizacyjnego jako »wolną wolę«. Z pewnością uchwycił on całość problemu, niemniej istnieje jeszcze jedna przeszkoda do pokonania dla poglądu, że organizmy żywe unikają drugiej zasady termodynamiki. Dotyczy ona tego, że nie ma żadnych przekonujących dowodów na naruszanie drugiej zasady ze strony organizmów żywych, a wręcz przeciwnie – istnieje wiele dowodów na to, że zasada ta jest przez nie przestrzegana. Ich życie jest zawsze związane – i zależne – z procesami przemiany materii, w których zawsze dochodzi do utraty energii swobodnej, podziału związków organicznych na CO₂ i wodę oraz rozproszenie ich energii pod postacią nieodzyskiwanego ciepła. Procesy metaboliczne są w dodatku zawsze bardzo nieefektywne⁹⁵¹. Dyskusja ta przypomina rozstrzygnięcia zawarte w *What is life?*, jednak formułowanie problemu uporządkowania Needhama, czerpiące z koncepcyjnych i teoretycznych zasobów embriologii i biochemii, wyraźnie kontrastuje z ideami Schrödingera⁹⁵².

Cyril Hinshelwood jest najbardziej znany ze swej pracy nad rozgałęzionymi reakcjami łańcuchowymi w procesach chemicznych (za którą zresztą przyznano mu w 1956 roku Nagrodę Nobla)⁹⁵³. Wyznaczony do objęcia katedry chemii w Oxfordzie w 1937 roku, zmienił zainteresowania w kierunku badania komórek bakteryjnych. Rezultaty jego prób przeniesienia koncepcji chemii fizycznej do analizy świata organicznego były publikowane w serii technicznych artykułów oraz kilku monografiach i podręcznikach, z których jeden był przez dłuższy czas standardem w dziedzinie mikrobiologii⁹⁵⁴. W 1946 roku Hinshelwood opublikował *The chemical kinetics of the bacterial cell* (Kinetyka chemiczna komórki bakteryjnej)⁹⁵⁵, która była recenzją prac dużej liczby badaczy nad strukturą, stosunkiem wzrostu i reprodukcji oraz zróżnicowaniem bakterii. Projekt Hinshelwooda jest podobny do pomysłu Schrödingera, chociaż oparty na dużo bliższym przyjrzeniu się dostępnej empirycznej pracy badaczy w mikrobiologii⁹⁵⁶.

⁹⁵¹ Tamże, s. 215–216.

⁹⁵² Por. E. Yoxen, *Where does Schrödinger's...?*, s. 40.

⁹⁵³ Por. tamże.

⁹⁵⁴ C.H. Hinshelwood, A.C.R. Dean, *Growth, function and regulation in bacterial cells*, Oxford University Press, Oxford 1966.

⁹⁵⁵ C.H. Hinshelwood, *The chemical kinetics of the bacterial cell*, The Clarendon Press, Oxford 1946.

⁹⁵⁶ Hinshelwood, odwołując się w przypisie do *What is life?* Schrödingera, pisze: „Nawet rolę odgrywaną przez słynną zasadę nieoznaczoności (której status może być traktowany jako pośredni między fizyczną i niefizyczną), której wykorzystanie w zjawiskach biologicznych było od czasu do czasu postulowane, można ocenić zadowalająco dopiero po szczegółowym zbadaniu bardzo dużej liczby roboczych hipotez odnoszących się do takich zjawisk”. C.H. Hinshelwood, *The chemical kinetics of the bacterial cell*, s. 3.

Schrödinger napisał swoją książkę w 1944 roku, a więc zanim odkryto strukturę DNA i zanim nastąpiło kilka przełomowych odkryć w genetyce i biochemii⁹⁵⁷. Zapytajmy więc, jak wyglądał w dużym skrócie stan genetyki i biochemii do momentu publikacji *What is life?*

Już w 1866 roku Ernst Haeckel zdał sobie sprawę, że jądro, w którym znajdują się chromosomy, jest organellą komórkową odpowiedzialną za utrzymanie i przekazywanie cech dziedzicznych⁹⁵⁸. August Weismann z kolei w roku 1892 odkrył, że cechy dziedziczne znajdowały się w chromosomach (dosłownie „kolorowych ciałach”), które składały się jego zdaniem ze sferycznych ciał. Każde takie ciało zawiera determinanty, a każdy taki determinant składa się z bioforów, z których każdy reprezentował inną cechę. Biofor odpowiadał faktycznemu genowi, to jest jednostce porządku biologicznego. Ilościowe badanie mierzące transmisję cech dziedzicznych zostało zainicjowane przez Gregora Mendla. W 1865 roku wygłosił dwa wykłady, w których zaprezentował wyniki swoich prac nad krzyżowaniem roślin, głównie grochu ogrodowego (*Pisum sativum*), które prowadził w ogrodzie klasztornym augustianów w Brnie⁹⁵⁹. Praca *Versuche über Pflanzen-Hybriden* (Doświadczenia nad hybrydami roślin) autorstwa Mendla jest uznawana za podstawę nauki znanej dzisiaj jako genetyka⁹⁶⁰. Mendel wykazał, że dziedziczenie jest oparte na czynnikach („czynniki dziedziczenia biologicznego”), występujących w różnych wariantach [na przykład genów determinujących kolor nasion (na przykład żółte lub zielone) oraz ich kształt (na przykład gładkie lub pomarszczone)], które niezmienione mogą być przekazywane z pokolenia na pokolenie⁹⁶¹. Był pierwszym badaczem, który traktował dziedziczność w nowoczesnym, naukowym duchu ilościowym⁹⁶². Genetyczne

⁹⁵⁷ Por. F. Budenholzer, *What is life? – current scientific and philosophical perspectives*, „Method: Journal of Lonergan Studies”, 2(23) (2005), s. 131.

⁹⁵⁸ Por. A. Lwoff, *Biological order*, s. 15.

⁹⁵⁹ Por. M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger's ghost...*, s. 53.

⁹⁶⁰ Por. U. Deichmann, *A brief review of the early history of genetics...*, s. 3.

⁹⁶¹ Por. M. Cobb, *Największa tajemnica życia...*, s. 19. Por. L. Stone, P.F. Lurquin, *Geny, kultura i ewolucja człowieka. Synteza*, tłum. W. Branicki, W. Więckowski, Wyd. UW, Warszawa 2009, s. 11–12.

⁹⁶² Por. M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger's ghost...*, s. 53–54. Mendel kształcił się nie tylko w biologii, ale także w naukach ścisłych, na długo zanim zajął się eksperymentami nad hybrydyzacją groszku. Warto zaznaczyć, że wśród jego wykładowców na Uniwersytecie w Wiedniu był światowej sławy austriacki fizyk Christian Andreas Doppler. Nie może więc dziwić, że dążenia Mendla do odnalezienia „ogólnie stosowanego prawa” kierującego tworzeniem i rozwojem hybryd bardziej przypominają nauki ścisłe niż biologię. W przeciwieństwie do pozostałych dziedzin biologii genetyka od samego początku swojego istnienia była więc blisko związana z fizyką i matematyką. W przeciwieństwie do współczesnych hodowców roślin Mendel uważał, że niezwykle ważne jest uzyskanie dokładnych danych liczbowych w stosunku do

zasady były dla niego teoretycznym, nieobserwowalnym konstruktem zaprojektowanym do modelowania wielopokoleniowego pojawiania się cech⁹⁶³. Swoje odkrycie opublikował w 1866 roku, ale nie spotkało się ono z wielkim odzewem wśród naukowców⁹⁶⁴. W 1868 roku Mendel został opatem i musiał przerwać swoje badania⁹⁶⁵. Wyniki jego prac pozostawały więc niezauważone przez ogół społeczności naukowej przez prawie dwie dekady. Ponownie zostały odkryte w 1900 roku. Rok ten jest powszechnie uważany za *annus mirabilis*, początek nowej dyscypliny: genetyki⁹⁶⁶. W tym samym roku trzech europejscy botanicy: Hugo de Vries, Carl Correns i Erich von Tschermak opublikowali wyniki swoich eksperymentów hodowlanych z końca lat dziewięćdziesiątych XIX wieku i stwierdzili, że potwierdzone zostały prawidłowości zaprezentowane przez Mendla w jego nowatorskim artykule. Dodatkowa obserwacja, że czasem kilka czynników zachowywało się w sposób, który wskazywał na powiązania między nimi, przyczyniła się wkrótce do sformułowania hipotezy wypromowanej przez Waltera Suttona oraz Theodora Boveriego mówiącej o tym, że elementy te układały się w grupach, na różnych chromosomach w jądrze. Stąd chromosomowa teoria dziedziczności zakładała, że prawidłowości w przekazywaniu cech są zakorzenione w faktach z zakresu cytomorfologii. Od tego czasu szybko zaczęła narastać świadomość, że możliwość niezależnego doboru odrębnych czynników dziedzicznych w oparciu o reguły prawdopodobieństwa powinna być postrzegana jako kamień węgielny nowego „paradygmatu” dziedziczności⁹⁶⁷. Dostrzegano zasadność kategoryzującego podziału na czynniki genetyczne z jednej strony i cechy z drugiej⁹⁶⁸. Maskujący efekt cech dominujących w stosunku do recesywnych oraz późniejsze ponowne występowanie cech recesywnych odegrały znaczącą rolę w utrwaleniu się tego rozróżnienia⁹⁶⁹. Pod koniec pierwszej dekady XX wieku, po sformułowaniu przez Williama Batesona terminu „genetyka” dla nowo powstałej dyscypliny studiów nad dziedziczeniem w roku 1906⁹⁷⁰, duński

każdej cechy, którą się zajmował. Por. U. Deichmann, *A brief review of the early history of genetics...*, s. 3. Por. S. Mukherjee, *Gen. Ukryta historia*, s. 29–30.

⁹⁶³ Por. M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger's ghost...*, s. 54.

⁹⁶⁴ Por. M. Cobb, *Największa tajemnica życia...*, s. 19.

⁹⁶⁵ Por. M. Henderson, *50 teorii genetyki, które powinieneś znać*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 2010, s. 15.

⁹⁶⁶ Por. H.-J. Rheinberger, S. Müller-Wille, *Gene concepts* [w:] S. Sarkar, A. Plutynski (eds), *A companion to the philosophy of biology*, s. 4.

⁹⁶⁷ Por. tamże, s. 4.

⁹⁶⁸ Por. tamże, s. 4–5.

⁹⁶⁹ Por. tamże, s. 5.

⁹⁷⁰ Bateson stworzył również znaczną część wczesnej terminologii rodzącej się nauki. On i Johannsen podeszli do genetyki holistycznie. Skrytykowali model genów na chromosomach ułożony niczym koraliki na nitce. Dla nich stwierdzenie, że geny odpowiedzialne są za

botanik Wilhelm Johannsen skodyfikował to rozróżnienie, wprowadzając pojęcia genotypu (dziedziczenie) i fenotypu (konkretne charakterystyki)⁹⁷¹. Dodatkowo, w 1909 roku zaproponował on, aby elementy genotypu nazywać „genami”. „Gen” oznaczał dyskretne genetyczne „zasady” Mendla, „genotyp” – agregat tych zasad, a „fenotyp” – zespół cech obserwowalnych, które łącznie stanowią obserwowalne cechy organizmu⁹⁷².

Johannsen podkreślał, że gen jako czynnik determinujący cechy dziedziczne nie stanowi jakiegokolwiek cząsteczki fizycznej, jednostki chemicznej [„uporządkowana predyspozycja” (niem. *Anlagen*) zawarta w komórce jajowej i plemniku] i dlatego musi być traktowany niezależnie od wszelkich innych pojęć dotyczących życia (jako abstrakcja, „jednostka kalkulacji”)⁹⁷³. Pojęcie genu stało się jedną z najbardziej wpływowych abstrakcji w biologii. Z czasem geny zaczęły być traktowane jako abstrakcyjne elementy równie abstrakcyjnej przestrzeni, których struktura jednakże mogła być odkrywana poprzez widoczne i wymierne wyniki doświadczeń hodowlanych prowadzonych na bazie mutacji organizmów modelowych⁹⁷⁴. Zagadnienie to stało się programem badawczym Thomasa Hunta Morgana. Na podstawie swoich badań nad muszką owocową z rodzaju *Drosophila* Morgan opracował czynniki genetyczne i zidentyfikował związane z nimi konkretne cechy⁹⁷⁵. Stosował tę samą strategię, co Mendel: rozkładał ogólny wygląd (fenotyp) organizmu na zbiór cech i studiował transmisję alternatywnych wersji tych cech z pokolenia na pokolenie. W 1912 roku potwierdził doświadczalnie słuszność chromosomowej teorii dziedziczności, wykazując, że za biały kolor oczu muszki owocowej odpowiedzialny jest czynnik genetyczny w obrębie chromosomu płciowego X⁹⁷⁶. Dowiódł również istnienia związku

cechy, brzmiało jak przestarzały preformacjonizm. Mimo że żaden nie zaprzeczał, że materiał genetyczny jest z natury fizyczny, obaj wierzyli, że czynniki decydujące o dziedziczeniu muszą być badane jako całość, jako stany układu dynamicznego, aby można było je zrozumieć. Cząsteczki chromatyny, jak sądzono, nie były na tyle złożone, aby same decydować o dziedziczeniu. Bateson próbował stworzyć wersję genetyki opartą na fizyce. Por. U. Deichmann, *A brief review of the early history of genetics...*, s. 4. Por. A. Zucker, *Holism and reductionism: a view from genetics*, „The Journal of Medicine and Philosophy”, 6 (1981), s. 154.

⁹⁷¹ Por. H.-J. Rheinberger, S. Müller-Wille, *Gene concepts*, s. 5. Por. N. Roll-Hansen, *Drosophila genetics: a reductionist research program*, „Journal of the History of Biology”, 1(11) (1978), s. 159.

⁹⁷² Por. M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger's ghost...*, s. 54.

⁹⁷³ Por. H.-J. Rheinberger, S. Müller-Wille, *Gene concepts*, s. 5. Por. M. Cobb, *Największa tajemnica życia...*, s. 21. Por. U. Deichmann, *A brief review of the early history of genetics...*, s. 4–5.

⁹⁷⁴ Por. H.-J. Rheinberger, S. Müller-Wille, *Gene concepts*, s. 5.

⁹⁷⁵ Por. M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger's ghost...*, s. 54.

⁹⁷⁶ Por. M. Cobb, *Największa tajemnica życia...*, s. 21.

między zmiennymi wzorcami dziedziczenia grup genów a częstością, z jaką wymieniają się swoimi częściami pary chromosomów w trakcie formowania się komórek jajowych i plemników. Zjawisko to znane jest jako *crossing over* (wzajemne krzyżowanie się).

W klasycznej genetyce gen był abstrakcją wnioskowaną z obserwowanej cechy⁹⁷⁷. Później nazwano tę koncepcję genu „genem cechy” (ang. *trait gene*) lub G_{Cech} (G_{Trait}). W poglądzie klasycznego genetyka G_{Cech} organizmu stanowią łącznie genotyp; ten z kolei jest wnioskowany z analizy fenotypu. G_{Cech} jest teoretycznym zamiennikiem czegokolwiek, co jest przekazywane w celu zapewnienia ponownego pojawienia się tej cechy w kolejnym pokoleniu. „Klasyczny gen” (G_{Cech}) był więc teoretyczną abstrakcją. Program badań klasycznej genetyki mógł postępować w szybkim tempie przy całkowitym braku wiedzy co do natury materialnej genu. Dla wielu genetyków w tym okresie było zupełnie bez znaczenia to, czy geny w ogóle z czegoś się składają⁹⁷⁸. W swoim przemówieniu z 1933 roku po odebraniu Nagrody Nobla Morgan w okolicznościowym wykładzie zauważył, że nie ma zgodnej opinii wśród genetyków co do tego, czym są geny – czy rzeczywiście istnieją, czy ich istnienie jest fikcyjne, gdyż na poziomie, na którym prowadzone są eksperymenty genetyczne nie ma najmniejszego znaczenia, czy gen jest jednostką hipotetyczną, czy cząsteczką materialną⁹⁷⁹.

Praca szkoły Morgana pokazała, że geny mogą być uważane za istotne części chromosomów, jednak nie próbowano badać molekularnej natury genów ani żadnej z ich biochemicznych funkcji⁹⁸⁰. Fascynacja takim podejściem wynikała z jego skuteczności: o ile metoda stosowana była w sposób właściwy, stanowiła precyzyjne narzędzie⁹⁸¹. Genetycy populacyjni, tacy jak Ronald A. Fisher, John B.S. Haldane i Sewall Wright, wykorzystali tę samą abstrakcyjną koncepcję genu do tworzenia skomplikowanych modeli matematycznych opisujących wpływ czynników ewolucyjnych na genetyczny skład populacji. W konsekwencji doszło do zredefiniowania ewolucji jako zmiany częstotliwości występowania genu w puli genowej populacji, co nazywane było „ewolucyjną”, „neodarwinowską” albo po prostu „współczesną” syntezą późnych lat trzydziestych. Uważany za „niezmiennik rozwoju” oraz wykazujący bezwzględne posłuszeństwo w odniesieniu do mendelowskich praw przekazywania z pokolenia na pokolenie gen zapewniał pewnego rodzaju zasadę bezwładności, w odniesieniu do której wszystkie

⁹⁷⁷ Por. M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger's ghost...*, s. 54.

⁹⁷⁸ Por. M. Cobb, *Największa tajemnica życia...*, s. 23.

⁹⁷⁹ Por. M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger's ghost...*, s. 54–55.

⁹⁸⁰ Por. G.E. Allen, *Life science...*, s. 187.

⁹⁸¹ Por. H.-J. Rheinberger, S. Müller-Wille, *Gene concepts*, s. 6.

rezultaty oddziaływania czynników zarówno rozwojowych, jak i ewolucyjnych, mogły być mierzone z największą dokładnością, oceniane i określone ilościowo.

Niemniej wielu genetyków w latach dwudziestych, w tym student Morgana, laureat Nagrody Nobla, genetyk Herman J. Muller (który pracował nad promieniowaniem i mutagenezą w grzybach pleśniaka *Neurospora*), nabrali przekonania, że geny muszą być rozpatrywane pod kątem ich materialności⁹⁸². Muller postrzegał geny jako obdarzone dwoma rodzajami właściwości – związanymi z autokatalizą i heterokatalizą. Funkcja autokatalityczna pozwalała im na odtwarzanie się jako jednostkom transmisji, a tym samym na łączenie genotypu jednego pokolenia z genotypem kolejnego. Zdolności heterokatalityczne łączyły geny z fenotypem jako jednostki funkcjonalne zaangażowane w ekspresję poszczególnych cech. Za pomocą swoich własnych prac badawczych Muller dodał do tej dziedziny nauki kolejny istotny element przemawiający za materialnym charakterem genu i odnoszący się do jego trzeciej właściwości; podatności na mutacje. Klasyczni genetycy uważali, że mutanty, czyli nowe warianty cech, powstają spontanicznie i przypisali oni tę odmianę zmianie struktury genetycznej⁹⁸³. W latach dwudziestych stwierdzono, że można tworzyć takie mutacje przez wystawienie organizmów na promieniowanie, jednak nie rozumiano mechanizmu samej mutacji. W 1927 roku Muller ogłosił, że wywołał mendlowską mutację u *Drosophila* za pomocą promieniowania rentgenowskiego⁹⁸⁴. Doszedł do wniosku, że promieniowanie rentgenowskie musiało trwale zmienić jakąś strukturę molekularną. Ograniczona zmienność biologiczna (zapewniająca zróżnicowanie wymagane w darwinowskiej selekcji) musi zostać zagwarantowana w każdym pokoleniu przez proces mutacji⁹⁸⁵. Mutacje te są następnie wiernie przekazywane z pokolenia na pokolenie, wykorzystując autokatalityczną funkcję materiału genetycznego. Częstotliwość mutacji można zwiększyć w laboratorium za pomocą sztucznych środków, takich jak promieniowanie.

Doświadczenia z wykorzystaniem promieniowania rentgenowskiego, które w latach trzydziestych i czterdziestych doprowadziły do powstania całego „przemysłu” genetyki rentgenowskiej, nie były jedynym czynnikiem, który otworzył drogę do materialnego scharakteryzowania genów jako jednostek dziedziczności⁹⁸⁶. W międzyczasie również prace cytologiczne doda-

⁹⁸² Por. tamże, s. 6. Por. M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger's ghost...*, s. 55.

⁹⁸³ Por. M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger's ghost...*, s. 55.

⁹⁸⁴ Por. tamże.

⁹⁸⁵ Por. tamże, s. 55–56.

⁹⁸⁶ Por. H.-J. Rheinberger, S. Müller-Wille, *Gene concepts*, s. 6.

ły nieco wiarygodności materialnemu charakterowi genów umiejscowionych w chromosomach. W latach trzydziestych Theophilus Painter skorelował formalny wzorzec rozmieszczenia genetycznych *loci* na mapach chromosomowych Morgana z widocznymi zmianami w układzie chromosomowego wzoru prążkowego chromosomów gruczołu ślinowego muszki *Drosophila*. Barbara McClintock zdołała za pomocą swojego mikroskopu prześledzić zmiany – translokacje, inwersje i delecje – wywołane przez promieniowanie rentgenowskie w chromosomach kukurydzy *Zea mays*⁹⁸⁷. Jednocześnie Alfred Sturtevant w swojej pracy eksperymentalnej dotyczącej efektu zmniejszonych oczu u muszki *Drosophila* pod koniec lat dwudziestych wykazał istnienie zjawiska, które nazwane zostało efektem pozycji – ekspresja mutacji była uzależniona od położenia odpowiadającego jej genu w chromosomie⁹⁸⁸. Odkrycie to stało się początkiem prowadzonych na szeroką skalę dyskusji dotyczących heterokatalitycznego aspektu genu. Jeśli funkcja genu była uzależniona od jego pozycji w chromosomie, stało się kwestią sporną, czy funkcja ta była w ogóle stabilnie połączona z tym genem, czy raczej, jak zakładał Richard Goldschmidt, funkcja fizjologiczna była determinowana przez organizację materiału genetycznego.

Pod koniec lat trzydziestych Alfred Kühn i jego grupa, jak również George Beadle i Boris Ephrussi, prowadzili badania nad genetycznymi uwarunkowaniami barwy oczu u *Drosophila*⁹⁸⁹. Wykorzystując transplantację organów pomiędzy owadami zmutowanymi i dziko występującymi, otworzyli okno na przestrzeń pomiędzy genem a jego przewidywaną funkcją fizjologiczną⁹⁹⁰. Badając pigmentację oczu owadów, zdali sobie sprawę, że geny nie powodują bezpośrednio powstawania substancji fizjologicznych, ale z pewnością inicjują to, co Kühn określił mianem „reakcji pierwotnej”, prowadzącej do fermentów bądź enzymów, które z kolei katalizują poszczególne etapy kaskadowo przebiegających reakcji metabolicznych. Kühn postrzegał swoje doświadczenia jako przeorientowanie na to, co w jego mniemaniu było preformacjonizmem transmisji genetycznej tamtych czasów. Domagał się epigenetyki, która łączyłaby analizę genetyczną, rozwojową i fizjologiczną w celu zdefiniowania heterokatalizy jako rezultatu współzależności pomiędzy dwoma łańcuchami reakcji, z których jeden prowadził od genów do poszczególnych fermentów, a drugi od jednego przejściowego produktu metabolicznego do innego z udziałem tych fermentów, tym samym skutkując powstaniem kompleksowych sieci epigenetycznych. Beadle wraz z Edwar-

⁹⁸⁷ Por. tamże, s. 6–7.

⁹⁸⁸ Por. tamże, s. 7.

⁹⁸⁹ Por. M. Cobb, *Największa tajemnica życia...*, s. 28.

⁹⁹⁰ Por. H.-J. Rheinberger, S. Müller-Wille, *Gene concepts*, s. 7.

dem Tatumem, naświetlając promieniami rentgenowskimi zarodniki pleśni *Neurospora crassa* (rodzaju różowej pleśni)⁹⁹¹, usystematyzowali pierwszą z tych relacji, formułując hipotezę „jeden gen – jeden enzym” (każdy gen zawiera instrukcję do tworzenia jakiegoś enzymu, który następnie pozwala nastąpić pojedynczej reakcji chemicznej)⁹⁹². Dla Kühna jednak, podobnie jak dla Beadle’a i Tatuma, materialny charakter genów oraz sposób, w jaki te domniemane jednostki wpływają na powstanie pierwotnych produktów, pozostały niejasne i wymykały się możliwościom analizy doświadczalnej.

Co było wiadomo o biochemii (chemii cząsteczek życia) do 1944 roku?⁹⁹³ W tym czasie biochemia dojrzała do miana dyscypliny autonomicznej, z jednej strony oddzielonej od chemii organicznej, a z drugiej od medycyny i rolnictwa. Dyscyplina ta została zobowiązana do materialistycznego wyjaśnienia życia, nie naruszając przy tym żadnych praw chemicznych lub fizycznych. W tymże duchu John B.S. Haldane postrzegał życie jako wzór chemicznych samoregulujących się procesów, które generowały podobne procesy. Porównał życie do płomienia: płomień zachowuje swoją strukturę w trakcie swego istnienia, ale w przeciwieństwie do życia nie reguluje sam siebie.

Pojęcie „protoplazmy” jako bezpostaciowej materiiżywionej rozpropagował słynnym wykładem z 1868 roku, zatytułowanym *The physical basis of life* (Fizyczna podstawa życia) i wygłoszonym w 1868 roku w Edynburgu, angielski zoolog, paleontolog i fizjolog Thomas Henry Huxley. Substancja ta, będąca siedliskiem wszystkich czynności życiowych, została nazwana przez angielskiego biologa „materialnym podłożem życia”⁹⁹⁴. Wszystko, co biolodzy mogli ustalić o życiu, pochodzi z obserwacji tego materialnego podłoża. „Węgiel, wodór, tlen i azot – pisze Huxley – wszystkie są ciałami nieożywionymi. Spośród nich, węgiel i tlen łączą się w pewnych proporcjach i w pewnych warunkach, by dać kwas węglowy; wodór i tlen dają wodę; azot i inne składniki dają sole azotowe. Te nowe związki, podobnie jak ciała elementarne, z których powstały, są nieożywione. Ale gdy zebrać je

⁹⁹¹ Por. E. Mendelsohn, *Edward Lawrie Tatum* [w:] E. Mendelsohn (ed.), *Life sciences...*, s. 159–160.

⁹⁹² Por. H.-J. Rheinberger, S. Müller-Wille, *Gene concepts*, s. 7. Por. E. Mendelsohn, *Beadle George Wells* [w:] E. Mendelsohn (ed.), *Life sciences...*, s. 8. Hipoteza „jeden gen – jeden enzym” nie zyskała wówczas powszechnej akceptacji, gdyż zdawała się ona sugerować, że każdy gen steruje wytwarzaniem jednego enzymu (ma tylko jedną funkcję), podczas gdy wiadano już wtedy o różnorodnych efektach działania genów. Por. M. Cobb, *Największa tajemnica życia...*, s. 30. Por. M. Henderson, *50 teorii genetyki, które powinnyś znać*, s. 37–38.

⁹⁹³ Por. M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger's ghost...*, s. 56.

⁹⁹⁴ Por. W. Locy, *Badacze życia*, s. 280. Szczegółową analizę koncepcji życia angielskiego biologa przeprowadziłem w pracy *Koncepcja życia w ujęciu reprezentatywnych przyrodników...*

razem, w pewnych warunkach, dają jeszcze bardziej złożone ciało, protoplazmę, a protoplazma wykazuje zjawiska życiowe. Nie widzę żadnej luki w tym ciągu kroków w molekularnych złożeniach”⁹⁹⁵.

Tak, jak właściwości wody są sumą właściwości atomów wodoru i tlenu, tak protoplazma jest wypadkową cech składających się na nią molekuł. „Nie zakładamy – pisze dalej Huxley – że coś zwanego »wodnością« weszło w związek i wzięło górę nad utlenionym wodorem, jak tylko został on utworzony, a następnie poprowadziło wodne cząsteczki na ich miejsca w ściankach kryształu czy pomiędzy listki szronu. Przeciwnie, żyjemy w nadziei i wierze, że z rozwojem fizyki molekularnej będziemy mogli po trosze zobaczyć drogę od cząsteczki wody do własności wody tak jasno, jak teraz jesteśmy w stanie wydedukować działanie zegarka z kształtu jego części i sposobu, w jaki są one połączone. [...] Jeśli własności wody można uznać za wynikające z natury i skłonności budujących ją molekuł, nie widzę żadnej rozumiałej podstawy do odrzucenia twierdzenia, iż własności protoplazmy są wynikiem natury i właściwości jej molekuł”⁹⁹⁶.

Duży nacisk w biochemii kładziono na metabolizm, biosyntezę białka i enzymy⁹⁹⁷. Uznano, że białka – największa (po wodzie) część komórki, są najbardziej uniwersalnymi biomolekułami – służą jako elementy konstrukcyjne, receptory sygnałów lub transportery przenoszące określone substancje do lub z komórek. Enzymy białek są zaś katalizatorami, pozwalając na szybkie przemiany chemiczne w ciele: każdy etap metabolizmu i syntezy enzymów jest ułatwiany przez enzymy. Wiadomo było, że białka są polimerami składającymi się z dwudziestu rodzajów aminokwasów ułożonych w szczególny sposób i połączonych przez kowalencyjne wiązania chemiczne. Te łańcuchy aminokwasów („koraliki” dwudziestu typów liniowo rozmieszczone na łańcuchach) – polipeptydy – były następnie składane w dokładne trójwymiarowe konfiguracje niezbędne do ich funkcjonowania w komórkach. Tak polipeptydy składane zostają w białka funkcyjne.

Chromosomy, nosiciele genów (jak było już wiadomo), składają się z mieszaniny białek i kwasów nukleinowych⁹⁹⁸. Chociaż odkryto już kolejność genów w chromosomach, nie dysponowano ostateczną wiedzą co do tego, który z tej dwójki był materialną podstawą genu Mendla⁹⁹⁹. Założe-

⁹⁹⁵ T. Huxley, *The physical basis of life*, Macmillan, London 1893, s. 150–151.

⁹⁹⁶ Tamże, s. 152–153. Angielski biolog obrał sobie za cel coś więcej niż tylko popularyzację przyjętej koncepcji protoplazmy. Przyjął teorię protoplazmatyczną jako zwycięstwo mechanistycznej koncepcji życia nad witalistyczną. Por. G.R. Welch, *T.H. Huxley...*, s. 482.

⁹⁹⁷ Por. M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger's ghost...*, s. 57.

⁹⁹⁸ Por. tamże, s. 57.

⁹⁹⁹ Por. tamże, s. 57–58.

niem w momencie pisania *What is life?* było to, że białka odgrywają właśnie tę rolę (i taki pogląd utrzymywał Schrödinger)¹⁰⁰⁰. Istniało więc przypuszczenie, że geny były białkami i że kontrolowały syntezę innych białek, a DNA uważano jedynie za „rusztowanie” dla cząsteczek białka¹⁰⁰¹. Według powszechnego na początku lat czterdziestych poglądu to białka uważano za cząsteczki życia, nie DNA, jednakże wyniki szeregu eksperymentów na początku lat dwudziestych sugerowały coś wręcz przeciwnego, że materiałem genetycznym jest DNA¹⁰⁰². Kolejne potwierdzenie tego, że DNA jest materiałem dziedzicznym wyniknęło z klasycznych eksperymentów na bakteriach prowadzonych przez Oswalda Avery’ego, Colina MacLeoda i Maclyna McCarty’ego w Instytucie Rockefellera. Gdy Schrödinger głosił swoje wykłady w 1943 roku, praca ta była w toku.

Wczesne prace doświadczalne nad genetyką bakteryjną, które ugruntowały „centralny dogmat” Cricka o przepływie „informacji” w istotach żywych, gdy Schrödinger pisał swoją pracę, dopiero się zaczynały¹⁰⁰³. Hipoteza „jeden gen – jedno białko”, która głosiła, że specyficzny gen wyraża się poprzez określenie (w sposób nieznany wówczas) struktury konkretnego białka, została po raz pierwszy sformułowana mniej więcej w tym samym czasie, kiedy Schrödinger wygłaszał swoje wykłady. Austriacki fizyk nie wiedział o niej. Od dawna było wiadomo, że ważne molekuły związane z organizmami żywymi zawierają węgiel (stąd pojawił się termin „organiczny”)¹⁰⁰⁴. Dużo wiedziano o małych cząsteczkach organicznych, takich jak alkohole czy estry. Atomy tych cząsteczek były utrzymywane razem za pomocą wiązań kowalencyjnych, które po raz pierwszy zostały wyjaśnione przy użyciu teorii kwantowej przez Fritza Wolfganga Londona i Waltera Heinricha Heitlera w 1926 roku. Wiedziano także o istnieniu w komórkach większych makromolekuł o wadze cząsteczkowej pomiędzy 104 a 105 (włączając w to enzymy, które przyspieszają reakcję)¹⁰⁰⁵. Istniała także pewna

¹⁰⁰⁰ Por. tamże, s. 58.

¹⁰⁰¹ Por. N. Symonds, *What is life? Schrödinger’s influence on biology*, „Quarterly Review of Biology”, 2(61) (1986), s. 222. W 1927 roku rosyjski genetyk Nikołaj Kolcow zasugerował, że każdy chromosom zbudowany jest z pary cząsteczek białka, które tworzą dwie identyczne nici. Każda z nici podczas podziału komórki służy jako szablon przy formowaniu się kolejnej nici. Zasugerował też, że wielka długość tych nici sprawia, że możliwa jest olbrzymia liczba sekwencji aminokwasów w łańcuchach białka, co ma przełożenie na liczne funkcje genów. Por. M. Cobb, *Największa tajemnica życia...*, s. 24.

¹⁰⁰² Por. J. Gribbin, *Skąd się wziął kot Schrödingera. Geniusz z Wiednia i kwantowa rewolucja*, tłum. S. Szymański, Prószyński i S-ka, Warszawa 2014, s. 204.

¹⁰⁰³ Por. M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger’s ghost...*, s. 58.

¹⁰⁰⁴ Por. N. Symonds, *What is life? Schrödinger’s influence on biology*, s. 221.

¹⁰⁰⁵ Por. tamże, s. 221–222.

wczesna wiedza o składzie innych białek, a także świadomość, że kwasy nukleinowe były obecne w komórkach¹⁰⁰⁶. Ówczesna technika nie pozwalała jednak na dokładne zbadanie tych makrocząsteczek. Nie było krystalografii rentgenowskiej, chromatografii ani mikroskopu elektronowego. Jedyne dowody na wielkość i kształt tych makrocząsteczek można było uzyskać poprzez badania, które używały wirowania.

3.2. ASPEKTY FORMALNE I MERYTORYCZNE „WIEDEŃSKIEJ” INTERPRETACJI UKŁADÓW BIOTYCZNYCH

Praca Schrödingera składa się z siedmiu krótkich rozdziałów i epilogu potwierdzającego jego wedantyczne poglądy filozoficzne. Austriacki fizyk prezentował w swojej publikacji wiele rozmaitych idei. Jedną z nich dotyczyła termodynamiki układów ożywionych, sięgając do rozważań fizyków z początków XX wieku¹⁰⁰⁷. Pytaniem było tu, jak możliwe jest uporządkowanie we wszechświecie rządzonego przez drugą zasadę termodynamiki. Prawo to nakazuje zwiększenie nieuporządkowania (wzrost entropii) w termodynamicznie zamkniętych układach, które (ostatecznie) doprowadzi do śmierci cieplnej wszechświata. Jednak jak zauważył Darwin, organizmy w procesie ewolucji stają się coraz bardziej złożone¹⁰⁰⁸. Jak połączyć te dwie obserwacje?¹⁰⁰⁹ To właśnie zagadnienie stało się problemem, nad którym pochylił się Schrödinger, odnośnie do przejścia z „nieuporządkowania do porządku”. Austriacki fizyk jako pierwszy przedstawił też koncepcję kodu genetycznego, jedną z najbardziej istotnych w dwudziestowiecznej biologii.

W pierwszej kolejności uwaga została skupiona na aspektach formalnych (epistemologiczno-metodologicznych) „wiedeńskiej” koncepcji życia, zogniskowanych wokół kwestii związanych z termodynamiką układów ożywionych. W dalszej kolejności analizy dotyczą meritum „wiedeńskiej” odpowiedzi na fundamentalne pytanie: co to jest życie? – czyli samej treści koncepcji Schrödingera.

Peter A. Corning i Stephen J. Kline podają krótki opis zagadnień związanych z porządkiem i nieporządkiem w fizyce. Przypominają, że porządek i nieporządek w kategoriach czysto fenomenologicznych definiował Ru-

¹⁰⁰⁶ Por. tamże, s. 222.

¹⁰⁰⁷ Por. M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger's ghost...*, s. 60.

¹⁰⁰⁸ Por. tamże, s. 60–61.

¹⁰⁰⁹ Por. tamże, s. 61.

dolf J.E. Clausius¹⁰¹⁰. W stanie uporządkowanym energia jest agregowana w taki sposób, że posiada potencjał do wykonywania użytecznej pracy. W związku z tym koncepcja entropii (lub termodynamicznego nieporządku) zaproponowana przez Clausiusa traktuje entropię jako miarę energetycznej dyspersji czy rozproszenia, a w konsekwencji jako niezdolność tejże energii do wykonywania pracy. W takim sformułowaniu stan entropii maksymalnej odpowiada stanowi kompletnego energetycznego nieuporządkowania, który paradoksalnie również reprezentuje warunki równowagowe. Chociaż taka wersja koncepcji entropii znalazła w minionych latach wiele zastosowań praktycznych, to zdaniem Corninga i Kline'a miała ona jednocześnie bardzo poważne ograniczenia. Świat materialny jest w rzeczywistości zorganizowany w sposób wielopoziomowy i hierarchiczny, a koncepcja Clausiusa koncentrowała się wyłącznie na porządku/nieporządku energetycznym na poziomie makroskopowym. Ograniczenie to zostało usunięte, kiedy fizycy Ludwig Boltzmann (1909) i Josiah Willard Gibbs (1906), zainspirowani pionierską pracą Jamesa Clerka Maxwella¹⁰¹¹ w dziedzinie teorii kinetycznej, zajęli się niezależnie od siebie kwestią relacji pomiędzy energetyką poziomów mikroskopowych i makroskopowych (objętością gazów w zbiorniku a dynamiką tworzących tę objętość atomów). Dylemat polega na tym, że zachowanie termodynamicznego mikrostanu nie może zostać w sposób precyzyjny przewidziane z dwóch powodów: po pierwsze na poziomie tym istnieje pewien wewnętrzny poziom fluktuacji stochastycznej (nieokreśloności), a po drugie człowiek-obszernik nie jest w stanie w sposób precyzyjny poznać początkowego mikrostanu układu bądź też nie jest w stanie poczynić niezbędnych obserwacji. W związku z tym Boltzmann i Gibbs wykorzystali techniki statystyczne przypominające te, które zostały opracowane w odniesieniu do gier losowych, do opisywania w kategoriach prawdopodobieństwa poziomu energetycznego porządku/nieporządku na poziomie mikrostanu, przy wstępnym założeniu, że w obrębie pewnych określonych założeń oraz ograniczeń statystyki tych mikrostanów będą korelować również z właściwościami makrostanów. Gibbs dosadnie nazwał swoją formalizację staty-

¹⁰¹⁰ Por. P.A. Corning, S.J. Kline, *Thermodynamics, information and life revisited, part I: to be or entropy*, „Systems Research and Behavioral Science”, 15 (1998), s. 276. Clausius w 1865 roku sformułował termin „entropia” z greckich słów oznaczających „przemianę treści”. Por. J. Gleick, *Informacja. Bit, wszechświat, rewolucja*, tłum. G. Siwek, Znak, Kraków 2012, s. 249–250. Por. N. Spielberg, B.D. Anderson, *Fizyka. Siedem teorii, które wstrząsnęły światem*, tłum. J. Błaszczak, Amber, Warszawa 1997, s. 130.

¹⁰¹¹ Maxwell, w przeciwieństwie do Clausiusa skupił się nie na negatywnym, ale na pozytywnym aspekcie omawianego zagadnienia. Dla niego entropia oznaczała to, co dało się przekształcić w pracę mechaniczną. Por. J. Gleick, *Informacja. Bit, wszechświat, rewolucja*, s. 250.

styczną „analogiami entropii” dla podkreślenia faktu, że są one jedynie matematycznymi przybliżeniami, a nie bezpośrednimi miarami istniejących rzeczywiście rzeczy. Obecnie fizycy i inżynierowie zasadniczo z tego samego powodu często dokonują rozróżnienia pomiędzy „entropią klasyczną” a „entropią statystyczną”. W każdym przypadku entropia termodynamiczna, zdefiniowana w tych pionierskich pracach, to „funkcja stanu”, porównywalna z temperaturą czy ciśnieniem. Entropia w takim sensie nie jest „rzeczą” czy też „siłą” – jest to właściwość materii, w pewien sposób zaskakująca, ponieważ została pomyślana jako środek mierzenia względnej nieobecności czegoś, w tym przypadku – porządku energetycznego. Kiedy entropia jakiegoś ośrodka rośnie, jego potencjał wykonywanej pracy maleje – co jest powodem dość mylącej sytuacji, w której równania entropii odnoszące się do potencjału pracy mają zazwyczaj znak ujemny¹⁰¹². I odwrotnie: to, co Schrödinger nazywał „ujemną entropią” (a Leon Brillouin nazwał „negentropią”), było postrzegane jako termodynamiczna miara porządku w sensie wysoce „nieprawdopodobnej” koncentracji potencjału pracy¹⁰¹³.

Celowe będzie dokonanie krótkiej charakterystyki przedschrödingerskiego etapu refleksji nad życiem w kontekście drugiej zasady termodynamiki. Jak możliwe jest życie w świecie, w którym rządzi druga zasada termodynamiki? Na te pytanie próbowało odpowiedzieć wielu uczonych. W pierwszych dekadach XX wieku z kwestią druga zasada termodynamiki *versus* życie mierzył się Charles Eugene Guye¹⁰¹⁴. Ten szwajcarski fizyk przekonywał, że nie ma żadnego naukowego uzasadnienia, aby przypuszczać, że druga zasada termodynamiki (bezwzględna zasada w ewolucji nieorganicznej) nie ma zastosowania w ewolucji fizyczno-chemicznej organizmów żywych¹⁰¹⁵. Innymi słowy, jeśli przyjmiemy punkt widzenia klasycznej termodynamiki (to znaczy, jeśli uznamy drugą zasadę termodynamiki za zasadę bezwzględną, absolutną), nie znajdziemy żadnych naukowych powodów, by przypuszczać, że zasada ta nie ma zastosowania do fizyczno-chemicznej ewolucji organizmów żywych¹⁰¹⁶. Niemniej, podkreśla autor, od

¹⁰¹² Por. M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger's ghost...*, s. 276–277.

¹⁰¹³ Por. tamże, s. 277.

¹⁰¹⁴ Próby połączenia biologii i energetyki podejmowali między innymi Jean-Baptiste de Lamarck, Herbert Spencer, Ludwig Boltzmann i Alfred J. Lotka. Por. P.A. Corning, S.J. Kline, *Thermodynamics, information and life revisited, part I...*, s. 277.

¹⁰¹⁵ Por. Ch.-E. Guye, *La second principe de la thermodynamique et l'évolution physico-chimique des organismes vivants* [w:] tenże, *L'évolution physico-chimique*, Lausanne Librairie de l'Université, Lausanne 1947, s. 110.

¹⁰¹⁶ Por. tenże, *Physico-chemical evolution*, trans. J.R. Clarke, Methuen & Co. LTD., London 1925, s. 151.

czasu prac Gibbsa i Boltzmanna druga zasada termodynamiki zyskała mniej bezwzględna interpretację. Uważa się ją za zasadę statystyczną, która pozwala pozostawać w niewiedzy w odniesieniu do praw dotyczących poszczególnych działań pomiędzy cząsteczkami, atomami i elektronami. Poza prawami ewolucji fizyczno-chemicznej, które wypływają z drugiej zasady i wyrażają tylko najbardziej prawdopodobne ścieżki rozwoju, istnieje w pewnych szczególnych przypadkach miejsce dla innych, bardzo rzadkich możliwości, a mianowicie wahań, inaczej zwanymi fluktuacjami. Z powodu ogromnej niejednorodności materii ożywionej, skłonnej do pojawienia się w niej fluktuacji bądź przez wzgląd na to, że istnieją niektóre określone pojedyncze punkty, w których wahania mogą być niezwykle istotne, należy przypuszczać, że ewolucja fizyczno-chemiczna organizmów żywych wymyka się (przynajmniej częściowo) drugiej zasadzie termodynamiki i jej konsekwencjom¹⁰¹⁷. Kiedy jednak stwierdzi się, że „kaprys fluktuacji” może wywierać wpływ na ewolucję komórkową, nie oznacza to, że taka ewolucja nie podlega żadnemu prawu, lecz jedynie że prawa tego rozwoju nie zawsze są dokładnymi prawami statystycznymi, jak ma to miejsce w chemii fizycznej. „Na ogół względne znaczenie tych wahań – pisze Guye – staje się tym większe, im mniejsza jest liczba cząsteczek zawartych w jednorodnym elemencie badanej objętości. Co więcej, fluktuacje te mogą stać się niezwykle istotne w pewnych szczególnych punktach w fizyczno-chemicznej ewolucji układu. Subtelna struktura materii ożywionej, którą można postrzegać jako wynik zestawienia bardzo małych jednorodnych elementów wydaje się szczególnie korzystna dla pojawienia się wahań. Tym samym jesteśmy skłonni uwierzyć, że kaprys wahań może równie dobrze mieć pewien wpływ na fizyczno-chemiczną ewolucję komórkową, a nawet na rozwój istot żywych, jeśli zostaną one potraktowane jako wynik komórkowej proliferacji. Chemię fizyczną istot żywych, określaną zwykle mianem fizjologii, można zatem uznać z tej perspektywy za bardziej ogólny przypadek chemii fizycznej niż nasza fizyko-chemia *in vitro* w tym sensie, że gdy jest on stosowany do bardzo zróżnicowanych środków, statystyczne wahania nie są dłużej całkowicie nieistotne, lecz naruszają prostotę i dokładność naszych praw fizyczno-chemicznych”¹⁰¹⁸. Dla szwajcarskiego fizyka zadziwiające jest to, że Hermann von Helmholtz przypisał możliwość sprzeczności z drugą zasadą termodynamiki do drobnej struktury żywych tkanek w czasie, gdy kwestia fluktuacji nie zdołała jeszcze ujrzeć światła dzien-

¹⁰¹⁷ Por. tenże, *La second principe de la thermodynamique...*, s. 123. Zob. tenże, *Physico-chemical evolution*, s. 145.

¹⁰¹⁸ Tenże, *Physico-chemical evolution*, s. 152–153.

go¹⁰¹⁹. Autor przypomina, że po rozważeniu ruchu ciepła i przypomnieniu, że wielkość entropii może być traktowana jako miara nieporządku, Helmholtz doszedł do następującego wniosku: „Dla nas, których metody są prymitywne względem molekularnej architektury, tylko skoordynowany ruch jest swobodnie transformowalny w inne formy energii”, dodając, że „to, czy taka transformacja jest również niemożliwa w subtelnej strukturze żywych tkanek organicznych, wydaje się dla mnie otwartą kwestią, której znaczenie w gospodarce natury jest oczywiste”¹⁰²⁰. Guye konkluduje: „Wydaje się, że pytanie postawione przez Helmholtza zaczyna znajdować dla siebie odpowiedź z pomocą fluktuacji”¹⁰²¹.

Problemy związane z próbami połączenia koncepcji termodynamicznych energetycznego porządku/nieporządku – które zostały zaprojektowane do użytku w ściśle określonych i ograniczonych układach fizycznych – z układami ożywionymi zaczęły się wraz z rozpoczęciem przez Schrödingera prac badawczych¹⁰²². Austriacki fizyk spróbował zdefiniować ten związek w odniesieniu do drugiej zasady termodynamiki.

Dla Schrödingera kluczowym pytaniem, jakie należało postawić, chcąc zgłębić fenomen życia, było to, jak zdarzenia zachodzące w czasie i przestrzeni mające miejsce w organizmie żywym mogą zostać opisane przez fizykę i chemię¹⁰²³. Odpowiadając, stwierdza, że organizm – ponieważ funkcjonuje w bardzo wrażliwy i bardzo zróżnicowany sposób i reaguje na środowisko – koniecznie musi składać się z ogromnej liczby atomów¹⁰²⁴. Dowód tego stanu rzeczy austriacki fizyk dostrzega w tym, iż fizyczne i chemiczne procesy, które są fundamentem działania organizmu opierają się na statystycznych zasadach, które są tylko wtedy spełnione z wielką precyzją, jeśli właśnie liczba „współpracujących” atomów jest nadzwyczaj duża¹⁰²⁵. W przeciwnym razie dochodziło do tak zwanych wahań termodynamicznych, które w konsekwencji mogłyby doprowadzić do ustania funkcji organizmu¹⁰²⁶. Istnieją jednak obszary w organizmie żywym, które zdaniem Schrödingera nie do końca stosują się do statystycznych zasad fizyki¹⁰²⁷. W związku z tym – pomimo

¹⁰¹⁹ Por. tamże, s. 152.

¹⁰²⁰ Tamże, s. 152–153.

¹⁰²¹ Tamże, s. 153.

¹⁰²² Por. P.A. Coming, S.J. Kline, *Thermodynamics, information and life revisited, part I...*, s. 277.

¹⁰²³ Por. E. Schrödinger, *Czym jest życie?...*, s. 15.

¹⁰²⁴ Por. tenże, *Warum sind die Atome so klein?*, „Forschungen und Fortschritte”, 9 (1933), s. 125.

¹⁰²⁵ Por. tamże, s. 125–126.

¹⁰²⁶ Por. tamże, s. 126.

¹⁰²⁷ Por. tamże.

cennych informacji o materialnej strukturze organizmów żywych i ich funkcjonowaniu, uzyskanych w wyniku prowadzonych w ciągu pierwszych dekad XX wieku badaniach (zwłaszcza w dziedzinie genetyki) – współczesna austriackiemu przyrodnikowi fizyka i chemia nie potrafiły w sposób wyczerpujący wyjaśnić wszystkiego, co dzieje się wewnątrz organizmu żywego¹⁰²⁸.

Jako powód, dla którego obie te nauki nie są w stanie dostarczyć zadowalającego wyjaśnienia, Schrödinger wskazuje zasadniczą różnicę między układami atomów w najważniejszych częściach organizmu żywego i ich wzajemnym oddziaływaniem a układami atomów i ich wzajemnym oddziaływaniem w bytach nieożywionych, które były i są przedmiotem empirycznych i teoretycznych badań fizyków i chemików. Prawa fizyki i chemii mają charakter statystyczny i, jak podkreśla, „właśnie ze względu na statystyczny punkt widzenia struktura owych części organizmów żywych różni się zasadniczo od struktury dowolnego obiektu materialnego, jaki fizycy i chemicy badali dotąd empirycznie w swych laboratoriach lub rozważali teoretycznie w swych gabinetach”¹⁰²⁹. W jego przekonaniu prawa i regularności odkryte powyższą drogą w żaden sposób nie mogą mieć bezpośredniego zastosowania do zachowań układów, które posiadają strukturę odmienną od tej będącej podłożem tychże praw¹⁰³⁰. Píše: „fizyk [...] może być zdziwiony przez fakt odsłaniany w wyniku nowoczesnych badań nad dziedziczeniem, że stosunkowo niewielkie obszary jądra komórkowego (»geny«) w nadzwyczaj precyzyjny i zgodny z prawem sposób przez miliardy podzielonych komórek i od wielu generacji są w stanie przenosić pewne cechy dziedziczne, bez zakłócania przebiegu badań przez wahania termodynamiczne, co jednakże dokonuje się przy stosunkowo (!) małej liczbie atomów. Dokładniejsze przemyślenia pozwalają na wyjaśnienie, że te grupy atomowe są łączone w (nadzwyczaj skomplikowane) związki molekuł i są stosunkowo odporne na zakłócenia według zasad kwantowego przekazu energii, które odkrył Max Planck”¹⁰³¹. Schrödinger z całą stanowczością przekonuje, że w uporządkowanych procesach i zdarzeniach zachodzących w organizmie żywym decydującą rolę odgrywają małe grupy atomów, które nie podlegają ściśle prawom statystycznym¹⁰³². To one mają decydujący wpływ na uzyskiwane przez organizm w trakcie rozwoju osobniczego obserwowalne cechy makroskopowe oraz na jego funkcjonowanie¹⁰³³.

¹⁰²⁸ Por. E. Schrödinger, *Czym jest życie?*..., s. 16.

¹⁰²⁹ Tamże, s. 16.

¹⁰³⁰ Por. tamże, s. 16–17.

¹⁰³¹ E. Schrödinger, *Warum sind die Atome so klein?*, s. 126.

¹⁰³² Por. tenże, *Czym jest życie?*..., s. 32.

¹⁰³³ Przez całe życie pozostawał pod silnym wpływem Boltzmanna. Zgodnie z termodynamiką statystyczną Boltzmanna, zachowania poszczególnych molekuł nie sposób przewi-

Na podstawie analizy ogólnej koncepcji genu oraz mutacji, opracowanej głównie przez Delbrücka, austriacki fizyk dochodzi do następującego wniosku: „materia ożywiona, choć nie wymyka się ustalonym dotąd prawom fizyki, ujawniać może inne, dotąd nieznane prawa, które z chwilą, gdy zostaną odkryte, staną się równie integralną częścią tej nauki”¹⁰³⁴. Schrödinger nie próbował przedstawić w zarysie żadnego z praw czy mechanizmów, za pomocą których porządek chromosomów narzuca dynamikę organizmu i kieruje nią¹⁰³⁵. To zadanie pozostawił przyszłym badaczom życia. Ważny jest sam fakt, iż zapewnia on o istnieniu takich praw. Ich poszukiwanie było również główną motywacją do napisania *What is life?*

Schrödinger podkreśla, że znane nam prawa fizyki mające charakter statystyczny są ściśle związane z naturalną tendencją układów do wzrostu nieuporządkowania¹⁰³⁶. Innymi słowy, naturalny porządek dotychczas opisany przez prawa fizyki jest oparty na statystyce atomowej, a więc ma jedynie przybliżoną wartość¹⁰³⁷. Precyzja, zademonstrowana na przykład przez paramagnetyzm, ruchy Browna i dyfuzję, opiera się na dużej liczbie współdziałających ze sobą atomów¹⁰³⁸. Powiązanie pomiędzy liczbą jednostek w układzie a przewidywalnością układu jest określana poprzez „regułę $\sqrt{n}$ ”. „Względna niedokładność praw fizyki i chemii fizycznej – pisze – wynosi $1/\sqrt{n}$, gdzie n oznacza liczbę cząsteczek biorących udział w wywołaniu, w określonym miejscu i czasie, zjawiska opisywanego przez prawo i sprawdzanego w określonym eksperymencie”¹⁰³⁹. Podczas gdy dla układu składającego się ze stu cząsteczek błąd wynosiłby 0,1, dla układu składającego się z miliona cząsteczek liczba ta wynosi 0,001¹⁰⁴⁰.

Austriacki fizyk kontynuuje swój wywód, opierając się na dowodach dostarczonych przez genetykę klasyczną. Stara się udowodnić, że stabilność występująca w układach ożywionych pociąga za sobą stabilność małych liczb jednostek¹⁰⁴¹. Zgodnie z „teorią celu” mutacji wywołanych promieniowaniem rentgenowskim (sformułowaną przez Timofiejewa-Riesowskiego, Zimmera i Delbrücka), objętość genu, w której ma miejsce „trafienie” (ko-

dzieć; można jedynie przewidzieć zachowanie ich dużych grup. Por. R. Olby, *The path to the double helix*..., s. 241.

¹⁰³⁴ E. Schrödinger, *Czym jest życie?*..., s. 84.

¹⁰³⁵ Por. L. Moss, *What genes can't do*, s. 60.

¹⁰³⁶ Por. E. Schrödinger, *Czym jest życie?*..., s. 84.

¹⁰³⁷ Por. L. Moss, *What genes can't do*, s. 57.

¹⁰³⁸ Por. E. Schrödinger, *Czym jest życie?*..., s. 22–29. Por. L. Moss, *What genes can't do*, s. 57.

¹⁰³⁹ E. Schrödinger, *Czym jest życie?*..., s. 30.

¹⁰⁴⁰ Por. tamże, s. 29. Por. L. Moss, *What genes can't do*, s. 57.

¹⁰⁴¹ Por. L. Moss, *What genes can't do*, s. 57.

nieczne, by pokonać jego stabilność), jest równa tylko tysiącowi atomów (a może nawet i mniej)¹⁰⁴². W jaki sposób – pyta Schrödinger – te małe geny utrzymują swój porządek, kiedy ich własne atomy, nieustannie napędzane energią cieplną, powinny pozostawać w nieustannym ruchu?¹⁰⁴³ Jak gen prognatyzmu, warunkujący specyficzny wygląd ust (wystającą żuchwę) u przedstawicieli rodu Habsburgów („wargę habsburską”), przekazywany przez kolejne pokolenia członków austriackiej rodziny, zdołał zachować swoją specyficzną strukturę, a tym samym swoją zawartość informacyjną, jeśli weźmiemy pod uwagę fakt, że przechowywany był w ciele ludzkim o temperaturze 36,6°C, a więc w temperaturze o wiele wyższej niż temperatura zera bezwzględnego?¹⁰⁴⁴ Schrödingera zdumiewa fakt, że trwający kilka wieków ruch cieplny nie spowodował odkształcenia struktury owego genu.

Przedstawwszy problem austriacki fizyk proponuje jego rozwiązanie, którego należy szukać w mechanice kwantowej, a w szczególności w sformułowanej w latach 1926–1927 kwantowomechanicznej teorii wiązania chemicznego Heitlera i Londona¹⁰⁴⁵. Dla Schrödingera mechanika kwantowa jest odpowiedzialna przede wszystkim za przełom w ontologii ciągłości. „Podczas gdy dotąd – pisze – powszechnie sądzono, że przyroda nie czyni skoków, wielkim odkryciem teorii kwantów było stwierdzenie, iż Księga Natury pełna jest nieciągłości”¹⁰⁴⁶. Odkrycie to jest niezwykle ważne między innymi w spekulacjach dotyczących energii: „Stany energetyczne ciał makroskopowych ulegają ciągłym zmianom, na przykład wychylenia wahadła maleją stopniowo wskutek oporu powietrza. Ku zaskoczeniu wszystkich, trzeba było jednak uznać, że układy na poziomie atomowym zachowują się inaczej. Na podstawie przesłanek, których nie będę tu omawiał, musimy przyjąć, że układy takie ze swej natury znajdować się mogą tylko w niektórych określonych stanach energetycznych, zwanych »własnymi poziomami

¹⁰⁴² Por. E. Schrödinger, *Czym jest życie?*..., s. 61. Por. L. Moss, *What genes can't do*, s. 57. Por. R. Olby, *The path to the double helix*..., s. 241.

¹⁰⁴³ Por. E. Schrödinger, *Czym jest życie?*..., s. 61. Por. G.S. Stent, *The coming of the golden age. A view of the end of progress*, The Natural History Press, New York 1969, s. 22. Por. G.S. Stent, R. Calendar, *Molecular genetics: an introductory narrative*, W.H. Freeman & Company, San Francisco 1978, s. 27. Por. G.S. Stent, *Looking for other laws of physics*, „Journal of Contemporary History”, 3(33) (1998), s. 371–372. Por. G.S. Stent, *That was the molecular biology that was*, „Science. New Series”, 160(3826) (1968), s. 392.

¹⁰⁴⁴ Por. E. Schrödinger, *Czym jest życie?*..., s. 61–62. Por. Stent, *The coming of the golden age*..., s. 22. Por. G.S. Stent, R. Calendar, *Molecular genetics: an introductory narrative*, s. 27. Por. tenże, *Looking for other laws of physics*, s. 371–372. Por. tenże, *That was the molecular biology that was*, s. 392.

¹⁰⁴⁵ Por. E. Schrödinger, *Czym jest życie?*..., s. 63. Por. L. Moss, *What genes can't do*, s. 57.

¹⁰⁴⁶ E. Schrödinger, *Czym jest życie?*..., s. 63.

energetycznymi«. Przejście od jednego takiego stanu do innego jest zjawiskiem dość tajemniczym, zwanym właśnie »przeskokiem kwantowym«¹⁰⁴⁷. Dany układ charakteryzowany jest nie tylko przez energię¹⁰⁴⁸. Aby podać pełny opis stanu układu nie wystarczy wskazać jedynie wartości energii; trzeba też dokonać charakterystyki określonej konfiguracji wszystkich cząsteczek. Większość zmian tego rodzaju charakterystyk w układach mikroskopowych ma charakter nieciągły. „Przejście od jednej konfiguracji do innej – pisze – to »przeskok kwantowy«. Jeśli kolejny stan odznacza się wyższym poziomem energetycznym, »przeskok« jest możliwy tylko wówczas, gdy układ pobiera niezbędną energię z zewnątrz. Przejście do niższego poziomu może być spontaniczne i związane jest w wypromieniowaniu nadmiaru energii»¹⁰⁴⁹. Najniższy dyskretny stan danego zbioru atomów oznacza maksymalne zbliżenie się do siebie jąder atomowych, dzięki czemu może powstać cząsteczka chemiczna¹⁰⁵⁰. Z podstawowego twierdzenia teorii kwantów o „dyskretności poziomów energetycznych” wynika, że konfiguracja tworzących cząsteczkę chemiczną składników odznacza się pewną trwałością, to znaczy, że nie może ona ulec zmianie, chyba że z zewnątrz zostanie dostarczona energia konieczna do przeniesienia jej na wyższy poziom energetyczny¹⁰⁵¹. Dostarczenie określonej ilości energii w celu przekształcenia układu atomowego w wyższy stan energetyczny może nastąpić na przykład drogą „ogrzewania” cząsteczki chemicznej, mimo to nie można dokładnie ustalić temperatury, w której to przejście w stu procentach nastąpi. „W każdej temperaturze (wyższej od absolutnego zera) – stwierdza – zachodzi określone prawdopodobieństwo przejścia, tym większe, rzecz jasna, im wyższa temperatura. Najlepszym sposobem określenia tego prawdopodobieństwa jest wskazanie średniego czasu niezbędnego, aby przejście się dokonało, czyli »czasu oczekiwania«¹⁰⁵².

Schrödinger wprowadza w tym miejscu dwa uściślenia do swoich rozważań. Kolejny wyższy poziom energetyczny niekoniecznie pociąga za sobą zmianę w ustawieniu zbioru atomów w cząsteczce chemicznej, przez co stałaby się „czymś innym”. Pisze: „Po najniższym poziomie następuje cały szereg poziomów; przejścia między nimi nie powodują żadnych dostrzegalnych zmian w konfiguracji całości – odpowiadają im tylko niewielkie drgania [...]. Poziomy te również są skwantowane, ale różnice energii między

¹⁰⁴⁷ Tamże.

¹⁰⁴⁸ Por. tamże, s. 64.

¹⁰⁴⁹ Tamże, s. 64.

¹⁰⁵⁰ Por. tamże, s. 64–65.

¹⁰⁵¹ Por. tamże, s. 65.

¹⁰⁵² Tamże.

nimi są niewielkie. Ruch cieplny spowodowany przez ogrzewanie może wywołać drgania już w stosunkowo niskich temperaturach. Gdy mamy do czynienia z dużą cząsteczką, możemy traktować owe drgania o wysokiej częstotliwości jako fale akustyczne, biegnące poprzez cząsteczkę i czasu oczekiwania »nie czyniące jej szkody«¹⁰⁵³. Kolejna poprawka odnosi się do mechanizmów atomowych wiążących się z właściwymi zdarzeniami mutacyjnymi¹⁰⁵⁴. Mutacja spowodowana radiacją może pociągać za sobą zmianę ułożenia konfiguracji cząsteczkowej, co ewentualnie doprowadzi do powstania izomeru. Izomery są cząsteczkami o tym samym składzie chemicznym, różniącym się od siebie jedynie ułożeniem przestrzennym. Chociaż dwa izomery mogą być całkiem blisko najniższego stanu energii, to przeskok od jednego do drugiego nadal może być w znacznym stopniu ograniczony. Przyczyną tego ograniczenia może być to, że mechanizm wykorzystany w przeskoku z jednego izomeru do następnego jest konfiguracją pośrednią znajdującą się na poziomie energetycznym o wiele wyższym niż którykolwiek z tych izomerów. Innymi słowy, nie istnieje bezpośrednia mechaniczna ścieżka od jednego izomeru do drugiego, lecz jedynie umożliwiająca występowanie stanu pośredniego znajdującego się na znacznie wyższym poziomie energetycznym niż dwa stabilne izomery. Zwykle dochodzi też do znacznego „uwolnienia energii”, które dzieli dwie dość stabilne niskoenergetyczne konfiguracje.

Austriacki fizyk pokazał więc, jak teoria kwantów, zastosowana przez Heitlera i Londona do wiązań chemicznych, uzasadniała i wyjaśniała istnienie stabilnych agregatów atomów, zwanych molekułami¹⁰⁵⁵. Atomy w cząsteczce znajdują się w wirze energetycznym, stąd w celu zmiany ich układu lub wydobycia ich z cząsteczki potrzebny jest zapas energii wystarczający, by podnieść poziom energii atomów powyżej wartości progowej tak, by wynieść je „ponad garb” oddzielający stałą konfigurację atomów od innej konfiguracji „izometrycznej”.

Dochodzimy do samego sedna koncepcji życia Schrödingera. W panującym wówczas duchu genocentryzmu Schrödinger podał dwie zaskakujące hipotezy: „kryształ aperiodycznego” (ang. *aperiodic crystal*) i „zako-dowanego scenariusza” (ang. *code-script*)¹⁰⁵⁶. Fizyka wiązania chemicznego opisana przez teorię Heitlera-Londona w równym stopniu odnosiła się do cząsteczek, ciał stałych i kryształów¹⁰⁵⁷. Z punktu widzenia mechaniki

¹⁰⁵³ Tamże, s. 67–68.

¹⁰⁵⁴ Por. tamże, s. 68–70. Por. L. Moss, *What genes can't do*, s. 58–59.

¹⁰⁵⁵ Por. R. Olby, *The path to the double helix...*, s. 242.

¹⁰⁵⁶ Por. M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger's ghost...*, s. 59.

¹⁰⁵⁷ Por. L. Moss, *What genes can't do*, s. 59.

kwantowej wszystkie te terminy reprezentują ten sam stan materii. Zdaniem Schrödingera takie zdolności posiadane przez organizm żywy, jak utrzymywanie wewnętrznego porządku, niepopadanie w atomowy bezład, „sycenie się” uporządkowaniem przychylnego otoczenia – należy wiązać z obecnością aperiodycznych¹⁰⁵⁸ ciał stałych, będących cząsteczkami chromosomu¹⁰⁵⁹. W jego opinii owe ciała są najlepiej uporządkowanymi strukturami atomowymi, jakie dotąd poznano. Istniejący w organizmie żywym porządek jest, jak podkreśla, zdolny do samozachowania i do powodowania zdarzeń uporządkowanych. Schrödinger wprowadził więc pojęcie kryształu aperiodycznego, odnoszące się do cząsteczki cieszącej się stabilnością, która jest wystarczająco długa i ma wystarczająco heterogeniczny skład, by być domniemanym nośnikiem zakodowanej informacji umożliwiającej utrzymanie i reprodukcję zorganizowanych form życiowych¹⁰⁶⁰. Zgodnie z tym poglądem, kluczowym aspektem była więc kontrola każdej żywej komórki za pomocą skryptu w jakiś sposób zapisanego w jej chromosomach¹⁰⁶¹. Schrödinger postrzegał porcje kodu genetycznego, geny, jako kryształy aperiodyczne, fizycznie identyczne z molekułami i podlegające zwykłym siłom molekularnym. Bardziej niż zwykły (periodyczny) kryształ znany chemii organicznej ze swoim monotonnym powtarzalnym wzorem jego aperiodyczny odpowiednik prezentował się jako złożony, koherentny i konkretnie zaprojektowany¹⁰⁶². Austriacki przyrodnik wysuwa hipotezę, że gen jest liniowym, jednowymiarowym kryształem aperiodycznym¹⁰⁶³. Jeden taki kryształ lub para kierują uporządkowanym procesem życia, jednak zgodnie z prawem Boltzmanna, ich zachowanie musi być „nieprzewidywalnie niekonsekwentne”. Innymi słowy, Schrödinger zaobserwował, że replikacja genów nie była jedynie „nudnym procesem powie-

¹⁰⁵⁸ P. Płonka w następujący sposób wyjaśnia aperiodyczność: „Aperiodyczność – cecha struktury lub czasowego przebiegu procesu, polegająca na braku powtarzania się jakichkolwiek wyróżnionych elementów niższego rzędu. Charakteryzuje ona między innymi procesy indeterministyczne, ale nie zawsze jest jednoznaczna z przypadkowością; na przykład aperiodyczna sekwencja nukleotydów w genie jest z punktu widzenia kodu genetycznego niewątpliwie uporządkowana i niesie określoną informację. Również procesy chaotyczne wykazujące brak periodyczności są deterministyczne. Cecha ta utrudnia więc odróżnienie procesów chaotycznych od stochastycznych”. P. Płonka, *Aperiodyczność* [w:] Z. Otałęga (red.), *Encyklopedia biologiczna*, t. I, Opres, Kraków 1998, s. 170.

¹⁰⁵⁹ Por. E. Schrödinger, *Czym jest życie?*..., s. 94.

¹⁰⁶⁰ Por. L. Moss, *What genes can't do*, s. 59.

¹⁰⁶¹ Por. D. Fleming, *Émigré physicists*..., s. 173.

¹⁰⁶² Por. N. Williams, Irene Manton, *Erwin Schrödinger and the puzzle of chromosome structure*, „Journal of the History of Biology”, 48 (2015), s. 3.

¹⁰⁶³ Por. M.F. Perutz, *Physics and the riddle of life*, s. 557.

lania”, porównywalnym do trójwymiarowego wzrostu kryształu¹⁰⁶⁴. Wręcz przeciwnie – replikowana struktura (gen) jest aperiodyczna, zupełnie jak skomplikowane cząsteczki organiczne, w których zarówno każdy atom, jak i każda grupa atomów odgrywają w tym procesie określoną rolę.

Jego druga hipoteza, „zakodowany scenariusz”, zapewnia skupione na genie rozwiązanie problemu konwersji „porządku” genetycznych instrukcji na zorganizowaną złożoność komórek¹⁰⁶⁵. Dla organizmów wielokomórkowych oznaczało to, po pierwsze, porządek pięknej choreografii procesu rozwoju, po drugie, utrzymanie porządku w całym życiu dorosłego organizmu, co stanowiło o jego fizjologii. Hipoteza ta obejmowała również wykrywanie zużytych części molekularnych i ich naprawy: „Nazywając strukturę włókien chromosomowych »zakodowanym scenariuszem«, mamy na myśli, że wszechwiedzący demon Laplace’a, dla którego nie byłby tajemnicą żaden związek przyczynowy, potrafiłby na podstawie tej struktury przewidzieć, czy w odpowiednich warunkach z jaja powstanie czarny kogut czy dropiata kura, mucha czy kukurydza, rododendron czy żuk, mysz czy kobieta. Dodać powinniśmy, że wygląd komórek jajowych jest bardzo często zadziwiająco podobny. A jeśli nawet – jak w przypadku stosunkowo wielkich jaj ptaków i gadów – tak nie jest, to jaja różnią się nie strukturą, lecz ilością substancji odżywczej, jaką ze zrozumiałych względów muszą zawierać. Struktura chromosomowa jest zarazem narzędziem realizacji tego scenariusza. Jest jakby jednocześnie władzą ustawodawczą i wykonawczą, czy też – by użyć innego porównania – wizją architekta i budowlanym przepisem wykonawczym”¹⁰⁶⁶. Dla austriackiego fizyka gen jest więc „kodeksem praw i władzą wykonawczą” – „planem architekta i fachem budowniczego w jednym”¹⁰⁶⁷.

Kilku ówczesnych badaczy wykazywało analogię pomiędzy alfabetycznymi i chemicznymi kodami, używając do tego izomerycznych rozkładów podjednostek w dużej cząsteczce, jednakże tylko Schrödinger był w stanie pomóc innym zrozumieć to pojęcie, a przede wszystkim umożliwił im powiązanie „planu działania” „zakodowanego scenariusza” z krystalografią, a dokładniej z kryształem aperiodycznym¹⁰⁶⁸. Innymi słowy, patrząc na dziedziczność z perspektywy „modelu Delbrücka”, twierdził, że życie mogłoby być pojmowane jako przechowywanie i przekazywanie informacji

¹⁰⁶⁴ Por. R. Olby, *The path to the double helix...*, s. 246.

¹⁰⁶⁵ Por. M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger's ghost...*, s. 59.

¹⁰⁶⁶ E. Schrödinger, *Czym jest życie?*..., s. 33–34.

¹⁰⁶⁷ M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger's ghost...*, s. 60.

¹⁰⁶⁸ Por. R. Olby, *The path to the double helix...*, s. 246.

biologicznej¹⁰⁶⁹. Zrozumienie życia, które nieuchronnie powiązane musi być z odkryciem genu, może wykraczać poza znane prawa fizyki.

Schrödinger ilustruje ogromne możliwości kombinacyjne kodu genetycznego, posługując się przykładem dwóch symboli z alfabetu Morse'a jako elementów izomerycznych¹⁰⁷⁰. Pisze: „Dla ilustracji pomyślmy o alfabecie Morse'a. Dwa rozmaite znaki, kreska i kropka, zestawione maksimum po cztery, pozwalają utworzyć trzydzieści rozmaitych kombinacji. Gdybyśmy natomiast do kreski i kropki dodali trzeci znak i dopuścili kombinacje do dziesięciu znaków, liczba ich możliwych uporządkowań wzrosłaby do 88 572; w przypadku 25-znakowych kombinacji z pięciu znaków wyniosłaby 372 529 029 846 191 405. Można by argumentować, że porównanie to jest ułomne, ponieważ znaki alfabetu Morse'a dają się układać dowolnie (na przykład kropka – dwie kreski lub dwie kropki – kreska) i nie jest to dobre porównanie dla zjawiska izomerii. By zaradzić tej wadzie, przyjmijmy, że dopuszczalne są tylko kombinacje 25-znakowe z pięciu znaków, po pięć każdego (5 kropek, 5 kresek i tak dalej). Daje to w przybliżeniu 623 300 000 000 000 możliwych kombinacji (gdzie zera po prawej stronie oznaczają cyfry, których dokładniej nie chciało mi się policzyć)”¹⁰⁷¹. Alfabet Morse'a pokazał, jak za pomocą zaledwie dwóch symboli ułożonych w czwórki można uzyskać trzydzieści różnych kombinacji¹⁰⁷². Liczby atomów w chromosomach muszą być bardzo duże, by uzyskać niemal nieograniczoną liczbę możliwych kombinacji. Stało się jasne, że miniaturowy kod precyzyjnie oddaje wysoce skomplikowany i określony plan rozwoju i zawiera mechanizm pozwalający na jego realizację. Jak przebiega ten proces – tego Schrödinger wydaje się nie wiedzieć. Chodziło mu wyłącznie o zademonstrowanie, że nie istniały żadne szczególne bariery uniemożliwiające odpowiednią stabilność i kompleksowość wewnątrz genów. Dla tego celu, jak powiedział, nie było alternatywy dla molekularnego obrazu genu. Droga do przyszłości została otwarta. Badacze nie tracili czasu na odkrywanie, jak kod genetyczny zostaje przepisany na kompletny organizm i poddany dokładnej replikacji. Ponadto z ogólnego opisu substancji dziedzicznej Delbrücka wynika, że materia ożywiona mimo że nie omija „praw fizyki”, prawdopodobnie zawiera dotąd nieznaną jej prawa, które jednak (kiedy zostaną odkryte) tworzą właśnie tak integralną część nauki jak poprzednie¹⁰⁷³.

¹⁰⁶⁹ Por. J. Pietzsch, *The Nobel Prize in physiology or medicine...*

¹⁰⁷⁰ Por. G.S. Stent, *The coming of the golden age...*, s. 22. Por. G.S. Stent, R. Calendar, *Molecular genetics: an introductory narrative*, s. 27. Por. G.S. Stent, *Looking for other laws of physics*, s. 371–372. Por. tenże, *That was the molecular biology that was*, s. 392.

¹⁰⁷¹ E. Schrödinger, *Czym jest życie?*..., s. 56–57.

¹⁰⁷² Por. D. Fleming, *Émigré physicists...*, s. 174.

¹⁰⁷³ Por. G.S. Stent, *Max Delbrück, 1906–1981*, s. 366.

W przeciwieństwie do Johna Desmonda Bernala (wiodącego badacza w dziedzinie krystalografii, badania struktury substancji krystalicznych¹⁰⁷⁴), Schrödinger nie brał pod uwagę faktu, iż wirusy i chromosomy składają się z ogromnych cząsteczek nukleoproteinowych¹⁰⁷⁵. Pominięcie tak istotnego faktu jest co najmniej dziwne, gdyż podkreślał on dobitnie makrocząsteczkową naturę genów, jednakże istnieją dowody na to, iż celowo pominął te chemiczne aspekty. Jak ujął to Robert Olby – sposób, w jaki opisywały one makrocząsteczkę, według Schrödingera-fizyka nie odróżniał jej od innych skupisk w ciele stałym. Dlatego też nie znalazł wyjaśnienia na to, jak atomy w genie były utrzymane w stałej sekwencji pomimo pobudzenia cieplnego. W trakcie poszukiwań własnego rozwiązania przedstawił pogląd, że wszystkie stabilne konfiguracje atomu są ograniczone do stanu krystalicznego, a czynnikiem odpowiadającym za stabilność ciał stałych jest właśnie ich krystaliczność. Wszystkie ciała stałe są krystaliczne. Dlatego też wszystkie cząsteczki, których atomy znajdują się w stabilnym ułożeniu, muszą mieć formę ciał krystalicznych. „Bez wątpienia – pisze Olby – postrzeganie wszystkich oddziaływań międzyatomowych jako takich samych, to jest dających się opisać przy użyciu równania falowego (równania Schrödingera), wydaje się sensowne i tego właśnie Schrödinger oczekiwał. Co więcej, nie uznawał on podstawowej różnicy pomiędzy makrocząsteczkami, skupieniami atomów w monecie oraz grupą kryształów w miedzianym przewodzie [...]. Zrobił więc to, co wcześniej zrobili przeciwnicy makrocząsteczki, a mianowicie odmówił uznania wiązania kowalencyjnego za podstawową różnicę pomiędzy skupieniem krystalicznym a wiązaniem występującym w makrocząsteczce. Tym co odróżniało go od zwolenników teorii agregacji, były powody takiego zachowania: dla Schrödingera był to niepowtarzalny charakter oddziaływania Heitlera-Londona, a dla innych były to niepowtarzalne właściwości agregatów koloidalnych”¹⁰⁷⁶.

Schrödinger próbuje określić, na czym polega swoista cecha życia. Według niego o układzie materialnym mówimy, że jest żywy, wówczas, „gdy »czyni« on coś, porusza się, wymienia materię z otoczeniem itp., i to przez czas dłuższy niż moglibyśmy się tego spodziewać w przypadku materii nieożywionej w analogicznych okolicznościach”¹⁰⁷⁷. W izolowanym układzie nieożywionym lub umieszczonym w jednorodnym otoczeniu w wyniku róż-

¹⁰⁷⁴ Bernal jest także uważany za jednego z prekursorów biologii molekularnej, ponieważ jego techniki były niezbędne do pracy przy wczesnych badaniach struktury DNA. Por. E. Mendelsohn, *John Desmond Bernal* [w:] E. Mendelsohn (ed.), *Life sciences...*, s. 8.

¹⁰⁷⁵ Por. R. Olby, *The path to the double helix...*, s. 242.

¹⁰⁷⁶ Tamże, s. 243,

¹⁰⁷⁷ E. Schrödinger, *Czym jest życie?...*, s. 85.

nego rodzaju tarcia wszelki ruch stosunkowo szybko ustaje, a wskutek przewodnictwa ciepła zarówno temperatura, jak i różnice potencjałów elektrycznych i chemicznych ulegają wyrównaniu. Wszystkie związki chemiczne zostają ostatecznie utworzone i mamy w końcu do czynienia z martwym, bezwładnym układem materialnym. Ten trwały stan, w którym nie zachodzą żadne obserwowalne zdarzenia, nazywa Schrödinger stanem równowagi termodynamicznej bądź też stanem maksymalnej entropii. Ten stan, jak podkreśla, praktycznie osiągany jest zazwyczaj bardzo szybko, jednak teoretycznie najczęściej nie stwierdzamy jeszcze stanu absolutnej równowagi, a zbliżanie się do owej granicy następuje teraz bardzo powoli¹⁰⁷⁸. Dla austriackiego fizyka tym, co czyni organizm żywy zagadkowym, jest to, że nie ulega on szybkiemu popadaniu w beładny stan równowagi. Unika szybkiego zamierania – jak zauważa badacz – „dzięki temu, że je, pije, oddycha (a w przypadku roślin – asymiluje)”, a więc dzięki metabolizmowi.

W jaki sposób pożywienie podtrzymuje organizm przy życiu? W odpowiedzi na to pytanie Schrödinger stwierdza, że życie bazuje na „ujemnej entropii”: „Każdy proces czy zdarzenie, mniejsza o nazwę, wszystko, co dzieje się w przyrodzie, prowadzi do wzrostu entropii w tej przestrzeni, w której się ów proces odbywa. Tak więc, każdy organizm żywy produkuje dodatnią entropię, która stale wzrasta. Zbliża się tym samym do stanu maksymalnej entropii, czyli do śmierci. Trzymać się przy życiu może zaś dzięki temu, że pobiera z otoczenia ujemną entropię, która [...] jest dla niego czymś pozytywnym. To ona go zasila. Wyrażając się w sposób mniej paradoksalny, powiemy, że istotą metabolizmu jest pozbywanie się przez organizm entropii, którą – póki żyje – musi nieuchronnie produkować”¹⁰⁷⁹. Entropia to wymierna wielkość fizyczna¹⁰⁸⁰. W temperaturze zera absolutnego, a więc około 298 K (-273°C), entropia dowolnej substancji równa się zeru, a więc beładny cząsteczkowy nie odgrywa już żadnej roli¹⁰⁸¹. Możemy oczywiście spowodować, by dana substancja mogła stopniowo, małymi, odwracalnymi krokami, przejść w jakiś inny stan. To przejście, które może powodować zmianę własności chemicznych lub fizycznych tej substancji, czy też jej rozkład na inne powoduje, że entropia rośnie¹⁰⁸².

Austriacki fizyk wprowadza statystyczną interpretację entropii, aby w oparciu o nią wytłumaczyć, na czym polega zadziwiająca zdolność organizmów żywych do opóźniania procesu przechodzenia w stan równowagi

¹⁰⁷⁸ Por. tamże, s. 86.

¹⁰⁷⁹ Tamże, s. 87.

¹⁰⁸⁰ Por. tamże.

¹⁰⁸¹ Por. tamże.

¹⁰⁸² Por. tamże, s. 87–88.

termodynamicznej, czyli śmierci¹⁰⁸³. Statystyczna interpretacja drugiej zasady termodynamiki, rozwinięta przez Boltzmanna, Gibbsa i Maxwella i tłumaczona przez nich jako fizyczny substytut prawdopodobieństwa¹⁰⁸⁴, przyjmuje u tego badacza następującą postać: „W układzie izolowanym bądź znajdującym się w jednorodnym środowisku [...] entropia rośnie, a układ szybciej lub wolniej zdąża do beładnego stanu maksymalnej entropii”¹⁰⁸⁵. To fundamentalne prawo fizyki, jak zauważa Schrödinger, mówi o naturalnym dążeniu pozostawionych samym sobie układów do stanu chaosu. Organizm żywy „syci się ujemną entropią”, którą wchłania z otoczenia. Pobierana ujemna entropia powoduje, że zostaje zrównoważony wzrost dodatniej entropii, będący skutkiem wewnętrznych procesów życiowych, co w konsekwencji utrzymuje organizm w stanie stosunkowo niskiej entropii. Schrödinger uważa więc ujemną entropię za miarę porządku, w związku z tym stwierdza: „Sposób, za którego pośrednictwem organizm utrzymuje się w stacjonarnym stanie stosunkowo wysokiego uporządkowania (niskiej entropii), polega zatem na stałym »syceniu się« porządkiem otoczenia”¹⁰⁸⁶. Pokarmem zwierząt wyższych jest wysoce uporządkowana materia w postaci mniej lub bardziej złożonych związków organicznych, która po wykorzystaniu jest następnie wydalana w formie zdegenerowanej, ale i tak służącej jeszcze za pożywienie dla roślin¹⁰⁸⁷. Te z kolei karmią się ujemną entropią, głównie w postaci światła słonecznego.

Schrödinger nie uważa, by funkcjonowanie materii ożywionej dało się sprowadzić do zwykłych praw fizyki i to bynajmniej nie z tego powodu, że istnieje jakaś „nowa siła” odpowiedzialna za zachowanie poszczególnych atomów w organizmie żywym¹⁰⁸⁸. Twierdzi, że nie powinniśmy się tego spodziewać ze względu na budowę materii ożywionej, która zdecydowanie różni się od materii nieożywionej. Na dowód tego przedstawia najbardziej (w swojej ocenie) interesujące fakty, które odśłania współczesna nauka. Stwierdza: „Następstwo zdarzeń cyklu życiowego organizmu wykazuje niezwykłą regularność i uporządkowanie, przewyższające wszystko, z czym mieliśmy do czynienia w świecie nieorganicznym. Decydują o tym wysoce uporządkowane grupy atomów, stanowiące znikomą część tych, z których składa się komórka. Ponadto z poglądu, jaki wyrobiliśmy sobie na temat

¹⁰⁸³ Por. tamże, s. 89.

¹⁰⁸⁴ Por. L. Brillouin, *Termodynamika – cybernetyka – życie*, cz. I, tłum. K. Malinowski, „Problemy”, 11 (1974), s. 38.

¹⁰⁸⁵ E. Schrödinger, *Czym jest życie?*..., s. 89.

¹⁰⁸⁶ Tamże.

¹⁰⁸⁷ Por. tamże, s. 90.

¹⁰⁸⁸ Por. tamże, s. 93.

powstawania mutacji, wynika, że przemieszczenia nielicznych atomów, wchodzących w skład owych »grup decydujących« w komórce rozrodczej, wystarczają, by spowodować określoną zmianę makroskopowych cech dziedzicznych organizmu»¹⁰⁸⁹.

Zdaniem austriackiego przyrodnika w biologii, w przeciwieństwie do fizyki, niewielka, wysoce uporządkowana grupa atomów (komórka jajowa i organizm jednokomórkowy), istniejąca tylko w jednej kopii (czasem w dwóch), wywołuje zdarzenia, będące wzorem uporządkowania¹⁰⁹⁰. Prawidłowe następstwo tych zdarzeń jest skutkiem „mechanizmu”, który zasadniczo nie przypomina „praw probabilistycznych” fizyki¹⁰⁹¹. Sytuacji takiej nie spotykamy nigdzie indziej poza materią ożywioną¹⁰⁹². „Czy – zważywszy na władzę, jaką w każdej pojedynczej komórce ma jej urząd centralny – każdy z nich nie przypomina rozproszonych po całym organizmie agencji władzy lokalnej, komunikujących się ze sobą łatwo dzięki kodowi, który jest im wspólny?”¹⁰⁹³ – pyta Schrödinger.

Z głównego przesłania *What is life?* wyraźnie wynika, że austriacki fizyk określał nowe prawa fizyki mianem praw „porządku wynikającego z porządku” (ang. *order from order laws*) skontrastowanych z prawami „porządku wynikającymi z nieporządku” (ang. *order-from-disorder laws*)¹⁰⁹⁴. Pierwsze z nich nazywał też „dynamicznymi” („nowymi”), a drugie „statystycznymi”. Wprowadzając powyższe rozróżnienie nawiązuje on do poglądów Plancka, który w swoim eseju *Dynamische und statistische Gesetzmässigkeiten* (Dynamiczne i statystyczne prawidłowości), wydanym w 1914 roku, wprowadził podział na prawa dynamiczne, powiązane z mikroskopowym układem pojedynczych cząstek, oraz prawa statystyczne, odnoszące się do makroskopowego układu znacznej liczby cząstek¹⁰⁹⁵. Zarówno w fizyce, jak i biologii występował problem z redukcją jednego zbioru praw do drugiego, to jest od makroskopowego do mikroskopowego. Co więcej, opinie naukowców w tej kwestii znacznie różniły się od siebie. Podczas gdy Maxwell wykluczył możliwość redukcji praw statystycznych do wyjaśnienia skutków działania mechaniki Newtona w pojedynczych cząstkach, Planck był zdania, że próba dokonania tej redukcji była „głównym zadaniem postępującej nauki”. Z jego dzieła wydanego w 1914 roku jasno wynika, że w pewnym

¹⁰⁸⁹ Tamże, s. 94.

¹⁰⁹⁰ Por. tamże, s. 96–97.

¹⁰⁹¹ Por. tamże, s. 96.

¹⁰⁹² Por. tamże, s. 97.

¹⁰⁹³ Tamże, s. 96.

¹⁰⁹⁴ Por. tamże, s. 97.

¹⁰⁹⁵ Por. R. Olby, *The path to the double helix...*, s. 243.

momencie badacz miał nadzieję, że uda mu się zmniejszyć różnicę pomiędzy sposobem funkcjonowania makro- i mikroskopowych układów. Chciał to osiągnąć poprzez redukcję praw statystycznych do praw dynamicznych¹⁰⁹⁶. Co więcej, Planck przez długi czas cenił klasyczne pojęcie roli teorii prawdopodobieństwa w fizyce jako tymczasowego narzędzia, z którym można rozprawić się z łatwością, gdy natrafi się na przypadkowe czynniki. Podobne pragnienie kierowało Boltzmannem, który zainspirował Schrödingera nie tylko poprzez swoje dzieła, ale także poprzez swoich zwolenników. Dla Plancka, Boltzmanna i Schrödingera dziedzictwo Maxwella, a mianowicie problem rozkładu prędkości cząstek, było jednocześnie wielkim wyzwaniem i utrapieniem.

Mechanizm wyjaśniający powstawanie „porządku z nieporządku” pozwala – jak twierdzi Schrödinger – zrozumieć bieg zdarzeń przyrody, w tym zwłaszcza ich nieodwracalność¹⁰⁹⁷. „Prawa fizyki”, oparte na tej zasadzie, uważa on jednak za niewystarczające do tego, by wyjaśnić zachowania materii ożywionej. Jego zdaniem najbardziej swoiste cechy materii ożywionej wynikają w znacznym stopniu z zasady „porządek z porządku”. Kłopoty związane z wyjaśnianiem zjawisk życiowych w oparciu o zwykłe prawa czynią w pełni uzasadnione oczekiwanie na odkrycie „prawa fizycznego nowego rodzaju, leżącego u podstaw fizyki”¹⁰⁹⁸. Chociaż nowe, to jednak będą to dalej prawa fizyki, w żadnym wypadku nie będą niefizyczne, tym bardziej nadprzyrodzone. Innymi słowy, stanowisko Schrödingera opiera się na rozróżnieniu „porządku z nieporządku” i „porządku z porządku”, z których pierwszy jest dominującym dziedzictwem fizyki statystycznej, a drugim wynikiem nowych spostrzeżeń dostarczonych przez teorię kwantową mogących sprostać wyzwaniom biologii¹⁰⁹⁹. Pojęcie „porządku z nieporządku” nie jest w stanie sprostać takim wyzwaniom.

Ta nowa zasada – „porządek z porządku” – wywodzi się z teorii kwantów¹¹⁰⁰. W tym kontekście Schrödinger wprowadza następującą dygresję w formie poprawki do swojego wcześniejszego twierdzenia, że wszystkie prawa fizyki mają podłoże statystyczne: „Istnieją bowiem zjawiska, których cechy oparte są w sposób widoczny na zasadzie »porządek z porządku« i zdają się nie mieć nic wspólnego ze statystyką atomowego bezładu”¹¹⁰¹. Austriacki fizyk przyrównuje tę sytuację do zegara sprężynowego. Zegar

¹⁰⁹⁶ Por. tamże, s. 244.

¹⁰⁹⁷ Por. E. Schrödinger, *Czym jest życie?*..., s. 97.

¹⁰⁹⁸ Por. tamże, s. 98.

¹⁰⁹⁹ Por. L. Moss, *What genes can't do*, s. 56.

¹¹⁰⁰ Por. E. Schrödinger, *Czym jest życie?*..., s. 98.

¹¹⁰¹ Tamże, s. 98.

składa się z prawdziwych elementów fizycznych, tak więc w zasadzie nie może uciec przed prawdopodobnymi konsekwencjami fluktuacji termalnych¹¹⁰². Sposób, za pomocą którego zegar jest w stanie pokazać właściwą godzinę, wynika z zasady „porządku z porządku” jego mechanizmu. Opierając się na rozróżnieniu Plancka pomiędzy prawami „dynamicznymi” i „statystycznymi”, Schrödinger zapewnia: „Mechanizmy zegarowe mogą funkcjonować »dynamicznie«, ponieważ zbudowane są z ciał stałych, w których siły Londona-Heitlera są dostatecznie duże, by zniwelować skutki ruchu cieplnego w zwykłej temperaturze”¹¹⁰³.

Gen i zegar są do siebie podobne dlatego, że ich elementy są utrzymywane razem przez oddziaływanie Heitlera-Londona¹¹⁰⁴. Uściślając, zegar zachowuje się w sposób statystyczny, ale dla celów praktycznych można powiedzieć, że zachowuje się dynamicznie¹¹⁰⁵. Dzieje się tak, ponieważ w ciele stałym substancja w temperaturze pokojowej jest równa substancji w temperaturze bliskiej absolutnemu zeru, w której króluje prawo dynamiki¹¹⁰⁶. Aby podkreślić swoistość organizmu żywego jako systemu, austriacki fizyk wskazuje na różnice między nim a zegarem¹¹⁰⁷. Te różnice to: okoliczność, że wspomniane wcześniej tryby w organizmach wielokomórkowych są rozproszone, oraz fakt, że tryby te nie są dziełem człowieka, ale powstały zgodnie z regułami „boskiej mechaniki kwantów”. Procesy dynamiczne są osiągnięciem wynikającym z pewnego rodzaju organizacji, które dla założonych celów zachowują się tak, jak gdyby znajdowały się w temperaturze absolutnego zera¹¹⁰⁸. W temperaturze pokojowej mechanizm zegarowy funkcjonuje tak, jakby znajdował się w temperaturze absolutnego zera, co wynika z faktu, iż makroskopowa dynamika układu niweluje fluktuacje termalne¹¹⁰⁹. Życie również jest systemem „porządku z porządku”, jednakże podczas gdy zasada „porządku z porządku” zegara jest znana zegarmistrzowi, zasada „porządku z porządku” życia nie została jeszcze określona¹¹¹⁰. Dla Schrödingera porządek ten wynika z ciała stałego, kryształu aperiodycznego, który został usunięty z nieporządku ruchu cieplnego. Stąd życie musi wykształcić umiejętność niwelowania bądź przekraczania degradujących sił ruchu cieplnego. Jest to możliwe dzięki

¹¹⁰² Por. L. Moss, *What genes can't do*, s. 60.

¹¹⁰³ E. Schrödinger, *Czym jest życie?...*, s. 102.

¹¹⁰⁴ Por. R. Olby, *The path to the double helix...*, s. 244.

¹¹⁰⁵ Por. tamże, s. 244–245.

¹¹⁰⁶ Por. tamże, s. 245.

¹¹⁰⁷ Por. E. Schrödinger, *Czym jest życie?...*, s. 103.

¹¹⁰⁸ Por. L. Moss, *What genes can't do*, s. 60.

¹¹⁰⁹ Por. tamże, s. 60–61.

¹¹¹⁰ Por. tamże, s. 61.

procesowi, który dokonuje „translacji” porządku kryształu aperiodycznego do dynamiki komórki (i poza nią).

Powyższe okoliczności skłaniają austriackiego fizyka do wyciągnięcia wniosku, że „wszystkie zjawiska mechaniczne płyną wyraźnie i bezpośrednio z zasady »porządek z porządku«, przy czym termin »mechaniczne« należy brać w najszerszym sensie tego słowa”¹¹¹¹. Konkludując, przypomina, że do zasady „porządek z porządku”, która jest (w jego ocenie) kluczem do zrozumienia procesów życiowych, odwoływał się Planck, przyznając tej zasadzie priorytet¹¹¹². Planck uznał, że u podłoża procesów życiowych leży swoiście rozumiany mechanizm zegarowy. Choć Schrödinger nie uważa, by ten wniosek był „absurdalny” i „całkiem błędny”, to jednak podchodzi do niego – jak twierdzi – „ze znaczną dozą sceptycyzmu”.

Praca Schrödingera zapowiadała koniec pewnej ery w biologii¹¹¹³. Jego idee zastępowane były przez teoretyczny język teorii informacji, której nigdy nie wykorzystał do opisu swych teorii. Corning i Kline podkreślają, że wraz z wprowadzeniem teorii informacji pod koniec lat czterdziestych ubiegłego wieku problem, jak definiować porządek/organizację w świecie przyrody, zwłaszcza przyrody ożywionej, stał się dużo bardziej skomplikowany¹¹¹⁴. W zamyśle Claude’a E. Shannona termin „entropia” miał się odnosić wyłącznie do poziomu statystycznej nieoznaczoności (nieporządek) w danym kontekście, poprzedzającym określony fakt, podczas gdy informacja miała się odnosić do zdolności redukcowania tej statystycznej nieoznaczoności. Jeśli ktoś wykorzystuje bit binarny jako podstawową jednostkę miary, poziom statystycznej nieoznaczoności (entropia) może zostać zdefiniowany empirycznie jako funkcja liczby bitów wymaganych dla eliminacji tej nieokreśloności. Inni teoretycy przyciągani przez izomorfizm matematyczny pomiędzy entropią Shannona a formalizacjami entropii statystycznej Boltzmanna i Gibbsa, począwszy od lat czterdziestych starali się zastosować teorię informacji bezpośrednio do termodynamiki, co stanowiło przedsięwzięcie do którego sam Shannon starał się ich zniechęcać¹¹¹⁵. Zasadniczo wspólną cechą wszystkich tych wysiłków było to, że traciły one z pola widzenia oryginalny cel pomiarów entropii statystycznej. Fascynacja ogólnymi właściwościami nieokreśloności i/lub przewidywalności zaprowadziła kolejne pokolenia teoretyków w obszary dalekie od korzeni mechaniki staty-

¹¹¹¹ E. Schrödinger, *Czym jest życie?...*, s. 98–99.

¹¹¹² Por. tamże, s. 99.

¹¹¹³ Por. E. Yoxen, *Where does Schrödinger’s...*, s. 38.

¹¹¹⁴ Por. P.A. Corning, S.J. Kline, *Thermodynamics, information and life revisited, part I...*, s. 278.

¹¹¹⁵ Por. tamże, s. 278.

stycznej, co miało związek ze stworzeniem przez Clausiusa koncepcji entropii energetycznej. Jedną z konsekwencji poszerzenia obszaru badań nieokreśloności jako właściwości szeroko rozpowszechnionej w świecie zjawisk jest to, że koncepcje entropii i informacji zostały rozciągnięte daleko poza swoje znaczenia oryginalne, poza tym nadano im po kilka znaczeń, często niespójnych¹¹¹⁶.

3.3. „WIEDEŃSKIE” DZIEDZICTWO W BADANIACH NAD ORGANIZACJĄ ŻYCIA

Michael R. Hendrickson podkreśla, że austriacki fizyk, jeden z odkrywców mechaniki kwantowej, miał ważny wkład w samo powstanie biologii molekularnej, a zatem odegrał w niej kluczową rolę, w radykalny sposób zmieniając ramy koncepcyjne biologii¹¹¹⁷. Hendrickson ów wpływ dostrzega w trzech wymiarach. Po pierwsze, definicja pojęcia fali w mechanice kwantowej (za którą otrzymał Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki) była niezbędna w teorii Linusa Paulinga dotyczącej wiązania chemicznego. Teoria Paulinga doprowadziła z kolei do zmorfologizowania chemii, przekształcając drukowany symbol związku chemicznego, na przykład H_2O , w trójwymiarową strukturę. To doprowadziło do powstania biochemii strukturalnej ze wszystkimi znanymi obrazami interakcji biochemicznych „zamek i klucz”, takimi jak wiązanie przeciwciała–antygen i trójwymiarowe struktury białek, w tym enzymów z ich „aktywnymi stronami” (ang. *active sites* – szczelinami i rowkami), w których zostały ujawnione ich właściwości katalityczne. Wyjaśnienie zaś przez Watsona i Cricka trójwymiarowego modelu DNA było następstwem eksperymentów w budowaniu modeli, możliwym dzięki chemii strukturalnej Paulinga. Po drugie, praca Schrödingera *What is life?* przewidywała kluczowe okresy „ery heroicznej” w biologii molekularnej (1953–1970), które obejmują opracowanie informacyjnej molekuly DNA (jej kryształu aperiodycznego), kodu genetycznego (jej „kodu”) i – w niektórych odniesieniach – aktualne ramy dla bioenergetyki¹¹¹⁸. W opinii Hendricksona Austriak był pierwszym, który użył terminu „kod” w związku z biologią,

¹¹¹⁶ Por. tamże, s. 278–279.

¹¹¹⁷ Por. M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger's ghost...*, s. 52. Autor niniejszej rozprawy – podobnie jak Hendrickson – nie marginalizuje wpływu Schrödingera na przedmiot i profil badań nad życiem w drugiej połowie XX wieku, chociaż zdaje sobie sprawę, że nie wszyscy podzielają takie stanowisko. Dyskusje nad tym zagadnieniem przedstawiono w następnym rozdziale książki.

¹¹¹⁸ Por. tamże, s. 53.

a jego metafory zadomowiły się w genetyce molekularnej („kod”, „program”, „transkrypcja”, „translacja”, „edycja” i tak dalej). Po trzecie, rozprawa Schrödingera motywowała zmiany ścieżki kariery u wielu badaczy, którzy w kolejnych dziesięcioleciach stali się liderami w nowej dziedzinie – biologii molekularnej.

Hendrickson przekonuje jednak, że Schrödinger odgrywa paradoksalną rolę w historii biologii molekularnej: jego poglądy odpowiadały zarówno za spektakularne pojawienie się biologii molekularnej i, pośrednio, za jej radykalną rekonceptualizację¹¹¹⁹. *What is life?* nie tylko zapewniło koncepcyjne podstawy dla euforycznego rozwoju biologii molekularnej, ale również przewidziało nieadekwatności tej ostatniej i wskazało drogę do jej znaczącej alternatywy. W pewnym sensie Schrödinger był zarówno „konstruktorem”, jak i „destruktoorem”. Innymi słowy – według argumentu przedstawionego przez Hendricksona – praca austriackiego fizyka, poprzez przedstawienie głównej roli „molekuły nadrzędnej” (ang. *master molecule*) dała pojęciowe podstawy rozwoju redukcjonistycznego podejścia w biologii (badacz nazywa je „schrödingerowską perspektywą”), a podkreślając znaczenie samoorganizacji, dała również pojęciowe podstawy upadku redukcjonistycznego podejścia genetycznego („perspektywa poschrödingerowska”)¹¹²⁰.

Zasadne będzie skoncentrować się najpierw na „perspektywie schrödingerowskiej” w biologii molekularnej. Trzy dekady po publikacji *What is life?* Hendrickson określa jako „erę heroiczną” (ang. *heroic age*) biologii molekularnej, ponieważ doprowadzono wtedy do wyjaśnienia uniwersalnych mechanizmów genetycznych, takich jak replikacja, transkrypcja i translacja¹¹²¹. Prace doświadczalne wykazały, że substancja dziedziczna, „gen”, była kwasem dezoksyrybonukleinowym¹¹²². Uwaga następnie skupiła się na rozszyfrowaniu fizycznej struktury DNA – problem został rozwiązany w 1953 roku za sprawą modelu podwójnej helisy Watsona i Cricka. Wychodząc od modelu podwójnej helisy DNA Watsona i Cricka, w 1953 roku „era” ta została naznaczona wielkimi osiągnięciami, które zakończyły się sekwencjonowaniem całych genomów wielu organizmów, w tym – w 2001 roku – genomu ludzkiego¹¹²³. W ocenie Hendricksona program badawczy „ery heroicznej” w ogromnym stopniu był inspirowany i kierowany przez tezy wy-

¹¹¹⁹ Por. tamże, s. 46.

¹¹²⁰ Por. Ch. Malaterre, *Review: H.U. Gumbrecht, R.P. Harrison, M.R. Hendrickson, R.B. Laughlin, What is life? The intellectual pertinence of Erwin Schrödinger*, „International Studies in the Philosophy of Science”, 2(26) (2012), s. 231.

¹¹²¹ Por. M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger's ghost...*, s. 61.

¹¹²² Por. S. Sarkar, *Genomics, proteomics, and beyond*, s. 59.

¹¹²³ Por. M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger's ghost...*, s. 61.

łożone w *What is life?*¹¹²⁴ Przyjmując hipotezę Schrödingera co do „kryształu aperiodycznego” i „zakodowanego scenariusza”, biolodzy molekularni, jak podkreśla Hendrickson, w tym okresie „złamali” kod genetyczny¹¹²⁵, szczegółowo opisując, w jaki sposób DNA koduje białka, przedstawili podstawy komórkowych mechanizmów regulacyjnych oraz – za pomocą krystalografii rentgenowskiej – odkryli molekularną anatomię wielu białek. Ważne koncepcyjnie innowacje z lat sześćdziesiątych zawdzięczamy z kolei Monodowi i Jacobowi, którzy opracowali model „allosterii”, aby wyjaśnić kooperacyjne zachowanie białek, a także „operonowy” model regulacji genów¹¹²⁶. Model „allosterii” wyjaśnia, dlaczego niektóre cząsteczki (jak na przykład hemoglobina), cechują się zachowaniami kooperatywnymi. W przypadku hemoglobiny mamy do czynienia z nieliniowym wzrostem wiązania tlenu po inicjacji wiązania. Badacze tłumaczą to konformacyjnymi zmianami kształtu u podjednostek molekularnych hemoglobiny, gdy pierwsze cząsteczki tlenu zaczynają się z nimi wiązać. Operonowy model ekspresji genów wyjaśnia zwrotną regulację genów u prokariotów. Model ten tłumaczy, jak obecność substratu aktywuje wytwarzanie białka, które z nim współdziała i którego brak hamuje tę produkcję. Geny były dotychczas interpretowane jako sekwencje DNA – albo określające białka (geny strukturalne), albo kontrolujące działania innych genów (geny regulacyjne)¹¹²⁷. Być może najważniejszym wydarzeniem dla klasycznej biologii molekularnej było stworzenie „kodu genetycznego”, wyznaczającego relację sekwencji DNA z sekwencjami reszt aminokwasowych w białkach. Ekspresja genów miała miejsce poprzez transkrypcję DNA do RNA w chromosomach (w jądrze) i translacji tych transkryptów na białka w rybosomach (w cytoplazmie). DNA zaczęło być postrzegane jako cząsteczka „definiująca” życie – była to myśl, która pomogła zainicjować w latach dziewięćdziesiątych ogromne projekty sekwencjonowania genomu, mająca na celu wytworzenie opartej na genach kompletnej biologii spełniającej wszystkie obietnice molekularnej genetyki rozwojowej¹¹²⁸.

¹¹²⁴ Por. tamże.

¹¹²⁵ Kodu genetycznego nie należy mylić z informacją genetyczną. Kod genetyczny odnosi się do relacji pomiędzy trzema zasadami DNA, zwanymi „kodonami” oraz jednym aminokwasem. Tabele dostępne w podręcznikach biologii molekularnej wskazują na relację między 64 kodonami i 20 aminokwasami. Natrafiono jedynie na kilka wyjątków relacji kodowania w kilku anormalnych przypadkach. Natomiast informacja genetyczna odnosi się do liniowej sekwencji kodonów wzdłuż DNA, które ulegają transkrypcji do informacyjnego RNA i są później przekładane, by liniowo ugrupować aminokwasy w białku. Por. L. Darden, J. Tabery, *Molecular biology*.

¹¹²⁶ Por. S. Sarkar, *Genomics, proteomics, and beyond*, s. 59.

¹¹²⁷ Por. tamże.

¹¹²⁸ Por. tamże, s. 59–60.

Hendrickson stoi na stanowisku, że „era heroiczna” przyjęła i przerobiła tekstowo-semantyczne metafory, jakie wprowadził Schrödinger¹¹²⁹. Podczas pisania swojej pracy austriacki fizyk widział narodziny teorii informacji (Claude E. Shannon), cybernetyki¹¹³⁰ (Norbert Wiener), teorii informatyki i technologii komputerowej (Alan Turing, John von Neumann). Terminologia i koncepcje tych obszarów zapewniły obfity materiał do dalszego opracowywania metafory „zakodowanego scenariusza”.

Hendrickson twierdzi, że „kryształ aperiodyczny” Schrödingera był zapowiedzią modelu podwójnej helisy DNA Watsona i Cricka, którzy przypisali DNA szereg cech¹¹³¹:

- DNA jest samoreplikującą się cząsteczką (podstawą replikacji DNA jest komplementarność par zasad Watsona-Cricka),
- wewnętrzna struktura DNA gwarantuje jego stabilność i zdolność do przenoszenia informacji (kowalencyjne wiązania szkieletu cząsteczki DNA zapewniają jej stabilność, podczas gdy bogactwo kombinatoryczne czterocyfrowego alfabetu – A, T, C, G – zapewnia wystarczającą liczbę różnych sekwencji),
- DNA jest materiałem dziedzicznym (geny stanowią instrukcje dla kształtowania z surowców cegiełek życia – biomolekuł – do genetycznie określonej formy i przekazywane są z pokolenia na pokolenie),
- genom zasadniczo nie ulega zmianom w czasie życia organizmu (DNA, będąc zarówno repozytorium instrukcji niezbędnych do rozwoju organizmu i jego utrzymania, jak i programem, który wykonuje te instrukcje, z wyjątkiem rzadkich mutacji, utrzymuje się z pokolenia na pokolenie).

Zdaniem badacza „era heroiczna” dała częściową odpowiedź na pytanie Schrödingera odnośnie do przekładania się uporządkowania materiału dziedzicznego na strukturalną i funkcjonalną kolejność organizmu, to znaczy, jak genotyp jest tłumaczony na fenotyp¹¹³². Jedną z funkcji genu (zmolekularyzowanego jako DNA) jest kodowanie polipeptydów, które po złożeniu stają się białkami funkcjonalnymi w komórce. Bogactwo białek wynika z kombinatorycznych możliwości alfabetu składającego się z dwudziestu znaków.

¹¹²⁹ Por. M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger's ghost...*, s. 62.

¹¹³⁰ W cybernetyce wykorzystano dwa nowe narzędzia do badania układów ożywionych – teorię informacji oraz procesy samoregulujące się (homeostaza). Jedną z głównych cech charakteryzujących bioukłady jest ich zdolność do spontanicznej samoregulacji. Jest to umiejętność utrzymania wewnętrznej równowagi pomimo zmian zachodzących w zewnętrznym środowisku. Teoria informacji dotyczy transmisji sygnałów niezależnie od sposobu, w jaki są reprezentowane. Por. M. Bedau, *Artificial life*, https://myweb.space.wisc.edu/lshapiro/web/Phil554_files/BedauArtLife.pdf (26.09.2012).

¹¹³¹ Por. M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger's ghost...*, s. 62–63.

¹¹³² Por. tamże, s. 63.

Komórka wykorzystuje RNA (mRNA) jako pośrednika: fragmenty DNA odpowiadające genom są przepisywane z DNA na bardzo podobny kwas nukleinowy RNA za pomocą podstawowej komplementarności. Ten transkrypt RNA jest z kolei tłumaczony przez organelle subkomórkowe, rybosomy, w polipeptydy. Specyficzne nukleotydowe triplety (na przykład GGC) są tłumaczone na aminokwasy (na przykład glicynę); biochemiczną „tabelą przeglądową” zapewniającą właściwe tłumaczenie jest „kod genetyczny”. Częsteczki będące nośnikami tego kodu to zestaw około trzydziestu przenoszących molekuł RNA (tRNA), odpowiadających każdemu możliwemu tripletowi nukleotydowemu, z których każdy może wiązać się z odpowiednim aminokwasem¹¹³³. Konwencjonalnie uważa się, że kod Schrödingera przewiduje ten „kod genetyczny”¹¹³⁴.

Hendrickson podkreśla, że ta „molekularna narracja ekspresji genów” uosabia silną wersję genetycznego redukcjonizmu i stała się znana jako „centralny dogmat”, sformułowany w 1958 roku przez Cricka¹¹³⁵. „Centralny dogmat”, będący kluczową zasadą biologii molekularnej „ery heroicznej”, przyjmuje, że przepływ lub transkrypcja informacji genetycznej z DNA do informacyjnego RNA, a następnie jego translacja do białek, są ściśle jednokierunkowe (w skrócie: DNA → RNA → białko, nigdy odwrotnie)¹¹³⁶. Sednem „centralnego dogmatu” jest więc kładzenie nacisku na jednokierunkową przyczynowość¹¹³⁷. Zamiast cyrkularnego sprzężenia zwrotnego „centralny dogmat” obiecuje liniową strukturę związku przyczynowego, biegnącego od centrali DNA do odległych filii „fabryki białkowej”. Badacz przedstawia kilka konsekwencji powyższego twierdzenia¹¹³⁸:

- rolę kodu DNA jest kodowanie dla białek funkcjonalnych (podstawowa struktura białka, będąca specyficzną sekwencją aminokwasów, które je tworzą, spontanicznie układając się w trójwymiarową formę funkcjonalną),
- teza jeden gen – jedno białko [współliniowość, ciągła taśma (ang. *strip*) kodów DNA dla ciągłej taśmy aminokwasów],
- geny kodują cechy (równoważność genu molekularnego G_{Mol} i genu cechy G_{Cecha}),
- genom, będący agregatem genów, stanowi program organizmu (DNA jednoznacznym, spójnym i ostatecznym programem fenotypu komórki).

¹¹³³ Por. tamże, s. 63–64.

¹¹³⁴ Por. tamże, s. 64.

¹¹³⁵ Por. tamże.

¹¹³⁶ Por. J. Tabery, M. Piotrowska, L. Darden, *Molecular biology*.

¹¹³⁷ Por. E.F. Keller, *Metaphors of twentieth-century biology*, Columbia University Press, New York 1995, s. 93.

¹¹³⁸ Por. M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger's ghost...*, s. 64.

Wnioski te wspierają znane metafory DNA i jego kompetencji: „planu życia”, „programu organizmu”, „księgi życia” i tak dalej¹¹³⁹.

Badacz podkreśla, że „era heroiczna” w biologii molekularnej była możliwa dzięki mocy dwóch uproszczeń. Pierwszym była zmiana w oryginalnym pytaniu, co to jest życie, na bardziej podatne na weryfikację eksperymentalną: co jest chemiczną podstawą dziedziczności?¹¹⁴⁰ Innymi słowy, „era heroiczna” w biologii molekularnej przyjęła strategiczne przejście Schrödingera z kwestii życia na kwestie fizyczno-chemicznych podstaw dziedziczności¹¹⁴¹. To pierwsze uproszczenie było w perspektywie uzupełnione przez inne, metodologiczne: wszystkie badania w tym okresie wykorzystywały do swych eksperymentów bakterie (*E. coli*) i wirusy, które na nich żerują (bakteriofagi). W przeciwieństwie do organizmów doświadczalnych używanych przez „klasycznych” genetyków (takich jak groch ogrodowy i muszki owocowe) bakterie i bakteriofagi mają zaletę prostej budowy i stosunkowo prostej mikroanatomicznej struktury genetycznej, a także stosunkowo szybkiego rozmnażania się¹¹⁴². Te dwa uproszczenia umożliwiły powstanie dorobku „ery heroicznej” w biologii molekularnej i przyniosły zbiór podstawowych uniwersalnych mechanizmów biomolekularnych leżących u podstaw replikacji i ekspresji genów (komplementarność par zasad, kod genetyczny), a także potężny zestaw technik (klonowanie, sekwencjonowanie genu, reakcje łańcuchowe polimerazy), które stosuje inżynieria molekularna¹¹⁴³.

W opinii Hendricksona powszechny sukces programu badawczego „ery heroicznej” zawierał jednak również źródła jego destrukcji. Powódź danych, jaką wygenerowała, paradoksalnie ujawniła ograniczenia programu¹¹⁴⁴. Poprzez zapewnienie przejrzystego wglądu w złożoność układów ożywionych dane zmusiły naukowców do wejścia w kontekst, łączność, powstanie, przyczynowość i samoorganizację w świecie biomolekularnym. Złożoność układów ożywionych zakwestionowała pojęcie wszechmocnej „molekuły nadrzędnej”; dane ujawniły wyjaśniającą nieadekwatność „perspektywy schrödingerskiej” i wygenerowały popyt na alternatywne ramy koncepcyjne¹¹⁴⁵.

¹¹³⁹ Tamże, s. 65.

¹¹⁴⁰ Por. tamże, s. 98.

¹¹⁴¹ Por. tamże, s. 61.

¹¹⁴² Por. tamże, s. 61–62. W związku z powyższym, niekiedy na określenie początkowej fazy rozwoju biologii molekularnej używa się etykiety: „era cennej prostoty” (ang. *age of precious simplicity*). Por. tamże, s. 62.

¹¹⁴³ Por. tamże, s. 98.

¹¹⁴⁴ Por. tamże, s. 48.

¹¹⁴⁵ Por. tamże, s. 48–49.

Jak można scharakteryzować „perspektywę poschrödingerską” w biologii molekularnej? Zdaniem Hendricksona w ostatnich dekadach w biologii nastąpiła koncepcyjna zmiana¹¹⁴⁶. Alternatywa, którą badacz nazywa „perspektywą poschrödingerską”, zastąpiła redukcjonizm (całość jest całkowicie wytłumaczalna przez analizę jej części pozbawionych kontekstu) przekonaniem o konieczności uwzględnienia kontekstu oraz relacji poszczególnych części w konstrukcji całości¹¹⁴⁷. „Perspektywa poschrödingerska” przesunęła nacisk z pojedynczych genów na funkcjonowanie genomu jako całości¹¹⁴⁸. Ponadto w coraz większym stopniu genom jest obecnie postrzegany jako tylko jeden z zasobów rozwojowych i fizjologicznych komórki. Agencja rozwoju organizmu oraz jej ciągła funkcja jest prowadzana na całą komórkę, a w przypadku wielokomórkowych form życia – na cały organizm. Konstrukcja „molekuły nadrzędnej” – z jej pojęciami liniowej przyczynowości i scentralizowanej agencji – wydaje się obecnie ustępować innym obrazom: spontanicznie generowanemu porządkowi wiru w strumieniu lub ponownie emergentnemu, inteligentnemu zachowaniu kolonii mrówek, organizacji bez organizatora.

Według Hendricksona „perspektywa poschrödingerska” bazuje na dwóch podstawowych pojęciach: sieci i układach samoorganizujących się¹¹⁴⁹. Sieci były znane biochemikom przed Schrödingerem, współczesna biologia odkryła je i wdrożyła w szerszym kontekście. Jednakże w odniesieniu do pojęcia samoorganizacji „perspektywa poschrödingerska” musiała wykroczyć poza biologię, do termodynamiki nierównowagowej, domeny fizyków i chemików¹¹⁵⁰. Badacze ci – jak przekonuje Hendrickson – mieli zaczerpnąć swoją inspirację z drugiego klastra idei zawartych w samej pracy, który uaktywnił perspektywę „nadrzędnej molekuły”¹¹⁵¹. Ten drugi klastor dotyczył termodynamiki układów ożywionych (bioenergetyki). Zważywszy na to, że rzucającą się w oczy właściwością form żywych jest ich wysoki stopień organizacji komórkowej, Schrödinger zastanawiał się nad tym, jak ta organizacja jest możliwa we wszechświecie, w którym druga zasada termodynamiki gwarantuje rosnące nieuporządkowanie. Sugestie Schrödingera odnośnie do tego, jak może powstać i utrzymać się porządek, wykorzystano w następnych dekadach przy opracowywaniu termodynamiki układów otwartych (otwarte tyczy się przepływu materii i energii), utrzymywanych

¹¹⁴⁶ Por. tamże, s. 96.

¹¹⁴⁷ Por. tamże, s. 49, 96.

¹¹⁴⁸ Por. tamże, s. 96.

¹¹⁴⁹ Por. tamże, s. 49.

¹¹⁵⁰ Por. tamże, s. 49–50.

¹¹⁵¹ Por. tamże, s. 50.

z dala od równowagi. Jest to dość ogólna teoria regulująca zarówno ożywione, jak i nieożywione układy, w których uporządkowanie jest spontanicznie generowane. Przykłady fizycznych, nieożywionych, samoorganizujących się układów obejmują wzorce konwekcyjne ciepła i skomplikowane wzory, które pojawiają się w różnych układach chemicznych. Te „układy rozpraszające” są powtarzalne w określonych okolicznościach, zdolne do spontanicznego generowania uporządkowania bez potrzeby jakiegokolwiek „architekta”. Zatem drugi zestaw idei Schrödingera w *What is life?* zapewnił zdaniem Hendricksona ważny element ram koncepcyjnych – samoorganizację – konieczny, by przemyśleć jeszcze raz problematyczny genocentryczny program, jaki zainspirował jego pierwszy zestaw idei¹¹⁵². Ślady obu koncepcji Schrödingera Hendrickson odnajduje w biologii XXI wieku.

Pod koniec lat siedemdziesiątych stało się jasne, że prostota obrazu genetyki przyjęta po odkryciach poprzedniej dekady straciła swoją ważność¹¹⁵³. Do stanu kryzysu doprowadziły w szczególności ustalenia biologii molekularnej dotyczące eukariontów. Początkowy obraz został wygenerowany z eksploracji genomów prokariotów (mikroorganizmów niezawierających jądra komórkowego), zwłaszcza bakterii *Escherichia coli*. W prokariotach każdy odcinek DNA posiada funkcję konstrukcyjną lub regulacyjną. W latach siedemdziesiątych stwierdzono, że genetykę eukariontów (organizmy posiadające jądro komórkowe) cechuje niespodziewana złożoność. Duża część genomowych sekwencji DNA najwyraźniej nie ma funkcji: te segmenty „śmieciowego” DNA przeplatają się pomiędzy genami na chromosomach, a także wewnątrz genów. Po transkrypcji RNA niekodujące segmenty znajdujące się w obrębie genów są rozłączane przed translacją.

Regulacja genów w komórkach eukariotycznych jest jakościowo odmienna i bardziej skomplikowana niż u prokariotów, używając przykładowo niestandardowych kodów genetycznych¹¹⁵⁴. Dalsze prace w dziedzinie biologii molekularnej tylko poszerzały złożoność tego obrazu do tego stopnia, że uzasadnione stało się przypuszczenie, iż klasyczny obraz biologii molekularnej załamuje się. Transkrypty RNA są poddawane alternatywnemu składaniu, gdzie ten sam gen DNA odpowiada kilku białkom. RNA jest przetwarzane (bazy są dodawane i usuwane), zanim zostanie przełożone w rybosomie – często w takim stopniu, że trudno jest utrzymać niektóre kody genów dla danego białka. Nie ma również żadnego jednoznacznego powiązania pomiędzy ilością DNA w organizmie a jego morfologiczną lub behawioralną złożonością; obserwację tę niektórzy badacze określają mianem „paradoksu wartości C” lub „tajemnicą

¹¹⁵² Por. tamże, s. 50.

¹¹⁵³ Por. S. Sarkar, *Genomics, proteomics, and beyond*, s. 62.

¹¹⁵⁴ Por. tamże.

wartości C” („C” oznacza ilość DNA w genomie)¹¹⁵⁵. Co ważniejsze, okazuje się, że sporo tak zwanych śmieciowych DNA jest przepisywane do RNA, choć nie są one poddawane translacji¹¹⁵⁶. Zatem prawdopodobnie wiele z „śmieciowych” DNA jest funkcjonalnych, chociaż natura tych funkcji jest nadal przedmiotem kontrowersji. Ustalenia te były możliwe dzięki rozwojowi technologii opartych na reakcji łańcuchowej polimerazy (ang. *polymerase chain reaction*, w skrócie PCR) w latach osiemdziesiątych. Wymieńmy i opiszmy za Hendricksonem i Sarkar niektóre z głównych ustaleń biologii molekularnej dotyczące eukariontów, które podważyły prostotę genetyki¹¹⁵⁷:

1. „Centralny dogmat” biologii molekularnej jest błędny, jeśli jest rozumiany jako uniwersalne prawo biologiczne¹¹⁵⁸. Mylący jest na kilka sposobów. Podawany jest w wątpliwość, ponieważ sam genom nie wydaje się zawierać wszystkich informacji niezbędnych do ustalenia, które białko jest kodowane przez konkretny „gen”. Istnieją nakładające się na siebie geny, geny w genach, dwa lub więcej różnych białek może być określanych przez ten sam gen. Ten sam transkrypt może być łączony na różne sposoby. Nie wszystkie informacje wypływają z DNA do RNA i do białka. Istnieje więcej informacji niż informacja kodująca, na przykład informacja rezydująca w specyfice komplementarności zamka i klucza molekularnego. Bakterie są w pełni zintegrowanymi organizmami i wszystkie elementy (DNA, RNA i białka) są tkane bezproblemowo w zestawie wzajemnych zależności, które mogą być modelowane jako złożona sieć. Przykładowo replikacja, transkrypcja i translacja białka wymagają RNA. Ponadto zarówno białka (czynniki transkrypcji), jak i RNA (RNA niekodujące) pośredniczą w kontroli tych procesów. Odejście od „centralnego dogmatu” wynika więc z rozbudowy ról dla różnych rodzajów RNA i białka. Jest to osiągnięte przez zmniejszenie roli DNA. Inny problem z „centralnym dogmatem” powstaje przy przejściu z przyczynowości liniowej do przyczynowości cyrkularnej lub sieciowej.

¹¹⁵⁵ Por. tamże. Por. M. Cobb, *Największa tajemnica życia...*, s. 346.

¹¹⁵⁶ Por. S. Sarkar, *Genomics, proteomics, and beyond*, s. 62.

¹¹⁵⁷ Por. M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger's ghost...*, s. 68–74. Por. S. Sarkar, *Genomics, proteomics, and beyond*, s. 62–63. Por. tenże, *Molecular models of life. Philosophical papers on molecular biology*, A Bradford Book–The MIT Press, Cambridge–London 2005, s. 192–194.

¹¹⁵⁸ Część „centralnego dogmatu” „DNA do RNA” została obalona już 1970 roku. W tym roku w „Nature” ukazał się artykuł anonimowego autora (*Central dogma reversed*), w którym omawiano implikacje nowo odkrytego enzymu – odwrotnej transkryptazy. U niektórych wirusów, których materiałem genetycznym jest RNA, odkryto, że enzym ten może przepisać RNA z powrotem do DNA, które następnie zostaje umieszczone w genomie gospodarza. To odwrócenie rzuciło wyzwanie twierdzeniu o liniowym jednokierunkowym przepływie informacji od DNA do RNA i do białka. Por. E.F. Keller, *Metaphors of twentieth-century biology*, s. 93.

Tradycyjne pojęcia przyczyny i skutku zakładają liniową zależność między zdarzeniami: A powoduje B, B powoduje C. Kiedy już A, B i C są kołowo połączone (na przykład poprzez pętle sprzężenia zwrotnego), mamy problem „kury i jaja” – każde jest przyczyną i skutkiem działania drugiego. Dodatkowo, ważny jest mikroanatomiczny kontekst komórek: to, co robi komórka, jest silnie uzależnione od komórek wokół niej.

2. DNA jest zaangażowane w sieć relacji, a replikacja jest możliwa tylko z udziałem innych elementów. Replikacja DNA wymaga szeregu białek biorących udział w montażu nukleotydów w odpowiednim miejscu w odpowiednim czasie i innych zaangażowanych w edycję i naprawę uszkodzonych odcinków. Inne białka są włączone w replikację DNA w koordynacji z innymi złożonymi zdarzeniami, które występują w czasie podziału komórki.

3. Dziedziczna stabilność DNA jest właściwością emergentną. Źródła stabilności genetycznej nie można znaleźć w strukturze jednostki statycznej, ale stabilność jest sama w sobie produktem dynamicznego procesu.

4. Geny nie kodują cech dosłownie. Zamiast tego różne wersje (tak zwane allele) danego genu są przyczynowo zaangażowane w produkcję różnic wewnątrz danej cechy. Przykładowo „gen” brązowych oczu odgrywa rolę przyczynową w pigmentacji oczu, które w przeciwnym razie byłyby niebieskie. Pociąga to za sobą wytwarzanie białka (enzymu), co z kolei czyni możliwe wytwarzanie pigmentu melaniny, który nadaje kolor tęczęwce. Ponadto w wytwarzaniu cechy geny zwykle nie działają w izolacji – działają jako zespoły lub sieci. Na cechy mają również wpływy czynniki środowiskowe.

5. Pojęcie „gen” stosuje się w co najmniej dwóch rozróżnialnych znaczeniach. Pierwsze z nich (według Mendla i Morgana) to abstrakcyjny konstrukt teoretyczny, wskazujący na obserwowane cechy (kolor kwiatu) i może przybierać różne formy (fioletowe kwiaty, białe kwiaty) – allele, które śledzą warianty tej cechy („gen koloru kwiatu”, który może przyjmować wartości „biały” lub „fioletowy”). W rzeczywistości gen jest przyczynowo zaangażowany w generowanie cech. Cały genom jest odpowiedzialny za produkcję oka, które może być różnie pigmentowane. Geny są „twórcami różnic”. Różnice w klasycznych genach powodują jednolite różnice fenotypowe w poszczególnych kontekstach genetycznych i środowiskowych. W kolejnych dziesięcioleciach określenie „gen” nabyło drugi sens, oznaczający segment (ciągły lub przerywany) DNA kodujący RNA. Czasami termin jest ograniczony do kodującego proteiny RNA, a innym razem jest rozszerzany o DNA transkrybowane do RNA, niebędące tłumaczone na białko (to jest niekodujące RNA)¹¹⁵⁹.

¹¹⁵⁹ Lenny Moss używa Genu-P i Genu-D, by odróżnić te dwa sensy. Pisze: „W pierwszym rozdziale zasugerowałem, że »geny« są pojmowane na dwa sposoby. Co prawda można

6. Genom (agregat genów) nie programuje organizmu. Jeśli od programu wymaga się, by był jednoznaczny, spójny i wyraźny, to genom nie spełnia żadnego z tych wymogów. Nie wszystkie segmenty DNA w organizmach eukariotycznych posiadają funkcję kodującą lub regulacyjną. Większość polipeptydów określających sekwencje DNA jest nieciągła, składa się z egzonów (kodujących segmentów) oddzielonych intronami (niekodującymi odcinkami). W ludzkich genomach blisko 95% DNA może być bezfunkcyjne. W przeciwieństwie do hipotezy współliniowości, według której ciągle sekwencje kwasów nukleinowych generują łańcuch aminokwasów, odcinki DNA są często dzielone pomiędzy regiony kodujące i regiony niekodujące. Ponadto egzony mogą być oddzielane przez duże obszary tego niekodowania, przypuszczalnie „śmieciowego DNA”. Rozróżnienie pomiędzy egzonami i intronami stało się nawet bardziej skomplikowane, gdy odkryto alternatywny proces dzielenia. Serie egzonów mogą być dzielone wspólnie na kilka sposobów, co daje początek różnorodności produktów molekularnych. Odkrycia takie jak nachodzenie na siebie genów oraz alternatywne dzielenie zmusiły biologów molekularnych do przemyślenia zrozumienia tego, co

im przypisać status czynników określających pewne fenotypy (Gen-P), ale jedynie w stosunku do ograniczonej liczby cech i jedynie wówczas, gdy wiąże się to z określonymi korzyściami. [...] Drugie znaczenie genów (Gen-D) odnosi się do segmentu DNA określanego jako jednostka transkrypcyjna. Jest ona odpowiedzialna za dostarczanie wzoru informacji dla niektórych polipeptydów, ale jej powiązanie z fenotypem jest samo w sobie nieokreślone”. L. Moss, *What genes can't do*, s. 51–52. Gen-P jest definiowany przez swoją relację z fenotypem, z kolei Gen-D przez swoją sekwencję molekularną. James Tabery, Monika Piotrowska i Lindley Darden, aby zobrazować różnicę pomiędzy tymi dwoma pojęciami, odwołują się do przykładu. Mukowiscydoza jest jedną z najpowszechniej występujących chorób genetycznych dotyczących populację pochodzenia europejskiego. Choroba ta wynika z nieprawidłowości w białkach membrany komórkowej, których funkcja polega na transportowaniu chlorku pomiędzy komórkami i płynem pozakomórkowym. Osobniki otrzymują dwie kopie genu CFTR, jeden od każdego z rodziców. Jeśli osobnik otrzyma dwie zmutowane kopie tego genu, wtedy będzie brakować zasobów koniecznych do transportu chlorku, co doprowadzi do nierównowagi w pozakomórkowym chlorku, generującej śluz, który pokrywa komórki organizmu, potencjalnie prowadząc do śmiertelnych infekcji. Gdy mówi się o genach mukowiscydozy, wykorzystywane jest pojęcie Genu-P. Pojęcie to odnosi się do umiejętności znalezienia transmisji tego genu z pokolenia na pokolenie jako instrumentalnego wskaźnika mukowiscydozy, bez bycia zależnym od posiadania wiedzy o przyczynowej drodze pomiędzy określoną sekwencją DNA a ostateczną chorobą fenotypową. Z kolei pojęcie Genu-D odnosi się do jednego zasobu rozwojowego powiązanego ze złożonym postępem choroby, która wchodzi w interakcję z takimi zasobami. Gen-D jest pośrednikiem w odniesieniu do ostatecznej choroby fenotypowej. Ponadto w przypadku innych chorób, w których istnieją inne allele chorobotwórcze w tym samym umiejscowieniu, perspektywa Genu-D traktowałaby wszystkie te allele jako indywidualne geny, a perspektywa Genu-P traktowałaby je zbiorczo jako gen „odpowiadający” za chorobę. Por. J. Tabery, M. Piotrowska, L. Darden, *Molecular biology*.

tworzy gen. Ponadto białka ulegają szeregowi modyfikacji potranslacyjnych, w których pośredniczą inne białka. Ekspresja genomu (to, co robi) zależy od środowiska komórkowego. Ponadto organizm jest osadzony w środowisku, które odgrywa istotną rolę w rozwoju. Trzeba także brać pod uwagę „szum rozwojowy”, nieunikniony probabilistyczny element normalnego rozwoju. Przykładowo, gdy komórka rozwijającego się organizmu dzieli się, często mamy do czynienia z nierównomiernym rozkładem regulujących białek, co z kolei prowadzi do zróżnicowanego rozwoju linii komórek potomnych – dlatego identyczne bliźnięta (klony rozwijające się w tym samym środowisku) mają różne odciski palców. Trzeba też pamiętać, że ekspresja genomu zależy od stadium rozwoju organizmu. To samo białko może działać na różne sposoby w różnych stadiach rozwoju organizmu.

7. Genom (całość DNA) jest strukturalnie dynamiczny. Schrödingerskie umiejscowienie jądra komórki na uboczu jest głęboko mylące. Jest ono bardzo wrażliwym składnikiem komórki, monitorującym i korygującym działania typowych błędów genomowych, wyczuwającym niezwykle i niespodziewane zdarzenia i reagującym na nie, często poprzez restrukturyzację genomu. Wiemy o składowych genomach (transpozonach), które mogą być udostępnione w takiej restrukturyzacji. W bakteriach genom jest siedliskiem podobnych aktywności. Przejście bitów genomu z bakterii do bakterii jest powszechne („transmisja pozioma”), a częstość mutacji genomu bakteryjnego może być modulowana w zależności od warunków otoczenia. Niesprzyjające warunki prowadzą do mniej efektywnych korekt, wyższych poziomów mutacji i większego zróżnicowania genomów. To zwiększa szanse, że wyprodukowany zostanie wariant z powodzeniem mogący sprostać wyzwaniom zmienionego środowiska. Genomowe DNA wydaje się w coraz większym stopniu bazą danych zasobów genetycznych niż „wszechmocnym dyrektorem” Schrödingera.

Jak można scharakteryzować bioenergetykę w perspektywach „schrödingerskiej” i „poschrödingerskiej”? Druga część refleksji Schrödingera w *What is life?* dotyczy problematyki entropii/negentropii, w szczególności kwestii, w jaki sposób organizmy żywe uzyskują porządek z nieporządku za pomocą termodynamiki układów otwartych, będących daleko od stanu równowagi. Hendrickson przekonuje, że świat okazuje się znacznie bardziej skomplikowany, niż przewidywano w erze heroicznej¹¹⁶⁰. Poddaje więc reinterpretacji rozmyślenia Schrödingera nad „wsysaniem uporządkowania z otoczenia do organizmu”. Zauważa, że koncepcyjny aparat, jaki został stworzony w celu odniesienia się do problemów bioenergetyki, wzbogacił

¹¹⁶⁰ Por. M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger's ghost...*, s. 85.

konceptyjną strukturę genetyki molekularnej¹¹⁶¹. Doprowadziło to do powstania nowej wizji życia jako układu samoorganizującego się bez konieczności znajdowania miejsca dla witalistycznych pozamaterialnych sił, zapewniającej alternatywę dla idei „wszechmocnego genu”.

Schrödinger postawił paradoksalny problem: entropia zawsze wzrasta w układach zamkniętych, co prowadzi do śmierci cieplnej wszechświata¹¹⁶². Tymczasem, jak zauważył Darwin, złożoność wydaje się wzrastać w toku ewolucji. Jak można pogodzić te pozornie sprzeczne tezy? Pojawił się też inny problem: w jaki sposób uporządkowanie jest utrzymywane po wytworzeniu? Rozwiązaniem, jakie austriacki fizyk zasugerował na pierwszy problem, było stwierdzenie, że w drugiej zasadzie termodynamiki nie było niczego, co blokowałoby wzrost lokalnego uporządkowania (na przykład w bakterii) tak długo, jak długo dług entropii pozostawał splecony w innych częściach wszechświata (przez wydalenie przez bakterie produktów przemiany materii i ciepła do świata zewnętrznego). Do drugiego problemu Schrödingerowi było trudniej się odnieść, zwłaszcza że był niedoinformowany odnośnie do stanu biochemii w swoich czasach. Hendrickson zauważa, że odpowiedź na to, w jaki sposób uporządkowanie jest utrzymywane, wymaga ram koncepcyjnych (które nie były dostępne w 1943 roku) – termodynamiki nierównowagowej procesów nieodwracalnych, a w szczególności teorii struktur dyssypatywnych.

Wybitnym wczesnym badaczem termodynamiki nierównowagowej był Ilya Prigogine. Zdaniem belgijskiego fizyka pochodzenia rosyjskiego układy żywe nie są odizolowane od ich środowiska¹¹⁶³. Wszystkie bioukłady muszą wymieniać energię i materię z otoczeniem. Istotnym aspektem zachowania układów w warunkach dalekich od stanu równowagi jest obecność interakcji „sprzężenia zwrotnego” między ich komponentami (molekułami w chemii, komórkami w organizmie, neuronami w mózgu i indywiduami w społeczności)¹¹⁶⁴. Jeśli istnieją takie interakcje, wówczas dla określonego krytycznego przepływu energii lub materii do lub z układu może spontanicznie pojawić się nowy typ struktury lub organizacji. Struktury powstałe w tych warunkach całkowicie różnią się od struktur „równowagowych”, takich jak na przykład kryształ, który po ukonstytuowaniu się nie wymaga dalszego kontaktu z otoczeniem w celu przetrwania. Może być przechowy-

¹¹⁶¹ Por. tamże, s. 81.

¹¹⁶² Por. tamże, s. 82.

¹¹⁶³ Por. I. Prigogine, P.M. Allen, R. Henman, *The evolution of complexity and the laws of nature* [w:] E. László, J. Bierman (eds), *Goals in a global society*, Pergamon Press, New York 1977, s. 1.

¹¹⁶⁴ Por. tamże, s. 2.

wany przez czas nieokreślony bez używania energii. Sytuacja jest zupełnie inna dla struktur nierównowagowych w otwartych układach. Są one podtrzymywane jedynie przez stałe rozpraszanie energii i to właśnie z tego powodu Prigogine nazywa je strukturami „dyssypatywnymi”, a nie „równowagowymi” (jakimi są kryształy). Struktury dyssypatywne są przejawem samodzielnej organizacji. Ta samoorganizacja może przybierać różne formy. W układach chemicznych może ona polegać na rytmicznych zmianach kompozycji lub formacji wzoru stężenia. Procesy te obejmują spójny ruch miliardów cząsteczek i są wyraźnie sprzeczne z ideą „molekularnego nieporządku”. Możliwość, że takie zjawisko samoorganizacji mogłoby być podstawą naszego rozumienia ewolucji systemów biologicznych, zwiększa się, gdy uświadomimy sobie, że wszystkie układy żywe wydają się posiadać te „nielinio-we” oddziaływania sprzężenia zwrotnego między swoimi elementami. Przykładem mogą być złożone działania katalityczne enzymów i nukleotydów. Prigogine zauważa, że ewolucja struktur dyssypatywnych, zbadana w układach fizyczno-chemicznych, zawiera dwa komplementarne aspekty. W jednej fazie układ zachowuje się w sposób deterministyczny względem średnich wartości zaangażowanych zmiennych, podczas gdy w innej fazie wahania są amplifikowane do momentu modyfikacji całej struktury, po czym poprzednia faza jest ponownie realizowana w innych okolicznościach. Dokładny charakter wahań jest na podstawie średnich z natury nieprzewidywalny.

Belgijski fizyk twierdzi, że nawet w najprostszych komórkach funkcja metaboliczna obejmuje kilka tysięcy sprzężonych reakcji chemicznych, wymagając w konsekwencji niezwykle wyrafinowanego mechanizmu dla ich koordynacji i regulacji¹¹⁶⁵. Ponadto reakcje metaboliczne wymagają konkretnych katalizatorów, enzymów, które są dużymi molekułami posiadającymi przestrzenną organizację, a organizmy muszą być zdolne do syntetyzowania tych substancji. Katalizator jest substancją przyspieszającą określone reakcje chemiczne, lecz nie bierze udziału w reakcji. Każdy enzym lub katalizator wykonuje jedno konkretne zadanie, a jeśli spojrzymy na sposób, w jaki komórka realizuje złożoną sekwencję operacji, okazuje się, że jest ona zorganizowana dokładnie na tej samej zasadzie, co współczesne „linie produkcyjne”. Ogólna modyfikacja chemiczna, jaka musi być wykonana, dzieli się na kolejne elementarne etapy, z których każdy jest katalizowany przez określony enzym¹¹⁶⁶. Taka organizacja jest w dość oczywisty sposób sprzeczna z ewolucją zmierzającą w kierunku molekularnego nieporządku. Porządek biologiczny jest zarówno strukturalny, jak i funkcjonalny, a na poziomie komórkowym i ponadkomórkowym przejawia się w postaci szere-

¹¹⁶⁵ Por. tamże, s. 17.

¹¹⁶⁶ Por. tamże, s. 18.

gu struktur i sprzężonych funkcji o rosnącej złożoności i hierarchicznym charakterze. Jest to sprzeczne z koncepcją ewolucji opisaną w termodynamice układów odizolowanych i zamkniętych.

Prigogine przyjmuje, że procesy życiowe wynikają bezpośrednio z praw fizyki odpowiadających konkretnym oddziaływaniom nieliniowym oraz warunkom dalekim od równowagi¹¹⁶⁷. Te szczególne właściwości mogą następnie umożliwić przepływ energii i materii w celu budowy i utrzymania funkcjonalnego i strukturalnego porządku. Istnieje uderzająca różnica pomiędzy składem chemicznym nawet najprostszych komórek a ich środowiskiem. Belgijski fizyk pisze: „Jesteśmy w pewnym sensie przybyszami z innego świata, którzy próbują zrozumieć swoje pochodzenie po znalezieniu domu na przedmieściach. Oczywiście ów dom nie znajduje się w konflikcie z prawami mechaniki, inaczej by się zapadł. Jednak nie ma to znaczenia; nas interesuje technologia dostępna dla budowniczych, dobór materiałów, potrzeby mieszkańców, ich poczucie estetyki i tak dalej. Domu tego nie można zrozumieć w odłączeniu od kultury, w jakiej jest on osadzony. Ponadto dom ten jest układem otwartym i nie może być rozpatrywany w izolacji. To samo odnosi się do cząsteczek biologicznych, takich jak białka lub kwasy nukleinowe. Ich architektura ściśle odpowiada prawom chemii fizycznej. Mimo to musimy zrozumieć strukturę otoczenia, w jakim formują się białka. Mówiąc inaczej: naszym celem jest zrozumieć strukturę biologiczną i społeczną jako zjawiska, na które wpływają – i same mogą wpływać – na otoczenie, a także jako zjawiska zachodzące spontanicznie w układach otwartych utrzymywanych daleko od równowagi”¹¹⁶⁸.

Prigogine, streszczając swoje poglądy w interesującym nas temacie, podkreśla, że organizacja biologiczna obejmuje nowy rodzaj struktury, która ma inne pochodzenie i wymaga innego wyjaśnienia od cechujących równoważne struktury, takie jak kryształy¹¹⁶⁹. Cechą struktur biologicznych jest to, że występują one w układach otwartych i ich organizacja zależy zasadniczo od wymiany materii i energii z otaczającym środowiskiem, jednakże otwartość układu nie jest warunkiem wystarczającym do zapewnienia pojawienia się struktury¹¹⁷⁰. Belgijski naukowiec wyjaśnia, że jest to możliwe tylko wtedy, gdy układ jest utrzymywany „daleko od równowagi” oraz gdy istnieją określone rodzaje „nieliniowych” mechanizmów oddziałujących pomiędzy różnymi elementami układu¹¹⁷¹.

¹¹⁶⁷ Por. tamże, s. 19.

¹¹⁶⁸ Tamże.

¹¹⁶⁹ Por. tamże.

¹¹⁷⁰ Por. tamże, s. 19–20.

¹¹⁷¹ Por. tamże, s. 20.

Układ otwarty może istnieć w trzech różnych reżimach¹¹⁷². Pierwszy obejmuje stan równowagi termodynamicznej, w którym pływy i prądy wyeliminowały różnice temperatury lub stężenia, a entropia wzrosła do nowej, większej wartości i osiągnięta została jednorodność. Dla układów odizolowanych jest to stan maksymalnego molekularnego nieporządku, maksymalnej entropii, przy czym stan równowagi jest regulowany przez zasadę porządku Boltzmanna. Druga możliwa forma istnienia odnosi się do układu, który tylko nieznacznie odbiega od równowagi i w którym są utrzymywane niewielkie różnice temperatury lub stężenia, zaburzając jego równowagę. Jeśli to zaburzenie jest wystarczająco małe, możemy wówczas analizować układ, uwzględniając niewielką korektę dla stanu równowagi – dlatego też stan taki określa się mianem „stanu liniowej nierównowagi”. Da się jednak dla niego wykazać, że układ zbliża się możliwie najbardziej do poziomu maksymalnego molekularnego porządku i że pojawienie się jakiegokolwiek nowej struktury lub organizacji nie jest możliwe. Jednakże sytuacja zmienia się diametralnie w trzecim możliwym układzie, powstałym w wyniku utrzymywanych ograniczeń, które znacząco oddalają układ od stanu równowagi. To właśnie w takich warunkach nowe struktury i nowe rodzaje organizacji mogą pojawić się spontanicznie i są one określane jako „struktury dyssypatywne”. Drugą podstawową funkcją niezbędną do pojawienia się struktur dyssypatywnych jest istnienie określonych typów nieliniowych mechanizmów interakcji, które oddziałują między elementami układu (na przykład hydrodynamiczne równania opisujące zachowanie płynu w obliczu gradientów temperatury dostarczają właśnie takiej nieliniowości). Najbardziej uderzającym przykładem dyssypatywnych struktur jest naczynie z płynem ogrzewanym równomiernie od spodu. Gdy ogrzewanie jest łagodne, ciepla substancja znajduje się w drugim reżimie liniowej nierównowagi, a ciepło przenika taką ciecz poprzez przewodzenie. Jeśli jednak ogrzewanie jest intensywne, przy pewnym ściśle określonym konwekcyjnym gradiencie temperatury nagle, spontanicznie pojawią się regularne komórki. Odpowiada to wysokiemu stopniowi organizacji cząsteczkowej w momencie, gdy energia przechodzi z termicznej agitacji do makroskopowych prądów konwekcyjnych. Zasada porządkowania Boltzmanna przypisałaby prawie zerowe prawdopodobieństwo takiemu zdarzeniu – jest ona zwyczajnie niezdolna do opisanie zjawiska tego typu. Możemy sobie wyobrazić, że zawsze istnieją nikle prądy konwekcyjne występujące jako wahania względem średniego stanu, gdzie poniżej pewnej krytycznej wartości gradientu temperatury fluktuacje te są tłumione i znikają¹¹⁷³. Powyżej pewnej krytycznej wartości pew-

¹¹⁷² Por. tamże.

¹¹⁷³ Por. tamże, s. 20–21.

ne wahania są zaś wzmacniane i powodują powstanie makroskopowego prądu¹¹⁷⁴. Pojawia się wówczas nowy molekularny porządek, który odpowiada w zasadzie olbrzymiej fluktuacji ustabilizowanej przez wymianę energii ze światem zewnętrznym. Jest to porządek charakteryzujący się występowaniem struktur dyssypatywnych. W przeciwieństwie do struktur równowagowych struktury dyssypatywne mogą cechować się spójnymi zachowaniami obejmującymi współpracę wielu jednostek.

W opinii Corninga i Kline’a wizja życia belgijskiego fizyka jest podobna do pomysłu Schrödingera – on również charakteryzuje układy ożywione w kontekście termodynamicznym jako dalekie od równowagi struktury rozpraszające, żywiące się energią¹¹⁷⁵. To, co zostało przez Prigogine’a do koncepcji Schrödingera dodane, to „mechanizm” ewolucyjny, który badacz nazywa „uniwersalnym prawem ewolucji”. Zdaniem belgijskiego fizyka „porządek” ewoluuje spontanicznie w układach otwartych w związku z ciągłymi dostawami energii. Układy te mogą tworzyć niestabilności strukturalne, które z kolei przejawiają potencjał do tworzenia perturbacji czy też „fluktuacji” prowadzących do większej „złożoności”. Prigogine mówi o tej dynamice przyczynowej jako o zasadzie „porządku przez fluktuacje”, a układ ożywiony charakteryzuje jako „ogromną fluktuację stabilizowaną przez wymiany materii i energii”. Jak sam zauważa, jest to „autokatalityczna teoria ewolucji”. Zgadza się on również z Schrödingerem, że „w czasie ewolucji, układ może osiągnąć stan, w którym entropia będzie niższa od entropii początkowej”¹¹⁷⁶.

Hendrickson zauważa, że odkrycie struktur dyssypatywnych, wyjaśnianych za pomocą termodynamiki nierównowagowej, pozwoliło uzupełnić dokonania Schrödingera¹¹⁷⁷. Ich niesamowite podobieństwo do organizmów żywych sprowokowało nazwę „organizmy fizyczne” (ang. *organisms of physics*)¹¹⁷⁸. Układy dyssypatywne są termodynamicznie otwartymi układa-

¹¹⁷⁴ Por. tamże, s. 21.

¹¹⁷⁵ Por. P.A. Corning, S.J. Kline, *Thermodynamics, information and life revisited, part I...*, s. 278.

¹¹⁷⁶ W ocenie Corninga i Kline’a jednym z problemów dotyczących omawianej koncepcji życia jest to, że Prigogine nie dokonuje rozróżnienia pomiędzy „porządkiem” a „organizacją” funkcjonalną, a wykorzystuje te terminy zamiennie. Tym samym nie widzi żadnej trudności w zastosowaniu zasady eksplanacyjnej w odniesieniu do tworzenia się komórek konwekcyjnych (ang. *Benard cells*) w garnku z podgrzewaną wodą, podobnie do złożonych mechanizmów kontroli, związanych z glikolizą, bądź wysoce skoordynowanymi transformacjami funkcjonalnymi, występującymi wraz z upływem czasu w kolonii pleśni komórkowej *Dictyostelium discoideum*. Tym samym jest to teoria, która sięga zdecydowanie zbyt daleko – pointują Corning i Kline. Por. tamże, s. 278.

¹¹⁷⁷ Por. M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger’s ghost...*, s. 82.

¹¹⁷⁸ Por. tamże, s. 82–83.

mi, utrzymywanymi z dala od równowagi przez ciągły przepływ materii i energii¹¹⁷⁹. W odpowiednich warunkach takie układy mogą ulegać przestrzennej samoorganizacji z jednoczesną poprawą wydajności energetycznej. Fizyczno-chemiczne struktury dyssypatywne w odpowiednich warunkach przekształcane są z chaotycznego roju losowo poruszających się submikroskopowych cząsteczek w widzialną postać, która obejmuje skoordynowane ruchy milionów cząsteczek na rozszerzonym terytorium. Będzie ona trwać w nieskończoność tak długo, jak długo trwa dostarczanie energii i materii. Komórki konwekcji ciepła Bénarda i autokatalityczne reakcje Biełousowa-Żabotyńskiego są dobrze rozpoznanymi przykładami laboratoryjnymi takich układów. Wszystkie one są przykładem emergencji formy bez interwencji organizatora (ang. *organizer*), to jest samoorganizacji. Materialna kompozycja struktury zawsze ulega zmianie, chociaż forma utrzymuje się, a wszystko to przebiega bez centralnego kierunku.

Bruce Weber pojawiające się samoorganizujące wzory czasoprzestrzenne zaobserwowane w reakcji Biełousowa-Żabotyńskiego dostrzega w systemach biologicznych [takich jak śluzowa forma agregacji (ang. *slime mold aggregation*) lub wzory elektryczne w czynności serca]¹¹⁸⁰. Badacz ten podkreśla, że takie zjawiska są znajdowane nie tylko w komórkach i organizmach, ale także ekosystemach, co umacnia przekonanie, że perspektywa szerszych systemów jest konieczna jako część nowej fizyki. Dynamika nieliniowych interakcji (gdzie odpowiedzi systemu mogą być dużo większe niż bodziec) i autokatalitycznych cykli są dla takich zjawisk istotne. Zakładając, że katalizatory w systemach biologicznych są kodowane w genach DNA, jedynym założeniem do rozpoczęcia definiowania życia jest postrzeganie układów ożywionych jako informacyjnych, autokatalitycznych, cyklicznych jednostek, które powstają i rozwijają się pod podwójnym dyktandem drugiej zasady termodynamiki i selekcji naturalnej. Takie nieredukcyjne podejście łączy zjawiska życiowe z podstawowymi prawami fizyki i chemii. Inni wyczuwają, jak zauważa Weber, że potrzeba nawet bogatszej fizyki, by w odpowiedni sposób wyłapać samoorganizujące się zjawiska obserwowane w biologii i spekulować, że ostatecznie konieczne jest „czwarte prawo” termodynamiki mówiące o takich zjawiskach. Złożoność sama w sobie nie jest życiem, ale czymś, co można określić jako „siedlisko życia”. Istoty żywe przejawiają złożoną, funkcjonalną organizację oraz zdolność do stania się na przestrzeni pokoleń bardziej przystosowanymi do swoich środowisk, w których zachodzące zjawiska reprezentują wyzwanie dla wyja-

¹¹⁷⁹ Por. tamże, s. 83.

¹¹⁸⁰ Por. B. Weber, *Life*.

śnień fizycznych opierających się na założeniach redukcjonistycznych. Poprzez odwołanie się do dynamiki układów złożonych stwarzamy sytuację, że teorie oparte na fizyce mogą zdecydowanie odnieść się do zjawisk emergencji bez uciekania się do rodzaju „witalizmu”, który bywał tolerowany na początku XX wieku.

Hendrickson pokazuje, jak należy postrzegać metabolizm w XXI wieku – analizuje pospolitą bakterię jelitową – *E. coli*, zanurzoną w środowisku, które zawiera tylko glukozę i niezbędne minerały¹¹⁸¹. W cudowny sposób bakteria przekształca „uporządkowanie” cząsteczki glukozy w „uporządkowanie” swoich cząsteczek składowych, w tym ściany komórkowej, błony komórkowej, enzymów, białek strukturalnych i kwasów nukleinowych. Czyni to poprzez sieć reakcji enzymatycznych, które łącznie składają się na złożoną sieć pośredniczącego (ang. *intermediary*) metabolizmu, który tworzy, podtrzymuje i regeneruje bakterię¹¹⁸². „Charakterystyczną cechą metabolizmu pośredniczącego – pisze Hendrickson – jest pozyskiwanie energii z wiązań chemicznych glukozy i jej uchwycenia w postaci ATP – uniwersalnej waluty energetycznej. Waluta ta może być wydana na prowadzenie reakcji chemicznych zaangażowanych w syntezę, między innymi złożonych cząsteczek charakterystycznych dla życia: białek, kwasów nukleinowych, DNA (RNA), węglowodanów i lipidów (błona komórkowa). Podążamy tą starożytną bioenergetyczną trajektorią, kiedy jemy, rośniemy i regenerujemy się, wydalamy i wydzielamy ciepło. Nasz skład materialny ciągle się zmienia; cząsteczki z wczorajszej kolacji włączone zostają w nasze składowe cząsteczki, dosłownie od stóp do głów”¹¹⁸³.

Hendrickson porównuje życie do powolnego spalania. W szczególności dostrzega podobieństwa szczególnie między dwoma ożywionymi i nieożywionymi zorganizowanymi strukturami dyssypatywnymi: bakterią i płomieniem¹¹⁸⁴. Płomień świecy, jako układ dyssypatywny, ma względnie stałą formę (z migotaniem), ale nie ma trwałej materialnej podstawy. Materia i energia przepływają przez płomień tak długo, jak długo dostępny jest воск, który płonie i tlen, który podtrzymuje reakcję. Spalanie świecy i metabolizm komórkowy są na równi przypadkami spalania. W obu występuje utlenianie wraz z ogólnym wzrostem światowej entropii. Oba (płomień i organizm) obejmują strukturę, która utrzymuje się tak długo, jak długo energia i materia przepływają przez nią. W obu strukturach wymiana materii i energii jest wymagana do utrzymywania uporządkowanej formy (obie są układami

¹¹⁸¹ Por. tamże, s. 83.

¹¹⁸² Por. tamże, s. 83–84.

¹¹⁸³ Tamże, s. 84.

¹¹⁸⁴ Por. tamże.

otwartymi): dla świec jest to topiony wosk i eliminowane ciepło oraz sadza, zaś dla organizmów jest to przyjmowany pokarm i wydalone odpady oraz ciepło. Uwagze Hendricksona nie umykają również znaczące różnice między tymi strukturami. Komórki i świece pracują w bardzo różnych temperaturach. Wysokie temperatury są wymagane do zerwania wiązań cząsteczek wosku, enzymy (białka) zaginają wiązania biomolekuł tak, że łączenie może nastąpić w temperaturze organizmu (enzymy są w zasadzie katalizatorami)¹¹⁸⁵. Energia świecy jest tracona w postaci ciepła i światła, energia generowana przez metabolizm zostaje pochwycona w użytecznej formie, cząsteczkach ATP¹¹⁸⁶. Energia ta może być następnie wykorzystana do budowy złożonych biomolekuł konstytutywnych dla życia. Spalenie świecy i powolne spalanie zachodzące w organizmie to kontrast jak między pożarem benzyny a regulowanym spalaniem w silniku samochodu w drodze do pracy.

Obecnie wielu badaczy stosuje „perspektywę systemową” w wyjaśnianiu bioukładów. Utarło się nawet przekonanie, że biolodzy żyją obecnie w „erze systemów”, w odróżnieniu od wcześniejszej „ery mechanizmów”¹¹⁸⁷. W ostatnim czasie gwałtowny rozwój w obszarze bioinformatyki doprowadził do znaczącego zapotrzebowania na naukowców posiadających umiejętności analizowania znacznych ilości danych¹¹⁸⁸. Zaplecze matematyczne zapewnia wartościowe umiejętności w tym zakresie, więc naukowcy zajmujący się przetwarzaniem danych świetnie prosperują w dziedzinie genomiki. Nie ma wątpliwości, że po rewolucji w genetyce w latach siedemdziesiątych, napędzanej rozwojem chemii, druga rewolucja w tej dziedzinie spowodowana była przez nowe metody obróbki danych. Istnieje głęboka potrzeba wykraczania poza analizę indywidualnych i odizolowanych elementów systemu na rzecz kwantyfikacji, modelowania i zrozumienia zintegrowanej organizacji i interakcji elementów w ramach układu¹¹⁸⁹. Zrozumienie komponentów systemowych pozostanie niezwykle ważne w biologii, ale skupianie się na strukturalnych i interaktywnych właściwościach układów pomoże uzupełnić naszą wiedzę i poprawić zdolności predykcyjne. Ostatecznym celem jest informacja o współdziałaniu ze sobą w czasie i przestrzeni podczas wytwa-

¹¹⁸⁵ Por. tamże, s. 84–85.

¹¹⁸⁶ Por. tamże, s. 85.

¹¹⁸⁷ Por. J.M. Marcum, *The conceptual foundations...*, s. 2. Por. M. Twardowski, *Perspektywa systemowa w wyjaśnianiu układów biologicznych* [w:] K. Kropiwiec, M. Szala (red.), *Nauka, filozofia, kultura...*, s. 35–46.

¹¹⁸⁸ Por. A. Jogalekar, *Physicists in biology...*

¹¹⁸⁹ Por. J.S. Robert, *Molecular and systems biology and bioethics* [w:] D.L. Hull, M. Ruse (eds), *The Cambridge companion to the philosophy of biology*, Cambridge University Press, Cambridge 2008, s. 366.

rzania złożonych cech¹¹⁹⁰. Ścieżki metaboliczne, embriologię, sieci neuronowe, zachowania zwierząt i tym podobne można pojmować wyłącznie jako systemy złożone, których charakterystyka winna poruszać trzy główne kwestie: jakie są elementy systemu, w jaki sposób działają jego części oraz jak części te współpracują ze sobą w celu realizacji danych zadań. Uczeni wyrażający ten pogląd (wśród nich Michael R. Hendrickson, Lisa Chong i L. Bryan Ray¹¹⁹¹, Paula Kiberstis i Leslie Roberts¹¹⁹² oraz Richard Gallagher i Tim Appenzeller¹¹⁹³) stoją na stanowisku, że tradycyjna biologia charakteryzująca się podejściem redukcjonistycznym nie jest w stanie w pełni poradzić sobie ze złożonością życia. Zdaniem badaczy ta niezdolność odniesienia się w pełni do złożoności biologicznej doprowadziła do fundamentalnych zmian w podstawach koncepcyjnych współczesnej biologii. Biologia molekularna znalazła się w stanie kryzysu wywołanego zarówno przez zbyt wiele informacji o rosnącej wykładniczo liście części molekularnych oraz przez odkrycie nieoczekiwanych i złożonych współzależności między tymi częściami¹¹⁹⁴. „Fasolowa genetyka» (ang. *beanbag genetics*) heroicznej ery prokariotycznej biologii molekularnej – pisze Hendrickson – zupełnie straciła na prostocie; nie istniała żadna bezpośrednia zależność między poszczególnymi cechami i pasem DNA, który kodował gen [...]. Każdy konkretny gen brał udział w produkcji wielu cech (*pleiotropia*), a zespół genów był zwykle wymagany do wygenerowania danej cechy (*epistaza*). Ponadto dana cecha może być wielokrotnie realizowana, a wiele ścieżek genetycznych może prowadzić do danego fenotypu. Stało się jasne, że do wyjaśnienia na poziomie komórek, narządów i organizmu, trzeba złożenia molekularnych fragmentów tego Humpty Dumpty¹¹⁹⁵ w taki sposób, by zachować oryginalną topologię. Wszystkie części wydają się uwikłane w skomplikowany układ przecinających się sieci¹¹⁹⁶. Badacz zauważa, że reakcja na kryzys przyjęła szereg form, z których wszystkie obejmowały do pewnego stopnia holistyczny zwrot, porzucenie przekonania, że złożone struktury i funkcje mogą bezpośrednio i całkowicie być wytłumaczone przez

¹¹⁹⁰ Por. U. Goodenough, *Reductionism and holism, change and selection, mechanism and mind*, „Zygon”, 2(40), (2005), s. 372.

¹¹⁹¹ Por. L. Chong, R.L. Bryan, *While-istic biology*, „Science”, 295 (2002), s. 1661.

¹¹⁹² Por. P. Kiberstis, L. Roberts, *It's not just the genes*, „Science Translational Medicine”, 296 (2002), s. 685.

¹¹⁹³ Por. R. Gallagher, T. Appenzeller, *Beyond reductionism*, „Science”, 284 (1999), s. 79.

¹¹⁹⁴ Por. M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger's ghost...*, s. 86–87.

¹¹⁹⁵ Zwariowana postać z książki Lewisa Carrolla zatytułowanej *Alicja po drugiej stronie lustra*. (II część *Alicji w krainie czarów*).

¹¹⁹⁶ M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger's ghost...*, s. 87.

właściwości ograniczonej liczby produktów genowych¹¹⁹⁷. Tradycyjne podejście redukcjonistyczne nie jest już w stanie wyczerpująco wyjaśnić znacznej ilości danych generowanych przez wysoce produktywne metody genomiki (analiza genomu organizmów), metabolomiki (badanie zestawu wszystkich metabolitów obecnych w organizmie, tkance czy komórce) i proteomiki (analiza białek), wykorzystywanych do analizowania kompleksowych zjawisk biologicznych¹¹⁹⁸. Niezdolność ta doprowadziła wspomnianych autorów do porzucenia tradycyjnego paradygmatu opierającego się na redukcjonizmie i oparcia się, przy badaniu i wyjaśnianiu zjawisk związanych z życiem, na swoiście rozumianym (nowoczesnym) holizmie. W myśl „nowego” paradygmatu biolodzy winni badać w całości, jednocześnie lub przez pewien czas, kompletne i całościowe zjawisko biologiczne, a nie zaledwie jedną bądź kilka części czy aspektów tego zjawiska. Jedynie dzięki takiej strategii badawczej zdaniem tych badaczy biolodzy są w stanie badać i wyjaśniać biozłożoność w sposób pełny i wieloaspektowy¹¹⁹⁹.

Podejście systemowe nie było tylko prostą odpowiedzią na ograniczenia związane z realizacją „Projektu poznania ludzkiego genomu”¹²⁰⁰. Stanowiło ono kontynuację rozważań wcześniejszych teoretyków systemowych, między

¹¹⁹⁷ Por. tamże.

¹¹⁹⁸ Por. J.M. Marcum, *The conceptual foundations...*, s. 12.

¹¹⁹⁹ Trzeba uczciwie zaznaczyć, że nie wszyscy uczeni opowiadający się za podejściem systemowym do fenomenu życia podzielają powyższy pogląd. Dla nich w pełni satysfakcjonujące i owocne jest dotychczasowe redukcjonistyczne pojmowanie biosystemu. Wedle ich spojrzenia system jest wynikiem synergistycznej wewnętrznej wzajemnej zależności, łączności oraz interakcji jego części. Redukcjonistyczne podejście we współczesnej biologii próbuje wpasować się więc w istniejące paradygmaty molekularne. Por. J.M. Marcum, *The conceptual foundations...*, s. 12–13. Por. P.K. Sorger, *A reductionist's systems biology*, „Current Opinion in Cell Biology”, 17 (2005), s. 9.

¹²⁰⁰ Zrozumienie budowy ludzkiego genomu pozostaje arcytrudnym zadaniem. Jego zmienność okazuje się kluczowa, gdyż nie istnieje żaden zsekwencjonowany genom, o którym można sensownie powiedzieć, iż „reprezentuje” różnorodność genetycznej zmienności. Okazało się, że uzyskanie pełnej sekwencji genomu nie jest równoznaczne z uzyskaniem wszelkich możliwych informacji na temat ludzkiego organizmu. Na przykład: przekonanie, że geny określają odpowiednie fenotypowe znaki w sposób bezpośredni i liniowy, zakłada istnienie stosunku 1:1 między genami i białkami, jakie geny te kodują. Dziś wiemy, że liczba białek jest większa od liczby genów. Wykazano również, że geny nie są prostymi i liniowymi przedstawieniami informacji. Pojedynczy odcinek DNA kodującego białko może generować strukturalnie lub funkcjonalnie różne cząsteczki białkowe, w zależności od złożonej dynamiki regulacyjnej komórki. Geny i ich produkty nie istnieją ani nie funkcjonują w rzeczywistości jako odizolowane i autonomiczne jednostki. Produkty genowe układają się w ścieżki (szlaki) i sieci, które mogą brać udział w wielu funkcjach rozwoju i funkcjonowania organizmu. Por. J.S. Robert, *Molecular and systems biology and bioethics*, s. 362. Por. F. Mazzocchi, *Complexity and the reductionism-holism debate in systems biology*, „WIREs Systems Biology and Medicine”, 4 (2012), s. 415. Por. P.K. Sorger, *A reductionist's systems biology*, s. 9.

innymi Claude’a E. Shannona, Norberta Wienera, Alana M. Turinga i Johna von Neumanna. Niemniej powszechnie uznaje się, że definicje systemowe pochodzące z tych źródeł są dla dzisiejszej biologii zbyt abstrakcyjne¹²⁰¹.

Poniżej najpierw przeprowadzono krótką historyczną rekonstrukcję systemowego podejścia do bioukładów. Należy się więc zatrzymać na źródłach, z których współcześni badacze przyjmujący perspektywę systemową czerpią inspirację przy wyjaśnianiu bioukładów, koncentrując się w dalszej kolejności na współczesnej biologii systemów – charakteryzując podstawowe nurty oraz przedstawiając kluczowe założenia.

Jednym z pierwszych dwudziestowiecznych wpływowych promotorów podejścia systemowego do zjawisk życiowych był Ludwig von Bertalanffy. Ten identyfikujący się z doktryną organicyzmu biolog położył fundament pod współczesną naukę o systemach i wypromował matematykę jako język opisu systemów biologicznych i ich dynamiki¹²⁰². Postrzegał on organizmy żywe jako szczególny przykład układów otwartych. „Układy ożywione – pisał – przedstawiają stany stabilne skrajnie skomplikowanego rodzaju i składają się z ogromnej liczby oddziałujących na siebie części składowych. To, co charakteryzuje organizm jako układ otwarty, leży u podstaw zjawiska życia. Możemy być pewni, że badając organizm jako całość nie musimy być odpowiedzialni za wszystkich współdziałających z nim partnerów. [...] Hierarchiczna organizacja z jednej strony i cechy charakterystyczne układów otwartych z drugiej są podstawowymi zasadami natury ożywionej”¹²⁰³. Wiele spostrzeżeń Bertalanffy’ego w zakresie otwartych i zamkniętych układów, perturbacji i stabilności jest nadal aktualnych¹²⁰⁴. Mimo tego współczesne mu środowisko biologów nie witało tych idei z entuzjazmem, a wręcz ignorowało je. Społeczność biologów nie była jednak w tamtym czasie gotowa na powszechną akceptację myślenia systemowego¹²⁰⁵. Dla większości biologów była synonimem prac laboratoryjnych. Nie wykazywano entuzjazmu wobec zmian w sprawdzonych i skutecznych sposobach realizacji nauki.

¹²⁰¹ Por. M.A. O’Malley, J. Dupré, *Fundamental issues in systems biology*, „BioEssays”, 27 (2005), s. 1271.

¹²⁰² Por. E.O. Voit, J.H. Schwacke, *Understanding through modeling. A historical perspective and review of biochemical systems theory as a powerful tool for systems biology* [w:] A.K. Konopka (ed.), *Systems biology. principles, methods, and concepts*, CRC Press, Boca Raton–London–New York 2007, s. 32. Bertalanffy odnosił ogólną teorię systemów nie tylko biologii, ale także do psychologii, ekonomii i nauk społecznych. Por. L. Chong, B.L. Ray, *While-istic Biology*, s. 1661.

¹²⁰³ L. von Bertalanffy, *Problemy życia*, tłum. A. Aduszkiewicz, „Literatura na Świecie”, 3–4(128–129) (1982), s. 132.

¹²⁰⁴ Por. E.O. Voit, J.H. Schwacke, *Understanding through modeling...*, s. 32.

¹²⁰⁵ Por. tamże, s. 33.

Pod koniec lat czterdziestych XX wieku sytuacja zaczęła nieco bardziej sprzyjać perspektywie systemowej w analizie problemów biologicznych¹²⁰⁶. W tym czasie pojawiło się wiele nowych koncepcji, takich jak teoria informacji Claude'a E. Shannona, cybernetyka Norberta Wienera czy teoria informatyki i technologii komputerowej Alana M. Turinga i Johna von Neumanna. Wszystkie one cieszyły się sporym zainteresowaniem wielu wybitnych fizyków i inżynierów, co dało zielone światło dla rozwoju teorii systemów¹²⁰⁷. Dzięki nim pojawiło się wiele nowatorskich systemowych koncepcji w samej biologii, takich jak między innymi abstrakcyjne układy dwóch morfogenów z autokatalitycznymi cechami Nicolasa Rashevsky'ego, nowatorski program badań nad sieciami reakcji biochemicznych Henrika Kacsera, kinetyczne modele regulacji genów poprzez indukcję i represję Briana C. Goodwina, badania nad ujemnymi i dodatnimi sprzężeniami zwrotnymi w układach ożywionych oraz abstrakcyjnymi, algorytmicznymi sposobami regulacji komórkowej Roberta Rosena¹²⁰⁸. Ważnym etapem na drodze do kształtowania się myślenia systemowego o problemach biologicznych była formalizacja biologii, szczególnie w odniesieniu do zasad i praw logiczno-matematycznych¹²⁰⁹. Próby jej przeprowadzenia dokonał Joseph Woodger. Biolog ten opracował aksjomatyczną metodę formalizacji twierdzeń o systemach biologicznych, mającą na celu zaszczerpienie rygoru w epistemicznych czynnościach biologów. W szczególności na podstawie formalnego mechanizmu skonstruowanego przez Alfreda Northa Whiteheada i Bertranda Russella w *Principia mathematica* (1910–1913) Woodger dokonał próby aksjomatyzacji genetyki klasycznej¹²¹⁰. Przekładając pojęcia i zasady genetyki na twierdzenia logiczne, chciał wykazać, że spodziewane konsekwencje zasad Mendla mogą zostać przewidziane w oparciu o podstawowe aksjomaty nauki.

Propagatorem teorii systemów był Ervin László. Wiele uwagi w swoich pracach poświęcił on teorii systemów, w szczególności w odniesieniu do ich podstaw koncepcyjnych¹²¹¹. László stworzył nowe postrzeganie świata, w tym świata przyrody ożywionej, opierające się na teorii systemowej. Dla węgierskiego badacza centralne założenie teorii systemowej stanowił holizm, w odróżnieniu od atomizmu i redukcjonizmu. Pisał: „W skład wszystkich organizmów wchodzi te same podstawowe substancje [...]; różnica

¹²⁰⁶ Por. tamże, s. 32.

¹²⁰⁷ Por. tamże, s. 33.

¹²⁰⁸ Por. tamże, s. 32–33.

¹²⁰⁹ Por. J.M. Marcum, *The conceptual foundations...*, s. 4.

¹²¹⁰ Por. M.A. Simon, *The matter of life. Philosophical problems of biology*, Yale University Press, New Haven–London 1971, s. 26.

¹²¹¹ Tamże, s. 6.

między Cezarem a szympansem nie jest w pierwszym rzędzie różnicą co do substancji, lecz co do struktury relacji na gruncie tej samej substancji. Nawet mózg [...] nie stanowi po prostu masy dodanych do siebie neuronów. Podczas gdy geniusz musi mieć więcej szarych komórek od papugi, idiota może mieć ich dokładnie tyle samo, co geniusz. Różnicę pomiędzy nimi wyjaśnić trzeba, odwołując się do tego, w jaki sposób substancja ta jest zorganizowana. Ponieważ ściśle wzajemne przyporządkowanie wszystkich neuronów jest zadaniem wykraczającym poza możliwości ludzkiego mózgu [...], zatem mózg jako całość lub przynajmniej niektóre jego podukłady [...], traktować należy jako całości o nieredukowalnych właściwościach”¹²¹². László oparł swój systemowy obraz przyrody na czterech powiązanych ze sobą zasadach:

- system naturalny stanowi całość, której właściwości są nieredukowalne do właściwości jego poszczególnych komponentów¹²¹³,
- system naturalny wykazuje ustalony dynamiczny stan w zmieniającym się otoczeniu¹²¹⁴,
- system naturalny jest zdolny do autokreatywności w odpowiedzi na wyzwanie otoczenia¹²¹⁵,
- system naturalny pełni funkcję dwukierunkowych łączników w świecie przyrody¹²¹⁶.

Dla László systemowy obraz przyrody odzwierciedla harmonię i dynamiczną równowagę między różnymi komponentami, tworzącymi wspólnie zjawiska naturalne. „W sumie więc przyroda w ujęciu systemowym – konkluduje – jest domeną organizacji złożonej i subtelnej. Systemy pozostają ze sobą w łączności i wspólnie tworzą supersystemy. [...] Charakterystyka całości na każdym z jej licznych szczebli przybiera inną postać, przy czym przechodząc ze szczebla na szczebel, właściwości tworzą ciąg nieprzerwany i nieredukowalny”¹²¹⁷.

Współcześni propagatorzy systemowego spojrzenia na fenomen życia korzystają z powstałych w minionym stuleciu teorii chaosu i teorii złożoności¹²¹⁸. Główne założenie teorii chaosu głosi, że warunki początkowe układu mają wpływ zarówno na jego stabilność, jak i niestabilność (niewielkie

¹²¹² E. László, *Systemowy obraz świata*, tłum. U. Niklas, Państwowy Instytut Wydawniczy, Warszawa 1978, s. 53–54.

¹²¹³ Por. tamże, s. 49–55.

¹²¹⁴ Por. tamże, s. 56–68.

¹²¹⁵ Por. tamże, s. 68–88.

¹²¹⁶ Por. tamże, s. 89–96.

¹²¹⁷ Tamże, s. 96.

¹²¹⁸ Por. J.M. Marcum, *The conceptual foundations...*, s. 6.

zmiany w warunkach początkowych mogą prowadzić do zasadniczych zmian układu). Zjawisko to, będące podstawą nieliniowego zachowania układu, naukowcy nazywają „efektem motyla”. Układy chaotyczne posiadają łatwość adaptacyjną, przejawiającą się widoczną odpornością na zakłócenia zewnętrzne. Inną teorią, do której odwołują się współcześni przedstawiciele strategii systemowej w spojrzeniu na życie, jest teoria złożoności. Propagatorzy tej teorii przy badaniu złożonych zjawisk naturalnych, zwłaszcza dotyczących życia, korzystają z podejścia holistycznego. Zwracają oni uwagę na wzajemne powiązania pomiędzy poszczególnymi różnorodnymi komponentami tworzącymi złożoną całość. Dla rzeczników teorii złożoności bioukłady są samoorganizującymi się, otwartymi układami dynamicznymi, których właściwości są nieredukowalne do właściwości ich składników. Kontrola przyczynowa w obrębie bioukładu często nie jest ograniczona do jednego specyficznego poziomu, ale rozłożona jest na wszystkie poziomy układu. Redukcjonistyczne, liniowe podejście jest niewystarczające, jeśli chodzi o możliwość objęcia oraz wyjaśnienia biozłożoności¹²¹⁹. Właściwości emergentne są produktem systemowych interakcji synergistycznych, a nie jedynie efektem syntezy różnych właściwości komponentów układu.

Głównym powodem, dla którego rozumienie systemowe na nowo zyskuje dziś powszechne zainteresowanie wśród biologów, jest fakt, iż postęp dokonany w biologii molekularnej, szczególnie w programie sekwencjonowania genomu, pozwala nam uzyskać kompleksowe zbiory danych z zakresu wydajności układu, a także poznać informacje na temat cząsteczek bazowych¹²²⁰. Mamy obecnie okazję prowadzenia analiz systemowych osadzonych w molekularnym zrozumieniu w ciągłym spektrum wiedzy. Zrozumienie na poziomie układu wymaga zmiany w naszym pojmowaniu tego, „czego należy szukać” w biologii. Choć zrozumienie genów i białek w dalszym ciągu pozostaje istotne, głównym celem jest zrozumienie struktury i dynamiki danego układu. Ponieważ system nie jest zwykłym zespołem genów i białek, jego właściwości mogą nie być w pełni pojęte poprzez wykorzystanie schematów ich wzajemnych powiązań. „I chociaż taki schemat – pisze Hiroaki Kitano – stanowi ważny pierwszy krok, jest analogiczny do statycznej mapy drogowej, podczas gdy to, czego naprawdę szukamy, to wzorce ruchu, przyczyny jego występowania oraz sposoby jego kontroli. Identyfikacja wszystkich genów i białek w organizmie jest jak wykaz wszystkich części samolotu. Choć taka lista zawiera katalog poszczególnych elementów, sama w sobie nie jest wystarczająca, aby zrozumieć złożoność leżącą u pod-

¹²¹⁹ Por. tamże, s. 7.

¹²²⁰ Por. H. Kitano, *Systems biology: a brief overview*, „Science”, 295 (2002), s. 1662.

staw projektowanego obiektu. Trzeba wiedzieć, w jaki sposób te części się ze sobą łączą w celu utworzenia struktury samolotu. Jest to proces analogiczny do sporządzania wyczerpującego schematu sieci regulacji genów i ich biochemicznych interakcji. Takie schematy zapewniają ograniczoną wiedzę o tym, jak zmiany w jednej części układu mogą wpływać na inne jego części; jednak aby zrozumieć, jak funkcjonuje konkretny układ, musimy najpierw zbadać, w jaki sposób współpracują ze sobą poszczególne części podczas jego aktywności”¹²²¹.

Co można powiedzieć o biologii „ery systemów”? Rozwój biologii molekularnej – najważniejszej z nauk biologicznych ostatnich dekad – w znacznym stopniu był napędzany założeniami liniowości i prostoty¹²²². Zapewniło to stabilne podejście analityczne, które pozwoliło naukowcom na zbadanie wielu podstawowych procesów molekularnych i komórkowych. Zgodnie z „centralnym dogmatem” biologii molekularnej, transkrypcja informacji zawartej w cząsteczkach DNA, wraz z translacją, występują w prostym liniowym porządku, począwszy od materiału genetycznego, a kończąc na syntezie białek. Oznacza to, że związek przyczynowy przepływa w jednym kierunku (od DNA, do RNA, do białek) i nie można go zawrócić¹²²³. Możliwość retroakcji jest tym samym wykluczona¹²²⁴. Choć operonowy model ekspresji genów przyniósł ze sobą geny kontrolne i pętle sprzężenia zwrotnego, organizmy nadal były postrzegane jako całkowicie możliwe do wyjaśnienia przez oddziaływania na poziomie molekularnym.

Wraz z nadejściem ery biologii molekularnej miała więc miejsce poważna zmiana perspektywy¹²²⁵. Życie zaczęło być interpretowane jako molekularny proces regulowany przez informację genetyczną, zaś redukcjonistyczne podejście zaczęto przyjmować za pewnik. Redukcjonizm molekularny był wdrażany na wszystkich możliwych płaszczyznach. Organizmy postrzegano jako zbiory mniejszych części składowych, takich jak atomy i molekuly, oraz ich interakcje. Właściwości organizmów uznano za objaśnione przez właściwości strukturalne i potencjał enzymatyczny ich makrocząsteczek, które mogłyby zostać poddane ocenie przy wykorzystaniu sekwencji genomu. Szło to w parze z redukcją mocy przyczynowej do funda-

¹²²¹ Tamże, s. 1662.

¹²²² Por. F. Mazzocchi, *Complexity and the reductionism-holism debate...*, s. 414.

¹²²³ Por. tamże, s. 414–415. Por. S. Sarkar, *Biological information: a skeptical look at some central dogmas of molecular biology* [w:] S. Sarkar (ed.), *The philosophy and history of molecular biology...*, s. 187.

¹²²⁴ Por. F. Mazzocchi, *Complexity and the reductionism-holism...*, s. 415.

¹²²⁵ Por. tamże, s. 415. Por. M. Morange, *Post-genomics, between reduction and emergence*, „Synthese”, 3(151) (2006), s. 355.

mentalnego, molekularnego poziomu. „Centralny dogmat” uznawał DNA za jedyny czynnik przyczynowy. W konsekwencji biologia była postrzegana jako zasadniczo redukowalna do fizyki i chemii. Wszystkie zasadne wyjaśnienia właściwości i zachowań organizmów uważano ostatecznie za molekularne, to znaczy obejmujące identyfikację odpowiednich cząsteczek i zasad ich interakcji. Biolodzy molekularni byli zaangażowani w badanie systemów biologicznych *in vitro*, ponieważ założono, że wiedza na temat właściwości odseparowanych części jest wystarczająca dla zrozumienia ich działania *in vivo*.

Pod koniec minionego wieku badania biologiczne osiągnęły jednak etap, na którym ograniczenia molekularno-redukcyjnego podejścia stały się coraz bardziej widoczne¹²²⁶. Dla wielu stało się jasne, że biologia molekularna, chociaż opisuje budowę molekularną układów ożywionych, nie obejmuje jednak zrozumienia, w jaki sposób składniki molekularne wspólnie, jako układ ożywiony, powodują powstanie życia¹²²⁷. Eberhard O. Voit i John H. Schwacke podkreślają, że nie wystarczy tylko zbieranie i przechowywanie uzyskiwanych informacji w bazach danych¹²²⁸. Konieczne jest tworzenie funkcjonalnego kontekstu, w którym uzyskiwane dane eksperymentalne mogą nabrać pełnego znaczenia. Piszą: „Dane muszą stać się informacjami. Bez funkcjonalnego kontekstu są niczym innym jak faktoidami, prostymi opisami funkcji, i tylko ich integracja w fizycznym, przestrzennym i funkcjonalnym otoczeniu oferuje nam odpowiedni wgląd i tym samym pozwala nam je poznać i zrozumieć”¹²²⁹. Głębszy aspekt niedociągnięć redukcjonizmu, który nie umyka uwadze przywoływanych badaczy, dotyczy zachowania się części składowych układów – często zachowują się inaczej *in situ* aniżeli w izolacji¹²³⁰. Różnice te niejednokrotnie mogą znacząco wpływać na rolę i funkcję konkretnego elementu. Dla pełnego zrozumienia kluczowe są interakcje i relacje istniejące między częściami w ich naturalnym kontekście i środowisku. Podejście, że podstawowym założeniem redukcjonizmu jest pełna izolacja badanych elementów, nie ma szans, by się w pełni sprawdzić.

Ograniczoność metodologii redukcjonistycznej zauważalna była zwłaszcza w obszarze badań z dziedziny genomiki. Wczesna genomika przyjmo-

¹²²⁶ Por. F. Mazzocchi, *Complexity and the reductionism-holism...*, s. 415.

¹²²⁷ Por. F.C. Boogerd, F.J. Bruggeman, J.-H.S. Hofmeyr, H.V. Westerhoff, *Afterthoughts as foundations for systems biology* [w:] F.C. Boogerd, F.J. Bruggeman, J.-H.S. Hofmeyr, H.V. Westerhoff (eds), *Systems biology. Philosophical foundations*, Elsevier, Amsterdam 2007, s. 334.

¹²²⁸ Por. E.O. Voit, J.H. Schwacke, *Understanding through modeling...*, s. 33.

¹²²⁹ Tamże.

¹²³⁰ Por. tamże, s. 34.

wała zasadniczo stanowisko redukcjonistyczne¹²³¹. Na początku uwaga badaczy była skoncentrowana na analizie pojedynczego genu, później na mapowaniu i sekwencjonowaniu genomów. Chociaż z czasem zaczęto kłaść większy nacisk na zrozumienie funkcjonalnej aktywności, mimo to próbowano wyjaśnić złożoną organizację biologiczną i funkcje w kategoriach deterministycznych. Coraz bardziej dawało o sobie znać zapotrzebowanie na bardziej hierarchiczne i mniej upraszczająco deterministyczne zrozumienie procesów molekularnych¹²³². Dla wielu biologów koniecznością było odejście od rozbierania rzeczy na mniejsze części i uznanie, że życia nie można w pełni zrozumieć na poziomie molekularnym i genetycznym, gdyż organizmy żywe stanowią wynik złożonych, dynamicznych oddziaływań na poziomie strukturalnym i funkcjonalnym (geny, mRNA, tRNA, białka i metabolity) wielu różnych składników funkcjonujących jako zorganizowane całości, których nie da się zrozumieć w redukcjonistycznych i deterministycznych kategoriach¹²³³.

W odpowiedzi na ograniczoność redukcjonistycznej strategii w badaniu fenomenu życia, szczególnie w kontekście „Projektu poznania ludzkiego genomu”, na początku XXI wieku wyłoniła się nowa subdyscyplina biologiczna, którą nazwano biologią systemów (ang. *systems biology*)¹²³⁴. Ta nowa gałąź biologii powstała jako skutek potrzeby przekroczenia granic uproszczonego pojmowania zjawisk biologicznych¹²³⁵. Genomowa rewolucja wygenerowała ogromne ilości danych, ale była niewystarczająca, by wydobyć z poznawanego procesu głębszy sens¹²³⁶. Wymagane dodatkowe ramy koncepcyjne wyłoniły się z nieoczekiwanego obszaru, bioenergetyki, która wykorzystywała koncepcje sieci i samoorganizacji¹²³⁷. W związku z tym biologia systemów uwydatniła relacje między biologicznie istotnymi cząsteczkami i badała je jako elementy kompleksowych sieci ulokowanych szerzej w ramach fizjologii, biologii rozwoju, ewolucji oraz ekologii.

Wyzwaniem dla biologii systemów jest zintegrowanie szeregu różnych reakcji zachodzących w organizmach (lub w jednej z ich obserwowalnych jednostek organizacyjnych) w jednolite i spójne ramy¹²³⁸. Aby to osiągnąć, biologia systemów dąży do zidentyfikowania i integracji sumarycznych

¹²³¹ Por. F. Mazzocchi, *Complexity and the reductionism-holism...*, s. 416.

¹²³² Por. M.A. O'Malley, J. Dupré, *Fundamental issues in systems biology*, s. 1270.

¹²³³ Por. F. Mazzocchi, *Complexity and the reductionism-holism...*, s. 415–416.

¹²³⁴ Por. J.M. Marcum, *The conceptual foundations...*, s. 2. Por. M. Chorąży, *Wprowadzenie do biologii systemów*, „Nauka”, 1 (2011), s. 2.

¹²³⁵ Por. F. Mazzocchi, *Complexity and the reductionism-holism...*, s. 416.

¹²³⁶ Por. M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger's ghost...*, s. 87.

¹²³⁷ Por. tamże, s. 88.

¹²³⁸ Por. tamże.

zbiorów danych biologicznych z wielu poziomów hierarchicznych (na przykład danych DNA, RNA, białek i metabolitów) oraz uwzględnienia ich poprzez połączenie formalnego modelowania matematycznego i dokładną analizę obliczeniową z „wielkoskalowymi” technikami eksperymentalnymi¹²³⁹. Tendencja w kierunku integracji nie ogranicza się do poziomów danych i ma inklinację do integrowania różnych dyscyplin i metod badawczych¹²⁴⁰.

Chociaż biologia systemów zasadniczo powstała w odpowiedzi na „rewolucję genomiki”, opiera się na przemyśleniach starszych teoretyków systemowych, o których wspominało w niniejszym opracowaniu. Ostateczny cel biologii systemów pokrywa się z fundamentalnym celem biologii: wyjaśnieniem, w jaki sposób systemy molekularne mogą być systemami żywymi¹²⁴¹. Aby ten cel osiągnąć biolodzy zamierzają zintegrować i wyjaśnić ogólne DNA, RNA oraz białkowe i metaboliczne dane poprzez połączenie modelowania matematycznego i obszernej analizy obliczeniowej z „wielkoskalowymi” technikami eksperymentalnymi¹²⁴².

Maureen O'Malley i John Dupré wyróżniają dwa odrębne strumienie wewnątrz biologii systemów: jeden, nazywany „pragmatyczną biologią systemów”, zwraca uwagę na „wielkoskalowe” interakcje molekularne; drugi – „teoretyczna biologia systemów” – odnosi się do zasad systemowych¹²⁴³. Rozróżnienie to oparte jest na stopniu antyredukcyjnego lub systemowego oddania. Oba te nurty opierają się na modelowaniu matematycznym, ale każdy z nich nieco inaczej definiuje systemy biologiczne¹²⁴⁴. Przedstawiciele pierwszego dostrzegają potrzebę odnoszenia się do wzajemnie powiązanych zjawisk badanych przez nich jako „systemy”¹²⁴⁵. Pragmatyczna biologia systemów obejmuje badania interakcji molekularnych zjawisk poprzez integrację wielopoziomowych danych i modeli. „System” jest więc wygodnym, acz nieprecyzyjnym pojęciem, obejmującym szereg szczegółowych interakcji z możliwymi do określenia funkcjami. Główną siłą napędową tej dyscypliny jest technologia pozwalająca na gromadzenie coraz

¹²³⁹ Por. F. Mazzocchi, *Complexity and the reductionism-holism...*, s. 416–417.

¹²⁴⁰ Por. tamże, s. 417.

¹²⁴¹ Por. F.C. Boogerd, F.J. Bruggeman, J.-H.S. Hofmeyr, H.V. Westerhoff, *Afterthoughts as foundations for systems biology*, s. 335.

¹²⁴² Por. M.A. O'Malley, J. Dupré, *Fundamental issues in systems biology*, s. 1271.

¹²⁴³ Por. tamże, s. 1270.

¹²⁴⁴ Por. tamże, s. 1273. Jest to również częścią szerszego trendu w nauce, w którym uznaje się, że badanie złożonych systemów z jednej perspektywy lub przy jednym sposobie opisu, czy też skupianie się wyłącznie na jednym poziomie organizacyjnym nie może w wystarczającym stopniu opisać takich układów. Por. F. Mazzocchi, *Complexity and the reductionism-holism...*, s. 420.

¹²⁴⁵ Por. M.A. O'Malley, J. Dupré, *Fundamental issues in systems biology*, s. 1271.

bardziej kompleksowych danych, a następnie na ich kolektywną analizę. Z kolei rzecznicy teoretycznej biologii systemów twierdzą, że do pomyślnego rozwoju biologii systemów konieczne są zasady kierujące systemami. Dla tychbadaczy podejście *ad hoc* do systemów jest niewystarczające. Istotna jest analiza systemu jako układu, a nie tylko zbioru części, aby móc zrozumieć emergentne właściwości składowych interakcji. „Teoretycy” biologii systemów uznają systemy za stanowiące fundamentalną kategorię ontologiczną, a różnice między systemami biologicznymi i systemami ludzkiego autorstwa uważają za mniej ważne od ich podobieństw. W ocenie przedstawicieli tego nurtu biologii systemów konieczne jest spojrzenie na systemy ożywione z radykalnie innej perspektywy aniżeli typowa perspektywa fizykalna wykorzystywana do studiowania systemów złożonych w chemii i fizyce¹²⁴⁶. System interpretowany w duchu redukcjonistycznym stanowi ewolucyjną syntezę swoich części, w której właściwości systemowe odzwierciedlają właściwości części składowych¹²⁴⁷. Z redukcjonistycznego punktu widzenia właściwości systemowe są w pełni możliwe do wyjaśnienia w odniesieniu do właściwości części tego systemu¹²⁴⁸. Innymi słowy, zjawisko biologiczne stanowi liniową syntezę bądź sumę swoich części (sumę bądź syntezę jego wewnętrzzależnych, wewnątrzpowiązanych i wzajemnie reagujących ze sobą części)¹²⁴⁹. Wielu współczesnych biologów systemowych takie zawężone rozumienie systemu nie zadowala. Zakładają perspektywę holistyczną, w której właściwości systemowe wyłaniają się z wzajemnie zależnych, wzajemnie powiązanych oraz współdziałających części systemu. Podstawą takiego rozumowania jest założenie, że właściwości systemowe są wynikiem nieliniowych synergistycznych interakcji pomiędzy jego częściami, a nie jedynie wynikiem sumowania bądź syntezy tych części. Stąd też właściwości systemowe nie są w prosty sposób redukowalne do właściwości części systemu i dlatego też muszą być badane i wyjaśniane jako rezultat określonej całości. W takim ujęciu systemu związek przyczynowy przesuwają się od góry, będącej całością, do dołu, który stanowią części systemu, a nie z dołu do góry. Ponadto dynamika komponentowych części systemu jest z natury nieliniowa, a jej wynik jest nieproporcjonalny do zdarzeń poprzedzających. Dodatkowo relacje dynamiczne pomiędzy wewnętrzzależnymi, wewnątrzpłączonymi i wchodzącymi we wzajemne interakcje częściami wykazują wymiar temporalny, w którym właściwości systemowe ulegają

¹²⁴⁶ Por. F.C. Boogerd, F.J. Bruggeman, J.-H.S. Hofmeyr, H.V. Westerhoff, *Afterthoughts as foundations for systems biology*, s. 335.

¹²⁴⁷ Por. J.M. Marcum, *The conceptual foundations...*, s. 12.

¹²⁴⁸ Por. tamże, s. 18.

¹²⁴⁹ Por. tamże, s. 13.

odslanianiu wraz z upływem czasu. Wynikiem takich właściwości jest moc systemu umożliwiająca ponowne uporządkowanie po wystąpieniu perturbacji nie tylko w odniesieniu do poprzedniego, ale również i do nowego położenia równowagi.

Różne rozumienie systemu przez „pragmatyków” i „teoretyków” współczesnej biologii systemów rzutuje na sposób, w jaki pojmowane są genomy. W przypadku tych pierwszych geny i genomy mają status przyczynowego i informacyjnego priorytetu nad innymi poziomami molekuł, będąc definiowanymi jako „cyfrowe rdzenie informacji”, które napędzają interakcje składające się na system¹²⁵⁰. Z perspektywy teoretycznej biologii systemów genomy niczego nie wyjaśniają, lecz jedynie stają się elementami, od których zależą właściwości nadrzędnego systemu. Badanie genomów staje się rozpoznawczym lub pierwszoplanowym narzędziem do analizy komórek i tkanek. Taka koncepcja genomów i genomiki zakłada, że podstawowymi przedmiotami „teoretyczno-systemowych” dociekań są procesy i właściwości wyższego poziomu niż bardziej konkretne, molekularne bazy tych zjawisk.

Różnice między omawianymi dwoma zasadniczymi nurtami w biologii systemów znajdują odzwierciedlenie w strategii modelowania¹²⁵¹. Modelowanie matematyczne stosuje się również w dziedzinie biologii molekularnej, jest ono jednak zbyt nieprecyzyjne i niewystarczające, aby poradzić sobie z ogromną ilością danych biologicznych i ukrytych w nich złożonościami wzorów. Wysoce dynamiczne, często nieliniowe zachowania dużych zbiorów interaktywnych składników można wyrazić jedynie za pomocą metod matematycznych umożliwiających ustalenie formalnych modeli systemów biologicznych¹²⁵². Modele te odgrywają następnie kluczową rolę w biologii systemów, choć nadal wymagają możliwie najobszerniejszego, eksperymentalnego przetestowania.

W biologii systemów można wyróżnić dwie zasadnicze strategie modelowe: oddolną i odgórną¹²⁵³. Oddolne modelowanie rozpoczyna się od niższych poziomów, zaczynając na przykład od DNA i białek, a następnie kieruje się ku górze, aby opisać wyższe poziomy. Jest to strategia preferowana przez biologów systemowych, którzy będąc oddani przede wszystkim idei przedstawienia wyjaśnień procesów wyższego poziomu w zakresie niższych poziomów, w pewien sposób podążają śladami redukcjonistycznych strategii wczesnej genomiki. Inaczej ma się rzecz ze zwolennikami teoretycznej biologii systemów, którzy szukają systemowych zasad i praw. Ci przyjmują

¹²⁵⁰ Por. M.A. O'Malley, J. Dupré, *Fundamental issues in systems biology*, s. 1272.

¹²⁵¹ Por. F. Mazzocchi, *Complexity and the reductionism-holism...*, s. 418.

¹²⁵² Por. tamże, s. 419.

¹²⁵³ Por. tamże.

zasadniczo podejście odgórne. Modelowanie rozpoczynają od zasad systemowych, startując od funkcji wyższego poziomu przy założeniu, że znana jest na przykład funkcja danego obiektu, jak choćby sieci. Następnie są włączane dalsze szczegóły, a na niższym poziomie, na przykład danego enzymu w sieci, podejmowana jest próba wyjaśnienia w kontekście celów wyższego poziomu. Większość biologów systemowych uważa ograniczenie badań do jednego poziomu za niewystarczające, zwracając uwagę na potrzebę integracji i agregacji informacji w różnych skalach czasowych i różnej obszerności poprzez modelowanie wielkoskalowe.

Sahotra Sarkar podkreśla, że najważniejszą innowacją biologii systemów jest jej wyraźne przywrócenie do biologii rozważań o czasie. Píše: „Jedną z charakterystycznych cech biologii molekularnej było unikanie wyraźnego odnoszenia się do czasu: przepływ informacji między kwasami nukleinowymi, a z nich do białek, kontrola ekspresji genu przez ujemne sprzężenie zwrotne i przełączniki – te mechanizmy zastępują dyskusję nad tym, jak skład chemiczny komórki zmienia się w czasie. Jest to jedna z istotnych cech, które czynią biologię molekularną tak inną od poprzedzającej ją biochemii. Biologia systemów wydaje się być powrotem do starszej szkoły biochemii, zajmując się procesami i ich zmianą w czasie, lecz na znacznie większą skalę: w biologii systemów tysiące reagentów jest potencjalnie śledzonych w czasie, a nie – jak miało to miało miejsce w klasycznej biochemii – kilka czy kilkanaście. Biologia systemów prezentuje dużo bardziej dynamiczny pogląd biologiczny niż biologia molekularna czy nawet genomika. Obiecuje innowacje zarówno koncepcyjne, jak i technologiczne. Jeśli uda jej się przyczynić do opracowania udanego modelu choćby pojedynczej komórki, będzie to sukces usprawiedliwiający kosztowne projekty sekwencjonowania genomów”¹²⁵⁴.

Hiroaki Kitano zauważa, że biologia systemów szuka zrozumienia na poziomie systemowym układów biologicznych złożonych z elementów odkrytych przez biologię molekularną¹²⁵⁵. Chociaż nie jest to pierwsza próba zrozumienia bioukładów, to dotychczasowe, dysponujące ograniczoną dostępnością wiedzy z zakresu biologii molekularnej, koncentrowały się w większości na opisie i analizie systemów biologicznych na poziomie fizjologicznym¹²⁵⁶. Unikalną cechą biologii systemów, która odróżnia ją od wcześniejszych prób, jest zdaniem Kitano możliwość osadzenia systemowe-

¹²⁵⁴ S. Sarkar, *Genomics, proteomics, and beyond*, s. 67.

¹²⁵⁵ Por. H. Kitano, *Systems biology: toward system-level understanding of biological systems* [w:] H. Kitano (ed.), *Foundations of systems biology*, The MIT Press, Cambridge–London 2001, s. 1.

¹²⁵⁶ Por. tamże, s. 2.

go zrozumienia bezpośrednio na poziomie molekularnym – w genach, białkach i tak dalej. „Tak więc – konkluduje Kitano – mimo że nie jest to pierwszy raz, kiedy próbujemy coś pojąć na poziomie systemów, po raz pierwszy mamy okazję zrobić to na bazie spójnych ram wiedzy zbudowanych od poziomu molekularnego do poziomu systemowego”¹²⁵⁷.

Eberhard O. Voit i John H. Schwacke zauważają, że cechą odróżniającą tradycyjne redukcjonistyczne eksperymenty od nowoczesnych systemowych jest to, że celem tych drugich jest wysoka przepustowość i dążenie do kompletności¹²⁵⁸. Podczas gdy tradycyjne badania zajmowały się jednym konkretnym genem, białkiem lub metabolitem, biolodzy systemowi bardzo często starają się ocenić ekspresję większości lub wszystkich genów organizmu jednocześnie¹²⁵⁹. Ich celem jest stworzenie obrazu wszystkich metabolitów i ich ilości w danym momencie, a także odkrycie wszystkich połączeń w obrębie pełnej sieci czynników transkrypcyjnych oraz identyfikacja wszystkich fizjologicznych oddziaływań między białkami w komórce¹²⁶⁰. Biologia systemów dąży do poznania wszystkich elementów przyczyniających się do istnienia danego zjawiska biologicznego oraz wszystkich procesów i interakcji regulujących jego dynamikę, a także do wyjaśnienia, dlaczego struktura zorganizowana jest w taki, a nie inny sposób, lub dlaczego dany proces funkcjonuje w taki, a nie inny sposób¹²⁶¹. Chce poznać podstawowe zasady, według których komórki i organizmy są tworzone i wykorzystywane, dzięki czemu nie tylko można wyjaśnić funkcjonowanie obserwowanego systemu, lecz także przewidywać skutki zachodzących zmian¹²⁶².

Voit i Schwacke zwracają uwagę na ogromną złożoność żywych komórek i organizmów, którą charakteryzują za pomocą trzech aspektów¹²⁶³. Po pierwsze, nawet najprostsze komórki składają się z ogromnej, trudnej do śledzenia przez nasz umysł ilości elementów. Najprostsze komórki drożdży mają ponad sześć tysięcy genów, co powoduje, że samo ich nazywanie stanowi nie lada wyzwanie. Po drugie, elementy składowe komórki współdziałają ze sobą na niezliczone sposoby, a to samo białko może mieć zupełnie odmienne funkcje. Gen może być łączony na różne sposoby, tworząc kody dla różnych produktów końcowych. Lipidy są istotnymi elementami błony, ale mogą również pełnić funkcję cząsteczek sygnalizacyjnych. Nie tylko

¹²⁵⁷ Tamże, s. 2–3.

¹²⁵⁸ Por. E.O. Voit, J.H. Schwacke, *Understanding through modeling...*, s. 37.

¹²⁵⁹ Por. tamże, s. 37–38.

¹²⁶⁰ Por. tamże, s. 38.

¹²⁶¹ Por. tamże, s. 36.

¹²⁶² Por. tamże, s. 37.

¹²⁶³ Por. tamże, s. 34.

same elementy mogą przybierać różne funkcje. Poszczególne funkcje większości ważnych systemów kontroli komórkowej mogą być osiągane na drodze alternatywnych kombinacji elementów, a zatem eksperymenty wyodrębniające pojedyncze części nigdy nie będą w stanie ujawnić wewnętrznej struktury kontrolnej. Sytuację komplikuje dodatkowo fakt, że systemy biologiczne posiadają stochastyczne funkcje, które mogą być wywołane przez niewielką liczbę cząsteczek i ich rozproszenie przestrzenne w komórce. Ta cecha jest trudna do wyłapania, tak intuicyjnie, jak i matematycznie, przez co poważnie wpływa na przewidywalność. Wreszcie po trzecie, interakcje w bioukładach najczęściej są nieliniowe, co skutkuje tym, że zwiększenie danych wejściowych nie musi wcale oznaczać podobnego zwiększenia danych wyjściowych. „W liniowych łańcuchach przyczynowo-skutkowych – piszą Voit i Schwacke – możemy łatwo przewidzieć reakcję na zakłócenia, jednak nie jest to takie proste w sieciach nieliniowych. Wzrost substratu prowadzi do szybszego wzrostu i wyższej wydajności w populacji drobnoustrojów, lecz tylko do pewnego momentu. Niezwykle trudno jest przewidzieć próg, w którym ta bezpośrednia, monotoniczna relacja przestanie występować”¹²⁶⁴. Badacze podkreślają, że bez pomocy analizy matematycznej i obliczeniowej można mieć trudności z przewidywaniem efektów prostych sprzężeń zwrotnych, które należą do powszechnych mechanizmów w regulacji biologicznej. Podobnie trudno jest ocenić zalety inhibicji wytwarzania produktu oraz zalety bądź wady różnych typów regulacji genów w danej sytuacji.

Biolodzy wyjaśniają zachowanie systemowe odnoszące się do jego odpowiedzi na zmiany zewnętrzne w zależności od tego, czy należą do biologów zorientowanych redukcjonistycznie, czy holistycznie. Ci pierwsi często wyjaśniają odpowiedź systemową na takie zmiany odniesieniem do homeostazy, która jest dla nich kluczowym elementem definiującym cechy życia¹²⁶⁵. Koncepcja mechanizmów homeostatycznych odnosi się do zdolności organizmu utrzymywania stabilnego środowiska wewnętrznego w zmieniającym się środowisku zewnętrznym (utrzymanie stanu systemu zbliżonego do ustalonych wstępnie wartości). Mechanizmy te są odpowiedzialne za przywracanie wewnętrznej stabilności organizmu w zetknięciu z perturbacjami zewnętrznymi. Stałość środowiska wewnętrznego stanowi jedynie przestrzenno-temporalny wycinek zjawiska naturalnego. Na podstawie takiego wycinka, biolodzy identyfikują i badają części konstytuujące mechanizmy homeostatyczne¹²⁶⁶.

¹²⁶⁴ Tamże.

¹²⁶⁵ Por. J.M. Marcum, *The conceptual foundations...*, s. 53.

¹²⁶⁶ Koncepcją powiązaną z homeostazą jest stabilność – zdolność układu do utrzymywania swojego strukturalnego oraz funkcjonalnego wstępnie ustalonego stanu, a nie jedynie

Homeostaza jest właściwością systemową, uzależnioną od regulacji interakcji liniowych pomiędzy komponentami systemu¹²⁶⁷. Jest ona zasadniczo redukcjonistyczna w dwóch istotnych aspektach. Po pierwsze, ogniskiem zainteresowania jest bardzo często pojedynczy czynnik, szczególnie w odniesieniu do przywracania bądź korygowania czynnika, w odniesieniu do którego z kolei nastąpiło odchylenie od wartości normalnej. Po drugie, interakcje pomiędzy częściami składowymi systemu mają charakter liniowy i statyczny w odniesieniu do szerokiego zakresu wstępnie ustalonych wartości. Redukcjonisci wykorzystują homeostazę do wyjaśniania interakcji pomiędzy częściami systemu. Interakcje te są wystarczające do wyjaśnienia zachowania systemu, jako że organizm stara się pozostać w liniowym zakresie wartości dla podanego parametru¹²⁶⁸. Inni redukcjonistycznie nastawieni badacze życia objaśniają odpowiedź systemową, odnosząc się do homeodynamiki, zależnej od dynamiki liniowej bądź stabilności dynamicznej. Zdaniem tej grupy biologów systemowych homeodynamika inkorporuje homeostazę¹²⁶⁹. Uważają oni homeodynamikę za koncepcję bardziej ogólną, o szerszym zakresie, podczas gdy homeostaza staje się jej przypadkiem szczególnym. Homeodynamika to ciągła transformacja jednego systemu dynamicznego w inny, poprzez niestabilności w punktach bifurkacji¹²⁷⁰. Homeodynamika jest dynamicznie interaktywna, a nie statyczna w związku z tym, że system osiąga równowagę w odniesieniu do zintegrowanych mechanizmów regulacyjnych. System dynamiczny reprezentuje samoorganizację układu otwartego, w którym możliwe jest nie tylko utrzymywanie stanu stabilnego, ale również przełączanie się pomiędzy różnymi stanami stabilnymi. Najważniejszą właściwością systemu homeodynamicznego jest jego spójność przestrzenno-temporalna, odnosząca się do synchronizacji w czasie i przestrzeni molekuł bądź architektury struktur ponadmolekularnych lub ponadkomórkowych, poprzez samoorganizację w widoczny, celowy, funkcjonalny sposób. Poza mechanizmami działającymi od dołu ku górze homeodynamika obejmuje również mechanizmy działające z góry w dół, przyczyniające się do powstawania złożonych zachowań systemowych. Chociaż wyjaśnienie zachowania systemowego obejmuje punkty bifurkacji, to jednak w dalszym ciągu opiera się na mechanizmach liniowych.

jego równowagi fizyczno-chemicznej. Stabilność ta ma naturę statyczną, biorąc pod uwagę wstępnie założone wartości stanu bądź warunki zachowywane w określonym, ograniczonym zakresie. Por. tamże, s. 53.

¹²⁶⁷ Por. tamże, s. 59.

¹²⁶⁸ Por. tamże, s. 60.

¹²⁶⁹ Por. tamże, s. 68.

¹²⁷⁰ Por. tamże, s. 60.

Z kolei holistycznie ukierunkowani biolodzy wyjaśniają odpowiedź systemu biologicznego na zewnętrzne zmiany, odwołując się do kategorii odporności (ang. *robustness*) na perturbacje, opierającej się na dynamice nieliniowej¹²⁷¹. Ich zdaniem odporność odnosi się do zdolności systemu do przystosowywania się bądź znoszenia rozmaitych perturbacji, które mogłyby naruszyć jego funkcjonalność (nie tylko strukturalną, ale również funkcjonalną)¹²⁷². Systemy biologiczne utrzymują fenotypową stabilność w obliczu różnych środowiskowych perturbacji, stochastycznych zdarzeń i genetycznych wariacji¹²⁷³. Odporność często powstaje wskutek dodatnich i ujemnych sprzężeń zwrotnych oraz innych form kontroli, które ograniczają moc wyjściową genu. Sprzężenie izoluje system od fluktuacji narzucanych przez otoczenie. Dodatnie sprzężenie zwrotne na ogół zwiększa czułość, podczas gdy ujemne może tłumić szum i odrzucać wahania. Odporność na perturbacje jest nieodłączną własnością wszystkich bioukładów i silnie sprzyja jej ewolucji. W odróżnieniu od homeostazy odporność uzależniona jest od dynamiki nieliniowej (system oraz jego właściwości nie są proporcjonalne do sumy części składowych oraz ich właściwości)¹²⁷⁴. Dodatkowo biolodzy systemowi odróżniają odporność od homeostazy, ponieważ odporność zależna jest od strategii utrzymywania funkcjonalności (nawet jeśli strategie te przeczą stabilności), podczas gdy w przypadku homeostazy nie mamy z czymś takim do czynienia. „Ostatecznie, odporność – pisze Marcum – wykazuje architekturę muchy bądź klepsydry, składającą się z wysoce chronionego procesu rdzeniowego, odpowiedzialnego za odpowiedź na perturbacje”¹²⁷⁵.

Fulvio Mazzocchi stoi na stanowisku, że redukcjonistyczne i holistyczne strategie badawcze powinny zostać zintegrowane¹²⁷⁶. Zamiast jako opozycyjnie i kompatybilnie można by (jak twierdzi) postrzegać je jako współzależne i komplementarne. Przekonuje, że –metodologicznie rzecz biorąc – pozwalają one na badanie fizycznych zjawisk zachodzących zarówno oddolnie (ang. *bottom-up*) (zaczynając od mikropoziomu), jak i odgórnie (ang. *top-down*) (startując od poziomu makro). Oba podejścia mogą być realizowane jednocześnie na wielu poziomach, tam i z powrotem, w ciągłej wymianie poglądów i możliwej obserwacji systemu. Badacz podkreśla, że należy skupić uwagę nie tylko na funkcjonowaniu komórki na pewnym pozio-

¹²⁷¹ Por. tamże, s. 53.

¹²⁷² Por. tamże, s. 53.

¹²⁷³ Por. A. Aderem, *Systems biology: its practice and challenges*, „Cell”, 121 (2005), s. 511.

¹²⁷⁴ Por. J.M. Marcum, *The conceptual foundations...*, s. 54.

¹²⁷⁵ Tamże, s. 54.

¹²⁷⁶ Por. F. Mazzocchi, *Complexity and the reductionism-holism...*, s. 420.

mie, ale również na jej relacji względem bezpośrednio sąsiadujących z nią poziomów. Będzie to możliwe dzięki zastosowaniu wielu międzypoziomowych metodologii, które scalają sąsiadujące stopnie struktury komórkowej. „Ujmując to tak, a nie inaczej – pisze Mazzocchi – redukcjonizm i holizm okazują się względne, ponieważ zależą od perspektywy danego poziomu organizacyjnego. W swoich zmaganiach z zasadą emergencji jeden z najważniejszych problemów biologii systemów to zasadność oddolnej lub odgórnej przyczynowości, co oznacza, że związek przyczynowy nie działa wyłącznie na podstawowym poziomie molekularnym i że porusza się cyrkularnie”¹²⁷⁷.

Chociaż biologia systemów jest dziś jeszcze w powijakach, jej potencjalne korzyści są ogromne, zarówno pod względem naukowym, jak i praktycznym¹²⁷⁸. Dzięki niej możliwa stała się zmiana sposobu myślenia – przeniesienie się z poziomu molekularnego na poziom systemu – sprzyjająca zrewolucjonizowaniu rozumienia złożonych biologicznych systemów regulacyjnych oraz zapewnieniu nowych możliwości praktycznego zastosowania. Niezaprzeczalne są osiągnięcia biologii molekularnej oraz jej zastosowania szczególnie w medycynie¹²⁷⁹. Stała się ona istotną częścią naszego aktualnego opisu zjawisk zachodzących w systemach żywych¹²⁸⁰. Jednakże w celu dogłębnego zrozumienia, czym jest życie, opis dostarczony przez biologię molekularną okazuje się niewystarczający¹²⁸¹. Aby zrozumieć naturę samego życia, nie wystarczy liczenie i mapowanie wszystkich genów, białek i innych cząsteczek. Redukcjonizm stworzył katalog części organizmu, lecz celem biologii jako nauki nie jest poznanie części samych w sobie, ale relacji między tymi częściami¹²⁸². Pomimo szerokiej wiedzy na temat wielu elementarnych składników komórek niemożliwe pozostawało przewidzenie, jak organizm będzie się rozwijał i jak zareaguje na zewnętrzne bodźce i czynniki środowiskowe. Nawet szybki przyrost danych i doświadczeń przeprowadzanych na mikroorganizmach i liniach komórkowych nie przyniósł pożądanego zrozumienia zjawisk biologicznych. Z czasem stało się jasne, że konieczna jest kolejna zmiana paradygmatu. „Opracowane miały zostać – piszą Voit i Schwacke – nowe zasady – nie prawa »sił życiowych« czy teleologii, lecz prawa zintegrowanych systemów i zorganizowanej złożoności – krok naprzód względem zorganizowanej prostoty

¹²⁷⁷ Tamże, s. 420.

¹²⁷⁸ Por. H. Kitano, *Systems biology: a brief overview*, s. 1664.

¹²⁷⁹ Por. K. Kaneko, *Life: an introduction to complex systems biology*, Springer, Berlin–Heidelberg–New York 2006, s. 7.

¹²⁸⁰ Por. tamże, s. 5.

¹²⁸¹ Por. tamże, s. 2.

¹²⁸² Por. E.O. Voit, J.H. Schwacke, *Understanding through modeling...*, s. 32.

Newtona i dwa kroki naprzód względem klasycznych poglądów boskiego ładu lub pierwotnie zakładanej złożoności”¹²⁸³.

Powyższemu zadaniu ma „stawić czoła” współczesna biologia systemów. Przedstawiciele tej „nowej” (choć swymi korzeniami sięgającym w głąb historii) biologii wychodzą z założenia, że do pełnego zrozumienia życia konieczne jest podejście systemowe, zgodnie z którym zamiast charakteryzować pojedyncze części komórki lub organizmu, należy skoncentrować się na badaniu struktury i dynamiki funkcji komórkowo-organizmalnych¹²⁸⁴. Zrozumienie właściwości systemów (jak na przykład trwałości) może mieć nieoceniony wpływ na przyszłość medycyny. Potrzebnych jest jednak wiele przełomowych odkryć w kontekście doświadczalnych urządzeń, zaawansowanego oprogramowania i metod analitycznych. Dopiero wtedy osiągnięcia biologii systemów będą mogły sprostać pokładanym w niej oczekiwaniom.

* * *

Podsumowując materiał zawarty w niniejszym rozdziale i akcentując najważniejsze jego treści, należy stwierdzić, że po raz pierwszy Schrödinger skierował swoją uwagę na problemy biologiczne już w 1932 roku, interesując się problemem rozmiaru i wewnętrznej spójności genu. Rok później w Pruskiej Akademii Nauk wygłosił mowę pod tytułem *Warum sind die Atome so klein?*, w której zawarł swoje przemyślenia na ten temat. W jednym z esejów opublikowanych w tomie zatytułowanym *Science and the human temperament* austriacki fizyk poruszył kwestie związane z termodynamiką w odniesieniu do organizmów żywych. Swoje spostrzeżenia ukierunkowane szczególnie na fenomen życia zamieścił w książce *What is life?*, którą napisał w 1944 roku, a którą oparł na wygłoszonych rok wcześniej wykładach w amfiteatrze Wydziału Fizyki na Trinity College w Dublinie. Przy pisaniu książki korzystał z prac o tematyce genetycznej takich autorów, jak: John B.S. Haldane, Edmund Ware Sinnott i Leslie Clarence Dunn, Cyril D. Darlington, Nikołaj W. Timofiejew-Riesowski, Karl G. Zimmer i Max Delbrück oraz Charles Sherrington.

Następnie podjęto próbę odpowiedzi na pytanie, jaki był stan genetyki i biochemii do momentu publikacji *What is life?* Wszystkim ówczesnym badaniom z dziedziny genetyki towarzyszył brak szczegółowej wiedzy o chemicznej strukturze genu. „Klasyczny gen” był teoretyczną abstrakcją. W czasie, kiedy austriacki fizyk pisał swoją książkę, powszechne było myślenie, że geny są białkami kontrolującymi syntezę innych białek.

¹²⁸³ Tamże.

¹²⁸⁴ Por. H. Kitano, *Systems biology: a brief overview*, s. 1662.

Streszczając poglądy Schrödingera dotyczące zagadnień związanych z organizacją życia, należy stwierdzić, że ten znany fizyk stał na stanowisku, że kluczem do zrozumienia istoty życia jest zasada „porządku z porządku”. Nowe prawa fizyki, określane mianem praw „porządku wynikających z porządku” (prawa „dynamiczne”), kontrastowały w jego systemie z prawami „porządku wynikającymi z nieporządku” (prawa „statystyczne”). Zasada „porządku z nieporządku” jest dziedzictwem fizyki statystycznej, podczas gdy zasada „porządku z porządku” wynika ze spostrzeżeń dostarczonych przez teorię kwantową. Z zasady „porządek z porządku” Schrödinger wyprowadził najbardziej swoiste cechy życia. Fizyk-noblista zwrócił szczególną uwagę na obecność w bioukładach aperiodycznych ciał stałych będących cząsteczkami chromosomu, które odpowiadają za utrzymywanie wewnętrznego porządku. Z perspektywy czasu najbardziej istotnym aspektem publikacji Schrödingera okazała się koncepcja „planu działania” „zakodowanego scenariusza”. Zgodnie z poglądem Austriaka, kluczowym aspektem była kontrola każdej żywej komórki za pomocą skryptu w jakiś sposób zapisanego w jej chromosomach. Porcje kodu genetycznego, geny, Schrödinger postrzegał jako kryształy aperiodyczne, fizycznie podobne do molekuł bez periodycznego powtarzania. Jeden taki kryształ lub ich para miały kierować uporządkowanym procesem życia.

Rola Schrödingera w historii biologii molekularnej jest paradoksalna. W pewnym sensie odpowiada on bowiem zarówno za powstanie biologii molekularnej, jak i za jej radykalną rekonceptualizację. Z jednej strony praca austriackiego fizyka poprzez przedstawienie głównej roli „molekuły nadrzędnej” dostarczyła podstawy do rozwoju redukcjonistycznego podejścia w biologii („perspektywa schrödingerowska”). W skrócie (za Hendricksonem) „perspektywa schrödingerowska”:

- uznaje istnienie poziomów organizacji, ale jest redukcjonistyczna w przekonaniu, że wszystkie właściwości wyższego poziomu mogą być wyjaśnione przez właściwości niższego szczebla,
- uznaje przyczynowość postępującą w górę, z niższych szczebli organizacyjnych na wyższe poziomy (nie uznaje cech emergentnych),
- na poziomie molekularnym uznaje tylko liniową przyczynowość i jednokierunkowy przepływ informacji, a DNA traktuje jako jedyne źródło informacji.

Program badawczy „ery heroicznej” (trzy dekady po publikacji *What is life*) był wyraźnie inspirowany tekstowo-semantycznymi metaforami przedstawionymi przez Schrödingera. „Era heroiczna” przyjęła je i przerobiła. Idee „kryształu aperiodycznego” i „zakodowanego scenariusza” przyczyniły się do „złamania” przez biologów molekularnych kodu genetycznego, szcze-

gółowego opisu, w jaki sposób DNA koduje białka, a także wyjaśnienia podstawy komórkowych mechanizmów regulacyjnych oraz odkrycia molekularnej anatomii wielu białek.

Z drugiej jednak strony, podkreślając znaczenie samoorganizacji *What is life?*, dała pojęciowe podstawy upadku redukcjonistycznego podejścia genetycznego, wskazując drogę dla jego alternatywy. Ta alternatywa, którą Hendrickson nazywa „perspektywą poschrödingerską”, zastąpiła redukcjonizm strategią uwzględniającą kontekst oraz relacje poszczególnych części w konstrukcji całości. W tej perspektywie nacisk przesuwają się z pojedynczych genów na funkcjonowanie genomu jako całości. Metafora „molekuly nadrzędnej” w perspektywie „poschrödingerskiej” ustępuje obrazom sieci i samoorganizujących się układów. „Perspektywa poschrödingerska” (za Hendricksonem):

- uznaje, że na każdym poziomie organizacji pojawiają się nowe właściwości, a te mogą być przyczynowo skuteczne, zarówno na swoim poziomie, jak i na niższych szczeblach organizacyjnych,
- nie uznaje uprzywilejowanych poziomów badania lub wyjaśnienia, ale zakłada, że na wszystkich poziomach istnieją sieci zamiast liniowych przyczynowych łańcuchów (przykładowo na poziomie biomolekularnym sieć łącząca DNA, RNA, białka i inne biomolekuly – zwyczajowy dyskurs przyczyny i skutku nie działa w przypadku sieci; dla najprostszej sieci – koła – mamy problem kury i jajka, każde z nich jest zarówno przyczyną, jak i skutkiem),
- nie jest genocentryczna, ale lokalizuje odniesienia na wszystkich poziomach organizacji, z których żaden nie jest uprzywilejowany (jest bardziej holistyczna niż redukcjonistyczna, będąc skupiona na organizmie).

Klasyczna już pozycja Schrödingera przez wprowadzenie pojęcia kodu genetycznego oraz aperiodycznych struktur materiału genetycznego stworzyła także ramy koncepcyjne dla bioenergetyki, zrodziła się więc potrzeba reinterpretacji dyskusji Schrödingera nad „wsysaniem uporządkowania z otoczenia do organizmu”. Uwaga badaczy skoncentrowała się na dwóch koncepcjach: idei sieci i fizyczno-chemicznych instancji samoorganizujących się układów. Wcielenie tych idei (wraz z kilkoma innymi) do biologii molekularnej późnego XX wieku doprowadziło do stworzenia biologii systemów, która zapewnia ramy koncepcyjne – do nich odnosimy kryzys kompleksowości postgenomowej biologii.

„Perspektywa poschrödingerska” na początku XXI wieku jest integralną częścią teoretycznej refleksji nad fenomenem życia oraz praktyki badawczej wielu rzeczników biologii systemów. Ta współczesna dziedzina nauki zrodziła się na bazie kryzysu, w jakim znalazła się biologia molekularna.

larna pod koniec minionego stulecia. Biologia systemów dla wielu jej przedstawicieli manifestuje odejście od redukcjonizmu „perspektywy schrödingerskiej”, czyli porzucenie przekonania, że złożone struktury i funkcje mogą bezpośrednio i całkowicie być wytłumaczone przez właściwości ograniczonej liczby produktów genowych, na rzecz holizmu „perspektywy poschrödingerskiej”. Biologia systemów to odpowiedź na przeładowanie informacjami i niespodziewane połączenia zarówno między poszczególnymi elementami systemów biologicznych, jak większymi całościami czy nawet samymi systemami.

Rozdział IV

DYSKUSJA WOKÓŁ „WIEDEŃSKIEJ” INTERPRETACJI UKŁADÓW BIOTYCZNYCH

Opublikowanie pracy *What is life?* spowodowało ożywioną dyskusję wokół jej tematyki. Jej przedmiotem stały się zagadnienia formalne i merytoryczne. Autorzy odnosili się zarówno do założeń i implikacji, jakie wynikały z pracy o życiu, jak również ustosunkowywali się do zagadnień merytorycznych. W czwartym rozdziale niniejszej dysertacji zreferowano dyskusję wokół koncepcji życia Schrödingera. Szczegółowo zaprezentowano reakcje czytelników *What is life?* – zarówno pozytywne, jak i krytyczne uwagi dotyczące tak uwarunkowań epistemologiczno-metodologicznych, jak i samego meritum koncepcji życia austriackiego fizyka. W dalszej kolejności porównano poglądy biologiczne Schrödingera z paralelnymi poglądami Bohra i Delbrücka. Autor przedstawił także dyskusję nad wpływem poglądów Schrödingera na sposób, w jaki późniejsi badacze analizowali kwestie związane z organizacją życia i zakresem tego wpływu na naukowców podejmujących zagadnienia biologiczne po drugiej wojnie światowej. Z jednej strony istnieją bowiem opinie, iż *What is life?* stało się publikacją niezwykle wpływową, stanowiąc inspirację dla fizyków, chemików i biologów, którzy rozpoczęli badania nad organizacją życia. Istnieje również pogląd, że pomysły przedstawione w *What is life?* miały niewielki wpływ na profil badań późniejszych badaczy życia. W końcowej części rozdziału niniejszej pracy poddane zostały analizie reinterpretacje najważniejszych twierdzeń zaprezentowanych przez austriackiego fizyka dokonane przez współczesnych badaczy.

4.1. OCENA „WIEDEŃSKIEJ” INTERPRETACJI UKŁADÓW BIOTYCZNYCH

Praca *What is life?* była wielokrotnie przedrukowywana, niezliczoną ilość razy przeglądana, recenzowana, chwalona i krytykowana przy licznych

okazjach¹²⁸⁵. Niewątpliwie wpływ na jej popularność miał fakt, iż autor już wówczas był znany jako jeden z twórców mechaniki falowej¹²⁸⁶. Uwaga, jaką poświęcono tej publikacji, bez wątpienia była spowodowana wysoką, międzynarodową pozycją Schrödingera¹²⁸⁷.

What is life? nie zakończyła zainteresowania Schrödingera tematyką biologiczną¹²⁸⁸. Wymiana listów z Haldanem w 1945 roku wskazuje, że ciągle zgłębiał kwestię genetyki populacyjnej. Kilka lat po opublikowaniu pracy dzielił się przemyśleniami z biologami z Uniwersytetu w Manchesterze¹²⁸⁹. Niektóre z biologicznych uwag można znaleźć w notatniku zatytułowanym *Xmas 1948* (przedstawia on to samo stanowisko, co w swojej publikacji)¹²⁹⁰. Schrödinger zaznaczył w nich, że dyskutował na ten temat, wyrażając te same poglądy na sympozjum w Alpach w 1952 roku (w mieście tym został pochowany 9 lat później). Jednakże poza tymi epizodami nie ma dalszych wyraźnych dowodów przemawiających za jego późniejszym zainteresowaniem kwestiami biologicznymi¹²⁹¹.

Pierwsze recenzje *What is life?* pojawiły się w naukowych i popularnych czasopismach już w pierwszych miesiącach 1945 roku¹²⁹². W ciągu kilku lat od pierwszego wydania książki pojawiły się jej niemieckie, hiszpańskie i japońskie tłumaczenia. Od samego początku praca cieszyła się ogromną popularnością i wielu czytelników wnikliwie ją analizowało. Wśród wyróżniających się naukowców-recenzentów książki Schrödingera można było znaleźć Johna B.S. Haldane'a, Michaela Polanyiego, Maxa Delbrücka, Cyrila D. Darlingtona czy Hermanna Mullera. Książka została zrecenzowana w prestiżowych czasopismach naukowych, między innymi „Die Naturwissenschaften”, „Scientia”, „British Medical Journal”, „The Lancet”, „Proceedings of the Physical Society”, „Scientific Monthly”, „Current Science”, „American Naturalist”, „Oxford Magazine” oraz „Cambridge Review”, co dowodzi, że skupiła na sobie uwagę wielu naukowców. Prowadzone też były mniej formalne dyskusje o ideach Schrödingera, na przykład w „Physics today”, „American Scientist” lub „Scientific American” oraz przez tych naukowców, którzy popularyzowali idee austriackiego fizyka, takich jak George Gamow czy wspomniany Darlington¹²⁹³.

¹²⁸⁵ Por. N. Mukunda, *Linking life to the quantum...*, s. 71.

¹²⁸⁶ Por. N. Symonds, *Schrödinger and Delbrück...*, s. 232.

¹²⁸⁷ Por. E. Yoxen, *Where does Schrödinger's...*, s. 21.

¹²⁸⁸ Por. S. Sarkar, *Erwin Schrödinger's excursus on genetics*, s. 100.

¹²⁸⁹ Por. R. Olby, *Schrödinger's problem: what is life?*, s. 122.

¹²⁹⁰ Por. E. Yoxen, *Where does Schrödinger's...*, s. 36.

¹²⁹¹ Por. S. Sarkar, *Erwin Schrödinger's excursus on genetics*, s. 100. Por. N. Symonds, *What is life? Schrödinger's influence on biology*, s. 221.

¹²⁹² Por. E. Yoxen, *Where does Schrödinger's...*, s. 19–20.

¹²⁹³ Por. tamże, s. 26.

Śledząc zawartość recenzji publikowanych na przestrzeni kilkudziesięciu lat od ukazania się omawianej pracy Schrödingera, można znaleźć tam głosy zarówno bardzo pozytywne, jak i bardzo krytyczne. Podczas gdy wielu komentatorów twierdziło, że książka ta miała fundamentalne znaczenie dla powstania biologii molekularnej, inni – dla odmiany – utrzymywali, że ma wiele braków, a nawet zawiera błędne informacje z dziedzin biologii i chemii. Najwięcej jednak było ocen wyważonych, zawierających zarówno elementy pozytywne, jak i krytyczne, które przedstawiono w poniższym rozdziale.

Od samego początku wielu autorów recenzji i omówień *What is life?* dostrzegało mocne strony biologicznych rozważań Schrödingera. Już w 1945 roku Cyril D. Darlington napisał recenzję publikacji Schrödingera, w której wymienia szereg walorów spojrzenia austriackiego fizyka na fenomen życia. Dla autora recenzji wymagający podkreślenia jest już sam fakt, że autorytet w dziedzinie mechaniki falowej zainteresował się samym fundamentem genetyki, jakim jest mechanizm dziedziczności¹²⁹⁴. Podkreśla, że bycie synem botanika dało Schrödingerowi łatwość i pewność w zajmowaniu się biologią, których nie mieli pozostali (poza Bohrem) ówcześni fizycy. Darlingtonowi imponuje rozległa wiedza biologiczna austriackiego fizyka, której pozazdrościć mogą nawet osoby posiadające stopnie akademickie w dziedzinie zoologii i botaniki. Docenia, że Schrödinger pokazał nam pierwsze kroki na ścieżce prowadzącej do poznania fenomenu życia. Ma nadzieję, że fizyk wkrótce wyrazi chęć, by poprowadzić nas dalej tą drogą.

O tym, że książka od samego początku była wysoko ceniona przez wielu naukowców świadczy komentarz anonimowego recenzenta drugiej edycji z 1948 roku, zamieszczony w „Plant Breeding Abstract”: „Ta książka już stała się klasyką biologiczną”¹²⁹⁵. Po kilku dekadach dzieło Schrödingera wciąż znajduje swoich obrońców. Jan Witkowski ma jednak wątpliwości, czy wszyscy, którzy powołują się na nie, w ogóle je przeczytali. Píše: „Istnieje pewna grupa książek, do której znajomości przyznają się pewne kręgi intelektualne, niestety nie ma pewności, czy zostały one w tych kręgach przeczytane. Przykładami takich książek, które przychodzą nam na myśl są: *O pochodzeniu gatunków* Darwina, *Traktat logiczno-filozoficzny* Wittgensteina oraz *Finnegan's Wake* Joyce'a z tematów odpowiednio: naukowego, filozoficznego oraz literackiego. Dla kręgów biologów i biologów molekularnych taką książką jest *What is life?*”¹²⁹⁶ Witkowski podkreśla, że książka

¹²⁹⁴ Por. C.D. Darlington, *Untitled review of 'What is life?', by E. Schrödinger*, „Discovery”, 6 (1945), s. 126.

¹²⁹⁵ [Unsigned review], „Plant breeding abstracts”, 19 (1948), s. 121; cyt. za: E. Yoxen, *Where does Schrödinger's...?*, s. 21.

¹²⁹⁶ J.A. Witkowski, *Schrödinger's 'What is life?' ...*, s. 266.

jest napisana w zwięzłym, treściwym i eleganckim stylu, który wydaje się rzadko osiągalny współcześnie¹²⁹⁷. Poniżej zaprezentowano wybrane pozytywne komentarze zamieszczone w publikowanych na przestrzeni kilku dekad recenzjach *What is life*. Ich autorzy zwracają szczególną uwagę na oryginalność i doniosłość biologicznych rozstrzygnięć austriackiego fizyka.

Wielu recenzentów podkreślało nowatorską linię rozumowania w spekulacjach Schrödingera o organizacji życia. Do tej grupy recenzentów należy Leon Brillouin, który w swej pracy *Life, thermodynamics and cybernetics* (Życie, termodynamika i cybernetyka), opublikowanej w 1949 roku, spekulacje Schrödingera na temat „termodynamika a życie” określił jako „interesującą, trafną i oryginalną linię rozumowania”¹²⁹⁸. Ten wybitny francuski fizyk odnośnie do korelacji praw fizyki i chemii (w tym drugiej zasady termodynamiki) z istnieniem życia rozważa trzy możliwe stanowiska¹²⁹⁹:

- konserwatywne, które znamionuje ostrożność i reprezentowane jest przez generację uczonych z przełomu XIX i XX wieku. Zgodnie z nim, znane prawa fizyki i chemii w pełni umożliwiają wyjaśnienie wszystkich aspektów życia; nie potrzeba więc odwoływać się do nieznanych praw,
- zgodnie z punktem widzenia, który Brillouin nazywa postępowym, pełne wyjaśnienie fenomenu życia będzie możliwe dopiero wtedy, kiedy odkryjemy nowe, nieznanne dotąd, prawa fizyki i chemii (jakkolwiek znane już dziś prawa nie pozostają z nim w sprzeczności),
- określane przez autora jako entuzjastyczne, zakłada, że fenomen życia różni się w zasadniczy sposób od układów nieożywionych, stąd do jego zrozumienia konieczne jest odwołanie do specyficznej dla życia „zasady”; w szczególności druga zasada termodynamiki ma obowiązywać tylko w obszarze obiektów nieożywionych; życie nie podlega tej zasadzie, a nawet pozostaje z nią w sprzeczności aż do momentu, gdy nadchodzi śmierć. Gdy życie zanika, druga zasada termodynamiki znów odzyskuje swoją moc.

Austriackiego fizyka Brillouin zalicza do reprezentantów drugiego z wyżej wymienionych stanowisk. Zamiast używanego przez niego określenia „ujemna entropia” wprowadza własne: „negentropia”. W jednej ze swoich publikacji książkowych pisze: „E. Schrödinger w swej książce *What is life?* podkreślił znaczenie negentropii. Jeżeli organizm żywy szuka pożywienia, to tylko w celu uzyskania z niego negentropii, która jest niezbędna dla pokrycia strat spowodowanych przez pracę mechaniczną lub proste procesy degradacji energii w organizmie żywym. Energia zawarta w pożywieniu nie

¹²⁹⁷ Por. tamże, s. 267.

¹²⁹⁸ Por. L. Brillouin, *Termodynamika – cybernetyka – życie*, cz. I, s. 37.

¹²⁹⁹ Por. tamże, s. 36.

odgrywa w istocie większej roli, ponieważ jej wartość jest zachowywana i nigdy nie ulega zmniejszeniu; istotnym czynnikiem jest tu negentropia”¹³⁰⁰.

Waldemar Kaempffert w swej recenzji z 1953 roku podkreśla, że Schrödinger podjął próbę stawienia czoła fundamentalnemu problemowi, który zaprzętał od lat umysły wielu naukowców próbujących złamać tajemnicę życia¹³⁰¹. „Dla niego – pisze Kaempffert – sposób, w jaki zarodek przybiera ludzką postać, był najbardziej fascynującym ze wszystkich problemów naukowych – o wiele bardziej fascynującym od uwalniania energii z uranu-235 lub plutonu. Zdumiewało go to, co ma miejsce, gdy jaja muszki owocowej są poddawane intensywnemu promieniowaniu rentgenowskiemu. Taki zabieg przynosi na świat potworne stworzenia – muchy z czerwonymi oczami, włochate, nagie, pozbawione skrzydeł, z oznakami zaburzeń. Stworzenia te, jeśli przeżyją, bez wyjątku rozmnożą się, co oznacza, że ich potomstwo będzie podobne do swych rodziców. Coś musiało po drodze stać się z niewidzialnymi genami w plazmie zarodkowej napromieniowanych much, czyniąc geny tym dla życia, czym atomy dla metalu lub gazu. Geny te są zawarte w małych opakowaniach nazywanych chromosomami (które zawdzięczają swoją nazwę temu, że są widoczne pod mikroskopem po zabarwieniu ich odpowiednim barwnikiem). Geny są niewątpliwie złożonymi cząsteczkami, tak więc musimy odnosić się do nich fizycznie i chemicznie. Promienie rentgenowskie [...] zaburzają strukturę molekularną genu, a nowa struktura nadaje plazmie zarodkowej nowe potencjalności, umożliwiając przyjście na świat potworom”¹³⁰². Kaempffert podkreśla, że Schrödinger podjął się „ar-

¹³⁰⁰ Tenże, *Nauka a teoria informacji*, Warszawa, PWN 1969, s. 160. Przywołany autor doprecyzowuje i uzupełnia wyjaśnienia Schrödingera. Dla Brillouina życie opiera się na pewnej liczbie procesów ujemnej katalizy. Dzięki niej organizm żywy utrzymuje się w całości. Swoisty ujemny katalizator podtrzymuje stan nietrwałej struktury organizmu żywego, przeciwdziałając tym samym jej dezorganizacji. Dzięki ujemnemu katalizatorowi organizm żywy jest zdolny odraczać w czasie (aż do dnia śmierci) normalną procedurę rozkładu. Brillouin, idąc za sugestią Norberta Wienera, postuluje również rozszerzenie pojęcia entropii o informację (informacja jako „ujemna entropia”) tak, by mogła ona w pełni opisywać procesy zachodzące w organizmach żywych. Jego zdaniem rozszerzenie pojęcia entropii w dziedzinie biologii będzie skutkowało stworzeniem „nowej klasyfikacji energii”. W przeciwieństwie do materii nieożywionej, gdzie dostatecznie znana jest ilość energii i entropii, w przypadku organizmów żywych potrzebne jest wprowadzenie „wartości odżywczej”. Funkcje kalorii zawartych w węglu są zupełnie inne aniżeli funkcje kalorii zawartych w zbożu czy mięsie. Poza tym w obrębie samych organizmów „wartość odżywcza” może się różnicować w zależności od specyfiki istoty żywej. Jako przykład podaje celulozę, która stanowi pożywienie tylko dla niektórych organizmów. Por. L. Brillouin, *Termodynamika – cybernetyka – życie*, cz. II, tłum. K. Malinowski, „Problemy”, 12 (1974) s. 38–39.

¹³⁰¹ Por. W. Kaempffert, *Explorations in science*, The Viking Press, New York 1953, s. 82.

¹³⁰² Tamże, s. 82–83.

cyważnej” próby wyjaśnienia, dlaczego chromosomy ojca lub matki powinny dzielić się równomiernie tak, że niektóre cechy ojca i niektóre matki zostają przeniesione na ich potomstwo. Austriacki fizyk, jak zauważa autor recenzji, podszedł do tego zagadnienia zarówno od strony matematycznej, jak również od strony teorii kwantowej. Uważa gen za gigantyczną, wysoce złożoną cząsteczkę zdolną do reprodukcji. „Jest to nowy sposób postrzegania życia – pisze – na tyle praktyczny, że mogą z niego skorzystać biochemik i biofizyk. Stanowi on najlepsze rozwiązanie, jakim obecnie dysponujemy, ponieważ umożliwia wyjaśnianie życia w odniesieniu do nowej wiedzy. Schrödinger przyznaje jednak, że jeśli ta uporządkowana i złożona cząsteczka, ten gen, może wytworzyć o wiele bardziej uporządkowanego i złożonego konia bądź człowieka, porządek musi być doprowadzany do niej z zewnątrz. Inaczej mówilibyśmy o zwyczajnej agregacji atomów rozkręcanej niczym zegar. Gdzie znajdujemy się, kiedy mamy do czynienia z takim podejściem do tajemnicy życia? Odpowiedź brzmi: przed granitową ścianą, której do tej pory nie udało nam się ukruszyć. Geny i chromosomy zawierają coś, co Schrödinger nazywa »zakodowanym scenariuszem«, który wydaje rozkazy do przeprowadzenia. Ponieważ jednak wciąż nie potrafimy skutecznie odczytywać skryptów, niewiele wiemy o wzroście i tym samym niewiele wiemy o życiu”¹³⁰³.

Elof A. Carlson podkreśla, że w pierwszych dekadach badań genetycznych nie było możliwe zrobienie czegokolwiek więcej ponad zwyczajne skupienie uwagi na gołej strukturze i lokalizacji genów¹³⁰⁴. Funkcję genów po raz pierwszy wyrażono w ramach modelu Beadle’a i Tatum’a za pomocą teorii „jeden gen – jeden enzym”. W latach czterdziestych istniało wystarczająco duże zainteresowanie genetyką, by zaintrygować nią fizyków i biochemików. Według Carlsona Schrödinger w swej książce zawarł jedno z pierwszych, bardzo nowatorskich, spostrzeżeń na temat tego problemu (opartych na intuicji, nie eksperymentach), pisząc o kryształach aperiodycznym stanowiącym chromosom, który w jakiś sposób regulował całość organizmalnej specyficzności, struktury i niepowtarzalności¹³⁰⁵.

Na to, co uważa za osobliwe, oryginalne i ważne w podejściu austriackiego fizyka do biologii wskazuje Yehuda Elkana¹³⁰⁶. „Była to oryginalność

¹³⁰³ Tamże, s. 83–84.

¹³⁰⁴ Por. E.A. Carlson, *The gene: a critical history*, W.B. Saunders Company, Philadelphia–London 1966, s. 231.

¹³⁰⁵ Por. tamże, s. 231–232.

¹³⁰⁶ Por. Y. Elkana, *Erwin Schrödinger as historian – notes towards an interpretation* [w:] J. Götschl (ed.), *Erwin Schrödinger’s world view. The dynamics of knowledge and reality*, Springer Science+Business Media, Dordrecht 1992, s. 122.

jego podejścia – pisze badacz – która wywołała tak silne uderzenie, bez względu na wartość prawdy czy specyficzne twierdzenia”¹³⁰⁷. Elkana podkreśla, że fizyka z kształtem, jaki posiadała w 1943 roku, nie miała narzędzi do poradzenia sobie ze zjawiskami biologicznymi¹³⁰⁸. Prawa fizyki i chemii były pod każdym względem statystyczne. Najbardziej skomplikowanym obiektem, z którym fizyka mogła sobie poradzić, był kryształ periodyczny. Z drugiej strony włókno chromosomowe może odpowiednio zostać nazwane kryształem aperiodycznym. Schrödinger był dobrze obeznany w pracach Delbrücka, stąd może dziwić, dlaczego nie używał określenia „polimer”, a „kryształ aperiodyczny”. Elkana przekonuje, że w ten sposób austriacki fizyk chciał zademonstrować, gdzie leży jego zainteresowanie: nie we właściwościach chemicznych, ale w epistemologii poszukiwania. Zakres naukowego myślenia musiał być rozszerzony tak, aby mógł poradzić sobie ze zjawiskami aperiodycznymi. „Aperiodyczność – pisze Elkana – ma powiązania z historią. Biologia, aby była studiowana »naukowo«, musiałaby objaśniać w ten sam sposób, jak robi to historia: odkrycie znaczącego projektu w zjawisku aperiodycznym. Przez przykucie uwagi do pracy Delbrücka ta mała książka poruszała badania anizotropowych i aperiodycznych zjawisk oraz podkreślała przekonanie, że biologia musi być i zostanie zredukowana do fizyki, ale do innego rodzaju fizyki niż znana w tamtym czasie”¹³⁰⁹.

W swoich refleksjach na kanwie *What is life?* Alwyn C. Scott stwierdza, że Schrödinger jako pierwszy zauważył, że informacja genetyczna jest wcielona w kod wiązań molekularnych¹³¹⁰. Z tej przyczyny książka austriackiego fizyka jest często cytowana jako wsparcie dla programu upraszczania sformułowań w biologii. Scott, parafrazując Schrödingera, pyta, gdzie znaleźć te zjawiska, które nie podpadają pod fizyczne prawa porządku i udziela odpowiedzi: wewnątrz sfer nieliniowej nauki¹³¹¹. Przypomina, że podczas swojej kadencji dyrektora w dublińskim Institute for Advanced Studies austriacki

¹³⁰⁷ Tamże.

¹³⁰⁸ Por. tamże.

¹³⁰⁹ Por. tamże, s. 123.

¹³¹⁰ Por. A.C. Scott, *The nonlinear universe. Chaos, emergence, life*, Springer Science+Business Media, Berlin–Heidelberg–New York 2007, s. 300.

¹³¹¹ Por. tamże, s. 300–301. Gdy zjawiska cechuje nieliniowość, zachodzą procesy podobne do przejść fazowych w fizyce, gdzie minimalne zmiany w jednej zmiennej mogą przełożyć się na nieciągłe zmiany w całym układzie. Zjawiska takie jak te są trudne do określenia w badaniach na niższym poziomie. Niektórzy badacze uważają, że układu odpornościowego nie można w pełni pojąć jedynie przez opisowe zrozumienie interakcji poszczególnych wirusów z poszczególnymi limfocytami C lub innymi składnikami tego układu. Interakcje na poziomie całego systemu cechują właściwości wyraźnie nieliniowe. Por. R. May, *Levels of organization in ecological systems* [w:] G.R. Bock, J.A. Goode, G.R. Bock, J.A. Goode (eds), *The limits of reductionism...*, s. 196–197.

noblista poprzez organizowane konferencje i własne badania nieliniowego elektromagnetyzmu jako podstawy dla teorii cząstek elementarnych i teorii grawitacji Einsteina próbował pobudzić zainteresowanie społeczności fizyków nieliniową nauką¹³¹². Dzięki temu – jak twierdzi Scott – Schrödinger o kilka dekad wyprzedził współczesne mu czasy. Jego zdaniem odpowiedzi na wciąż nierozwiązane zagadki biologii należy szukać w nieliniowej nauce, która opisuje nieograniczone i nieprzewidywalne zjawisko chaosu, powstawania i chaotycznego wpływu, jaki wynika z oddziaływań pomiędzy poziomami hierarchicznymi złożonych systemów.

Marcello Barbieri książkę *What is life?* określa jako przełomową w historii biologii molekularnej¹³¹³. Mówi nawet o „proroctwie Schrödingera”, dostrzegając zawarte tam dwa nowatorskie pomysły: o materiale genetycznym jako „kryształe aperiodycznym” oraz o chromosomach zawierających „zakodowany scenariusz” dla całego organizmu. Barbieri podkreśla, że metafora kryształu aperiodycznego zawierała ideę umieszczającą atomy materiału genetycznego w unikalnym wzorze w każdym indywidualnym organizmie¹³¹⁴. Idea ta później określiła specyfikę biologii, a metafory zakodowanego scenariusza użyto do wyrażenia koncepcji, że musi istnieć miniaturowy kod podobny do kodu Morse’a, złożony z wielu znaków, mający do wykonania bardzo skomplikowany plan rozwoju całego organizmu. Był to pierwszy raz, kiedy słowo „kod” odniesiono do struktury biologicznej i otrzymano funkcję biologiczną. Istnienie specyfiki i kodu „w sercu życia” doprowadziły Schrödingera do trzeciego pomysłu, który miał formę przepowiedni o istnieniu „innych praw fizyki”, co się jednak nie sprawdziło. Okazało się, że łączenie i rozłączanie wiązań wodorowych wystarcza do zrozumienia funkcjonowania substancji dziedzicznej. „Proroctwo Schrödingera – konkluduje Barbieri – wydaje się rozbitkiem na morzu wiązań wodorowych, ale w rzeczywistości jest to prawda tylko w bardzo powierzchownym znaczeniu. Istotą proroctwa było istnienie czegoś całkowicie nowego, co okazało się prawdą. Jak widać, życie bazuje na informacji organicznej i organicznym znaczeniu, są to rzeczywiście nowe, podstawowe jednostki natury. Schrödinger powoływał się na istnienie nowych praw, a nie nowych bytów, ale były to drobne niedoskonałości, które nie powinny przesłaniać istoty proroctwa”¹³¹⁵.

Michael R. Hendrickson przekonuje, że dwa najważniejsze pojęcia „kryształu aperiodycznego” i „zakodowanego scenariusza” w *What is life?*

¹³¹² Por. A.C. Scott, *The nonlinear universe...*, s. 301.

¹³¹³ Por. M. Barbieri, *Biosemitotics: a new understanding of life*, „Naturwissenschaften”, 95 (2008), s. 586.

¹³¹⁴ Por. tamże.

¹³¹⁵ Tamże.

uprzedziły i zainspirowały rozwój genetyki molekularnej w następnych dekadach. Było tak zwłaszcza w kwestii podwójnej helisy DNA Watsona i Cricka, odkrycia kodu genetycznego oraz sformułowania tezy, które stały się znane jako „centralny dogmat” biologii molekularnej, głoszący jednokierunkowy przepływ informacji z DNA do RNA i do białka. Podejście austriackiego fizyka do zagadnień związanych z życiem określa autor jako genocentryczne (koncentrowanie się na genach), redukcjonistyczne („jesteśmy naszymi genami”) i preformacjonistyczne („plan” lub „program” dla organizmu został wstępnie uformowany, zwinięty w DNA; „duch w chromosomach”)¹³¹⁶. Hendrickson przekonuje, że Schrödinger jako pierwszy dał wskazówki co do „genomu jako programu”, metafory, w której „kod” należy rozumieć zarówno jako zaszyfrowane informacje, jak i zestaw instrukcji w rozumieniu informatycznym (kod, który szyfruje, generuje rozporządzenia i wykonuje je)¹³¹⁷.

David Berlinski podkreśla, że nowatorska idea nazwana przez Schrödingera „zakodowanym scenariuszem” z biegiem lat zyskała potwierdzenie. Zapisem kodu, rodzajem komórkowego sekretarza, organizującego i rejestrującego całościowe oraz makroskopowe cechy komórki, przewidzianym zdaniem Berlinskiego przez Schrödingera, okazuje się DNA¹³¹⁸.

W opinii André Lwoffa Schrödinger wykazał się ogromną intuicją biologiczną. Zacytujmy odpowiedni fragment wypowiedzi francuskiego mikrobiologa: „Najbardziej niezwykłą intuicję biologiczną wykazał Schrödinger. Począwszy od małych cząsteczek – pisał Schrödinger w 1944 roku – możliwe jest zbudowanie dużych agregatów bez monotonnego mechanizmu repetycji. W złożonej cząsteczce organicznej każda grupa atomów odgrywa indywidualną rolę, która nie do końca odpowiada innym grupom atomowym. Atomy składające się na cząsteczkę są ze sobą spajane za pomocą sił dokładnie tego samego rodzaju, które pozwalają im budować ciała stałe z prawdziwego zdarzenia, jakimi są kryształy. Najistotniejszy element istoty żywej, włókna chromosomu – prezentujące taką samą trwałość struktury co kryształ – można nazwać kryształem aperiodycznym. Schrödinger dodaje, że w całościowym ujęciu włókno chromosomowe może być uważane za aperiodyczne ciało stałe”¹³¹⁹. Niezwykłą intuicję austriackiego fizyka Lwoff dostrzega także w jego ideach dotyczących ujemnej entropii. Píše: „W swojej niezwyklej książce *What is life* Schrödinger stwierdza, że wszystko, co

¹³¹⁶ Por. M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger's ghost...*, s. 48.

¹³¹⁷ Por. tamże, s. 60.

¹³¹⁸ Por. D. Berlinski, *The language of life* [w:] J.L. Casti, A. Karlqvist (eds), *Complexity, language, and life: mathematical approaches*, Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg–New York–Tokyo 1986, s. 231.

¹³¹⁹ A. Lwoff, *Biological order*, s. 14–15.

ma miejsce w przyrodzie, przekłada się na wzrost entropii, zaś żywa istota nieprzerwanie ją zwiększa, to jest wytwarza entropię dodatnią, a tym samym zbliża się do stanu maksymalnej entropii, jakim jest śmierć. Jest to z pewnością prawda, a organizm może pozostać przy życiu, mówi Schrödinger, tylko poprzez ciągle pobieranie ujemnej entropii ze swojego środowiska. Ujemna entropia jest, według niego, »czymś bardzo dodatnim«, a dokładniej miarą porządku. Organizm, jak uważa Schrödinger, podtrzymuje swój porządek poprzez »zasysanie uporządkowania« czerpane ze swojego otoczenia. Dla zwierząt źródłem uporządkowania są bardziej lub mniej złożone substancje organiczne; dla roślin – światło słoneczne. Ten tok rozumowania został potwierdzony przez Brillouina¹³²⁰.

Michael Morange twierdzi, że austriacki fizyk w swojej książce przedstawił nowe wnioski genetyki w oryginalny, żywy i interesujący sposób, często lepiej niż biologowie¹³²¹. Nawet po upływie pięćdziesięciu lat od jej wydania – zdaniem Morange’a – książka ta nie straciła nic na swojej wartości. Autor jest przekonany, że czytając *What is life?*, współczesny biolog molekularny z pewnością podzieliłby przedstawioną w niej deterministyczną wizję roli genów i całkowicie zgodziłby się z tym programem badawczym¹³²². Ponadto austriacki fizyk był jednym z pierwszych naukowców, który użył słowa „kod” w opisie roli genów¹³²³. W opinii Morange’a oryginalność pomysłów austriackiego fizyka wynikała jednak przede wszystkim z jego dalekowzrocznej wizji. „Schrödinger odważył się – pisze – powiedzieć, to, czego wcześniej nie powiedział żaden genetyk, a mianowicie, że »chromosomy [...] zawierają w zakodowanym scenariuszu pewnego rodzaju plan całego przyszłego indywidualnego rozwoju organizmu i jego funkcjonowania w dojrzałym stadium«. Dla Schrödingera geny nie stanowiły jedynie gwarancji porządku w organizmie ani nie były tajemniczymi przewodnikami zapewniającymi jego harmonijne funkcjonowanie, zamiast tego postrzegał je jako zapisy, które w najmniejszym detalu określały funkcjonowanie i przyszłość każdego organizmu. Poznanie organizmu wiąże się z koniecznością odkodowania informacji zawartej w chromosomach. Schrödinger logicznie podsumował pogląd genetyków, według którego geny są sercem i duszą organizmu, dlatego można powiedzieć, że biologia molekularna miała pokazać, w jaki sposób geny określają umiejscowienie i naturę wszystkich aminokwasów, a więc białek występujących w komórce”¹³²⁴. *What is life?* nie

¹³²⁰ Tamże, s. 95–96.

¹³²¹ Por. M. Morange, *A history of molecular biology*, s. 74.

¹³²² Por. tamże, s. 74–75.

¹³²³ Por. tamże, s. 75.

¹³²⁴ Tamże, s. 75–76.

było dla Morange’a pracą naukową w ścisłym tego słowa znaczeniu¹³²⁵. Jej celem nie było zachęcanie do przeprowadzania nowych eksperymentów ani prezentowania nowych modeli funkcjonowania organizmów, ale raczej za-
oferowanie nowej wizji biologii. „Jednakże nowa wizja – pisze Morange –
nie narzuca się, tak jak nowa teoria i początkowo przechodzi bez echa, nigdy
nie jest też pracą jednej osoby. Pod tym względem Schrödinger był zarówno
autorem książki, jak i reprezentantem nowej wizji”¹³²⁶.

André Pichot patrzy na *What is life* jako na dzieło budujące podstawy,
na których oparta będzie genetyka molekularna, mimo że współcześni ge-
netycy często je ignorują¹³²⁷. Według niego książka mówi o początkach
pojęcia informacji genetycznej. Pichot zauważa, że mimo iż słowo „infor-
macja” w niej się nie pojawia, idea ta jest bardzo jasno w niej wyjaśnio-
na¹³²⁸. Docenia wagę spekulacji Schrödingera dla rozwoju ważnych kon-
ceptów biologicznych. W konkluzji stwierdza: „Schrödinger [...] miał
zasługę w postawieniu genetyki do pionu, formułując pytania teoretyczne
i zrzucając na drugi plan interpretację znaków. Nie zostało to od razu zro-
zumiane przez genetyków. Oczywiście nie wiedzieli, co począć z »kryszta-
łem aperiodycznym«, który miał być modelem istoty żywej. Genetycy
woleli zająć się znaną już teorią chromosomową Morgana, uzupełnioną
o kilka enzymów. Trzeba było czekać dziesiątka lat, aby koncepcja Schrö-
dingera stała się podstawą teoretyczną genetyki molekularnej dla kiedys
odkrytej struktury DNA. Od tego momentu wszystko potoczyło się bardzo
szybko, a teoria Schrödingera posłużyła za przewodnika. Była swego ro-
dzaju szkieletem, który należało pokryć skórą. Otworzyło to drogę bada-
niom naukowców, takim jak Avery, MacLeod i McCarty oraz Watson
i Crick, którzy swoją pracą dostarczyli tę »skórę«, nadając sens szkieleto-
wi”¹³²⁹. Odkrycie struktury DNA wiązało się z odkryciem w niedługim
czasie głównych funkcji genomu. Między 1953 i 1963 rokiem odkryto
mechanizm podwajania się DNA, obecność i rolę RNA jako nośnika
i przekaziciela informacji, kod genetyczny, mechanizm syntezy białek
i główne czynniki regulujące tę syntezę¹³³⁰.

¹³²⁵ Por. tamże, s. 76.

¹³²⁶ Tamże, s. 76–77

¹³²⁷ Por. A. Pichot, *Histoire de la notion de gene*, Flammarion, Paris 1999, s. 175.

¹³²⁸ Por. tamże, s. 176.

¹³²⁹ Strukturę kwasów nukleinowych w latach dwudziestych XX wieku wyjaśnił amery-
kański biochemik rosyjskiego pochodzenia Phoebus Levene. Opracował on „hipotezę te-
tranukleotydową”, w myśl której kwasy nukleinowe zbudowane są z długich łańcuchów
powtarzających się „cegiełek” zawierających w równych proporcjach cztery rodzaje zasad.
Por. M. Cobb, *Największa tajemnica życia...*, s. 25–26.

¹³³⁰ Por. tamże, s. 206–207.

Giuseppe Longo postrzega Schrödingera w jego refleksji na temat życia jako poszukującego „ogólnych zasad w jeszcze raczkującej dziedzinie biologii molekularnej, gdzie chaotyczne obserwacje mogą najlepiej odnieść lokalne różnice genomów (mutacje) do teratogenicznych efektów (patologie lub anormalności) w fenotypie (forma, funkcja lub zachowanie istoty żywej)”¹³³¹. Zauważa, że książka *What is life?* jest znana głównie jako jedna z pierwszych prób scharakteryzowania chromosomu jako konstrukcji niosącej „zakodowany scenariusz” dla architektury organizmu¹³³². Ten „zakodowany scenariusz” Longo postrzega jako coś w rodzaju „programu”, „kompilatora”, a nawet „wsparcia dla systemu operacyjnego”. Podkreśla, że jest to perspektywa bardzo ogólna i oryginalna, gdyż pojęcia te były wówczas stosunkowo młode. Informatyka – przynajmniej według współczesnej koncepcji „programów kodowanych i przetwarzanych dane” – dopiero co weszła w życie, a wojna pchnęła naprzód sztukę kodowania i dekodowania za sprawą prac nad złamaniem Enigmy i innych niemieckich kodów. Od tego czasu nauka kodowania i dekodowania sekwencji zero-jedynkowych i ich obliczeń zmieniła świat. Niemniej idea genomu jako programu ma tak długą historię, że niektórzy nadal używają jej jako metafory. W opinii przywoływanego autora dalsze spekulacje zawarte w drugiej połowie eseju Schrödingera są równie nietuzinkowe, co te na temat „zakodowanego scenariusza”. Uwaga austriackiego fizyka przerzuca się z analizy dziedziczenia do kwestionowania lokalnej i globalnej stabilności życia. Longo zauważa, że – czasem w sprzeczności z poprzednimi uwagami własnego autorstwa – Schrödinger sugeruje nieco inne pojęcie organizmu nieodwołujące się do paradygmatu programowania, a zamiast tego skupiające się na analizie entropia vs. „organizacja” (jako jej negatywny odpowiednik)¹³³³. W przeciwieństwie do pierwszych stron poświęconych kodowaniu, których konkluzja jest łatwa do zrozumienia (wszystko jest dzisiaj zaszyfrowane), druga część pracy w ocenie Longo otwiera się na nowe i bardziej oryginalne spostrzeżenia¹³³⁴.

Longo krytycznie odnosi się do surowej recenzji *What is life?* autorstwa Linusa Paulinga z 1987 roku, w której ten amerykański fizyk i chemik zarzuca Schrödingerowi, między innymi że nigdy nie słyszał o hipotezie „jeden gen – jeden enzym”, dlatego to, co pisze o organizmie jest „niejasne” i „powierzchowe”¹³³⁵. Według Longo ta kluczowa uwaga jest albo „try-

¹³³¹ G. Longo, *From exact sciences to life phenomena: following Schrödinger and Turing on programs, life and causality*, „Information and Computation”, 207 (2009), s. 546.

¹³³² Por. tamże, s. 546.

¹³³³ Por. tamże, s. 546–547.

¹³³⁴ Por. tamże, s. 547.

¹³³⁵ Por. tamże, s. 550.

wialna”, albo „rażąco nieprawdziwa”. Pisz: „Jeśli przyjmujemy to za określenie »genu« – jak wiele osób wydaje się robić – sprawimy, że nasz tok rozumowania stanie się analogiczny do pojęcia flogistonu z XVIII wieku. Jeżeli natomiast potraktujemy to jako odniesienie do genu jako sekwencji w DNA – będzie to droga donikąd”¹³³⁶. Zdaniem Longo więcej można dziś za to powiedzieć o pracach nad alternatywnym składaniem, którego konsekwencje mogą być krótko opisane jako hipoteza „jeden gen – wiele białek; niektóre białka – żaden gen”.

W wielu recenzjach akcentowano doniosłość biologicznych refleksji w *What is life?* John F. Wharton w swojej recenzji z 1946 roku sytuuje *What is life?* pośród dzieł, które miały ogromny wpływ na ludzkie myślenie. Pisz: „W historii literatury istnieje niewiele przykładów krótkich prac, które by dogłębnie wpłynęły na ludzką myśl i działanie. *Common sense* Thomasa Paine’a i *Manifest komunistyczny* przychodzą do głowy jako pierwsze. Być może lepszym przykładem jest Willard Gibbs i jego krótka praca, która zrewolucjonizowała chemię. Powiedziano mi, że znaleziska Abbé Mendla zostały przedstawione z porównywalną zwięzłością. Interesującym faktem jest, że dwie ostatnie z wymienionych prac przeszły niemal niezauważone przez ostatnie pięćdziesiąt lat. Licząca dziewięćdziesiąt stron książeczka napisana przez Erwina Schrödingera zatytułowana *What is life?* może, zupełnie prawdopodobnie, okazać się dokumentem porównywalnym z wymienionymi wcześniej”¹³³⁷. Wharton podkreśla, że ta krótka publikacja nie tylko zapoznaje czytelnika z ostatnimi postępami w fizyce i biologii, ale jest napisana niezwykle „oszczędnie” i z perfekcyjną „ekonomią stylu”¹³³⁸. „Zapierająca dech w piersiach magia” – cytując recenzenta – widoczna jest w rozważaniach o „zakodowanym scenariuszu”¹³³⁹. Możliwe implikacje pracy austriackiego fizyka dla pogłębienia podstawowych pojęć biologicznych Wharton uważa za tak liczne, że trzeba by było – jak twierdzi – książki o wiele grubszej, aby je szczegółowo przedstawić¹³⁴⁰. Badacz omawia dwie z tych implikacji, które wydają mu się najbardziej doniosłe.

By wyjaśnić zdolność chromosomów do narzucania i generowania porządku, według Whartona konieczne jest dostrzeżenie najpierw „celu istnienia porządku w każdym z nas”¹³⁴¹. Cel ten jednak nie jest czymś indywidu-

¹³³⁶ Tamże.

¹³³⁷ J.F. Wharton, *Probing the ultimate mystery. A review of 'What is life?', by E. Schrödinger*, „Saturday Review of Literature”, 29 (1946), s. 7.

¹³³⁸ Por. tamże.

¹³³⁹ Por. tamże, s. 8.

¹³⁴⁰ Por. tamże, s. 9.

¹³⁴¹ Por. tamże.

alnym, niezwiązanym z niczym. Gen jest molekułą obejmującą konkretną aranżację atomów. Może być przekazywany w niezmienionej postaci przez setki, a być może nawet tysiące lat. Aranżacje atomów w strukturach chromosomów są, jak pokazuje Schrödinger, a na co zwraca uwagę Wharton, najbardziej uporządkowanymi rzeczami, jakie istnieją w naturze. Wharton pisze: „Stąd celowość, jaką zawieram w moim indywidualnym organizmie – reprezentowana przeze mnie na dobre i złe i za którą jestem odpowiedzialny – jest również celowością ludzkości. Historia ludzkości ma w związku z tym powiązane znaczenie, natomiast inne założenia trudno było niektórym historykom zaakceptować”¹³⁴².

Zdaniem cytowanego autora jednym z pól, na którym *What is life?* może okazać się przełomowe, jest badanie syntezowe (ang. *synthesized research*)¹³⁴³. W jego ocenie zbyt wielu specjalistom wystarczyło oferowanie odkryć we własnej dziedzinie, stąd nie mamy żadnych prawd ostatecznych dostępnych nam wszystkim. Synteza odkryć Schrödingera w pracach tych szkół byłaby tu ogromnie pożyteczna. Przykładowo niewielka liczba naukowców na całym świecie pracuje nad problemem percepcji. „Chociaż człowiek myślący – pisze Wharton – od czasów Platona badał problem tego, jak widzimy, czujemy, smakujemy, słyszymy lub wachamy, nie uzyskiwał wciąż zadowalającej odpowiedzi. Jak na przykład widzisz »coś«? Powiedziano ci, że promienie światła podróżują od obiektu do twoich oczu, a obraz – odwrócony do góry nogami – formowany jest na siatkówce. Następnie, w tajemniczy, niewyjaśniony sposób przekazywany jest do mózgu, a ty »widzisz«, powiedzmy, na łokieć przed sobą kałamarz, ku któremu sięgasz i maczasz w nim pióro. Jak twój mózg nauczył się wykorzystywać fakty widoczne w tym odwróconym obrazie – które obejmują jasność światła, gładkość lub ostrość kałamarza, kąt, z jakiego go obserwujesz, i garść innych czynników – by przypisując każdemu odpowiednią wartość, poinformować cię, że obiekt, który oddalony jest od ciebie na długość łokcia, to kałamarz? [...] Bez celu, który może być jednostkowy lub powszechny, lub bez doświadczenia, częściowo naszego, a częściowo dziedzicznego, zmysł wzroku (lub dowolny inny związany z percepcją) byłby bezużyteczny, i być może niemożliwy, zaś z celem w ręku i doświadczeniem, na którym można bazować, tak zwany umysł podświadomy może niemal natychmiast położyć większy nacisk na dowody i prognozować, że kałamarz można dosięgnąć ręką. Kod genetyczny Schrödingera – z jego »kodeksem i zdolnością wykonawczą« dającą początek dążeniom, potrzebom, celom i pragnieniom, które

¹³⁴² Tamże.

¹³⁴³ Por. tamże.

istnieją w moim lub twoim doświadczeniu – ujawnia początek i naturę tych celów, które Instytut Dartmouth Eye uznaje za odgrywające tak dominującą rolę w tym, co widzimy”¹³⁴⁴. Jeśli to prawda, to – jak podkreśla Wharton – nasz system edukacyjny potrzebuje „głębokiego remontu”¹³⁴⁵. Musimy dać człowiekowi jaśniejsze zrozumienie celu, więcej faktów ewidencyjnych oraz szersze spektrum, w jakim podświadomość ocenia fakty i decyduje. Spektakularne sukcesy fizyków i chemików różnych specjalności są dziś przekazywane w ten sposób, aby przemawiać za omawianą metodą.

Genetyk John B.S. Haldane docenia wysiłek Schrödingera w zgłębianiu podstawowych pojęć genetyki, chociaż nie rozstrzyga o wartości jego spekulacji dla rozwoju tejże dyscypliny. Píše: „Zastanawiam się, czy potomność uzna *crossing-over* za tak interesujący, jak wymiany energii czy mutacje przemiany atomowej. Jakkolwiek będzie, każdy badacz jest zainteresowany podejściem Schrödingera do genetyki”¹³⁴⁶. Zdaniem Haldane’a nie tylko każdy genetyk powinien przeczytać książkę austriackiego fizyka, lecz na przykład fizjolog, który dowie się z niej, że organizm żywy żeruje na ujemnej entropii i zaraz potem wróci do badania metabolizmu z zupełnie nowym zestawem pytań, które chciałby zadać. W konkluzji Haldane stwierdza: „Jakkolwiek będzie, książka należy do tych, do których wracamy raz po raz. Pożyczyłem ją kilku kolegom genetykom, a werdykt był jednomyślnie pomysłny. Możemy nie zgadzać się ze szczegółami lub nawet fundamentalnymi zasadami, nie możemy jednak przerwać jej czytania do samego końca. Niestety, ma tylko 93 strony. Mamy 93 pierwiastki, ale jak dotąd opisano 738 izotopów. Być może trzeba oczekiwać książki dłuższej na 738 stron ogólnie o biologii. Jestem przekonany, że bez wątpienia prof. Schrödinger zawsze znajdzie swoich czytelników”¹³⁴⁷.

Grégoire Nicolis i Ilya Prigogine podkreślają szczególną wagę stwierdzenia Schrödingera, że DNA jest kryształem aperiodycznym. Piszą: „Jak zauważyliśmy, algorytmiczna złożoność jest długością najkrótszego opisu danej (*finite*) sekwencji, w tym znaczeniu całkowicie losowa sekwencja, tudzież ciąg generowanego przez proces hałasu, posiadają maksymalną możliwą złożoność algorytmiczną będącą zasadniczo równą ich długości, podczas gdy sekwencja typu XXX [...] posiada minimalną możliwą złożoność, ponieważ pojedyncza instrukcja wystarczy, aby ją w pełni odtworzyć. Podobnie – informacja jest uważana za maksymalną w określonej losowej se-

¹³⁴⁴ Tamże.

¹³⁴⁵ Por. tamże.

¹³⁴⁶ J.B.S. Haldane, *A physicist looks at genetics. A review of 'What is life?', by E. Schrödinger*, „Nature”, 155 (31 March 1945), s. 375.

¹³⁴⁷ Tamże, s. 376.

kwencji, ponieważ jej realizacja na tle ogromnej liczby losowych sekwencji wymaga precyzyjnego zlokalizowania układu w przestrzeni stanu. Informacja jest zerowa w sekwencji o minimalnej złożoności, ponieważ wynik może składać się tylko z sekwencji, które są do siebie podobne. Podkreśliliśmy też wcześniej, że złożoność obiektów naturalnych leży gdzieś pomiędzy tymi dwiema skrajnościami, ponieważ oprócz losowości obejmuje również kilka prawidłowości dużej skali. Celebrowany aforyzm Erwina Schrödingera mówiący o tym, że DNA jest »kryształem aperiodycznym« oddaje tę dwoistość, ten dualizm, w wyjątkowo przejrzysty i precyzyjny sposób¹³⁴⁸. Nicolis i Prigogine dodają, że modele dokładnie tego rodzaju złożoności zapewniają nam samoorganizujące się stany materii dopuszczane przez fizykę stanów nierównowagowych¹³⁴⁹. Najważniejszym spośród tych stanów, w świetle założeń autorów, jest chaotyczna dynamika. Niestabilność ruchu związanego z chaosem pozwala, jak twierdzą, badać przestrzeń stanu układu w sposób ciągły, tworząc w ten sposób informację i złożoność. Z drugiej strony to właśnie na skutek fizycznego mechanizmu te stany są wytwarzane z prawdopodobieństwem równym jeden (problem doboru danej sekwencji spośród bardzo dużej liczby apriorycznie równie prawdopodobnych sekwencji zwyczajnie nie występuje). Dynamiczny układ generujący chaos działa jako skuteczny selektor, który odrzuca większość przypadkowych sekwencji i zachowuje tylko te zgodne z właściwymi prawami. Równie ważne jest też to zdaniem autorów, że nieodwracalność wiążąca się z tymi prawami pozwala na istnienie atraktorów o asymptotycznej stabilności oraz powtarzalności. Nicolis i Prigogine podsumowują, że w końcu udało się zidentyfikować fizyczne pochodzenie i kilka prawdopodobnych, matematycznych pierwowzorów złożoności.

Johann Götschl i Werner Leinfellner zauważają, że Schrödinger jest dla większości znany jako jeden z największych przedstawicieli fizyki teoretycznej¹³⁵⁰. Wielu zwolenników austriackiego fizyka, zachwyconych jego geniuszem i wynikami, jakie osiągnął w fizyce kwantowej, rzadko wspomina o Schrödingierze jako biologu. Tymczasem zdaniem autorów zrewolucjonizował on nie tylko fundamenty nowoczesnej fizyki, ale również dokonał znaczącego wkładu do biologii. Götschl i Leinfellner podkreślają, że w *What is life?* austriacki naukowiec próbował zintegrować fizykę kwantową i chemię kwantową z genetyką i biologią ewolucyjną. „Jego dynamiczne poglądy

¹³⁴⁸ G. Nicolis, I. Prigogine, *Exploring complexity. An introduction*, W.H. Freeman & Company, New York 1989, s. 191–192.

¹³⁴⁹ Por. tamże, s. 192.

¹³⁵⁰ Por. J. Götschl, W. Leinfellner, *Introduction* [w:] J. Götschl (ed.), *Erwin Schrödinger's world view...*, s. 1.

na ewolucję życia – piszą – doprowadziły do obecnego przełomu w ewolucji biologii i do najwspanialszej intelektualnej przygody w historii nauki i kultury: odszyfrowania kodu genetycznego, który nastąpił w następnej dekadzie przez odszyfrowanie ludzkiego genomu. Na nowo odczytamy znów znaczenie słów Sokratesa: »poznać samego siebie«. Dynamiczny koncept ewolucji był bardzo owocny dla dzisiejszego ujednolicenia teorii wszechświata, takich jak teoria GUT, z którą jesteśmy w stanie po raz pierwszy w historii wyjaśnić pochodzenie i ewolucję naszego uniwersum i rozpoczęcie samoorganizacji życia, cywilizacji i kultur. Ostateczne steoretyzowanie tego dynamicznego procesu ewolucji nie byłoby możliwe bez pionierskiej pracy Schrödingera”¹³⁵¹.

Sahotra Sarkar uważa za „nad wyraz nieżyczliwe” oceny wskazujące zarówno na nieadekwatność analizy termodynamicznej Schrödingera, jak również jego nieznaną najnowszymi odkryć w genetyce¹³⁵². Autor przekonuje, że w czasie, kiedy austriacki fizyk przygotowywał swoje wykłady, nie było jeszcze jasne, że zwyczajne zasady mechaniki statystycznej okażą się wystarczające nawet w przypadku wyjaśnienia wszelkich właściwości makroskopowych materii nieożywionej, dopiero na początku lat czterdziestych zaczął ten fakt ustalać Lars Onsager. W opinii Sarkara wzięwszy pod uwagę doświadczenie naukowe Schrödingera, z całą pewnością musiał on mieć świadomość trudności takich przedsięwzięć, jak to podejmowane przez Onsagera. Dodatkowo interpretowanie życia w odniesieniu do ujemnej entropii było częścią intelektualnego *milieu* tamtych czasów, sięgającego wstecz przynajmniej prac węgierskiego fizyka Leo Szilarda z 1929 roku¹³⁵³, emi-

¹³⁵¹ Tamże.

¹³⁵² Por. S. Sarkar, *Erwin Schrödinger's excursus on genetics*, s. 101.

¹³⁵³ Por. tamże, s. 101–102. Pod koniec lat dwudziestych Szilard zaproponował rozwiązanie problemu „demonu Maxwella” (czyli tego, jak w układzie zamkniętym powstawać mogły bardziej uporządkowane struktury bez kompensacji energii i z jednoczesnym przestrzeganiem drugiej zasady termodynamiki), przez co wywarł fundamentalny wpływ na to, co znamy dziś jako teorię informacji. W eksperymencie myślowym z 1871 roku fizyk James Clerk Maxwell stworzył bezcielesną istotę, demona, który mógł przesyłać energię przeciwko gradientowi stężeń. Węgierski fizyk sprostował temu wyzwaniu, wykazując, że odpowiedź tkwi w relacji entropii i wykorzystywaniu przez owego demona „pewnego rodzaju pamięci” czy też „inteligencji”. Maxwell przedstawił swojego demona w nadziei, że interwencja inteligencji może przywrócić porządek utracony przez ciągły wzrost entropii. Szilard wykazał jednak, że i to jest iluzją i że demon musi samemu sobie zapłacić za przywrócony porządek, stając się „nieuporządkowanym”. Pisał: „Analizuje się, jakimi warunkami jest ograniczone to, że pozornie można zbudować *Perpetuum mobile* drugiego rodzaju, jeśli pozwoli się inteligentnemu bytowi dokonać ingerencji w układ termodynamiczny. Jeśli taki byt dokona pomiarów, otrzymanie Państwo zachowania systemu, które znacznie różni się od pozostawionego samemu sobie układu mechanicznego. Pokażemy, że już pewien rodzaj pamięci, który system

granta do Stanów Zjednoczonych (który ostatecznie w sposób istotny przyczynił się do rozwoju biologii molekularnej). Sarkara zaskakuje to, że niezyczliwe oceny często pomijają zupełnie fakt, że niewątpliwym wkładem publikacji Schrödingera w rozwój nauki było przejrzyste i nieodparte sformułowanie idei kodu genetycznego, co dało niezwykle istotny impuls biologii molekularnej, zwłaszcza po 1953 roku, po sformułowaniu modelu podwójnej helisy DNA¹³⁵⁴. Zdaniem amerykańskiego badacza hinduskiego pochodzenia z jednej strony trudno byłoby skutecznie obronić twierdzenie, że to fizycy przenieśli wnioskowanie informacyjne do biologii molekularnej (gdyż to rozwój nauk informacyjnych w latach pięćdziesiątych stał się źródłem metafor informacyjnych przenikających wszystkie dyscypliny), z drugiej strony to analiza informacyjna w postaci kombinatoryki kodowania była głównym tematem w *What is life?*¹³⁵⁵ Według Sarkara to jest właśnie najbardziej istotny wkład tej pozycji w biologię, chociaż nie ma ona nic wspólnego z przeszłością Schrödingera jako fizyka, który pomimo swego wykształcenia fizycznego, wywarł głęboki wpływ na metaforykę substancji genetycznej¹³⁵⁶. Jego dzieło oferuje retoryczny model genu, który pchnął Francisca Cricka i Jamesa Watsona do odkrycia wzoru podwójnej helisy DNA. Pomogło ono również George'owi Gamowowi opisać w 1954 roku relację DNA i białek jako „translację”.

Freeman J. Dyson w *What is life?* docenia trafność sformułowanych pytań, które otworzyły drogę do przełomowych odkryć w biologii w następ-

wyróżnia w mających miejsce pomiarach, może stwarzać okazję do stałego obniżenia entropii, a więc prowadziłby do naruszenia drugiej zasady, jeśli same pomiary ze swojej strony nie odbywałyby się koniecznie pod wpływem generacji entropii. Początkowo oblicza się całkiem uniwersalnie wytwarzanie entropii z postulatu, że przedstawia ona pełną kompensację w myśl drugiej zasady [...]. Następnie oblicza się powstałą ilość entropii, także [...] na podstawie urzędzenia, które jest w stanie przeprowadzić pomiary (pod wpływem stałego uzyskiwania entropii) i stwierdza się, że jest ona na tyle duża, na ile niezbędna jest do uzyskania pełnej kompensacji: prawdziwe uzyskiwanie entropii przy pomiarze [...] nie musi być wyższe niż wymaga tego równanie”. L. Szilard, *Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen*, „Zeitschrift für Physik”, 53 (1929), s. 840. Por. L.E. Kay, *Who wrote the book of life?*..., s. 64–65. Dociekania Szilarda opierają się na teoretyczno-kwantowych zasadach i tym samym stanowią istotny punkt łączący termodynamikę, teorię informacji i teorię kwantową. Por. M. Morange, *A history of molecular biology*, s. 67. Por. D. Fleming, *Émigré physicists...*, s. 156–163. Por. G. Segrè, *Ordinary geniuses...*, s. 137. Por. A. Rapoport, *Discussion*, s. 196.

¹³⁵⁴ Por. S. Sarkar, *Erwin Schrödinger's excursus on genetics*, s. 102. W innym artykule Sarkar podkreśla, że idea kodu genetycznego była najbardziej znaczącym wkładem koncepcyjnym książki *What is life?* Zob. tenże, *What is life? revisited*, „BioScience”, 9(41) (1991), s. 634.

¹³⁵⁵ Por. S. Sarkar, *Erwin Schrödinger's excursus on genetics*, s. 105.

¹³⁵⁶ Por. R. Doyle, *Mr. Schrödinger inside himself*, „Qui Parle”, 2(5) (1992), s. 3.

nych dekadach¹³⁵⁷: „Podstawowe zadane przez Schrödingera pytania były następujące: Jaka jest fizyczna struktura cząsteczek ulegających duplikacji podczas podziału chromosomów? Jak mamy rozumieć proces duplikacji? W jaki sposób owe cząsteczki zachowują indywidualność z pokolenia na pokolenie? Jak udaje się im sterować metabolizmem komórki? Jak tworzą organizację widoczną w strukturze i działaniu wyższych organizmów? Sam nie odpowiedział na te pytania, lecz zadając je, wskazał biologii drogę prowadzącą do epokowych odkryć następnych czterdziestu lat: odkrycia podwójnej helisy i kodu trójkowego, szczegółowej analizy i całościowej syntezy działania genów oraz do ilościowego pomiaru odległości ewolucyjnej gatunków”¹³⁵⁸.

Jako „niezwykłą” ze względu na szerokie spojrzenie i oryginalność myśli książkę Schrödingera określił Roger Penrose¹³⁵⁹. Podkreślał, że zawarte w niej stwierdzenia, między innymi że zjawiska kwantowe mają fundamentalne znaczenie w badaniach biologicznych oraz że odżywiamy się, aby „zyskać energię”, znacząco ukształtowały ludzkie myślenie na temat życia¹³⁶⁰. „Podkreśla to – pisze – wielkie znaczenie, jakie dziś jeszcze ma ta książka. Na pewno warta jest lektury!”¹³⁶¹

Za jedną z najbardziej znaczących prac naukowych XX wieku uznał *What is life?* Vasily V. Ogrzyzko, podkreślając, że Schrödinger, odkrywca mechaniki kwantowej, zasugerował posiadanie klucza do tajemnicy dziedziczności i popularyzowanie idei DNA prezentującej molekularny „zakodowany scenariusz” genetycznej charakterystyki organizmu przez fizykę wiązania kowalencyjnego¹³⁶². *What is life?* zainspirowało współpracę pomiędzy Crickiem i Watsonem i doprowadziło do identyfikacji informacji genetycznej jako sekwencji zasad w DNA replikujących przez rozpoznawanie komplementarnej zasady.

John A.V. Butler w swej recenzji skoncentrował się na relacji między termodynamiką a życiem. Podkreślał że to, czy procesy życiowe przestrzegają drugiej zasady termodynamiki lub czy życie znajduje sposób na jego uniknięcie, było zagadką przez stulecia¹³⁶³. Przypomniął, że Kelvin w swoim formułowaniu drugiej zasady termodynamiki pozostawił tę kwestię otwartą,

¹³⁵⁷ Por. F. Dyson, *Początki życia*, tłum. P. Golik, Państwowy Instytut Wydawniczy, Warszawa 1993, s. 8.

¹³⁵⁸ Tamże, s. 10.

¹³⁵⁹ Por. R. Penrose, *Foreword* [w:] A.K. Pati, P.C.W. Davies, D. Abbott (eds), *Quantum aspects of life*, Imperial College Press, London 2008, s. vii.

¹³⁶⁰ Por. tenże, *Przedmowa* [w:] E. Schrödinger, *Czym jest życie?* ..., s. 11–12.

¹³⁶¹ Tamże, s. 12.

¹³⁶² Por. V.V. Ogrzyzko, *Erwin Schrödinger, Francis Crick and epigenetic stability*, „Biology Direct”, 3 (2008), <http://link.springer.com/article/10.1186/1745-6150-3-15> (15.04.2015).

¹³⁶³ Por. J.A.V. Butler, *Life and the second law of thermodynamics*, „Nature”, 158 (1946), s. 153.

wyłączając ze swych rozważań układy ożywione. Od tego czasu różni autorzy szczegółowo rozważali kwestie zależności między drugą zasadą termodynamiki a organizmem żywym. Padały różne rozstrzygnięcia, ale większość autorów, w opinii Butlera, skłaniała się w stronę sformułowania Schrödingera: „organizm karmi się ujemną entropią”¹³⁶⁴. Przywoływany badacz uważa spekulacje biologiczne austriackiego fizyka, chociaż skoncentrowane głównie na strukturze genu, za niezwykle inspirujące i wpływowe¹³⁶⁵.

Hermann Joseph Muller w swojej recenzji opisuje Schrödingerowską fascynację fenomenem życia jako „naturalną reakcję kogoś zagłębiającego się w fenomen fizyczny, kto staje się świadom fascynujących faktów z dziedziny genetyki, gałęzi nauki, którą określa jako »najbardziej interesującą w naszych czasach«”¹³⁶⁶. Niewielki tomik austriackiego fizyka postrzega jako niezwykle cenny w tworzeniu łączności między naukami fizycznymi i biologicznymi.

William McCrea i Éamon de Valera uważają, że publikacja ta trafnie przewidziała koncepcję kodu genetycznego¹³⁶⁷. W ich opinii praca Schrödingera jeszcze za jego życia „wywróciła do góry nogami” fizykę i chemię, będąc na dobrej drodze do przekształcania i unowocześniania nauk biologicznych¹³⁶⁸.

Według Narasimhaiengara Mukundy podkreślenia (i to szczególnego) wymaga to, iż austriacki fizyk pisał, by wszystkim przekazać swą fascynację fenomenem życia i by jak najlepiej wyrazić to, co wydawało mu się ważne w tym czasie jako fizykowi¹³⁶⁹. Dwa z jego autorskich pomysłów stały się – po odkryciu struktury DNA w 1953 roku – częściami nowoczesnej biologii: to, że gen jest najlepiej przedstawiany jako polimer aperiodyczny oraz że jego komunikat w celu zabudowy i reprodukcji jest przekazywany w formie pewnego kodu. Zdaniem Mukundy w porównaniu do oczekiwań Bohra, że zasada komplementarności mechaniki kwantowej mogłaby stać się niezbędną dla zrozumienia życia, główne założenie Schrödingera wydawało się znacznie bliższe nowoczesnej biologii i miało na nią bardziej namacalny wpływ. „Zwyciężył, pokazując, że niektóre z podstawowych pytań stawianych przez biologię mogą zostać wyrażone – i to wymownie – w języku fizyki, co było bezcenne”¹³⁷⁰ – konkluduje Mukunda.

¹³⁶⁴ Tamże.

¹³⁶⁵ Por. tamże.

¹³⁶⁶ H.J. Muller, *A physicist stands amazed at genetics*, „Journal of Heredity”, 37 (1946), s. 90.

¹³⁶⁷ Por. W. McCrea, É. de Valera, *Erwin Schrödinger and the Dublin Institute*, s. 133.

¹³⁶⁸ Por. tamże, s. 134.

¹³⁶⁹ Por. N. Mukunda, *Linking life to the quantum...*, s. 72.

¹³⁷⁰ Tamże.

Na trzy doniosłe kwestie, które zostały poruszone w *What is life?*, zwrócił uwagę G. Rickey Welch¹³⁷¹. Schrödinger przekonywał, że układy żywe utrzymują swoją wewnętrzną organizację, żywiąc się ujemną entropią ze środowiska. Choć nie wymyślił tej idei¹³⁷², jego wnioski w tej kwestii zdaniem przytaczanego autora były bardzo pouczające. Austriacki badacz pisał swoją książkę w czasie, gdy integralność termodynamiki i życia nie miały jeszcze solidnej podstawy. W następnych dziesięcioleciach zarówno gałąź termodynamiki „blisko równowagi”, jak i gałąź „daleko od równowagi” umożliwiły racjonalizowanie istnienia życia jako epifenomenu ewolucji kosmicznej. Ponadto konstrukty termodynamiczne dostarczyły powiązania przyczyny i skutku mającego zastosowanie w opisie procesów biologicznych na wszystkich poziomach hierarchii¹³⁷³. Po drugie, mamy do czynienia ze sławną metaforą „kryształu aperiodycznego” przedstawiającego strukturę genetyczną¹³⁷⁴. Welch zauważa, że metafora „kryształu” była wykorzystywana w biologii rozwojowej od początku stulecia, wywodząc się od Ludwika Pasteura, który zasugerował, że życie jest oparte na własnościach chiralnych cząsteczek organicznych. „Choć nie możemy podziękować jedynie Schrödingerowi za stworzenie tego paradygmatu w biologii, jego analogiczny sposób rozumowania jest godny uwagi”¹³⁷⁵ – konkluduje Welch. Po trzecie mamy do czynienia z aspiracją Schrödingera połączenia fizyki i biologii, a w rezultacie stworzeniem nowych praw lub zasad fizyki¹³⁷⁶. W opinii amerykańskiego biologa jest to najważniejsze i daleko idące przesłanie *What is life?* Określa ono nie tylko status Schrödingera w biologii, ale także esencję kwestii (nie)redukowalności.

Lynn Margulis i Dorion Sagan widzą w Schrödingerze fizyka, którego fizyczno-chemiczne podejście do fenomenu życia miało decydujący wpływ na odkrycie DNA i molekularnej biologicznej rewolucji¹³⁷⁷. Podkreślają, że jego książka z 1944 roku była główną inspiracją do napisania przez nich pół wieku później pracy pod tym samym tytułem. Piszą: „Schrödinger, laureat Nagrody Nobla, czcił życie w całej jego złożoności. Co prawda, chociaż wymyślił równanie, które dało teorii kwantowej solidne matematyczne pod-

¹³⁷¹ Por. G.R. Welch, *Of men, molecules, and (ir)reducibility*, „BioEssays”, 6(11) (1989), s. 188.

¹³⁷² Powyższa idea mogła być wyprowadzona z pism L. Boltzmann, którego prace Schrödinger znał. Por. tamże.

¹³⁷³ Por. tamże, s. 188–189.

¹³⁷⁴ Por. tamże, s. 189.

¹³⁷⁵ Tamże, s. 189.

¹³⁷⁶ Por. tamże.

¹³⁷⁷ Por. L. Margulis, D. Sagan, *What is life?*, University of California Press, Berkeley–Los Angeles 2000, s. 2.

stawy, nigdy nie postrzegał życia jako zjawiska *stricte* mechanicznego. Nasza książka odnosząca się do życia w pełni, nie odrzucając żadnej dziedziny nauki, nie tylko nosi tytuł dzieła Schrödingera, ale także – mamy nadzieję – niesie ze sobą jego ducha. Staraliśmy się przywrócić życie do świata biologii¹³⁷⁸. Przywołując koncepcję „kryształu aperiodycznego”, dostrzegają uderzające podobieństwo tej koncepcji z podwójną spiralą, po raz pierwszy opisaną przez Cricka i Watsona¹³⁷⁹. Podkreślają jednak, że współcześnie znajdujemy lepsze określenie. „Może nawet bardziej niż »kryształ aperiodyczny« Schrödingera – piszą – życie przypomina fraktal – wzór powtarzany w większej i mniejszej skali. Fraktale, piękne w swej subtelności i zdumiewające swą złożoną strukturą, są tworem komputerów, konkretnie programów graficznych powtarzających po tysiąc razy jedną matematyczną operację. »Fraktale« życia są komórkami, układami komórek, wielokomórkowymi organizmami, społecznościami organizmów i ekosystemami społeczności. Powtarzające się miliony razy w ciągu tysięcy milionów lat procesy doprowadziły do wytworzenia wspaniałych, trójwymiarowych wzorów widocznych w organizmach, stadach, miastach oraz wszechświecie jako całości”¹³⁸⁰.

Robin Holliday jest zdania, że wpływ książki *What is life?* był wysoce edukacyjny, ponieważ informowała ona fizyków (i nie tylko) o istocie genu, dziedziczności i genetyki¹³⁸¹.

Według Tibora Gánti Schrödinger w swojej książce dostarcza opisu najważniejszych właściwości istot żywych, z których korzystały kolejne pokolenia badaczy¹³⁸². Píše: „Wszystkie układy – za życia – coś robią: pracują, funkcjonują. Układ, który nic nie robi, nie jest żywy. Może być wówczas nieożywiony, co oznacza, że nie żyje, nigdy nie żył i nigdy nie będzie żył. Może być też martwy, co oznacza, że kiedyś żył, ale stracił tę zdolność. Może być również w stanie nieaktywności, co oznacza, że normalnie jest w stanie żyć, jednak ta funkcja jest w danym momencie wyłączona; może zacząć znowu żyć w odpowiednich warunkach”¹³⁸³.

W wielu recenzjach *What is life?* pojawiły się również głosy krytyczne kierowane pod adresem koncepcji życia Schrödingera. W szczególności krytycy wytykali terminologiczne, metodologiczne i merytoryczne nieścisłości i błędy w spekulacjach biologicznych austriackiego fizyka.

¹³⁷⁸ Tamże.

¹³⁷⁹ Por. tamże, s. 7.

¹³⁸⁰ Tamże, s. 4.

¹³⁸¹ Por. R. Holliday, *Physics and the origins of molecular biology*, „Journal of Genetics”, 85 (2006), s. 95.

¹³⁸² Por. T. Gánti, *The principles of life*, Oxford University Press, Oxford 2003, s. 2.

¹³⁸³ Tamże.

H. Roberts w swojej (jednej z pierwszych) recenzji *What is life?* z 1945 roku uważa, że tytuł książki jest nieadekwatny do jej zawartości, jest zbyt ogólny i może być odebrany przez czytelników jako chwytliwy slogan, który ma na celu jedynie przyciągnięcie uwagi. „Praca badawcza w tych ramach – pisze Roberts – w żadnej mierze nie jest nowością. Profesor Edmund B. Wilson, wykładający przed American Association for the Advancement of Science ponad 20 lat temu na temat *The physical basis of life* – bardzo podobny do wykładów profesora Schrödingera – kończy, jak ja zakończyłbym tę recenzję, mówiąc, że cały system komórkowy może być zaangażowany w tworzenie każdej charakterystycznej cechy, ale fundamentalny problem pozostaje. Wilson uważa, że ludzie mają gotowe, starodawne odpowiedzi: »Jest to czynność organizmu jako całości«; »To własność układu jako takiego«; i wiele innych fraz tego typu. Jednak co do całości i dużo prostszych terminów większość odpowiada: »Nie wiemy«. Być może, również słowami Wilsona odpowiemy: »Nie ma problemu, który da się sformułować bez opowiadania bredni«. Nie ma bredni w książce *What is life?*, poza jej tytułem”¹³⁸⁴.

Schrödinger obiera sobie za cel omówienie ważnej i rozległej kwestii: jak zdarzenia w przestrzeni i czasie, które mają miejsce wewnątrz organizmu żywego, mogą być przypisane fizyce i chemii. W ocenie Maxa Delbrücka austriacki fizyk nie zrealizował w pełni zamierzonego celu¹³⁸⁵. „To szerokie pytanie – pisze – obejmuje wiele gałęzi nauk biologicznych, a biolodzy z romantycznym pietyzmem dla mocy nowoczesnej fizyki spodziewają się w czytanej książce wspaniałych odkryć. Okazuje się jednak, że autor ma dużo skromniejsze cele i nie jest wcale zainteresowany tłumaczeniem zawartości słowa »jak«, ale raczej pytaniem, czy fizyka i chemia będą w stanie udzielić kompletnego wytłumaczenia. Nie jest to tak oczywiste, jak mogłoby się wydawać, bowiem terminy »fizyka« i »chemia« są źle zdefiniowane, jeśli chodzi o ich zastosowanie nie do obecnej, ale do przyszłej zawartości tych nauk. To pytanie zawiera przewidywanie, a dyskusje co do przewidywań nie mają raczej sensu. Wobec tego w głównej dyskusji autor schodzi na skromniejszy poziom i za swój cel obiera przedstawienie swego punktu widzenia: »Oczywista niezdolność fizyki i chemii naszych czasów do wyjaśnienia tych zjawisk nie jest podstawą do wątplenia w ich zdolność do wytłumaczenia ich w przyszłości«”¹³⁸⁶.

¹³⁸⁴ H. Roberts, *A difficult question brilliantly unanswered. A review of 'What is life?', by E. Schrödinger*, „New Statesman and Nation”, 29 (1945), s. 146.

¹³⁸⁵ Por. M. Delbrück, *What is life? and what is truth? A review of 'What is life?', by E. Schrödinger*, „Quarterly Review of Biology”, 20 (1945), s. 370.

¹³⁸⁶ Tamże.

John B.S. Haldane w swojej recenzji z 1945 roku polemizuje z niektórymi ideami zawartymi w dziele Schrödingera. Ma wątpliwość co do słuszności następującego stwierdzenia, że ponieważ gen ma wymiary molekularne i w komórce występują tylko jeden lub dwa geny danego rodzaju, w związku z tym nie można zastosować mechaniki statystycznej do zachowania genów. „Być może – pisze badacz – nie jest to jednak takie pewne, bowiem katalizator organiczny może, w odpowiednich okolicznościach, przetwarzać więcej niż 100 000 składowych molekuł na sekundę. Jeśli geny są katalizatorami tego rodzaju uporządkowania, nawet pojedynczy gen wymaga statystycznego potraktowania”¹³⁸⁷. Za „pochopną” Haldane uznaje akceptację Schrödingera wyjaśnienia procesu mutacji podanego przez Delbrücka. Daje powód, dla którego obraz ten wymaga gruntownych modyfikacji: Schrödinger stwierdza, że pojedyncze zdarzenie, które skutkuje mutacją, musi być jonizacją lub procesem podobnym do niej. Z kolei Haldane, powołując się na znane mu badania, pisze: „Lea i Catcheside w nieopublikowanej pracy wygłoszonej na Genetical Society, którą bardzo uprzejmie pozwalają mi cytować, przedstawiają solidny dowód, że wiele, jeśli nie wszystkie ze śmiertelnych mutacji generowanych przez napromieniowane gamety *Drosophila* wynika z rozerwania chromosomu z następującym po nim przywróceniem do stanu pierwotnego; w *Tradescantia* autorzy obliczyli, że »przynajmniej 17 jonizacji musi mieć miejsce w chromatydzie, by ta pękła«. Pomimo tego myślą, że »obszar docelowy« prawidłowo określa rozmiar genu. Prawdę mówiąc, jak często dzieje się w mechanice kwantowej, prosta teoria dała raczej prawidłowe rezultaty, niemniej musiała zostać zmodyfikowana. I znowu, fakt, iż poziom mutacji dzikich genów wzrasta bardziej dzięki temperaturze niż mniej stabilnych zmutowanych genów, jest nieźle tłumaczony na polu mechaniki kwantowej. Jednak Fabergé i Beale dowiedli, że poziom mutacji bardzo niestabilnych genów spadł w wysokich temperaturach. Być może w chromosomach jest więcej rzeczy, o których nam się nie śni nawet w mechanice falowej”¹³⁸⁸. Haldane ubolewał, że w omawianej książce zostały poruszone tylko niektóre z ważnych biologicznych problemów i miał nadzieję, że Schrödinger pominięte ważne zagadnienia biologiczne poruszy w swej następnej publikacji.

Zainteresowanie problemami biologicznymi Schrödingera wyrażone w książce *What is life?* nie uszło uwadze Irene Manton, badaczki zajmującej się cytologią roślin¹³⁸⁹. W artykule *Comments on chromosome structure*

¹³⁸⁷ Tamże, s. 375.

¹³⁸⁸ Tamże.

¹³⁸⁹ Manton, która była bardziej biofizykiem niż genetykiem, opisała tę książkę jako bodziec dla swoich własnych przemyśleń w wybranej przez nią dziedzinie botaniki. Książką

(Omówienie struktury chromosomu) podzieliła się swoimi spostrzeżeniami po lekturze książki Schrödingera. Autorka do dyskusji austriackiego fizyka na temat chromosomów dodała własny, poparty badaniami cytologicznymi komentarz. W wątpliwość podała słusność sformułowania „rozmiar genu”¹³⁹⁰. Podkreśliła, że w sensie, jakim posługuje się austriacki fizyk, „gen” nie oznacza niczego ponad fizyczną podstawę widocznej na zewnątrz mutacji, a jeśli mutację można było spowodować przez zmianę aranżacji atomowej z natury skoku kwantowego występującego wewnątrz molekuly, wówczas gen jest częścią tej molekuly, która uległa zmianie i niczym więcej. W związku z powyższym, słowo to, w jej ocenie, nie ma precyzyjnego znaczenia. Przy omawianiu maksymalnego rozmiaru „genu” na podstawie danych genetycznych Schrödinger rozumie to słowo jako albo najmniejszy fragment chromosomu, który może mieć wykrywalny genetyczny efekt, albo najmniejszą odległość między dwoma mutacjami, którą można oddzielić przez *crossing-over*. Przy omawianiu minimalnego rozmiaru „genu” dedukowanego z indukcji mutacji przez promieniowania jonizujące, słowo to równa się u niego zakresowi wpływu minimalnego stopnia radiacji, koniecznego do zapoczątkowania mutacji. „Rzeczą, jaką prof. Schrödinger tak naprawdę chce omówić – stwierdza Manton – jest fundamentalna molekularna jednostka struktury chromosomu, która niekoniecznie jest identyczna z dowolną z tych koncepcji. Użycie słowa »gen« do tego celu również może wydawać się szczególnie niefortunne dla cytologa, ponieważ pewna doza strukturalnej nieciągłości jest sugerowana w niemal nieunikniony sposób. Mutacje są nieciągłe i ułożone w liniową sekwencję wzdłuż chromosomu. Czy fundamentalny materiał genetyczny, w którym zachodzą mutacje, jest również nieciągły (jak koraliki na sznurku) – to kolejna kwestia, której ani genetyka, ani cytologia nie są również w stanie wyjaśnić. Trudność lingwistyczna byłaby być może przedstawiona lepiej, jeśli słowo gen zostałoby usunięte ze słownika; jedno z najbardziej znaczących zdań prof. Schrödingera mogłoby wobec tego zostać omówione następująco: »Wierzmy, że mutacja ma naturę skoku kwantowe-

Schrödingera zainteresowała się dzięki Michaelowi Polanyiemu, fizykowi urodzonemu na Węgrzech, z którym się przyjaźniła. Kilka miesięcy wcześniej, zanim pojawił się tekst Manton w „Nature”, Polanyi opublikował recenzję *What is life?* w „Manchester Guardian”. Udzielił pozytywnej oceny biologicznym rozstrzygnięciom austriackiego fizyka, chociaż napisał, że cytology mogą znaleźć bardziej fizyczne aspekty fenomenu życia. To, że Polanyi użył określenia „cytolog” w swojej recenzji, a nie bardziej ogólnego „biolog”, odzwierciedla jego związanie z Manton i jej współpraca z cytologami w Manchesterze. W późnych latach czterdziestych w *Personal knowledge* Polanyi odniósł się bezpośrednio do Manton i jej badań paproci. Por. N. Williams, *Irene Manton, Erwin Schrödinger...*, s. 3, 17.

¹³⁹⁰ Por. I. Manton, *Comments on chromosome structure. A Review of 'What is life?', by E. Schrödinger*, „Nature”, 155 (1945), s. 471.

go, a fundamentalna jednostka struktury chromosomu – lub być może całe włókno – jest aperiodycznym ciałem stałym»¹³⁹¹.

Manton skoncentrowała się następnie na wyrażeniu „całe włókno chromosomu”¹³⁹². Przytacza dwa skrajne poglądy na tę kwestię, oba wspierane dowodami. Według tego, z którego korzysta Schrödinger, całe włókno chromosomu jest pojedynczą strukturą przez cały czas, poza ograniczonym okresem w trakcie profazy, kiedy dzieli się w przygotowaniu do podziału komórkowego. Najmocniejszym dowodem na poparcie tego poglądu jest zróżnicowane zachowania konkretnych stadiów jądrowych po wystawieniu na promieniowanie X na poziomie wystarczającym do przełamania chromosomu. Manton, przywołując alternatywne poglądy, pisze: „Zakładając, że stwierdzenia obecne w literaturze są słuszne [...], pojawia się stanowisko mówiące, że w niektórych organizmach, takich jak *Tradescantia*, irradycja MUX powoduje przerywanie chromosomów (chromatyd), ale na innych stadiach tylko pękanie całych chromosomów. Przy interpretowaniu tego w znaczeniu pojedynczego włókna chromosomowego we wszystkich stadiach rozwoju poza profazą – nie zawsze jasne jest, że pojedyncze włókno poświadczane jest spiralną strukturą i niekoniecznie oparte na uznaniu materiału genetycznego za pojedynczy”¹³⁹³.

W przeciwieństwie do austriackiego fizyka cytolodzy, w tym Manton, postrzegają chromosom jako spiralną, helikalną strukturę¹³⁹⁴. Badaczka przypomina, że to, iż widoczna średnica w pełni rozwiniętego chromosomu ma kształt helikalnej spirali, wiadomo już od 1880 roku (chromosomy mejo-tyczne opisane zostały znacznie później)¹³⁹⁵. Swoje przekonanie opiera na eksperymencie z rozszczepieniem chromosomu w paproci *Todea*. Sugeruje, że struktura helikalna może pociągać za sobą obecność kolejnych włókien, co z kolei poprowadzi ją do rozważania możliwej obecności duplikatów, kopii materiału genetycznego, w genomie *Todea*¹³⁹⁶. Twierdzi ona, że w genomie *Todea* może być miejsce dla 300–12 000 kopii materiału genetycznego¹³⁹⁷. Oferuje modyfikację strukturalnego poglądu Schrödingera, sugerując, że struktura chromosomu powinna być przedstawiana nie jako kryształ aperiodyczny w swoim podłużnym wymiarze, ale jako periodyczny w wymiarze poprzecznym. Pisze: „Waga przypisywana układowi atomowemu w »krysz-

¹³⁹¹ Tamże, s. 471.

¹³⁹² Por. tamże.

¹³⁹³ Tamże, s. 471–472

¹³⁹⁴ Por. tamże

¹³⁹⁵ Por. tamże, s. 472.

¹³⁹⁶ Por. tamże, s. 472–473.

¹³⁹⁷ Por. tamże, s. 473.

tale aperiodycznym« jest niemal z całkowitą pewnością słuszna, a właściwość ta podzielana jest przez inne protoplazmatyczne substancje poza chromosomami, szczególnie przez enzymy. Jeśli wysunięty pogląd na strukturę chromosomu jest słuszny, szczególne właściwości chromosomu przypisać będzie można nie do aperiodycznego włókna jako takiego, ale do faktu, że ich wiązki kontrolowane są w sposób przypominający kryształy periodyczne. Całe »włókno chromosomowe« może zostać zwizualizowane jako kryształ aperiodyczny, jeśli chodzi o wymiary podłużne i periodyczny w kwestii wymiarów poprzecznych. Rozpoznanie elementu periodycznej struktury w jednym wymiarze materiału genetycznego prawdopodobnie byłoby mniejszym sprostowaniem w ogólnym spojrzeniu na chromosom»¹³⁹⁸.

Hermann J. Muller zwrócił uwagę, że istnieje znacznie więcej osobliwości, poza tymi podkreślonymi w omawianym dziale, które w tejże publikacji pochopnie wzięto za pewnik, skoro jego celem jest rozważenie pytania: co to jest życie?¹³⁹⁹ Muller przekonuje, że to zdolność genu do akumulowania i przekazywania informacji dziedzicznej czyni możliwy wzrost, dziedziczność i ewolucję, od najprostszych początków do najbardziej kompleksowych – to właśnie jest przyczyną tak wielkiej rozbieżności między tym, co żywe, a tym, co martwe, oraz usprawiedliwia nasz podział natury na te dwie kategorie. Innymi słowy, dokładnie ta własność zdaniem Mullera formuje podstawy życia samego w sobie. Najbardziej fundamentalnym problemem życia jest więc odkrycie struktury i działania genu oraz jego składników czyniących to życie możliwym. Wyjaśnienie bez wątpienia obejmie fizykę i chemię. Geny, w przeciwieństwie do innych ciał nieożywionych, mają ogólną zdolność do kształtowania innych ciał materialnych zgodnie z własnym wzorcem. To właśnie pozwala genom na przechodzenie zmian ewolucyjnych. „Jeśli powyższy pogląd na naturę genu – pisze Muller – który prowadzi do wzrostu jego organizacji na przestrzeni wieków, jest słuszny, nie wydaje się tak kluczowy dla rezultatów osiąganych przez geny, że podstawowe zmiany w ich układzie, mutacje, powinny być prostymi przemianami kwantowymi bez utraty energii (co Schrödinger nazywa przejściem z jednego porządku do kolejnego), bowiem rolą multiplikacji i doboru jest wyprowadzanie porządku z genów w każdym wypadku. Co więcej, w odniesieniu do tego porządku, nie wydaje się usprawiedliwione postrzeganie go jako zaledwie ekwiwalentu tego, co fizyka ma na myśli, mówiąc »porządek«, dla kontrastu z chaosem, który określa pojęciem »entropia«”¹⁴⁰⁰. W ocenie Mullera fizyczny porządek i „organizacja biologiczna” to zupełnie dwa różne poję-

¹³⁹⁸ Tamże, s. 473.

¹³⁹⁹ Por. H.J. Muller, *A physicist stands...*, s. 90–91.

¹⁴⁰⁰ Tamże, s. 91.

cia¹⁴⁰¹. Pisz: „Ten rodzaj fizycznego porządku [...] może zawierać w sobie relatywnie mniej energii niż bezpośrednio dostępnej w układzie, a jednak może obejmować jakościowo zaawansowany rodzaj aranżacji elementów, obejmujący ogromny potencjał rozszerzania i kontynuowania działania układu, oraz wykorzystania dalszej energii w procesie. Jak się wydaje, materia ożywiona ma tendencję do napędzania samej siebie oraz zwiększania coraz bardziej swojego stopnia organizacji. W podobnych sytuacjach będzie to system bardziej odpowiedni biologicznie niż ten »silny«: to jest że kontrolowanie energii zamiast jej zbierania jest bardziej faworyzowane przez dobór naturalny”¹⁴⁰². Uwadze badacza nie umykają także inne niedociągnięcia austriackiego fizyka: brak odwołania do publikacji biologów, którzy wnieśli istotny wkład w omawiane problemy, czy błędy między innymi przy obliczaniu minimum genów lub przy opisie ich rozmiaru¹⁴⁰³.

Za swoje biologiczne poglądy Schrödinger został skrytykowany również przez swojego byłego kolegę z Oxfordu Francisa Simona, z którym wcześniej omawiał te zagadnienia¹⁴⁰⁴. W konsekwencji, w drugiej edycji książki pojawiły się uwagi odnośnie do zastrzeżeń Simona w zakresie argumentacji austriackiego fizyka i terminologii, której używa. Uwagi te nie były wystarczające dla Simona, napisał więc do Schrödingera 19 grudnia 1946 roku list, w którym stwierdza między innymi: „Podajesz, że spalanie węgla uwalnia ciepło, na dowód twój twierdzenia, że węgiel + tlen to stan dobrze zorganizowany. Teraz (a) nie są, tlen ma wysoką entropię i (b) te fakty nie mają ze sobą nic wspólnego, na przykład wodór i tlen reagują gwałtownie, tworząc wodę, która ma mniejszą entropię! Te reakcje w organizmie żywym są tylko częściowo opracowane, a w konsekwencji musimy się pozbyć ciepła, które otrzymujemy. Z tą nieodwracalną produkcją [*sic*] łączy się za mała ilość (dodatnia lub ujemna) odwracalnie wyprodukowanego ciepła, ale jest ona tak nieznacząca, że nie ma ważnego wpływu na procesy życiowe, które im przypisałeś. Możesz zobaczyć, że zasugerowana przez ciebie poprawka nie satysfakcjonuje mnie, szczególnie że wciąż można mieć wrażenie, że w twojej opinii rozważania termodynamiczne zmuszają istoty żywe do bycia karmionymi substancjami dobrze zorganizowanymi [...] nie jest jasne, że rozważania entropii nie są ważne dla tego problemu”¹⁴⁰⁵.

¹⁴⁰¹ Por. tamże, s. 92.

¹⁴⁰² Tamże.

¹⁴⁰³ Por. tamże.

¹⁴⁰⁴ Por. E. Yoxen, *Where does Schrödinger's...*, s. 24.

¹⁴⁰⁵ *Letter from Simon to Schrödinger*, 19 December 1946 [w:] *The Simon papers at the Royal Society*, File FS14/3/5, Correspondence Box No. 29; cyt. za: E. Yoxen, *Where does Schrödinger's...*, s. 24–25.

W opinii André Lwoffa stwierdzenia Schrödingera odnoszące się do ujemnej entropii, czyli uporządkowania jako prawdziwego paliwa podtrzymującego życie, należy rozpatrywać z biologicznego i fizycznego punktu widzenia¹⁴⁰⁶. Silnik maszyny jest utrzymywany w pracy poprzez spalanie węgla. Spalanie węgla jest źródłem ruchu maszyny (nie jest źródłem jej struktury). Lwoff twierdzi, że formuła: „organizm żywi się ujemną entropią” została zastosowana do zachowania układużywionego, jednak zachowanie porządku biologicznego jest tylko jednym z aspektów życia; drugim jest reprodukcja – tylko organizm może wytworzyć inny organizm. W jego opinii zachowanie (tak samo jak reprodukcja) porządku biologicznego zależy od tego samego procesu, a mianowicie metabolizmu, który jest skorelowany ze wzrostem entropii. Ponieważ porządek biologiczny lub organizacja – podobnie jak informacja – może być wyrażony w ramach ujemnej entropii, w ocenie Lwoffa stwierdzenia typu „organizm żywy podtrzymuje się przy życiu poprzez zasysanie porządku ze swojego otoczenia” mogą być nieco mylące nawet wtedy, gdy odnosi się je tylko do zachowania. Badacz pisze: „Jeśli organizm chce działać, musi coś spalać, podobnie jak robi to silnik parowy. Może spalać na przykład cukier. Jasne jest jednak, że tym, co ma znaczenie w cząsteczce cukru, nie jest strukturalna ujemna entropia jego atomów czy prawdopodobieństwo, że atomy te są zorganizowane w pewien porządek. Istota tkwi w energii wiązań chemicznych. Organizm pobiera pokarm i spala go. Oddziela i wiąże atomy oraz cząsteczki. Praca, ze współzależnym jej rozkładem energii, jest wytwarzana kosztem energii wiązań chemicznych. Organizm nie jest w stanie korzystać z energii w abstrakcie, musi redukować tlen. Energia światła umożliwia roślinie wydzielanie jonów wodorowych z cząsteczek wody. Gdy światło spotyka atomy, produkowana jest praca i degradowana jest energia. Niemniej według niektórych fizyków, do których się zwróciłem, nie wydaje się uzasadnione stwierdzenie, że roślina wykorzystująca światło jako źródło energii żywi się ujemną entropią tego światła”¹⁴⁰⁷. Zdaniem Lwoffa to samo wydaje się mieć zastosowanie dla energii wiązania chemicznego¹⁴⁰⁸. O ile nie została wytworzona praca, nie można mówić o energii swobodnej i jej entropicznym komponencie. W wyniku reakcji chemicznej wykorzystana zostaje energia wiązania chemicznego pokarmu, wytwarza się ciepło, zaś część energii ulega degradacji. W pierwotnym wiązaniu chemicznym jedna część pozostaje w gotowości do pracy, zaś druga to potencjalna entropia. Energia wysokiego stopnia, jak na przy-

¹⁴⁰⁶ Por. A. Lwoff, *Biological order*, s. 96.

¹⁴⁰⁷ Tamże, s. 97.

¹⁴⁰⁸ Por. tamże.

kład energia światła lub wiązania chemicznego, nie może być jednak dalej rozdzielana na dodatnią i ujemną entropię. Lwoff dodaje: „Ujemna entropia jest stopniem energii. Porządek jest prawdopodobieństwem. Organizm nie obsługuje koncepcji stopni ani logarytmów prawdopodobieństw. Organizm obsługuje atomy lub cząsteczki i energię światła lub wiązań chemicznych. Niemniej niektórzy z fizyków, z którymi miałem okazję rozmawiać, uważają, że sformułowanie Schrödingera jest całkowicie dopuszczalne, podczas gdy inni twierdzą, że nie ma żadnego sensu. Ogólny konsensus osiągnięty tylko na jednej płaszczyźnie, która dotyczy karmienia organizmu granulka-
mi ujemnej entropii (na tyle dodatniej, na ile dodatnia może być ujemna entropia)»¹⁴⁰⁹.

Max Hartmann w swej recenzji *What is life?* jest krytyczny wobec sformułowanego przez austriackiego fizyka określenia „ujemna entropia”. Badacz pisze: „Relacje Schrödingera widziane w zasadzie poprawnie nie mają nic wspólnego z entropią. Entropia także w sferze organicznej jest w pełni skuteczna. Przeważający koniec końców dowód wolnej energii potencjalnej, która jest zużywana do podtrzymywania i zwiększania porządku organizmów, pochodzi od Słońca przez asymilację CO₂ poprzez zielone rośliny»¹⁴¹⁰.

Robert Olby w swej analizie biologicznych poglądów Schrödingera koncentruje się zwłaszcza na określeniu „ujemna entropia”, które uważa za „wysoko niefortunne”. Twierdzi: „Wobec tego zamieszania najwyraźniej szkoda, że Schrödinger sprawił, iż problem wygląda na większy, niż naprawdę był [...]. Stąd, zamiast rozmawiać o wolnej energii, dzięki której organizmy żyją, użył terminu ujemnej entropii. Ściśle mówiąc, jest to sprzeczność terminologiczna. Entropia jest dodatnia powyżej zera absolutnego, zerowa przy 0°K. Poniżej tego nie można zejść. Jaka wtedy może być ujemna entropia? Oczywiście Schrödinger nie zaznacza tego, ale był odpowiedzialny za termin, który teraz został skrócony przez Brillouina do beznadziejnego słowa »negentropia«»¹⁴¹¹. Dla Olby’ego zastanawiające jest też i to, dlaczego Schrödinger zadał sobie tyle trudu, by przedstawić model genu stworzony przez Delbrücka według mechaniki kwantowej¹⁴¹². Już wtedy założenie, że jest on molekułą, było dość powszechne.

Za „trywialne nieporozumienie” uważał podaną przez Schrödingera definicję życia, zgodnie z którą jest ono pogwałceniem zasady entropii Colina

¹⁴⁰⁹ Tamże.

¹⁴¹⁰ M. Hartmann, *Was ist Leben?*, „Philosophia Naturalis”, 6 (1970), s. 133.

¹⁴¹¹ R. Olby, *Schrödinger’s problem: what is life?*, s. 128.

¹⁴¹² Por. tamże, s. 245.

Pittendrigh¹⁴¹³. Stwierdza: „Życie wymaga przepływu energii, jest częścią szerszego systemu, w którym następuje wzrost entropii. Każdy organizm żywy jest częścią wszechświata, bierze udział w wymianie energii oraz w entropii zachodzącej we wszechświecie”¹⁴¹⁴. Według niego austriacki fizyk nie do końca zdawał sobie sprawę z różnicy między porządkiem a organizacją. A w opinii Pittendrigha właśnie słowo „organizacja” jest bardziej odpowiednie od słowa „porządek” (ponieważ jest ona czymś więcej niż porządek). Kryształ, podobnie jak organizm żywy, chociaż wykazuje wewnętrzny porządek, nie ma organizacji, której cechą jest zawartość informacyjna. W ocenie Pittendrigha nie można zrozumieć życia bez uprzedniego namysłu nad pojęciami przypadkowości i nieprzypadkowości. „W świecie ożywionym – pisze – „stnieje coś nieprzypadkowego. Różnica wydaje się polegać na jakości owej nieprzypadkowości w życiu. To nie tylko porządek, ale cała organizacja o wysokiej zawartości informacyjnej. Porządek powtarzany w życiu jest tak bardzo nieprawdopodobny, że niemal wyklucza możliwość przypadkowego powtórzenia się. Utrzymanie tego porządku wymaga więc stałego przekazywania informacji”¹⁴¹⁵.

Max F. Perutz również odsłonił wiele błędów w rozumowaniu Schrödingera¹⁴¹⁶. Chromosomy w oczach austriackiego fizyka są zarówno „kodeksem”, jak i „władzą wykonawczą” w żywej komórce. Perutz przypomina, że biochemicy wykazali, iż „władza wykonawcza” jest sprawowana przez katalizatory enzymatyczne, zaś w 1941 roku Beadle i Tatum odkryli, że pojedyncze geny definiują pojedyncze działania enzymatyczne. Odkrycie to zaprowadziło do powstania hipotezy „jeden gen – jeden enzym” – idei, której załączki znajdujemy jeszcze u J.B.S. Haldane’a (1937 rok)¹⁴¹⁷. W opinii Perutza Schrödinger nie wydaje się tego świadomy, bo nie wspomina o innych ważnych ideach, zawartych między innymi w pracach Paulinga i Delbrücka. Ci ostatni podkreślali, że interakcje między molekułami są już dość dobrze rozumiane i nadają stabilności dwóm molekułom o uzupełniającej strukturze w zestawieniu, a nie dwóm molekułom o koniecznie identycznej strukturze. Komplementarność należy przede wszystkim wziąć pod uwagę w dyskusji na temat specyficznego przyciągania między molekułami oraz ich syntezy enzymatycznej. Schrödinger wspomina o tym, że według powszechnej opinii geny są cząsteczkami białek, tymczasem w styczniu 1944 roku ukazał się

¹⁴¹³ Por. C. Pittendrigh, *Czym jest życie? Rozm. przepr. W. Osiatyński*, „Kultura”, 41 (1976), s. 5.

¹⁴¹⁴ Tamże.

¹⁴¹⁵ Tamże.

¹⁴¹⁶ Por. M. Perutz, *Erwin Schrödinger's 'What is life?'...*, s. 242.

¹⁴¹⁷ Por. tenże, *Physics and the riddle of life*, s. 556.

esej Oswalda Avery’ego, Colina MacLeoda i Maclyna McCarty’ego, który zawierał rozstrzygający dowód na to, że geny składają się nie z białka, lecz z DNA¹⁴¹⁸.

Perutz twierdzi, że pozorne sprzeczności między życiem i statystycznymi prawami fizyki można rozwiązać, powołując się na chemię – naukę w dużej mierze ignorowaną przez Schrödingera¹⁴¹⁹. Austriacki fizyk pisał o tym, że regularny przebieg zdarzeń rządzonych przez prawa fizyki nigdy nie jest konsekwencją jednej uporządkowanej konfiguracji atomów, chyba że konfiguracja ta powtarza się wielokrotnie. Według Perutza Schrödinger, pisząc tak, nie zdawał sobie sprawy z tego, iż w dokładnie w ten sam sposób funkcjonują katalizatory chemiczne. „Biorąc pod uwagę źródło energii swobodnej – stwierdza Perutz – dobrze zorganizowana konfiguracja atomów w pojedynczej cząsteczce katalizatora enzymatycznego może kierować powstaniem zorganizowanego związku stereospecyficznego z prędkością 10^3 – 10^5 cząsteczek na sekundę, tworząc tym samym porządek z bezładu ostatecznym kosztem energii słonecznej”¹⁴²⁰. Chemicy mogli również podpowiedzieć austriackiemu fizykowi, że nie ma żadnego problemu w wyjaśnieniu stabilizacji polimerów, z jakich składa się materia ożywiona, ponieważ ich energie wiążące wahają się od 3 eV wzwyż, co odpowiada półtrwaniu każdego wiązania wynoszącego przynajmniej 10^{30} lat w temperaturze pokojowej¹⁴²¹. Trudność polega na wyjaśnieniu, jak ich nieokresowe wzory są dokładnie odtwarzane w każdym pokoleniu. Perutz konkluduje, że o tym problemie w książce Schrödingera nie ma żadnej wzmianki.

G. Rickey Welch twierdzi, że pytanie: „czy biologia może być zredukowana do fizyki lub chemii?” jest „błędym kursem epistemologicznym”¹⁴²². Powinniśmy raczej – jak twierdzi Welch – badać tę sprawę z punktu widzenia teorii redukcji, gdzie i biologia teoretyczna, i fizyka teoretyczna są postrzegane jako elementy większej, obszernej struktury teoretycznej, która może być rozłożona na kilka empirycznych dziedzin. „W rzeczy samej, dzisiejsi naukowcy, zarówno biolodzy, jak i fizycy, zajmują się badaniem takiej teorii ujednolicenia”¹⁴²³ – kończy swój wywód Welch.

Haboku Nakamura w swych rozważaniach krytycznie ocenił poszukiwania przez Schrödingera „nieznanego prawa termodynamiki”. Austriacki fizyk wierzył, że ujawni się ono przy okazji badań nad genami, które okre-

¹⁴¹⁸ Por. tenże, *Erwin Schrödinger’s ‘What is life?’* ..., s. 241.

¹⁴¹⁹ Por. tamże, s. 243.

¹⁴²⁰ Tamże.

¹⁴²¹ Por. tamże.

¹⁴²² Por. G.R. Welch, *Of men, molecules...*, s. 189.

¹⁴²³ Tamże.

ślają żywe cechy¹⁴²⁴. „Rozumowanie Schrödingera – pisze Nakamura – zostało zaakceptowane przez wielu fizyków i naukowców w innych dziedzinach z następującym wynikiem: znaczna część badań została przeprowadzona w genetyce, która jest jedną z kopalni złota biologii, jednakże żyła czystego złota nie została odkryta, a wokół kopalni zaczęły stopniowo powstawać hałdy. Biologia molekularna jest jedną z największych hałd wiedzy uzyskanej na skutek poszukiwania złota. Jednakże nowe prawo termodynamiki nigdy nie znajdowało się w hałdach, a wszystkie zjawiska życiowe mogą być wyjaśnione za pomocą klasycznego drugiego prawa”¹⁴²⁵. Według Nakamury żadne nowe prawo nie może się ujawnić w układach ożywionych. W jego ocenie przyczyną błędnego rozumowania Schrödingera było to, że uważał bioukłady za termodynamicznie zamknięte. Pojedynczy system, na przykład pojedyncza komórka, musi zawsze wymieniać energię ze środowiskiem i, jako cały system, zjawiska komórkowe pozostają w zgodzie z prawami termodynamiki. Niemniej układy ożywione mogą z całą pewnością zwiększać ład makromolekuł, komórek, indywidualnych osobników, i, chociaż tylko częściowo, zmniejszać entropię.

Mark A. Bedau skoncentrował swoją uwagę na idei Schrödingera, że przetrwanie w obliczu drugiej zasady termodynamiki poprzez proces metabolizmu jest kluczową cechą życia¹⁴²⁶. Dostrzegł słabości koncepcji życia opartej na metabolizmie. Za jej główną wadę uważał to, iż wiele podmiotów dokonujących procesu przemiany materii zdaje się nie być żywych ani też w żaden sposób zawierać w sobie życia, jakie znamy¹⁴²⁷. Podaje przykłady płomienia świecy, wiru i komórek konwekcyjnych, które same w sobie nie dowodzą niezbiecie, że metabolizm jest wystarczający do istnienia życia. Bedau stanął na stanowisku, że odpowiednia koncepcja życia nie musi klasyfikować jako żywych wszystkich tych rzeczy, które intuicyjnie jako takie klasyfikujemy. Istotne jest to, czy metabolizm jest charakterystyczną cechą, która w istocie wyjaśnia zunifikowaną różnorodność życia. Wszelka przekonująca obrona życia jako metabolizmu musiałaby wykazać, że metabolizm odpowiada za najbardziej charakterystyczne cechy życia. To, czy jest to możliwe, dla Bedau wydawało się wątpliwe.

Michael Morange z kolei podkreślił, że austriacki fizyk nie był zainteresowany chemiczną strukturą genów ani nie wspomniał o pracach Avery’ego

¹⁴²⁴ Por. H. Nakamura, *The definition of life* [w:] M. Rizzotti (ed.), *Defining life: the central problem in theoretical biology*, University of Padova, Padova 1996, s. 171.

¹⁴²⁵ Tamże, s. 172.

¹⁴²⁶ Por. M.A. Bedau, *The nature of life* [w:] M.A. Boden (ed.), *The philosophy of artificial life*, Oxford University Press, Oxford 1996, s. 336.

¹⁴²⁷ Por. tamże, s. 337.

nad czynnikiem transformującym (ang. *transforming factor*)¹⁴²⁸. Pomimo iż cytował Delbrücka, to jedynie jako lidera „Grupy Fagowej”, a nie autora badań nad genami, a to one nabrały w tym czasie największego rozmachu. W końcu Schrödinger nie opisał szczegółowej roli genów ani też nie wspominał nic o pracy Beadle’a i Tatum nad fizjologią genetyczną (ang. *genetic physiology*).

Za rażące uważała opaczne interpretowanie przez austriackiego noblistę wielu faktów biologicznych Leah Ceccarelli. Ceccarelli pisze: „Kilka z jego najbardziej rozwiniętych argumentów okazało się ślepyimi zaułkami prowadzącymi naukowców, którzy szli tym tropem, do złych wyborów i złych ścieżek w badaniach naukowych. Co więcej, opuścił kilka idei, które były najbardziej potrzebne dla rozwoju nowych pól wiedzy. Przykładowo nie zauważył poglądu, iż komplementarność pomiędzy molekułami może wyjaśnić specyficzne przyciąganie chromosomów, mimo że L. Pauling, M. Delbrück i J.B.S. Haldane doszli do takich wniosków przed wydaniem jego pracy. Zignorował również przełomową kwestię sposobu dokładnej replikacji genów z jednego pokolenia do następnego, mimo że inni badacze wskazywali na istotność tego problemu”¹⁴²⁹. Włoska badaczka podkreśliła, że wiedza austriackiego fizyka o stanie genetyki w czasie pisania książki była o kilka lat „zaczofana”. Odniosła wrażenie, iż Schrödinger nie wiedział, że Delbrück porzucił genetyczne badania nad muszkami i skierował swoją uwagę na bardziej produktywną pracę, to jest badanie wirusów bakteryjnych – bakteriofagów¹⁴³⁰. Co jest jeszcze bardziej istotne – Schrödinger zdawał się nie wiedzieć, że praca *Dreimännerwerk* została zdyskredytowana, a sam Delbrück właśnie porzucił model genu forsowany przez *What is life?* jako jedyne możliwe wytłumaczenie.

Według Ceccarelli brak ekspertyzy z genetyki można Schrödingerowi wybaczyć, zwłaszcza – gdy jako fizyk – przeproszał z góry za potencjalne błędy¹⁴³¹. W ocenie Włoszki nie ma za to żadnego usprawiedliwienia dla niestaranego wykorzystania przez austriackiego fizyka praw fizyki i chemii. Badaczka ubolewa, że Schrödinger nie brał pod uwagę aktualnych poglądów panujących wśród chemików, biologów i krystalografów. Rozprawę

¹⁴²⁸ Por. M. Morange, *A history of molecular biology*, s. 74.

¹⁴²⁹ L. Ceccarelli, *Shaping science with rhetoric. The cases of Dobzhansky, Schrödinger, and Wilson*, The University of Chicago Press, Chicago–London 2001, s. 68.

¹⁴³⁰ Por. tamże, s. 69.

¹⁴³¹ Por. tamże. Według Ceccarelli brak oryginalności nie jest najważniejszą rysą na koncepcji życia Schrödingera. Badaczka podkreśliła jednak, że ostatecznie nieoryginalny tekst naukowy wciąż może być uznawany za ważny jako forma popularyzacji pewnych poglądów, które do tej pory nie zostały tak dobrze wyrażone w poprzednich pracach.

Schrödingera na temat termodynamiki Ceccarelli uważała za niejasną i powierzchnową. Zatrzymała się na pojęciu „ujemnej entropii”: „Schrödinger zajął się kwestią entropii, oferując głównie pojęcie »ujemnej entropii« w celu wyjaśnienia, dlaczego materia ożywiona zdaje się nie podlegać drugiej zasadzie termodynamiki. Niestety jego wy tłumaczenie było błędne i mylące; jedynym powodem, dla którego jego wywód wykazał różnicę w termodynamice ożywionej i nieożywionej materii, był fakt, że nie zdołał poprawnie zdefiniować układu, w którym pomiary miałyby mieć miejsce. Gdyby Schrödinger wykazał, że należy rozważać entropię całego wszechświata podczas stosowania drugiego prawa, nie byłoby adresowanego do niego problemu termodynamicznego. Przez zaniedbanie zewnętrznego strumienia zaburzenia u organizmów oraz wprowadzenie pojęcia »ujemnej entropii« Schrödinger mylnie sprawił wrażenie, że materia ożywiona jest w pewien sposób odmienna od nieożywionej”¹⁴³². Inny przykład niestaranego rozumowania Schrödingera dostrzegła Ceccarelli w podnoszeniu kwestii termodynamicznej stabilności samego genu. Jej zdaniem Schrödinger, rozważając tę kwestię, całkowicie zignorował istnienie enzymów; co więcej – nie zdołał odkryć faktu, że mogą one pomóc w rozwiązaniu opisanego przez niego problemu. W końcu, kiedy nazwał gen „kryształem aperiodycznym”, zdawał się nie być świadomy faktu, że cząsteczki organiczne tworzą wiązania kowalencyjne, które są odmienne od wiązań jonowych obecnych w kryształach¹⁴³³.

Michael R. Hendrickson przekonywał, że Schrödinger w dużej mierze nie był poinformowany co do aktualnego rozwoju biochemii¹⁴³⁴. Stabilność, której Schrödinger szukał w krystalicznej strukturze kryształu aperiodycznego (i która przewyższała zakłócenia działania ruchu cieplnego), była przez cały czas obecna w wiązaniu kowalencyjnym¹⁴³⁵. To oznaczało, że mechanika kwantowa Schrödingera (poprzez Paulinga) racjonalizowała stabilność wiązania kowalencyjnego. Ale stabilność genetyczna obejmuje więcej niż stabilne wiązania kowalencyjne; wymaga dokładnego kopiowania specyficznych sekwencji nukleotydowych. Różne białka są zaangażowane w poprawną nowo syntetyzowanego DNA, by zachować ogólny poziom błędów replikacji na minimalnym poziomie.

W biologicznych poglądach Schrödingera wskazywano na elementy nienaukowe. W 1948 roku z ostrą krytyką *What is life?* wystąpił Trofim Łysenko. Krytycyzm Łysenki wobec koncepcji życia Schrödingera był czę-

¹⁴³² Tamże.

¹⁴³³ Por. tamże, s. 69–70.

¹⁴³⁴ Por. M.R. Hendrickson, *Exorcizing Schrödinger's ghost...*, s. 68.

¹⁴³⁵ Por. tamże, s. 69.

ścią jego publicznego potępienia genetyki Morgana jako politycznie nieakceptowanej formy nauki¹⁴³⁶. Biologiczne poglądy austriackiego fizyka określił jako nienaukowe, nasączone ideologią¹⁴³⁷: „Prawdziwe ideologiczne podłoże genetyki Morgana ujawnił [...] fizyk E. Schrödinger. W swej pracy *What is life?* aprobuje chromosomową teorię Weissmana i dochodzi do szeregu wniosków. Oto główny z nich: »osobista, indywidualna dusza równa jest wszechobecnemu, wszechwidzącemu, wiecznemu duchowi«. Ten główny swój wniosek uważa Schrödinger za »[...] najdonioślejsze ze wszystkiego, co może dać biolog, który zamierza jednocześnie udowodnić istnienie Boga i nieśmiertelność duszy«”¹⁴³⁸.

Nieco bardziej pogłębioną, ale jednak wyraźnie stronnictwczą i krytyczną recenzję *What is life?* przygotował dawny zwolennik Łysenki Aleksander I. Oparin¹⁴³⁹. Chociaż Schrödinger próbuje zrozumieć życie z punktu widzenia fizyki, to jest w czysto materialistycznym kontekście, niemniej, jak zauważył Oparin, w swoim wniosku uznaje on boskie pochodzenie życia¹⁴⁴⁰. Koncepcję życia austriackiego fizyka Rosjanin postrzega jako połączenie mechanicyzmu z mistycyzmem: „Gdy mechanicyści próbują wyjaśnić wewnętrzny przystosowawczy charakter organizmów poprzez analogię do maszyn, nieuchronnie muszą dojść do tych samych wniosków co idealiści – do uznania twórczej woli Stwórcy. Za poglądowy przykład może służyć książka *What is life?* E. Schrödingera, jednego z największych współczesnych fizyków. We wstępie autor stawia sobie zadanie poznania istoty życia ze zgoła materialistycznego punktu widzenia. Staje on jednak na mechanistycznym stanowisku, wyznając pogląd, że organizacja biologiczna opiera się na zasadzie »mechanizmu zegarowego«. W zakończeniu książki logiczna konieczność zmusza Schrödingera do scharakteryzowania życia jako »wspaniałego arcydzieła, uczynionego według wytycznych boskiej mechaniki kwantowej« [...], czyli mówiąc wprost – do uznania boskiego pochodzenia życia”¹⁴⁴¹. Mistycyzm wyrażony przez jednego z adeptów zachodniej fizyki w epilogu

¹⁴³⁶ Por. E. Yoxen, *Where does Schrödinger's...?*, s. 21.

¹⁴³⁷ Por. T.D. Łysenko, *O sytuacji w biologii. Referat wygłoszony na Sesji Wszechzwiązkowej Akademii Nauk Rolniczych im. W.I. Lenina 31 lipca 1948 roku*, tłum. H. Birecka, Państwowy Instytut Wydawnictw Rolniczych, Warszawa 1948, s. 16–17.

¹⁴³⁸ Tamże, s. 13.

¹⁴³⁹ Por. E. Yoxen *Where does Schrödinger's...?*, s. 21.

¹⁴⁴⁰ Por. A.I. Oparin, *Life. Its nature, origin and development*, trans. A. Synge, Oliver & Boyd, Edinburgh–London 1961, s. 27.

¹⁴⁴¹ Tenże, *Życie a inne formy ruchu materii* [w:] G.M. Frank, A.M. Kuzin, I.W. Kuzniecowa, N.N. Liwszyc, M.F. Wiedienow (red.), *O istocie życia*, tłum. A. Bednarczyk, Książka i Wiedza, Warszawa 1967, s. 31. Zob. tenże, *Life...*, s. 27. Zob. tenże, *The problem of the origin of life*, „Modern Quarterly”, 6 (1951), s. 139.

What is life? został potraktowany przez Oparina jako znak upadłości badań biologicznych nad pochodzeniem życia. Badacz pisze: „Zaprzeczając wbrew danym naukowym prawidłowości procesu powstawania życia stronnicy wymienionych poglądów nie znajdują żadnej odpowiedzi na to pytanie i siłą rzeczy dochodzą do skrajnie idealistycznych, mistycznych wyobrażeń o pierwotnej, twórczej roli bóstwa i o określonym planowym porządku stworzenia świata ożywionego. Jako przykład można by przytoczyć książkę Schrödingera: *What is life?*, w której autor broni morganowskiej hipotezy genów. Gdy wreszcie przy końcu książki zajmuje się zagadnieniem zasadniczej swoistości życia, nie pozostaje mu nic innego, jak powołać się na boga, oświadczając, że wewnętrzna budowa materii ożywionej jest najdoskonalszym arcydziełem »boskiej mechaniki kwantów«”¹⁴⁴².

Cyril D. Darlington w pracy z 1953 roku *The facts of life* (Fakty dotyczące życia) skoncentrował się na stwierdzeniu austriackiego fizyka mówiącym, że nieoznaczoność lub nieregularność (którą Schrödinger nazywa nieokreślonością) na poziomie atomowym jest kompatybilna z regularnością na wyższych poziomach¹⁴⁴³. Przypomina, że Austriak spogląda na cząsteczki chromosomu jak na odpowiednio przystosowane wielkością i szczegółowością do kontrolowania lub wyhamowywania nieregularności swoich składników atomowych. Wynika stąd, że zachowania organizmów żywych mogą być przewidywalne na drodze dziedziczności, mimo że same spoczywają na nieprzewidywalnych fundamentach. W organizmach żywych, jak przekonuje Darlington, nieprawidłowości niższego poziomu w mutacji i rekombinacji mogą być wykorzystywane, o ile nie są tłumione lub buforowane. Organizm może w tym zakresie wykorzystywać je tak, by nawzajem się stymulowały. „Poprzez kontrolowaną nieregularność w rekombinacji mutacji – pisze Darlington – w jednolitej przemienności diploidalnej i półfaz życia owe nieprawidłowości są narażone na działanie selekcji w zmieniających się lub opcjonalnych środowiskach, pokolenie po pokoleniu. Selekcja ta działa w sposób deterministyczny, mogąc umożliwiać środowisku pozorne wpływanie na organizm i na jego dziedziczność w trakcie ewolucji. Może ona [...] oddziaływać bezpośrednio. Interkalowana nieoznaczoność w bioukładach jest środkiem do ustanowienia deterministycznej relacji między kolejnymi układami ożywionymi i środowiskiem. Ta interkalacja nieoznaczoności stała się kluczowym mechanizmem ewolucji i stanowi być może fundamentalne od-

¹⁴⁴² Tenże, *Zagadnienie pochodzenia życia w świetle współczesnego przyrodoznawstwa*, tłum. H. Jakubczyk [w:] *Filozoficzne problemy współczesnej biologii*, Państwowe Wyd. Rolnicze i Leśne, Warszawa 1953, s. 239.

¹⁴⁴³ Por. C.D. Darlington, *The facts of life*, George Allen & Unwin Ltd, London 1953, s. 390–391.

krycie życia”¹⁴⁴⁴. Darlington twierdzi, że badania genetyczne i fizjologiczne znacząco zmieniły nasze poglądy na temat determinizmu w procesach życiowych¹⁴⁴⁵. Podobieństwa rodziców i potomstwa nie wynikają bezpośrednio ani wyłącznie z deterministycznej zasady dziedziczności – są one spowodowane zaburzeniami nieoznaczoności nie tylko środowiska, ale również mutacji i rekombinacji. Poza tym nieoznaczoność mutacji i rekombinacji jest w praktyce nieistotna dla jednostki. Odkrywa się ją, ponieważ bez niej ewolucyjna zmiana nigdy nie mogłaby nastąpić, a życie zostałoby tym samym wygaszone w swoim początkowym stadium. Oznacza to, że rodziców i potomstwo cechuje nieprzewidywalność ich genetycznego związku.

Howard Hunt Pattee przypominał, że austriackiego fizyka fascynowała romantyczna idea głosząca, że „inne prawa fizyki” mogły zostać odkryte przez badanie genu¹⁴⁴⁶. Jednym z przykładów tego typu „romantycznej idei” była spekulacja Schrödingera, że pewne właściwości żywej komórki, w tym replikacja, mogą znajdować się we wzajemnie wyłącznej relacji względem ścisłego zastosowania mechaniki kwantowej, oraz że musi zostać wypracowany nowy język pojęciowy, aby móc opisać tę sytuację. „Jednak dziś – pisze Pattee – dwadzieścia lat od tamtych czasów, te pytania nie pojawiają się zbyt często. Obecnie przyjmuje się z reguły, że nie tylko tajemnica dziedziczności została zrozumiana w ramach fizyki, lecz także nie napotkano po drodze żadnych »paradoksów« ani żadnych »innych praw fizyki«, zaś konwencjonalne, normalne prawa fizyki i chemii okazały się dotychczas wystarczające”¹⁴⁴⁷.

Za przypominające magię André Pichot uważa to, że austriacki fizyk traktuje kryształ aperiodyczny jako wyjaśniający swoją obecnością tworzenie się układu poprzez porządek¹⁴⁴⁸. Mimo że dobrze ujął rozwiązanie dotyczące przekazywania organizacji na przestrzeni generacji poprzez transmisję kryształu aperiodycznego, stale uporządkowanego, który jest czterowymiarowym modelem istoty żywej, to nie udało mu się wyjaśnić w sposób przekonujący, jak układ ten kieruje organizacją bytu¹⁴⁴⁹.

Robert Rosen przekonywał natomiast, że odpowiedź Schrödingera na tytułowe pytanie może zostać zakwalifikowana przez dzisiejszych naukowców jako, w najlepszym wypadku, „bez znaczenia”, a w najgorszym

¹⁴⁴⁴ Tamże, s. 391.

¹⁴⁴⁵ Por. tamże, s. 392.

¹⁴⁴⁶ Por. H.H. Pattee, *Physical problems of heredity and evolution* [w:] C.H. Waddington (ed.), *Towards a theoretical biology. Vol. 2*, s. 268.

¹⁴⁴⁷ Tamże.

¹⁴⁴⁸ Por. A. Pichot, *Histoire de la notion de gene*, s. 199.

¹⁴⁴⁹ Por. tamże.

jako „po prostu głupia”¹⁴⁵⁰. Pisze: „Wydaje się absurdalne, aby dzielić żyjący organizm, powiedzmy hipopotama lub chryzantemę, lub *Paramecium*, na części, które są »życiem« oraz »wszystko inne«, a co gorsza twierdzić, że »życie« jest zasadniczo tym samym u wszystkich organizmów, podczas gdy »wszystko inne« bywa różne. Z tego punktu widzenia jest nie do pomyslenia, aby określenia takie, jak »życie hipopotama« lub »życie chryzantemy« były zupełnie bez znaczenia, podobnie jak określenia »żyjący hipopotam« i »żyjąca chryzantema«. Jednak to właśnie wymiana rzeczownika i przymiotnika nie ma miejsca w pytaniu Schrödingera. To podejście reprezentuje zwrot, którego badacze nie lubią. Z jednej strony chcą wierzyć (dość głęboko, w rzeczywistości), że pozwala im to eksplorować ich dane do nie obserwowalnych gatunków; wierzyć, powiedzmy, że właściwości ich błon są właściwościami ogólnie prawdziwymi lub że ich dane pobrane od szczurów mogą zostać zastosowane do innych gatunków. Z innej strony uważają za niepokojące to, że systemy tak traktowane, zwłaszcza gdy ktoś mówi o błonie komórkowej, a nigdy jej nie widział, są jedynie fizyczno-matematyczną »abstrakcją«”¹⁴⁵¹. Zdaniem Rosena pytanie austriackiego fizyka jest jak powrót do platońskiego idealizmu, a przez to sytuuje się ono „kompletnie poza polem nauki”¹⁴⁵². Pytanie samo w sobie może być rozpatrywane jedynie w pewnym metaforycznym sensie, a nie brane na poważnie. Choć Rosen nie ma wątpliwości, że pytanie, co to jest życie, jest centralnym pytaniem, na którym opiera się biologia, uważa, że w imię ideału „obiektywności” należy je wyrugować z przestrzeni naukowej¹⁴⁵³. „Pytanie samo w sobie – pisze badacz – może być bez końca przeformułowywane, ale należy starać się wyeliminować je w imię pewnego ideału mechanistycznej »obiektywności«, bo jest bardziej subiektywne, niż ten ideał sam w sobie na to pozwala. Gdy uznamy pytania Schrödingera, które traktują o przymiotniku lub orzeczeniu jako rzeczy samej w sobie, już tworzymy nową fizykę. Bardziej formalnie stara fizyka spoczywa na dualizmie pomiędzy fazami i stanami, zmuszając do zmiany stanów, które powodują »zachowania« układu. Orzeczenia lub przymiotniki zazwyczaj odnoszą się do zachowań, które są tym, co na pierwszy rzut oka widzimy. Co więcej, nacisk jest kładziony na znaczne przekrzywienie kierunku, który nazwałem wewnętrznymi aspektami systemu (jak oddziałuje się na siły), kosztem jego aspektów grawitacyjnych (jak wywiera się siły).

¹⁴⁵⁰ Por. R. Rosen, *Essays on life itself*, Columbia University Press, New York 2000, s. 6.

¹⁴⁵¹ Tamże, s. 6–7.

¹⁴⁵² Por. tamże, s. 7.

¹⁴⁵³ Por. tamże, s. 25.

W biologii pokazane jest to w terminach problemów strukturalno-funkcjonalnych, gdzie struktura odnosi się do inercji, a funkcje do grawitacji”¹⁴⁵⁴.

Roger Penrose poświęcił swoją uwagę pytaniu, które Schrödinger poruszył pod koniec swojej publikacji, dotyczącemu bardzo dyskusyjnej kwestii – czy faktycznie musi być prawdą to, że prawa fizyki przewidziane przez standardową mechanikę kwantową są wystarczające do fizycznego wyjaśnienia życia¹⁴⁵⁵. Penrose przywołał sytuację inżyniera zaznajomionego wyłącznie z newtonowską mechaniką i ogólnymi zasadami statystyki, który spotyka się z silnikiem elektrycznym: „Bez jakiegokolwiek znajomości praw elektromagnetyzmu, jakimi uraczyli nas Faraday i Maxwell, taki inżynier nie miałby żadnego wytłumaczenia dla zachowania silnika, którego działanie ocierałoby się w jego oczach o magię. Trzeba jednak dodać, że prawa Faradaya i Maxwella są nadal matematycznymi prawami fizyki, wykraczającymi poza [...] całościowy schemat rzeczy określanych przez ogólne ramy newtonowskiej mechaniki i fizyki statystycznej”¹⁴⁵⁶. Na podobnej zasadzie Schrödinger stwierdził, że jest z pewnością możliwe, by nowe składniki fizyczne, wykraczające poza te znane fizyce XX wieku, mogły być potrzebne do pełnego zrozumienia fizycznych podstaw życia¹⁴⁵⁷. W opinii Penrose’a nie ma dziś wielu biologów, którzy opowiadaliby się za koniecznością istnienia takich składników w celu wyjaśnienia fenomenu życia.

Zauważono także wiele zapożyczeń w koncepcji życia Schrödingera. Max Delbrück w koncepcji genu jako kryształu aperiodycznego nie dostrzegł niczego oryginalnego, co zasługiwałoby na uwagę biologów: „Dyskusja prowadzi do koncepcji genu jako »kryształu aperiodycznego«. Nadano genom to zaskakujące miano odmienne niż aktualne: »skomplikowana molekula«, ponieważ autor chce podkreślić, po pierwsze, że stabilność genów to ten sam rodzaj, co stabilność kryształów, w których atomy składowe utrzymywane są razem przez wiązania walencyjne; po drugie, kryształy te należą do nowego rodzaju, niezbadanego wcześniej przez fizyków, którzy skupili swoją uwagę na kryształach periodycznych. Nie ma w tym stanowisku niczego nowego, a czytelnikom zajmującym się już biologią sugeruje się pominięcie tej części książki”¹⁴⁵⁸. Delbrück ma więc wątpliwości co do zasadności zastąpienia terminu „skomplikowana molekula” terminem „kryształ aperiodyczny”, gdyż przez to – jak twierdzi – sugeruje się nowy i niezbadany stan materii¹⁴⁵⁹.

¹⁴⁵⁴ Tamże, s. 25–26.

¹⁴⁵⁵ Por. R. Penrose, *Foreword*, s. viii.

¹⁴⁵⁶ Tamże, s. viii–ix.

¹⁴⁵⁷ Por. tamże, s. ix.

¹⁴⁵⁸ M. Delbrück, *What is life? and what is truth?*..., s. 371.

¹⁴⁵⁹ Por. tamże.

Hermann Joseph Muller w swojej recenzji zauważył, że „pierwsza próba” zmierzenia się z zawiłościami ówczesnej genetyki była w wykonaniu „mistrza fizyki” bardziej odtwórcza aniżeli twórcza¹⁴⁶⁰. Jego zdaniem praktycznie wszystko, o czym pisze w swej pracy Schrödinger, a co jest przedmiotem fascynacji wielu czytelników (między innymi że geny są tak małe, że ich mutacje są indywidualnym fenomenem kwantowym podległym nieoznaczoności i okazjonalnemu rozpraszaniu energii, że geny przez mechanizm ewolucyjny są układane w uporządkowany zbiór napędzający system zawierający geny oraz że mimo stałego rozpraszania energii mającego miejsce w świecie, zgodnie z drugą zasadą termodynamiki, organizmy mają tendencję do zyskiwania na „uporządkowaniu” lub „ujemnej entropii”), znane jest biologom. Jednak wielu z nich może być nieprzyzwyczajonych do fizycznej, bardziej precyzyjnej terminologii. Przykładowo biolodzy przywykli do mówienia o „energii potencjalnej” częściej aniżeli o „ujemnej entropii”. „Zwyczajowa koncepcja fizyków – pisze Muller – rozważa ilość energii jako »dostępną«, przeciwieństwo energii rozpraszanej w heterogeniczny sposób i nienadającej się do użytku w systemach molowych. Stąd [...], odnosi się do tego, o czym biolog mówi luźno »potencjalna energia chemiczna«”¹⁴⁶¹. Poza tym zdaniem Mullera biolodzy opisaliby fakt, że geny w zestawie chromosomów różnią się praktycznie całkowicie od siebie jako „kompleksowość”, a nie „aperiodyczność” chromosomów¹⁴⁶². W opinii Mullera użycie nowych terminów przez Schrödingera ma jedynie na celu przedstawienie zjawisk życiowych jako będących w kontraście do tych ze świata nieożywionego.

Max F. Perutz w pracy austriackiego fizyka wskazuje na brak oryginalności, widzi w niej jedynie nagłośnienie istniejących już hipotez¹⁴⁶³. Hipoteza jakoby gen był jak aperiodyczny jednowymiarowy kryształ jest zdaniem Perutza w istocie przeformułowaniem hipotezy Delbrücka, według której gen jest „polimerem, który powstaje przez repetycję identycznych struktur atomowych”¹⁴⁶⁴. Schrödinger stwierdza, że układy ożywione nie osiągają równowagi termodynamicznej definiowanej jako stan maksymalnej entropii; unikają tego, czerpiąc z ujemnej entropii. Perutz podejrzewa, że z kolei tę koncepcję zaczerpnął Austriak z wykładu Boltzmanna na temat drugiej zasady termodynamiki, wygłoszonego przed Imperial Austrian Academy of Sciences w 1886 roku¹⁴⁶⁵. Z kolei Franz Simon uświadamia Schrödingerowi

¹⁴⁶⁰ Por. H.J. Muller, *A physicist stands...*, s. 90.

¹⁴⁶¹ Tamże, s. 91–92.

¹⁴⁶² Por. tamże, s. 90.

¹⁴⁶³ Por. M. Perutz, *Erwin Schrödinger's 'What is life?'...*, s. 243.

¹⁴⁶⁴ Tamże, s. 240.

¹⁴⁶⁵ Por. tamże.

znaczenie energii swobodnej w rozważaniach dotyczących życia¹⁴⁶⁶. Austriacki fizyk odniósł się do tego zarzutu w drugim wydaniu swojej książki. Uświadomił sobie znaczenie energii swobodnej, ale uznał ją za zbyt trudny i mylący termin dla swoich czytelników-laików¹⁴⁶⁷. Argument ten zdaniem Perutza jest jednak bardzo niewiarygodny, ponieważ znaczenie entropii uważa z pewnością za trudniejsze do pojęcia¹⁴⁶⁸. Perutz zauważa, że kiedy Schrödinger pisał swoją książkę, wiadomo było, że podstawową właściwością energii chemicznej w żywych komórkach jest ATP i że zmagazynowana tam energia swobodna jest w większości entalpiczna. Austriacki fizyk nie usunął jednak tego rozdziału z późniejszych wydań swojej publikacji.

Zdaniem Evelyn Fox Keller spekulacje Schrödingera na temat podstaw życia zawarte w *What is life?* odzwierciedlają wiele idei, które sformułował wcześniej Muller¹⁴⁶⁹. Keller przekonuje, że – tak jak Muller – Schrödinger szybko zidentyfikował włókno chromosomów jako „najbardziej istotną części organizmu”, jako „materialny nośnik życia”¹⁴⁷⁰. Szukając klucza do zrozumienia struktury i mechanizmu genów, Schrödinger, podobnie jak Muller, zwrócił się w kierunku badań nad mutacją¹⁴⁷¹. Keller oczywiście dostrzega także różnice między Schrödingeringiem i Mullerem w spojrzeniu na fenomen życia. Język pierwszego różni się od języka drugiego, tak samo jak ich teoretyczne narzędzia: tam, gdzie jeden mówi o „kodzie” lub „zakodowanym scenariuszu”, drugi mówi o „wzorze”; gdzie jeden wskazuje na niezwykłą niezawodność „wytwarzania porządku z porządku” i uchylanie się od praw termodynamiki statystycznej, drugi wskazuje na mechanizmy autosyntezy i automatycznego przyciągania jako rdzenia dylematu życia¹⁴⁷². W opinii autorki szczegóły, jakie austriacki fizyk ma do zaoferowania w zakresie struktury genu, opierają się na zdyskredytowanej wcześniej pracy Delbrücka (w rzeczywistości opisaney przez samego Mullera)¹⁴⁷³. Zdaniem Keller argument Schrödingera wydaje się w istocie dążyć nie tyle do rozwiązania, co raczej odrzucenia wcześniejszych twierdzeń Bohra dotyczących nieodłącznej bariery poznania tajemnic życia, która wynikała z rozszerzenia zasady komplementarności. Ponadto zauważa ona, że Schrödinger nie tylko nie

¹⁴⁶⁶ Por. tamże, s. 241.

¹⁴⁶⁷ Por. tamże. Por. S. Carroll, *Nowa perspektywa. Pochodzenie życia, świadomości i wszechświata*, tłum. U. i M. Seweryńscy, Prószyński i S-ka, Warszawa 2017, s. 306.

¹⁴⁶⁸ M. Perutz, *Erwin Schrödinger's 'What is life?'...*, s. 241.

¹⁴⁶⁹ Por. E.F. Keller, *Physics and the emergence of molecular biology: a history of cognitive and political synergy*, „Journal of the History of Biology”, 3(23) (1990), s. 401.

¹⁴⁷⁰ Por. tamże.

¹⁴⁷¹ Por. tamże, s. 402.

¹⁴⁷² Por. tamże.

¹⁴⁷³ Por. tamże.

rozwiązuje problemu życia, ale paradoks, jaki identyfikuje jako leżący u podstaw tego problemu, skutecznie rozwikłał się w obliczu przyszłych dokonań¹⁴⁷⁴. Zdaniem badaczki nie można też uznać *What is life?* za źródło jakichkolwiek rzeczywistych projektów dalszych badań.

Narasimhaiengar Mukunda twierdzi, że to, co było prawdą w książce Schrödingera, nie było jego autorstwa, a większość tego, co pochodziło od niego, było uważane za nieprawdziwe nawet wówczas, gdy wychodziło spod jego pióra¹⁴⁷⁵.

Leah Ceccarelli podkreśla, że dzieło austriackiego fizyka nie prezentowało oryginalnej teorii ani nie dostarczało nowych eksperymentalnych danych na temat organizacji materii ożywionej¹⁴⁷⁶. Większość dzieła była parafrazą artykułu wydanego w 1935 roku przez Timofiejewa-Riesowskiego, Zimmera i Delbrücka¹⁴⁷⁷. Kilka ważnych idei zawartych w broszurze, które nie pochodzą z tego artykułu, było również rozwijanych przez innych badaczy¹⁴⁷⁸. Na przykład: *What is life?* porównywało materiał genetyczny do kodu Morse’a i z tego powodu wysnuło ważny pogląd o „kodzie” dziedzicznym. Co najmniej pięciu innych naukowców przed Schrödingerem użyło podobnego porównania. Podobnie idea mówiąca o tym, że wkrótce będzie możliwe rozwiązanie problemu kodowania i rozpoznania struktury genu, została po raz pierwszy sformułowana przez H.J. Mullera, a nie przez Schrödingera. Nawet sam pomysł napisania tekstu, który miałby zainspirować fizyków i biologów do wspólnej pracy nie powstał tylko w głowie Austriaka, ponieważ Muller sformułował podobną ideę w czasopiśmie „Scientific Monthly” w 1936 roku.

Zarzucano również Schrödingerowi ogólnikowość i powierzchowność w biologicznych analizach. Max Delbrück uważa stwierdzenie austriackiego fizyka – że procesy życiowe zależą od dostępności ujemnej entropii – za jedynie częściowy opis „sztuczek życia”¹⁴⁷⁹. Przekładając to na tradycyjną terminologię, precyzuje: żywa komórka korzysta ze specyficznych enzymów, a enzymy te promują wybiórczo niektóre z reakcji obejmujących wzrost wolnej energii. Schrödinger nie wraca w swojej późniejszej dyskusji do problemu tego, jak komórka omija statystyczne fluktuacje. Delbrück jest wyraźnie rozczarowany tym pominięciem. Zauważa również, że na początku

¹⁴⁷⁴ Por. tamże, s. 403. Por. E.F. Keller, *The century of the gene*, Harvard University Press, Cambridge 2000, s. 21–22.

¹⁴⁷⁵ Por. N. Mukunda, *Linking life to the quantum...*, s. 72.

¹⁴⁷⁶ Por. L. Ceccarelli, *Shaping science with rhetoric...*, s. 67.

¹⁴⁷⁷ Por. tamże, s. 67–68.

¹⁴⁷⁸ Por. tamże, s. 68.

¹⁴⁷⁹ Por. M. Delbrück, *What is life? and what is truth?...*, s. 371.

książki statystyczne fluktuacje reprezentowane są jako nieprzewidywalne trudności na drodze do fizycznego zrozumienia komórki, trudność ta jest jednak z upływem czasu zacierana. Jego zdaniem bez głębszego omówienia tego aspektu, zwłaszcza dla procesów enzymatycznych i niestabilnych gazów, argumenty książki tracą na sile.

John A.V. Butler w swej recenzji ubolewa, że w książce Schrödingera zabrakło rozważań nad tym, co sam Butler nazywa „najważniejszym problemem w chemii”, czyli nad strukturą białka¹⁴⁸⁰.

Linus Pauling, laureat Nagrody Nobla, podkreśla, że w ciągu ostatnich czterdziestu lat biologia została zrewolucjonizowana przez pojawienie się nowej dziedziny nazwanej biologią molekularną¹⁴⁸¹. Jej rozwój niemal w całości wynikał z wprowadzenia nowych idei do świata chemii, które były stymulowane mechaniką kwantową. W ocenie Paulinga w przeciwieństwie do fizyki (sformułowanie równania falowego było wielkim wydarzeniem¹⁴⁸²), za sprawą swojej dyskusji nad „ujemną entropią” w kontekście życia Schrödinger nie wniósł żadnego wkładu do biologii, a jeśli już, to tylko negatywny¹⁴⁸³. Pauling pisze: „W 1944 roku opublikowana została książka Schrödingera zatytułowana *What is life?* oparta na jego wykładach w Trinity College w Dublinie. Kiedy pierwszy raz – ponad 40 lat temu – przeczytałem tę książkę, byłem rozzarowany. Do dziś uważam, że Schrödinger nie przyczynił się w żadnym stopniu do rozwoju naszej wiedzy o życiu. Wielu biologów i fizyków, z którymi rozmawiałem, nie zgadza się z moją opinią. Kiedy pytam, czym Schrödinger przyczynił się do zrozumienia życia, każdy z nich odpowiada, że to on wykazał, iż życie jest ujemną entropią – że organizmy żywe wykorzystują entropię w sposób odmienny od materii nieożywionej. Nie miałem okazji przedyskutować tej kwestii z chemikiem fizycznym, osoby z dobrym zrozumieniem dzieła J. Willarda Gibbsa na temat termodynamiki chemicznej. Jestem pewien, że taka osoba stanęłaby po mojej stronie”¹⁴⁸⁴. Amerykański fizyk i chemik uważa, że rozważania jego austriackiego kolegi na temat termodynamiki są ogólnikowe i powierzchowne, i to do tego stopnia, że nie powinny być tolerowane nawet w popularnym wykładzie¹⁴⁸⁵. Podkreśla, że przy omawianiu termodynamicznych ilości ważne jest określenie układu. Schrödinger, w opinii Paulinga, nigdy tego nie robi, pisząc o entropii. „Raz zdaje się [Schrödinger] uznawać – pisze Ame-

¹⁴⁸⁰ Por. J.A.V. Butler, *Life and the second law...*, s. 153.

¹⁴⁸¹ Por. L. Pauling, *Schrödinger's contribution...*, s. 228.

¹⁴⁸² Por. tamże, s. 232.

¹⁴⁸³ Por. tamże, s. 228–229.

¹⁴⁸⁴ Tamże, s. 229.

¹⁴⁸⁵ Por. tamże.

rykanin – że system jest organizmem żywym, pozbawionym jakiejkolwiek interakcji z otoczeniem; innym razem jest to organizm żywy w równowadze termicznej z otoczeniem; jeszcze innym razem organizm żywy oraz otoczenie tworzą całość wszechświata. W pierwszym przypadku spontaniczny proces polega na konieczności zwiększenia entropii organizmu żywego; w drugim przypadku chodzi o zwiększenie entropii organizmu oraz jego otoczenia, gdzie entropia organizmu jest rosnąca albo malejąca; w trzecim przypadku mowa jest o zwiększeniu entropii wszechświata”¹⁴⁸⁶. Zdaniem Paulinga Schrödinger mógł omówić poikilotermiczny organizm otoczony w taki sposób, by mógł on znajdować się w stanie równowagi termicznej ze środowiskiem, lecz nie był w stanie wpływać na przenoszenie materii przez swoją „otoczkę”. Organizm będzie żył nadal przez jakiś czas, będąc poddawany różnym spontanicznym reakcjom. Wiadomo z zasad termodynamiki, że wolna energia organizmu koniecznie maleje. Pauling konkluduje, że nie można powiedzieć bez dalszego zagłębienia się w temat, czy jest to wzrost, czy spadek entropii organizmu.

Schrödinger omawiał problem entropia–życie w świetle istnienia kodu genetycznego¹⁴⁸⁷. Ogólne zasady dziedziczenia zostały wypracowane i uznano, że musi istnieć jakiś rodzaj kodu, prawdopodobnie liniowy układ „liter”. Pauling przypomina, że w czasie, gdy austriacki fizyk pisał swoją pracę, materiał genetyczny uważano bardziej za białko niż kwas nukleinowy z „literami” różnych reszt aminokwasowych w łańcuchu polipeptydowym stanowiącym gen. Przypomina także, że w tym czasie wiadomo już było, że białka zawierają długie łańcuchy polipeptydowe, czasami z setkami reszt aminokwasowych na łańcuch. Wiedziano także, że konkretne białko, takie jak ludzka hemoglobina, ma dobrze określoną sekwencję reszt aminokwasowych w swoich łańcuchach polipeptydowych. Łańcuch polipeptydowy o dowolnej sekwencji reszt aminokwasowych miałby (bez uwzględniania innych czynników) większą entropię, a tym samym większe prawdopodobieństwo niż łańcuch o dobrze sprecyzowanej sekwencji. Schrödinger sam wydaje się nad tym zastanawiać, pytając, jaki proces prowadzi do wytworzenia się polipeptydowych łańcuchów cechujących się niską entropią. Zdaniem Paulinga odpowiedź na to pytanie jest bardzo powierzchowna: stwierdza się jedynie, że organizm „czerpie z ujemnej entropii, przyciągając do siebie strumień ujemnej entropii”.

W ocenie amerykańskiego badacza prawdziwe pytanie o istotę życia, które Schrödinger pomija, to pytanie o to, jak osiągnąca jest biologiczna spe-

¹⁴⁸⁶ Tamże, s. 229–230.

¹⁴⁸⁷ Por. tamże, s. 230.

cyfika, czyli jak reszty aminokwasowe są organizowane w ściśle zdefiniowaną sekwencję charakterystyczną dla konkretnego organizmu¹⁴⁸⁸. Gen jest zdolny do powielania się, a także potrafi dokonywać bezpośredniej syntezy białka, za którą jest odpowiedzialny¹⁴⁸⁹. Z termodynamicznego punktu widzenia nie istnieje w tym kontekście żaden problem¹⁴⁹⁰. Pauling pisze: „Załóżmy, że w komórce znajduje się zbiornik z różnymi aminokwasami tak, że kondensacji w łańcuchach polipeptydowych towarzyszy spadek swobodnej energii, niezależnie, czy sekwencja jest zorganizowana, czy nie. Naturalną właściwością enzymów jest zdolność do znacznego przyspieszania reakcji; ponadto mogą one być wysoce specyficzne, zdolne do rozróżnienia jednego aminokwasu od innego. Nie wydaje się dziwne, że gen może dostarczać informacji, aby umożliwić syntezy repliki samego siebie, jak również w celu umożliwienia syntezy danego łańcucha polipeptydowego z konkretnych reakcji przyspieszonych przez konkretny enzym. Produkt ma oczywiście mniejszą entropię od podobnego produktu o sekwencji losowej. Większe znaczenie ma tu więc coś znajdującego się wewnątrz komórki niż ujemna wartość pochodząca spoza niej”¹⁴⁹¹.

Peter A. Corning podkreśla, że Schrödinger podjął próbę zbadania tytułowego pytania swojej pracy z bardzo zawężonej perspektywy, przedstawiając redukcjonistyczne twierdzenie o tym, co uważał za najważniejszą właściwość fizyczną życia, a mianowicie jego termodynamiczne podłoże¹⁴⁹². W innym artykule, napisanym wspólnie z Stephenem J. Kline, Corning rozwija swoją krytyczną uwagę pod adresem koncepcji życia fizykanoblisty, w szczególności twierdząc, że przez lata wielokrotnie cytowana poetycka metafora Schrödingera: „organizmy żywią się ujemną entropią” w rzeczywistości mogłaby zostać uznana za „absurd”¹⁴⁹³. Prowadzi ona bowiem do redukcji złożoności organizmów żywych do monolitycznych procesów termodynamicznych i zrównuje porządek termodynamiczny z organizacją funkcjonalną. Tymczasem ta ostatnia jest celowym projektem adaptacyjnym występującym w wielkiej różnorodności specyficznych środowisk, włączając w to znaczną ilość rozmaitych reżimów energetycznych i poziomów organizacyjnych. W rezultacie Schrödinger zdaniem przywoływanych

¹⁴⁸⁸ Por. tamże.

¹⁴⁸⁹ Por. tamże, s. 230–231.

¹⁴⁹⁰ Por. tamże, s. 231.

¹⁴⁹¹ Tamże.

¹⁴⁹² Por. P.A. Corning, *What is life? Among other things, It's a synergestic effect!*, „Cosmos and History: The Journal of Natural and Social Philosophy”, 1–2(4) (2008), s. 233.

¹⁴⁹³ Por. P.A. Corning, S.J. Kline, *Thermodynamics, information and life revisited, part I...*, s. 277.

badaczy sprowadził wyzwania związane z organizacją fizyczną, samorozwojem, samokontrolą i reprodukcją do pojedynczego parametru, wypaczając tym samym zasadniczą naturę procesów ewolucyjnych. W oczach Corninga i Kline’a metafora Schrödingera stanowi również pewnego rodzaju karykaturę energetyki układów ożywionych, która wykształciła pomysłowe i wysoce efektywne mechanizmy pochłaniania i pozyskiwania dostępnej energii w różnych formach, a następnie wykorzystywania jej dla rozmaitych celów, poczynając od wykonywania pracy, a kończąc na budowaniu¹⁴⁹⁴. Ich zdaniem stwierdzeniem dużo bardziej zbliżonym do prawdy byłoby zdanie, że organizmy żywią się dostępną energią i tworzą porządek termodynamiczny, strukturalny i funkcjonalny (zamiast twierdzenia sformułowanego przez Austriaka, że żywią się one porządkiem). Poza tym, jak podkreślają Corning i Kline, wspomniana hipoteza Schrödingera jest niemożliwa do przetestowania, jako że jego definicje entropii i ujemnej entropii mają formę okrężną i nie posiadają żadnego odniesienia empirycznego. „W takim kontekście nie mamy pojęcia, w jaki sposób dokonać pomiarów którejkolwiek z nich, nie ma to bowiem nic wspólnego z pomiarem gradientu temperatury cząsteczek gazu w zdefiniowanym układzie”¹⁴⁹⁵ – konkludują Corning i Kline.

Paul Davies wspomina, że – zastanawiając się nad tajemnicą pochodzenia życia – bezskutecznie szukał odpowiedzi w książce Schrödingera. Píše: „Choć praca Cartera daje do myślenia, nadal pozostawiła ona tajemnicę życia nierozwikłaną. Krótco po jej przeczytaniu, dostałem posadę jako pracownik naukowy w Instytucie Astronomii Teoretycznej w Cambridge, gdzie dyrektorem był Fred Hoyle i gdzie zatrudnienie znajdował także Brandon Carter. W tym czasie natrafiłem przypadkiem na małą książeczkę fizyka Erwina Schrödingera, noszącą tytuł *What is life?*, która wydawała się odnosić bezpośrednio do mojego problemu i dążyła do wyjaśnienia, dlaczego organizmy biologiczne wydają się tak tajemnicze z punktu widzenia fizyki. Dowiedziałem się później, że książka ta zdążyła już 20 lat wcześniej wywrzeć ogromny wpływ na pionierów biologii molekularnej. Niestety, książka Schrödingera powodowała więcej pytań niż odpowiedzi i dlatego wrzuciłem problem biogenezy do mojego mentalnego koszyka z napisem »zbyt trudne«”¹⁴⁹⁶.

Gunther Stent podkreśla, że w czasie gdy książka była pisana, wiedza Schrödingera na temat stanu genetyki była przestarzała¹⁴⁹⁷. W jego opinii

¹⁴⁹⁴ Por. tamże.

¹⁴⁹⁵ Tamże.

¹⁴⁹⁶ P. Davies, *The fifth miracle...*, s. 15.

¹⁴⁹⁷ Por. tamże, s. 5.

Schrödinger raczej nie wiedział o powstaniu genetyki biochemicznej w drugiej połowie lat trzydziestych XX wieku, a zatem nie wspominał o głównej doktrynie tej ery, teorii „jeden gen – jeden enzym”, która miała przygotować drogę dla genetyki molekularnej. Kolejny dowód na nieaktualność tez zawartych w *What is life?* Stent dostrzega w nacisku na muszkę owocową *Drosophila melanogaster* jako główny obiekt badań genetycznych, którego hegemonia wówczas już ustępowała mikroorganizmom, zwłaszcza formie *Neurospora*. Zauważa także lukę w informacjach Schrödingera, a jest nią fakt, że nie wiedział, iż przez ostatnie pięć lat Delbrück, którego model genowy od początku zdawał się stanowić inspirację dla książki Schrödingera, pracował już przy wirusach bakteryjnych – materiale eksperymentalnym, który miał posłużyć do odpowiedzi na postawione pytania.

Lenny Moss sugeruje, że chociaż wizja Schrödingera zawarta w *What is life?* jest niezwykle atrakcyjna, to opiera się jednak tylko na hipotetycznych założeniach¹⁴⁹⁸. Zdziwienie Mossa budzi to, iż próba podejścia Schrödingera do poszerzenia pojęcia entropii fizycznej dla opisu organizacji biologicznej została oparta na niezmiennionej, strukturalnej koncepcji entropii, a nie na jej przeformułowaniu i uogólnieniu w kategoriach informacji¹⁴⁹⁹. Zaznacza, że to rozszerzenie teorii termodynamiki było wówczas podejmowane przez matematyków z MIT Norberta Wienera¹⁵⁰⁰ i Claude’a E. Shannona. Co więcej, z opublikowanych prac i notatników z późniejszego okresu kariery naukowej Schrödingera Moss wnioskuję, że ta linia rozwoju teoretycznego nigdy go nie interesowała.

Narasimhaiengar Mukunda krytykuje Schrödingera za to, że jego wiedza o genetyce pochodziła z bardzo nielicznych źródeł¹⁵⁰¹. Poza tym, w jego opinii, austriacki fizyk mocno zawęził swoje pole widzenia głównie do problemu replikacji i unikał łączenia jej z metabolizmem lub pytaniem, jak powstało życie. Krytykuje Schrödingera również za to, że wyraził swoje poglądy ogólnikowo, a także nie podążył za tym, co sam rozpoczął, a zamiast tego obrócił swoje zainteresowanie w innym kierunku¹⁵⁰².

¹⁴⁹⁸ Por. L. Moss, *What genes can't do*, s. 61.

¹⁴⁹⁹ Por. E. Yoxen, *Where does Schrödinger's...*, s. 24.

¹⁵⁰⁰ Wiener o organizacji przejawianej przez istoty żywe mówi jako o „enklawie wzrastającego stopnia organizacji”. Pisz: „Podczas gdy świat jako całość [...] ma tendencję niwelowania różnic, to istnieją lokalne enklawy, w których panuje tendencja przeciwna, a mianowicie ograniczona i czasowa skłonność do wzrastania stopnia organizacji. Życie znajduje swój dom w niektórych spośród takich enklaw”. N. Wiener, *Cybernetyka i społeczeństwo*, tłum. O. Wojtasiewicz, Książka i Wiedza, Warszawa 1960, s. 11.

¹⁵⁰¹ Por. N. Mukunda, *Linking life to the quantum...*, s. 72.

¹⁵⁰² Por. tamże.

André Pichot podkreśla, że wiedza biologiczna Schrödingera jest powierzchowna i fragmentaryczna, a także że Austriak zapomina o enzymach czy pomija mapy chromosomowe¹⁵⁰³. Utrzymanie i rozwój organizacji biologicznej Schrödinger wyjaśnia, twierdząc, że organizm posila się ujemną entropią, którą wydobywa z układu środowiska zewnętrznego¹⁵⁰⁴. Pichot uważa że to wyjaśnienie jest pobieżne i że fizyk-noblista ogranicza się do stwierdzenia, że strukturyzacja i utrzymywanie się organizmu żywego nie naruszają praw fizyki, ale nie podaje nam wyjaśnienia tego zjawiska. Stwierdza: „Trywialnie można by powiedzieć że żyjemy, ponieważ jemy oraz jemy, ponieważ żyjemy. Nikt nie widział nigdy przedmiotu nieożywionego lub trupa, który by się pożywiał. Odżywianie się jest niewątpliwie jednym z warunków życia, lecz nie jest wystarczające i przede wszystkim nie polega na pasywnym przyjmowaniu pożywienia. Jest to proces aktywny wzmacniający często nachylenie ku równowadze termodynamicznej. Jedynie organizmy ożywione pożywiają się i możemy to jedynie wytłumaczyć przez fakt, że żyją. Oznacza to, że wyjaśnienie Schrödingera zatacza koło: układy ożywione utrzymują swoją organizację, żywiąc się ujemną entropią, zatem pożywiają się jedynie dlatego, że są żywe”¹⁵⁰⁵. W ocenie Pichota Schrödinger miał trudność w wyjaśnieniu sposobu, według którego układ materiału genetycznego mógłby kierować organizacją bytu ożywionego¹⁵⁰⁶.

Przedmiotem dyskusji były również możliwe powiązania poglądów biologicznych Schrödingera z odnośnymi poglądami Bohra i Delbrücka. Andrew T. Domondon zauważa, że dla wielu naukowców i historyków nauki pierwszą postacią, która przychodzi im do głowy, gdy poprosimy o wymienienie fizyka wnoszącego największy wkład do rozszyfrowania organizacji życia w XX wieku, z całą pewnością jest Schrödinger¹⁵⁰⁷. Domondon uważa, że taka opinia jest w dużej mierze zasługą pracy *What is life?* austriackiego fizyka. Bardzo kuszące jest, by postrzegać Schrödingera jako kolejnego rekruta „ataku” fizyków na problemy biologiczne, ataku zapoczątkowanego przez Bohra i widocznego w pracy Delbrücka. Domondon sugeruje jednak, że postrzeganie „ataku” fizyków na problemy biologiczne jako „ataku zjednoczonego” w swojej orientacji metodologicznej jest problematyczne, nawet w przypadku Bohra i Delbrücka. Nie inaczej jest w przypadku Schrödingera, którego poglądy różniły się znacznie od poglądów wymienionych wcześniej naukowców.

¹⁵⁰³ Por. A. Pichot, *Histoire de la notion de gene*, s. 178.

¹⁵⁰⁴ Por. tamże, s. 192.

¹⁵⁰⁵ Tamże, s. 192–193.

¹⁵⁰⁶ Por. tamże, s. 198.

¹⁵⁰⁷ Por. A.T. Domondon, *Bringing physics...*, s. 446.

Różnica leży zdaniem przywoływanego autora w samym rozumieniu paradoksu życia¹⁵⁰⁸. Dla Delbrücka paradoks miał być dopiero odkryty. To odkrycie kierunkowało przebieg badań niemieckiego fizyka. Dla kontrastu, Schrödinger wierzył, że ma w swoich rękach już wystarczająco dobrze postawiony paradoks. Dla austriackiego fizyka paradoksem było to, jak poszczególne cechy mogą być przekazywane z pokolenia na pokolenie z tak wysoką wiernością, biorąc pod uwagę termodynamiczny szum na poziomie molekularnym. Zastanawiał się, jak osobliwe zniekształcenie dolnej wargi u kilku członków dynastii Habsburgów mogło być przekazywane przez kolejne stulecia. To pytanie – jak twierdzi Domondon – streszcza centralny problem, jaki Schrödinger próbował rozwikłać w swoim dziele¹⁵⁰⁹.

Według Domondona Schrödinger różnił się od Delbrücka i Bohra w ocenie tego, jakie zasady mogą być kluczowe w odniesieniu do zjawiska życia¹⁵¹⁰. W szczególności różnił się od nich swoim postrzeganiem znaczenia zasady komplementarności. Niezależnie od tego, czy Delbrück zrozumiał oryginalny pogląd na komplementarność Bohra poprawnie, Domondon nie ma wątpliwości, że niemiecki fizyk widział tę kategorię jako kluczowe pojęcie w wyjaśnianiu zjawisk biologicznych. Dla kontrastu, Schrödinger przywiązywał bardzo małą wagę do komplementarności. Uznał, że nieokreśloność kwantowa nie odgrywa praktycznie żadnej roli w wyjaśnieniu problemu życia. Podobnego do Domondona zdania jest Nils Roll-Hansen, który twierdzi, że Schrödinger trzymał się realnego rozumienia jednostek teoretycznych, pomimo iż dystansował się od całkowicie mechanistycznego postrzegania świata¹⁵¹¹.

Chociaż Schrödinger krytykował poglądy Bohra na komplementarność, zdaniem Domondona i Roll-Hansena sam był subskrybentem interpretacji świata, która była nie mniej tajemnicza. W czasach studenckich jego biologiczne spojrzenie na świat zostało zainspirowane książką Richarda Semona *Die Mneme als erhaltendes Prinzip* (Mnem jako zasada zachowania), która zawierała mieszankę ewolucji Darwina i dziedzictwa psycholamarkowskiego¹⁵¹². Źródłem ogólnego duchowego porządku była dla niego indyjska filozofia Vendanty. Na ostatnich stronach *What is life?* sugeruje on, że oparta na Vedancie indyjska filozofia może zapewnić ramy dla zrozumienia pozornie sprzecznych wyników fizyki kwantowej¹⁵¹³. Pomimo niewątpliwego zainte-

¹⁵⁰⁸ Por. tamże.

¹⁵⁰⁹ Por. tamże, s. 447.

¹⁵¹⁰ Por. tamże.

¹⁵¹¹ Por. N. Roll-Hansen, *The application of complementarity...*, s. 425.

¹⁵¹² Por. tamże.

¹⁵¹³ Por. A.T. Domondon, *Bringing physics...*, s. 447.

resowania Schrödingera filozofią indyjską, błędem jest (jak twierdzi Domondon) przypuszczenie, że odegrała ona rolę w jego światopoglądzie analogiczną do roli komplementarności w światopoglądach Bohra i Delbrücka. Autor ten podkreśla, że Schrödinger robi odniesienia do filozofii indyjskiej tylko na kilku ostatnich stronach swojej książki. Główną perspektywą filozoficzną, dominującą w większej części pracy, jest determinizm lub raczej chęć jego ratowania. Austriacki fizyk był sojusznikiem Einsteina w słynnych debatach Bohr–Einstein nad statusem determinizmu w mechanice kwantowej, chociaż w jego biologicznych pismach również się on przejawia. Schrödinger mówi o możliwości utrzymywania się różnych poziomów determinizmu, klasycznego lub statystycznego¹⁵¹⁴. W ocenie Domondona wiele z przykładów, jakie Schrödinger przytacza w swojej pracy, jak choćby zegar mechaniczny, przywołują klasyczny, deterministyczny obraz wszechświata. Domondon zauważa też, że fizyk korzysta z tych przykładów do tego stopnia, że nawet wtedy, gdy odwołuje się do sił termodynamicznych, ich efekty nie są wystarczająco silne, by powstrzymać go od myślenia o przedmiotach bez wykorzystania klasycznych terminów. Zobowiązanie Schrödingera wobec determinizmu Domondon dostrzega również w sugestii, że istnieje „zakodowany scenariusz” zawierający program życia. Austriacki fizyk rozważa możliwość istnienia sił termodynamicznych uszkadzających „zakodowany scenariusz”, jak to uczynił w przypadku zegara. Dla Domondona interesujące jest to, w jaki sposób Schrödinger rozwiązuje ten problem: sugeruje, że „zakodowany scenariusz” składa się z kryształów aperiodycznych zaproponowanych przez Delbrücka, a to dlatego, że siły Heitlera-Londona w ciałach stałych są wystarczająco silne, aby wytrzymać termodynamiczny szum na poziomie molekularnym. Dla Schrödingera „zakodowany scenariusz” jest „chroniony przez teorię kwantów”. W rzeczywistości wyklucza wszystkie inne wyjaśnienia jego stabilności. „To, czym wyróżnia się ta sugestia – pisze Domondon – jest odzwierciedlanie próby Schrödingera pomieszczenia ustaleń mechaniki kwantowej w obrazie klasycznego determinizmu. To kontrastuje z poglądami Delbrücka, który wierzył, że mechanika kwantowa zmusza nas, aby zmienić radykalnie obraz wszechświata, zwłaszcza w odniesieniu do zrozumienia zjawisk życiowych. Schrödinger sugeruje jednak, że model kwantowy leży u podstaw modelu świata, który jest w zasadzie deterministyczny. [...] Dla Schrödingera zakodowany scenariusz może przyjmować formę aperiodycznego kryształu, ale to, co reprezentuje, jak czyniono aluzję w odniesieniu do Laplace’a, to powrót do klasycznego deterministycznego poglądu na świat”¹⁵¹⁵.

¹⁵¹⁴ Por. tamże, s. 448.

¹⁵¹⁵ Tamże.

Kolejną kwestią, w jakiej Schrödinger różnił się od Bohra i Delbrücka (i na którą zwraca uwagę Domondon) jest to, w jaki sposób myślał on o drodze do zrozumienia fenomenu życia¹⁵¹⁶. Bohr wyraźnie dystansował się od chemii; Delbrück w pewnym (mniejszym) stopniu też. Biorąc pod uwagę stan fizyki jako najbardziej prestiżowej nauki w pierwszej połowie XX wieku, można (jak twierdzi Domondon) pokusić się o stwierdzenie, że Schrödinger również podzielał niską ocenę chemii¹⁵¹⁷. Z taką interpretacją nie do końca zgadza się Roll-Hansen¹⁵¹⁸. W opinii tego autora austriacki fizyk z jednej strony zdaje się odrzucać tradycyjną analizę chemiczną jako możliwą ścieżkę rozwoju, twierdząc, że chemia nie była w stanie dostarczyć dokładnego zrozumienia wyników ostatnich badań genetycznych¹⁵¹⁹. Z drugiej strony można odczytać z jego pracy przeciwny pogląd, który zamieścił na początku, że chemicy zbliżali się do zrozumienia życia bardziej niż fizycy, ponadto nie był optymistą co do wizji, że fizycy wkrótce dokonają ważnego wkładu w wyjaśnianie fenomenu życia¹⁵²⁰.

Domondon zauważa również, że Schrödinger sugerował możliwość pojawienia się nowych praw w wyniku badania życia, ale różnił się od Bohra i Delbrücka w ocenie tego, jakiego rodzaju prawa mogą to być¹⁵²¹. Z jednej strony odrzucał perspektywę witalistyczną i popierał pogląd, że klucz do zrozumienia zjawisk życiowych spoczywa (jak sugerowali również Bohr i Delbrück) w budowie organizmu (to jest jego organizacji). Z drugiej strony różnił się od obydwo, bo chociaż podzielał pogląd Delbrücka, że badanie organizmów żywych ma potencjał odsłonięcia nowych praw fizycznych, nie postrzegał badań biologicznych jako generujących rodzaj kryzysu, jak głosił niemiecki fizyk¹⁵²². Schrödinger twierdził raczej, że wszelkie nowe prawa, które mogą być wykryte, nie byłyby zupełnie obce znanym prawom fizyki lub całkowicie z nimi nie korespondowały¹⁵²³. W rzeczywistości w artykulacji prawa z „porządku do porządku” widział nowe zasady konieczne do opisywania uporządkowania istot żywych, a nie było to „nic innego niż zasady teorii kwantów od nowa”. W opinii Domondona, o ile Schrödinger wierzył, że nowe zasady (które mogłyby zostać odkryte przez badania biologiczne) miałyby odniesienie w kategoriach znanych praw fizycznych, o tyle zdawał

¹⁵¹⁶ Por. tamże.

¹⁵¹⁷ Por. tamże, s. 448–449.

¹⁵¹⁸ Por. N. Roll-Hansen, *The application of complementarity...*, s. 425.

¹⁵¹⁹ Por. tamże, s. 426.

¹⁵²⁰ Por. A.T. Domondon, *Bringing physics...*, s. 449.

¹⁵²¹ Por. tamże.

¹⁵²² Por. tamże, s. 449–450.

¹⁵²³ Por. tamże, s. 450.

się podzielać pogląd Bohra, że znane prawa dotyczące materii nieożywionej powinny być nie mniej skuteczne w odniesieniu do materii ożywionej. Zasadniczą różnicę między Schrödingerem i Bohrem Domondon widzi w ich odmiennym rozumieniu tego, jak znane prawa fizyki (zwłaszcza mechaniki kwantowej) mogą być stosowane w odniesieniu do fenomenu życia. Bohr postrzegał życie w kategoriach mechaniki kwantowej, a dokładniej – widział zjawisko życia jako rodzaj makroskopowego zjawiska kwantowego, które jest najlepiej rozumiane przez pryzmat komplementarności. Dla Schrödingera fenomen życia mógł być rozumiany wykorzystując klasyczną terminologię. To nie znaczy, że austriacki fizyk odmawia znaczenia mechanice kwantowej. W rzeczywistości, aby wyjaśnić, dlaczego zegar może być rozumiany przez klasyczną dynamikę pomimo obecności termodynamicznego szumu, podkreśla znaczenie kwantowego charakteru mechanicznych wiązań w stałych materiałach w zegarze.

Z kolei Roll-Hansen podkreśla, że chociaż Schrödinger uważał możliwe użycie „innych praw fizyki” do przyszłego wyjaśnienia genetyki, to jednak nie zakładał, że to zaangażowanie fizyki będzie miało rewolucyjny charakter¹⁵²⁴. Nowe prawa byłyby „integralną częścią” fizyki, tak jak stare prawa. Co więcej, w opinii Roll-Hansena austriacki fizyk przez „prawa”, ale nie w dosłownym sensie logicznego empiryzmu (nie reprezentowały uniwersalnych regularności w obserwowanych zjawiskach), rozumiał ogólne struktury i zwykłe mechanizmy. „Pogląd Schrödingera na nową fizykę – pisze Roll-Hansen – nie był tak romantyczny z natury jak pogląd Bohra i jego zwolenników, jednakże nie uratowało go to przed podobnie błędną oceną potencjału chemii w wyjaśnieniu dziedziczności biologicznej”¹⁵²⁵.

Różnicę w ocenie rzeczywistości Schrödingera oraz Bohra i Delbrücka Domondon rozumie jako rezultat ich różnych ocen charakteru i innej oceny znaczenia mechaniki kwantowej¹⁵²⁶. Bohr i Delbrück przykładali wielką wagę do nieprzyczynowego i holistycznego charakteru mechaniki kwantowej. Interpretacja jej cech doprowadziła ich do przekonania, że była ona również idealną perspektywą do badania pozornie nieklasycznego charakteru życia. W przeciwieństwie do nich Schrödinger podkreślał wielką wagę, jaką posiadała mechanika kwantowa w odniesieniu do stabilności wiązania chemicznego. „Nic dziwnego – konkluduje Domondon – że ten aspekt mechaniki kwantowej stanowił centralny punkt jego [Schrödingera] odniesienia do tego, dlaczego makroskopowe zjawiska mogą być traktowane w kategoriach

¹⁵²⁴ Por. N. Roll-Hansen, *The application of complementarity...*, s. 426.

¹⁵²⁵ Tamże.

¹⁵²⁶ Por. A.T. Domondon, *Bringing physics...*, s. 450.

klasycznych, mimo że nieklasyczne efekty są obecne na poziomie mikroskopowym”¹⁵²⁷.

Warto na koniec tej części rozważań postawić pytanie: co zawdzięczamy wspomnianym fizykom: Schrödingerowi, Bohrowi i Delbrückowi? Zdaniem autora niniejszej rozprawy w stosunku do pierwszych okresów mechanicyzmu omawiani fizycy wiedzieli, że sam mechanicyzm nie sprosta współczesnemu rozwojowi badań nad życiem. Nie rozwiązaliśmy problemów związanych z życiem, odwołując się do doktryny mechanistycznej. Można zaryzykować stwierdzenie, że wspomniani fizycy „rozmiękczyli” Laplace’owski deterministyczny mechanicyzm, przekształcając go w formę mniej radykalną.

4.2. DYKUSJA NAD WPŁYWEM *WHAT IS LIFE?* SCHRÖDINGERA NA PRZEDMIOT I PROFIL BADAŃ PRZYRODNIKÓW

W poprzednim rozdziale przedstawiono „schrödingerowską” i „poschrödingerowską” perspektywę w rozwoju biologii molekularnej. Różni autorzy podejmują próbę odpowiedzi na pytanie: jak znaczący był wpływ biologicznych idei Schrödingera na przedmiot i profil badań konkretnych badaczy. W opinii wielu autorów seria wykładów wygłoszonych w Dublinie w 1943 roku oraz oparta na nich książka, w przeciwieństwie do wykładu Bohra i bazującej na nim publikacji *Light and life*, spełniały funkcję magnesu przyciągającego do biologii wielu fizyków i chemików. Na wpływ *What is life?* nie pozostali też obojętni sami biolodzy. Chociaż wiele z idei zawartych w tej pracy nie jest oryginalnych, a niektóre z nich rozmiągają się z prawdą, bez wątpienia książka miała wpływ na kluczowych twórców biologii molekularnej¹⁵²⁸. Ze wszystkich spostrzeżeń i prognoz przypisywanych Schrödingerowi najważniejsze są te, które sprawiły, że okrzyknięto go „protoplastą kodu genetycznego” i „prorokiem informacyjnej biologii molekularnej”¹⁵²⁹. Praca, wprowadzając do biologii pojęcie kodu genetycznego oraz aperiodyczne struktury materiału genetycznego, oddziaływała na badania nad termodynamiką układów otwartych oraz wyjaśnienia sposobu kontroli miliar-

¹⁵²⁷ Tamże.

¹⁵²⁸ Por. K. Hussey, *Schrödinger’s contributions...*, s. 20. Por. B. Weber, *Life*. Por. K.R. Dronamraju, *Erwin Schrödinger and the origins of molecular biology*, s. 1071. Por. J.C. Kendrew, *How molecular biology started* [w:] J. Cairns, G.S. Stent, J.D. Watson (eds), *Phage and the origins...*, s. 343.

¹⁵²⁹ Por. L.E. Kay, *Who wrote the book of life?...*, s. 59.

dów reakcji prowadzących do uformowania się dojrzałego organizmu przez informację genetyczną w pojedynczej komórce¹⁵³⁰. Lista tych, którzy potwierdzili znaczący wpływ tej publikacji obejmuje: Seymoura Benzera, Francisa Cricka, George'a Gamowa, Alfreda Hersheya, Salvadora Lurię, Gunthera Stenta, Jamesa Watsona i Maurice'a Wilkinsa. Publikacja austriackiego fizyka natychmiast stała się symbolem transferu nowych pojęć fizyki do biologii¹⁵³¹. Schrödinger sugerował, że mechanika kwantowa będzie w stanie wyjaśnić kwestie mechanizmów dziedziczenia¹⁵³². Jego badania często były przedstawiane jako pierwszoplanowe w warunkach powojennego rozwoju biologii¹⁵³³, mimo to dyskutuje się, na ile zbiór spekulacji, pojęć i metafor wywodzących się z książki Schrödingera był ważnym impulsem dla powstania biologii molekularnej¹⁵³⁴.

Robert Olby przekonuje, że wpływ Schrödingera na powstanie biologii molekularnej nie był aż tak duży, jak by się mogło niektórym wydawać. Nieliczni biolodzy, chemicy i fizycy, z których część zainspirował Schrödinger, wzięli udział w kursach biologii fagowej prowadzonych w stacji badawczej Cold Spring Harbor¹⁵³⁵. Określano ich jako członków „Grupy Fagowej”, której głównym celem była analiza uniwersalnego fenomenu życia, to jest replikacji genetycznej, w jej najprostszej z możliwych form, a co za tym idzie, odkrycie paradoksalnych mechanizmów umożliwiającym cząsteczkom odtwarzanie się z tak niezwykłą dokładnością. Członkowie „Grupy Fagowej” wierzyli, że tak dokładny proces kopiowania cząsteczek musi wiązać się z działaniem nieznanych jeszcze praw fizyki. „Jednakże – pisze Olby – nie doszukano się żadnych paradoksów. Wręcz przeciwnie, okazało się, że proces replikacji DNA jest zależny od tradycyjnych praw fizyki i chemii strukturalnej, co doprowadziło do powstania czysto molekularnej

¹⁵³⁰ Por. N. Symonds, *Schrödinger and Delbrück...*, s. 232. Schrödinger miał nadzieję, że rozwiązanie tego problemu spowoduje konieczność wprowadzenia nowych praw fizyki. Por. tamże, s. 32.

¹⁵³¹ Por. A. Jogalekar, *Physicists in biology...*

¹⁵³² Por. M. Morange, *A history of molecular biology*, s. 73. Por. A. Jogalekar, *Physicists in biology...*

¹⁵³³ Por. N. Williams, *Irene Manton, Erwin Schrödinger...*, s. 2.

¹⁵³⁴ Por. H.U. Gumbrecht, *The sustainability of Erwin Schrödinger's thought* [w:] H.U. Gumbrecht, R.P. Harrison, M.R. Hendrickson, R.B. Laughlin, *What is life? The intellectual...*, s. 1. Por. S. de Chadarevian, *Designs for life: molecular biology after World War II*, Cambridge University Press, Cambridge 2003, s. 51.

¹⁵³⁵ Por. R. Olby, *The path to the double helix...*, s. 225. Por. Seymour S. Cohen (wbrew temu co twierdzi Olby) uważa, że książka Schrödingera poświęcona biologii nie wpłynęła w znaczący sposób nawet na rozwój wczesnych prac nad fagami. Por. S.S. Cohen, *The origins of molecular biology. Review: 'The path to the double helix', by R. Olby*, „Science”, 187 (1975), s. 828.

larnego opisu tego procesu”¹⁵³⁶. Przekonaniu, że „Grupa Fagowa” dała początek biologii molekularnej, mają zaprzeczać prace grupy krystalografów założonej przez Williama Thomasa Astbury’ego, Johna Desmonda Bernala i ich uczniów¹⁵³⁷. „Czyż nie zajmowali się oni biologią molekularną? A może grupa ta upozorowała swoje powiązania z »Grupą Fagową«”, której podejście do biologii molekularnej w znacznej mierze różniło się od ich własnego podejścia, rozpoznawalnego pod nazwą »szkoły informacyjnej« (ang. *Informational School*)?”¹⁵³⁸ – pyta retorycznie Olby. Wspomniana „szkoła informacyjna”, która przeszła przez kilka etapów rozwoju: romantyczny (1935–1953), dogmatyczny (1954–1962) i akademicki (1963 do dziś)¹⁵³⁹, pozostawała po wieloma względami w opozycji do „szkoły strukturalnej”¹⁵⁴⁰. Olby szczegółowo omawia różnice pomiędzy tymi dwiema szkołami, wynikające z różnych wpływów, które przede wszystkim zainspirowały fizyków do zajęcia się problematycznymi kwestiami w biologii¹⁵⁴¹. Jednym z nich była chęć zastosowania tradycyjnych reguł fizyki do biologii, drugim – odkrycie nowych praw. Członkowie „szkoły informacyjnej”, której czołowym działaczem był Delbrück, opowiadają się za poglądem głoszącym, że

¹⁵³⁶ R. Olby, *The path to the double helix...*, s. 225.

¹⁵³⁷ Por. tamże, s. 225–226.

¹⁵³⁸ Tamże, s. 226. G.E. Allen twierdzi, że – historycznie rzecz ujmując – trzy nurty intelektualne uformowały obecną biologię molekularną: 1. strukturalny: zajmujący się architekturą molekuł biologicznych, 2. biochemiczny: zajmujący się interakcją molekuł biologicznych w metabolizmie komórki oraz dziedzicznością i 3. informacyjny: zajmujący się sposobem przenoszenia informacji z jednej generacji organizmów do następnej, oraz sposobem, w jaki ta informacja przekłada się na unikalne molekuły biologiczne. Podejście strukturalne skupia się w szczególności na trójwymiarowych problemach, kształtach molekuł oraz w pewnym zakresie tym, jak kształt wpływa na nadanie określonych funkcji. Podejście to tradycyjnie zajmowało się tylko jednowymiarowymi problemami, to jest sekwencją liniową części molekuł przenoszących konkretną biologiczną informację. Wydawało się, że podejście biochemiczne znajduje się gdzieś pomiędzy tymi dwoma. W obecnej biologii molekularnej wszystkie te trzy komponenty są połączone. Tak więc można bezpiecznie powiedzieć, że każdy kompletny opis dowolnego zjawiska molekularnego musi zawierać dane strukturalne, biochemiczne oraz informacyjne. Jednak w historii biologii molekularnej, a w genetyce molekularnej w szczególności, nie zawsze miało to miejsce. Do lat pięćdziesiątych te trzy podejścia funkcjonowały jako trzy stosunkowo różne dziedziny badania. Dopiero po ich połączeniu biologia molekularna w obecnej postaci uzyskała swoją dominującą pozycję w dwudziestowiecznej biologii. Por. G.E. Allen, *Life science...*, s. 189.

¹⁵³⁹ Por. N.C. Mullins, *The development of scientific specialty: the Phage Group and the origins of molecular biology*, „Minerva”, 10 (1972), s. 52. Mullins dziewiętnastoletni okres romantyczny dzieli na dwie fazy: 1935–1945 jako „wczesnoromantyczną” i 1945–1953 jako „późnoromantyczną”. Por. tamże. Szerzej o okresach w rozwoju biologii molekularnej w: G.S. Stent, *The coming of the golden age...*, s. 17–57.

¹⁵⁴⁰ Por. R. Olby, *The path to the double helix ...*, s. 226.

¹⁵⁴¹ Por. tamże, s. 227.

wszystkie zjawiska biologiczne, bez względu na ich złożoność, mogą być ostatecznie wyjaśnione z punktu widzenia tradycyjnych praw fizyki¹⁵⁴². Podczas gdy rozumowanie członków szkoły strukturalnej jest reprezentowane przez zastosowanie zasady komplementarności Bohra w biologii, poglądy członków drugiej ze szkół są przedstawione w książce Schrödingera zatytułowanej *What is life?*¹⁵⁴³ Olby nie podziela poglądu, że praca Schrödingera miała takie samo przesłanie, jak zasada komplementarności Bohra. Przekonuje, że nowe prawa, które według Schrödingera miałyby wynikać z badań nad organizmami żywymi, nie są tak rewolucyjne, jak zasada komplementarności Bohra. Ponadto nieprawdziwy okazał się domysł Bohra, że fizycy stosujący metody fizyki w biologii mieli napotkać bariery nie do pokonania. Wręcz przeciwnie, okazało się, że *What is life?* reprezentowało poglądy zupełnie odmienne od poglądów „szkoły strukturalnej”. Olby uważa, że zainteresowanie Schrödingera biologiczną reprodukcją wywodzi się z chęci odkrycia w naturze ścisłego determinizmu odrzuconego przez fizykę. W jego opinii Schrödinger nie akceptował poglądu Bohra, który twierdził, że nie ma możliwości wyjaśniania kwestii związanych z genetyką z punktu widzenia fizyki¹⁵⁴⁴. Dlatego też nie należy – jak twierdzi Olby – łączyć poszukiwań „nowych praw” prowadzonych przez Schrödingera z prowadzonymi przez Bohra.

Podobnie jak Olby, Matthew Cobb nie dostrzega bezpośredniego związku między biologicznymi ideami Schrödingera a podejmowanymi później eksperymentami i formułowanymi teoriami, które doprowadziły do przełomowych odkryć w biologii molekularnej. Cobb pisze: „Poglądy na mutację przedstawione w *Pracy Trzech*, którą Schrödinger z takim zapałem popierał, nie wpłynęły na późniejszy bieg wydarzeń, a jego przypuszczenie, że badania nad materialną podstawą dziedziczenia doprowadzą do odkrycia nowych praw fizyki, okazało się całkowicie błędne. Nawet idea »zakodowanego scenariusza«, która dziś sprawia wrażenie tak proroczej, nie miała bezpośredniego wpływu na poglądy biologów co do zawartości genu. [...] Znaczenie schrödingerowskiego »zakodowanego scenariusza« faktycznie nie kryło w sobie takiego bogactwa, jak nasz »kod genetyczny«. Schrödinger nie sądził, że istnieje zgodność pomiędzy każdą częścią genu a dokładnymi procesami biochemicznymi – pojęcie kodu zaś nasuwa taki wniosek – ani nie odniósł się do kwestii, co dokładnie zawiera zakodowany scenariusz, poza niejasną sugestią jakiegoś planu. Gdyby spytać dzisiaj któregośkolwiek biologa o zawartość kodu genetycznego, odpowie on jednym słowem: informa-

¹⁵⁴² Por. tamże, s. 226.

¹⁵⁴³ Por. tamże, s. 227.

¹⁵⁴⁴ Por. tamże, s. 240.

cja. Schrödinger nie wykorzystał tej potężnej metafory. Nie było jej ani w jego słownictwie, ani w sposobie rozumowania”¹⁵⁴⁵.

Innego zdania niż Olby i Cobb jest wielu biologów i historyków biologii. Yehuda Elkana podkreśla, że przekonania Schrödingera na temat życia zamieszczone w książce *What is life?* miały nadzwyczajny oddźwięk w środowisku naukowym¹⁵⁴⁶. Twierdzi, że trudno znaleźć historyka nowoczesnej biologii, który nie wspomina Schrödingera jako fizyka, który wpłynął na powstanie biologii molekularnej. Freeman J. Dyson podkreśla, że licząca sobie mniej niż sto stron książka tego autora miała znaczący wpływ na młodych uczonych, którzy w nadchodzącej dekadzie stworzyli biologię molekularną¹⁵⁴⁷. Z kolei Elof A. Carlson pracę Schrödingera zalicza do zasadniczych źródeł biologii molekularnej, obok „zielonej broszurki” Timofiejewa-Riesowskiego, Zimmera i Delbrücka z 1935 roku, teorii „jeden gen – jeden enzym” Beadle’a i Tatum wypracowanej we wczesnych latach czterdziestych XX wieku, teorii na temat transformacji bakterii przez DNA zademonstrowanej po raz pierwszy przez Avery’ego, MacLeoda i McCarty’ego w 1944 roku oraz „Grupy Fagowej” założonej głównie przez Delbrücka, Lurię, Doermanna i Hersheya (lata 1937–1948)¹⁵⁴⁸. Natomiast Robert Wright i John Simmons uważają *What is life?* za jedną z najbardziej wpływowych książek naukowych w XX wieku, która zainspirowała całe pokolenie fizyków i biologów molekularnych do podjęcia badań nad podstawowymi procesami biologicznymi¹⁵⁴⁹.

Według opinii fizyka Neville’a Symonds mistrzowska zdolność Schrödingera do mówienia o różnych kwestiach związanych z życiem spowodowała, że wielu biologów i niebiologów spojrzało na tę dziedzinę nauki z innej perspektywy¹⁵⁵⁰. Twierdzi, że *What is life?* odegrało ważną rolę we wstępnym kształtowaniu się kursu, jaki został podjęty w badaniach nad biologią molekularną. Wpływ książki przez następne dziesięć lat po publikacji nie był już tak znaczący, jako że był to okres, w którym podstawy genetyki biochemicznej powstawały przy użyciu relatywnie prostych technik biologicznych oraz biofizycznych. Jednakże sytuacja uległa zmianie w 1953 roku w momencie odkrycia formuły struktury DNA, i to od tego czasu – jak twierdzi Symonds – książka austriackiego fizyka znacząco poszerzyła swój

¹⁵⁴⁵ M. Cobb, *Największa tajemnica życia...*, s. 41.

¹⁵⁴⁶ Por. Y. Elkana, *Erwin Schrödinger as historian...*, s. 121.

¹⁵⁴⁷ Por. F. Dyson, *Początki życia*, s. 8.

¹⁵⁴⁸ Por. E.A. Carlson, *An unacknowledged founding...*, s. 151.

¹⁵⁴⁹ Por. R. Wright, *Nonzero. Logika ludzkiego przeznaczenia*, tłum. Z. Łomnicka, Prószyński i S-ka, Warszawa 2005, s. 274. Por. J. Simmons, *Erwin Schrödinger (1887–1961)...*, s. 87, 90.

¹⁵⁵⁰ Por. N. Symonds, *Schrödinger and Delbrück...*, s. 232.

wpływ¹⁵⁵¹. „Rosnąca liczba naukowców – pisze Symonds – zaczęła się pojawiać w dziedzinie biologii, gdy okazało się, że ich pytania można rozpatrywać w kategoriach molekularnych. Wówczas, głównie dzięki książce Schrödingera, zapanował okres, w którym (prawdopodobnie po raz pierwszy) biologia molekularna była postrzegana, na równi z matematyką i fizyką, jako wyzwanie dla dociekliwszych badaczy. To był właśnie ten napływ »świeżej krwi«, który doprowadził do wielu nowych inicjatyw, które w następnych latach umożliwiły rozkwit biologii molekularnej»¹⁵⁵².

Donald Fleming opisuje biologię molekularną jako dziedzinę stworzoną lub usankcjonowaną głównie przez Schrödingera, Szilarda, Delbrücka, i Luriego¹⁵⁵³. Pisze: „Czterech ludzi, którzy stworzyli środowisko sprzyjające Watsonowi i Crickowi, to: Erwin Schrödinger, Leo Szilard, Max Delbrück, Salvador Luria – Austriak, węgierski Żyd, Niemiec, i Włoch; wszyscy oni przez faszyzm zostali wykorzeni z swej ojczystej ziemi i zepchnięci poza ramy świata, jaki wcześniej zamieszkiwali – do Dublina Schrödinger, a Szilard, Delbrück i Luria do Stanów Zjednoczonych. Trzech z nich to fizycy, wśród których zajmujący się kwantami Schrödinger był jednym z założycieli mechaniki kwantowej. Luria był biologiem, ale pokrewnym fizykom. Siłą liczb i konkretnych cech mesjanistycznych, grupa fizyków odegrała kluczową rolę w procesie, w wyniku którego niemożliwe już ambicje rozgorzały na nowo”¹⁵⁵⁴. Fleming sugeruje, że *What is life?* usankcjonował nowy rodzaj „ataku” na sekrety życia¹⁵⁵⁵.

W opinii Kristin Hussey książka Schrödingera zachęciła wielu naukowców do nowego sposobu myślenia oraz do podjęcia zagadnień biologicznych z fizycznego punktu widzenia¹⁵⁵⁶. W ten sposób miał on również pośredni, choć niekwestionowany i ważny, wpływ na biologię. Nowoczesne trendy w genetyce i biologii molekularnej zawdzięczają swoje istnienie przynajmniej częściowo austriackiemu fizykowi. Także zdaniem Evelyn Fox Keller niezaprzeczalny jest wpływ tej pracy na późniejszy rozwój biologii molekularnej¹⁵⁵⁷. Badaczka nie ma wątpliwości, że była ona uznawana przez większość fizyków, którzy zwrócili się po wojnie ku biologii molekularnej za główny, o ile nie decydujący, powód ich „przeprowadzki”. Również wielu biologów, którzy odegrali później rolę w rewolucji molekularnej, powoływa-

¹⁵⁵¹ Por. tamże, s. 232–233.

¹⁵⁵² Tamże, s. 233.

¹⁵⁵³ Por. E. Yoxen, *Where does Schrödinger's...*, s. 29.

¹⁵⁵⁴ D. Fleming, *Émigré physicists...*, s. 156.

¹⁵⁵⁵ Por. E. Yoxen, *Where does Schrödinger's...*, s. 29.

¹⁵⁵⁶ Por. K. Hussey, *Schrödinger's contributions to molecular biology*, s. 22.

¹⁵⁵⁷ Por. E.F. Keller, *Physics and the emergence...*, s. 403. Zob. tenże, *The century of the gene*, s. 21–22.

ło się na wpływ pracy Schrödingera. W opinii Keller Schrödinger promował ideę istnienia przynajmniej jednego obszaru biologii godnego fizycznych talentów, to jest genetyki, w czasie, gdy wielu fizyków poszukiwało właśnie takiej alternatywy¹⁵⁵⁸.

Stuart A. Kauffman docenia fakt, że praca *What is life?* stanowiła w swoim czasie źródło inspiracji dla najbardziej błyskotliwych umysłów biologii, dając początek biologii molekularnej¹⁵⁵⁹. „Schrödinger ma rację – pisze Kauffman – i jego książka zasługuje na swą znakomitą reputację. Pięć lat po jej publikacji poznaliśmy strukturę DNA, która uświadomiła nam, że rzeczywiście istnieje kod prowadzący od DNA do RNA i do głównej struktury białka. Dostrzeżenie tego byłoby niebywałym sukcesem dla każdego naukowca, nie mówiąc o fizyku zaglądającym nieśmiało za mury biologii”¹⁵⁶⁰.

Mikulas Teich zastanawia się, dlaczego praca Schrödingera wywarła aż tak duży wpływ na środowiska naukowe¹⁵⁶¹. W jego opinii marazm części fizyków pojawił się częściowo w wyniku tego, że badania nad strukturą materii nie oferowały już żadnych przyszłościowych dróg postępu, a częściowo na skutek świadomego lub nieświadomego zrozumienia, że wielkie doświadczenia i teoretyczne postępy na tym polu od początku wieku dały rezultat w postaci skonstruowania najniebezpieczniejszej broni znanej ludzkości – bomby atomowej¹⁵⁶². Intelktualnie i etycznie bardziej pożyteczne było skupienie się na „zagadce życia”.

Z kolei Joachim Pietzsch najważniejszą przyczynę, dla której książka ta okazała się aż tak wpływowa, dostrzega w szczęśliwym zbiegu okoliczności¹⁵⁶³. W maju 1943 roku Oswald Avery opublikował w Instytucie Rockefellera w Nowym Jorku wyniki badań, z których wynikało, że w końcu odkryto źródło dziedziczności. Ku zdziwieniu wielu osób eksperymenty, które przeprowadził Avery, potwierdziły, że źródłem tym nie są białka, jak myślało wielu, a znajdujący się w chromosomach kwas nukleinowy nazywany DNA, o którym sądzono, że jest obojętny. Tak więc zaraz po tym, jak opublikowane zostały metaforyczne sugestie Schrödingera o możliwej do odczytania księdze życia, Avery odkrył ten „zakodowany scenariusz”, który naukowcy mogli się od tego momentu starać odszyfrować.

¹⁵⁵⁸ Por. tenże, *Physics and the emergence...*, s. 404.

¹⁵⁵⁹ Por. S.A. Kauffman, *What is life? Was Schrödinger right?* [w:] M.A. Bedau, C.E. Cleland (eds), *The nature of life. Classical and contemporary perspectives from philosophy and science*, Cambridge University Press, Cambridge 2010, s. 374.

¹⁵⁶⁰ Tamże, s. 375.

¹⁵⁶¹ Por. M. Teich, *A single path to the double helix. A review of 'The path to the double helix', by R. Olby*, „History of Science”, 13 (1975), s. 275.

¹⁵⁶² Por. tamże, s. 276.

¹⁵⁶³ Por. J. Pietzsch, *The Nobel Prize in physiology or medicine...*

Wreszcie w opinii genetyka Conrada H. Waddingtona, chociaż książka jest jednym z pierwszych sformułowań bardzo fundamentalnego pytania, nie to jest powodem, dla którego była aż tak wpływowa¹⁵⁶⁴. Hasło, że gen jest kryształem aperiodycznym, brytyjski embriolog uważa za „przesadnie paradoksalną frazę, ponieważ kryształy zazwyczaj nie dysponują okresowością, ale trzema wymiarami, gdzie głównym punktem w kwestii dziedziczności jest to, że liniowo są jednowymiarowe”¹⁵⁶⁵. Na czym więc polegała wpływowość książki austriackiego fizyka? Waddington, wspominając dyskusję w Klampenborg na przedmieściach Kopenhagi w późnych latach trzydziestych, odbytą pod patronatem Fundacji Rockefellera pomiędzy fizykami i genetykami z Wielkiej Brytanii, Francji i Niemiec, pisze: „Głównym wehikułem idei »klampenborgskich«, któremu molekularni »pionierzy« przypisywali wpływ na swoje poglądy, była krótka, ale genialna książka Schrödingera, *What is life?* [...]. Nie ma wątpliwości, że zasłużenie miała wielki wpływ, tak ze względu na swoją elegancję i jakość intelektualną, jak i autorytet autora w dziedzinie fizyki”¹⁵⁶⁶.

Niewielka książeczka Schrödingera zainspirowała wielu naukowców z różnych dziedzin do podjęcia badań biologicznych¹⁵⁶⁷. Herman J. Muller we wspomianej już recenzji książki austriackiego fizyka pisze: „Kiedy tak obiecujący fizyk, jak Erwin Schrödinger, założyciel mechaniki falowej, laureat Nagrody Nobla i profesor w Dublinie, schodzi ze swej ścieżki, by napisać średnio popularną książkę o genetyce i znaczeniu genu i teorii mutacji w fizyce, biologii oraz własnym zapatrywaniu na ogół natury, naukowcy wszystkich grup biorą sobie do serca jego słowa”¹⁵⁶⁸. Detlev Ganten wyznaje, że w jego pokoleniu każdy poważny badacz biologii i medycyny czytał i był pod głębokim wrażeniem *What is life?*¹⁵⁶⁹. Zaznacza jednak, że niewielu z tych, którzy ją przeczytali, interesowało, co Schrödinger miał do powiedzenia na temat praw „porządku wynikającego z nieporządku”, ale pojęcie kryształu aperiodycznego wywarło na większość znaczący wpływ¹⁵⁷⁰. Monografia Schrödingera z 1944 roku odegrała kluczową rolę w zmobilizowaniu nowego pokolenia fizyków i chemików do zrozumienia działania natury substancji genetycznej¹⁵⁷¹.

¹⁵⁶⁴ Por. C.H. Waddington, *Some European contributions to the prehistory of molecular biology*, „Nature”, 221 (1969), s. 321.

¹⁵⁶⁵ Tamże.

¹⁵⁶⁶ Tamże.

¹⁵⁶⁷ Por. A. Jogalekar, *Physicists in biology...*

¹⁵⁶⁸ H.J. Muller, *A physicist stands...*, s. 90.

¹⁵⁶⁹ Por. D. Ganten, *What is life? On Erwin Schrödinger, his cat, and the Journal of Molecular Medicine*, „Journal of Molecular Medicine”, 12(85) (2007), s. 1291.

¹⁵⁷⁰ Por. R. Olby, *The path to the double helix...*, s. 246.

¹⁵⁷¹ Por. L. Moss, *What genes can't do*, s. 53.

Wyraźnie zainspirowany książką Schrödingera był chemik fizyczny Kurt G. Stern. Dał temu wyraz między innymi w opublikowanym w 1947 roku artykule na temat mechanizmu kodowania genetycznego. Pisał w nim: „Nakreślona powyżej teoria zgadza się z postulatem mechaniki kwantowej Schrödingera, że gen powinien mieć wystarczająco stabilną konfigurację wobec zakłóceń termicznych, w ujęciu statystycznie niewystarczającej liczby atomów w indywidualnym genie, oraz że mutacja powinna być raczej gwałtownym zdarzeniem. Mutacjom wywołanym przez promieniowanie X u *Drosophili* często towarzyszą wykrywalne cytologicznie zmiany w ogromnych chromosomach śliny”¹⁵⁷².

Nie ukrywał swojego zafascynowania książką Schrödingera Gunther Stent. Ten niemiecki fizyk-biolog po latach tak szczegółowo opisuje swój pierwszy kontakt z *What is life?*: „Kiedy wychodziłem z przyjęcia, nasza gospodyni, która wcześniej słyszała naszą dyskusję, zasugerowała abym – o ile w rzeczywistości interesuje mnie kwestia związku pomiędzy biologią a fizyką – przeczytał najnowszą książkę Erwina Schrödingera *What is life?* Ze swojego kursu fizyki pamiętałem, że Schrödinger był austriackim fizykiem, który wspólnie z niemieckim fizykiem Wernerem Heisenbergiem zrewolucjonizował nowoczesną fizykę w latach dwudziestych, tworząc mechanikę kwantową. Ponieważ interesowało mnie, co wybitny fizyk ma do powiedzenia na temat zupełnie dla mnie tajemniczych procesów pozwalających na odróżnienie ożywionej od nieożywionej materii, kupiłem książkę Schrödingera i przeczytałem wszystkie dziewięćdziesiąt stron jej kieszonkowego wydania jednym tchem”¹⁵⁷³. W opinii Stenta, chociaż dzieło wydaje się napisane przejrzyście, to skomplikowana terminologia wprowadzona przez austriackiego fizyka sprawia, że większość biologów nie do końca rozumie, co takiego stara się on przekazać. Stent twierdzi więc, że na profesjonalnych biologów książka ta wywarła niewielki wpływ lub nie wywarła go wcale. „O ile w ogóle – pisze Stent – zaprzętała sobie głowę lekturą *What is life?*, to sam tytuł uznali za przejaw ogromnego tupetu. W najlepszym przypadku z rozbawieniem tolerowali książkę”¹⁵⁷⁴. Zdaniem badacza praca ta wywarła ogromny wpływ na samych fizyków (w przeciwieństwie do biologów). Stent pisze: „Tytułowe pytanie Schrödingera miało na celu skonfrontowanie fizyków z poważnym problemem pogodzenia istnienia organizmów żywych ze znanymi prawami fizyki. Ponieważ wielu fizyków cierpiało na swoisty ma-

¹⁵⁷² K.G. Stern, *Nucleoproteins and gene structure*, „Yale Journal of Biology and Medicine”, 19 (1947), s. 945.

¹⁵⁷³ G.S. Stent, *Looking for other laws of physics*, s. 371.

¹⁵⁷⁴ Tenże, *Introduction: waiting for the paradox* [w:] J. Cairns, G.S. Stent, J.D. Watson (eds), *Phage and the origins...*, s. 3.

razm zawodowy w okresie, który nastąpił tuż po wojnie, skłonni byli skierować swoje wysiłki na nowe obszary, które zdaniem Schrödingera były właśnie w owym czasie gotowe na nowe, ekscytujące odkrycia. W tej ingerencji w pasje pozbawionych złudzeń fizyków *What is life?* stało się czymś w rodzaju *Chaty wuja Toma* rewolucji w naukach o życiu, która nastąpiła w latach pięćdziesiątych i sześćdziesiątych, a po której, jako rewolucyjna spuścizna, kiedy opadł już rewolucyjny kurz, pozostała biologia molekularna¹⁵⁷⁵. Wiarę Schrödingera w odkrycie „innych praw fizyki”, dotychczas nieznanych, Stent uważa za najważniejszą zachętę psychologiczną dla fizyków, by ci zwrócili się ku biologii: „Tak nowo narodzona romantyczna idea, że »inne prawa fizyki« można odkryć, badając gen, bardzo zafascynowała fizyków. To badanie paradoksu fizycznego, donkiszotowska nadzieja, że genetyka stanie się zrozumiała w ramach konwencjonalnej wiedzy fizycznej, pozostała ważnym elementem psychologicznej infrastruktury twórców biologii molekularnej”¹⁵⁷⁶. Zdaniem Stenta książka Schrödingera nie oferuje konkretnych sugestii na temat tego, jak zabrać się do badania natury genu, lecz przewiduje dokładnie, że „postępy w rozumieniu działania substancji dziedziczności przejdą od biochemii do fizjologii i genetyki”¹⁵⁷⁷. W swych pracach Stent pokazał niezwykle zainteresowanie metafizycznymi kwestiami *What is life?* i ich wpływem na biologię¹⁵⁷⁸.

Koncepcja Schrödingera o wysoce kompleksowych strukturach molekularnych, które kontrolują procesy życiowe, okazała się mieć przełomowe znaczenie dla kariery Maurice Wilkinsa¹⁵⁷⁹. Ten brytyjski fizyk krystalograf był zaangażowany w program Manhattan, którego efektem było skonstruowanie bomby atomowej podczas drugiej wojny światowej. Po jakimś czasie, głęboko wstrząśnięty tym, co wydarzyło się w Hiroszimie i Nagasaki, stracił zupełnie zapał do fizyki i szukał nowej dziedziny, w której mógłby poprowadzić badania¹⁵⁸⁰. Duże wrażenie zrobiła na nim książka *What is life?*, której egzemplarz otrzymał od swojego przyjaciela. Szczególnie poruszyła go koncepcja genów jako kryształów aperiodycznych przypominających mu kryształy luminescencyjne, które badał, przygotowując swoją pracę doktorską¹⁵⁸¹. Ostatecznie Wilkins porzucił fizykę na rzecz biofizyki¹⁵⁸². Po

¹⁵⁷⁵ Tenże, *Looking for other laws of physics*, s. 371.

¹⁵⁷⁶ Tenże, *Introduction: waiting for the paradox*, s. 4.

¹⁵⁷⁷ Tamże.

¹⁵⁷⁸ Por. E. Yoxen, *Where does Schrödinger's...*, s. 28.

¹⁵⁷⁹ Por. tamże.

¹⁵⁸⁰ Por. tamże, s. 29. Por. M. Cobb, *Największa tajemnica życia...*, s. 40.

¹⁵⁸¹ Por. M. Wilkins, *The third man...*, s. viii.

¹⁵⁸² M. Cobb, *Największa tajemnica życia...*, s. 40.

latach szczegółowo opisuje wpływ austriackiego fizyka na zmianę swoich zainteresowań: „Byłem zafrapowany myśleniem Schrödingera w *What is life?*, ponieważ połączył on wyjątkowo istotne zagadnienia biologiczne, takie jak geny, z raczej dziwnym światem elektronów poruszających się w kryształach. Pisał o genie będącym kryształem aperiodycznym, a to łączyło się bezpośrednio z moimi badaniami do rozprawy doktorskiej, w których elektrony poruszały się w sposób swobodny w kryształach doskonałych, jednak mogły zostać spowolnione bądź uwięzione, jeśli kryształ posiadał jakieś nieregularności. Wydawało mi się, że ta »aperiodyczność« miała związek z lokalnymi nieregularnościami, w których zapisana została informacja genetyczna, w odróżnieniu od periodycznego tła. Jednak podstawowe znaczenie książki Schrödingera w moim przypadku było takie, że skłoniła mnie do działania, lecz nie chodziło wyłącznie o to, co napisał, a raczej o to, w jaki sposób to napisał. Ruth mówiła często: »liczy się naprawdę nie to, co mówisz, ale to, w jaki sposób«. Schrödinger mówił językiem fizyki i to mnie stymulowało jako fizyka do dokładnego zapoznania się z jego książką i jego wstępem do genetyki, a następnie do zdecydowania, że to właśnie jest ten ogólny obszar, który chcę badać jako »biofizyk«. Przemyślenia te skłoniły mnie do zaakceptowania ponownego zaproszenia Randalla do dołączenia do niego w Szkocji [...]. Uznałem, że rozpoczęcie badań biofizycznych nad niezwykle ważnym obszarem dotyczącym genów będzie wymagało wielkiej wyobraźni i zarządzania podobnego do tego koniecznego w biznesie, a uważałem, że Randall posiada takie umiejętności”¹⁵⁸³. Lektura publikacji Schrödingera dała Wilkinsowi bezpośredni impuls do podjęcia badań nad strukturą kwasów nukleinowych za pomocą obrazów dyfrakcyjnych promieni X¹⁵⁸⁴.

What is life? zainteresowało Seymoura Benzera molekularną podstawą genetyki¹⁵⁸⁵. Ten amerykański fizyk, który doktoryzował się w dziedzinie fizyki bryły sztywnej na Uniwersytecie Purdue, jako uczestnik kursu fagowego w 1948 roku w Cold Spring Harbor został wręcz oczarowany książką Schrödingera i miał nadzieję rozpocząć poszukiwania dotyczące aperiodycznego kryształu dziedziczności w laboratorium w Caltechu¹⁵⁸⁶. W ciągu kilku lat doprowadził do przeformułowania nieco zamazanej koncepcji genu Mendla z genetyki klasycznej w definicję genu precyzyjnie zdefiniowanego, typowego dla późniejszego okresu biologii molekularnej.

¹⁵⁸³ M. Wilkins, *The third man...*, s. viii.

¹⁵⁸⁴ Por. A. Urbanek, *Rewolucja naukowa w biologii*, s. 18.

¹⁵⁸⁵ Por. R. Olby, *The path to the double helix...*, s. 247.

¹⁵⁸⁶ Por. G.S. Stent, *Looking for other laws of physics*, s. 390.

Powszechnie wiadomo, że *What is life?* miało ogromny wpływ na młodego Jamesa Watsona, ale także na Francisca Cricka, mających swój istotny wkład w odkryciu struktury DNA w 1953 roku¹⁵⁸⁷. Praca ta doprowadziła Watsona do poszukiwania i udzielenia odpowiedzi na to zawarte w tytule, fundamentalne pytanie¹⁵⁸⁸. Po przeczytaniu książki jeszcze jako student, tuż przed otrzymaniem dyplomu postanowił zwrócić się nie ku biologii ptaków, ale ku genetyce¹⁵⁸⁹. Nabral przekonania, że geny z eksperymentów Avery'ego są molekułami, a on musi odkryć ich strukturę¹⁵⁹⁰. Crick, również fizyk, uważał, że argumenty wysunięte przez Schrödingera nie były pozbawione niedoskonałości, jednak mimo tego był pod silnym wrażeniem jego książki. Pracował nad minami magnetycznymi dla Admiralicji w czasie drugiej wojny światowej i planował pozostanie w obszarze badań militarnych. Po przeczytaniu *What is life?* uznał, że fizycy mogą uczynić znacznie więcej w obszarze związanym z poznaniem sekretów życia i dołączył do Laboratorium Cavendish w Cambridge, aby kontynuować badania do swojej pracy doktorskiej nad trójwymiarową strukturą białek. W 1965 roku w artykule opublikowanym w „British Medical Bulletin” na temat biologii molekularnej pisał: „Na tych, którzy zainteresowali się tym tematem po okresie wojny 1939–1945, mała książeczka Schrödingera *What is life?* wydaje się mieć szczególnie wpływ. Jej główny punkt – mówiący że biologia potrzebuje stabilności wiązań chemicznych i że tylko mechanika kwantowa może to wyjaśnić – był jednym z tych, których stwierdzenie tylko fizyk uznałby za konieczne. Ale książka była wyjątkowo dobrze napisana i przekazywała w ekscytujący sposób ideę, według której w biologii, wyjaśnienia molekularne byłyby nie tylko ekstremalnie ważne, ale też że były tuż za rogiem. Powiedziano to już wcześniej, ale książka Schrödingera wydana została w bardzo

¹⁵⁸⁷ Współczesny fizyk teoretyk Sean Carroll tak opisuje wkład Schrödingera w odkryciu struktury DNA: „Erwin Schrödinger w swoim eseju *Czym jest życie?* wskazał na potrzebę przekazywania informacji przyszłym generacjom. Mając w pamięci przykład kryształów, które nie wywiązują się z tego zadania, ale są blisko, Schrödinger zasugerował, że winowajcą powinien być jakiś rodzaj »kryształu aperiodycznego« – zbiorowisko atomów, które pasują do siebie w powtarzalny sposób, lecz zamiast rutynowo powtarzać wzór, mają zdolność przenoszenia znaczących porcji informacji. Jego idea pobudziła wyobraźnię dwóch młodych naukowców, którzy następnie zidentyfikowali strukturę molekuly rzeczywiście przenoszącej informację genetyczną: Francis Crick i James Watson odkryli, że DNA ma postać podwójnej helisy”. S. Carroll, *Nowa perspektywa...*, s. 334.

¹⁵⁸⁸ Por. J. Pietzsch, *The Nobel Prize in physiology or medicine...* Por. D. Ganten, *What is life? On Erwin Schrödinger...*, s. 1291. Por. H.F. Judson, *The eighth day of creation. Makers of the revolution in biology*, Penguin Books, London 1995, s. 47.

¹⁵⁸⁹ Por. M. Cobb, *Największa tajemnica życia...*, s. 40–41.

¹⁵⁹⁰ Por. J. Pietzsch, *The Nobel Prize in physiology or medicine...*

odpowiednim czasie i przyciągnęła ludzi, którzy w innych okolicznościach nigdy nie zainteresowaliby się biologią”¹⁵⁹¹. W artykule Olby’ego na temat wpływu tej lektury cytowany jest list Cricka napisany w 1970 roku, w którym angielski biochemik ponownie podkreślał jej wartość w znaczeniu ogólnym, ale ostrożnie odróżnia ją od bardziej specyficznej roli katalizatora, jaką odgrywa praca Linusa Paulinga: „Nie przypominam sobie okazji, kiedy Jim Watson i ja dyskutowaliśmy o ograniczeniach książki Schrödingera. Myślę, że głównym powodem jest to, iż byliśmy pod silnym wpływem Paulinga, który posiadał wystarczająco poprawny zbiór pomysłów. Nigdy więc nie traciliśmy czasu, dyskutując, czy powinniśmy myśleć w sposób, w jaki robił to Schrödinger, czy Pauling. Wydawało się nam oczywiste, że powinniśmy pójść tropem Paulinga”¹⁵⁹². Wnioski są dość wyraźne. Książka Schrödingera wywarła na niektórych naukowców silny i stały wpływ, sugerując i potwierdzając pewien rodzaj badań, ale do rozwiązania jednego z tych problemów lepiej się nadawały prace innych, jak Paulinga¹⁵⁹³. Podczas gdy Crick i Wilkins, historycznie lub chociaż nostalgicznie, opisywali książkę jako przekaz idei, która doprowadziła ich do zainteresowania strukturą genu, nie odnieśli się do jej ważnych metafizycznych podtekstów ani też do poglądu Schrödingera na prawa fizyczne.

Koncepcja ujemnej entropii Schrödingera znalazła się w centrum rozważań fizyków Johna R. Reitza i Conrada Longmire’a. W artykule z 1950 roku będącym owocem dyskusji z Georgem Gamowem¹⁵⁹⁴ autorzy, bazując na rozważaniach austriackiego fizyka, próbowali jeszcze bardziej precyzyjnie odpowiedzieć na pytanie, czy druga zasada termodynamiki jest respektowana w układach ożywionych¹⁵⁹⁵. Zauważyli, że druga zasada termodynamiki stwierdzająca, że w dowolnym układzie pozostawionym samemu sobie entropia wzrasta lub pozostaje stała, ale nie spada, można interpretować z grubsza w ramach pojęć chaosu i uporządkowania. Każdy układ pozostawiony sam sobie zmierza w kierunku chaosu lub pozostaje ten sam – nie stanie się bardziej uporządkowany. Straci na uporządkowaniu, jeśli mamy do czynienia z reakcją nieodwracalną. Autorzy, aby rzucić światło na rozpatrywane zagadnienie, odwołują się tu do przykładu ze szklanym pudłem zwie-

¹⁵⁹¹ F.H.C. Crick, *Recent research in molecular biology: an introduction*, „British Medical Bulletin”, 21 (1965), s. 184.

¹⁵⁹² Letter from F.H.C. Crick to R.C. Olby, 15 January 1970; cyt. za: E. Yoxen, *Where does Schrödinger’s...*, s. 27–28.

¹⁵⁹³ Por. E. Yoxen, *Where does Schrödinger’s...*, s. 28.

¹⁵⁹⁴ Por. tamże, s. 23.

¹⁵⁹⁵ Por. J.R. Reitz, C. Longmire, *Living matter and physical laws*, „Physics Today”, 3 (1950), s. 15.

rającym trochę wody, ziemi i powietrza oraz ziarno kwiatu. Tylko o ziarnie można powiedzieć, że jest w dużym stopniu uporządkowane lub że ma niską entropię. Ziemia, woda i powietrze są w stanie równowagi, na raczej komfortowym etapie nieuporządkowania. Możliwe są dwa scenariusze. Z jednej strony ziarno może zgnieć. Z pewnością jest to reakcja nieodwracalna i zgodnie z wymaganiami narzuconymi drugim prawem, chaos i entropia rozpatrywanego układu wzrastają. Z drugiej strony ziarno może urosnąć i stworzyć kwiat i wiele innych ziaren identycznych z nim samym. Wzrost również jest nieodwracalną reakcją, tym razem jednak uporządkowanie wzrosło, bowiem część z nieuporządkowanej ziemi, wody i powietrza została przekształcona w uporządkowane ziarna. Reitz i Longmire piszą: „Na pierwszy rzut oka, ponieważ entropia [...] spadła, nasze szklane pudło może łamać drugą zasadę termodynamiki. Prawdę mówiąc, nie ma żadnej sprzeczności, ponieważ pudło nie zostało zostawione samo sobie, jak tego wymagano, ale zostało wystawione na duże ilości światła słonecznego. Jako układ musimy więc rozważać pudło i światło słoneczne, które możemy sobie wyobrażać jako zamknięte w długiej rurze z końcem w pudle. Gdyby promieniowanie w naszym układzie było całkowicie chaotyczne, składałoby się głównie z fal cieplnych odpowiadających temperaturze pudła i nie byłoby żadnego widzialnego światła, o jakim można byłoby mówić, ponieważ jednak w naszej rurze jest dużo widzialnego światła, radiacja z pewnością nie jest w stanie nieuporządkowanym. W miarę wzrostu nasion i wykorzystywania promieni słonecznych część porządku w posiadaniu światła zniknęła, a jego miejsce zajął porządek obecny w nasionach. By zadowolić drugie prawo, wymagane jest tylko, by uporządkowanie nowych nasion nie było mniejsze niż to obecne w świetle słonecznym”¹⁵⁹⁶. Autorzy dochodzą do wniosku, że kwiat zyskał na uporządkowaniu, żerując na uporządkowanej energii lub czymś, co Schrödinger nazwał „ujemną entropią”¹⁵⁹⁷. Źródłem ujemnej entropii dla roślin jest Słońce. Stąd radiacja emitowana przez Słońce jest równoznaczna z tą na powierzchni (6000°C) i pozostaje w związku z tym w stopniu całkowitego nieuporządkowania – pojawia się ono, kiedy promienie słoneczne wpadają do pudła. Nie wszystkie organizmy są uzależnione od ujemnej entropii Słońca. Wyżej rozwinięte formy życia nauczyły się żerować na innej materii ożywionej. W związku z tym dla organizmów żywych możliwe jest, by zwiększać ich stopień uporządkowania bez łamania drugiej zasady termodynamiki. Nie udowodniono jednak, że drugie prawo jest przestrzegane. Powodem tego jest, że zbyt trudno zmierzyć lub przekalkulować dokładnie

¹⁵⁹⁶ Tamże, s. 15–16.

¹⁵⁹⁷ Por. tamże, s. 16.

entropię organizmu żywego. Reitz i Longmire konkludują, że w związku z tym należy uważać za fakt eksperymentalny to, że spadek w entropii organizmu żywego jest mniejszy niż wzrost entropii energii z pożywienia. Powinniśmy się dowiedzieć o wiele więcej o strukturze organizmów żywych, zanim będziemy w stanie odpowiedzieć na pytanie o całkowitą entropię organizmów¹⁵⁹⁸.

Poglądy Schrödingera na dziedziczenie spotkały się z uznaniem i aprobatą Maxa Hartmanna. Niemiecki biolog wspomina: „podkreślałem w swoich wykładach przez lata, jak E. Schrödinger w swoich popularnych odczytach, że zasadnicze wyjaśnienie i definicja życia znajdują się w bliższym poznaniu nośników dziedziczenia składających się z nukleoproteidów lub genów i ich działania”¹⁵⁹⁹. W opinii Hartmanna austriacki noblista okazał się fizykiem pozbawionym uprzedzeń przy ocenie zdarzeń życiowych¹⁶⁰⁰. Jako „fizyk bez uprzedzeń” pierwszy stwierdził, że życie wykazuje zachowanie uporządkowane i zgodne z zasadami częściowo bazującymi na istniejącym porządku, który należy utrzymać¹⁶⁰¹. Przedstawiona przez Schrödingera ocena procesów życiowych zmotywowała Hartmanna w 1952 roku do tego, by jako centralny temat do dyskusji dla przyrodników i filozofów na Międzynarodowych Tygodniach Uniwersyteckich w Alpbach (Tyrol) zaproponować *Proces i prawo w fizyce i biologii*. W trwających dwa tygodnie wykładach i dyskusjach nad powyższym zagadnieniem brali udział, oprócz Hartmanna, między innymi sam Schrödinger, fizyk March czy filozof Moser. Hartmann nadmienia, że w trakcie dyskusji z Schrödingerem wystąpiła „całkowita zgodność” między nimi w kwestii nukleoprotein. „Ta ocena – dodaje biolog – otrzymała dzięki najnowszym wynikom genetyki wirusowej i bakteryjnej zaskakująco całkowite potwierdzenie i poznanie, i nie przesadza się, jeśli się twierdzi, że życie organizmu zależy przede wszystkim od

¹⁵⁹⁸ Wspomniany fizyk J.R. Reitz przy innej okazji pisał: „Książka Schrödingera wyszła w czasach, gdy byłem studentem (1946–1949). Większość z moich kolegów, teoretyków, przeczytało ją, było nią zainteresowanych i ją omawiało. Oczywiście, w tamtych czasach istniało wiele interesujących problemów w fizyce i wszyscy posiadaliśmy tezy, jak te problemy rozwiązać. Gdy otrzymałem swój doktorat, dołączyłem do Los Alamos Scientific Laboratory na okres kilku lat. Dr Longmire przyjechał tam mniej więcej w tym samym czasie. [...] Longmire i ja byliśmy również zaangażowani w nową sztukę szybkich komputerów i myśleliśmy, że wierzyliśmy w możliwość rozwiązywania złożonych problemów takich, jak to w jaki sposób aktywność biologiczna pochodzi z bezpośredniej aplikacji praw fizycznych i chemicznych”. J.R. Reitz, *Personal communication*, 13 June 1975; cyt. za: E. Yoxen, *Where does Schrödinger's...?*, s. 20.

¹⁵⁹⁹ M. Hartmann, *Was ist Leben?*, s. 126.

¹⁶⁰⁰ Por. tenże, *Prozeß und Gesetz...*, s. 232.

¹⁶⁰¹ Por. tamże, s. 234.

składania się z nukleoprotein, stałej ciągłości tych ogromnych molekuł jako całości i ich niepowtarzalnej umiejętności, jaką jest autonomiczne rozmnażanie jako całość”¹⁶⁰².

George Gamow, fizyk pochodzący ze Związku Radzieckiego, znany jest ze swego wkładu w mechanikę kwantową i fizykę jądrową, a zwłaszcza z genialnego wyjaśnienia promieniowania alfa, ale także z tego, iż wydedukował, że gdyby nasz wszechświat miał gorący i gęsty początek (później nazwany Wielkim Wybuchem), zawierałby widoczny ślad w postaci promieniowania ciała doskonale czarnego o charakterystycznej temperaturze (w obu przypadkach za pewnik wziął przyjęte prawa fizyki i zastosował je do niezwyklej sytuacji). Gamow w 1952 roku omówił *What is life?* w pozycji zatytułowanej *Mr Tompkins learns the facts of life* (Pan Tompkins uczy się o życiu)¹⁶⁰³. Uważa on pracę Schrödingera za satysfakcjonującą chociażby na poziomie podstawowym. Książka Gamowa, jedna z całej serii¹⁶⁰⁴, wykorzystuje fikcyjną postać pana Tompkinsa do komentowania ówczesnych teorii biologicznych. W ostatnim rozdziale, zatytułowanym *Wykład Profesora: natura życia*¹⁶⁰⁵, tematem jest termodynamika życia. Wykład wygłoszony zostaje przez starszego profesora pozostającego pod wyraźnym wpływem Schrödingera. Zacytujmy pierwsze zdania rozdziału: „»Więc interesuje cię biologia«, rzekł stary Profesor, który przyszedł na kolację ze swoją córką i zięciem. »Może przyjdiesz na mój wykład dzisiaj wieczorem? Mam mówić o związku między fenomenem życia a prawami fizyki«. »Nie wiedziałem, że ciebie również interesuje biologia, ojcze« rzekła Maud, napełniając swoją filiżankę kawy. »Myślałam, że twoje badania ograniczają się do atomów, jąder atomowych i tego rodzaju rzeczy«. »To prawda« rzekł Profesor, »jednak podczas mojej ostatniej wizyty w Anglii spotkałem mojego starego przyjaciela, uznanego austriackiego fizyka, który przyczynił się kiedyś do powstania teorii kwantowej. Skupił się teraz na fundamentalnych problemach biologii i twierdzi, że nadszedł doskonały czas, by fizycy włączyli się do badań. Prawdę mówiąc, ta *maladia biologica*, jak niektórzy ludzie okre-

¹⁶⁰² Tenże, *Was ist Leben?*, s. 126–127.

¹⁶⁰³ Por. E. Yoxen, *Where does Schrödinger's...?*, s. 25. Por. V. Nanjundiah, *George Gamow and the genetic code*, „Resonance”, 7(9) (2004), s. 44. Krótkie streszczenie biologicznych poglądów Gamowa zamieściłem w pracy *Kontrowersje wokół natury życia w pi-smach fizyków...*, s. 93–95.

¹⁶⁰⁴ W przeciwieństwie do innych książek z tej serii o tej traktującej o biologii zapomniano. Wyszła tuż przed tym, jak odkrycie podwójnej helisy wywróciło biologię do góry nogami, więc trudno było o gorszy moment na jej ukazanie się. Por. V. Nanjundiah, *George Gamow and the genetic code*, s. 44–45.

¹⁶⁰⁵ Por. G. Gamow, *Mr Tompkins learns the facts of life*, Cambridge University Press, Cambridge 1953, s. 66–88.

ślają problem, wydaje się rozprzestrzeniać wśród fizyków, zarówno teoretyków, jak eksperymentatorów, i zamiast podążać za ostatnią myślą Diraca co do istnienia eteru, wielu z nich poświęciło cały swój czas hodowaniu bakterii lub otwieraniu brzuszków białych myszek»¹⁶⁰⁶. W drugim, poprawionym wydaniu książki, opublikowanym w 1968 roku, po wielu problemach, które pojawiły się w 1952 roku i które zostały rozwiązane dzięki postępowi biologii molekularnej, treść omawianego wyżej rozdziału jest znacząco zmodyfikowana i pomija zupełnie postać Schrödingera w opowiadaniu Profesora. W tym czasie Gamowa szczególnie intrygowała zagadka kodu genetycznego, dlatego wyszedł poza to, co powiedział Schrödinger w książce *What is life?* na temat „zakodowanego scenariusza”¹⁶⁰⁷. Twierdził, że można wyprowadzić kod genetyczny wyłącznie z wiedzy na temat sekwencji baz w molekuale DNA oraz sekwencji aminokwasów w kodowanym przez nie białku. Szczegóły leżące u podstaw chemii były nieistotne. Poza tym jeszcze bardziej uprościł problem kodu, redukując go do działania numerycznego – twierdząc, że DNA jest łańcuchem czterech różnych grup chemicznych, nazywanych bazami, podobnie jak białka są łańcuchami dwudziestu rodzajów aminokwasów (liczba 20 była śmiałym przypuszczeniem, które okazało się poprawne, jednak prawdziwa dwudziestka różniła się od tej podanej przez Gamow)¹⁶⁰⁸. Gamow zastanawiał się, jak czteroznakowy język DNA można by przełożyć na język białek zawierający dwadzieścia znaków¹⁶⁰⁹. Dostrzegł istnienie bezpośredniego związku między sekwencjami nukleotydów w DNA a sekwencją aminokwasów w białku¹⁶¹⁰. Podkreślał, że informacja dotycząca sekwencji aminokwasów zapisana jest w formie kodu w molekuale DNA. Zaproponował „kod diamentowy” – nazywany tak, ponieważ polegał na wnące w kształcie trapezu lub diamentu uformowanej pomiędzy czterema nukleotydami DNA¹⁶¹¹. Vidyanand Nanjundiah w następujący sposób wyjaśnił podstawowe idee stojące za „kodem diamentowym” Gamowa: „Jeśli trzy następujące po sobie podstawy na jednej nici oznaczyć jako 1, 2 i 3, dwa przeciwne narożniki diamentu formują numery 1 i 3', zaś pozostałe dwa narożniki formowane są przez 2 i 2', gdzie 3' i 2' są komplementarne

¹⁶⁰⁶ Tamże, s. 66.

¹⁶⁰⁷ Por. V. Nanjundiah, *George Gamow and the genetic code*, s. 45.

¹⁶⁰⁸ Por. tamże, s. 45–46.

¹⁶⁰⁹ Por. tamże, s. 46.

¹⁶¹⁰ Por. G. Gamow, M. Yčas, *Mr Tompkins inside himself. Adventures in the new biology*, George Allen & Unwin LTD, London 1968, s. 257. Por. ciż, *The cryptographic approach to the problem of protein synthesis* [w:] H.P. Yockey, R.L. Platzman, H. Quastler (eds), *Symposium on information theory in biology...*, s. 63. Por. G. Gamow, *What is life?*, „Transactions of the Bose Research Institute”, 24(4) (1961), s. 185.

¹⁶¹¹ Por. V. Nanjundiah, *George Gamow and the genetic code*, s. 47.

względem 3 i 2. Kolejność tych podstaw wzdłuż nici nie była istotna. Aminokwas miał dokładnie pasować w sposób stereospecyficzny do diamentu. Kod zależał od bezpośredniej interakcji aminokwasów z DNA. Był to kod trypletowy: tylko trzy podstawy były istotne (1, 2 i 3), ponieważ czwarta (2') była określana automatycznie poprzez zasady układania podstaw w pary. Ponieważ następujące po sobie aminokwasy na białku dzieliły dwie lub trzy podstawy je kodujące, był to »pokrywający się« kod»¹⁶¹². Ostatecznie kod diamentowy okazał się błędnym konceptem. Mimo to idea ta była ważnym etapem na drodze do sformułowania ostatecznie przez Cricka w 1957 roku „centralnego dogmatu” biologii molekularnej, zgodnie z którym, informacja genetyczna płynie w kierunku: DNA→ RNA→ białko.

Idee zawarte w *What is life?* były wielokrotnie cytowane i rozważane przez Henry’ego Quastlera w kontekście dyskusji na temat tego, jak użyć narzędzia termodynamiki i teorii informacji do rozwiązywania problemów związanych z życiem. Quastler polemizował w szczególności ze stwierdzeniem Schrödingera, że organizmy żywią się „ujemną entropią”. Powyższe stwierdzenie – jak twierdzi – „skłania do refleksji”¹⁶¹³. Pisał też: „Pogląd, że informacja jest najcenniejszym »towarem« dla istot żywych, został dobitnie sformułowany przez Schrödingera w jego twierdzeniu, że »układy ożywione żywią się uporządkowaniem«, potrzebując świeżych dostaw właśnie uporządkowania, a nie energii czy materii. Taka potrzeba zakłada, że uporządkowanie zostało gdzieś zatracone, to jest zakłóca je obecny szum. To jednak nie oznacza, że szum ten występuje wszędzie. Niektóre procesy można przeprowadzić w »mechaniczny sposób« bez utraty danych informacyjnych. Tak jest w przypadku, który Schrödinger klasyfikuje jako »wytwarzanie porządku z porządku«. Podejrzewa on, że każdy akt przekazu informacji genetycznej z rodziców na potomstwo występuje bez poważnej utraty informacji. Idea ta zgadza się z obecnym modelem duplikacji DNA (Watsona-Cricka) i powtarza się w modelach Gamowa i Yčasa odnoszących się do transmisji informacji z genetycznego do somatycznego materiału”¹⁶¹⁴.

Wyraźnie zainspirowany Schrödingerem David Bohm podjął w swych badaniach kwestie związane z porządkiem biologicznym. W jednej ze swoich prac poświęconej właśnie temu zagadnieniu pisał między innymi: „Niektórzy fizycy (szczególnie Schrödinger) sugerują, że proces genetyczny jest stabilny,

¹⁶¹² Tamże, s. 47.

¹⁶¹³ Por. H. Quastler, *Introduction* [w:] H. Quastler (ed.), *Essays on the use of information theory in biology*, University of Illinois Press, Urbana 1953, s. 2.

¹⁶¹⁴ Tenże, *The domain of information theory in biology* [w:] H.P. Yockey, R.L. Platzman, H. Quastler (eds), *Symposium on information theory in biology...*, s. 189. Zob. tenże, *Introduction*, s. 2.

ponieważ odpowiednie cząsteczki (takie jak DNA) również znajdują się w dobrze zdefiniowanych stanach kwantowych. Nie biorąc jednak takich właściwości kwantowych pod uwagę, jest niemal pewne (jak kładł nacisk Pattee), że nie będziemy mogli zrozumieć stabilności transmisji cech genetycznych. Wówczas bardzo prawdopodobne jest, że zabraknie nam pewnych kluczowych aspektów procesu, kiedy zignorujemy właściwości kwantowe cząstek, traktując je tak jak wielkoskalowe, klasyczne obiekty”¹⁶¹⁵.

Roger Penrose wyznaje, że w czasach studenckich przedmiotem jego lektury były głównie prace Schrödingera: „Ekscytowała mnie zawsze ich odkrywczość. Pomagały one zrozumieć nowe zjawiska tajemniczego świata, w którym żyjemy. Pracą najbardziej zasługującą na taką ocenę jest krótka, klasyczna już książeczka *What is life?*, która, jak dziś sądzę, powinna zostać zaliczona do najbardziej znaczących prac naukowych napisanych w naszym stuleciu. Zawierała próbę zrozumienia niektórych tajemnic życia, próbę podjętą przez fizyka, który bardzo przyczynił się do zmiany rozumienia budowy świata. Interdyscyplinarne podejście do zagadnienia było wówczas czymś wyjątkowym, a mimo to książka napisana została z przesadną, niekiedy rozbijającą skromnością, w sposób przystępny dla laików oraz młodych ludzi myślących o karierze naukowej”¹⁶¹⁶.

Nie ukrywał swojego zafascynowania *What is life?* także John Joe McFadden, mikrobiolog z University of Surrey. Stwierdził on, że większość argumentów tam przedstawionych zachowała aktualność: „Upłynęło ponad pięćdziesiąt lat od czasu, gdy Erwin Schrödinger postawił zdumiewającą tezę, iż życie opiera się na zasadach mechaniki kwantowej. [...] Schrödinger wskazywał na fakt, że prawa fizyki klasycznej mają charakter statystyczny, są słuszne dla zbiorów miliardów atomów, lecz na poziomie opisu pojedynczych cząstek zawodzą. Życie, utrzymywał Schrödinger, opiera się na dynamice pojedynczych cząstek, toteż podlega prawom mechaniki kwantowej. Była to niezwykle przepowiadnia, zważywszy, że w 1944 roku powszechnie głoszone, iż wewnątrz komórki wypełnia rodzaj amorficznej galaretki nazywanej protoplazmą. Kiedy jednak biolodzy molekularni bliżej przyjrzeni się zasadom funkcjonowania komórki, odkryli szczegóły struktury na wszystkich poziomach”¹⁶¹⁷.

Nick Lane, biochemik, pracujący w University College London, postrzega Schrödingera jako fizyka, który zapoczątkował „erę nowoczesnej biologii molekularnej wraz z całym postępem w technologiach badań nad

¹⁶¹⁵ D. Bohm, *Some remarks on the notion of order* [w:] C.H. Waddington (ed.), *Towards a theoretical biology. Vol. 2*, s. 35.

¹⁶¹⁶ R. Penrose, *Przedmowa* [w:] E. Schrödinger, *Czym jest życie?...*, s. 11.

¹⁶¹⁷ J. McFadden, *Mechanika kwantowa i biologia* [w:] J. Al-Khalili, *Kwanty. Przewodnik dla zdeorientowanych*, tłum. U. i M. Seweryńscy, Prószyński i S-ka, Warszawa 2015, s. 259.

DNA”¹⁶¹⁸. Za szczególnie wpływową Lane uważa wysuniętą przez austriackiego fizyka hipotezę, że materiał genetyczny to kryształ aperiodyczny służący (dzięki temu, że jego struktura nie powtarza się) jako „zakodowany scenariusz”¹⁶¹⁹. W publikacjach biologicznych przed Schrödingerem nikt nie używał tego terminu¹⁶²⁰.

Według Jima Al-Khalili, iracko-brytyjskiego fizyka i Johnjoe’a McFaddena, irlandzko-brytyjskiego biochemika, „nowatorska” odpowiedź Schrödingera na pytanie, co to jest życie, wciąż budzi zdziwienie¹⁶²¹. Odpowiedź ta, udzielona więcej niż siedemdziesiąt lat temu, była inspiracją dla prac tych badaczy nad biologią kwantową. „[R]ozwiązanie Schrödingera najgłębszej tajemnicy życia było i wciąż jest tak rewolucyjne” – wyznają Al-Khalili i McFadden. W dalszej części książki autorzy szczegółowo omawiają, w czym tkwi oryginalność i ponadczasowość idei austriackiego fizyka. Piszą: „Zgodnie z tym, co [twierdził] [...] Schrödinger [...] życie jest odmienne od obiektów nieożywionych, ponieważ względnie mała ilość wysoko uporządkowanych cząsteczek, takich jak te wewnątrz genów albo ptasiego kompasu, może mieć znaczenie dla całości organizmu. To jest właśnie to, co [...] Schrödinger [nazywał] porządkiem z porządku. Kolor waszych oczu, kształt nosa, wasz charakter, poziom inteligencji, a nawet skłonność do chorób, to wszystko jest określone przez dokładnie czterdzieści sześć bardzo ściśle uporządkowanych supercząsteczek: DNA chromosomów, które odziedziczyliśmy po swoich rodzicach. Żaden z makroskopowych obiektów w znanym wszechświecie nie posiada takiego wpływu na strukturę materii na jej zupełnie fundamentalnym poziomie – poziomie, gdzie króluje mechanika kwantowa, a nie fizyka klasyczna. Schrödinger dowodzi, że to czyni życie tak wyjątkowym. W 2004 roku, siedemdziesiąt lat od publikacji książki Schrödingera, wreszcie zaczynamy doceniać zdumiewające implikacje niezwyklej odpowiedzi, jakiej udzielił na pytanie: co to jest życie?”¹⁶²²

4.3. KLUCZOWE POGLĄDY SCHRÖDINGERA NA FENOMEN ŻYCIA PODDANE REINTERPRETACJI

Świat przyrody ożywionej okazuje się znacznie bardziej skomplikowany, niż przewidywał w swej publikacji Schrödinger. Niezbędne są nowe ra-

¹⁶¹⁸ N. Lane, *Pytanie o życie. Energia, ewolucja i pochodzenie życia*, tłum. A. Tuz, Prószyński i S-ka, Warszawa 2016, s. 34.

¹⁶¹⁹ Por. tamże, s. 34–35.

¹⁶²⁰ Por. tamże, s. 35.

¹⁶²¹ Por. J. Al-Khalili, J. McFadden, *Życie na krawędzi...*, s. 55.

¹⁶²² Tamże, s. 72.

my koncepcyjne, by nadać sens zestawowi szczegółowych twierdzeń austriackiego fizyka. Twierdzenia te były wielokrotnie przez lata pogłębiane i sprawdzane różnymi narzędziami, dzięki czemu możliwe stało się głębsze wejście w kwintesencję definicji życia. W orbicie zainteresowań badaczy życia znalazły się między innymi następujące kwestie: *What is life?* a współczesna wiedza o pochodzeniu życia; „nieznane prawa” Schrödingera w świetle teorii informacji i inżynierii komunikacyjnej; hipotezy Schrödingera dotyczące kodowania i genomu a współczesne pojęcia programu i organizacji w biologii; termodynamika życia Schrödingera wobec danych współczesnej fizyki.

Niektórzy badacze uzgadniają *What is life?* ze współczesną wiedzą o pochodzeniu życia. Stuart A. Kauffman z perspektywy kilkudziesięciu lat analizuje główne tezy Schrödingera wyłożone w *What is life?* „Pięćdziesiąt lat temu w Dublinie – pisze Kauffman – czołowa postać nauki tego stulecia poprowadziła wykłady i przepowiedziała przyszłość dziedziny badawczej, która nie była jego własną. Powstała książka *What is life?* jest uznawana za stanowiącą w swoim czasie źródło inspiracji dla najbardziej błyskotliwych umysłów biologii, dając początek nauce o nazwie biologia molekularna [...]. »Książeczka« Schrödingera jest sama w sobie genialna, o czym świadczy jej reputacja. Niemniej, pół wieku później przy okazji jej honorowania, być może moglibyśmy ośmielić się zadać nowe pytanie: czy główna teza tej książki jest prawdziwa? Nie jest moim celem podważać czy ujmować zasług tak wspaniałej postaci, jaką był Schrödinger oraz ci, których on natchnął. Przeciwnie – tak jak wszyscy naukowcy zainspirowani jego ideami, również i ja dążę do dalszego poszukiwania”¹⁶²³. Amerykański biolog zastanawia się w szczególności nad słusznością głównego twierdzenia austriackiego fizyka mówiącego o tym, że duża aperiodyczna substancja stała jako stabilny nośnik dziedzicznych informacji jest konieczna do powstania życia i jego ewolucji. „Waham się zadać pytanie – pisze – ponieważ jestem w pełni świadomy tego, jak głęboko zakorzenione w naszym światopoglądzie od czasów Darwina i Weismanna – a także od rozwoju teorii plazmy zarodkowej, z genem jako niezbędną stabilną formą przechowywania zmienności dziedzicznej – są odpowiedzi udzielone przez samego Schrödingera, który mówił o powstawaniu »porządku z porządku«. Duże, aperiodyczne ciała stałe i mikrokod, o jakich wspominał Schrödinger, przerodziły się z czasem w DNA i kod genetyczny. Niemal wszyscy biolodzy są dziś przekonani, że takie autoreplikacyjne struktury molekularne i taki mikrokod są niezbędne z perspektywy życia. Przyznaję, że nie jestem do końca przekonany”¹⁶²⁴.

¹⁶²³ S.A. Kauffman, *What is life? Was Schrödinger right?*, s. 374.

¹⁶²⁴ Tamże.

Kauffman przypomina, że debata skupia się na zakresie, w jakim źródła porządku biologii tkwią głównie w stabilnych strukturach wiązań cząsteczek (centralne twierdzenie austriackiego fizyka) lub w zbiorowej dynamice układu takich cząsteczek¹⁶²⁵. W ocenie Amerykanina Schrödinger prawidłowo zwracał uwagę na kluczową rolę, jaką odgrywa mechanika kwantowa, stabilność molekularną oraz możliwość wystąpienia mikrokodu kierującego ontogenezą. Badacz twierdzi też, że ostateczne źródła samoreprodukcji i stabilności niezbędnej dla zmiany dziedzicznej, rozwoju i ewolucji, wymagając stabilności cząsteczek organicznych, mogą jednocześnie wymagać emergentnych, uporządkowanych własności w zbiorowych zachowaniach złożonych, nierównoważnych systemach reakcji chemicznych. Takie złożone układy reakcyjne (jak twierdzi amerykański biolog) mogą spontanicznie przekraczać próg lub przejście fazowe, po którym stają się zdolne do zbiorowej autoreprodukcji, ewolucji i doskonale uporządkowanych, dynamicznych zachowań. Ostateczne źródła porządku wymagane do emergencji i ewolucji życia mogą więc bazować na nowych zasadach zbiorowych, emergentnych zachowań w układach reakcyjnych znajdujących się daleko od równowagi.

W opinii Kauffmana spostrzeżenia Schrödingera były prawidłowe co do obecnej formy życia¹⁶²⁶. Powstawanie dużych, aperiodycznych ciał stałych wyposażonych w mikrokod, porządek z porządku, nie mogą być jednak – jak twierdzi amerykański biolog – ani konieczne, ani wystarczające do powstania i ewolucji życia. W przeciwieństwie do tego niektóre rodzaje stabilnej dynamiki grupowej mogą być konieczne i wystarczające dla formacji i podtrzymania życia. Kauffman zauważa też, że ostateczne źródła porządku mogą wymagać odrębnego porządku stabilnych wiązań chemicznych pochodzących od mechaniki kwantowej, jednak leżeć mogą gdzie indziej¹⁶²⁷. Ostateczne źródła porządku i samoreprodukcji wynikają prawdopodobnie z emergencji zbiorowo uporządkowanej dynamiki złożonych, chemicznych systemów reakcyjnych.

Kauffman pisze, że duża aperiodyczna substancja stała, nad którą niegdyś zastanawiał się Schrödinger, jest dziś powszechnie znana¹⁶²⁸. Odkąd Watson i Crick zauważyli, że matrycowa komplementarna struktura podwójnej helisy DNA przepowiedziała tryb replikacji, niemal wszyscy biolodzy przystali na taką lub inną wersję matrycowej komplementarności jako

¹⁶²⁵ Por. tamże.

¹⁶²⁶ Por. tamże.

¹⁶²⁷ Por. tamże, s. 375.

¹⁶²⁸ Por. tamże, s. 376.

koniecznej do powstania samoreprodukujących się układów cząsteczkowych. Obecnie ulubionymi pretendentami do tej roli zdają się być cząsteczki RNA lub niektóre podobne polimery. Istnieje nadzieja, że polimery mogą działać jako matryce dla własnej replikacji, jeżeli brak jakichkolwiek zewnętrznych katalizatorów. Badacz przekonuje jednak, że pojawienie się życia nie zależy od właściwości matrycowych DNA, RNA czy też innych podobnych polimerów, lecz korzenie życia sytuuje w katalizie i kombinatoryce chemicznej¹⁶²⁹. „Drogami do powstania życia mogą być szerokie bulwary prawdopodobieństwa, nie zaś zaułki rzadkiej przypadkowości”¹⁶³⁰ – pisze. Kauffman formułuje w tym miejscu następujące pytania: Czy takie kolektywnie autokatalityczne układy ewoluują oraz czy mogą rozwijać się bez genomu w sposób nam znany? A jeśli tak, jakie byłyby tego konsekwencje dla naszej tradycji od czasów Darwina, Weismanna, a nawet Schrödingera?¹⁶³¹ Jeśli układy samoreprodukcyjne mogą ewoluować bez trwałego i dużego repozytorium cząsteczkowego informacji genetycznej, wówczas teoria Schrödingera o dużych aperiodycznych substancjach stałych nie jest konieczna do wyjaśnienia powstania i rozwoju życia – konkluduje przywoływany autor¹⁶³².

Kauffman podkreśla, że (przynajmniej w eksperymentach komputerowych) takie kolektywne autokatalityczne układy mogą ewoluować bez genomu¹⁶³³. Używając dość realistycznych warunków termodynamicznych w modelu płynnych reaktorów, można udowodnić, że modelowe układy autokatalityczne mogą się faktycznie pojawić. Ponadto wykazano, że takie układy mogą osiągać i utrzymywać wysokie stężenie polimerów w modelach o dużych powierzchniach w obliczu tendencyjności dotyczącej rozszczepiania w środowisku wodnym. Dodatkowo tego rodzaju układy mogą „przetrwać”, jeżeli środowisko „żywieniowe” zostanie w pewien sposób zmodyfikowane, oraz „umrzeć” (zapaść się), gdy inne środki spożywcze zostaną usunięte z przepływu układu reaktora. Zdaniem amerykańskiego biologa przynajmniej *in silico* autokatalityczne układy mogą rozwijać się bez genomu. Żadna stabilna, duża struktura molekularna nie zawiera informacji genetycznej w powszechnie rozumianym znaczeniu tego słowa. Wręcz przeciwnie, grupa cząsteczek – reakcje, jakim są poddawane i jakie katalizują – stanowią poniekąd „genom” układu. Stabilne zachowanie dynamiczne tego samoreprodukującego się systemu reakcji stanowi podstawową dziedziczność, jaką on sam wykazuje. Zdolność do włączania nowych jednostek molekularnych (i być może także

¹⁶²⁹ Por. tamże, s. 380.

¹⁶³⁰ Tamże.

¹⁶³¹ Por. tamże, s. 380–381.

¹⁶³² Por. tamże, s. 381.

¹⁶³³ Por. tamże.

eliminacji starszych form cząsteczkowych) sama w sobie stanowi zdolność do wariacji dziedzicznej, to jest zmienności. Darwin dopowiada, że takie układy będą ewoluować na drodze selekcji naturalnej.

Powyższe rozważania prowadzą Kauffmana do wniosku, iż zaproponowany przez Schrödingera wymóg dużej aperiodycznej substancji stałej jako stabilnego nośnika informacji dziedzicznych nie jest konieczny do powstania życia i jego ewolucji¹⁶³⁴.

W świetle teorii informacji i inżynierii komunikacyjnej podejmowana jest również dyskusja nad „nieznanymi prawami” Schrödingera. Gerard Battail twierdzi, że w świetle doświadczenia zdobytego przez badaczy z dziedziny teorii informacji i inżynierii komunikacyjnej w ciągu ostatnich sześciu dekad, brakujące, nieznane w czasach Schrödingera „prawa fizyki” zostały „ujawnione”¹⁶³⁵. Przekonuje, że to, co jest potrzebne do opisywania świata, to (oprócz materii i energii) informacja. Informacja była znana jako podstawowa jednostka w pracy Schrödingera, ale nabyła status jednostki naukowej kilka lat później, począwszy od przełomowej pracy Shannona¹⁶³⁶. Zdaniem Battaila granica między układami ożywionymi i nieożywionymi polega na tym, że te pierwsze wykorzystują informację, a drugie nie. Badacz zatem sugeruje, że nie ma wielkości fizyczno-kwantowych, z natury nieprecyzyjnych, związanych z „małymi” liczbami atomów. To informacja, jako „jednostka nominalna” (ang. *nominal entity*), kontroluje właściwości istoty żywej. Aby wyjaśnić, co należy rozumieć przez pojęcie „jednostka nominalna”, autor korzysta z konkretnego przykładu numeru telefonicznego. Píše: „Chcę zadzwonić do pana Dupont, którego numer telefonu to 0123456789, ale błędnie wybrałem 0123456788. W rezultacie nie udało mi się do niego zadzwonić. I rzeczywiście wybrany numer różni się tylko jedną cyfrą od numeru pana Dupont, ale bliskość nie ma tu znaczenia; jest to ten sam negatywny wynik jako sekwencji różniącej się od prawidłowej jedną wśród wszystkich 10 cyfr, na przykład 1234567890. Wyraźnie numery telefonów, które odpowiadają różnym użytkownikom, nie mogą być uważane za bardziej lub mniej zbliżone do siebie: każdy jest unikalny. Są one określane jako jednostki nominalne”¹⁶³⁷. Jednostka nominalna to sekwencja jednoznacznie identyfikująca coś lub kogo¹⁶³⁸.

¹⁶³⁴ Por. tamże.

¹⁶³⁵ Por. G. Battail, *An answer to Schrödinger's 'What is life?'*, „Biosemiotics”, 4 (2011), s. 58.

¹⁶³⁶ Por. tamże, s. 59.

¹⁶³⁷ Tamże.

¹⁶³⁸ Por. tamże. Pomysł jednostki nominalnej nie jest nowy. W ciągnącej się przez całe stulecia debacie jedni przyjmowali, że gatunki istnieją realnie, inni uważali, że tylko indywi-

Battail podkreśla, że informacja odgrywa istotną rolę (nie w pełni rozpoznaną) przyłączeniu abstrakcji i konkretności¹⁶³⁹. W związku z tym wykazuje ona właściwości radykalnie różne od tych materii i energii, które potrzebują być w pełni zrozumiałe. Badacz wskazuje na leksykalny problem związany z pojęciem informacji. Jedno słowo „informacja” jest używane do oznaczania jednocześnie bytu, jego ilościowej jednostki miary oraz obiektu posiadającego ten byt jako atrybut. „Informacja” jest używana do wyznaczania klasy równoważności między sekwencjami, komunikacji między jednostkami i ilościowej miary zdolności jednostki do komunikowania się.

Kolejną conceptualną trudnością jest to, że informacja jako klasa równoważności, jest bardzo abstrakcyjnym pojęciem i możliwe są inne znaczenia tego słowa¹⁶⁴⁰. Materia i energia są zachowywane, a tym samym mogą być wymieniane, informacja natomiast nie istnieje autonomicznie w świecie fizycznym, ale musi być przenoszona przez jakieś fizyczne medium, substrat lub falę. Oznacza to, że pozostaje ona w ostrym kontraście z materią i energią. Informacja może być unicestwiona, gdy inna informacja zajmie jej miejsce na nośniku. Może ona również być reprodukowana: informacje zapisane na nośniku mogą być kopiowane na inny nośnik, z którego może być powielana, co oznacza, że początkowa informacja może się reprodukować. Fizyczne wsparcie dla informacji ma w sobie właściwości materii i energii, radykalnie obce dla tych informacji. Zapis z informacją na nośniku fizycznym jest jednak konieczny do umożliwienia interakcji informacji ze światem fizycznym, tym samym może nadawać jej „realności”. Ponadto informacja jest podmiotem nominalnym – jako klasa równoważności pomiędzy sekwencjami może być reprezentowana przez „wiadomość informacyjną” określoną jako najkrótsza binarna sekwencja należąca do tej klasy¹⁶⁴¹. Numeracja binarna ustanawia stosunek jeden do jednego między wszystkimi „wiadomościami” informacji i całkowicie naturalną informacją, która jest nominalnym bytem ze względu na swoje unikalne właściwości arytmetyczne¹⁶⁴². Każde dwie jednostki nominalne są identyczne lub różne.

Battail zauważa, że można zdefiniować dowolny zestaw zdarzeń losowych jako „rozmnażanie” informacji¹⁶⁴³. „Potencjalne” informacje będą w stanie współdziałać z fizycznymi urządzeniami tylko wtedy, gdy generują

dua (ang. *nominal entities*) są prawdziwe. Ten spór miał swoje źródło w rozbieżnych interpretacjach Arystotelesa i Platona, które pojawiły się u Porfiriusza. Por. tamże, s. 59–60.

¹⁶³⁹ Por. tamże, s. 60.

¹⁶⁴⁰ Por. tamże.

¹⁶⁴¹ Por. tamże, s. 60–61.

¹⁶⁴² Por. tamże, s. 61.

¹⁶⁴³ Por. tamże, s. 63.

jednowymiarową sekwencję symboli z alfabetu zapisanego na nośniku fizycznym. Sekwencja taka przenosi wówczas informacje „symboliczne”. Może być kopiowana, gdyż jej obsługa jest jednowymiarowa: początkowa sekwencja może następnie działać jako matryca. Zbudowane z semantycznych zasad informacje „symboliczne” mogą działać jako przepis na budowę fenotypu, czyli obiektu czterowymiarowego (trzy przestrzenne wymiary plus czas). Ten obiekt to nośnik informacji „strukturalnej” (lub arystotelesowskiej). Najprostszym przykładem takiej receptury jest „kod genetyczny”, gdzie semantyczne zasady kojarzą triplety nukleotydów (kodony) z aminokwasami. Możemy wielokrotnie kopiować informacje symboliczne i używać ich jako przepisu w rozprzestrzenianiu identycznych obiektów. Informacje „strukturalne” nie mogą być kopiowane ani wykorzystywane jako przepis (recepta) replikacji przedmiotu. Obiekt nie może być powielany, chyba że nosi swój opis w formie symbolicznej. Informacje „symboliczne” stosowane jako przepis dla replikacji żywego przedmiotu Battail nazywa genomem. „Potencjalne” informacje mogą stawać się „symboliczną” informacją poprzez zapis. Powoduje to zamianę informacji „symbolicznej” na informację „strukturalną”, zgodnie z regułą semantycznych przepisów. Battail rozważa także pewną część przedmiotu (będącą nośnikiem fizycznym symbolicznej sekwencji, na przykład genomu), która jest niezbędna dla replikacji bytu ożywionego¹⁶⁴⁴. Informację związaną z tą sekwencją jednostki nominalnej definiuje on jako tożsamość tego przedmiotu. Autor sugeruje, że obiekt jest uporządkowany, jeżeli można go identycznie powielać, a więc posiada własny symboliczny opis działania jako przepis na jego budowę i utrzymanie¹⁶⁴⁵. Innymi słowy, replikacja uporządkowanego obiektu nie przynosi żadnych innowacji do jego kontekstu: to tylko utrzymanie już istniejących informacji, które po prostu zostają wpisane na jedno więcej wsparcie fizyczne.

Battail twierdzi, że obraz świata żywego i jego relacji ze światem nieożywionym odsłania głęboki paradoks, co wynika z poniższych stwierdzeń¹⁶⁴⁶:

- świat nieożywiony w opisie fizyki statystycznej jest bogaty w niewyobrażalnie ogromną liczbę zdarzeń losowych, zatem niesie dużą ilość „potencjalnych” informacji,
- świat ożywiony jest zdominowany przez informację „symboliczną” genomów,
- świat ożywiony ukazuje się nam jako niezwykle zróżnicowany i skontrastowany, stąd bogaty w informację.

¹⁶⁴⁴ Por. tamże.

¹⁶⁴⁵ Por. tamże, s. 64.

¹⁶⁴⁶ Por. tamże, s. 64–65.

Powyższy paradoks jest spowodowany zmianą skali: życie funkcjonuje tak, że niektóre zdarzenia na poziomie atomowym dają konsekwencje w skali makroskopowej¹⁶⁴⁷. Battail pisze: „Niewyobrażalnie ogromna liczba ulotnych zdarzeń występuje w świecie nieożywionym na poziomie atomowym (Schrödinger pyta, z udawaną naiwnością: »Dlaczego atomy są tak małe?«). Zmierzające do zachowania informacji życie skutkuje w ostatnich organizmach (jako gatunków z niskim prawdopodobieństwem, że ich genomy są mylone z każdym innym) ich długowiecznością. Co istotne, cząsteczki DNA uniknęły skali atomowej w jednym z swoich wymiarów, niosąc symboliczne sekwencje tak długo, aby umożliwić wystarczająco efektywne korekcje błędów. Niskie prawdopodobieństwo błędu nabyte w ten sposób łączy ich wytrwałość (ang. *persistence*) z geologiczną skalą czasu”¹⁶⁴⁸.

Autor wyciąga ze swych rozważań konkretne wnioski¹⁶⁴⁹:

- korzystanie z informacji jako podstawowej jednostki naukowej zdecydowanie poprawia rozumienie życia i jego relacji ze światem nieożywionym,
- bardzo duża ilość pracy pozostaje do zrobienia, zanim ta uwaga zostanie w pełni zastosowana do biologii,
- sama informacja powinna być lepiej znana i spopularyzowana wśród biologów; badania teorii informacji wydają się lepiej dopasowane do potrzeb biologii,
- nie tylko biologia, ale sama fizyka (szczególnie w zakresie, w jakim ma na celu integrację obserwatora fenomenu życia jako nieuniknionego aktora eksperymentu) powinna uznać rolę informacji i niezwykłość jej właściwości w porównaniu z podstawowymi jednostkami fizyki klasycznej.

W jaki sposób „fizykę dziedziczności” Schrödingera konfrontuje się ze współczesną wiedzą na ten temat? Stuart A. Kauffman z perspektywy kilkunastu lat od ukazania się *What is life?* zastanawia się nad następującą kwestią: skoro teoria Schrödingera nie jest konieczna, aby wyjaśnić genezę życia, to może aperiodyczna stała substancja DNA nie jest też wystarczająca do wyjaśnienia dziedzicznej różnorodności?¹⁶⁵⁰ Amerykański biolog stara się wykazać, że mikrokod uzależniony od dużej aperiodycznej substancji stałej nie wystarcza, by zapewnić porządek. Pisze: „Genom określa szeroką sieć aktywności równoległego przetwarzania. Dynamiczne zachowanie takiej sieci może być katastrofalnie chaotyczne, uniemożliwiając dowolnie wybranej jednostce dziedziczności bycie częścią wielce zróżnicowanych zachowań kodowanego systemu. Kodowanie w stabilnej konstrukcji, takiej jak DNA,

¹⁶⁴⁷ Por. tamże, s. 65.

¹⁶⁴⁸ Tamże.

¹⁶⁴⁹ Por. tamże.

¹⁶⁵⁰ Por. tamże, s. 382.

nie może samo w sobie zapewnić, że tak zakodowany układ zachowa wystarczający porządek dla selekcyjnej zmienności dziedzicznej”¹⁶⁵¹. Ponadto badacz sugeruje, że kodowanie dużej, stabilnej i aperiodycznej substancji stałej takiej jak DNA nie jest konieczne, aby osiągnąć stabilne zachowanie dynamiczne będące warunkiem selekcyjnej zmienności dziedzicznej, zarówno w przypadku prymitywnych układów autokatalitycznych, jak i bardziej zaawansowanych organizmów. Kauffman sugeruje więc, że korzystanie przez organizmy z aperiodycznej substancji stałej jako stabilnego nośnika informacji genetycznej nie jest wystarczające, aby zapewnić porządek¹⁶⁵². Zakodowany układ nadal może być chaotyczny. Wymagane może być natomiast bycie otwartym układem termodynamicznym przez układ zdolny odrzucić informacje bądź stopnie swobody wystarczająco szybko, by zrównoważyć fluktuacje termiczne oraz inne wahania.

Kauffman podkreśla, że po blisko trzech dekadach badań stało się jasne, że duże sieci logiczne działają w jednym z trzech schematów (algorytmów) – chaotycznym, porządkowym i złożonym, balansującym na pograniczu porządku i chaosu¹⁶⁵³. Z tej trójki – jak twierdzi – na największą uwagę zasługuje spontaniczne pojawienie się porządkowego schematu koordynującego aktywności tysięcy binarnych zmiennych. Taki spontaniczny i zarazem kolektywny porządek może być jednym z głębszych źródeł porządku w całym świecie biologicznym.

Badacz przedstawia „bardzo dramatyczną”, jak określa, implikację samoorganizacji¹⁶⁵⁴. Od czasów Darwina funkcjonuje przekonanie, że dobór jest jedynym źródłem porządku biologicznego. Podstawą jest pozornie oczywiste założenie, że organizmy są sprytnie skonstruowanymi maszynami, będąc połączeniem zasad konstrukcyjnych, przypadku i konieczności. Dla Amerykanina taki pogląd jest niewystarczający: „Darwin nie znał siły samoorganizacji. Nie da się ukryć, że trudno samemu dostrzec tę siłę. Taka samoorganizacja – od powstania życia do jego spójnej dynamiki – musi odgrywać kluczową rolę w naszej historii życia, czy nawet – zaryzykuję – w każdej historii życia. Niemniej Darwin miał również sporo racji. Dobór naturalny cały czas ma miejsce. Nie pozostaje nam więc nic innego jak na nowo prze-myśleć teorię ewolucji. Naturalna historia życia jest swojego rodzaju małżeństwem samoorganizacji i selekcji. Musimy zacząć postrzegać życie w nowych ramach i zgłębić nowe prawa jego rozwoju”¹⁶⁵⁵.

¹⁶⁵¹ Tamże.

¹⁶⁵² Por. tamże, s. 387.

¹⁶⁵³ Por. tamże, s. 384.

¹⁶⁵⁴ Por. tamże, s. 390.

¹⁶⁵⁵ Tamże.

Kauffman nie ma wątpliwości, że Schrödinger poprawnie przewidział opieranie się życia na strukturze dużych aperiodycznych substancji stałych¹⁶⁵⁶. Stabilność tych substancji miała dostarczyć trwałego nośnika materiału informacji genetycznej. Mikrokod znajdujący się w takim materiale określałby rozwój organizmu. Kwantowe zmiany w materiale miały natomiast być niewielkie, rzadkie i stanowić mutacje. Niemniej, na bardziej fundamentalnym poziomie Kauffman zastanawia się, czy Schrödinger faktycznie miał rację w tej kwestii? Czy pamięć strukturalna aperiodycznej substancji stałej na pewno jest niezbędna dla istnienia życia jako całości? W odpowiedzi stwierdza: „Z pewnością, jeśli potraktować cząsteczki organiczne z wiązaniami kowalencyjnymi jako małe »aperiodyczne substancje stałe«, argument Schrödingera nie jest całkowicie błędny. Przynajmniej dla form życia opartych na węglu potrzeba odpowiednio silnych wiązań, aby być stabilnym w danym środowisku. Jednak, *suma summarum*, to zachowania zbiorów tych cząsteczek – nie one same – tworzy życie na Ziemi i przynajmniej w domniemaniu jest podstawą wielu potencjalnych form życia w dowolnym miejscu we wszechświecie”¹⁶⁵⁷. Organizmy żywe Kauffman postrzega jako kolektywnie autokatalityczne układy molekularne. Sugeruje, że pojawienie się samoreprodukujących się układów molekularnych nie wymaga obecności dużych, aperiodycznych substancji stałych, gdyż ograniczona ewolucja takich układów zasadniczo nie zależy od ich udziału. Również ani dynamiczny porządek, ani dziedziczna wariacja nie są zapewnione przez aperiodyczne substancje stałe, które kodują strukturę i niektóre oddziaływania wielu innych cząsteczek. Zamiast tego – jak twierdzi autor – dziedziczne wariacje występujące w samoreprodukujących się układach chemicznych (na podstawie których przekonująco funkcjonować może dobór naturalny) wymagają stabilności dynamicznej. To z kolei może być osiągnięte za pomocą układów termodynamicznych, które zbiegają się w wystarczającym stopniu w swojej przestrzeni ciągów, by móc wyrównać wahania wynikające w pierwszej kolejności z faktu, że jedynie niewielka liczba cząsteczek bierze czynny udział w całym procesie.

Amerykański biolog podkreśla, że pod żadnym pozorem nie krytykuje Schrödingera za to, że ten nie brał pod uwagę samoorganizacyjnych zachowań otwartych układów termodynamicznych¹⁶⁵⁸. Przypomina, że badanie takich układów rozpoczęło się stosunkowo niedawno i w dalszym ciągu nie jest szczególnie zaawansowane. Zdaniem badacza możemy powiedzieć ze

¹⁶⁵⁶ Por. tamże.

¹⁶⁵⁷ Tamże.

¹⁶⁵⁸ Por. tamże.

stuprocentową pewnością tylko to, iż rodzaje samoorganizacji, które zaczynamy dostrzegać w otwartych układach termodynamicznych, mogą zmienić nasz pogląd na temat ewolucji życia. „Schrödingerowi – konkluduje Kauffman – i tak udało się przewidzieć naprawdę sporo. Możemy tylko życzyć sobie, by jego mądrość towarzyszyła nam i dziś, co z pewnością pozwoliłoby uczynić tę pracę nieco bardziej rozbudowaną”¹⁶⁵⁹.

Kwestia stabilności systemów biologicznych jest znacznie bardziej złożona niż Schrödinger mógł zakładać w latach czterdziestych XX wieku – twierdzi Vasily V. Ogryzko¹⁶⁶⁰. Dla austriackiego fizyka najbardziej oczywistą manifestacją biologicznej stabilności była dziedziczność. Ogryzko twierdzi, że obecne epigenetyczne badania podkreślają dziedziczne aspekty epigenetycznego zjawiska. Jednak to skupienie na dziedziczności niepotrzebnie ogranicza zasięg epigenetyczny. Píše on: „Wyróżnione jako terminalne komórki żyją przez dekady, utrzymując swoją wyraźnie odmienną cechę fenotypową na przekór środowiskowym stresom, termicznym ruchom i mechanizmowi DNA naprawiania uszkodzeń. Te komórki nie rozprzestrzeniają się, zatem termin »dziedziczny« nie ma zastosowania do ich cech”¹⁶⁶¹. Badacz wprowadza określenie „stabilność epigenetyczna”, które odnosi do szerszego zjawiska obejmującego utrzymanie fenotypowych cech w obydwu (niereplikujących i replikujących) komórkach, niezależnie od sekwencji DNA. Przeciwstawia sobie dwa rodzaje potencjalnych mechanizmów stabilności epigenetycznej i omawia je z punktu widzenia przedstawianego przez Schrödingera¹⁶⁶². Podczas gdy pierwszy rodzaj, który Ogryzko określa mianem „epigenetycznego szablonu (wzornika)”, nie oddala się daleko od punktu widzenia biologii molekularnej na zjawisko życia, analiza drugiego – rozpatrywanego z punktu widzenia biologii systemów – mogłaby prowadzić do daleko sięgających zmian w naszym rozumieniu fizycznych zasad przetwarzania informacji w żywych komórkach. Idee Schrödingera zdaniem rosyjskiego badacza wydają się przydatne do tego unowocześnienia.

Chociaż istnienie mechanizmów epigenetycznych kłóci się z „genocentrycznym poglądem na życie”, nie kwestionuje bezpośrednio (jak twierdzi Ogryzko) „centralnego dogmatu” biologii molekularnej wyjaśniającego, jak informacja genetyczna jest odszyfrowywana, by dawać początek biologicznemu uporządkowaniu¹⁶⁶³. Badacz zauważa, że to Crick sformułował „cen-

¹⁶⁵⁹ Tamże.

¹⁶⁶⁰ Por. V.V. Ogryzko, *Erwin Schrödinger, Francis Crick...*

¹⁶⁶¹ Tamże.

¹⁶⁶² Por. tamże.

¹⁶⁶³ Por. tamże.

tralny dogmat” ostrożnie, jako „szczegółowy transfer część za częścią kolejnych informacji” z białek do kwasów nukleinowych lub innych białek. Ta definicja pozostawia „otwarte drzwi” dla innych typów informacji, które mogą być wymagane do określenia stanu organizmu i mogą rozchodzić się niezależnie od sekwencji DNA.

Ogryzko w odniesieniu do mechanizmu utrwalania epigenetycznej informacji, która jest oparta w sposób uprzywilejowany na aktywności enzymów (nanoszących szczególny epigenetyczny ślad w kompleksach makromolekularnych i zawierających taki sam ślad), używa terminu „epigenetyczne szablونowanie (oznaczanie, znakowanie)” (ang. *epigenetic templating*)¹⁶⁶⁴. Badacz powyższy termin wyjaśnia, odwołując się do konkretnych przykładów biologii molekularnej. „Niedawno zaproponowany – pisze – semikonserwatywny mechanizm duplikowania nukleosomu może oznaczać, że epigenetyczne szablونowanie, działa również dla śladów chromatynowych różnego rodzaju, jak na przykład różnych histonów. Wszystkie rodzaje histonu H3 tworzą tak zwane homotypowe nukleosomy, mające obydwie cząsteczki H3 tego samego typu w oktamerze histonowym. Jednakże nowe histony H3 składają się na DNA tylko w formie dimerów H3/H4; zatem mechanizm składania musi dopasować typy nowych i starych histonów H3, jeśli ma być utrzymany homotypowy nukleosom. Taki mechanizm mógłby przyczynić się do zrozumienia roli CenpA, centromerowej – specyficznej wersji histonu H3, w epigenetycznym utrzymaniu centromerowej struktury niezależnej od sekwencji DNA”¹⁶⁶⁵.

Autor przekonuje, że model niektórych kinaz białkowych przypomina epigenetyczne modelowanie operujące również w cytoplazmie¹⁶⁶⁶. Pisze: „Kinazy tyrozynowe często zawierają domeny SH2, które rozpoznają fosfotyrozynę, podczas gdy niektóre serynowe/treoninowe kinazy zawierają domeny FHA, które rozpoznają fosfoserynę/fosfotreoninę. Te strukturalne cechy są zwykle rozumiane jako sygnalizujące kaskadowe sygnały modelu z fosfoproteiną A, modulując kinazę białkową do białka B. Jednakże jeśli niektóre z kinaz dążą do tworzenia dimerów (lub oligomerów), mogą znacznie utrzymywać swój stan fosforylacji”¹⁶⁶⁷. Epigenetyczną informację, złączoną z wieloma kinazami obecnymi w cytoplazmie, autor klasyfikuje jako transoddziaującą, to jest nieposiadającą żadnej konkretnej lokalizacji genomowej. Taki wybór terminologii zdaniem Ogryzko pozwala rozróżnić ją od epigenetycznej informacji cis-oddziałującej sprzężonej z chromatyną, która

¹⁶⁶⁴ Por. tamże.

¹⁶⁶⁵ Tamże.

¹⁶⁶⁶ Por. tamże.

¹⁶⁶⁷ Tamże.

proceedzi do metylowania DNA, potranslacyjnych modyfikacji histonowych, alternatywnych histonów i tak dalej.

Rosjanin podkreśla, że zmiana modelu transdukcji sygnału na epigenetyczny, może być użyteczna dla badań wielu innych modyfikacji białek i nawet interakcji pomiędzy makrocząsteczkami¹⁶⁶⁸. „Przypuśćmy – pisze – że szukamy domeny białka rozpoznającej ADP-rybozylowaną lizynę. Możliwość, że pewna ADP-rybozylaza mogłaby być wykonawcą epigenetycznego modelowania, pokaże nam, że ten właśnie enzym powinien wieść prym w poszukiwaniu domen rozpoznających ADP-rybozylowaną lizynę – pomyśl raczej zaskakujący z punktu widzenia układu kaskadowego”¹⁶⁶⁹. Zdaniem badacza przyszłe badania powinny ujawnić, w jak dużym stopniu ten model, obiecujący dopełnić „centralny dogmat” biologii molekularnej, mógłby wyjaśnić stabilność zjawiska epigenetycznego.

Ogryzko przedstawia następnie podejście do epigenetycznej stabilności i problemu fluktuacji z punktu widzenia biologii systemów¹⁶⁷⁰. Dla niego nie jest zaskakujące, że Crick, ojciec „centralnego dogmatu”, sformułował idee wykraczające poza jego granice¹⁶⁷¹. Dodaje, że chociaż z przewagą genocentrycznego poglądu na życie, idea epigenetycznego modelowania zachowuje zgodność z ogólnym duchem biologii molekularnej, który (podążając za Schrödingerem) poszukuje klucza życia w strukturze molekularnej. Zauważa, że model ten dzieli z mechanizmem replikacji DNA Watsona i Cricka jedną zasadniczą cechę wspólną – lokalizowany „kawałek po kawałku” sposób przechowywania i przenoszenia informacji, która jest magazynowana w poszczególnych stanach makromolekuł (na przykład modyfikacja białka) i jej przenoszenie polega na kontaktach międzycząsteczkowych i fizycznych sprzężeniach pomiędzy różnymi działaniami (modyfikacja–depozycja i modyfikacja–rekognicja). Zdaniem badacza taki model ma tę zaletę, jaką jest możliwość zbadania przez tradycyjne biochemiczne doświadczenia w systemach wolnych komórek. Jednak czy to jedyna metoda? Odpowiadając, stwierdza, że ostatnie unowocześnienie w technologiach „omics”¹⁶⁷² otworzyło drogę do analizy życia z różnych perspektyw¹⁶⁷³. Ponowne odkrycie, że życie w rzeczywistości jest zjawiskiem kompleksowego systemu, prowadzi do radykalnie nowego podejścia w wyjaśnieniu stabilności biologicznego

¹⁶⁶⁸ Por. tamże.

¹⁶⁶⁹ Tamże.

¹⁶⁷⁰ Por. tamże

¹⁶⁷¹ Por. tamże.

¹⁶⁷² *Omics* – angielski neologizm językowy, odnosi się do obszarów badań w biologii, jak na przykład *genomics* – genomowy.

¹⁶⁷³ Por. tamże.

porządku, opartego na całościowych dynamicznych właściwościach układów żywnionych. Zdolność sieci genów regulacyjnych do posiadania wielokrotnych alternatywnych elementów przyciągających była długo przypisywana stabilności różnych wzorów wyrażających geny podczas rozróżniania komórek. Bardziej ogólny i pokrewny pogląd porównuje organizację i dynamikę wewnątrzkomórkowej struktury do uporządkowania generowanego spontanicznie w układach termodynamicznych, daleko od punktu równowagi. W przeciwieństwie do przypadku „epigenetycznego modelowania” epigenetyczne czynniki określające organizację komórkową w takim podejściu do biosystemu nie mogą być śledzone do konkretnej struktury molekularnej albo do jakiejś innej „małej części układu biologicznego”. Ten rodzaj epigenetycznej informacji ma status całościowy, przedstawiający jedną możliwość ze spektrum możliwych stałych stanów w dynamice całego układu.

Ogryzko zastanawia się nad tym, jak wiarygodne jest podejście systemowe w odniesieniu do epigenetycznej stabilności¹⁶⁷⁴. W tym kontekście wspomina o problemie, który określa „klątwa małej liczby”. Píše: „Szorstkim rzeczywistym testem, zmierzającym się z nimi, jest wrodzona głośność wewnątrzkomórkowej dynamiki spowodowana małą liczbą uczestniczących cząsteczek. Zmienność w liczbie cząsteczek transkrypcyjnych regulatorów kwestionuje rolę dynamiki sieci genów w stabilności wzorów wyrażających gen [...]. »Kłątwa małej liczby« ciąży w równym stopniu, gdy koncepcje płynące z nierównowagowej statystyki fizycznej i klasycznej kinetyki chemicznej, które pracują racjonalnie dobrze w skali makroskopowej, są zastosowane do organizacji nanoobiektów, z przedziału jak komórki bakteryjne lub eukariotyczne, mając tylko kilka kopii z wielu witalnych molekularnych składników”¹⁶⁷⁵. Badacz zauważa, że problem „małej liczby” pogarszają dwa czynniki: olbrzymia różnorodność różnych rodzajów cząsteczek obecnych w nawet najprostszej żywej komórce oraz konieczność wzięcia pod uwagę miejscowego kontekstu każdej cząsteczki¹⁶⁷⁶. Obydwa prowadzą do bardzo wielkiej liczby zmiennych koniecznych do opisanie stanu komórki. Ogryzko wyraża pogląd, że biologia molekularna mówi nam, że im więcej uczymy się o powiązaniach wewnątrzkomórkowego zarządzania, tym więcej znajdujemy funkcyjnych różnic pomiędzy cząsteczkami tego samego rodzaju, zgodnie z ich wieloma modyfikacjami i ich jednostkowym, wewnątrzkomórkowym rozmieszczeniem¹⁶⁷⁷. Píše: „Jeśli w duchu podejścia »omics«, rozważymy wszystkie te informacje jako będące zasadniczymi dla kompletnego

¹⁶⁷⁴ Por. tamże.

¹⁶⁷⁵ Tamże.

¹⁶⁷⁶ Por. tamże.

¹⁶⁷⁷ Por. tamże.

opisu dynamiki wewnątrzkomórkowej, liczba różnorodności rozszerza się drastycznie, razem z kosztem utrzymania fluktuacji pod kontrolą. Odzwierciedla to fakt, że wzrost zdolności rozdzielczej w naszym opisie stanu komórki jest odwrotnością surowej procedury, używanej w mechanice statystycznej do przejścia ze szczegółowego mikroskopowego opisu układów fizycznych, do ich opisu w warunkach makroskopowych stopni swobody, przez uśrednianie wszystkich nieistotnych zmiennych. Tak więc, im więcej informacji o komórce traktujemy jako zasadnicze, tym mniej możemy polegać na prawach dużych liczb do określania stabilności dynamiki wewnątrzkomórkowej”¹⁶⁷⁸.

Czy lekcja otrzymana z *What is life?* mogłaby okazać się pomocną w rozwiązaniu powyższego problemu? Ogryzko odpowiada, że bardzo podobny problem „małej liczby” był powodem wiary austriackiego fizyka w to, że „nowa fizyka” powinna być wykorzystana do wyjaśnienia stabilności biologicznego uporządkowania i dla promowania struktury molekularnej jako bazy dziedziczności genetycznej¹⁶⁷⁹. Przypomina logikę Schrödingera: „Podczas gdy stabilność większości makroskopowych zjawisk jest oparta na uśrednianiu właściwości dużej liczby elementów biorących udział i zachowujących się chaotycznie, to w poziomie mikro cząsteczki są prowadzone wspólnie przez prawa mechaniki kwantowej, a ich struktura i skład są niepodatne na statystyczne fluktuacje. Zasady kwantowe musiałyby mieć określone znaczenie dla stabilności biologicznego uporządkowania, gdzie w wyraźnym kontraście do układów termodynamicznych niewiarygodnie mała grupa atomów (dużo za mała, by przejawiać precyzyjne statystyczne prawa) gra dominującą rolę w bardzo uporządkowanych i dozwolonych zdarzeniach wewnątrz organizmu żywego”¹⁶⁸⁰. Zdaniem Ogryzko analiza Schrödingera była efektownie potwierdzona przez dalszy postęp genetyki molekularnej. Ta założyła ponad wszelką wątpliwością główną rolę kowalencyjnego kręgosłupa cukier-fosforan DNA w zdolności systemów biologicznych do niesienia dowolnych ilości informacji genetycznej. Pomysł struktury molekularnej jako bazy dla przechowywania pamięci jest dla Ogryzko jednakowo spójny z modelem „epigenetycznego modelowania”.

Badacz formułuje kolejne pytanie: czy zasady kwantowe mogą okazać się pożyteczne w wyjaśnieniu epigenetycznej stabilności? Odpowiadając, stwierdza, że na pierwszy rzut oka odwoływanie się do mechaniki kwantowej w celu rozwiązania problemu zmienności wydaje się tylko komplikować

¹⁶⁷⁸ Tamże.

¹⁶⁷⁹ Por. tamże.

¹⁶⁸⁰ Tamże.

sytuację¹⁶⁸¹. W teorii kwantowej wymiarowość złożonego układu nie wzrasta liniowo z liczbą jego części składowych, ale gwałtownie. Liczba zmiennych używanych do opisywania dynamiki wewnątrzkomórkowego mnożenia, potrzebna do utrzymania wszystkich fluktuacji pod kontrolą, musi zatem wzrastać w postępie geometrycznym. Czy nie będzie więc rozsądniej przestrzegać biologicznego zastosowania teorii kwantowej tylko do doskonałych w czasie badań struktury molekularnej i oddziaływań wewnątrzkomórkowych? W odpowiedzi badacz stwierdza, że nie wydaje się to najlepszą strategią. Píše: „Kwantowa teoria jest ogólną teorią stabilności materii, niezastąpioną dla zrozumienia zachowania obiektów zarówno małych, jak i dużych. Będąc szczególnym przypadkiem skondensowanego znaczenia fizycznego, jest bardzo nieprawdopodobne, by fizyka życia mogła być zrozumiana prawidłowo bez teorii kwantowej. Jako że udoskonalamy nasze technologie do wyższych rozdzielczości, opisywanie wewnątrzkomórkowej dynamiki rozpoczynające się od pierwszych (na przykład kwantowo-mechanicznych) zasad będzie wzrastająco ważne. Również trwający postęp w »omics« i nanotechnologiach może nas prawdopodobnie doprowadzić do poznania granic tego, jak wiele można zaobserwować odnośnie do indywidualnego biologicznego obiektu (na przykład pojedyncza komórka). Naturalnym językiem do rozpatrywania tych granic może być formalizm teorii kwantowej. Jakkolwiek ekscentryczne może się to wydawać, taka linia pytań obiecuje przyniesienie niespodzianek w rozumieniu życia”¹⁶⁸².

Za najbardziej stosowne do „zrobienia skoku” na kwantowomechaniczny opis systemów biologicznych Ogryzko uważa kwantowe splątanie, będące jedną z najbardziej nieklasycznych cech nowoczesnej fizyki¹⁶⁸³.

¹⁶⁸¹ Por. tamże.

¹⁶⁸² Tamże.

¹⁶⁸³ Por. tamże. „Splątanie” wyraża ideę, że zdarzenie zachodzące w pewnym miejscu ma natychmiastowy wpływ na to, co dzieje się w innym miejscu, bez względu na to, jak te miejsca są od siebie oddalone. Prawdopodobnie „magnetorecepcja” (zdolność do wykrywania nawet bardzo słabego stałego pola magnetycznego Ziemi) motyli czy ptaków (klasyczne badania prowadzone były na rudzikach) jest możliwa dzięki efektowi „splątania kwantowego”. Por. J. Al-Khalili, J. McFadden, *Quantum coherence and the search for the first replicator* [w:] A.K. Pati, P.C. W. Davies, D. Abbott (eds), *Quantum aspects of life*, s. 184–214. Einstein do końca życia tłumaczył, że jeżeli z teorii wynika splątanie, to znaczy że teoria „jest do niczego”. Dziś wiemy, że nie miał racji. Warto podkreślić, że problem splątania kwantowego zahacza o problem organizacji, a dokładnie ociera się o zagadnienie relacji między częścią a całością. Splątanie kwantowe jest właśnie takim efektem, który uświadamia, że całość to jest coś innego niż zbiór części. W mechanice kwantowej dwa podukłady można rozdzielić, ale jeśli znajdują się w stanie splątanym, to gdy je zmienimy, natychmiast zmienia się stan kwantowy. To jest koherencja kwantowa. Okazuje się, że w mechanice kwantowej jeśli jest znany stan całości i zaistnieje potrzeba wiedzy o jednej jej części, to odpowiedź na to

Twierdzi, że jest to uniwersalna własność układów fizycznych złożonych z interaktywnych części. Chodzi o korelację pomiędzy przestrzennie rozdzielonymi zdarzeniami, które nie są przyczynowo pokrewne, przez co dostarczają nowego rodzaju uporządkowania, nieoczekiwanego zgodnie z klasycznym punktem widzenia. Badacz dowodzi, że stan splątany może być zdumiewająco trwały i istnieć w wysokich temperaturach w systemach materialnych. Fizyczny opis wewnątrzkomórkowych procesów będzie więc wymagał brania pod uwagę stanu splątanego.

Jak może stan splątany zastąpić „dużą liczbę” w stabilizowaniu biologicznego porządku? Ogryzko tak odpowiada: „Podobnie do surowej procedury może to obniżyć liczbę stopni swobody, które muszą być zabezpieczone przed fluktuacjami, ale w bardziej subtelny sposób niż przez proste uśrednienie. Rozważmy najprostszy przykład układu splątanego – tak zwaną parę elementarnych cząstek Bella: podczas gdy w przedstawieniu »spin w górę/spin w dół« wszystkie ułożenia stanów dwóch cząstek są dozwolone dla stanu stałego, w przypadku pary Bella dozwolone są tylko dwa. Jest to wyraźne we współzależnościach w wynikach pomiarów spinów tych cząstek. W skrajnym przypadku, kiedy zmierzono w »spinie w górę/spinie w dół« punkt wyjścia, para Bella zachowuje się tak, jakby miała tylko jeden stopień swobody (zamiast dwóch, wynikających z jego kompozycji); w tym wyobrażeniu stan splątany skutecznie zredukował poziom rozmiaru złożonego układu. Odpowiednio ze wzrostem liczby składników liczba niezależnych zmiennych niezbędnych do opisanie układu splątanego może nie rosnąć tak szybko, jak w przypadku systemu rozłącznego»¹⁶⁸⁴.

Czy stan splątany musi być brany pod uwagę przy wybieraniu właściwych zmiennych dla opisanie wewnątrzkomórkowego procesu? Odpowiadając, Ogryzko podkreśla, że opis stanu komórki musi zaczynać się od określenia pozycji każdego jądra i każdego w nim elektronu. Rodzi się wtedy pytanie, jak uprościć ten tak bardzo skomplikowany obraz. „Są tam granice tego – pisze Ogryzko – jak daleko możemy pójść tą procedurą bez utraty zasadniczych informacji dotyczących funkcjonowania komórek. Z drugiej strony oddziaływania między różnymi częściami komórki będą nieuchronnie

jest następująca: tak jak stan całości jest kompletny, tak stan części jest niekompletny i taki musi pozostać, bo w tej całości część tak współgra z resztą, że gdy chcemy wyodrębnić tę część, „psujemy” całość. Nie można „zobaczyć” danej części nie naruszając całości. Mówił już o tym Bohr, że aparatura jest sprzężona z układem kwantowym i narusza go, wprowadzając ten układ w inny stan, wymuszony przez aparaturę. Bardzo mało jeszcze o tym wiadomo. Na pojęciu splątania kwantowego oparta jest idea komputera kwantowego, który jest dziś marzeniem fizyków.

¹⁶⁸⁴ V.V. Ogryzko, *Erwin Schrödinger, Francis Crick...*

je płątać. Odrzucenie informacji o stanie splątanym będzie sztucznie zwiększać liczbę niezależnych stopni swobody, z równoczesnym wzrostem kosztu utrzymania”¹⁶⁸⁵. Zdaniem Rosjanina te argumenty sugerują, że właściwy opis działania komórek będzie wymagał brania niektórych stanów splątanych pod uwagę. Badacz przekonuje, że potwierdzenie współzależności pomiędzy molekularnymi zdarzeniami wewnątrz komórki może pomóc zrozumieć, jak dynamika wewnątrzcząsteczkowa pozostaje na odpowiednim poziomie pomimo zmienności w liczbach wielu jej uczestniczących składników.

Ogryzko jest świadomy, że szukanie wsparcia dla zaproponowanej przez niego roli stanu splątanego spotyka się z wyzwaniem doświadczalnym i teoretycznym¹⁶⁸⁶. Po pierwsze, będziemy musieli nauczyć się wykrywania korelacji we fluktuacjach wielu obserwowalnych cech charakterystycznych żywych komórek i być zdolni wykonać to na poziomie pojedynczej komórki. To zadanie wciąż pozostaje trudne przy użyciu obecnej technologii i będzie wymagało wykorzystania dwóch podejść: „nano-” i „omic-”. Po drugie, zauważa, że stan splątany jest powszechnie dostrzegany jako bardzo delikatny (kruchy) i szybko niszczone przez oddziaływanie układu fizycznego ze swoim środowiskiem. To zjawisko nazwane jest dekoherencją indukowaną środowiskowo (ang. *environmentally induced decoherence*, EID). Ogryzko jest jednak optymistą. Píše: „Dostrzeżona delikatność jakiegokolwiek splątania jest nieporozumieniem wynikającym ze znanych wyzwań kontrolowania poszczególnych klas splątanych stanów dla celów przekształcania informacji kwantowych. W rzeczywistości splątanie jest zjawiskiem wszechobecnym, obecnym zawsze, gdziekolwiek istnieje oddziaływanie pomiędzy różnymi układami fizycznymi; nawet EID samo w sobie jest wynikiem stanu splątania układu z jego środowiskiem. Język, który wprost obejmuje splątanie, przynosi większą jasność, wygodę i dodatkowe wejście w badania znanego fizycznego zjawiska. Jest to zdobycie wzrastającej ważności w tłumaczeniu właściwości zagęszczonej materii, prowadzące do spekulacji nad jego kluczową rolą w życiu”¹⁶⁸⁷.

Dla rosyjskiego badacza zastanawiające jest to, że – jeśli ludzkości zajęło tylko kilka dekad, by dojść do użycia splątania w technologii informacji kwantowej – dlaczego życie podczas miliardów lat ewolucji nie mogłoby również nauczyć się z tego korzystać, znajdując w splątaniu alternatywny środek dla stabilizacji biologicznego porządku¹⁶⁸⁸. Czy mogło to – kontynu-

¹⁶⁸⁵ Tamże.

¹⁶⁸⁶ Por. tamże.

¹⁶⁸⁷ Tamże.

¹⁶⁸⁸ Por. tamże.

uje Ogryzko – nauczyć nas prowadzenia wewnątrzkomórkowej dynamiki w tak zwanych „niespójnych wolnych podprzestrzeniach”, ostatnio odkrytych przez teoretyków kwantowej informacji, dążących do ochrony przetwarzania informacji kwantowej przed EID? Ogryzko twierdzi, że proces selekcji mógł mieć tu znaczenie, ale w rodzaju w pewnym sensie różniącym się od uznanego mechanizmu Darwina i mógł go wyprzedzać. Píše: „Matematycznie »niespójność wolnych podprzestrzeni« jest pokrewna pomysłowi »preferowanych stanów« zaproponowanemu dla wyjaśnienia przejścia ze świata kwantowego do klasycznego. W tym podejściu EID nie niszczy wszystkich splątanych stanów – niektóre są ustabilizowane przez proces nazwany środowiskowo-indukowaną super selekcją. Równocześnie splątane stany w systemach biologicznych mogłyby być dokładnie chronione przed EID, ponieważ są one »preferowanymi stanami« przeżywającymi interakcje ze środowiskiem”¹⁶⁸⁹. Zdaniem badacza implikacje takiego pomysłu mogłyby być interesujące dla zrozumienia życia. Sugeruje to punkt widzenia na adaptację życia do jego środowiska, który różni się od przyjętego darwinowskiego poglądu w tym, że adaptacja przez „przeżycie najmocniejszych” może zdarzyć się na poziomie indywidualnego obiektu, to jest nie obejmuje replikacji. Z drugiej strony wskazuje nowe potencjalne źródło stanów splątanych przygotowanych dla nas przez ewolucję biologiczną, które mogą być użyte w protokołach kwantowej informacji.

Swoje analizy Ogryzko kończy następującą konkluzją: „Dla podsumowania splątanie może dać nam biologię z konceptualnym składnikiem, zaginiony w momencie molekularnego wyjaśnienia życia dominującego przez ostatnie 50 lat. Filozof mógłby zobaczyć w tym fizyczny odpowiednik starego powiedzenia – »całość jest większa niż suma jej składników«, odzwierciedlającego aspekt życia, który nie może być ograniczany do struktury molekularnej i oddziaływań. Nowoczesny teoretyk informacji mógłby zobaczyć splątanie jako niezależny środek przetwarzania informacji w żywych komórkach, dodany do molekularnego mechanizmu »nakrętki i śruby« [...]. Notabene, to również Schrödinger pierwszy rozpoznał splątanie jako »charakterystyczną cechę mechaniki kwantowej – tę, która wdraża jej całkowite odejście od klasycznego myślenia«. Dość ironicznie zatem spuścizna poszukiwań Schrödingera mogła przetrwać molekularną rewolucję w naukach o życiu, pomogła zainicjować nowe zrozumienie biologicznego uporządkowania – z perspektywy systemu, przyswajając wzdłuż drogi spektakularne osiągnięcia nowoczesnych nauk fizycznych i informacyjnych”¹⁶⁹⁰.

¹⁶⁸⁹ Tamże.

¹⁶⁹⁰ Tamże.

W ciągu następnych dekad po publikacji *What is life?* zarówno w biologii molekularnej, jak i termodynamice wydarzyło się bardzo wiele, dzięki czemu uwagi Schrödingera pod pewnymi względami stały się przestarzałe – podkreśla Jeffrey S. Wicken¹⁶⁹¹. Ogólny sens spostrzeżeń pozostaje jednak jak najbardziej zasadny. Austriacki fizyk był zdania, że informacyjny aspekt biologicznej organizacji stanowił sekret jej aspektu operacyjnego, czyli utrzymywania wewnętrznego porządku poprzez żywienie się darmową energią. Zdaniem Wickena schrödingerska interpretacja „porządek z porządkiem” związku między informacją i operacją nie uwzględnia dynamiki samoorganizacji, która uniemożliwia zlokalizowanie programu rozwojowego w dowolnym molekularnym substracie i wymaga organizmalnego zrozumienia ekspresji informacji genetycznej, gdzie cała translacyjna maszynaria ma równie zasadnicze znaczenie dla tej ekspresji, co komunikat. Schrödinger zdołał jednak trafnie ocenić, że strategia układów ożywionych w jakiś sposób obejmuje prawidłowe wykorzystanie przez nie struktur informacyjnych w celu utrzymania dalekiej od równowagi spójności za sprawą metabolicznych szlaków działań dyssypacyjnych. Organizacja biologiczna, jak przekonuje Wicken, zależy od nierównowagowych warunków i specyficznych ścieżek kinetycznych. To właśnie w tym połączeniu Wicken dostrzega „witalne” właściwości bioukładów.

Jego zdaniem Schrödinger nigdy nie określił tego, co miał na myśli, mówiąc o porządku, bazując zamiast tego na oczywistym kontraście porządku względem losowości¹⁶⁹². Według Wickena wprowadza to pewne zamieszanie, gdyż „organizacja” jest czasami luźno przywoływana w tym samym sensie co „porządek”, a oba te pojęcia często nachodzą na wzajemne terytoria pojęciowe. Swoją uwagę ilustruje przykładem: Druga zasada termodynamiki wprowadza nieporządek w tym sensie, że zwiększa rozprzestrzenienie masy i energii między dostępnymi stanami kwantowymi. Równie często słyszymy, że druga zasada jest „dezorganizująca” w swoich skutkach do tego stopnia, że zabrania się jej przekraczać próg „obszaru losowości”¹⁶⁹³. Sam fakt, że spora część badań samoorganizacji w ciągu ostatniej dekady poruszała jej relację względem procesów termodynamicznych, wskazuje (jak twierdzi Wicken) na zagrożenia wynikające z takiego swobodnego użycia języka¹⁶⁹⁴.

Wicken stoi na stanowisku, że powyższych niejasności dotyczących porządku i losowości (które pojawiają się również przy okazji kryształu ape-

¹⁶⁹¹ Por. J.S. Wicken, *Evolution, thermodynamics...*, s. 42.

¹⁶⁹² Por. tamże.

¹⁶⁹³ Por. tamże, s. 42–43.

¹⁶⁹⁴ Por. tamże, s. 43.

riodycznego) można uniknąć jedynie poprzez wprowadzenie pewnych starannie nakreślonych rozróżnień dla alternatywnych sposobów „bycia nielosowym”¹⁶⁹⁵. Wskazuje na dwa sposoby, w jakie elementy układu fizycznego mogą być rozmieszczone nielosowo. Jeden z nich podąża wewnętrznymi wzorcami lub statystycznymi odchyleniami, drugi – względami funkcjonalnymi. Pierwszy wyraża porządek, drugi – organizację i funkcjonalną informację. Ta biologiczna organizacja jest uporządkowana i bogata w informację, wyrażając unikalną cechę układów ożywionych, jakiej nie jest w stanie wygenerować świat maszyn. Biologiczna organizacja porządku jest konsekwencją wymogów autoreprodukcji. Na poziomie molekularnym porządek i informacyjna obfitość znajdują się we wzajemnej opozycji: porządek wymaga wzorca, okresowości lub redukcji kombinacyjnych opcji, po których nałożeniu maleje informacyjna zdolność pojemnościowa. „»Uporządkowany kryształ aperiodyczny« Schrödingera jest więc – ściśle rzecz ujmując – pojęciową sprzecznością”¹⁶⁹⁶ – konkluduje Wicken.

Z kolei na jednym z podstawowych pytań postawionych przez Schrödingera dotyczących tego, czy idee fizyki klasycznej, w postaci stosowanej zwykle przez biologów w pojmowaniu przez nich zachowań fizycznego świata, mogły być wystarczające do wyjaśnienia podstawowych funkcji życiowych, koncentruje się Roger Penrose¹⁶⁹⁷. Przypomina on, że austriacki fizyk dopuszczał myśl, że teoretycznie systemy biologiczne (będące stosunkowo duże w skali atomowej i zawierające w sobie ogromną liczbę atomów) miałyby swoje działania makroskopowe określane zasadniczo przez wielko-liczbowe prawo statystyczne. Wraz z kilkoma ogólnymi zasadami mechaniki newtonowskiej (jak choćby zasadą zachowania energii) Schrödinger przyjmował domniemanie, że mogło to prowadzić do ogólnych zachowań odpowiadających klasycznym prawom Newtona. Podkreślał jednak, że kluczową cechą mendlowskiej natury dziedziczenia jest jej ugruntowanie w nieciągłości, wyjaśnialnej tylko na drodze kwantowej nieciągłości i stabilności zawartych w podstawowych nośnikach informacji genetycznej. Schrödinger twierdził, że nośniki te musiały być cząsteczkami specyficznego rodzaju – cząsteczkami, które obecnie znamy jako DNA.

W opinii Penrose’a cząsteczki i ich skład chemiczny z pewnością są regulowane przez prawa kwantowe¹⁶⁹⁸. Niemniej – jak twierdzi – chemicy i biolodzy mogą nie uznawać chemii za szczególnie „kwantowomechaniczną”, częściowo z powodu wielu modeli kulkowych (lub komputerowych), na jakich

¹⁶⁹⁵ Por. tamże.

¹⁶⁹⁶ Tamże.

¹⁶⁹⁷ Por. R. Penrose, *Foreword*, s. vii.

¹⁶⁹⁸ Por. tamże.

zbudowali oni swoje doświadczenie (przez co praktyczna znajomość nie współgra z nieintuicyjnym charakterem układów kwantowych)¹⁶⁹⁹. Zgodnie z tymi wyobrażeniami, możemy (jak twierdzi Penrose) myśleć o chemii jako o co najwyżej „słabo” kwantowomechanicznej dziedzinie nauki, w której bardziej zagadkowe cechy mechaniki kwantowej (takie jak sumarycznie spójne zachowania) nie odgrywają szczególnie ważnej roli¹⁷⁰⁰. Takie spójne zachowania można zaobserwować w zjawiskach nadciekłości i nadprzewodnictwa występujących między daleko oddzielonymi cząstkami kwantowymi w sytuacjach, gdzie ogólnych zachowań połączonego systemu nie można zrozumieć jedynie w kategoriach indywidualnego charakteru jego elementów składowych. Kwestią zasadniczą jest to, czy takie „silnie” kwantowomechaniczne właściwości przyrody mogą odgrywać istotną rolę w podstawowych procesach życiowych. Obszarem, gdzie takie kwestie są rozstrzygane, jest mózg. Oddzielone od siebie obszary mózgu (przy niewielkich zakłóceniach bezpośredniego połączenia neuronów) są odpowiedzialne za przetwarzanie różnych typów percepcji (takich jak na przykład kolor, kształt i ruch w procesie widzenia). Krytycy wysuwają argument o niegościnnym środowisku, jakie ciepły i „chaotyczny” żywy mózg przewiduje dla takich delikatnych i subtelnych, nielokalnych procesów kwantowych¹⁷⁰¹. Penrose nie ma wątpliwości co do tego, że jeśli mózg ma korzystać z takich „silnie” kwantowomechanicznych zjawisk, musi to robić za pośrednictwem specyficznej, bardzo wyrafinowanej organizacji. „Cała sytuacja – pisze – jest jednak z pewnością daleka od beznadziejnej, gdyż – z jednej strony – w strukturze komórkowej istnieje szeroko pojęta subtelność, zaś z drugiej – samo istnienie nadprzewodników wysokotemperaturowych pokazuje, że zbiorowe zjawiska kwantowe mogą zachodzić przy stosunkowo małej ilości wyrafinowania i bez konieczności występowania ekstremalnego zimna”¹⁷⁰².

Inny badacz, Stuart Hameroff, przypomina, że w swojej książce *What is life?* Schrödinger zaproponował kwantową podstawę układów ożywionych, stwierdzając, że zasadnicze ramy życia mieszczą się w kryształach aperiodycznych¹⁷⁰³. Opis austriackiego fizyka odnosi się do DNA i RNA, jak rów-

¹⁶⁹⁹ Por. tamże, s. vii–viii.

¹⁷⁰⁰ Por. tamże, s. viii.

¹⁷⁰¹ Nielokalność oznacza, że wpływ na zachowanie się obiektu kwantowego ma nie tylko to, co jest w jego bezpośrednim sąsiedztwie, ale także to co dzieje się daleko od niego. Einstein zaprzeczał istnieniu takich korelacji. W latach siedemdziesiątych John Bell przeprowadził doświadczenia, w których potwierdził, że te korelacje naprawdę istnieją.

¹⁷⁰² Por. R. Penrose, *Foreword*, s. viii.

¹⁷⁰³ Por. S. Hameroff, *That's life! – The geometry of π electron clouds* [w:] A.K. Pati, P.C. W. Davies, D. Abbott (eds), *Quantum aspects of life*, s. 404.

niez do cytoszkieletowych zespołów białek. Schrödinger wysunął ponadto koncepcję, że sumarycznie jednolite zachowania, nieodłącznie występujące w układach ożywionych mogą obejmować nielokalne korelacje kwantowe między biomolekułami. Konwencjonalne przekonanie współczesnej nauki jest takie, że biologiczne układy są zbyt „ciepłe, wilgotne i głośne” dla z pozoru delikatnych procesów kwantowych. Jednakże Hameroff dowodzi, że tak nie jest, powołując się na ostatnie dane eksperymentalne, które ujawniają zdolność biomolekuł do wykorzystywania ciepła i energii w celu przeciwdziałania dekoherencji (która wyklucza supracząsteczkowe lub systemowe role) i promowania funkcjonalnych stanów kwantowych. „Używając dzisiejszej terminologii – pisze Hameroff – mówi się o tym, że życie obejmuje kooperatywne procesy kwantowe w geometrycznych siatkach niebiegunowych chmur rezonansowych elektronu π . Takie chmury π są odizolowane od komórkowych płynów i jonów, będąc zakopanymi w niebiegunowych podprzestrzeniach składników zespołów biomolekularnych, na przykład błonach, mikrotubulach, kwasach nukleinowych i organelach. W każdej chmurze π tańce elektronów – znane jako kwantowe siły Londona [...] – regulują miejscowe, nanoskalowe, biomolekularne stany konformacyjne. W repetycyjnych strukturach, takich jak cytoszkielet i DNA, chmury π uformowane w specyficzne okresowe i nieokresowe geometrie siatkowe są oddzielone od siebie o niecałe dwa nanometry, a tym samym przyczyniają się do tunelowania elektronów, przeskakiwania ekscytynu, klasycznych i nielokalnych procesów kwantowych dalekiego zasięgu (na przykład splątanie, superpozycja, obliczenia kwantowe) [...]. W szczególności procesy kwantowe bazujące na cytoszkiecie mogą łączyć się biomolekularnymi rezonansami mechanicznymi, rozciągając się na całej objętości komórek i ewentualnie także między komórkami i organizmami poprzez tunelowanie za pośrednictwem połączeń szczelinowych [...]. Tym samym geometryczny rozkład niebiegunowych chmur elektronowych π może umożliwić zbiorowy, kooperatywny proces kwantowy – jednostkową funkcję fali – pośredniczący percepcji i regulujący celowościowe zachowania organizmów żywych. Tym właśnie jest życie”¹⁷⁰⁴. Hameroff przekonuje, że w miarę jak biologia ujawnia coraz więcej szczegółów, to, czym tak naprawdę jest życie, staje się coraz bardziej nieuchwytnie¹⁷⁰⁵. Jego zdaniem układy ożywione są procesami zawieszonymi na krawędzi świata kwantowego i klasycznego, a biologia ewoluowała po to, aby jak najlepiej wykorzystać kooperatywne procesy kwantowe¹⁷⁰⁶.

¹⁷⁰⁴ Tamże, s. 405.

¹⁷⁰⁵ Por. tamże, s. 425.

¹⁷⁰⁶ Por. tamże, s. 426.

Współcześnie podejmowane są próby poszerzenia sformułowanych przez Schrödingera w kontekście fenomenu życia idei dotyczących termodynamiki. Przeanalizowanie i poszerzenie jego termodynamicznego poglądu dotyczącego życia obrali sobie za zadanie Eric D. Schneider wraz z Dorionem Saganem i Jamesem J. Kayem. Badacze ci koncentrują się na termodynamice biologicznej, której zarys, jak twierdzą, przedstawił w *What is life?* austriacki fizyk¹⁷⁰⁷. Dyscyplina ta łączy w sobie biologię i fizykę w proporcjach, które mogą uczynić ją równie silną, co biologia molekularna, i równie praktyczną, jak biotechnologia. Zagadnienia termodynamiczne poruszane przez austriackiego fizyka doprowadziły z czasem do tego, co znamy dziś pod nazwą termodynamiki nierównowagowej¹⁷⁰⁸.

Według ustaleń Schneidera i Kaya druga zasada termodynamiki nie tylko nie stanowi przeszkody dla zrozumienia życia, ale nawet jest niezbędna dla dokonania pełnego opisu procesów życiowych¹⁷⁰⁹. Proponują, aby rozszerzyć termodynamikę na przyczynowość procesów życiowych i w ten sposób wykazać, że druga zasada termodynamiki jest przyczyną konieczną, chociaż niewystarczającą dla wyjaśnienia życia samego w sobie. Przeanalizowanie termodynamiki prowadzi ich do wniosku, że drugie prawo stanowi podstawę, oraz określa kierunek wielu procesów obserwowanych podczas rozwoju organizmów żywych. Badacze ci chcą przez to zharmonizować biologię z fizyką na poziomie makroskopowym oraz wykazać, że biologia nie stanowi odstępstwa od fizyki (do tej pory niewłaściwie rozumianej). Od czasów Boltzmann i Gibbsa w dziedzinie termodynamiki dokonał się ogromny postęp. Badacze przyglądają się zasadom termodynamiki sformułowanym na nowo i poszerzają je w sposób umożliwiający opisanie układów i procesów zachodzących w obszarach nierównowagowych w odniesieniu do gradientów utrzymujących systemy z dala od położenia równowagi. W powyższym kontekście drugie prawo stwierdza, że – będąc odsuwanymi od położenia równowagi, układy zyskują możliwość skorzystania z wszelkich dostępnych środków umożliwiających im przeciwstawienie się pochodzącym z zewnątrz gradientom. Zdaniem Schneidera i Kaya rozszerzenie drugiej zasady termodynamiki ma zastosowanie do złożonych układów znajdujących się w warunkach nierównowagowych, co różni je od stwierdzeń klasycznych, których stosowalność ogranicza się do warunków równowagowych bądź zbliżonych do równowagowych. Z dala od położenia

¹⁷⁰⁷ Por. E.D. Schneider, D. Sagan, *Energy flow, thermodynamics, and life*, The University of Chicago Press, Chicago–London 2005, s. 7–8.

¹⁷⁰⁸ Por. tamże, s. 15.

¹⁷⁰⁹ Por. E.D. Schneider, J.J. Kay, *Life as a manifestation of the second law of thermodynamics*, „Mathematical and Computer Modelling”, 6–8(19) (1994), s. 26.

równowagi możliwe jest, jak przekonują badacze, wyłanianie się stabilnych, wysoce uporządkowanych układów złożonych, a także ich rozwój oraz wzrost kosztem większego nieuporządkowania na wyższych poziomach hierarchii systemu. Schneider i Kay chcą zademonstrować użyteczność tego nowego sformułowania drugiego prawa, rozważając jeden z klasycznych przykładów struktur rozpraszających, jakim są komórki Bénarda. Twierdzą, że paradygmat ten może zostać zastosowany do układów fizycznych i chemicznych oraz że pozwala on na termodynamicznie spójne wyjaśnienie rozwoju dalekich od położenia równowagi złożonych układów, w tym życia.

Schneider i Kay podkreślają, że jeśli będziemy postrzegać Ziemię jako otwarty układ termodynamiczny z dużym gradientem odciskanym na nim przez słońce, imperatyw termodynamiczny sformułowanej na nowo drugiej zasady termodynamiki będzie oznaczał, że system uczynił wysiłki w celu zredukowania tego gradientu poprzez wykorzystanie wszelkich dostępnych sobie procesów fizycznych i chemicznych¹⁷¹⁰. Badacze zmierzają do wykazania, że procesy samoorganizacji są efektywnym środkiem redukcji gradientu. Twierdzą, że cyrkulacja meteorologiczna i oceanograficzna degraduje niektóre z gradientów energii oraz nierównowagi docierającej energii słonecznej, jednakże w dalszym ciągu istnieją dodatkowe gradienty energii wymagające rozproszenia¹⁷¹¹.

Kluczowa dla Schneidera i Kaya jest teza, że życie istnieje na Ziemi jako jeden ze środków rozpraszania wywołanego przez słońce gradientu i, jako takie, jest przejawem sformułowanej na nowo drugiej zasady termodynamiki¹⁷¹². „Jest kwestią oczywistą – piszą – że układy ożywione są dalekimi od stanu równowagi układami rozpraszającymi i posiadają ogromny potencjał w zakresie redukcji gradientu promieniowania na Ziemi. Znaczna część tego rozpraszania realizowana jest przez królestwo roślin [...]. Interesującym wyjątkiem są tutaj ekosystemy głębin morskich, które pozyskują swoją energię z gradientów temperaturowych i chemicznych pochodzących z dna morskiego, a nie z energii słonecznej. Życie jest najbardziej obfite w takich systemach, w których gradienty temperaturowe i chemiczne są najwyższe, w związku z czym najwyższe jest również wymagane rozpraszanie gradientu”¹⁷¹³.

Autorzy twierdzą, że układy ożywione są dynamicznymi systemami rozpraszającymi o zakodowanej pamięci (genie wraz z jego DNA), która pozwala na kontynuację procesów rozpraszania bez konieczności rozpoczy-

¹⁷¹⁰ Por. tamże, s. 35.

¹⁷¹¹ Por. tamże, s. 35–36.

¹⁷¹² Por. tamże, s. 36.

¹⁷¹³ Tamże.

niania na nowo tych procesów w związku z wystąpieniem zdarzeń stochastycznych¹⁷¹⁴. Piszą: „układy ożywione są jak wyszukane minitornada, obdarte pamięcią (ich DNA), których arystotelesowską »ostateczną przyczyną« może być druga zasada termodynamiki”¹⁷¹⁵. Według Schneidera i Kaya nie wolno jednakże przeceniać znaczenia termodynamiki w odniesieniu do procesów życiowych. Przeformułowana druga zasada termodynamiki jest warunkiem koniecznym, jednak niewystarczającym dla istnienia życia. Paradygmat ten nie stoi w sprzeczności z hipotezą neodarwinistyczną i nie kwestionuje znaczenia procesów genetycznych ani ich roli w ewolucji biologicznej. Schneider i Kay odrzucają jednak samolubny gen jako jedyne uczestnika procesu w zakresie doboru, zamiast tego uznając geny czy gatunki za komponenty w konkurujących, autokatalitycznych ekosystemach, rywalizujących o zdegradowanie dostępnych gradientów energii.

Powstania życia Schneider i Kay nie postrzegają jako zjawiska izolowanego¹⁷¹⁶. Ich zdaniem reprezentuje ono emergencję jeszcze innej klasy procesów, których celem jest rozpraszanie gradientów termodynamicznych. Życie postrzegają jako najbardziej wyszukane z możliwych zakończenie kontinuum rozwojowego naturalnych struktur rozpraszających, od fizycznych, przez chemiczne, autokatalityczne, do układów ożywionych. Autokatalityczne reakcje chemiczne stanowią szkielet chemicznych układów rozpraszających. Zasadniczo dzięki zastosowaniu termodynamiki nierównowagowej do układów otwartych możliwe jest przedstawienie scenariuszy rozwoju maszynierii biochemicznej, odpowiedzialnej za duplikację i translację kwasów nukleinowych oraz innych molekuł, kluczowych dla istnienia życia¹⁷¹⁷.

Badacze stawiają tezę, zgodnie z którą wzrost, rozwój i ewolucja są odpowiedzią na termodynamiczny imperatyw rozpraszania gradientów¹⁷¹⁸. Wzrost biologiczny występuje wtedy, kiedy układ dodaje większą liczbę tego samego typu ścieżek degradacji narzuconych gradientów. Rozwój biologiczny ma miejsce wtedy, kiedy w systemie wyłaniają się nowe ścieżki degradacji narzuconych gradientów. Im większy system (to znaczy im większa aktywność strumienia systemu), tym więcej dostępnych reakcji i ścieżek (zarówno w liczbie, jak i typach) dla destrukcji gradientów. Powyższa zasada zdaniem Schneidera i Kaya zapewnia kryteria dla oceny wzrostu i rozwoju układów ożywionych. Jeśli wszystkie inne warunki pozostają równe, to preferowane są lepsze ścieżki rozpraszania.

¹⁷¹⁴ Por. tamże.

¹⁷¹⁵ Tamże.

¹⁷¹⁶ Por. tamże.

¹⁷¹⁷ Por. tamże, s. 37.

¹⁷¹⁸ Por. tamże.

Schneider i Kay dokonują przeformułowania drugiej zasady termodynamiki, zmieniając dawne twierdzenie o „wzroście entropii” w twierdzenie opisujące układy podlegające procesom prowadzącym je do osiągnięcia wyjątkowego stanu równowagi¹⁷¹⁹. Opis ten umożliwia dyskusję dotyczącą zachowania układów w sytuacjach nierównowagowych. Przewycięża trudność związaną z charakterystyką układów nierównowagowych w odniesieniu do entropii, która może być definiowana jedynie w stanie równowagi. Autorzy sugerują, że w sytuacjach nierównowagowych układy będą wykorzystywać wszystkie dostępne środki w celu oparcia się gradientom odpowiedzialnym za warunki nierównowagowe. Co więcej, im silniejszy zastosowany gradient, tym większy wpływ na układ mieć będzie atraktor równowagi. Emergencja zgodnych struktur samoorganizacyjnych stanowi oczekiwaną odpowiedź systemów, jako że starają się one poprzez rozpraszanie przeciwdziałać zewnętrznym gradientom, które odsuwają je od stanu równowagi. Badacze wykazują, że zasady te przejawiają się w zachowaniu fizycznych układów rozpraszających (na przykład komórki Bénarda) i stosują te same zasady w odniesieniu do pochodzenia życia, biologicznego wzrostu i rozwoju ekosystemów, a także ewolucji biologicznej¹⁷²⁰. Chociaż nie zaprzeczają, że układy ożywione możliwe są nie tylko w przypadku przeformułowania drugiej zasady termodynamiki, ale właśnie ta zasada daje ich zdaniem uzasadnienie dla procesów życiowych i jest konieczną, aczkolwiek niewystarczającą przyczyną dla życia samego w sobie.

W jaki sposób organizmy utrwalają, a nawet rozwijają swoją organizację we wszechświecie rządzonej drugą zasadą termodynamiki? Schneider i Sagan przypadek ten nazywają „paradoksem Schrödingera”¹⁷²¹. Według nich podstawowe rozwiązanie tego paradoksu jest proste: organizmy kontynuują istnienie i rozwój poprzez import wysokiej jakości energii spoza obrębu swojego ciała. Żywią się „ujemną entropią” – wyższą organizacją kwantów energii światła ze słońca. Nie będąc odizolowanymi układami, organizmy zwiększają swoją organizację kosztem wzrostu entropii wokół nich. Aby więc zrozumieć rozwój naturalnych złożonych systemów takich jak życie, musimy zwrócić uwagę na to, czego są częścią, czyli na otaczające ich energię i środowisko.

Schneider i Sagan podkreślają, że będąc fizykiem, Schrödinger szukał nowych koncepcji pogodzenia termodynamicznej teorii z biologicznymi faktami¹⁷²². Zauważył, że układy ożywione wydają się lekceważyć drugą

¹⁷¹⁹ Por. tamże, s. 45.

¹⁷²⁰ Por. tamże.

¹⁷²¹ Por. E.D. Schneider, D. Sagan, *Energy flow...*, s. 15.

¹⁷²² Por. tamże, s. 16.

zasadę termodynamiki. Energia i masa w zamkniętych układach ulegają losowo rozłożeniu w czasie, układy ożywione stanowią jednak przeciwieństwo takiego bezładu. Życie w środowisku skłaniającym się ku bezładowi zwiększa ich porządek. Zdaniem badaczy lepszym słowem od „porządku” jest „organizacja”. Podkreśla ono, że poszczególne organizmy są organizowane, aby coś robić (żyć, rozmnażać się, utrzymać takimi, jakie są), czyli aby oprzeć się termodynamicznej równowadze. Nacisk kładziony przez Schrödingera na kryształ jako na naturalny egzemplarz złożoności doprowadził go do użycia terminu „porządek”, który jest bardziej właściwy dla statycznych wzorów kryształów po ich uformowaniu. Ale życie to coś więcej niż kryształ, który „nic nie robi”. Dlatego też słowo „organizacja” (jak zauważają Schneider i Sagan) dzięki swej konotacji ciągłej i harmonicznej aktywności (funkcji) jest lepszym określeniem dla życia.

Schneider i Sagan podkreślają, że matematycy i teoretycy wysunęli wiele odrębnych, precyzyjnych i technicznych definicji terminów takich jak porządek, złożoność, informacja i bezład (chaos), tymczasem, Schrödinger używał tych pojęć bardziej swobodnie¹⁷²³. Porządek kryształu po jego utworzeniu kontrastuje z ciągłą funkcją czułego organizmu, niemniej, strukturalnie obie zwracają na siebie uwagę za sprawą symetrii i regularności. Dla autorów jasne jest, że życie jest dalekie od typowego, losowego zbioru cząsteczek. Schrödinger jako pierwszy podkreślił potrzebę zmierzenia się z życiem z termodynamicznej perspektywy. Zainspirowani przez austriackiego fizyka autorzy postrzegają życie nie jako kopiujące molekuly, lecz jako specyficzny proces transformacji energii. Twierdzą jednak, że mimo iż austriacki fizyk nie pomylił się w znaczeniu przypisywanym termodynamice, nie udało mu się trafnie przewidzieć wszystkich szczegółów¹⁷²⁴. Organizacja organizmów, jak zauważają badacze, nie bierze się z ujemnej entropii, lecz ze swobodnej energii. Energia swobodna to ilość dostępnej energii, jaką organizmy mogą spożytkować. Ilość ta jest wprost proporcjonalna do gradientów, jakie mogą wykorzystywać maszyny lub z których mogą korzystać organizmy celem utrzymania się przy życiu i reprodukcji jako specyficzne rodzaje materialnych organizacji.

Zdaniem omawianych autorów termin „porządek” powinien być zarezerwowany wyłącznie dla statycznych podmiotów, nie dynamicznych organizacji aktywnie wymieniających masę i energię z otoczeniem podczas realizowania funkcji mających na celu utrzymanie ich struktury¹⁷²⁵. Stoją oni na

¹⁷²³ Por. tamże.

¹⁷²⁴ Por. tamże, s. 18.

¹⁷²⁵ Por. tamże, s. 23–24.

stanowisku, że procesy życiowe otwarte dla środowiska budują złożoność, skupiają informację i wymieniają dane w miarę poszerzania się zakresu ich energetycznych operacji, wprowadzającego coraz większy bezład do otoczenia, od którego procesy te są uzależnione¹⁷²⁶. Bezład, czy też chaos, tak jak miał to na myśli Schrödinger w swoim wyjaśnieniu żywego procesu, nie ma obecnie zastosowania.

Schneider i Sagan twierdzą, że spektakularna popularność jednej, genetyczno-informacyjnej części programu Schrödingera, odbyła się kosztem drugiej – energetyczno-termodynamicznej¹⁷²⁷. W ocenie autorów chociaż nie można ujmować ogromnemu sukcesowi dociekań odnoszących się do genetyczno-informacyjnego aspektu życia, z równą powagą należy potraktować „drugą stronę medalu”. Dodają przy tym, że nie jest ważne to, że w swej wizji życia austriacki fizyk popełnił błędy, ale że zwrócił uwagę zarówno na informacyjne, jak i energetyczne zdolności organizmów żywych: organizację zaczerpniętą od rodziców oraz organizację utrzymywaną pomimo drugiej zasady termodynamiki zobowiązującej układy do zmierzania w kierunku równowagi. Idąc tropem Schrödingera, można odkryć sposoby patrzenia życia na procesy energetyczne kierujące nie tylko samym życiem, ale również układami nieożywionymi. Schneider i Sagan przekonują, że złożoność życia nie wynika wyłącznie z przetwarzania chemicznych danych, ale również z funkcji przetwarzania energii. Piszą: „Istotnie replikacja DNA i białkowo-budulcowe zobowiązania RNA mogły »wjechać« do egzystencji na termodynamicznym »rumaku«. Ich role mają sens w kontekście wcześniejszego gradientu – redukującej funkcji. Życie to nie tylko jednostka genetyczna. Geny same w sobie nie robią niczego więcej prócz szlifowania kryształów. Życie jest otwartym, cyklicznym układem organizowanym przez zasady termodynamiki, ale nie jest jedynym takim systemem”¹⁷²⁸.

Schneider i Sagan argumentują, że życie – jako złożony system – należy rozumieć jako strukturę przepływu energii organizowanej przez zasady termodynamiczne¹⁷²⁹. Zamieszczają też listę tych zasad, deklarując przy tym, że lista ta nie jest pod żadnym względem wyczerpująca i należy oczekiwać odkrycia z czasem innych zasad łączących otwarte, złożone układy. Zasady te przedstawiają się następująco¹⁷³⁰:

1. W liniowym obszarze bliskim równowagi istnieją wzajemne relacje, w których siły i przepływy są sprzężone.

¹⁷²⁶ Por. tamże, s. 24.

¹⁷²⁷ Por. tamże.

¹⁷²⁸ Tamże.

¹⁷²⁹ Por. tamże, s. 327.

¹⁷³⁰ Por. tamże, s. 327–330.

2. W liniowym obszarze bliskim równowagi łączna produkcja entropii układu na skutek przepływów masy i energii osiąga minimum przy stacjonarnym stanie nierównowagi. Procesy bliskie równowagi osiągają stacjonarny stan w pewnej odległości od równowagi i ewoluują w kierunku stanu o minimalnej produkcji entropii.
3. Energia jest zachowywana w układzie.
4. Ponieważ układy są odsuwane od liniowego stanu bliskiego równowagi przez nakładane na nie gradienty, używają one wszystkich dostępnych ścieżek w celu przeciwdziałania i degradacji tych gradientów. W tym kontekście nabiera nowego znaczenia określenie „struktura dyssypacyjna”: nie tylko zwiększania rozproszenia masy i energii, ale także degradacji gradientów. W związku z tym istotne jest rozróżnienie między dyssypacją (rozproszeniem) i degradacją (rozkładem) energii: ta pierwsza oznacza prowadzenie energii przez układ i może, lecz nie musi niszczyć gradienty; ta druga oznacza niszczenie jakości energii. Degradacja energii oznacza niszczenie energii, czyli degradację zdolności energii do produkowania gradientów mogących wykonywać pracę w stosunku do otoczenia. W prostych układach obejmujących sam przepływ ciepła, degradacja energii następuje poprzez jej dyssypację.
5. W miarę wzrostu zaaplikowanych gradientów rośnie również zdolność układu do sprzeciwienia się dalszemu oddalaniu od równowagi. Im dalej dany układ znajduje się od równowagi, tym silniejszy gradient musi być narzucony i zdegradowany, by utrzymać ten układ w tym stanie.
6. Układom odsuniętym od równowagi przez większe gradienty towarzyszą rosące przepływy energii i wyższe wskaźniki produkcji entropii.
7. Otwarte układy nierównowagowe znajdują się w pewnej odległości od równowagi, produkują entropię, która jest eksportowana poza układ i utrzymują niski poziom entropii wewnątrz układu kosztem bezładu poza nim. Absorbowanie energii i masy do wnętrza struktury obniży wewnętrzną entropię układu, jeśli importowana entropia jest mniejsza niż wewnętrzna produkcja entropii.
8. Jeśli gradient jest nakładany na układ i pozwalają na to warunki kinetyczne, powstają autokatalityczne lub samonapędzające się procesy i struktury organizacyjne. Te autokatalityczne organizacje pobierają masę i energię do swojego wnętrza. Procesy są organizowane przez gradienty, których energetyczny potencjał jest „wciągany” do cyklicznych układów. Autokatalityczne organizacje są nieliniowymi układami dynamicznymi, przez które przepływa energia i masa. Systemy te wykazują stałe, cykliczne zachowania i dynamiczne właściwości opisane matematycznie przez atraktory, bifurkacje oraz katastroficzne zachowania. Druga zasada

termodynamiki i zachowania nierównowagowych układów dyssypacyjnych są głównymi generatywnymi siłami dla złożonych organizacji dynamicznych w przyrodzie, w tym tych autokatalitycznych. Kluczowym aspektem tego postulatu jest to, że nowa masa i energia mogą być włączane do układów dyssypacyjnych.

9. Systemy biologiczne optymalnie wychwytyują energię i degradują dostępne gradienty energii możliwie jak najpełniej (słowo „optymalnie” oznacza tutaj „najbardziej korzystnie dla wzrostu, metabolizmu i reprodukcji”). Optymalne wartości mogą zwiększać się lub zmniejszać wraz ze zmianami środowiskowymi.
10. Procesy biologiczne opóźniają natychmiastowe rozproszenie energii, doprowadzając do przechowywania, obiegu i strukturyzacji energii i masy. Systemy biologiczne, skłaniając się ku coraz większemu wychwytywaniu energii, przechowują biomasę, a tym samym odkładają w czasie natychmiastowe rozproszenie energii i produkują wewnętrzne gradienty pozwalające na uniezależnienie się od energetycznych niestabilności środowiska.
11. Życie i inne układy złożone nie tylko nie są sprzeczne z drugą zasadą termodynamiki, lecz istnieją właśnie dzięki niej, ponadto redukują wcześniejsze istniejące gradienty efektywniej, niż miałyby to miejsce bez nich.

Schneider i Sagan są zdania, że sformułowana przez nich lista zasad (choć niekompletna) stanowi zarys spójnej, termodynamicznej teorii życia¹⁷³¹. Ta oparta na gradientach teoria w zamyśle autorów pokazuje, w jaki sposób życie – w ramach drugiej zasady termodynamiki – jest napędzane przez te same termodynamiczne imperatywy, jakie organizują złożone układy nieożywione.

Pod adresem schrödingerskiej termodynamiki życia Rupert Riedl kieruje zarzut, że austriacki fizyk przesadnie uwydatnia rolę entropii i uporządkowania, zaniedbując tym samym koncepty energii swobodnej i wymiany energii pomiędzy przekształcanymi układami i ich środowiskiem¹⁷³². Píše: „Pod koniec lat czterdziestych Schrödinger dostał radę od B. Simona, że nie powinien mówić o uporządkowaniu, ale o energii swobodnej, jako że energia jest zawarta w pożywieniu, a nie pomiar uporządkowania materii, co decyduje o utrzymywaniu organizacji zwierząt [...]. I ta rada w zasadzie pozostała słuszna”¹⁷³³. W innym miejscu Riedl dodaje: „Informacja powinna bez wątpliwości być obligatoryjna wobec panującej drugiej zasady termodynamiki i eksperci od termodynamiki powinni uwzględnić przyklepienie do ich

¹⁷³¹ Por. tamże, s. 330.

¹⁷³² Por. R. Riedl, *Schrödinger's negentropy concept and biology* [w:] J. Götschl (ed.), *Erwin Schrödinger's world view...*, s. 65. Por. J. Götschl, W. Leinfellner, *Introduction*, s. 7.

¹⁷³³ R. Riedl, *Schrödinger's negentropy...*, s. 60.

wyrażenia energii swobodnej”¹⁷³⁴. Austriacki biolog podkreśla, że energia swobodna nie ma strukturalnego odpowiednika i jest to ostateczny koncept, który staje się coraz bardziej istotny dla wszystkich nauk o życiu¹⁷³⁵. Riedl przekonuje także, że jeśli biologiczne uporządkowanie jest rozumiane nie tylko jako dynamiczne, ale również jako ewolucyjne, znacznie łatwiej jest wyjaśnić to w ramach równoważenia energii (oszczędzania i strat energii pomiędzy układami ożywionymi, a ich środowiskami) niż przez koncept uporządkowania¹⁷³⁶. Ten sformułowany na nowo przez Prigogine’a energetyczny koncept razem z funkcjonowaniem hierarchicznych struktur organizmów i rolą informacji dla organizmów żywych uzupełnia zdaniem autora poglądy Schrödingera.

Bazując na uwagach Schrödingera na temat entropii zamieszczonych w *What is life?* własne, oparte na współczesnej wiedzy rozstrzygnięcia, perspektywy i sposoby analizy dotyczące organizacji biologicznej i ujemnej entropii przedstawiają Francis Bailly i Giuseppe Longo. Autorzy koncentrują się zwłaszcza na próbie naszkicowania powiązania zasady entropii z wielkoskalowymi zachowaniami organizmu żywego¹⁷³⁷. Schrödinger podkreśla znaczenie nabycia organizacji jako ujemnej entropii, w tym także za pośrednictwem spożywanego pokarmu. Nabywanie tej organizacji będzie przyczyniać się do powstania trwających napięć między wzrostem entropii (charakterystycznym dla dowolnego nieodwracalnego procesu termodynamicznego generującego bezład, nieporządek) a utrzymaniem porządku. „To właśnie utrzymanie porządku – piszą Bailly i Longo – jego ciągła regeneracja jest tym, co nas naprawdę interesuje i co pragniemy ująć w ramach »in abstracto« za pomocą formuł matematycznych jako ujemną entropię, posiadającą własne teoretyczne zasady. Będzie się to odbywać niezależnie od jakiegokolwiek analizy przyczynowej, która z pewnością wymagałaby scalenia z teoriami fizyczno-chemicznymi; jeśli jednak nie posiadamy (przynajmniej) dwóch teorii, każdej z własną pojęciową autonomią, nie mamy też nic, co potrzebowaliśmy scalić”¹⁷³⁸.

Badacze przypominają, że pojęcie ujemnej entropii było wiele razy wprowadzane do fizyki, ale po jakimś czasie zawsze odrzucane, gdyż ter-

¹⁷³⁴ Tamże, s. 63.

¹⁷³⁵ Por. tamże, s. 64. Por. J. Götschl, W. Leinfellner, *Introduction*, s. 7.

¹⁷³⁶ Por. R. Riedl, *Schrödinger's negentropy...*, s. 64. Por. J. Götschl, W. Leinfellner, *Introduction*, s. 7.

¹⁷³⁷ Por. F. Bailly, G. Longo, *Biological organization and negative entropy: based on Schrödinger's reflections*, Cornell University Library, <https://arxiv.org/abs/0801.2038> (10.10.2016).

¹⁷³⁸ Tamże.

modynamika była w stanie wypracować szerokie ramy bez konieczności uciekania się do niczego innego niż wynikających z niej ogólnych zasad (zachowania energii, nie zmniejszającej się entropii i braku jakiegokolwiek ruchu – a w związku z tym jakiegokolwiek formy energii – w temperaturze zera absolutnego)¹⁷³⁹. Unifikacja z klasyczną dynamiką była możliwa za pomocą wykorzystania statystyk i nieograniczonych analiz trajektorii cząstek jako optymalnych trajektorii działania. Powyższa perspektywa skupia się na energii i powiązanych z nią pojęciach: nawet entropię można wyrazić w odniesieniu do rozkładu (degradacji) energii (i/lub dyspersji trajektorii). Zdaniem Bailly’ego i Longo tym, co liczy się najbardziej w przypadku organizmów żywych, jest organizacja oferująca kluczową obserwabłą z perspektywy „większej skali”, która u Schrödingera jest komórką lub organizmem. Pomimo przejrzystości wyboru skali stosowanej przez austriackiego fizyka reakcje wobec jego rozważań były równie negatywne, co niestosowne. „Ich jawne odrzucenie – piszą Bailly i Longo – ze strony wielu autorów było spowodowane zwykłym zwarciem: organizacja i stabilność zjawiska życia nie może być rozumiana w sposób inny niż w odniesieniu do organizacji i stabilności genomu. Ten ostatni jest oczywiście z natury fizyczno-chemiczny i dlatego nie wymaga innych koncepcji niż te wynikające z fizyki i chemii”¹⁷⁴⁰. Badacze nie zgadzają się ze „stronniczą”, jak twierdzą, interpretacją idei austriackiego fizyka. Bronią jego „molekularnej perspektywy”, podkreślając, że genetyka Schrödingera w ramach fizyki szkicuje problem przekazywania organizacji biologicznej¹⁷⁴¹. Rozważa dziedziczność w odniesieniu do jej fundamentów. Wypracowuje problem teoretyczny i szuka jego rozwiązania. Zauważają także, że Schrödinger nie proponuje żadnej konkretnej zasady, która byłaby matematycznie sformalizowana, niemniej kładzie nacisk na konieczność analizy zjawisk statystycznych, niezwykle ważnych w fizyce dla zrozumienia termodynamicznej entropii¹⁷⁴². Analizy te mogą, jak twierdzą Bailly i Longo, pomóc ustalić korelacje fizycznych teorii, wśród których znajdziemy chemię makrocząsteczek. W szczególności Schrödinger uważa, że konieczne jest dążenie do scalenia dwóch różnych mechanizmów, które umożliwiłyby zachodzenie uporządkowanych procesów: statystycznego mechanizmu wytwarzającego porządek z nieporządku i nowej metody, w której porządek generuje porządek. To właśnie w tym tkwi złożoność zjawisk biologicznych: porządek jawi się jako zorganizowana jedność, zróżnicowana i spleciona, która tworzy i utrzymuje się we własnym zakresie. Jeśli

¹⁷³⁹ Por. tamże.

¹⁷⁴⁰ Tamże.

¹⁷⁴¹ Por. tamże.

¹⁷⁴² Por. tamże.

chodzi o drugi mechanizm organizacji („porządek z porządku”), Schrödinger przedstawia ideę, zgodnie z którą, mechanizm ten wykorzystywałby pobieranie ujemnej entropii z otoczenia, w szczególności z pokarmu.

Bailly i Longo zauważają, że materia ożywiona, poza swymi zdolnościami reprodukcyjnymi, generatywnymi i plastycznymi, wyróżnia się zachodzącą w niej przemianą, która ze względu na różne wymiany z otoczeniem i wewnętrzne reakcje biochemiczne jest w stanie pozostać dynamicznie daleka od równowagi i strukturalnie stabilizować „rozszerzoną sytuację krytyczną”, jaka ją charakteryzuje¹⁷⁴³. W tym punkcie autorzy dokonują próby przeanalizowania, z termodynamicznego punktu widzenia, dynamiki przemiany materii. „Chociaż proponowane tutaj podejście – piszą – przybiera postać w dużej mierze czerpiącą z koncepcji fizyki, specyficzność biologiczna pojawia się od momentu uwzględnienia przez nas ewolucyjnej autonomii jej organizacji i wynikowego »porządku« w schematycznej i wysoce abstrakcyjnej formie ujemnej entropii”¹⁷⁴⁴.

Aby określić złożoność organizmu żywego, autorzy wprowadzają rozróżnienie między trzema możliwymi komponentami:

- kombinatorycznym, gdzie ważnym czynnikiem jest liczba zróżnicowanych linii rozwojowych komórki,
- morfologicznym, który bierze pod uwagę mniej lub bardziej wyszukane formy struktur i ich powiązań,
- funkcjonalnym, odnoszącym się do relacji wytworzonych przez sieci składające się z komórek lub części organizmu¹⁷⁴⁵.

W zależności od konkretnej sytuacji dominujące warunki mogą się zmieniać – na przykład w mniej rozwiniętych organizmach w zależności od liczby komórek kluczową rolę może odgrywać aspekt kombinatoryczny¹⁷⁴⁶. Podobnie – jeśli mowa o aspekcie morfologicznym, znaczący wkład ma istnienie mniej lub bardziej znaczących symetrii, mniej lub bardziej licznych powiązań poszczególnych elementów, mniej lub bardziej osobliwych struktur (na przykład fraktale), które w niektórych przypadkach mogą stanowić główne komponenty (może matematycznie dominujące) złożoności organizmu. W wysoko rozwiniętych organizmach – na przykład obdarzonych sporym i rozbudowanym układem nerwowym – wyraźnie dominować zdaje się relacyjny/funkcjonalny aspekt, logarytmicznie uzależniony od liczby zaangażowanych komórek. Różne manifestacje tej samej całkowitej złożoności w zjawiskach życia ilustruje zdaniem autorów generyczność trajektorii bio-

¹⁷⁴³ Por. tamże.

¹⁷⁴⁴ Tamże.

¹⁷⁴⁵ Por. tamże.

¹⁷⁴⁶ Por. tamże.

logicznych wychodząca naprzeciw osobliwym liniom geodezyjnym fizyki, ponieważ ta sama złożoność stanowi – jak twierdzą – istotny element koncepcyjnej przestrzeni charakterystycznej dla jakiegokolwiek analizy zjawisk życiowych.

* * *

Podsumowując tę część pracy i akcentując kluczowe jej treści, należy stwierdzić, że poglądy Schrödingera dotyczące zagadnień związanych z życiem spotkały się z ogromnym zainteresowaniem zarówno fizyków, jak i biologów. Reakcje czytelników na *What is life?* były zarówno pozytywne, jak i krytyczne. Autorzy recenzji i opisów omawianej broszury dostrzegli szereg interesujących wątków w spekulacjach Schrödingera o fenomenie życia. Doceniano nowatorską linię rozumowania, zwracano też uwagę na doniosłość biologicznych refleksji zawartych w *What is life?*, nie brakowało także uwag krytycznych. Wskazywano na terminologiczne, metodologiczne i merytoryczne nieścisłości i błędy występujące w jego koncepcji życia. Dostrzegano także elementy nienaukowe i liczne zapożyczenia. Wielu recenzentów raziła wreszcie ogólnikowość i powierzchowność biologicznych analiz.

Wiele z tych krytycznych uwag wydaje się być jednak zdecydowanie „na wyrost”. Pod adresem Schrödingera wysuwano między innymi zarzut, że nie wykorzystał potężnej metafory, jaka mieści się w słowie „informacja”. Odnosząc się do tego zarzutu, trzeba pamiętać, że w czasach, w których pisał on swoją książkę, w dyskusjach nad fenomenem życia nie przywiązywano większej wagi do tego pojęcia również ze względu na to, że wówczas nadawano mu inne, zdecydowanie dużo węższe znaczenie. Spostrzeżenia Schrödingera dotyczące „zakodowanego scenariusza” bez wątpienia kształtowały sposób myślenia wielu późniejszych badaczy życia.

W dalszej części rozważań starano się wskazać podobieństwa i różnice między biologicznymi poglądami Schrödingera a odpowiadającymi im poglądami Bohra i Delbrücka. Różnica między Schrödingerem a wspomnianymi fizykami ujawniła się już w samym rozumieniu paradoksu. Delbrück dopiero szukał paradoksu i to poszukiwanie kierunkowało przebieg jego badań. Schrödinger przeciwnie – wierzył, że paradoks został już odkryty. Wyraził go w pytaniu, jak osobliwe zniekształcenie dolnej wargi u kilku członków dynastii Habsburgów mogło być przekazywane przez trzy stulecia. Schrödinger różnił się od Bohra i Delbrücka w ocenie znaczenia zasady komplementarności w biologii. W przeciwieństwie do obu wspomnianych fizyków marginalizował pojęcie komplementarności w wyjaśnianiu zjawisk

biologicznych, a zasadniczą perspektywą filozoficzną Schrödingera w jego spekulacjach nad fenomenem życia stał się klasyczny determinizm. W opozycji do Austriaka Bohr i Delbrück wierzyli, że mechanika kwantowa radykalnie zmienia nasze rozumienie życia. Schrödinger różnił się od Bohra i Delbrücka także drogą, na jakiej możliwe jest lepsze zrozumienie zagadki życia. Bohr, podobnie jak Delbrück (choć w mniejszym stopniu), demonstrował swój dystans w stosunku do chemii. Schrödinger nie w pełni podzielał ich stanowiska, sugerując, że przyszłe postępy w zrozumieniu życia, są bardziej prawdopodobne ze strony chemii aniżeli fizyki. Schrödinger różnił się także od Bohra i Delbrücka w kwestii rodzaju „nowych praw”, jakie mają pojawić się w wyniku badania życia. Uważał, że wszelkie nowe prawa, które mogą zostać wykryte, byłyby niemożliwe do odniesienia się do nich za pomocą znanych praw fizyki.

W dalszej części rozdziału stwierdzono, że *What is life?* stało się magnesem przyciągającym do biologii zarówno fizyków, jak i chemików. Praca Schrödingera odegrała ważną rolę w mobilizacji młodych fizyków i chemików do podjęcia próby zrozumienia działania natury substancji genetycznej. Zaciekała ona także wielu biologów. Na liście tych, dla których ta publikacja miała znaczący wpływ, znaleźli się między innymi: Seymour Benzer, Francis Crick, George Gamow, Alfred Hershey, Salvador Luria, Gunther Stent, Kurt G. Stern, James Watson i Maurice Wilkins. Mimo to nadal budzi dyskusje, na ile (i czy w ogóle) książka Schrödingera była impulsem do powstania biologii molekularnej.

Wiele szczegółowych twierdzeń austriackiego fizyka wyłożonych w jego książce poddawanych jest obecnie gruntownej reinterpretacji. Współcześni badacze życia zastanawiają się nad kwestią, jak uzgodnić idee zawarte w *What is life?* ze współczesną wiedzą o pochodzeniu życia. Stuart A. Kauffman z perspektywy kilkudziesięciu lat zastanawia się, czy – tak jak przewidywał austriacki fizyk – duża aperiodyczna substancja stała jako stabilny nośnik dziedzicznych informacji jest konieczna do powstania życia i jego ewolucji. Kauffman podkreśla, że praca austriackiego fizyka zasługuje na swą znakomitą reputację. Kilka lat po jej publikacji poznana została struktura DNA uświadamiająca istnienie kodu prowadzącego od DNA do RNA i do głównej struktury białka. Mimo iż spostrzeżenia Schrödingera były prawidłowe co do istniejącej formy życia, w opinii Kauffmana w głębszym sensie czegoś im zabrakło. Nie duże, aperiodyczne ciała stałe wyposażone w mikrokod, ale niektóre rodzaje stabilnej dynamiki grupowej są konieczne i wystarczające do powstania i ewolucji życia. Ostateczne źródła porządku mogą wymagać odrębnego porządku stabilnych wiązań chemicznych pochodzących z mechaniki kwantowej.

Schrödinger zaznacza możliwość istnienia „nowych praw”. Czy są wymagane? Wielu współczesnych badaczy wyraża przekonanie, że żadne „nowe prawa” (porównywalne do mechaniki kwantowej i teorii względności) w odniesieniu do życia nie są wymagane. Gerard Battail twierdzi, że do opisu życia, oprócz materii i energii, potrzebna jest informacja. W przeciwieństwie do układów nieożywionych istoty żywe wykorzystują informację. Ta ostatnia kontroluje właściwości istoty żywej.

Współcześni badacze życia konfrontują tezy wyłożone w *What is life?* z tym, co dzisiaj wiemy na temat dziedziczenia. Stuart A. Kauffman przekonuje, że aperiodyczna stała substancja szczegółowo opisana przez Schrödingera nie wystarczy do wyjaśnienia dziedzicznej różnorodności, a mikrokod od niej uzależniony to za mało, by zapewnić porządek. Zamiast tego konieczny i wystarczający do osiągnięcia wymaganej struktury jest zbieżny przepływ układów w uporządkowanym systemie. Vasily V. Ogrzyzko twierdzi, że kwestia stabilności systemów biologicznych nie ogranicza się tylko do dziedziczności. Istnieje również „stabilność epigenetyczna”, która jest odpowiedzialna za utrzymanie fenotypowych cech w obydwu, niereplikujących i replikujących komórkach, niezależnie od sekwencji DNA. Ogrzyzko przekonuje, że zasady kwantowe mogą okazać się pożyteczne w wyjaśnieniu epigenetycznej stabilności. Odwołuje się w tym kontekście do zjawiska kwantowego splątania. Jeffrey S. Wicken podkreśla, że mechanistyczna interpretacja „porządek z porządku” Schrödingera nie uwzględnia dynamiki samoorganizacji. Przekonuje, że organizacja biologiczna jest wypadkową nierównowagowych warunków i specyficznych ścieżek kinetycznych. Roger Penrose koncentruje się na pytaniu Schrödingera, czy idee fizyki klasycznej wystarczają do wyjaśnienia podstawowych funkcji życiowych. Twierdzi, że istotną rolę w podstawowych procesach życiowych mogą odgrywać „silnie” kwantowomechaniczne właściwości przyrody. Obszar, w którym taka rola jest przywoływana, obejmuje funkcjonowanie mózgu. Stuart Hameroff, wbrew konwencjonalnemu przekonaniu współczesnej nauki, domniemywa, że systemy biologiczne są zdolne do wykorzystywania ciepła i energii w celu przeciwdziałania dekoherencji i promowania funkcjonalnych stanów kwantowych.

Przykładem współcześnie podejmowanych prób poszerzenia idei dotyczących termodynamiki w kontekście fenomenu życia sformułowanych przez Schrödingera jest propozycja Erica D. Schneidera (wraz z Dorionem Saganem i Jamesem J. Kayem). Według ustaleń Schneidera (i współautorów) druga zasada termodynamiki nie tylko nie stanowi przeszkody dla zrozumienia życia, ale nawet jest niezbędna dla dokonania pełnego opisu procesów życiowych. Schneider, Sagan i Kay poszerzają drugą zasadę termody-

namiki w sposób umożliwiający opisanie układów i procesów zachodzących w obszarach nierównowagowych. W takim ujęciu życie jest przejawem „poszerzonej” drugiej zasady termodynamiki jako daleki od stanu równowagi „system rozpraszający”. Zaproponowana „termodynamiczna teoria życia” ukazuje, w jaki sposób życie podlega tym samym termodynamicznym imperatywom, co złożone układy nieożywione. Rupert Riedl uwypatnia zaniedbany przez Schrödingera koncept energii swobodnej i wymiany energii pomiędzy przekształcanymi systemami i ich środowiskiem. Wreszcie Francis Bailly i Giuseppe Longo, bazując na uwagach Schrödingera w *What is life?* na temat ujemnej entropii, przedstawiają propozycję współczesnego ujęcia tego zagadnienia, przypominając, że pojęcie ujemnej entropii było wiele razy wprowadzane do fizyki, ale po jakimś czasie je odrzucano. Zdaniem autorów tym, co naprawdę ma znaczenie dla organizmów żywych, jest organizacja.

Rozdział V

KONTEKSTOWY WYMIAR BADAŃ NAD ORGANIZACJĄ ŻYCIA

Aktualnie badania nad organizacją życia nie dokonują się tylko w ramach jednej dziedziny, na przykład fizyki, ale w szerszym kontekście z udziałem wielu nauk przyrodniczych. Wynika to stąd, że po drugiej wojnie światowej nastąpił ogromny postęp w rozwoju tych dyscyplin naukowych. Powstało wiele nowych dziedzin, które podejmują problem rozszyfrowania życia zarówno w aspekcie historycznym, jak i aktualnym. W niniejszym rozdziale autor pragnie ukazać, jakie problemy występują w procesie poznania organizacji życia, dlatego chce zaprezentować czytelnikowi szeroki kontekst badań nad życiem. Aktualnie intensywnie rozwija się cały szereg dziedzin w biologii, jak również fizyki, to tworzy kontekst obecnych badań. Przykładowo, badając układy ożywione, nie można odwołać się jedynie do założeń termodynamiki, należy wykorzystać osiągnięcia z innych dziedzin, w tym nowych gałęzi biologii. Innymi słowy, trzeba pójść w kierunku interdyscyplinarnego spojrzenia na fenomen życia. Z tego powodu zaprezentowano aspekt formalny i merytoryczny kontekstowych badań nad organizacją życia podejmowanych przez współczesnych fizyków, takich jak Paul C.W. Davies, Nigel Goldenfeld, Carl R. Woese, Evelyn Fox Keller, Bernd-Olaf Küppers, Lebrecht von Klitzing, Alfred Driessen, Hans-Peter Dürr, Howard Wiseman, Jens Eisert, Seth Lloyd, Jim Al-Khalili, Apoorva D. Patel, John Swain, Arun K. Pati oraz Derek Abbott. Przedstawiono różne postawy współczesnych fizyków (na bazie współczesnego stanu wiedzy) wobec odwiecznego sporu między redukcjonizmem a holizmem. W centrum rozważań znalazły się takie tematy, jak systemowe zasady organizacji bioukładów oraz kwantowe aspekty życia.

5.1. ASPEKT FORMALNY KONTEKSTOWYCH BADAŃ NAD ORGANIZACJĄ ŻYCIA

Wiek XXI podobnie jak poprzedni cechuje wielka różnorodność stanowisk fizyków podejmujących problem organizacji życia. Jeśli opracujemy

mapę stanowisk fizyków podejmujących ten problem, to okaże się, że ma ona różne kształty. Znajdziemy na niej zarówno zwolenników redukcjonizmu, jak i antyredukcjonizmu. Fizycy nie rezygnują z prób wyjaśnienia fenomenu życia ze względu na jedność świata: czy mieści się ono w tej jedności, czy też nie, dlatego autor zamierzał przedstawić szeroką panoramę stanowisk fizyków, których część zakłada wystarczalność praw fizyki w wyjaśnieniu fenomenu życia. Chociaż znajdujemy w ich analizach elementy sugerujące autonomię życia, nie zmierzają oni do jej wyraźnego uznania. Skąd to wynika? Wydaje się, że z obawy, że jeżeli przyjmiemy autonomię życia, to trzeba będzie konsekwentnie trzymać się tego założenia w podejmowanych analizach. Inni są zdania, że nie należy zawężać badań nad życiem jedynie do praw fizyki.

Analiza poglądów rozpoczyna się od autora, który w swych poglądach na życie jest bardzo zbliżony do dziewiętnastowiecznego mechanicyzmu – niemieckiego fizyka Bernda-Olafa Küppersa. Za jedną z najbardziej imponujących cech współczesnej nauki uważa on ogromny postęp dokonany w dziedzinie zrozumienia kompleksowych fenomenów¹⁷⁴⁷. Szczególnie widoczny przykład tej tendencji odnajduje w rozwoju biologii molekularnej. Według fizyka rezultaty biologii molekularnej stały się głównym punktem zainteresowania, ponieważ doprowadziły do głębokiego wejrzenia w fizyczną naturę organizmów żywych, łącznie z fizycznymi aspektami dziedziczenia. Co więcej, wyniki biologii molekularnej zasugerowały stworzenie fizycznej teorii ewolucji oraz spójnej koncepcji początków życia. Biolodzy starają się naświetlić i zrozumieć molekularne zasady zróżnicowania i morfogenezy. Neurobiolodzy dowiadują się coraz więcej o fizycznej strukturze i funkcjonowaniu centralnego układu nerwowego. Zdaniem Küppersa powyższe fakty świadczą o ogromnym sukcesie redukcjonistycznego programu badań¹⁷⁴⁸. Przypomina on, że program ten zaczyna się od ontologicznego założenia, że nie ma żadnych znaczących różnic między ożywioną a nieożywioną materią (organizm żywy nie jest niczym innym niż złożonym zbiorem atomów oraz molekuł), a przejście od nieożywionej do ożywionej materii musi być postrzegane jako ciągłe. Cały fenomen biologiczny może zostać wytłumaczony w ramach fizyki i chemii. Jeśli są jakieś konkretne

¹⁷⁴⁷ Por. B.O. Küppers, *Understanding complexity* [w:] A. Beckermann, H. Flohr, J. Kim (eds), *Emergence or reduction?*, s. 241. Zob. tenże, *Einleitung. Inwieweit lassen sich die Lebenserscheinungen physikalisch-chemisch erklären?* [w:] B.-O. Küppers (ed.), *Leben = Physik + Chemie?*..., s. 9.

¹⁷⁴⁸ Por. tenże, *Understanding complexity*, s. 241. Por. tenże, *Geneza informacji biologicznej. Filozoficzne problemy powstania życia*, tłum. W. Ługowski, PWN, Warszawa 1991, s. 115–117.

ograniczenia fizycznego rozumienia materii ożywionej, są one postrzegane jako tymczasowe, a nie fundamentalne. Zakłada się, że fenomenem życia nie rządzą żadne inne zasady poza prawami fizyki i chemii.

Niemiecki fizyk zauważa, że jeśli zadamy ogólne pytanie o to, w jakich kwestiach fizyka różni się od biologii, zazwyczaj uzyskamy odpowiedź, że fizyka ma do czynienia z prostymi układami, a biologia – z kompleksowymi¹⁷⁴⁹. W pierwszej chwili odpowiedź ta wydaje się przekonująca, jest bowiem zgodna z intuicyjnymi przekonaniem odnośnie do badanej materii. Przy bliższej analizie jednak pogląd ten jest trudny do utrzymania. Küppers rozważa prosty układ, typowy dla fizyki, jakim jest jeden mol idealnego gazu: „W warunkach standardowych taka ilość gazu zawiera około 10^{24} cząsteczek – dokładna liczba podawana jest przez dobrze znaną liczbę Avogadra. Jeśli chcemy opisać układ z dokładnością mikrofizyczną, to zaczynając od fundamentów mechaniki klasycznej, musimy opisać szybkość i pozycję każdej z 10^{24} cząsteczek w zadanym czasie lub używając języka technicznego, musimy opisać przestrzeń fazową. Dynamiczne zachowanie systemu charakteryzowane jest przez ruch chmury punktów w przestrzeni fazowej. Jednak, specyfikacja wszystkich punktów fazowych może zostać dokonana tylko w ramach »Gedankenexperiment« i nie może zostać dokonana w rzeczywistości. Nawet w tym rzekomo prostym przypadku mamy do czynienia z wyjątkowo kompleksowym układem”¹⁷⁵⁰.

Küppers twierdzi, że organizm żywy może zostać porównany (i to na wiele sposobów) do kompleksowej maszyny¹⁷⁵¹. Podkreśla, że nie przez przypadek cybernetyka bierze swój początek z teorii organizmu jako maszyny. Zauważa on, że podobnie jak w przypadku maszyny organizm jest zależny od sposobu, w jaki został stworzony, bowiem jego funkcje zostały podyktowane wcześniej. Zasady konstrukcji reprezentują warunki graniczne, zgodnie z którymi prawa fizyki i chemii sprawiają, że organizm jest pod względem reprodukcyjnym samowystarczalny. Jak w przypadku maszyny fenomen emergencji i odwrotnej przyczynowości może zostać zaobserwowany w organizmie żywym i przypisany istnieniu specyficznych warunków granicznych, przejawiających się w materii ożywionej. Niemiecki fizyk stoi na stanowisku, że to specyficzna struktura warunków granicznych określa ogólną konstrukcję układu, tak dla maszyny, jak i organizmów żywych. W przypadku maszyny warunki graniczne określane są w projekcie przez jej konstruktora. Dla organizmów żywych podobne plany konstrukcyjne nie istnieją. Küppers odnajduje je w genomie organizmów: „Jeśli materiał gene-

¹⁷⁴⁹ Por. tenże, *Understanding complexity*, s. 243.

¹⁷⁵⁰ Tamże.

¹⁷⁵¹ Por. tamże, s. 250.

tyczny organizmu umieszczony jest w odpowiednim fizyczno-chemicznym otoczeniu takim, jak komórka jajowa, ekspresja następuje na poziomie fenotypowym; to znaczy, że plan konstrukcyjny organizmu zapisany w genomie zamieniany jest na materię, krok po kroku, dlatego struktury wszystkich warunków granicznych, jakie pojawiają się w ukończonym, zróżnicowanym organizmie, mają niewątpliwe źródło w kodzie genetycznym. Genom sam w sobie reprezentuje w takim wypadku główny warunek graniczny, który określa wszystkie pozostałe warunki pojawiające się w organizmie żywym¹⁷⁵². Küppers szczegółowo rozważa warunki graniczne znajdujące się za porządkiem materii ożywionej. Wszystkie warunki graniczne dla organizmów żywych rezydują w konkretnej fizycznej strukturze, w molekułach DNA¹⁷⁵³. To mikrostan, szczegółowa sekwencja monomerów DNA, koduje wszystkie właściwości strukturalne i funkcjonalne organizmu. Sekwencja monomerów w molekułach DNA jest warunkiem granicznym w sensie fizycznym. Może zostać sprecyzowana przez podanie współrzędnych w przestrzeni wszystkich atomów w strukturze molekuły, razem z pozostałymi fizyczno-chemicznymi warunkami otoczenia (temperatura, siła jonowa i inne). Struktura reprezentuje precyzyjny zestaw właściwości fizycznych, które zarządzają wszystkimi fizycznymi i chemicznymi procesami w układzie.

Küppers zastanawia się w jakim zakresie w ramach fizyki może zostać wyjaśnione istnienie tej specyficznej charakterystyki materii ożywionej dokonanej przez warunki graniczne¹⁷⁵⁴. By udzielić odpowiedzi na to pytanie, odwołuje się do koncepcji przestrzeni sekwencyjnej. W celu zaprezentowania tej koncepcji wprowadza krótką dygresję o mechanizmie magazynowania informacji genetycznych¹⁷⁵⁵. Informacja wymagana do skonstruowania istoty żywej umieszczona jest zawsze w konkretnej klasie molekuł komórki: kwasach nukleinowych, zazwyczaj DNA. Molekuły DNA to makromolekuły tworzone przez łączenie mniejszych molekuł – nukleotydów – w długie łańcuchy. W podobnej makromolekule informacyjnej monomery mają podobną funkcję do liter w języku. Szczegółowa sekwencja monomerów w DNA określa całkowicie informację genetyczną¹⁷⁵⁶. „Jeśli poprzez spontaniczną lub kierowaną mutagenezę – pisze Küppers – litera w podobnym planie genetycznym zostanie zamieniona, może to doprowadzić – podobnie jak błąd typograficzny w książce – do chaosu w tekście oraz śmierci i rozkładu organizmu. Można tutaj mówić o pomyłce, przez

¹⁷⁵² Tamże.

¹⁷⁵³ Por. tamże.

¹⁷⁵⁴ Por. tamże, s. 254.

¹⁷⁵⁵ Por. tamże, s. 246.

¹⁷⁵⁶ Por. tamże, s. 246–247.

którą zakłócona struktura organizmu nie może już pełnić szczególnych funkcji dla całego układu. Wynika z tego, że informacja genetyczna jest w posiadaniu pewnego konkretnego semantycznego schematu, który koduje właściwości strukturalne i funkcjonalne organizmu i reprezentuje miarę jego materialnej kompleksowości¹⁷⁵⁷.

Niemiecki fizyk twierdzi, że wiele spojrzeń na biologiczną kompleksowość wynika z koncepcji przestrzeni sekwencyjnej, którą charakteryzuje następująco: „Przestrzeń sekwencyjna jest wielkowymiarowym hipersześcianem, reprezentującym wszystkie możliwe warianty sekwencji DNA. Analogicznie do przestrzeni fazowej, przestrzeni sekwencyjnej możemy przypisać konkretną liczbę mikrostanów, sekwencji, jakie można uzyskać ze skończonej klasy monomerów w makromolekule skończonej długości. Nawet dla wyjątkowo krótkich makromolekuł przestrzeń sekwencyjna ma znaczną złożoność. Nawet sekwencja informacyjna genomu bakterii ma około 102 400 000 mikrostanów w swojej przestrzeni sekwencyjnej, gdzie bardzo małą część wszystkich tych mikrostanów można uznać za kodującą znaczącą informację¹⁷⁵⁸. W kontraście do układów fizycznych, w systemach biologicznych szczegółowa wiedza o mikrostanach ich informacyjnych makromolekułach ma szczególne znaczenie dla zrozumienia tych układów¹⁷⁵⁹. To specyficzna struktura DNA definiuje właściwości materii żywej. Nie ma tu możliwości odnoszenia się do pośrednich wartości celem zmniejszenia kompleksowości przestrzeni sekwencyjnej. Nie ma możliwości znalezienia makrostanu, przechowującego wystarczające informacje o całym układzie. Jeśli ktoś ma zamiar zrozumieć, jak mogły powstać organizmy żywe, kiedy istniała wyłącznie materia nieożywiona, musi przeanalizować całą przestrzeń sekwencyjną systemu i przeanalizować jego przestrzeń sekwencyjną we wszystkich możliwych mikrostanach. Küppers przekonuje, że dzięki niezwyklej kompleksowości przestrzeni sekwencyjnej, biologia zmusza fizyków do nowego podejścia¹⁷⁶⁰. Konkretnie rodzaje abstrakcji i idealizacji, zwyczajowe w ramach fizyki równowagowej, nie mają już znaczenia w biologii. „Stwierdzenie jest tym ważniejsze – pisze – że fenomen wewnętrznej kompleksowości widoczny jest w świecie ożywionym na wszystkich poziomach organizacji, bez względu na to, czy rozważamy przestrzeń sekwencyjną makromolekuł informacyjnych, czy przestrzeń stanów w sieciach neuronowych¹⁷⁶¹.

¹⁷⁵⁷ Tamże, s. 247.

¹⁷⁵⁸ Tamże.

¹⁷⁵⁹ Por. tamże.

¹⁷⁶⁰ Por. tamże, s. 248.

¹⁷⁶¹ Tamże.

Wynika stąd, że warunki graniczne organizmów żywych materializują się na poziomie molekularnym w sekwencji DNA genomu i w związku z tym zdefiniowanych mikrostanów przestrzeni sekwencyjnej¹⁷⁶². Nawet dla najprostszych organizmów liczba wymiarów przestrzeni sekwencyjnej jest niewyobrażalnie duża¹⁷⁶³. Czy istnienie specyficznych mikrostanów może zostać wyjaśnione prawami fizyki? Odpowiadając, niemiecki fizyk stwierdza: „Jak dotąd nie znaleźliśmy niczego, co wsparłoby hipotezę, że warunki biologii molekularnej organizmu żywego są bezpośrednią konsekwencją praw fizycznych. Zamiast tego mamy wiele eksperymentalnych dowodów przemawiających za założeniem, że wszystkie mikrostany w przestrzeni sekwencyjnej mają podobne prawdopodobieństwo realizacji w ramach obowiązujących praw fizycznych. Ponieważ jednak liczba wszystkich możliwych mikrostanów jest niesamowicie duża, prawdopodobieństwo realizacji konkretnego zdefiniowanego mikrostanu staje się nikłe. Oznacza to z kolei, że wybór i stabilizacja zdefiniowanego mikrostanu, na przykład mikrostanu przenoszącego informację biologiczną, nie może zostać wytłumaczona bez ram fizyki równowagowej”¹⁷⁶⁴. Stąd zdaniem autora selektywna samoorganizacja mikrostanów w przestrzeniach sekwencyjnych wydaje się jedyną możliwą, zgodnie z warunkami procesów nierównowagowych, poprzez które nieokreślona liczba mikrostanów ograniczana jest do kilku mających znaczenie z biologicznego punktu widzenia¹⁷⁶⁵. Procesy samoorganizacji molekularnej mogą zostać zredukowane całkowicie do znanych praw fizyki. Koncepcja warunków granicznych jest niezbędna dla zrozumienia fenomenu biologicznej kompleksowości.

Küppers twierdzi, że nie istnieje wyraźna granica pomiędzy ożywionymi i nieożywionymi układami, lecz mamy do czynienia tylko z przejściem z jednego stanu w drugi¹⁷⁶⁶. Na potwierdzenie wskazuje istnienie obiektów, na przykład wirusów, które należą do obszaru na pograniczu nieożywionej i ożywionej materii. Częstka wirusa posiada wszystkie właściwości układu ożywionego, kiedy znajduje się wewnątrz komórki bakteryjnej gospodarza. Wykorzystuje metabolizm komórki gospodarza w celu rozmnażania, mutuje, podlega selekcji naturalnej w jego ograniczonym polu istnienia. Podobnie jak każdy inny organizm w toku ewolucji dostosował się do swojej funkcji

¹⁷⁶² Por. tamże, s. 254.

¹⁷⁶³ Por. tamże, s. 255.

¹⁷⁶⁴ Tamże.

¹⁷⁶⁵ Por. tamże.

¹⁷⁶⁶ Por. tenże, *Molecular theory of evolution: outline of a physico-chemical theory of the origin of life*, trans. P. Woolley, Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg–New York–Tokyo 1985, s. 9.

oraz może przetrwać jedynie w określonych warunkach. Tak więc w środowisku komórki gospodarza wirus posiada wszystkie właściwości, które się zazwyczaj przypisuje istotom żywym. Z kolei w izolacji zachowuje się pod każdym względem jak prosta cząsteczka oraz nie spełnia żadnego z możliwych kryteriów bycia żywym. Wirusy przyjmują w tej sytuacji typowy status hybrydowy pośród obiektów ożywionych oraz nieożywionych, dzięki czemu można przypuszczać, że przejście pomiędzy obiektami ożywionymi oraz nieożywionymi jest płynne¹⁷⁶⁷.

W ocenie fizyka pojawiające się w związku z kompleksowością zjawisk życiowych ograniczenia redukcjonistycznego opisu układów ożywionych nie mają charakteru zasadniczego¹⁷⁶⁸, a wszelkie obiekcje wobec redukcjonistycznego programu mają korzenie psychologiczne: „W rzeczy samej, bardzo łatwo przychodzi zrozumienie dyskomfortu, jaki musi odczuwać antyredukcjonista. Jeśli bowiem poglądy redukcjonistyczne są słuszne i cały fenomen biologiczny – przynajmniej zasadniczo – może zostać wytłumaczony prawami fizyki, uzasadniony jest ontologiczny wniosek, że życie jest niczym więcej ponad kompleksowe oddziaływanie dużej liczby atomów i molekuł. Zgodnie z tym, nawet fenomen świadomości musi być rozważany jako bezpośrednia konsekwencja materialnej kompleksowości – kompleksowości uznanej za zarządzaną wyłącznie przez prawa fizyki”¹⁷⁶⁹. Nie istnieje zatem program będący alternatywą dla redukcjonizmu¹⁷⁷⁰. We wszystkich w odpowiedni sposób zbadanych procesach życiowych nie ma jakichkolwiek oznak wskazujących na to, że prawa fizyki oraz chemii w ich znanych nam formach nie wystarczają, by móc wyjaśnić żywotność systemów¹⁷⁷¹. Jeśli fizykalnym wytłumaczeniom układów ożywionych są postawione granice, to nie mają one zasadniczego charakteru, lecz wynikają z kompleksowości procesów życiowych. Nie wyklucza to jednak twierdzenia, że powszechne zasady fizyki oraz chemii w procesach życiowych nie ujawnią się w specjalnej formie. Należy tak długo trzymać się uniwersalnej aktualności redukcjonistycznego programu, dopóki jego zasięg nie zostanie ograniczony kontrprzykładem¹⁷⁷².

Co uderza w koncepcji życia niemieckiego fizyka? Küppers, chociaż kładzie nacisk w fenomenie życia na kategorię informacji, to jednak wyprowadza ją w sposób całkowicie mechanistyczny (połączenie układów daje

¹⁷⁶⁷ Por. tenże, *Einleitung...*, s. 12.

¹⁷⁶⁸ Tenże, *Geneza informacji biologicznej...*, s. 134.

¹⁷⁶⁹ Tenże, *Understanding complexity*, s. 242.

¹⁷⁷⁰ Por. tenże, *Einleitung...*, s. 33.

¹⁷⁷¹ Por. tamże, s. 31.

¹⁷⁷² Por. tamże, s. 33.

informację). Wiedział on, że należy wyjaśniać w szerokim kontekście świat biotyczny, opierając się na całościowych współczesnych danych naukowych (w tym dotyczących materii, energii i informacji), chociaż obawiał się przyjąć w sposób wyraźny i zdecydowany autonomię życia.

Popiera i rozwija – chociaż w umiarkowany, „rozrzedzony”¹⁷⁷³ sposób – redukcjonistyczne stanowisko w biologii Evelyn Fox Keller¹⁷⁷⁴. Ta amerykańska fizyczka twierdzi, że fizyka i chemia są, bądź w przyszłości będą, przynajmniej po części w stanie wyjaśnić fundamentalne problemy biologiczne¹⁷⁷⁵. Zauważa ona, że wysiłki podejmowane w celu wyjaśnienia zjawisk biologicznych na podstawie właściwości fizycznych i chemicznych na dobre rozpoczęły się wraz z powstaniem biologii molekularnej¹⁷⁷⁶. Od tego momentu rozpoczęła się wielka transformacja biologii, która dotyczy zarówno języka, przedmiotu, jak i metodologii nauk o życiu¹⁷⁷⁷. Pisz: „Powstała w czasach pojęciowych przemian [...] oraz karmiona szeregiem różnego rodzaju sukcesów [...] – początkowo tylko w fizyce, ale z czasem także w biologii – biologia molekularna nabrała wystarczającej dynamiki, by odmienić dalsze losy nauki, przynosząc ze sobą cały zbiór nowych przekonań: przekonanie o absolutnej adekwatności nie tylko materializmu, ale szczególnego rodzaju (liniowego, przyczynowego) mechanizmu; przekonanie o niepodważalnej wartości prostoty; przekonanie o jednolitym charakterze prawdy [...]. Z punktu widzenia tej nowej konstelacji przekonań starsza biologia – a z nią wielu starszych naukowców – stało się przedmiotem pogardy; bra-

¹⁷⁷³ Takiego określenia w kontekście redukcjonizmu Keller używa John Dupré. Keller stoi bowiem między innymi na stanowisku, że znajomość samych sekwencji DNA nie daje podstaw do pełnego zrozumienia procesów rozwojowych czy chorobotwórczych. „Znaczenie dowolnej sekwencji DNA – pisze – jest relacyjne – do zrozumienia rozwoju lub choroby ważne są wzorce ekspresji genetycznej, które są kontrolowane przez niezwykle złożony aparat regulacyjny i nie da się przewidzieć [jakie one będą] na podstawie znajomości samej sekwencji”. E.F. Keller, *Czas wykraczania poza gen*, tłum. A. i in. Derra, „AVANT”, 1(4) (2013), s. 219. Por. J. Dupré, *Processes of life...*, s. 9–10. Por. M. Twardowski, *Krótko o antyredukcjonistycznej filozofii biologii Johna Dupré* [w:] K. Bałękowski, P. Wiatr (red.), *Prawda i byt...*, s. 86–97.

¹⁷⁷⁴ O redukcjonistycznej koncepcji życia amerykańskiej fizyczki pisałem w pracy *Krótko o redukcjonistycznej filozofii biologii Evelyn Fox Keller* [w:] K. Bałękowski, P. Wiatr (red.), *Prawda i byt...*, s. 98–111.

¹⁷⁷⁵ Por. F.J. Ayala, R. Arp, *It is possible to reduce biological explanations to explanations in chemistry and/or physics: introduction* [w:] F.J. Ayala, R. Arp (eds), *Contemporary debates in philosophy of biology*, Wiley-Blackwell, Malden–Oxford–Chichester 2010, s. 15. Por. M. Bragg, R. Gardiner, *Na barkach Gigantów. Wielcy badacze i ich odkrycia od Archimedes do DNA*, tłum. J. Kuryłowicz, Prószyński i S-ka, Warszawa 2004, s. 206.

¹⁷⁷⁶ Por. E.F. Keller, *Physics and the emergence...*, s. 406.

¹⁷⁷⁷ Por. tamże.

kowało przede wszystkim zrozumienia tego, co oznaczał postęp w nauce”¹⁷⁷⁸. Jednak dopiero pod koniec XX stulecia nastąpiły najbardziej spektakularne sukcesy redukcjonistycznego programu w biologii¹⁷⁷⁹. W szczególności w tym okresie nastąpił ogromny rozwój nowych technologii w biologii molekularnej, dzięki czemu można było prowadzić zaawansowane badania z wykorzystaniem procedur analizy. W naukach fizykalnych i matematycznych również nastąpiła zmiana pewnych warunków, głównie ze względu na rozwój potężnych, szybkich komputerów. Te dość zróżnicowane odkrycia stworzyły łącznie warunki dla nowego zbliżenia pomiędzy matematyką a naukami biologicznymi¹⁷⁸⁰. „Wsparcie dla współpracy interdyscyplinarnej – pisze Keller – ruszyło pełną parą i we wczesnych latach XXI wieku jak grzyby po deszczu zaczęły się mnożyć programy i wydziały, pod wspólnym szyldem biologii systemów”¹⁷⁸¹. Wielu przedstawicieli tej młodej dyscypliny, obejmującej ogromną różnorodność podejść matematycznych, obliczeniowych oraz fizycznych do problemów biologii, jest zdania, że analizy obliczeniowe otwierają drogę do prowadzenia owocnych redukcjonistycznych badań „z dołu ku górze”, to znaczy od wiedzy na temat elementarnych molekularnych elementów składowych i ich interakcji do właściwości systemowych¹⁷⁸². Zdaniem amerykańskiej fizyczki dzięki interdyscyplinarnemu podejściu biologów systemów będzie możliwe owocne wyjaśnianie procesów biologicznych w kategoriach procesów fizycznych i chemicznych. Pisze: „Dzięki pełnemu wyobraźni wdrażaniu technik teoretycznych i obliczeniowych w obrębie nauk fizykalnych, matematycznych i informatyki, dzięki zastosowaniu metod i spostrzeżeń z zakresu nauk technicznych oraz wykorzystaniu zaawansowanych technologii opracowanych w fizyce doświadczalnej w celu uzyskania rozmaitych rodzajów danych mikromolekularnych, niezbędnych w analizie fizycznych podstaw procesów molekularnych, zaczynamy nabywać swoisty rodzaj zrozumienia, który możliwe, że pozwoli na sformułowanie wyjaśnień biologicznych w odniesieniu do procesów fizycznych i chemicznych”¹⁷⁸³. Keller podkreśla jednak, że takie redukcjonistyczne stanowiska nie będą przypominały tego rodzaju wyjaśnień fizycznych i chemicznych, do któ-

¹⁷⁷⁸ Tamże, s. 406–407.

¹⁷⁷⁹ Por. tenże, *It is possible to reduce biological explanations to explanations in chemistry and/or physics* [w:] F.J. Ayala, R. Arp (eds), *Contemporary debates in philosophy of biology*, s. 21.

¹⁷⁸⁰ Por. tamże, s. 21–22.

¹⁷⁸¹ Tamże, s. 22.

¹⁷⁸² Por. tamże.

¹⁷⁸³ Tamże.

rych byliśmy dotąd przyzwyczajeni. Do najbardziej oczywistych różnic, które zauważała, należą:

- znaczna liczba oraz gęstość interakcji pomiędzy częściami,
- hierarchiczna i wielkoskalowa organizacja systemów biologicznych,
- zależność tożsamości części oraz interakcji pomiędzy nimi od oddziaływań wyższego rzędu,
- odporność i zdolność adaptacyjna struktur biologicznych,
- znacznie większa złożoność bioukładów niż układów fizycznych.

Autorka podkreśla, że tym, co odróżnia bioukłady od układów fizycznych i chemicznych, jest to, iż do pełnego opisu tych pierwszych niezbędne jest użycie pojęcia funkcji¹⁷⁸⁴. Kategorii funkcji zasadniczo w słownictwie chemicznym i fizycznym jak dotąd brakowało, podczas gdy w biologii jest ona niezbędna. Keller używa tego pojęcia w sensie prostego mechanizmu sprzężenia zwrotnego¹⁷⁸⁵. Amerykańska fizyczka zauważa, że odkąd narodziła się w połowie XX wieku nowa gałąź nauki zwana cybernetyką, nigdy nie porzucono już uznania kluczowej roli sprzężenia zwrotnego w projektowaniu lub organizowaniu jednostek funkcjonalnych¹⁷⁸⁶. W ostatnich latach kategoria ta odgrywa zasadniczą rolę w analizach biologicznych układów regulacyjnych. „Wydaje się – pisze Keller – że współczesne metody analizy sprzężenia zwrotnego w cybernetyce mogłyby okazać się użyteczne w wypełnianiu tej krytycznej luki, zapewniając stanowisko mechanistyczne (to jest fizyczne i chemiczne) przynajmniej w zakresie niektórych przypadków funkcji biologicznej”¹⁷⁸⁷.

Keller odwołuje się do „maszyn Bernarda” (od nazwiska słynnego fizjologa Claude’a Bernarda, najbardziej kojarzonego z homeostazą), będących „czynnikami homeostazy”¹⁷⁸⁸. Maszyny Bernarda są urządzeniami pozwalającymi na tworzenie i podtrzymywanie ustalonego środowiska wewnętrznego organizmu (homeostazy) bądź też środowiska w najbliższym otoczeniu organizmu. Autorka, żeby zilustrować działanie maszyn Bernarda, odwołuje się między innymi do przykładu chemotaksji bakteryjnych. Bakterie mają zdolność wyczuwania substancji odżywczej (będącej czynnikiem wabiącym) i przemieszczania się w jej kierunku lub oddalania od toksyn (jako czynnika odstraszającego)¹⁷⁸⁹. W ocenie autorki można stosunkowo prosto wyjaśnić niemal w całości ogólną strukturę tego systemu. Mechanizm, który umożli-

¹⁷⁸⁴ Por. tamże, s. 23.

¹⁷⁸⁵ Por. tamże, s. 24.

¹⁷⁸⁶ Por. tamże, s. 27.

¹⁷⁸⁷ Tamże.

¹⁷⁸⁸ Por. tamże.

¹⁷⁸⁹ Por. tamże.

wia chemotaksje, jest zbudowany z wyszukanych struktur, których podstawowymi elementami składowymi są wici, będące motorem systemu, oraz receptory chemiczne, będące sensorami. Keller wyjaśnia mechanizm wykorzystywany przez bakterie: „Jest to maszyna Bernarda w pełnym tego pojęcia znaczeniu, jednak ta konkretna reguluje środowisko bakterii, przemieszczając organizm do miejsca, w którym środowisko lokalne jest bardziej korzystne, zamiast bezpośrednio zmieniać to środowisko [...]. Działa ona za pomocą hierarchii pętli sprzężenia zwrotnego, pomiędzy systemem sensorycznym a motorycznym, które są już obecnie dobrze poznane i które zostały w sposób efektywny przedstawione w postaci modeli biorących w nich udział procesów fizycznych i chemicznych. W jaki sposób jednak mechanizm taki został zbudowany, jest już inną kwestią, a proces ten nie został w dalszym ciągu poznany. Można jednak całkowicie bezpiecznie zauważyć, że ten proces również jest uzależniony od swoistego rodzaju sprzężenia zwrotnego, a mianowicie sprzężenia zwrotnego pomiędzy zmianami chemicznymi a zmianami w środowisku fizycznym, materialnym, do których doprowadziła zmienność chemiczna oraz przesunięcia w ciśnieniu selektywnym oddziałującym na innowacje chemiczne, spowodowanego przez zmiany środowiska fizycznego. W tym przypadku funkcja jest budowana dzięki pewnemu rodzajowi transdukcji ewolucyjnej pomiędzy reakcjami chemicznymi a dynamiką fizyczną czasowo-przestrzenno-materialnego medium, w którym reakcje te występują”¹⁷⁹⁰.

Keller przekonuje, że powyższy przykład stanowi potwierdzenie przynajmniej częściowego sukcesu wysiłków zmierzających ku zredukowaniu wyjaśnień biologicznych do wyjaśnień fizyczno-chemicznych, chociaż ma świadomość, że na potwierdzenie trzeba będzie jeszcze poczekać¹⁷⁹¹. „Przedstawiłam pewne bardzo ogólne sugestie – konkluduje – jednakże zadanie skonstruowania konkretnych modeli, które rzeczywiście byłyby w stanie generować tego rodzaju narzędzia, jest niesamowicie trudne. Działania związane z realizacją takiego zadania, podjęte niedawno, znajdują się zaledwie w fazie wstępnej. Wysiłki takie powinny uwzględnić procesy samodzielnej budowy i samodzielnej organizacji takich wielopoziomowych systemów, działających na wielu płaszczyznach przestrzennych i czasowych [...], w których struktura wewnętrzna i właściwości elementów składowych same w sobie reagują na dynamikę systemu. Jednakże wydaje mi się, że zadanie to zostało obecnie zdefiniowane z wystarczającą jasnością, która pozwala na pewien optymizm. Jaki rodzaj wyjaśnień zapewnią tego typu

¹⁷⁹⁰ Tamże, s. 28.

¹⁷⁹¹ Por. tamże, s. 29.

modele czy wyjaśnienia te będą mieścić się w zakresie zdolności kognitywnych ludzkiego umysłu, czy też będziemy musieli i w tym wypadku polegać na komputerach, które są w o wiele wyższym stopniu zdolne do ogarnięcia tak wielkiej złożoności – to wszystko są oczywiście kolejne pojawiające się pytania. Jest jedynie prawdopodobne, że w końcu [...] osiągniemy sukces w »redukowaniu« wyjaśnień biologicznych do chemicznych i fizycznych [...]»¹⁷⁹².

Jako potwierdzenie tezy o kontekstowym wymiarze życia może służyć stanowisko brytyjskiego fizyka Paula Daviesa. Gdy się porówna jego poglądy z enuncjacjami innych fizyków, można zauważyć zasadniczą różnicę w analizach fenomenu życia zarówno w podejściu do strategii metodologicznej, jak i w analizach merytorycznych. Davies przekonuje, że upraszczające rzeczywistość redukcjonistyczne odpowiedzi na pytanie, co to jest życie, okazały się niewystarczające. Opowiada się za modelem świata, w którym dzięki wrodzonej „kreatywności” materii na każdym poziomie kompleksowości wynurzają się nowe i często nieprzewidywalne właściwości, których nie da się wyprowadzić z cech elementów składowych¹⁷⁹³. Już w złożonych „nieliniowych” układach fizycznych dostrzega on coś więcej niż tylko sumę części składowych¹⁷⁹⁴. Swoje antyredukcjonistyczne stanowisko wyraża zwłaszcza w odniesieniu do bioukładów, podkreślając ich wysoką kompleksowość powodującą, że nie są tylko zwykłą sumą części, ale kierują się własnymi prawami i własną logiką¹⁷⁹⁵. „W przypadku układów ożywionych nikt nie przeczy – pisze Davies – że organizm jest zbiorem atomów. Błędem jest natomiast przypuszczać, że nie jest niczym innym niż tylko zbiorem atomów. Takie twierdzenie jest równie absurdalne, jak teza, że symfonia Beethovena nie jest niczym więcej aniżeli tylko zbiorem nut lub powieść Dickensa nie jest niczym innym aniżeli tylko zbiorem słów. Życie, temat melodii lub akcja powieści to tak zwane własności emergentne. Pojawiają się one tylko na kolektywnym poziomie struktury i są bezsensowne na poziomie elementów składowych”¹⁷⁹⁶. Zdaniem brytyjskiego uczonego na

¹⁷⁹² Tamże, s. 30.

¹⁷⁹³ Por. P.C.W. Davies, *Introduction: toward an emergentist worldview*, s. 5. Por. P.C.W. Davies, *Preface*, s. x. Por. R. Poczeb, *System – struktura – emergencja*, s. 13. Por. M. Twardowski, *Koncepcja życia Paula Daviesa* [w:] K. Bałkowski, P. Wiatr (red.), *Prawda i byt...*, s. 71–78.

¹⁷⁹⁴ Por. D.H. Adams, *Self-organization and living systems: is DNA an 'artificial intelligence'?*, „Medical Hypotheses”, 29 (1989), s. 224.

¹⁷⁹⁵ Por. J. Brockman, *Problem początków* [w:] J. Brockman (red.), *Trzecia Kultura. Nauka u progu trzeciego tysiąclecia*, tłum. P. Amsterdamski, J. i M. Jannaszowie, M. Ryszkiewicz, M. Tempczyk, W. Turopolski, CIS, Warszawa 1996, s. 361–362.

¹⁷⁹⁶ P.C.W. Davies, *Bóg i nowa fizyka*, tłum. P. Amsterdamski, Cyklady, Warszawa 2006, s. 84.

każdym coraz wyższym poziomie w hierarchicznej strukturze organizacyjnej materii żywej pojawiają się nowe cechy niemające znaczenia na niższym poziomie¹⁷⁹⁷.

Davies stoi na stanowisku braku możliwości rozwiązania kluczowych problemów biologicznych – zwłaszcza biogenezy – bez uprzedniego dogłębnego zrozumienia samej natury życia¹⁷⁹⁸. Tymczasem tytułowe pytanie z opublikowanej pracy Schrödingera wciąż jest dalekie od odpowiedzi¹⁷⁹⁹. Kompleksowe zrozumienie życia nadal jest dla biologów ogromnie kłopotliwe. „Nie podważam przy tym faktu – pisze Davies – że biologia molekularna osiągnęła oszałamiające sukcesy w nauce, niemniej naukowcy do dziś nie są w stanie wskazać, co dokładnie oddziela organizm żywy od innych rodzajów obiektów fizycznych. Choć traktowanie organizmów jako mechanizmów niewątpliwie okazało się bardzo owocne, warto podchodzić z dużą dozą dystansu do tak sporego uproszczenia. Mechanistyczna definicja jest ważną częścią zrozumienia życia, nie mówi jednak całej prawdy”¹⁸⁰⁰. Według brytyjskiego fizyka życie jest tak niezwykle w swoich właściwościach, że kwalifikuje się do opisu jako alternatywny stan materii¹⁸⁰¹. Sformułowanie kompletnej definicji życia uważa on za „notorycznie trudny problem”. Zauważa, że większość podręczników skupia się na chemii życia (przedstawienie działania cząsteczek wewnątrz komórki). Przekonuje, że chociaż życie bez wątpienia jest zjawiskiem chemicznym, jednak jego dystynktywna natura nie tkwi w chemii jako takiej. Aby zilustrować problem, jaki napotykamy przy skrajnie analitycznym podejściu do fenomenu życia, Davies odwołuje się do konkretnego przykładu. „Wyobraźmy sobie – pisze – że wyrzucamy w powietrze ptaka martwego i żywego. Martwy ptak spadnie na ziemię z hukiem kilka metrów od miejsca rzutu. Żyjący ptak z kolei zakończy tę »podróż« na antenie telewizyjnej po drugiej stronie miasta, gałęzi drzewa, dachu czy też w gnieździe. Ciężko dokładnie przewidzieć, gdzie dokładnie wyląduje taki ptak. Jako fizyk jestem przyzwyczajony do postrzegania materii jako pasywnej, obojętnej i grudkowatej rzeczy, która reaguje tylko wtedy, gdy zmuszają ją do tego zewnętrzne siły – na przykład gdy martwy ptak spada na ziemię pod wpływem siły grawitacji. Istoty żywe żyją jednak, dosłownie, własnym życiem, jak gdyby posiadały jakąś wewnętrzną iskrę, która daje im auto-

¹⁷⁹⁷ Por. tenże, *Kosmiczny projekt*, tłum. A. Bielaczyc, Copernicus Center Press, Kraków 2014, s. 170.

¹⁷⁹⁸ Por. tenże, *The fifth miracle...*, s. 19.

¹⁷⁹⁹ Por. tenże, *Kosmiczny projekt*, s. 158.

¹⁸⁰⁰ Tenże, *The fifth miracle...*, s. 32–33.

¹⁸⁰¹ Por. tamże, s. 19.

nomię do robienia tego, co uznają za słuszne. Nawet bakterie wykonują czynności »po swojemu« w ograniczony sposób»¹⁸⁰².

Zdaniem brytyjskiego uczonego właśnie autonomia – rozumiana jako niezależność lub samostanowienie – jest jedną z najistotniejszych cech istot żywych, odróżniających je od rzeczy martwych¹⁸⁰³. Oprócz autonomii do innych ważnych cech, które odróżniają istoty żywe od układów nieożywionych, Davies zalicza: reprodukcję, metabolizm, odżywianie, złożoność, organizację, rozwój, informację przekazywaną w genach od rodzica dla potomstwa, wysoce sprecyzowany i wyrafinowany kanał komunikacji między kwasami nukleinowymi i białkami, odbywający się za pośrednictwem kodu genetycznego, trwałość i zmianę, unikatowość¹⁸⁰⁴. Za najbardziej wyrazistą z wyżej wymienionych właściwości organizmu żywego uważa organizację¹⁸⁰⁵. „Zachodzące złożone procesy – pisze – mają kooperatywny charakter i tym samym nadają organizmowi jako całości spójną tożsamość. To właśnie wrażenie, że organizm w jakiś sposób wykorzystuje ślepe, bezcelowe siły fizyczne w swojej organizacji [...] wydaje się tak zaskakujące»¹⁸⁰⁶. Autor podkreśla, że wszystkie nowo odkryte zasady organizacji i złożoności mogą stać w ramię w ramię ze znanymi prawami fizyki – poszerzając je, lecz jednocześnie pozostawiając w stanie nienaruszonym¹⁸⁰⁷. Nie uważa jednak, że możemy być w stu procentach pewni, że znamy wszystkie prawa fizyki istotne z punktu widzenia tak niezwykle złożonych układów, jakimi są organizmy żywe. Stoi na stanowisku, że mamy prawo pozostawić otwartą taką możliwość, bowiem niektóre ze znanych praw fizyki mogą nie sprawdzać się na pewnym poziomie złożoności¹⁸⁰⁸. „W rzeczywistości – pisze Davies – fizycy mają wystarczająco duży zawrót głowy z przetestowaniem równania Schrödingera dla układu trzech ciał, nie mówiąc o systemie z 10^{16} ciał. W oczywisty sposób, co najmniej nieuzasadnione byłoby całkowicie wykluczyć hipotezę, że na pewnym poziomie złożoności wyłoni się nowa fizyka. Nie mamy zwyczajnie prawa do takiej górnolotności, tak samo jak nie mamy prawa domagać się, by ogólna teoria względności sprawdzała się na wszystkich poziomach wielkości. I jeśli okaże się, że występują na

¹⁸⁰² Tamże, s. 33.

¹⁸⁰³ Por. tamże, s. 33.

¹⁸⁰⁴ Por. tamże, s. 33–36. Por. tenże, *Kosmiczny projekt*, s. 158–161. Por. tenże, *The fifth miracle...*, s. 19.

¹⁸⁰⁵ Por. tenże, *The physics of complex organisation* [w:] B. Goodwin, P. Saunders (eds), *Theoretical biology: epigenetic and evolutionary order from complex systems*, Edinburgh University Press, Edinburgh 1989, s. 101.

¹⁸⁰⁶ Tamże, s. 101.

¹⁸⁰⁷ Por. tamże, s. 107.

¹⁸⁰⁸ Por. tamże, s. 108.

pewnym poziomie nieredukowalne, fundamentalnie nowe prawa organizacji i złożoności, wówczas uczyni to próbę wyjaśnienia biologii na drodze poszczególnych procesów atomowych nie tylko niepożądaną [...], co po prostu błędną¹⁸⁰⁹.

Brytyjski fizyk przekonuje, że fundamentalne prawa fizyki nie wyczerpują wszystkich potencjalnych praw. Wskazuje on przykładowo tak zwane prawa „organizacyjne”, które nie zastępują ani nie unieważniają podstawowych praw fizyki, ale jedynie je poszerzają¹⁸¹⁰. Davies stwierdza: „Na przykład istnieją podobne do praw regularności dość ogólnej natury, które opisują tak różnorodne złożone samoorganizujące się systemy jak kolonie mrówek”¹⁸¹¹. Nie wyklucza, że życie powstało na bazie takiego wyższego rzędu emergentnego prawa rosnącej złożoności, odnoszącego się do szczególnych układów spełniających nieznane nam warunki¹⁸¹². „Osobiście – pisze – od dawna skłaniam się ku możliwości istnienia takich praw wyższego rzędu, czyli praw rosnącej złożoności, ale otwarcie przyznaję, że jak dotąd brak na to przekonujących dowodów”¹⁸¹³.

Jak wynika z powyższych analiz, szeroki kontekst według tego autora polega na tym, aby nie ograniczać się w badaniach nad fenomenem życia tylko do fizyki. Można mieć wrażenie, że chciałby stworzyć coś w rodzaju „supernauki”, która by łączyła fizykę i biologię.

W podobnym antyredukcjonistycznym duchu wypowiadają się Nigel Goldenfeld, amerykański fizyk, i Carl R. Woese, amerykański fizyk i mikrobiolog. Przewidują oni, że zbieżność nowych idei teoretycznych w ewolucji i lawina genomowych informacji znacząco przekształcą nasze pojmowanie biosfery i zaprowadzą do rewizji definicji pojęć, takich jak organizm, a redukcjonizm molekularny, który zdominował biologię XX wieku, w kolejnym stuleciu zostanie zastąpiony podejściem holistycznym, które obejmie swoim zasięgiem zjawiska zbiorowe¹⁸¹⁴. Podkreślają, że procesy zbiorowe, które dominują w biologii, były często zaniedbywane przez dotychczasowych badaczy życia¹⁸¹⁵. Przypominają, że drobnoustroje są w stanie wymieniać geny, prowadzić komunikację między komórkami, przemieszczać się

¹⁸⁰⁹ Tamże.

¹⁸¹⁰ Por. P. Davies, *Milczenie Gwiazd. Poszukiwania pozaziemskiej inteligencji*, tłum. U. i M. Seweryńscy, Prószyński i S-ka, Warszawa 2013, s. 62.

¹⁸¹¹ Tamże.

¹⁸¹² Por. tamże.

¹⁸¹³ Tamże, s. 62–63.

¹⁸¹⁴ Por. N. Goldenfeld, C.R. Woese, *Biology's next revolution*, „Nature”, 445 (2007), s. 369.

¹⁸¹⁵ Por. ciż, *Life is physics: evolution as a collective phenomenon far from equilibrium*, „Annual Review of Condensed Matter Physics”, 2 (2011), s. 376.

wspólnie między powierzchniami i tworzyć błony biologiczne (przestrzenie poszerzone, wielokomórkowe kolonie o ustalonym podziale obowiązków, komórkowym zróżnicowaniu i wspólnym systemie obronnym przed „nieproszonymi gośćmi”)¹⁸¹⁶. Poziomy transfer genów (ang. *horizontal gene transfer*, HGT, czyli nie-genealogiczne przenoszenie materiału genetycznego z jednego organizmu do drugiego – jak na przykład z jednej bakterii do drugiej lub z wirusa do bakterii) jest wszechobecny i znaczący wśród drobnoustrojów, na przykład w przyspieszaniu rozprzestrzeniania się odporności na antybiotyki. Z uwagi na HGT nie jest właściwe traktowanie drobnoustrojów jako organizmów zdominowanych przez indywidualne cechy. W rzeczywistości ich komunikacja za pośrednictwem genetycznych lub „kworumowych” kanałów wskazuje, że zachowanie mikrobiologiczne należy rozumieć przede wszystkim jako kooperatywne. Mikroorganizmy tworzą w przyrodzie społeczności, dokonują inwazji na biochemiczne nisze i biorą udział w cyklach biogeochemicznych¹⁸¹⁷. Drobnoustroje absorbują geny lub pozbywają się ich w razie potrzeby jako odpowiedź na uwarunkowania naturalnego środowiska. „Zamiast pojedynczych genomów – piszą Goldenfeld i Woese – widzimy ich kontinuum, które rzuca cień na znaczenie pojęcia »gatunku« w sferze drobnoustrojów. Bezżyteczność tego terminu wynika z ostatnich osiągnięć w dziedzinie metagenomiki, a dokładniej badania genomów pozyskanych z naturalnych próbek, a nie hodowli klonów. I tak na przykład badania rozkładu przestrzennego genów rodopsyny u mikroorganizmów morskich sugerują, że geny te są »kosmopolityczne«, wędrując pośród bakterii (lub archeonów) w zgodzie z presjami środowiskowymi”¹⁸¹⁸. Autorzy zwracają również uwagę na fakt, że mikroorganizmy posiadają niezwykłą zdolność do odbudowy swoich genomów w obliczu poważnych presji środowiskowych oraz że w niektórych przypadkach ich zbiorowe interakcje z wirusami mogą mieć kluczowe znaczenie. Dostrzegają oni ciągłość strumienia energetycznego i informacyjnego transferu z genomu do komórek, przez społeczności, sferę wirusów, aż po środowisko. Sugerują nawet, że cechą charakterystyczną życia jest silna zależność od strumienia płynącego ze środowiska (niezależnie, czy mówimy o przepływie energii, chemikaliów, metabolitów czy też genów).

Istnienie zjawiska życia jest dla tych badaczy zjawiskiem emergentnym, stanowiącym w jakiś sposób nieuchronną konsekwencję praw fizyki statystycznej i teorii układów dynamicznych¹⁸¹⁹. „Jest to niezwykle czas dla bio-

¹⁸¹⁶ Por. tamże.

¹⁸¹⁷ Por. ciż, *Biology's next revolution*, s. 369.

¹⁸¹⁸ Tamże.

¹⁸¹⁹ Por. tamże, s. 380.

logii – piszą Goldenfeld i Woese – ponieważ perspektywa, o jakiej mówimy, umieszcza tę naukę w kontekście, który siłą rzeczy angażuje inne dyscypliny bardziej przychylnie nastawione do znaczenia zjawisk zbiorowych. Pytania stawiane przez generyczny przepływ energii, informacji i genów, do jakich się tu odnieśliśmy, prawdopodobnie wymagają rozstrzygnięcia w duchu mechaniki statystycznej i teorii układów dynamicznych”¹⁸²⁰. W innym miejscu dodają: „Mówiąc prościej: jeśli chcemy zrozumieć naszą biologię, potrzebujemy mechaniki statystycznej genów – fundamentalne procesy, które nas ukształtowały, mają zdecydowanie charakter zbiorowy i muszą być traktowane z uwzględnieniem tego faktu”¹⁸²¹.

Należy zauważyć, że jako fizycy autorzy ci doszli do świadomości, że dotychczasowe odwołujące się tylko do fizyki pojmowanie fenomenu życia w kontekście świata drobnoustrojów okazało się zdecydowanie niewystarczające. Podkreślili oni, że fenomen życia nie mieści się w ścisłych prawach fizycznych, w związku z tym ukazali nowy, poszerzony, nieograniczający się tylko do fizyki sposób pojmowania organizmu żywego.

W kierunku rozpoznania większej autonomii życia podążyły również prace innego fizyka, Lebrechta von Klitzinga. Badacz ten zauważa, że na przestrzeni ostatniego stulecia biolodzy starali się znaleźć wyjaśnienie funkcji „życia” poprzez znajomość danych fizjologicznych¹⁸²². W przeciwieństwie do tego niemiecki fizyk jest przekonany, że informacje z mieszaniny kwasów nukleinowych, nukleotydów, enzymów i innych elementów nie są istotne dla znalezienia odpowiedzi na odwieczne pytanie, co to jest życie. Jako główny problem wskazuje on rozpowszechnioną błędną interpretację, zgodnie z którą każde biologicznie znaczące zdarzenie jest postrzegane jako macierzysta funkcja nukleotydów w genomie¹⁸²³. Autor stoi na stanowisku, że nie wystarczy brać pod uwagę jedynie tego, co dzieje się na poziomie genomu. Podkreśla, że każda komórka zawiera w sobie komplet informacji genetycznych, jednak wykorzystana zostanie tylko ich część¹⁸²⁴. Ponadto zwraca on uwagę na to, że jedynie mała część genomu komórki jest wykorzystywana indywidualnie oraz że części genomu są w stanie zmieniać swoje położenie w sekwencji. „Cała historia ewolucji – pisze von Klitzing – jest w zasięgu ręki, ale nie zawsze się po nią sięga. W wyniku tego bioukład ma

¹⁸²⁰ Tamże, s. 369.

¹⁸²¹ Ciż, *Life is physics...*, s. 376.

¹⁸²² Por. L. von Klitzing, *Communication – basis of life* [w:] H.-P. Dürr, F.-A. Popp, W. Schommers (eds), *What is life? Scientific approaches and philosophical positions*, World Scientific, New Jersey–London–Singapore–Hong Kong 2002, s. 167.

¹⁸²³ Por. tamże, s. 167–168.

¹⁸²⁴ Por. tamże, s. 168.

możliwość szeroko pojętej zmienności przekazu informacji”¹⁸²⁵. Na potwierdzenie tego odwołuje się do następującego eksperymentu: Bakteria *E. coli*, żywiąca się glukozą jako metabolicznym substratem, może zmienić w przeciągu godziny enzymatyczną kompozycję szlaku metabolicznego na inny substrat, na przykład galaktozę. Podczas późniejszego podziału komórki potomne komórki przejmują tę informację dla nowego szlaku metabolicznego. W międzyczasie skład chemiczny genomu nie ulega zmianie. Konsekwencją jest brak możliwości udzielenia odpowiedzi przez biologa molekularnego na pytanie, co to jest życie, bo dla bakterii *E. coli* może to być optymalizacja środowiska.

Trudno nie zgodzić się z von Klitzingiem, że skoncentrowanie się na genomie, który uważa się za „boską cząstkę”, nie jest wystarczającym podejściem przy badaniu fenomenu życia, gdyż należy uwzględnić cały organizm. Genom bez całości organizmu w rzeczywistości niewiele znaczy.

Na aspekt organizacji życia zwrócił uwagę Hans-Jürgen Fischbeck. Podkreśla, że życie podtrzymuje i broni swojego wysoce skomplikowanego porządku przed drugą zasadą termodynamiki, która głosi permanentny wzrost entropii¹⁸²⁶. Organizmy żywe postrzega on jako „struktury dyssypatywne”, podtrzymujące swój stan w sposób dynamiczny dzięki nieustannemu przepływowi energii i określonych substancji. W konsekwencji twierdzi, że życie jest możliwe wyłącznie z dala od równowagi termodynamicznej dzięki eksportowi entropii do środowiska. Umożliwia to dyssypacja uporządkowanej energii zdolnej do pracy. Jej źródłem jest głównie (bezpośrednio lub pośrednio) światło słoneczne. Fischbeck zauważa, że formowanie się struktur – co jest charakterystyczne dla życia – stało się zrozumiałe, ponieważ układy dyssypatywne konstruuja się poprzez samoorganizację uzależnioną od zewnętrznych i wewnętrznych czynników. Dodaje jednak, że życie jest fenomenem samoorganizacji specyficznych biochemicznych, dyssypatywnych struktur, których osobliwości są określane przez trzecią, obok metabolizmu i reprodukcji, charakterystyczną cechę życia: dziedziczenie genetyczne.

Fischbeck podkreśla, że jednym z największych triumfów nowoczesnej biologii było wyjaśnienie molekularnego mechanizmu dziedziczenia¹⁸²⁷. Dzięki temu „wkroczyło do gry” nowe pojęcie: informacja¹⁸²⁸. Genetyczna

¹⁸²⁵ Tamże.

¹⁸²⁶ Por. H.-J. Fischbeck, *On the essence of life – a physical but nonreductionistic examination* [w:] H.-P. Dürr, F.-A. Popp, W. Schommers (eds), *What is life? Scientific approaches...*, s. 218.

¹⁸²⁷ Por. tamże.

¹⁸²⁸ James Gleick podkreśla, że współcześnie to informacja rządzi światem, przenikając niemal każdą dziedzinę nauki. Autor ten biologię, a zwłaszcza genetykę, postrzega jako

molekuła DNA wygląda jak tekst zapisany literami, który koduje strukturę białek, oraz program sterujący mechanizmem komórki, a nawet procedurę ontogenetyczną układu ożywionego¹⁸²⁹. Pojęcie informacji szybko uznano za kluczowe¹⁸³⁰. Pojawiające się najpierw jako genetyczna informacja zakodowana w DNA, okazało się „kukułczym jajem” w „biochemicznym gnieździe”, ponieważ informacja jest podwójną strukturą, złożoną z materialnego kodu i niematerialnego znaczenia, a przedmiotami badań fizyki i chemii są materia i energia, nie informacja¹⁸³¹. Zdaniem niemieckiego fizyka istnieje powód, aby przypisywać „znaczeniu” status niezależny od materialnej struktury kodowania¹⁸³². Jedno i to samo znaczenie może zostać zaszyfrowane semantycznie i fizycznie w sposób kompletnie odmienny. W biologii molekularnej „znaczenie” może być niezależne od swojej struktury kodowania. Autor wnioskuje to z faktu, że efekt („znaczenie”) określonych molekularnych kodów może być inny w obrębie różnych kontekstów.

Fischbeck definiuje informację za pomocą czterech kolejnych twierdzeń¹⁸³³:

1. Informacja jest podwójną strukturą składającą się z niematerialnego znaczenia (semantyka) i materialnego kodu (syntaktyka). Ustrukturyzowana materia nie jest informacją, dopóki pozostaje bez znaczenia.
2. Znaczenia powstają tylko w żywych związkach. Informacja zatem pojawia się wyłącznie w obrębie życia. W tym tkwi jakościowa różnica pomiędzy światem ożywionym i nieożywionym.
3. Znaczenia są niezależne od swojego kodu, ponieważ jedno i to samo znaczenie może zostać zakodowane w sposób odmienny semiotycznie i fizycznie.
4. Informacja jest ustanawiana jako byt relacyjny, łączący „nadawcę” i „odbiorcę”, którzy „rozumieją” jej znaczenie.

szczególne pole badania informacji. Píše: „Dziś nawet biologia stała się [...] polem badania przekazników i kodów genetycznych. Geny magazynują informacje i umożliwiają ich odczytywanie i zapisywanie. Życie rozwija się sieciowo. Nawet ludzkie ciało jest przetwórną informacji. Pamięć mieści się nie tylko w mózgu, ale i we wszystkich komórkach. Nic dziwnego, że genetyka rozkwitła na równi z informatyką. DNA to podstawowa cząsteczka będąca nośnikiem informacji, najbardziej złożony jej procesor na poziomie komórkowym – alfabet i kod, sześć miliardów bitów kształtujących ludzki organizm. [...] Komórki organizmu to punkty węzłowe w ściśle splecionej sieci komunikacyjnej, przekazujące i odbierające, kodujące i dekodujące. Ewolucja sama w sobie ucieleśnia ciągłą wymianę informacji między organizmem a środowiskiem”. J. Gleick, *Informacja. Bit, wszechświat, rewolucja*, s. 14.

¹⁸²⁹ Por. H.-J. Fischbeck, *On the essence of life...*, s. 218–219.

¹⁸³⁰ Por. tamże, s. 219.

¹⁸³¹ Por. tamże, s. 219.

¹⁸³² Por. tamże, s. 220.

¹⁸³³ Por. tamże.

Niemiecki fizyk szczegółowo przedstawia swoje rozstrzygnięcia w tym temacie. Znaczenia nie są przedmiotem fizyki i chemii¹⁸³⁴. Fizyczne i chemiczne pojęcia nie nadają się do opisu niematerialnego, znaczeniowego wymiaru życia. Znaczenia definiują się wzajemnie: „sensem życia jest życie”¹⁸³⁵. Życie odnosi się tylko do siebie samego i tylko przez siebie samo jest definiowane, realizując abstrakcyjną strukturę sensu¹⁸³⁶. Redukcjonizm odrzuca takie spojrzenie i sprowadza życie do przyczynowego splotu fizyczno-chemicznych reakcji, ponieważ działa pod wpływem założenia przyczynowego determinizmu, pochodzącego z fizyki klasycznej, pomimo faktu, że determinizm ten został zdezaktualizowany przez teorię kwantową oraz teorię chaosu. Z perspektywy redukcjonistycznej znaczenia nie są realne, a przypisywane biochemicznym procesom przez człowieka jako obserwatora mają co najwyżej charakter epifenomenalny.

Ponieważ samoorganizacja życia zasadniczo odbywa się poprzez wymianę informacji, to właśnie zdaniem Fischbecka kategorycznie odróżnia układy ożywione od nieożywionych¹⁸³⁷. Tam, gdzie w innych wypadkach należy oczekiwać wyłącznie chaotycznego zachowania, znaczenia łączą się ze sobą, aby tworzyć sensy. Dla niemieckiego fizyka życie jest zatem zjawiskiem zarówno materialnym, jak i niematerialnym. W związku z tym niewłaściwa jest wiara, że życie może być w pełni wytłumaczone za pomocą przyczynowych praw natury. Jest to wyłącznie „poziom orto” prawidłowego rozpoznania faktycznej rzeczywistości. Relacyjna rzeczywistość życia ma miejsce na semantycznym poziomie wymiany informacji. Nie da się jej uchwycić za pomocą obserwacji empirycznej. Życie składa się nie tylko z faktów, ale jest ze swej istoty rzeczywistością relacyjną. Nie funkcjonuje wyłącznie w oparciu o metabolizm, ale również wymianę sensotwórczej informacji, której poziom semantyczny ujawnia całościowy charakter istoty żywej¹⁸³⁸.

Przyczynowe wyjaśnienie życia musi zostać uzupełnione o rozumienie¹⁸³⁹. Rozumienie jest podejściem do semantyki na interpretacyjnym „metapoziomie” wiedzy. Znaczy to, że biologia w najpełniejszym znaczeniu jako nauka o życiu nie może być dziedziną czysto empiryczną, opartą wyłącznie na fizyce i chemii, ale musi również zawsze zawierać elementy interpretacyjne.

¹⁸³⁴ Por. tamże.

¹⁸³⁵ Por. tamże, s. 220–221.

¹⁸³⁶ Por. tamże, s. 221.

¹⁸³⁷ Por. tamże.

¹⁸³⁸ Por. tamże, s. 221–222.

¹⁸³⁹ Por. tamże, s. 222.

Fischbeck patrzy na życie jako zjawisko komunikacyjne. Twierdzi, że wymiana informacji jest komunikacją i to właśnie ona stymuluje samoorganizację życia¹⁸⁴⁰. Życie jest procesem komunikacji, który wydarza się na czterech autopoietycznych¹⁸⁴¹ poziomach obejmujących się wzajemnie: komórka, organizm, społeczność gatunkowa, biotop. Są one jednocześnie informacyjnie zamknięte i otwarte. Wszystkie poziomy funkcjonują w oparciu o swój własny „język”. Byty konstytuują się więc poprzez komunikację. Autor podsumowuje krótko dobrze znane fakty potwierdzające ten punkt widzenia. Na poziomie komórkowym mamy do czynienia z „językiem” kodowanym w kwasach rybonukleinowych i białkach. Partnerami komunikacji są organelle komórkowe. Jako jednostka funkcjonalna komórka jest ograniczona błoną, a jednocześnie otwarta na wymianę sygnałów i substancji metabolicznych poprzez rozmaite receptory i kanały. Jest zarazem zamknięta w sobie i otwarta na informacje. Fischbeckowi przypomina to abstrakcyjną strukturę systemów formalnych¹⁸⁴². Systemy tego rodzaju są z jednej strony w pełni zdefiniowane przez aksjomaty i wyprowadzone z nich zasady, które tworzą całość ich formalnych wniosków. W tym sensie są one zamknięte. Z drugiej strony zgodnie z twierdzeniem Gödla, nie są one zamknięte, ponieważ zawierają prawdziwe założenia, które nie mogą być wyprowadzone z aksjomatów i danych zasad. Założenia tego rodzaju mogą być systematycznie wyprowadzane w obrębie obszerniejszego systemu, ale nawet taki większy system jest znów, zgodnie z twierdzeniem Gödla, zarazem zamknięty i otwarty. Podobnie, autopoietyczne byty związane z życiem są na poziomie semantycznym systemami znaczeniowymi, zamkniętymi i otwartymi zarazem¹⁸⁴³. Oznacza to, że mogą istnieć kombinacje znaczeń, które mają sens wychodzący poza odpo-

¹⁸⁴⁰ Por. tamże.

¹⁸⁴¹ Chilijscy biolodzy Humberto Maturana i Francisco Varela uznali metabolizm za esencję czegoś absolutnie niezbędnego do życia. Nazywali to „autopoiesis” (autopojęzą). Termin ten pochodzący z języka greckiego, znaczący „siebie” (*auto*) oraz „tworzyć” (*poiein*), odnosi się do własności życia, jaką jest samoproduktowanie się. Bez autopoiesis istoty organiczne nie są w stanie samo-utrzymać się, czyli przestają być żywe. Autopoietyczna istota stale podlega metabolizmowi. Wciąż się zachowuje dzięki reakcjom chemicznym, oraz ruchowi cząsteczek. Autopoiesis jest wykorzystywana przez nieustanną chemię życia oraz przepływ energii, czyli metabolizm. Tylko komórki, organizmy zbudowane z komórek, oraz biosfery zbudowane z organizmów są autopoietyczne i mogą ulegać metabolizmowi. DNA jest niewątpliwie istotną cząsteczką dla życia na Ziemi, lecz samo w sobie jest martwe. Cząsteczki DNA powielają się, jednak nie ulegają metabolizmowi i nie są autopoietyczne. Powielanie się nie jest tak istotną cechą życia jak autopojęza. Por. L. Margulis, D. Sagan, *What is life?*, s. 17–18.

¹⁸⁴² Por. H.-J. Fischbeck, *On the essence of life...*, s. 223.

¹⁸⁴³ Por. tamże, s. 224.

wiadający im autopoietyczny byt i wpasowujący się w rozleglejsze związki znaczeniowe.

Fischbeck przekonuje, że znaczenia to nie obiektywne fakty¹⁸⁴⁴. Nie można ich dostrzec za pomocą eksperymentów, nie są one przedmiotem fizyki ani chemii. Nie da się ich odkryć przy użyciu obserwacji, ale wyłącznie poprzez współuczestnictwo w komunikacji. Fizyczne sygnały można zaobserwować i zmierzyć, ale nie da się tego zrobić z ich znaczeniem, chociaż można je do pewnego stopnia interpretować, ujmując w znaczącym kontekście życiowym indywidualnej istoty oraz jej gatunku. Należy porzucić „poziom orto”, odkrywanie faktów poprzez pomiary i wkroczyć na związany z interpretacją „poziom meta”. Na najniższym komórkowym stadium komunikacji interpretacja zaobserwowanych faktów sięga dalej niż na poziomach wyższych, ponieważ relacja pomiędzy kodem i znaczeniem jest tutaj znacznie bardziej ścisła, a związki funkcjonalne mają charakter bardziej obiektywny. Możliwe jest zatem wyrażenie znaczenia określonej informacji na poziomie molekularnym przy użyciu pojęciowego metajęzyka nauki¹⁸⁴⁵. Pełne zrozumienie wewnątrzkomórkowej komunikacji jest jednak nie do pomyślenia, nie tylko ze względu na jej ogromną złożoność, ale także dlatego, że żywa komórka zawiera związki, które nie mogą się składać z pojedynczych części (biomolekuł i ich wzajemnych interakcji)¹⁸⁴⁶. Komórka zatem jest już biosystemem, będącym czymś więcej niż „fabryką chemiczną”, nawet jeśli przynależy do organizmu wielokomórkowego.

Fischbeck podsumowuje, że sieci komunikacyjne na różnych stadiach systemów autopoietycznych są odgraniczone barierami rozumienia¹⁸⁴⁷. Świata znaczeń nie da się wykryć empirycznie, bo jest on transempiryczny. Do pewnego stopnia jednak zewnętrzna interpretacja znaczenia danych empirycznych jest mimo wszystko możliwa. Życie nie może być jedynie opisywane i tłumaczone z samej swej istoty poprzez empirię, ponieważ składają się na nie również „przestrzenie transempiryczne”, a mianowicie światy znaczeń w komunikacji wewnętrznej. Semantyka organizującego życie procesu komunikacji wprowadza porządkujące związki znaczenia w ramy przyczynowości, aby mógł zrodzić się „sens pośród przypadku”¹⁸⁴⁸. Oczywiście skończoność procesu życiowego nie może być przyczynowo „wytłumaczona”, a tylko semantycznie „zrozumiana”¹⁸⁴⁹. Semantyka organizującego ży-

¹⁸⁴⁴ Por. tamże.

¹⁸⁴⁵ Por. tamże, s. 224–225.

¹⁸⁴⁶ Por. tamże, s. 225.

¹⁸⁴⁷ Por. tamże.

¹⁸⁴⁸ Por. tamże, s. 226.

¹⁸⁴⁹ Por. tamże, s. 227.

cie procesu wymiany informacji nie jest zatem epifenomenem, ale jakościowo odróżnia ona życie od świata nieożywionego. Odpowiedź Fischbecka na pytanie o istotę życia brzmi zatem: życie jest kierowanym znaczeniem, semantycznie spójnym zjawiskiem komunikacyjnym¹⁸⁵⁰. Z tego punktu widzenia trzy charakterystyczne właściwości życia – metabolizm, reprodukcja i dziedziczność – powinny zostać uzupełnione o właściwość czwartą, która wyraża i ujmuje nieodzowny niematerialny wymiar życia: przeznaczenie do znaczenia.

Rodzi się pytanie, dlaczego tak wielu współczesnych fizyków wyraźnie odżegnuje się od skrajnego redukcjonizmu na rzecz umiarkowanego emergentyzmu? Odpowiedź nie jest wcale prosta. Wszyscy oni wiedzieli, że redukcjonizm zaprowadził ich poprzedników w ślepą uliczkę. Poznali strukturę podstawowych molekuł budujących życie, zrodziło się jednak pytanie: co dalej? I stąd pojawił się emergentyzm. Badacze zrozumieli, że nie ma innej metody przy badaniu powstania życia niż emergentyzm, chociaż nie jest on panaceum na wszystkie problemy związane z wyjaśnieniem życia. Emergentyzm mówi o wynurzaniu się pierwotnych bioukładów, rodzi się jednak pytanie, w imię czego one się wynurzają? Wydaje się, że wynurza się to, co zawarte jest w informacji. Informacja ma potencjalne treści, a emergentyzm je skutecznia, ale w takim kierunku, w jakim jest zawarta informacja. Kiedy powstało życie, powstała już potencjalna informacja o jego rozwoju, i ta informacja się urealnia.

5.2. ASPEKT MERYTORYCZNY KONTEKSTOWYCH BADAŃ NAD ORGANIZACJĄ ŻYCIA

Jednym z przełomowych wydarzeń w historii biologii była publikacja w 1944 roku książki Schrödingera zatytułowanej *What is life?* Minęło od tamtej pory ponad siedemdziesiąt lat, a postawione w niej tytułowe pytanie nadal pozostaje bez ostatecznej odpowiedzi. Chociaż procesy biologiczne są coraz lepiej rozumiane zarówno na płaszczyźnie biochemicznej, jak i molekularno-biologicznej, z punktu widzenia fizyki życie wciąż skrywa wiele tajemnic¹⁸⁵¹. Życie, jego natura i pochodzenie z nieożywionych związków chemicznych wciąż wydaje się fizyce niemal magicznym stanem materii. Cytowany już wielokrotnie Paul Davies pisze: „Fizykowi takiemu jak ja życie wydaje się niemalże jakąś magią: wszystkie te głupie molekuły spisku-

¹⁸⁵⁰ Por. tamże.

¹⁸⁵¹ Por. D. Abbott, P.C.W. Davies, A.K. Pati, *Preface* [w:] A.K. Pati, P.C.W. Davies, D. Abbott (eds), *Quantum aspects of life*, s. xiii.

jące ze sobą, by osiągnąć tak sprytne cele! Jak one to robią? Nie ma nikogo, kto pisałby aranżację, brak choreografa, który reżyserowałby przedstawienie, brak poczucia wspólnoty, brak kolektywnej woli, sił życiowych – nic oprócz bezmyślnych atomów, popychających się i przyciągających, miotanych przypadkowymi fluktuacjami termicznymi. A jednak produktem końcowym jest doskonała, niezwykle charakterystyczna forma uporządkowania”¹⁸⁵².

Kwestie, jakie poruszał Schrödinger, odnosząc się do relacji biologii i fizyki kwantowej, są także i dziś przedmiotem dyskusji. Fizycy zastanawiają się nad tym, jak ważne jest uwzględnienie poziomu kwantowego w fenomenie życia. Dotąd wszyscy uważali, że wystarczy zatrzymać się na poziomie molekularnym (DNA, RNA i białka). Współcześni fizycy zastanawiają się, że może czegoś istotnego odnośnie do życia nie znajdziemy już na poziomie kwantowym. Niniejszy rozdział zawiera przykładowe opinie wyrażane na ten temat.

Kontekstowy profil współczesnych badań nad życiem znajduje swoje odzwierciedlenie w stopniowo wyodrębniającej się nowej, interdyscyplinarnej gałęzi nauki, będącej połączeniem fizyki kwantowej, biochemii i biologii¹⁸⁵³. W opinii wielu współczesnych badaczy niektóre aspekty mechaniki kwantowej w naturalny sposób zaistniały w biologii. Jim Al-Khalili i John-joe McFadden twierdzą, że mechanika kwantowa odgrywa ważną rolę w biologii, ponieważ stanowi podstawę atomowej i molekularnej struktury, a więc i podstawę kształtu i wiązań cząsteczek, a w konsekwencji i szablonowych funkcji kwasów nukleinowych i specyficzności białek¹⁸⁵⁴. Zdaniem autorów okazuje się ona również kluczowa w wyjaśnianiu różnicujących prędkości dyfuzji, specyficzności błon oraz wielu innych ważnych funkcji biologicznych. Życie, jak przekonują autorzy, pojawia się na „kwantowej krawędzi” rozdzielającej świat klasyczny od świata kwantowego¹⁸⁵⁵. Mechanika kwantowa jest tym samym fundamentem najbardziej podstawowego poziomu mechanizmu samego życia¹⁸⁵⁶. Tym, na co szczególnie zwracają uwagę, jest przekonanie, że mechanika kwantowa może odgrywać nawet bardziej niż podstawową rolę w wyjaśnieniu struktury molekularnej, wiązań i powinowactwa chemicznego. Biologia bazuje na chemii, która z kolei podlega zasadom kwantowym, takim jak reguła Pauliego. Zatem szereg mniej

¹⁸⁵² P. Davies, *Milczenie Gwiazd...*, s. 57.

¹⁸⁵³ Por. J. Al-Khalili, J. McFadden, *Życie na krawędzi...*, s. 9.

¹⁸⁵⁴ Por. J. Al-Khalili, J. McFadden, *Quantum coherence and the search for the first replicator* [w:] A.K. Pati, P.C. W. Davies, D. Abbott (eds), *Quantum aspects of life*, s. 39.

¹⁸⁵⁵ Por. tamże, s. 29.

¹⁸⁵⁶ Por. tamże, s. 39.

intuicyjnych właściwości tej teorii również może odgrywać istotną rolę w opisie samego życia¹⁸⁵⁷. Al-Khalili i McFadden dowodzą, że nie jest to wcale tak spekulatywne, jak mogłoby się wydawać. Autorzy dostrzegają dwa ważne procesy kwantowe zachodzące w organizmach żywych: „splątanie kwantowe” oraz „tunelowanie kwantowe”. „Splątanie” wyjaśniono już wcześniej, należy zatrzymać się więc na drugim z wymienionych zjawisk. „Tunelowanie kwantowe” to proces, dzięki któremu cząstki elementarne mogą swobodnie przechodzić przez niemożliwe do przebycia bariery¹⁸⁵⁸. Wiele wskazuje na to, że pod wpływem „tunelowania kwantowego” elektrony mogą przemieszczać się wzdłuż łańcucha oddechowego (co umożliwia procesy oddychania komórkowego). Co więcej, prawdopodobnie nawet protony, dwa tysiące razy cięższe od elektronów, są zdolne do „tunelowania kwantowego” w reakcjach enzymatycznych (co tłumaczyłoby niezwykłą szybkość reakcji katalizowanych przez enzymy). Kwantowe tunelowanie protonów może zmieniać strukturę zasad nukleotydowych i być odpowiedzialne za niektóre rodzaje mutacji¹⁸⁵⁹. Autorzy dostrzegają własności kwantowe także w sposobie, w jaki rośliny przechwytyują światło słoneczne¹⁸⁶⁰.

Bardzo obiecująco brzmią doniesienia, że w ostatnich latach zgromadzone zostały poszlakowe dowody na to, że mechanika kwantowa może rzucić istotne światło na pochodzenie życia¹⁸⁶¹. Mimo to biologia kwantowa budzi jeszcze wiele emocji. Al-Khalili i McFadden podkreślają, że chociaż oczywiste jest, że fenomen życia na swym najbardziej elementarnym poziomie organizacji podlega prawom mechaniki kwantowej, to dla wielu współczesnych badaczy życia ich rola jest jednak marginalna. Piszą: „Chodzi im o to, że ponieważ prawa mechaniki kwantowej rządzą oddziaływaniem atomów, to oczywiste zasady świata kwantowego muszą obowiązywać na najbardziej podstawowym poziomie również w biologii – ale tylko na tym poziomie, i w rezultacie mają niewielki wpływ lub w ogóle go nie mają, gdy bierzemy pod uwagę procesy zachodzące w skalach przestrzennych i czasowych ważnych dla życia”¹⁸⁶². W innym miejscu dodają: „Życie wydaje się spinać świat klasyczny z kwantowym, sadowiąc się na kwantowym brzegu”¹⁸⁶³.

Zdaniem Rogera Penrose’a, chociaż byłoby zbyt optymistycznie przy naszym obecnym stanie wiedzy oczekiwać znalezienia ostatecznych odpo-

¹⁸⁵⁷ Por. tamże, s. 39–40.

¹⁸⁵⁸ Por. tamże, s. 22, 104, 106–109.

¹⁸⁵⁹ Por. J. Al-Khalili, J. McFadden, *Quantum coherence...*, s. 40.

¹⁸⁶⁰ Por. tamże, s. 35.

¹⁸⁶¹ Por. D. Abbott, P.C.W. Davies, A.K. Pati, *Preface*, s. xiii.

¹⁸⁶² J. Al-Khalili, J. McFadden, *Życie na krawędzi...*, s. 32–33.

¹⁸⁶³ Tamże, s. 149.

wiedzi na wszystkie pytania dotyczące tego tematu, jednak istnieje wiele możliwości prowadzenia w tym zakresie pogłębionej debaty¹⁸⁶⁴. Nie wszyscy są tego zdania. Fizycy kwantowi Howard Wiseman i Jens Eisert za nieuprawnione uważają odwoływanie się przy rozważaniu kwestii biologicznych (zwłaszcza tak fundamentalnego problemu, jakim jest pochodzenie życia) do mechaniki kwantowej¹⁸⁶⁵. Twierdzą, że pochodzenie życia jest całkiem prawdopodobne zgodnie z przyjętymi teoriami fizyczno-chemicznymi. Piszą: „Aby zrozumieć chemiczną strukturę i reakcje zachodzące na podstawowym poziomie, niezbędne jest wykorzystanie fizyki kwantowej. Chemię uważa się jednak zwykle za naukę pochodną od fizyki w prosty oddolny – nie odgórny – sposób przyczynowy. Gdyby tak nie było, należałoby postulować nie tylko »zasadę kwantowego życia«, ale także »zasadę kwantowej chemii«”¹⁸⁶⁶. Przywołani fizycy przyjmują, że pochodzenie życia może być wyjaśnione poprzez poszukiwanie najprostszego nośnika informacji dziedzicznej w świecie przyrody. Jako na dobrze nagłośniony przykład wskazują potwora Spiegelmana, będącego znacznie prostszym od wirusów, od jakich pochodzi. Składa się on z nici RNA o zaledwie 218 nukleotydach, co oznacza, że jest on dużą cząsteczką zawierającą mniej niż 10 atomów¹⁸⁶⁷. Środowisko jego replikacji to wodny roztwór aktywowanych nukleotydów wzbogacony o enzym replikazy Q¹⁸⁶⁸. Potwór przenosi informację dziedziczną i podlega selekcji naturalnej. Celem Wisemana i Eiserta nie jest wykazanie, że potwór Spiegelmana to „pierwsze życie”, gdyż to, jak twierdzą, prawdopodobnie zrodziło się w mocno odmiennych środowiskach. Przeciwnie, w niniejszym kontekście: **(i)** początki życia nie muszą być aż tak skomplikowane, jak uważają ci, którzy podkreślają jego nieprawdopodobieństwo, oraz **(ii)** nic w tych eksperymentach nie sugeruje zaangażowania czegokolwiek innego prócz chemii w autostrukturyzacji i replikacji tych stosunkowo dużych cząsteczek. Argumentują więc, że życie jest nieuniknioną konsekwencją chemii w odpowiednim środowisku¹⁸⁶⁹.

O konieczności brania pod uwagę kwantowych aspektów przy wyjaśnianiu życia nie mają wątpliwości Derek Abbott, Paul C.W. Davies i Arun K. Pati. Wierzą oni, że nadszedł czas, aby wyodrębnić kwantowy program

¹⁸⁶⁴ Por. R. Penrose, *Foreword*, s. x.

¹⁸⁶⁵ Por. H. Wiseman, J. Eisert, *Nontrivial quantum effects in biology: a skeptical physicists' view* [w:] A.K. Pati, P.C. W. Davies, D. Abbott (eds), *Quantum aspects of life*, s. 382.

¹⁸⁶⁶ Tamże, s. 383.

¹⁸⁶⁷ Por. tamże, s. 383–384.

¹⁸⁶⁸ Por. tamże, s. 384.

¹⁸⁶⁹ Por. tamże.

biologii¹⁸⁷⁰. Rozwijające się dziedziny nanotechnologii, biotechnologii, technologii kwantowej i przetwarzania informacji kwantowej obecnie silnie na siebie oddziałują. Skrót BINS, od angielskiego *Bio-Info-Nano-Systems*, został ukuty, aby opisać synergiczne przeplatanie się tych kilku dyscyplin. Żywa komórka jest systemem powielającym i przetwarzającym informację, będąc w pełni wyposażona w naturalnie powstałe nanomaszyny, które na pewnym poziomie wymagają opisu kwantowomechanicznego. W miarę pogłębiających się więzi inżynierii kwantowej i nanotechnologii coraz częstsze będzie wykorzystywanie struktur biologicznych lub hybryd biologicznych i sztucznych układów w celu wytworzenia nowych urządzeń do przechowywania i przetwarzania informacji oraz realizacji innych zadań. Zrozumienie tych systemów na poziomie mechaniki kwantowej stanie się niezbędne.

W niniejszym rozdziale zreferowano i przeanalizowano próby wyjaśniania kwestii kwantowych aspektów życia przez szerokie grono uznanych fizyków, którzy mieli okazję odnieść się do tego zagadnienia. Nadrzędna kwestia dotyczy tego, jak ważną rolę przy roztrząsaniu problemów biologicznych odgrywa mechanika kwantowa. Rozważając to, należy się skoncentrować na takich zagadnieniach, jak holistyczne efekty kwantowe w biologii, mechanika kwantowa a pochodzenie życia, język genetyczny z perspektywy mechaniki kwantowej, życie z dwóch perspektyw: mechaniki kwantowej i teorii złożoności obliczeniowej, rola mechaniki kwantowej w zrozumieniu dynamiki bioukładów. Aby rozszerzyć dyskusję, znalazły się w niniejszym rozdziale rozważania dotyczące sztucznego życia kwantowego, ponieważ mogą one rzucić światło na prezentowane w pracy pojmowanie fenomenu życia.

Współcześni fizycy doszukują się holistycznych efektów kwantowych w biologii. Jednym z tych badaczy jest Alfred Driessen. Niemiecki fizyk zwraca uwagę na szybko rosnące zainteresowanie właściwościami kwantowymi materii ożywionej, które pobudza dyskusję na temat fundamentalnych właściwości życia¹⁸⁷¹. Podkreśla, że w ostatnich latach opublikowanych zostało wiele badań eksperymentalnych i teoretycznych odnoszących mechanikę kwantową do bioukładów¹⁸⁷². Ich istotą nie jest potwierdzenie występowania efektów kwantowych w biologii (to nie jest niczym nowym), ale fakt, że odgrywają tam one ważną rolę, gdyż przejawiają się w nieoczekiwanej skali wielkości i temperatury. Zajmując się mechaniką kwantową, ma się

¹⁸⁷⁰ Por. tamże, s. xiv.

¹⁸⁷¹ Por. A. Driessen, *Life and quantum biology, an interdisciplinary approach*, Cornell University Library 2014, <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1109/1109.2584.pdf> (15.06.2016).

¹⁸⁷² Por. tamże.

wrażenie – twierdzi Driessen – wkraczania w inny świat, gdzie nowe pojęcia często kłócą się z tymi opartymi na mechanistycznym poglądzie, do jakiego przyzwyczaiła nas fizyka klasyczna. Skupiając uwagę na materii ożywionej, ponownie jego zdaniem otwieramy drzwi do tajemniczego świata. Przypomina on, że życie kryje tajemnice we wszystkich swoich formach – od najbardziej prymitywnych wirusów, bakterii, do najwyższych poziomów fauny i flory.

Driessen przedstawia dwa podejścia w badaniach życia¹⁸⁷³. Dla wielu naukowców zdolność zrozumienia życia i odtworzenia w szczególności procesów biologicznych jest kwestią czasu. W tym celu należy rozwikłać procesy chemiczne i szczegółowo zbadać podstawowe zjawiska fizyczne. Zgodnie z tym poglądem, biologia stanie się ostatecznie chemią, a chemia – fizyką. Inni badacze wolą używać holistycznego podejścia i traktować materię ożywioną jako coś, czego nie można zredukować do aglomeratu martwych bloków budulcowych. W opinii niemieckiego fizyka w badaniu bardzo złożonych systemów biologicznych redukcjonizm nie daje zamierzonych rezultatów. Za centralne uważa on dwa pojęcia: jedności i informacji¹⁸⁷⁴. Jedność jest kluczowa w kontekście materii ożywionej. Można to zaobserwować, rozważając przeciwną koncepcję podziału lub rozkładu, która jest najbardziej oczywistym przejawem śmierci. W mechanicyzmie XVIII i XIX wieku jedność była redukowana do geometrycznego układu części, jaki znajdujemy na przykład w maszynie. Mechanika kwantowa udowodniła, że nie jest to właściwe podejście, gdyż zasadniczą rolę odgrywają splątanie i superpozycja¹⁸⁷⁵. Oba te „nowe” zjawiska, które nie mają swoich klasycznych odpowiedników, są ściśle powiązane z pojęciem jedności. Inną własnością materii ożywionej jest informacja¹⁸⁷⁶. Informacja odnosi się do złożoności systemu, a organizmy żywe stoją na najwyższym szczeblu drabiny złożoności.

Driessen zdaje sobie sprawę z tego, że główny nurt badań biologicznych opowiada się za pewną wersją redukcjonizmu¹⁸⁷⁷. Przy takim podejściu rośliny, zwierzęta, a nawet ludzie są niczym innym jak odpowiednio uporządkowanym zbiorem atomów lub cząsteczek. Wyjaśniając występowanie porządku, biolodzy głównego nurtu idą w ślady Darwina i jego rozważań na temat ewolucji. Twierdzą oni, że zmiany i występowanie porządku wynikają

¹⁸⁷³ Por. tamże.

¹⁸⁷⁴ Por. tamże.

¹⁸⁷⁵ Mówimy, że spin elektronu jest w stanie superpozycji, gdy może wirować „w górę” i „w dół” jednocześnie (superpozycja „spinu w górę” i „spinu w dół”). Por. J. Al-Khalili, J. McFadden, *Życie na krawędzi...*, s. 200–201.

¹⁸⁷⁶ Por. A. Driessen, *Life and quantum biology...*

¹⁸⁷⁷ Por. tamże.

wyłącznie z losowości lub przypadku oraz doboru naturalnego. Niemiecki fizyk, komentując to stanowisko, stwierdza, że jedna z podstaw mechaniki kwantowej mówi o tym, że występowanie przypadku w konkretnym zdarzeniu nie może być wykryte przez jakikolwiek eksperyment naukowy. Wniosek na temat losowości – lub alternatywnie celowości „konstrukcji” – nie może być zatem wyciągnięty na podstawie czystej analizy naukowej, lecz jedynie przez refleksję na temat wyników badań naukowych w sferze metafizyki.

Driessen zwraca uwagę na wysoki stopień jedności występujący w organizmach żywych, w przeciwieństwie do układów nieożywionych¹⁸⁷⁸. Jedność oznacza, że należy najpierw rozważyć całość lub system, a dopiero potem jego części lub składniki. Całość jest czymś więcej niż tylko sumą swoich części. Z powyższym twierdzeniem zgadza się większość współczesnych fizyków.

Powstaje pytanie – dlaczego mechanika kwantowa, która zrodziła się około stu lat temu, jest wciąż tak ważna dla tematu organizacji życia?¹⁸⁷⁹ Driessen przedstawia dowody, że złożone białko biologiczne wykazuje spójne kwantowo współdzielenie elektronicznego pobudzenia na całej swojej szerokości 5 nm¹⁸⁸⁰. Sugeruje to, że odległe cząsteczki w obrębie białka są „spięte” ze sobą za pomocą koherencji kwantowej dla bardziej efektywnego wychwytywania światła. Stanowi to dowód na to, że zespół cząsteczek o przybliżonej jednostce masy atomowej przekraczającej wartość 106 funkcjonuje w spójny sposób. Niemiecki fizyk podaje dwa inne przykłady wskazujące, że mechanika kwantowa usprawnia funkcjonalne zachowania bioukładów. Jednym z nich jest nieoczekiwana zdolność niektórych ptaków (rudzika) przejawiania zmysłu orientacji dzięki wykrywaniu gradientu pola magnetycznego. Drugim jest zmysł węchu muszek owocowych (*Drosophila*) realizowany przez wykrywanie drganiowego spektrum cząsteczek zapachowych. Funkcjonalne zachowania we wszystkich tych przypadkach można wytłumaczyć jedynie na podstawie mechaniki kwantowej.

Driessen stara się wykazać, że mechanika kwantowa umożliwia spojrzenie na rzeczywistość inne od osiemnastowiecznego i dziewiętnastowiecznego poglądu fizyki klasycznej¹⁸⁸¹. Najbardziej zadziwiające są jego zdaniem dowody na istnienie jakościowych przemian w przyrodzie. Zmiany te mają miejsce, gdy nowa forma (nowa informacja) jest implementowana w systemie. Oznacza to, że systemy występujące w przyrodzie nie mogą być zredu-

¹⁸⁷⁸ Por. tamże.

¹⁸⁷⁹ Por. tamże.

¹⁸⁸⁰ Por. tamże.

¹⁸⁸¹ Por. tamże.

kowane do mniej lub bardziej złożonych części, które wchodzą w ich skład. Skupianie się na aspektach materialnych – w tym przypadku właściwościach części składowych – nie jest wystarczające. Głównym powodem jest to, że części składowe są obecne tylko w całości. „Każde pojęcie zlokalizowanego elektronu w atomie – pisze – prowadzi do sprzeczności w teorii, jak i w praktyce. To samo dzieje się w doświadczeniu Younga ze światłem, atomami lub cząsteczkami. Jeśli ktoś próbuje identyfikować eksperymentalnie lub teoretycznie, przez którą z dwóch szczelin przeszedł obiekt, obraz interferencyjny zanika. Oznacza to, że system podwójnych szczelin znacząco się zmienia. Czy to taka dziwna sytuacja? Dla greckiego myśliciela Arystotelesa i większości innych ludzi, było i nadal jest oczywiste, że istnieją przemiany wykraczające poza zwykłe przegrupowanie części. Z pomocą może nam przyjść przykład wzięty z dziedziny sztuki. Kontemplując arcydzieła malarzy i rzeźbiarzy wszechczasów, urzeka nas w nich nie tylko szczegółowość form, barw, oczy, usta, skóra i włosy, ale również piękno, pasja i pewien rodzaj wyrazu osobistej historii ich autora. Wracając do świata ożywionego – w twarzach ludzi zawarta jest ogromna ilość informacji, wykraczająca daleko poza to, czego można by oczekiwać od geometrycznych układów tkanek biologicznych”¹⁸⁸².

Jaka jest różnica między ożywionymi i nieożywionymi obiektami?¹⁸⁸³ Odpowiadając, niemiecki fizyk twierdzi, że istnieje ontologiczna podstawa tej dystynkcji. Różnica między nimi nie leży w częściach, jakie otrzymamy po rozebraniu całości. Procedura jest taka sama, jak w przypadku rozbierania materii nieożywionej. Zamiast takiego działania powinno się szukać organizacji wyższego poziomu, możliwej dzięki jakościowej przemianie związanej ze zwiększoną ilością informacji. „Jeśli rozważymy organizm żywy – pisze Driessen – od wirusa po człowieka – mogłoby się okazać, że to, co nazywamy życiem, jest systemem zorganizowanym w rodzaj makroskopowego supersplątania. Jeśli obserwujemy zwiększoną efektywność w wyłapywaniu światła u pewnych nanostruktur biologicznych, która wykracza poza możliwości ich części składowych, wówczas powinna istnieć dla tego podstawa ontologiczna, czyli system odpowiedzialny za ten fakt. To samo można powiedzieć o innych wynikach badań naukowych. Skoro ptaki mogą wykrywać bardzo nikle sygnały magnetyczne w celu orientacji w locie, a muszki owocowe rozróżniają niemal identyczne cząsteczki o jedynie różnych poziomach drgań, powinien istnieć złożony system, który byłby za to odpowiedzialny. We wszystkich tych przypadkach mechanika kwantowa wydaje

¹⁸⁸² Tamże.

¹⁸⁸³ Por. tamże.

się jedynym wyjaśnieniem”¹⁸⁸⁴. Driessen przekonuje, że klasyczne modele kulkowe cząsteczek nie mogą uwzględniać w sobie niezwyklej wydajności układu. Trzeba zamiast tego zastosować podejście systemowe, w którym całość jest jakościowo różna od agregacji swoich części składowych.

Czy to możliwe, że dodatkowa ilość informacji dostępna na wyższym poziomie biosystemów umożliwia także znacznie bardziej wydajną drogę do mutacji z lepszym przystosowaniem do środowiska?¹⁸⁸⁵ Driessen odpowiada, że w tym przypadku mechanika kwantowa może być także środkiem, za pomocą którego natura dostarcza dodatkowych informacji do systemu tak, aby układ funkcjonował mniej losowo i mniej „na ślepo”, niż można by oczekiwać od właściwości statystycznych jego części. Źródło dodatkowej informacji wypływałoby z naturalnych praw rządzących systemem wyższego poziomu. „Poniekąd mówienie – konkluduje – że w pewnym punkcie występują jakościowe przemiany jest tym samym co mówienie, że przyroda zapewnia nowe informacje. W ten sposób hierarchia złożoności może być uzyskana zgodnie z poznaniem”¹⁸⁸⁶.

Na następujące pytania: Jaka jest relacja między ożywioną i nieożywioną materią? Czy istoty żywe mogą być postrzegane jako te, które wynurzyły się z materii nieożywionej? Czy biologia może być całkowicie zredukowana do chemii, a nawet do fizyki?, próbuje odpowiedzieć niemiecki fizyk Hans-Peter Dürr.

Dürr zauważa, że w fizyce klasycznej świat jest traktowany jako oparta na materii rzeczywistość, której rozkład części w czasie jest jednoznacznie określany przez konkretne prawa dynamiki¹⁸⁸⁷. Z kolei współczesna fizyka kwantowa pokazuje, że materia nie składa się z materii, bowiem rzeczywistość jest jedynie potencjalnością. Świat posiada strukturę holistyczną, która opiera się na podstawowych relacjach i niematerialnych przedmiotach, doświadczać coraz bardziej otwartego indeterministycznego rozwoju. W tych bardziej elastycznych ramach przyczynowych ożywiona i nieożywiona materia nie powinny być traktowane jako fundamentalnie różne, lecz jako struktury o odmiennym porządku tej samej niematerialnej jednostki. „W stabilnej konfiguracji – pisze Dürr – wszystkie niewiadome są statystycznie uśredniane, wykazując w ten sposób unikalne i deterministyczne zachowanie zwykłej materii nieożywionej; natomiast w przypadku staty-

¹⁸⁸⁴ Tamże.

¹⁸⁸⁵ Por. tamże.

¹⁸⁸⁶ Tamże.

¹⁸⁸⁷ Por. H.-P. Dürr, *Inanimate and animate matter: orderings of immaterial connectedness – the physical basis of life* [w:] H.-P. Dürr, F.-A. Popp, W. Schommers (eds), *What is life? Scientific approaches...*, s. 145.

stycznie niestabilnych i dynamicznie stabilnych konfiguracji »ożywione« cechy podstawowej struktury kwantowej mają szansę osiągnąć poziomu makroskopowego i połączyć się z tym, co postrzegamy jako zjawisko życia. To przypuszczenie może być bardziej wyraźne i jasne poprzez identyfikację elektrycznego dipolowego momentu biomolekuł jako grupującego parametru w odpowiednim układzie makrokwantowym. Ma to istotne przełożenie na biologię i medycynę. W szczególności sugeruje istnienie »oprogramowania«, zapewne niezbędnego dla logistyki procesów biologicznych ukrytych za materialnym sprzętem, który sam jest pojmowany w tradycyjnym kontekście»¹⁸⁸⁸.

Fizyk przypomina, że w analitycznym sposobie postrzegania rzeczy, który jest integralną częścią biologii molekularnej, zwykle zakłada się, że zjawiska „mezokosmosu” (naszego świata, w którym żyjemy) mogą być interpretowane jako bezpośrednio zależne od praw „mikrokosmosu” i równocześnie wynikające z tych praw¹⁸⁸⁹. Wprawdzie cząsteczki i atomy są „objektami”, o których fizyk wie sporo i o których może w związku z tym wypowiadać się z dużą pewnością, jednak nie wynika z tego, że jego koncepcje okażą się szczególnie przydatne dla biologa. Jeśli przenieść się bowiem z „mikrokosmosu” do „mezokosmosu”, pierwotne cechy „bloków budulcowych” są w dużej mierze ukryte i jawią się w znacznym stopniu w jakościowo zmienionej postaci, wynikającej z ich skomplikowanych interakcji. Dürr zakłada więc, że fizyk raczej będzie miał do zaoferowania biologowi w kontekście pojęciowym niewiele więcej niż chemik, który w dodatku przekaże tę samą wiedzę lepiej i prościej. „Może to być prawda – pisze – ale niekoniecznie, jako że fizyka była przedmiotem szeroko pojętej przemiany podczas pierwszych trzech dekad XX wieku; efekty tej przemiany, przynajmniej w mojej opinii, nie były do tej pory wystarczająco zauważane przez biologów. Podejrzewam, że na początkowe pytanie można odpowiedzieć twierdząco tylko wtedy, gdy odnosimy się do ważniejszego stopnia nowej fizyki oraz wykazywanych przez nią połączeń i zależności w przyrodzie, które wybiegają poza nasze pojęciowe przyzwyczajenia. To właśnie ten radykalnie zmieniony światopogląd współczesnej fizyki, który – w moim mniemaniu – może również przynieść ze sobą odpowiednio zmieniony, obfitujący w nowe i bardziej osobliwe pytania i propozycje pogląd dla dzisiejszej, głównie naukowo zorientowanej, biologii”¹⁸⁹⁰.

Dürr nie uważa, by nowa fizyka była po prostu zmianą paradygmatów w sensie nadanym temu terminowi przez Thomasa Kuhna w pracy *The*

¹⁸⁸⁸ Tamże, s. 145–146.

¹⁸⁸⁹ Por. tamże, s. 146.

¹⁸⁹⁰ Tamże, s. 146–147.

structure of scientific revolutions (Struktura rewolucji naukowych)¹⁸⁹¹. Choć w ograniczonej formie, stare odkrycia i opisy odzyskują swoje dawne znaczenie w ramach nowych pojęć z odpowiednio zmodyfikowanym punktem widzenia. Podkreśla, że ograniczenie polega na tym, że w celu zapewnienia wyczerpującego opisu zjawisk, opis zawarty w ramach jednego paradygmatu nie jest wystarczający i wymaga uzupełnienia komplementarnymi strukturami relacji, które mogą być wyrażone jedynie w innym paradygmacie, sprzecznym z tym pierwszym. Piszze: „Niezgodność komplementarnych paradygmatów wyjaśnia, że reprezentacja w jednym z nich nie jest, ściśle rzecz biorąc, odpowiednia dla rzeczywistej sytuacji, wykraczając poza wzór Kuhna. W tym przypadku stary paradygmat nie jest zastępowany przez nowy, ponieważ pozwala to uniknąć empirycznych niezgodności, lub zasadnicze fakty zostają dokładniej opisane, tudzież po prostu stają się łatwiejsze do zrozumienia, jak pokazuje choćby przypadek Kuhna”¹⁸⁹².

¹⁸⁹¹ Por. tamże, s. 147.

¹⁸⁹² H.-P. Dürr, *Inanimate and animate matter...*, s. 147. Ogólnie rzecz biorąc, Kuhn twierdzi, że myśl naukowa zdominowana jest przez „paradygmaty”, które wyznaczają kurs przyszłych badań naukowych. Przez „paradygmat” rozumie on „powszechnie uznawane osiągnięcia naukowe, które w pewnym czasie dostarczają społeczności uczonych modelowych problemów i rozwiązań”. Th.S. Kuhn, *Struktura rewolucji naukowych*, tłum. H. Ostromecka, PWN, Warszawa 1968, s. 12. Według tego amerykańskiego fizyka i filozofa nauki większa część nauki „normalnie” zajmuje się wyłącznie rozwojem „paradygmatów”. Sugeruje jednak także, że czasami w „paradygmatach” występuje wiele anomalii, a przyjęte poglądy ulegają unicestwieniu. W tym momencie – jak twierdzi Kuhn – powstaje nauka „rewolucyjna”, a paradygmat zostaje zmieniony. Ważnym aspektem tej tezy jest to, jakoby w nauce nie istniały poglądy całkowicie słuszne lub niesłuszne, prawda zależy od konkretnego paradygmatu, a co za tym idzie, decyzja o zmianie paradygmatu nie jest czymś, co można rozsądnie uzasadnić. Z tego powodu, obstawanie przy twierdzeniu, że nauka dąży do jakiegoś ostatecznego celu, jest błędem. Mamy zamiast tego do czynienia z procesem ewolucji mającym skromne początki, bez nadziei na pojawienie się jego końca. Na przykład fizyka po podwójnej rewolucji – mechaniki kwantowej i teorii względności wkroczyła w fazę, którą można by określić mianem „normalnej nauki”, w której najwięcej działań wiąże się z „rozwiązywania zagadek”, a nie kwestionowaniem podstaw samej nauki. Z perspektywy Kuhna Watson i Crick zajmowali się „normalną nauką”. Wykorzystali metody klasyczne w celu znalezienia rozwiązania badanej przez nich tajemnicy. Tym co skłoniło ich do rozpoczęcia, a później kontynuowania badań nad DNA, było przekonanie, że substancja dziedziczna została pominięta przez stary paradygmat białkowej lub nukleoproteinowej natury genu. Ponadto liczyli na to, że ich badania dostarczą też informacji o dziedziczności i replikacji genu, jednakże ich podejście do problemu nie różniło się zbytnio ani od podejścia ich poprzedników, ani współczesnych im naukowców zainteresowanych strukturą białek. Wynikało to z faktu, iż dane o strukturze białek mówiły niewiele, a jeżeli cokolwiek, to bardziej o syntezie białkowej. Por. M. Ruse, *Two biological revolutions*, s. 33–34. Por. M. Morange, *A history of molecular biology*, s. 69. Por. S.S. Cohen, *The origins of molecular biology...*, s. 828–829. Por. L. Kuźnicki, *Granice nauki*, Dom Wydawniczy ELIPSA, Warszawa 2006, s. 138–139.

Dürr zauważa, że z punktu widzenia nowej fizyki struktura zależności wynika nie tylko z różnorodnych i złożonych interakcji wyimaginowanych „bloków” (na przykład z sił elektromagnetycznych powłoki atomu) składających się z atomów i molekuł, lecz także za sprawą znacznie bardziej nieodłącznej holistycznej struktury relacji typowej dla fizyki kwantowej¹⁸⁹³. Stoi on na stanowisku, że nie możemy sensownie wypowiadać się o „blokach”, to jest „częściach” systemu w pierwotnym znaczeniu. „Materia – pisze Dürr – nie składa się z materii! Koncepcja, która przyjmuje, że materia jest podstawowym aspektem, a relacje między nią – powiązanie, kształt, *gestalt* – są drugorzędne, traci swoją zasadność. Współczesna fizyka odwraca ten ranking: forma przed substancją, relacyjność przed materialnością. Uważamy, że trudno sobie wyobrazić czystą relację, powiązanie lub *gestalt* bez materialnego substratu. Pole elektromagnetyczne, które wypełnia przestrzeń bez materii [...], jest jak nieistotny *gestalt*, »uformowana nicość«, coś w rodzaju holistycznej, bardzo zróżnicowanej formy, w której w konkretnym różnicowaniu możemy wykryć rozmowy telefoniczne przeznaczone dla nas, programy radiowo-telewizyjne, istnienie i właściwości Słońca, Księżyca i gwiazd oraz wiele, wiele więcej. [...] W ogólnej fizyce kwantowej (więcej niż jedna »cząstka«), *gestalt* »zamieszkuje« wielowymiarowe przestrzenie, które nie mają dłużej nic wspólnego z trójwymiarową przestrzenią świata, jakim go rozumiemy, choć pozostawia on w nim »wrażenia«”¹⁸⁹⁴.

Dürr podkreśla, że nakładanie się na siebie stanów kwantowych prowadzi nie tylko do powrotu starego klasycznego obrazu cząstek nacechowanego pewnym brakiem precyzji (ignorowanie fazy relacji), lecz także innej nieścisłości, która dotyczy relacji fazowych i również może opisywać klasyczne zjawiska falowe (takie jak obszar promieniowania elektromagnetycznego)¹⁸⁹⁵. Ambiwalencja fal i cząstek, którymi przepełnione są stany kwantowe, pojawia się ponownie w tym samym makroskopowym przypadku granicznym pod postacią dwoistości klasycznych cząstek i klasycznych pól falowych, czyli dwóch uzupełniających się paradygmatów. Zdaniem autora ten aspekt może być znaczący w biologii w kwestii genetycznego i epigenetycznego opisu w rozwoju organizmów. Genetyczno-epigenetyczna relacja może być traktowana jako w pewien sposób analogiczna do związku istniejącego między „lokalną strukturą materialną” i „fenomenologicznie wyrażonym *gestaltem* dźwiękowym, który można usłyszeć, gdy jest grany”.

¹⁸⁹³ Por. H.-P. Dürr, *Inanimate and animate matter...*, s. 153.

¹⁸⁹⁴ Tamże, s. 153–154.

¹⁸⁹⁵ Por. tamże, s. 154.

Według niemieckiego fizyka systemy wielu stanów kwantowych („cząstek”) są całościowo zróżnicowaną strukturą procesów¹⁸⁹⁶. Zróżnicowanie pozwala na rozróżnienie „artykulacji chwil”, jednak nie na podział. Systemy te są nie tylko nad wyraz skomplikowane, ale również bardzo złożone. Termin „złożoność” wyraża tu fakt, że takie systemy nie mogą być zredukowane do prostszych układów bez „złamania” któregoś z połączeń, dlatego redukcjonizm jako metodologia nie może się tu powieść. Ponadto nowoczesna teoria chaosu mówi nam, że jeśli mamy do czynienia z wrodzonymi niestabilnościami, pominięcie nawet najbardziej znikomych korelacji może zniekształcić wynik w niedopuszczalnym stopniu, a więc taka redukcja nie jest możliwa nawet w przybliżeniu¹⁸⁹⁷.

Dürr zauważa, że analiza systemu zawsze była prostsza niż późniejsza synteza spostrzeżeń uzyskanych z jej części, jednak w warunkach nowej fizyki kompletna synteza całościowego układu staje się znacznie trudniejszym, a nawet wręcz niemożliwym przedsięwzięciem¹⁸⁹⁸. Najpierw należy możliwie najdokładniej przeanalizować części i ich właściwości, w tym wpływy ich sił. W syntezie z kolei trzeba nie tylko „złożyć” materię z części, ale również odgórnie nałożyć efekty, jakie wywierają te siły. Dla dużej liczby części zadanie to mogło stać się skomplikowanym problemem, jednak wciąż takim, które pozostawało zasadniczo możliwe do rozwiązania i zwykle mogło być także rozstrzygnięte w praktyce za pomocą metod statystycznych. Niemniej statystyka związana z fizyką kwantową jest bardziej wyrafinowanym procesem niż normalne statystyki, które stosujemy w przypadku niewystarczającej znajomości faktów. „Statystyki kwantowe – pisze Dürr – opierają się na potencjalności typu »również«, nie zaś nieokreślonej rzeczywistości »albo... albo...«. W przeciwieństwie do prawdopodobieństwa, do którego jesteśmy przyzwyczajeni i które może przyjmować dowolną wartość od zera (niemożliwość) do jednego (pewność), potencjalność fizyki kwantowej nie jest liczbą dodatnią. Jest to liczba zespolona, która może się wahać od 1 do -1 w sposób podobny do fali, a jeśli kilka fal nakłada się na siebie – jak mają w zwyczaju fale – nie tylko nie mogą się one wzajemnie umacniać, lecz wręcz się osłabiają, a nawet całkowicie niwelują, w zależności od stosunku fazy [...]. Tak więc: z nowego punktu widzenia rzeczywistość nie zaczyna się od podziału [...]; przybliżone rozdzielenie jest możliwym wynikiem tworzenia się struktury, a mianowicie wytwarzaniem częściowej łączności poprzez bezpośrednie wymieranie [...]. Przypomina to pod pew-

¹⁸⁹⁶ Por. tamże.

¹⁸⁹⁷ Por. tamże, s. 154–155.

¹⁸⁹⁸ Por. tamże, s. 155.

nym kątem rozwój organizmu biologicznego z jednej komórki na drodze kolejnych »podziałów komórkowych«, które nie występują przez podział *per se*, lecz raczej na drodze powtarzającej się formacji połowicznie oddzielonych ścian komórkowych. Służy to jednak wyłącznie jako metafora, ponieważ formacja *gestaltu* w rzeczywistości nie występuje w postrzeganej przez nas trójwymiarowej przestrzeni. Relacje między częściami całości nie wynikają więc jedynie wtórnie jako interakcja między tym, co było początkowo odizolowane, lecz są wyrazem pierwotnej tożsamości wszystkiego, są *idemem* [...]. W ten sposób struktura relacji nie tworzy się wtórnie z komunikacji, wzajemnej wymiany [...] sygnałów umacnianych przez rezonans, lecz poprzez wspólnotę, styczność, identyfikację”¹⁸⁹⁹.

Fizyki zauważa, że rozmiar obiektu nie jest wystarczającym kryterium, aby zapewnić całkowitą eliminację holistycznych form charakterystyki mechaniki kwantowej, a tym samym skuteczną dominację czysto klasycznych form¹⁹⁰⁰. Idzie nawet o krok dalej w swych spostrzeżeniach, przekonując, że makroskopowe struktury kwantowe nadal pozostają dość specyficzne, ponieważ wszystkie wytwarzają się dopiero przy stanie równowagi termodynamicznej w układzie¹⁹⁰¹. Kiedy oddalamy się od tego stanu równowagi, występują całkowicie nowe zjawiska grupowania. Wymaga to ciągłego zewnętrznego zasilania układu energią. Najbardziej znanym przykładem tego jest laser. „W tym przypadku – pisze – medium, jakie było odpowiednio »pompowane« do niestabilnej konfiguracji stanu [...] na drodze lekkich zrzutów napromieniania w formie zbiorowej, kwantowomechanicznej spójnej [...], i wielofotonowej fali światła, poprzez ciągłe dostarczanie energii umożliwiamy kwantowej, mikroskopowej strukturze pojawić się makroskopowo również tutaj. W ten sposób proces ten jest kwantowo analogiczny do zachowania klasycznych dyssypatywnych struktur dalekich od równowagi termodynamicznej [...], które mają tendencję do tworzenia określonych wzorców grupowania”¹⁹⁰².

Według niemieckiego przyrodnika możliwe tworzenie się makroskopowych struktur kwantowych (koherencja) w zasilanych energetycznie układach sugeruje, że nie zatrzymujemy się na systemach przyrody nieożywionej¹⁹⁰³. Dzięki temu pojawia się hipoteza bezpośredniego połączenia pomiędzy zjawiskami życia a fundamentalną i holistyczną strukturą rzeczywistości. Bioukłady mogą w istocie działać w sposób podobny do lasera,

¹⁸⁹⁹ Tamże, s. 155–156.

¹⁹⁰⁰ Por. tamże, s. 158.

¹⁹⁰¹ Por. tamże.

¹⁹⁰² Tamże.

¹⁹⁰³ Por. tamże.

ponieważ, tak jak on, są układami otwartymi, które wymagają ciągłego dopływu energii, aby móc zachować zdolność wykonywania swoich funkcji, co czynią za sprawą metabolizmu poprzez spożywanie pokarmu¹⁹⁰⁴. Dzięki wystarczająco silnemu dopływowi energii, stany charakteryzujące się brakiem termicznej równowagi mogą być wytwarzane w odpowiednio zaprojektowanych makrocząsteczkach lub układach molekularnych osadzonych w konkretnych substratach, które pobudzają konkretne zbiorcze tryby drgań niskiej częstotliwości z dużą mocą¹⁹⁰⁵.

Według autora wszystko to nie wystarcza jednak do opracowania bezpośredniego połączenia między prawami nowej fizyki i zjawiskami życia¹⁹⁰⁶. Mimo tego na pierwszy rzut oka widoczne są podobieństwa, które powinny być okazją dla biologii, aby bliżej przyjrzeć się tym pojęciom, niekonwencjonalnym w klasycznym tego słowa znaczeniu. Dürr jest zdziwiony, że nie zostało to dokonane w biologii molekularnej. Zauważa, że w opisach atomów i makrocząsteczek wciąż przyjmuje się za oczywistość to, że aproksymacje chemików są zasadniczo wystarczające. Wspomina o przestrzennych modelach złożonych makrocząsteczek, jakie przedstawiają chemicy, w szczególności model podwójnej helisy DNA. Plan rozwoju istoty żywej ma być zakodowany w makrocząsteczce DNA pod postacią konkretnej sekwencji cząsteczek bazowych (nukleotydów), podobnie do oddzielnych znaków w tekście¹⁹⁰⁷. Nakładające się na siebie kuliste powłoki „zrośniętych” atomów, które tworzą te cząsteczki, mają dać przybliżone pojęcie (kwantowomechaniczne) rozkładu elektronów w tychże ato-

¹⁹⁰⁴ Por. tamże, s. 158–159.

¹⁹⁰⁵ Herbert Fröhlich, urodzony w Niemczech brytyjski fizyk, używał metod teorii pola kwantowego do opisania holistycznych efektów w fizyce materii zagęszczonej, a później przyjął to samo podejście do biologii. Wysunął ciekawe teoretyczne przykłady pola kwantowego, które wydawały się odpowiednie do interpretacji układów ożywionych. Właściwości elektryczne biologicznych cząsteczek dipolowych odgrywają w nich rolę grupującego parametru kwantowego. Jeśli takie podejście miałoby się okazać skuteczne, oznaczałoby to, że klasyczny wzór formacji w chaotycznych, często rozpraszających się układach, przywoływany do wyjaśniania materii ożywionej, może również prowadzić w pewnych okolicznościach do ekspresji makroskopowych struktur kwantowych, w których holistyczne wiązanie, jak w mikrokosmosie, odgrywa kluczową rolę za sprawą korelacji fazowych. Por. H. Fröhlich, *Coherence in biology* [w:] H. Fröhlich, F. Kremer (eds), *Coherent excitations in biological systems*, Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg–New York–Tokyo 1983, s. 3. Zob. tenże, *Theoretical physics and biology* [w:] H. Fröhlich (ed.), *Biological coherence and response to external stimuli*, Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg–New York–London–Paris–Tokyo 1988, s. 1. Por. H.-P. Dürr, *Inanimate and animate matter...*, s. 159. Por. A.C. Scott, *The nonlinear universe...*, s. 182.

¹⁹⁰⁶ Por. H.-P. Dürr, *Inanimate and animate matter...*, s. 159.

¹⁹⁰⁷ Por. tamże, s. 159–160.

mach¹⁹⁰⁸. „Mówiąc bardziej precyzyjnie – pisze Dürr – kulista powłoka jest graficznym przedstawieniem obszaru, w którym istnieje wysokie prawdopodobieństwo napotkania elektronu. Dlatego też część kwantowomechanicznej dystynkcji jest już włączona w tym zakresie. Jednak warto przy tym pamiętać, że w tej reprezentacji pod uwagę brana jest wyłącznie intensywność, a nie faza fal elektronowych, która odgrywa ważną rolę na obszarze nakładających się na siebie sferycznych powłok. Pod taką postacią elektrony nie mogą dłużej »wiedzieć« niczego o sobie nawzajem; holistyczny kontekst zostaje zignorowany i przepada»¹⁹⁰⁹.

Dürr zastanawia się nad możliwym znaczeniem powyższych idei dla współczesnej biologii. Zauważa, że wielu współczesnych biologów jest pod dużym wrażeniem sukcesów analitycznego poglądu na materię żywą i oddala się coraz bardziej od holistycznej perspektywy¹⁹¹⁰. Autor jest innego zdania i twierdzi, że analityczny pogląd uzupełnia się nawzajem z poglądem holistycznym¹⁹¹¹. W zależności od pytania, z jakim mamy do czynienia, jeden lub drugi punkt widzenia jest bardziej lub mniej odpowiedni. Analityczne stanowisko ma tę zaletę, że prowadzi do obiektywnych wyników, które można bezpośrednio przełożyć na nasz język. Ma ono jednak tę wadę, że pozostawia częściowo nierozstrzygniętą kwestię, czy izolacja przedmiotu obserwacji, która jest konieczna do analizy, może znacznie zmienić jego tożsamość i sposób funkcjonowania. Ma to miejsce w mikrofizyce, gdzie wyodrębnienie podukładów niszczy wcześniej istniejące fazowe zależności fal materii wobec reszty układu, a tym samym zatracą ogólną spójność funkcji korpuskularno-falowych. Holistyczny punkt widzenia z drugiej strony musi zmierzyć się z zasadniczą trudnością odniesienia go do ram współczesnej nauki. „Mówiąc krótko: jest to problem nie do obejścia – pisze Dürr – ponieważ wynika wyłącznie z całościowej struktury i podstawowej spójności. W szczególności jest prawie niemożliwe stworzenie sytuacji doświadczalnych, które można by uznać za wystarczająco »podobne« do tych faktycznych. W tym przypadku konieczne jest więc oparcie się na innych »kryteriach prawdy«, tudzież »kryteriach spójności«. Skoro zatem normalne metody statystyczne do weryfikacji i falsyfikacji nie mają zastosowania, prawdopodobnie będzie musiało minąć trochę czasu, zanim będziemy mogli czuć się na tym gruncie pewniej. Jest to konieczne, aby móc uniknąć wpadnięcia w pułapkę »*anything goes*« czyhającą po drugiej stronie. W najlepszym razie »wiedza« w kontekście na-

¹⁹⁰⁸ Por. tamże, s. 160.

¹⁹⁰⁹ Tamże.

¹⁹¹⁰ Por. tamże.

¹⁹¹¹ Por. tamże, s. 161.

ukowym nigdy nie zostanie nabyta na drodze tego podejścia. Fizyka kwantowa ze swoimi definitywnymi postulatami prawdopodobieństwa stanowi ciekawy przykład tego, jak wiedza, która jest z początku wyłącznie jakościowa, może nabyć pewnych ilościowych cech, a tym samym uniknąć całkowitej arbitralności”¹⁹¹².

Biolodzy molekularni, którzy powinni być najbardziej otwarci na fizyczne idee, obecnie są zdania, iż wszystkie te zawiłości fizyki kwantowej są zupełnie bez znaczenia dla ich dyscypliny¹⁹¹³. W ocenie niemieckiego fizyka argumenty przywoływane do uzasadnienia tego stanowiska są bezzasadne¹⁹¹⁴. Przyjęte przez Dürra stanowisko wynika, jak sam stwierdza, w dużej mierze z jego doświadczenia jako fizyka nuklearnego i molekularnego. Podkreśla, że w tych dziedzinach nauki bezdyskusyjnie rządzi fizyka kwantowa¹⁹¹⁵. Dlatego musi ona również mieć zastosowanie do wszystkich dyscyplin opartych na fizyce jądrowej lub molekularnej. Dotyczy to chemii i biologii, zwłaszcza biologii molekularnej. „Obiektywne spojrzenie na przyrodę żywą w jej nierozzerwalnej złożoności – pisze – zdaje się wymuszać na nas ideę, że musi istnieć jakaś inna siła działająca w tle, która zapewnia podstawowe inicjacje i niezbędne rozróżnienia oraz koordynuje interakcje wszystkich tych procesów. Obecnie możemy pominąć ten »oczywisty« punkt widzenia w świetle niezwykłych sukcesów analitycznych modeli naukowych. W ten sposób możemy zignorować fakt, że, jak podkreślono powyżej, powszechne założenie, iż odejście od obecnych pojęć (przykładowo w kierunku holistycznej fizyki kwantowej) zaprowadzi do całkowicie odmiennych, a tym samym empirycznie bezzasadnych wyników badań przeprowadzanych do tej pory, nie jest logicznie poprawne. Zamiast tego powinniśmy skupić się na przypadku wymienionym wcześniej: określenie znaczenia wielości fazowych relacji fal światła emitowanego przez obserwowany obiekt – co nowoczesne holografy wykorzystują także w praktyce, aby kompleksowo zarejestrować obiekt – nie zrodziło zwykłej fotografii, która rejestruje jedynie intensywność światła, tracąc swoje znaczenie. Podobnie możliwe znaczenie praw mikroskopowych może wyrażać się przede wszystkim w dodatkowych relacjach holistycznych, a tym samym zapewnić nam dodatkowe spostrzeżenia. Takie spostrzeżenia mogą stanowić wyjaśnienie pozornej niedoskonałości i (okazjonalne) porażki modeli mechanicznych i chemicznych. Powinny one motywować nas, aby nie skreślać z góry nowych

¹⁹¹² Tamże.

¹⁹¹³ Por. tamże, s. 161–162.

¹⁹¹⁴ Por. tamże, s. 162.

¹⁹¹⁵ Por. tamże.

podejść”¹⁹¹⁶. W przekonaniu autora będzie to dowód na to, iż warto być w przyszłości bardziej otwartym i nie wykluczać interesujących uzupełnień dotychczasowych dogmatów¹⁹¹⁷. Już dziś istnieją ciekawe hipotezy i metody, które powinny być rozpatrywane i rozbudowywane.

W konkluzji Dürr stwierdza: „Na podstawie naszej obecnej wiedzy, początkowe pytanie, »Czy biologia może być w ostatecznym rozrachunku zredukowana do fizyki?«, pozostaje bez jasnej odpowiedzi tak lub nie. Jeśli by postawić je jednak nieco inaczej, na przykład: »Czy zrozumienie istot żywych wykracza poza prawa fizyki?« – [...] moja odpowiedź byłaby bardzo bliska »nie«. Zakłada to jednak, że zgadzamy się tu odnieść do holistycznej struktury współczesnej fizyki, a nie do znacznie uproszczonych skłonności mechanistycznych fizyki klasycznej z jej liniową analizą przyczynowo-skutkową. W tych warunkach, termin »zrozumienie« należy zrewitalizować, ponieważ nie może ono być dłużej przyrównywane do »wyjaśnienia« w tradycyjnym znaczeniu, ze względu na zasadniczą niemożność całkowitej redukcji w mechanice kwantowej. Podstawowy holizm rzeczywistości jako złożonej potencjalności ogólnego systemu pozwala jedynie na przybliżoną redukcję (skomplikowanych) związków do prostszych podsystemów. Jednakże takie przybliżenia mogą być w dużym stopniu zasadne i nadające się do praktycznego zastosowania w ograniczonym zakresie pytań lub w odniesieniu do konkretnych, prostszych systemów. Tak więc twierdzenia dotyczące zachowania tego, co nazywamy materią nieożywioną (posiadającą tę prostszą strukturę), cechuje duża predykcyjna wiarygodność; oprócz tego pozwalają nam one projektować maszyny, które działają niezawodnie i zgodnie z oczekiwaniami – jak pokazuje nasze codzienne obcowanie ze złożoną technologią. Podejście proponowane tutaj nie skazuje nas więc na ślepotę wobec przyszłych zdarzeń i ogólną niemoc ich kształtowania, lecz raczej pokazuje nam wyraźnie granice, które uniemożliwiają nam przejęcie pełnej kontroli nad przyszłością. W szczególności nie należy mylić istoty żywej – rośliny, zwierzęcia lub człowieka – z maszyną, albowiem maszyna, choć bardzo złożona, zasadniczo utraciła swoją holistyczną, »życiową« strukturę poprzez dekoherencję¹⁹¹⁸ i uśrednienie. Żywa istota jest bardziej jak wiersz, który odkrywa kolejne wymiary i wyraża nowe właściwości na każdym poziomie organizacji: litery, słowa, zdania, wersu”¹⁹¹⁹.

¹⁹¹⁶ Tamże, s. 164.

¹⁹¹⁷ Por. tamże.

¹⁹¹⁸ Dekoherencja to proces, w którym molekularny losowy ruch niszczy kwantowy porządek w układzie. Por. J. Al-Khalili, J. McFadden, *Życie na krawędzi...*, s. 71.

¹⁹¹⁹ H.-P. Dürr, *Inanimate and animate matter...*, s. 164–165.

Hans-Jürgen Fischbeck, również przyglądający się życiu z perspektywy teorii kwantowej, zauważa, że na poziomie semantycznym związki znaczeniowe konstytuują autopoietyczne byty, takie jak komórki czy organizm¹⁹²⁰. Są one transempiryczne i – jeśli chodzi o ich treść – nierozpoznawalne z perspektywy fizyczno-chemicznej. Jeśli życie, jak argumentuje autor, ostatecznie znajduje niezdeterminowaną przestrzeń w obrębie przyczynowej ramy, gdzie może być „sterowane znaczeniowo”, to musi istnieć nieprzyczynowy związek, łączący poziom semantyczny z poziomem materialnym. Zdaniem autora z perspektywy teorii kwantowej jest to zupełnie możliwe. Koherencja semantyczna musi zostać wyrażona w obrębie koherencji kwantowej, to jednak oznacza odrzucenie jak dotąd powszechnie uznanego założenia, jakoby teoria kwantów była fundamentalnie nieistotna w biologii, poza odniesieniem do wiązań chemicznych. Autor ukazuje, w jaki sposób kwantowa koherencja jest możliwa na poziomie komórkowym.

Fischbeck stoi na stanowisku, że teoria kwantów jest holistyczna¹⁹²¹. Jest ona związana z modelem „wszystko w jednym”, w którym żaden element nie może być oddzielony od innych¹⁹²². Ta „wszechjedność” stanowi ogólną potencjalność, którą w założeniach można opisać matematycznie¹⁹²³. Autor przekonuje, iż przedmioty nabywają obiektywnych właściwości w wyniku tak zwanych stałych pomiarów, które wywołują dekoherencję, będącą rozpadem ogólnej koherencji¹⁹²⁴. Im większy jest taki obiekt, tym gwałtowniej i pełniej zachodzi dekoherencja. Wyłącznie cząstki elementarne, atomy i odpowiednio małe molekuly zachowują cechy kwantowo-mechanicznej komplementarności. „Biomolekuly – pisze Fischbeck – są z reguły stosunkowo duże. Jeśli wyrwie się je z systemu życiowego komórki i bada w warunkach laboratoryjnych, jak to robi biologia molekularna, są one poddane »stałemu pomiarowi« przez środowisko dyssypatywne. Ukazują się wtedy jako niemalże typowe przedmioty o wyraźnych właściwościach. Odporna jest tylko korelacja elektronowa tworząca związki chemiczne. Jednak tylko w życiowym związku komórki – w naturalnym stanie – jest ona umieszczona w kooperatywnym środowisku, dającym nadzieję na podtrzymanie do pewnego stopnia tak zwanej korelacji EPR pomiędzy biomolekulami, co czyni dekoherencję niekompletną”¹⁹²⁵. W związku z tym autor zakłada, że biomolekuly w środowisku naturalnym nie są w pełni od siebie

¹⁹²⁰ Por. H.-J. Fischbeck, *On the essence of life...*, s. 227.

¹⁹²¹ Por. tamże.

¹⁹²² Por. tamże.

¹⁹²³ Por. tamże, s. 227–228.

¹⁹²⁴ Por. tamże, s. 228.

¹⁹²⁵ Tamże.

odróżnialne, ponieważ są związane korelacjami EPR w zwykłej koherencji¹⁹²⁶. Podkreśla, że te okoliczności były jak dotąd całkowicie ignorowane przez inżynierię genetyczną biologii molekularnej. Rozbija się DNA na części (metoda PCR), wyznacza się sekwencje ich nukleotydów, składa gatunki z powrotem jak puzzle i wierzy się, że odtąd zdeterminowane pełne sekwencje będą nadal przedstawiać całościowy obraz DNA¹⁹²⁷. Badacze rozbijają korelację elektronową, której nie da się zrozumieć jako sumy części, wierząc, że korelacja elektronowa produkująca cały związek, nie posiada znaczenia¹⁹²⁸. Jednakże to ona konstituuje kontekst, który na poziomie semantycznym determinuje znaczenie uzależnionych od kontekstu segmentów genomu.

Fischbeck podkreśla, że nawet całe DNA to nie wszystko¹⁹²⁹. Całością jest żywa komórka. Jej życie realizuje się poprzez zamknięte funkcjonalne obwody. Początki i końce pasują do siebie, chociaż są wielokrotnie rozgałęzione. Z perspektywy semantycznej znaczenia definiują się wzajemnie, formując autopoietyczny związek sensu komórki. Od strony matematycznej dopasowania początków i końców są okresowymi warunkami granicznymi. Odróżniają one semantycznie koherentne związki od innych, możliwych w obrębie przyczynowej stochastyczności. Ingerencja w te związki wywołana pomiarami, w sposób nieunikniony niszczy kwantowe korelacje. „Wydaje mi się – pisze – że w tym przypadku komplementarność stanowi uzasadnienie transempiryczności poziomu semantycznego komunikacji wewnętrznej komórki. Okresowe warunki graniczne działają jak tak zwana »przyczynowość zstępująca«, która nie ma nic wspólnego ze zwyczajną przyczynowością warunków wyjściowych. W ten sposób cykliczna pełnia sieci wpływa na rozmaite etapy, które ją realizują”¹⁹³⁰.

Mechanika kwantowa wykorzystywana jest przez współczesnych fizyków do badania pochodzenia życia. Poniżej przedstawiono kilka współczesnych prób zastosowania przez fizyków teorii kwantowej do śledzenia scenariuszów powstania życia.

Mechanika kwantowa rozwiązała problem materii poprzez wyjaśnienie subatomowej, atomowej i molekularnej jej struktury¹⁹³¹. Paul Davies przy-

¹⁹²⁶ Por. tamże.

¹⁹²⁷ Por. tamże, s. 228–229.

¹⁹²⁸ Por. tamże, s. 229.

¹⁹²⁹ Por. tamże.

¹⁹³⁰ Tamże.

¹⁹³¹ Por. P. Davies, *A quantum origin of life?* [w:] A.K. Pati, P.C.W. Davies, D. Abbott (eds), *Quantum aspects of life*, s. 4. Por. M. Twardowski, *Koncepcja życia Paula Daviesa*, s. 79–82.

pomina, że pionierom mechaniki kwantowej, takim jak Bohr czy Schrödinger, w połowie XX wieku wydawało się jasne, że znajdują się na skraju rozwiązania zagadki także materii ożywionej. Wierzyli, że mechanika kwantowa, poza zwykłym zapewnianiem podstaw dla kształtów i rozmiarów cząsteczek biologicznych oraz ich chemicznego powinowactwa, odgrywa kluczową rolę w pochodzeniu i funkcjonowaniu organizmów żywych¹⁹³². Świadomość, że tajemnice życia leżą na poziomie molekularnym, pomogła im umocnić oczekiwanie, że mechanika kwantowa może odegrać kluczową rolę również w biologii. Bohr uważał, że rozróżnienie między czymś żywym i czymś martwym było fundamentalne i w istocie stanowiło manifestację zasady komplementarności. Natomiast praca *What is life?* odwoływała się do idei kwantowej, aby poprzeć tezę jej autora, zgodnie z którą, informacja genetyczna jest przechowywana w strukturze kryształu aperiodycznego. Schrödinger spekulował także, że efekty kwantowe prowadzą do pewnych diametralnie nowych zachowań, które odróżniają organizmy żywe od układów nieożywionych. Według Daviesa w pewnym sensie obaj – Bohr i Schrödinger – mieli rację. Mechanika kwantowa dostarcza wyjaśnienia dla kształtów cząsteczek, jakże istotnych z punktu widzenia szablonowych funkcji kwasów nukleinowych i specyfiki białek. Reguła Pauliego nadaje atomom i cząsteczkom określone rozmiary, co z kolei określa nie tylko szablony, ale także zróżnicowane szybkości dyfuzji, właściwości błony komórkowej i wiele innych istotnych funkcji biologicznych.

Mechanika kwantowa obejmuje swoim zasięgiem także siły wiązań molekularnych, które utrzymują mechanizm życia w spójności i umożliwiają przemianę materii¹⁹³³. Davies przypomina jednak, że te wczesne rozważania ojców mechaniki kwantowej na temat kwantowych aspektów życia zostały w niedługim czasie porzucone¹⁹³⁴. Biochemicy i biolodzy molekularni opowiedzieli się za klasycznym „kulkowo-szkieletowym” modelem molekuł. Udowodnili, że owocne rezultaty można uzyskać, pozostając w zgodzie z poglądem, że wszystkie podstawowe funkcje biologiczne mogą być pojmowane w odniesieniu do układów i przekształceń klasycznych jednostek molekularnych o różnych kształtach, różnych rozmiarach i różnej lepkości¹⁹³⁵.

Brytyjski fizyk powraca do tematu kwantowych aspektów życia, twierdząc, że mechanizmy kwantowe odegrały ważną rolę przy narodzinach ży-

¹⁹³² Por. P. Davies, *Does quantum mechanics play a non-trivial role in life?*, „Biosystems”, 78 (2004), s. 69.

¹⁹³³ Por. tamże, s. 69–70.

¹⁹³⁴ Por. tenże, *A quantum origin of life?*, s. 4.

¹⁹³⁵ Por. tenże, *Does quantum mechanics play...?*, s. 70.

cia¹⁹³⁶. Podkreśla bowiem, że w pewnym sensie fenomen życia jest podporządkowany mechanice kwantowej, gdyż skoro istnieje powszechna zgoda, co do tego, że życie w jakiś sposób narodziło się w przestrzeni molekularnej, mechanizmy kwantowe na pewnym poziomie nie mogą być ignorowane przy jego wyjaśnianiu. Przekonuje, że mechanizmy kwantowe umożliwiły zrodzenie się życia bezpośrednio ze świata atomowego, bez pośrednictwa chemii. „Ortodoksyjna perspektywa – pisze – zakłada, że długotrwały okres coraz bardziej skomplikowanej »kulkowo-szkieletowej« chemii poprzedził powstanie w pełni autonomicznego układu ożywionego. Filozoficzne stanowisko, które wspiera moją hipotezę, wiąże się z przekonaniem, że sekret życia nie tkwi *per se* w jego złożoności, a tym bardziej w materiale, który się na nią składa, ale raczej w jego niezwyklej zdolności do przetwarzania i reprodukcji informacji”¹⁹³⁷. Davies wskazuje na fundamentalne aspekty mechaniki kwantowej, które wykraczają poza klasyczny opis, a wśród nich¹⁹³⁸:

- superpozycje oraz różne aspekty faz kwantowych, takie jak rezonanse,
- splątanie,
- tunelowanie (zjawisko tunelowe),
- aspekty oddziaływań środowiskowych, takie jak kwantowy efekt Zenona,
- abstrakcyjne właściwości kwantowe, takie jak supersymetria.

Jedna lub więcej z tych cech może odgrywać kluczową rolę w funkcjonowaniu biologicznych lub prebiologicznych procesów.

Brityjski przyrodnik podkreśla, że wszystkie organizmy żywe są procesorami przetwarzającymi informacje¹⁹³⁹. Przechowują genetyczną bazę danych i replikują ją z okazjonalnymi błędami, zapewniając w ten sposób surowiec do selekcji naturalnej. Kierunek przepływu informacji jest oddolny („z dołu do góry”), co oznacza, że forma organizmu i jego selektywne cechy mogą być prześledzone wstecz do procesów molekularnych. Skoro informacja przepływa od wymiaru kwantowego, nie można nie brać pod uwagę kwantowych aspektów życia.

Biologia molekularna opiera się na kluczowym dualizmie¹⁹⁴⁰. Oznacza to, że cząsteczki biologiczne odgrywają zarówno rolę wyspecjalizowanych związków chemicznych, jak również rolę cząsteczek informacyjnych. Odzwierciedla to podstawowy dualizm fenotyp–genotyp. Używając analogii informatycznej, Davies stwierdza, że chemia odpowiada osprzętowaniu,

¹⁹³⁶ Por. tenże, *A quantum origin of life?*, s. 4.

¹⁹³⁷ Tamże.

¹⁹³⁸ Por. tenże, *Does quantum mechanics play...*, s. 70.

¹⁹³⁹ Por. tamże.

¹⁹⁴⁰ Por. tamże.

a informacja – oprogramowaniu. Pełne zrozumienie pochodzenia i funkcji życia wymaga wyjaśnienia obu aspektów, to jest sprzętowego i programowego. Badania biogenezy mają tendencję skupiania się na chemii, próbując odkryć chemiczną drogę od braku życia do życia. Choć praca taka dostarcza ważnego wglądu w to, jak i gdzie powstać mogły fundamentalne bloki budulcowe życia, czyni ona niewielkie postępy w kontekście poważniejszego problemu: jak te bloki budulcowe przybrały postać określonej i niezwykle złożonej organizacji cechującej nawet najprostszy autonomiczny organizm.

Pozostawiając otwartą kwestię, czy mechanika kwantowa może być istotna dla zrozumienia powstawania złożoności chemicznej w ogóle, Davies skupia się na drugim aspekcie problemu, to jest oprogramowaniu, tudzież informacyjnej zawartości cząsteczek biologicznych¹⁹⁴¹. Przekonuje, że spoglądanie na życie w kategoriach przetwarzania informacji skutkuje przekształceniem całej konceptualnej podstawy problemu biogenezy. Píše: „W ostatnich latach nasze rozumienie natury informacji doświadczyło czegoś w rodzaju rewolucji za sprawą rozwoju dziedziny obliczeń kwantowych i przetwarzania informacji kwantowej. Kluczowe znaczenie dla tego przedsięwzięcia ma zastąpienie klasycznego informacyjnego »bitu« jego kwantowym odpowiednikiem, »kubitem«. W miarę rozwoju układu kwantowego wejściowe kubity przekształcają się w kubity wyjściowe. Informacje mogą być przetwarzane na drodze utożsamienia ich z kubitami; co ważniejsze, sprawność przetwarzania jest zwiększona, ponieważ kwantowa superpozycja i splątanie reprezentują rodzaj obliczeniowej równoległości. W niektórych okolicznościach ten czynnik wspomagający może być wykładniczym, co oznacza ogromny wzrost prędkości i mocy obliczeniowej w porównaniu z klasycznym przetwarzaniem informacji. Wielu badaczy zwraca uwagę na daleko idące konsekwencje, jakie wiązałyby się z odkryciem, że organizmy żywe mogą przetwarzać informacje kwantowo-mechanicznie – zarówno na poziomie biomolekularnym, jak i komórkowym/neuronowym. Bioukłady są typowymi procesorami informacji. Cząsteczkami informacyjnymi są tu DNA”¹⁹⁴².

Chociaż mechanika kwantowa ma kluczowe znaczenie dla wyjaśnienia struktury cząsteczek DNA i RNA, zwykle zdaniem Daviesa nie bierze się jej pod uwagę, kiedy chodzi o ich rolę w zakresie przetwarzania informacji¹⁹⁴³. Oznacza to, że cząsteczki biologiczne są traktowane bardziej jako magazyny i przetwórcze klasycznych bitów, a nie kubitów. Autor rozważa hipotetyczną

¹⁹⁴¹ Por. tamże.

¹⁹⁴² Tamże.

¹⁹⁴³ Por. tamże.

możliwość, że przynajmniej w niektórych okolicznościach założenie to może być błędne¹⁹⁴⁴. Wyróżnia trzy potencjalnie interesujące scenariusze¹⁹⁴⁵:

1. Mechanika kwantowa odegrała znaczącą rolę w powstaniu życia w nieożywionych układach chemicznych, jednak przestała być istotnym czynnikiem, gdy życie nabrało rozpędu.
2. Kwantowe przetwarzanie informacji mogło odegrać kluczową rolę w powstaniu życia oraz sporadyczną lub uzupełniającą rolę w jego dalszym rozwoju (w zachowanych organizmach mogą istnieć relikty dawnych układów kwantowych przetwarzania informacji, tak samo jak istnieją biochemiczne pozostałości oferujące wskazówki na temat historycznych biologicznych, a nawet prebiologicznych, procesów).
3. Życie rozpoczęło się jako klasyczny złożony układ, niemniej z czasem rozwinęło pewne formy zachowań kwantowych (przykładowo, jeśli systemy biologiczne mogą przetwarzać informacje kwantowomechanicznie, zyskują wyraźną przewagę szybkości i siły, można więc się spodziewać, że dobór naturalny odkryłby i umocniłby takie zdolności, jeżeli są one możliwe).

Dla Daviesa jest prawie pewne, że niektóre mechanizmy komórkowe (na przykład fotosynteza) nie działają w oparciu o mechanikę kwantową, ale powstaje problem, czy kwantowe udoskonalenie jest produktem ewolucji, czy pozostałością po początkach życia¹⁹⁴⁶.

Podkreśla on, że chociaż kwantowe przetwarzanie informacji jest bardziej wydajne niż jego klasyczny odpowiednik, zakres jego zastosowania jest bardzo mocno ograniczony przez wymóg kwantowej koherencji¹⁹⁴⁷. Koherencja wymaga utrzymania delikatnych zależności fazowych pomiędzy różnymi komponentami w funkcji falowej przez wystarczająco długi czas, aby informacja mogła zostać przetworzona. Interakcje między układem kwantowym i jego otoczeniem będą wzmacniać dekoherencję (brak spójności) funkcji falowej (szum otoczenia skutecznie zakłóca fazy). Po osiągnięciu dekoherencji układ kwantowy zachowuje się pod wieloma względami tak samo jak układ klasyczny. W szczególności kubity przeradzają się w bity, a polepszone zdolności przetwarzania informacji układu kwantowego zanikają.

W opinii Daviesa centralnym i obecnie ogromnym wyzwaniem w wysiłku do stworzenia praktycznego komputera kwantowego jest konieczność redukcji skutków dekoherencji. Pisze: „O ile nie można tego zrobić łatwo

¹⁹⁴⁴ Por. tamże, s. 70–71.

¹⁹⁴⁵ Por. tamże, s. 71.

¹⁹⁴⁶ Por. tamże.

¹⁹⁴⁷ Por. tamże. Zob. tenże, *A quantum origin of life?*, s. 9.

i sprawnie, obliczenia kwantowe nigdy nie staną się praktyczną rzeczywistością. Szybkość dekoherencji zależy od charakteru i temperatury otoczenia oraz siły, z jaką wiąże się ono z układem kwantowym [...], przez co głównym problemem w wypracowaniu obliczeń kwantowych jest możliwie najskuteczniejsze »odfiltrowanie« otoczenia zaburzającego spójność, aby zmniejszyć temperaturę i rozwinąć procedury korekcji błędów w celu zniwelowania skutków zakłóceń środowiskowych. Jeśli mechanika kwantowa ma odgrywać rolę w biologicznym przetwarzaniu informacji, typowe wartości dekoherencji nie mogą być większe od biochemicznie znaczących wartości reakcji i/lub muszą zostać wdrożone procesy korekcji błędów»¹⁹⁴⁸.

Autor przypomina, że proste modele dekoherencji były skrupulatnie badane na przestrzeni ostatnich dwóch dekad¹⁹⁴⁹. Zwykle dla cząsteczki wchodzącej w interakcje ze zbiornikiem cieplnym w temperaturze pokojowej, zachodzi niezwykle szybka dekoherencja. Jeśli tłumaczyć by to sytuacją nukleotydu w środowisku komórki w temperaturze pokojowej, typowy byłby czas dekoherencji rzędu 10^{-13} sekundy¹⁹⁵⁰. Na pierwszy rzut oka wszystko dzieje się tak szybko, że trudno jest wyobrazić sobie, by mogło w tym czasie zaistnieć coś biologicznie znaczącego¹⁹⁵¹. Gdy jednak przyjrzeć się dokładniej, sytuacja wydaje się bardziej subtelna. Davies wskazuje dwa sposoby, w jakie dekoherencja może być „odwlekana” wystarczająco długo, aby umożliwić powstanie biologicznie ważnych procesów¹⁹⁵². Pierwszym z nich jest tak zwane osłanianie (ang. *screening*¹⁹⁵³). Jeśli dany układ może być quasi-izolowany od wywołującego dekoherencję środowiska, to tempo dekoherencji daje się znacznie obniżyć. Bardzo niewiele wiadomo o właściwościach skринingowych cząsteczek biologicznych. I tak na przykład region reakcji otoczony cząsteczką enzymu jest częściowo osłaniany od oddziaływań cieplnych Van der Waalsa zachodzących na pozostałym obszarze komórki. Podobnie histonowe owijanie DNA może służyć do osłaniania kodujących protonów przed dekoherencją. Organizmy mogą wykorzystywać gradienty termodynamiczne, zachowując się jak silniki cieplne i w ten sposób drastycznie redukując efektywną temperaturę danych zespołów cząsteczek. Brytyjski fizyk posiłkuje się przykładem powolnego uwalniania energii z cząsteczek ATP do zespołów aktomiozyn, co – jak twierdzi – ustanawia temperaturę efektywną aktomiozyn na poziomie zaledwie $1,6 \times 10^{-3}$ K. Za-

¹⁹⁴⁸ Tenże, *Does quantum mechanics play...*, s. 71.

¹⁹⁴⁹ Por. tenże, *A quantum origin of life?*, s. 9.

¹⁹⁵⁰ Por. tamże, s. 9–10.

¹⁹⁵¹ Por. tamże, s. 10.

¹⁹⁵² Por. tamże. Zob. tenże, *Does quantum mechanics play...*, s. 76–77.

¹⁹⁵³ Spolszczony niefortunnie w terminologii jako „skринing”.

gadnienie nadprzewodnictwa w wysokiej temperaturze uczy nas, że w przypadku złożonych stanów skupienia materii proste „rozumowanie kT ”, może być mylące. Druga możliwość dotyczy wolnych od dekoherencji podprzestrzeni. W celu zbudowania komputera kwantowego wiele uwagi poświęcono identyfikacji przestrzeni Hilberta, na którą nie ma wpływu sprzężenie pomiędzy układem i środowiskiem. Paradoksalnie, gdy układ sprzęga się w sposób bardzo silny ze swoim otoczeniem poprzez określone stopnie swobody, może on skutecznie „zamrozić” inne stopnie swobody dzięki kwantowemu efektowi Zenona¹⁹⁵⁴, umożliwiając utrzymanie się superpozycji, a nawet splotów. Wyrażnego przykładu dostarcza autorowi podwójna studnia jednowymiarowego potencjału. Częsteczka wprowadzona w najniższy stan energetyczny jednej studni będzie dążyć w tę i z powrotem przez barierę, oscylując z określoną częstotliwością. Jeśli zamiast tego częsteczkę wprowadzić w stan wzbudzony studni, częstotliwość tego ruchu będzie inna, zatem stan wyjściowy zawierający superpozycję o najniższym stopniu energii i stanu wzbudzenia, ewoluuje w skomplikowaną płataninę, gdy ów ruch traci fazę. Jeśli jednak częsteczka może wchodzić w silne interakcje z zewnętrzną „łaźnią grzewczą”, otoczenie wpływa na nierówne oscylacje, wymuszając ich synchronię, co skutkuje zachowaniem kwantowej koherencji w ograniczonej formie, ze względu na interakcję z otoczeniem. Ponadto jeśli układ jest wprowadzony w stan splątania z lewej i prawej strony studni, to splątanie jest również zachowane dzięki interakcji ze środowiskiem. Model ten powstał w odniesieniu do oscylacji neutrina, ale ma zastosowanie ogólne, wymaga jednakże, aby interakcja pomiędzy studnią potencjału była „ślepa”.

Davies kreśli krótko własny scenariusz pochodzenia życia. Punktem wyjściowym hipotezy jest założenie o istnieniu kwantowego replikatora, układu kwantowego, który kopiuje informacje z niewielką ilością błędów¹⁹⁵⁵. Informacja może być przedstawiona w formie kubitów, ale nie jest to konieczne. Wystarczy kwantowa replikacja klasycznych bitów. Kwantowy replikator musi być układem atomowym, który jest zdolny do klonowania samego siebie¹⁹⁵⁶. Istnieje twierdzenie o zakazie klonowania, które głosi, że wzbroniona jest replikacja funkcji falowych¹⁹⁵⁷. Treść informacji układu atomowego musi być skopiowana w formie z grubsza nienaruszonej, za jed-

¹⁹⁵⁴ Kwantowy efekt Zenona opisuje jak „kwantowe strzały” (w nawiązaniu do paradoksu stworzonego przez starożytnego greckiego myśliciela) mogą ulec zatrzymaniu w czasie, gdy dokonujemy aktu pomiaru. Innymi słowy, ciągłe obserwacje mogą uniemożliwić występowanie zdarzeń kwantowych. Por. J. Al-Khalili, J. McFadden, *Życie na krawędzi...*, s. 316.

¹⁹⁵⁵ Por. tenże, *A quantum origin of life?*, s. 6.

¹⁹⁵⁶ Por. tamże, s. 6–7.

¹⁹⁵⁷ Por. tamże, s. 7.

nym razem lub w drodze serii interakcji. Informacja ta może mieć formę binarną, wykorzystując na przykład orientację spinu elektronu lub atomu. Mechanizmy kwantowe pozwalają zatem na automatyczną dyskretyzację informacji genetycznej.

Kwantowe replikatory istnieją w naturze¹⁹⁵⁸. Najprostszy przykład stanowi stymulowana emisja fotonów. Kolejny to wzrost atomu po atomie sieci krystalicznej. Przykłady te nie są bogate pod względem informacyjnym, gdyż nie spełniają dodatkowego kryterium wysokiej złożoności algorytmicznej, jakiego wymaga biologia, bo ani identyczne fotony, ani identyczne atomy w sieci krystalicznej nie zawierają więcej niż kilka bitów informacji. Autor poszukuje więc naturalnego systemu, w którym w krótkiej skali czasu zachodzi wysokiej dokładności replikacja bogatego w informacje zbioru obiektów kwantowych. Ten hipotetyczny system nazywa on „Q-życiem”. Przestrzenią dla Q-życia mógłby być – jak twierdzi – skondensowany układ materii o niskiej temperaturze, na przykład lodowa powłoka planetozymanu w przestrzeni międzygwiazdnej.

Jak zatem powstało organiczne życie? Davies kreśli szczegółowy scenariusz: „Informacja może być bez trudu przenoszona z jednego medium do innego. Na pewnym stadium Q-życie mogło dokooptować duże molekuly organiczne, aby użyć ich jako pamięci zapasowej, podobnie jak używa się twardego dysku w komputerze. Procesor komputera (analogiczny do Q-życia) jest znacznie szybszy od napędu twardego dysku (analogicznie do RNA i DNA), ale mniej odporny i wymagający ciągłego dopływu energii. Solidne systemy obliczeniowe potrzebują czegoś na kształt twardego dysku. W końcu, organiczny układ molekularny mógł dosłownie rozpocząć życie na własną rękę. Utrata szybkości przetwarzania zostałaby zrekompensowana większą złożonością, uniwersalnością i stabilnością cząsteczek organicznych, pozwalając życiu organicznemu na zasiedlenie wielu środowisk pozostających poza zasięgiem Q-życia (na przykład wysoka temperatura)”¹⁹⁵⁹. Autor dodaje, że chociaż replikator, jaki podał przykładowo, posiada ze swej istoty naturę kwantowomechaniczną, opisany proces kopiowania nie replikuje żadnych informacji dotyczących splątania ani fazy; na przykład proces replikuje raczej bity, a nie kubity¹⁹⁶⁰. Z tego powodu, w stadium replikacji nie mielibyśmy do czynienia z dekoherencją. Charakter przejścia od arbitralnego układu kwantowego do replikującego systemu kwantowego jest dużo bardziej jasny, ale proces ów prawdopodobnie byłby niezmiernie spotęgowany, gdyby był przynajmniej częściowo koherentny.

¹⁹⁵⁸ Por. tamże.

¹⁹⁵⁹ Tamże, s. 8–9.

¹⁹⁶⁰ Por. tamże, s. 9.

Proponowana przez Daviesa hipoteza zakłada, że przejście od stanu nieożywionego do życia było procesem zapośredniczonym kwantowo i że najwcześniejsza forma życia zawierała elementy kwantowe¹⁹⁶¹. Siła superpozycji kwantowych jest taka, że system jest w stanie eksplorować wiele możliwych ścieżek jednocześnie, tym samym znacznie skracając czas przekształcenia. Ponieważ życie jest wysoce nietypowym stanem materii, jego powstanie z przypadkowego stanu wyjściowego jest przypuszczalnie wysoce nieprawdopodobne. Mechanizmy kwantowe prowadzą do drastycznego zmniejszenia prawdopodobieństwa i przyspieszają przejście od nieożywionej do ożywionej materii, wykorzystując równoległe przetwarzanie właściwości superpozycji. Istnieje jednak poważny problem, z którym należy się skonfrontować. Autor definiuje życie jako określony stan o niskim prawdopodobieństwie. Mechanika kwantowa umożliwia znacznie wydajniejszą eksplorację przestrzeni możliwości w porównaniu do klasycznego stochastycznego systemu. Jeśli istnieją więc odgałęzienia funkcji falowej „zawierające życie” (na przykład kwantowy replikator), będą one przypuszczalnie posiadać bardzo małe amplitudy. Musimy zatem wyjaśnić, dlaczego funkcja falowa układu „załamuje się” w jeden z tych stanów niskiego wewnętrznego prawdopodobieństwa. Ujmując to inaczej, jak kwantowa superpozycja rozpoznaje, że „odkryła” życie i inicjuje owe załamanie? Zdaniem badacza wchodzi tu w grę jakiś nieunikniony teleologiczny składnik: system w jakiś sposób „wybiera” życie ze znacznie szerszego zbioru stanów nieożywionych.

Davies ma świadomość, że sposób, w jaki wyraził powyższą ideę, może zostać oceniony jako językowe nadużycie¹⁹⁶². W standardowym ujęciu mechaniki kwantowej układ kwantowy nigdy sam z siebie nie „inicjuje załamania”. Funkcja falowa załamuje się na skutek interakcji ze środowiskiem. Jedną z możliwości zakłada, że replikatory są produktami środowiskowej postselekcji, wzmocnionymi przez pętlę kwantowego sprzężenia zwrotnego. Środowisko służy jako swego rodzaju urządzenie pomiarowe i w jakiś sposób wybiera do pomiaru kwantową zmienną odpowiadającą życiu. Wtedy nawet jeśli amplituda jest mała, życie będzie „rzutowane” z superpozycji przez pomiar (jak przez interakcję). Może zachodzić nawet „kierowanie” w kierunku życia przez odwrócony efekt Zenona. Zakłada to jednak, że środowisko w jakiś sposób faworyzuje życie (życie jest „wbudowane w naturę” w sposób przesądzony z góry).

Davies podkreśla, że jednym ze sposobów na wyobrażenie sobie powstania życia w skutek „eksploracji stanów” jest ujrzenie go jako szerokiego

¹⁹⁶¹ Por. tamże, s. 11.

¹⁹⁶² Por. tamże.

drzewa decyzyjnego stanów (kwantowego lub klasycznego)¹⁹⁶³. Korzeń drzewa może odpowiadać prostemu i łatwemu do sformułowania stanowi wyjściowemu, który może następnie ewoluować w jakikolwiek dalszy stan, korzystając z szerokiego wachlarza możliwości. Można to przedstawić w formie drzewa stanów rozwidlającego się wielokrotnie na rosnącą liczbę gałęzi, gdzie każda gałąź symbolizuje możliwą fizyczną ścieżkę przez stan przestrzeni, prowadzącą od stanu wyjściowego. Stany o wysokiej złożoności są przedstawione jako gałęzie na szczycie drzewa, a podzbiór tych gałęzi reprezentuje kwantowy replikator albo jakiś inny stan, który możemy określić jako życie, albo rodzące się życie. Zdaniem autora zagadka genezy życia polega na tym, w jaki sposób stan wyjściowy prosty „odnajduje” jedną z niezmiernie rzadkich gałęzi odpowiadających życiu. Porównano kwantowe i klasyczne przeszukiwanie drzewa decyzyjnego i odkryto, że w pewnych okolicznościach poszukiwanie kwantowe jest znacznie szybsze niż poszukiwanie klasyczne. W ocenie brytyjskiego fizyka tego modelu nie można jednak natychmiastowo zastosować do problemu biogenezy, ponieważ kwantowa koherencja nie może być utrzymana dłużej niż przez krótką sekwencję interakcji w żadnym prawdopodobnym prebiotycznym układzie fizycznym. Pomimo tego jako przykład zademonstrowano, że kwantowa koherencja powyżej okresu pikosekundy jest możliwa i prowadzi do olbrzymiego zwiększenia szybkości przekształceń w określone stany, inaczej trudne do osiągnięcia.

Brytyjski przyrodnik zauważa, że nasza niewiedza dotycząca ścisłej natury kwantowego replikatora czyni prawie niemożliwe oszacowanie prawdopodobieństwa, jaką formę przybierze produkt finalny kwantowego poszukiwania¹⁹⁶⁴. Można jednak poczynić pewne spostrzeżenia odnoszące się do kwantowego przyspieszenia. Jeśli replikator albo inna kwantowa struktura na drodze do niego może być opisana jako lokalne minimum powierzchni energii, a formacja tego nieznanego systemu jest pokrewna fazie przekształcenia, wtedy mechanizmy kwantowe są zdolne do olbrzymiego zwiększenia prawdopodobieństwa zajścia przekształcenia dzięki umożliwieniu tunelowania przez stosowną barierę potencjalną w powierzchni energii. Prawdopodobny model biogenezy ukazywałby więc przekształcenie fazowe analogicznie do nukleacji bąbelkowej w kwantowej teorii pola, gdzie nukleowany stan niskiej energii stanowi zbiór replikatorów wchodzących w interakcje (duży zbiór zajmujący mezoskopową przestrzeń skondensowanego systemu materialnego). Wytworzyłyby to kwantową wersję koncepcji Kauffmana,

¹⁹⁶³ Por. tamże, s. 12.

¹⁹⁶⁴ Por. tamże.

dotyczącej autoanalitycznej sieci molekuł. Po drugie, jeśli jest ustalone z góry, że „rozwiązaniem” kwantowego „poszukiwania” jest kwantowy replikator i jeśli system nie ulega dekoherencji szybciej niż trwa replikacja, wtedy zachowanie replikatora powinno przypominać rezonans kwantowy i w związku z tym zwiększać prawdopodobieństwo przekształcenia do stanu replikatora.

Przy ujmowaniu życia w kategoriach informacyjnych istotne jest, jak zaznacza Davies, że tak długo, jak informacja jest replikowana, nie są replikowane struktury, w które się ona wciela¹⁹⁶⁵. W przypadku znanego, opartego na DNA życia informacje reprezentowane przez pary zasad sekwencji i same pary zasad są replikowane razem. Zatem replikacja informacji jest związana z replikacją struktur, lecz na poziomie kwantowym istnieją jeszcze inne możliwości. Davies rozważa przykład automatu komórkowego, taki jak „Gra w życie”. W tym systemie grupa pięciu zgrupowanych komórek może przyjąć formę zwaną gliderem. Glider porusza się w sieci komórek jako koherentny obiekt (w klasycznym sensie), a zatem przechowuje informacje. Chociaż poszczególne komórki są włączane i wyłączane, to zachodzi to w sposób, który zachowuje ogólny schemat. Powstanie informacji biologicznej może mieścić się w tych kategoriach (tworząc kwantowy automat komórkowy). Możliwy jest skondensowany układ materii, w którym schemat wzbudzenia albo schemat spinów lub jakaś inna kwantowa zmienna może wywoływać przekształcenia w sąsiadującym stanie kwantowym w sposób, który zachowuje schemat wysokiego prawdopodobieństwa, ale „zaraża” wzbudzeniem albo spinem przyległe atomy. „Pakiet informacji” byłby zatem zachowany i przekazywany dalej, aż napotkałby odpowiednie otoczenie kwantowe, w którym zacząłby replikować. Wtedy dwa pakiety informacji rozprzestrzeniłyby się poza regionem interakcji. Kwantowe fluktuacje zachodzące przy procesie krzewienia i replikacji prowadziłyby w sposób naturalny do „mutacji” i darwinowskiej konkurencji pomiędzy rywalizującymi pakietami informacji.

Zdaniem Daviesa nierozwiązana kwestia dotycząca replikacji to zagadnienie czasu i choreografii¹⁹⁶⁶. W najprostszym szablonowym układzie formowanie par zasad zachodzi przy losowym dostępie do molekularnych komponentów i posiada tempo zdeterminowane przez wolniejszy z dwóch procesów: czas reakcji dla pary wiązań lub czas dyfuzji odpowiadającej cząsteczkowym lub atomowym budulcom. W prawdziwej replikacji DNA łączenie się par zasad jest nieporównywalnie bardziej wydajne i szybsze,

¹⁹⁶⁵ Por. tamże, s. 13.

¹⁹⁶⁶ Por. tamże.

ponieważ jest zarządzane przez dużą i złożoną polimerazę o skomplikowanych stanach wewnętrznych. Znamy niewiele konkretów dotyczących tej wewnętrznej aktywności replikazy. Davies snuje przypuszczenie w odniesieniu do jej funkcji, że oprócz normalnego obniżania barier potencjału umożliwiającego kwantowe tunelowanie (a wtedy proces akceleracji), replikaza bierze również udział w określonej liczbie choreografii, aby upewnić się, że odpowiednie elementy znajdują się w odpowiednim czasie na właściwym miejscu¹⁹⁶⁷.

W konkluzji Davies stwierdza, że biologia kwantowa pozostaje kwestią nierozstrzygniętą z powodu braku dowodów¹⁹⁶⁸. Istnieje wiele sugestywnych eksperymentów i linii argumentacji wskazujących, że niektóre funkcje biologiczne działają w pobliżu lub wewnątrz kwantowego reżimu, jednak jak dotąd żaden jednoznaczny przykład działania efektów kwantowych w kluczowych procesach biologicznych nie został przedstawiony. Centralną kwestią jest przeciwstawienie koherencji dekoherencji (utrata/brak spójności), co z kolei rodzi zasadnicze koncepcyjne pytanie: Jeśli efekty kwantowe odgrywają ważną rolę w życiu, wówczas (przynajmniej w niektórych procesach) czas dekoherencji musiałby trwać znacznie dłużej niż sugerują to naiwne obliczenia środowiska termicznego. Z drugiej strony szybka dekoherencja jest niezbędna do nadania cząsteczce prawidłowo określonego kształtu trójwymiarowego. Klasyczna geometria i topologia mają znaczenie zarówno dla pozycyjnego przechowywania informacji (na przykład genetyka), jak również szablonowania funkcji (na przykład replikacja). Wydaje się więc, że zarówno szybka dekoherencja, jak i długotrwała spójność mogą współistnieć w obrębie ważnych mechanizmów życia. Należałoby się tego spodziewać po każdym wystarczająco złożonym systemie molekularnym, jednak wyjaśnienie tego „pokojowego współistnienia” oraz sposób, w jaki przyroda wykorzystuje koherencję i dekoherencję, powinny być traktowane jako priorytet w dalszych badaniach nad znaczeniem mechaniki kwantowej w poznawaniu sekretów życia. Charakterystyka bioukładów jako procesorów informacyjnych otwiera drogę do przetwarzania przez nie informacji kwantowej¹⁹⁶⁹. Odkrycie drogi od nieżycia do życia może zostać rozszerzone poprzez potraktowanie pochodzenia życia nie tyle jako procesu chemicznego, co pojawienia się specyficznego, zakodowanego systemu przetwarzającego informację z niespójnego środowiska molekularnego¹⁹⁷⁰. Kompleksowe wyjaśnienie biogenezy musi uwzględniać ten programowy aspekt. Postępy

¹⁹⁶⁷ Por. tamże, s. 13–14.

¹⁹⁶⁸ Por. tenże, *Does quantum mechanics play...*, s. 77.

¹⁹⁶⁹ Por. tamże, s. 77–78.

¹⁹⁷⁰ Por. tamże, s. 78.

w dziedzinie kwantowej teorii informacji obiecują postawienie tego problemu w zupełnie nowym świetle i mogą wskazać drogę do decydującego przełomu w wyjaśnieniu jednej z największych tajemnic nauki.

Seth Lloyd, amerykański fizyk, przekonuje, że mechanika kwantowa ma dwie cechy, które są istotne w zagwarantowaniu powstawania złożonych systemów takich jak życie¹⁹⁷¹. Pierwszą z nich jest nieciągłość, która oznacza, że dowolny skończony układ kwantowy o ograniczonej energii ma skończoną liczbę rozpoznawalnych stanów. Druga cecha to losowość, zgodnie z którą wyniki niektórych zdarzeń kwantowych są z natury probabilistyczne. Lloyd pokazuje, że obie te cechy oznaczają razem, że układy kwantowe muszą rodzić złożone zachowania. Píše: „Będąc cyfrowy, wszechświat może być traktowany jako gigantyczny procesor informacji: w jego najbardziej mikroskopowych skalach sprowadza się do przetwarzania bitów. Wszechświat oblicza. Obliczeniowy charakter wszechświata jest odpowiedzialny za generowanie struktur – galaktyk, gwiazd, planet, ludzi, bakterii – jakie widzimy wokół nas [...]. Ponieważ jest probabilistyczny, obliczeniowy wszechświat jest efektywnie programowany przez przypadkowe zdarzenia kwantowe, zwane fluktuacjami kwantowymi. Zdarzenia te »wstrzykują« losowe bity do działania wszechświata: generują one zmienność. To właśnie ta zmienność, przetwarzana przez trwającą obliczeniowość wszechświata, jest odpowiedzialna za złożoność otaczających nas struktur”¹⁹⁷².

Autor rozważa konsekwencje nieciągłości¹⁹⁷³. Wszechświat jest cyfrowy. Jednostką informacji cyfrowej jest bit. Bit stanowi różnicę między dwoma alternatywami: „tak” lub „nie”, „prawda” lub „fałsz”, „0” lub „1”. Cyfrowy charakter mechaniki kwantowej jest wszechobecny na poziomie mikroskopowym. Bity są wszędzie: spin elektronu lub polaryzacja fotonu rejestrują bity kwantowe, czyli „kubity”. Interakcje pomiędzy tymi bitami pozwalają zaistnieć mikroskopowej dynamice, jaką są zasadniczo obliczenia. Obliczeniowa zdolność wszechświata na jego najbardziej mikroskopowym poziomie jest kluczowym elementem spontanicznego powstania złożoności. Wszystko, co realizuje obliczenia, może być zaprogramowane tak, aby wytwarzać strukturę o dowolnym stopniu złożoności. Cyfrowy charakter mechaniki kwantowej powoduje, że wszechświat prowadzi efektywne obliczenia nie tylko na jego najbardziej mikroskopowym poziomie, ale także w większej skali¹⁹⁷⁴. Kwantowa natura wszechświata zakłada, że w każdej

¹⁹⁷¹ Por. S. Lloyd, *Quantum mechanics and emergence* [w:] A.K. Pati, P.C.W. Davies, D. Abbott (eds), *Quantum aspects of life*, s. 19.

¹⁹⁷² Tamże.

¹⁹⁷³ Por. tamże, s. 20.

¹⁹⁷⁴ Por. tamże.

skali energii spektrum cząstek elementarnych jest skończone. Z tych cząstek elementarnych zaledwie kilka (protony, neutrony, elektrony, fotony) jest wystarczająco długowiecznych i posiadających wystarczająco silne interakcje, aby móc odgrywać znaczącą rolę w skalach energii zaangażowanych w codziennym życiu. Ta niewielka liczba cząstek elementarnych może łączyć się ze sobą celem wytworzenia większego, acz skończonego zbioru prostych związków chemicznych. Podobnie jak nieliniowe oddziaływania pomiędzy cząstkami elementarnymi umożliwiają im przetwarzanie informacji w odpowiedni sposób, tak oddziaływania pomiędzy związkami chemicznymi pozwalają im wykonywać ten sam rodzaj logicznych operacji przeprowadzanych przez komputery cyfrowe. Lloyd dowodzi, że za sprawą prowadzenia obliczeń, reakcje chemiczne spontanicznie dają początek złożonym zachowaniom takim jak życie¹⁹⁷⁵. „Jak i gdzie – pisze – dokładnie powstało życie, pozostaje niewyjaśnione. Niemniej, gdy coś ma charakter obliczeniowy, nie powinniśmy być zaskoczeni, że będzie dążyć do powstania samoreprodukujących się struktur chemicznych, które prawdopodobnie stanowiły podstawę protożycia. Ponieważ chemia jest cyfrowa, to protożycie – czymkolwiek by ono nie było – odziedziczyło swoją cyfrową specyfikę po chemii. Z czasem jego potomkowie odziedziczyli wspaniałą strukturę cyfrową, jaką jest kod genetyczny: jedna para zasadowa, dwa bity”¹⁹⁷⁶.

Lloyd zwraca uwagę na probabilistyczny charakter wszechświata¹⁹⁷⁷. Mimo że wiele procesów w mechanice kwantowej ma charakter deterministyczny, tak jak duża część procesów obliczeniowych, niektóre zdarzenia kwantowe są z natury losowe, niepewne¹⁹⁷⁸. Najbardziej znanym z tych zdarzeń są wyniki pomiarów¹⁹⁷⁹. Autor rozważa kilka przykładów probabilistycznych zdarzeń kwantowych. Układy kwantowe są cyfrowe. Przykładowo polaryzacja fotonów ma dwa rozróżnialne stany, które reprezentują bit. Jeden z tych stanów może odpowiadać polom elektromagnetycznym fotonu poruszającego się w przód i w tył (mówi się wtedy, że taki foton jest poziomo – horyzontalnie – spolaryzowany), nazywa się wtedy ten stan „zerowym”. Drugi stan odpowiada polom elektromagnetycznym fotonu, który porusza się w górę i w dół (wówczas mówi się, że taki foton jest pionowo – wertykalnie – spolaryzowany), nazywamy go wówczas „jedynkowym”. „Takie spolaryzowane fotony – pisze Lloyd – są łatwe do wytworzenia: wystarczy przepuścić zwyczajne światło, które zawiera oba rodzaje fotonów,

¹⁹⁷⁵ Por. tamże.

¹⁹⁷⁶ Tamże.

¹⁹⁷⁷ Por. tamże.

¹⁹⁷⁸ Por. tamże, s. 20–21.

¹⁹⁷⁹ Por. tamże, s. 21.

przez polaryzacyjne soczewki naszych okularów przeciwsłonecznych. Pionowe fotony przejdą, a poziome odbiją się. Ponieważ światło odbite od wody lub asfaltu składa się głównie z poziomo spolaryzowanych fotonów, polaryzujące okulary odfiltrowują odbłask. [...] Do zabawy włącza się jednak mechanika kwantowa i fotony mogą być teraz również polaryzowane kołowo (cyrkularnie): ich pola elektromagnetyczne krążą spiralnie, poruszając się z prędkością światła. Co się stanie, gdy weźmiemy taki kołowo spolaryzowany foton i przepuścimy go przez nasze okulary? Wiemy, że okulary zatrzymują poziomo spolaryzowane fotony i przepuszczają spolaryzowane pionowo. Ale co z fotonami spolaryzowanymi kołowo? Okazuje się, że połowa z nich jest przepuszczana, a druga połowa – odbijana. Kiedy taki foton jest transmitowany, jego nowa polaryzacja jest pionowa; kiedy odbijany – jego nowa polaryzacja jest pozioma. To, czy spolaryzowany kołowo foton zostanie przepuszczony, jest czysto losowym zdarzeniem porównywalnym do rzutu monetą. Po przepuszczaniu serii spolaryzowanych kołowo fotonów przez okulary przeciwsłoneczne, otrzymujemy losowe, probabilistyczne wyniki. Jeśli przyjmiemy, że odbicie (refleksja) [...] odpowiada wartości 0, a przepuszczenie (transmisja) [...] odpowiada wartości 1, wówczas za każdym razem, gdy kołowo spolaryzowany foton przechodzi przez okulary, generowany jest nowy losowy bit¹⁹⁸⁰. Proces, na drodze którego mechanika kwantowa generuje nowe losowe bity informacji, nazywa się dekoherencją¹⁹⁸¹. Pomiar generuje dekoherencję, jak robi to wiele innych procesów kwantowomechanicznych (na przykład kwantowy chaos). Zarówno pomiar, jak i chaos mają tendencję do amplifikowania małych i słabych sygnałów, dzięki czemu niewielka fluktuacja kwantowa może wywrzeć ostatecznie duży wpływ na świat makroskopowy. Na podobnej zasadzie – jeśli by prześledzić termiczne i chemiczne fluktuacje energii, temperatury, ciśnienia, liczby cząstek i tak dalej do ich mikroskopowego źródła – okaże się, że takie statystyczno-mechaniczne wahania są w rzeczywistości kwantowo-mechaniczne. Oznacza to, że probabilistyczny charakter mechaniki statystycznej może zostać prześledzony do probabilistycznego charakteru mechaniki kwantowej. Dekoherencja jest wszechobecna. Mechanika kwantowa stale wprowadza do wszechświata nowe losowe bity.

Mechanika kwantowa tworzy cyfrowy świat¹⁹⁸². Lloyd szczegółowo analizuje obliczeniową własność wszechświata. Obliczanie jest procesem bardziej ogólnym i bardziej wszechobecnym niż to, co pojawia się w trady-

¹⁹⁸⁰ Tamże.

¹⁹⁸¹ Por. tamże, s. 22.

¹⁹⁸² Por. tamże.

cyjnym elektronicznym komputerze. Jest to proces, który łączy cyfrowe informacje o zmienności w celu wytworzenia złożoności. Zdolność komputerów do generowania złożoności jest jedną z ich najbardziej fundamentalnych wewnętrznych umiejętności. Komputer jest urządzeniem, które przetwarza informacje w sposób systematyczny. Komputer cyfrowy działa na podstawie informacji cyfrowej, czyli bitów. Praca komputerów sprowadza się do przerzucania bitów. W związku z powyższym naturalne jest uważać sam wszechświat za komputer. Mechanika kwantowa gwarantuje cyfrowy charakter wszechświata, gdzie wszystko składa się z bitów kwantowych, takich jak polaryzacja fotonu. Bity te są stale przerzucane z powodu naturalnej, mikroskopowej dynamiki wszechświata¹⁹⁸³. Ich przerzucanie podlega prawom mechaniki kwantowej. Niektóre „przerzuty” tych kwantowych bitów są deterministyczne, jak ma to miejsce w klasycznym komputerze cyfrowym. Inne są z kolei losowe, jak wtedy, gdy nasze okulary przeciwsłoneczne odbijają lub przepuszczają spolaryzowany kołowo foton.

Lloyd przypomina, że obliczeniowa natura wszechświata nie jest radykalnym odkryciem XXI wieku¹⁹⁸⁴. W rzeczywistości idea wszechświata polegająca na rejestracji i przetwarzaniu informacji sięga XIX wieku. W drugiej połowie XIX wieku James Clerk Maxwell, Ludwig Boltzmann i Josiah Willard Gibbs odkryli wzór matematyczny entropii ujęty w kategoriach ruchu atomów i cząsteczek. Formuła ta stwierdzała, że entropia jest proporcjonalna do liczby bitów informacji zarejestrowanych przez mikroskopowe stany atomów i cząsteczek. Każdy atom niesie ze sobą niewielką liczbę bitów informacji. Za każdym razem, gdy dwa atomy zderzają się ze sobą, te bity są przerzucane i przetwarzane. Maxwell, Boltzmann i Gibbs wraz z ich następcami z powodzeniem wykorzystywali cyfrową naturę wszechświata, aby analizować zachowania aglomeracji atomów i cząstek elementarnych. Lloyd używa tej właściwości do przeanalizowania tworzenia się struktur i złożoności we wszechświecie. W celu przeprowadzenia tej analizy wyjaśnia najpierw samo pojęcie obliczeń cyfrowych. Rozpoczyna od rozważenia koncepcji programu. Program składa się jego zdaniem z ciągu instrukcji, które mówią komputerowi, co ma robić. Innymi słowy, program jest sekwencją bitów, którym komputer nadaje znaczenie¹⁹⁸⁵. W komputerze cyfrowym każda instrukcja sama w sobie zazwyczaj ma proste znaczenie, lecz wiążąc ze sobą wiele prostych instrukcji, wykonywane mogą być arbitralnie złożone operacje¹⁹⁸⁶. Autor dowodzi, że fluktuacje kwantowe pro-

¹⁹⁸³ Por. tamże, s. 23.

¹⁹⁸⁴ Por. tamże.

¹⁹⁸⁵ Por. tamże, s. 23–24.

¹⁹⁸⁶ Por. tamże, s. 24.

gramują wszechświat. Oznacza to, że losowe wyniki zdarzeń kwantowych, takie jak refleksja lub transmisja fotonu, mogą wprawiać w ruch sekwencje dalszych przerzutów bitów. To, w jaki sposób kwantowe fluktuacje programują wszechświat, zależy od praw mechaniki kwantowej. „Załóżmy na przykład – pisze Lloyd – że w wyniku fluktuacji kwantowej spolaryzowany pionowo foton przechodzi przez nasze okulary przeciwsłoneczne i jest wchłaniany przez oko, powodując propagację sygnału przez nerw wzrokowy do mózgu. Nasz mózg interpretuje ten sygnał jako wskazanie obecności ryby tuż pod powierzchnią wody, które następnie motywuje nas do rzutu ościenia w jej kierunku. Co oznacza ten foton? W tym konkretnym przypadku oznacza obiad!”¹⁹⁸⁷

Komputery takie jak Mac i PC mają szczególną funkcję: są uniwersalnymi komputerami cyfrowymi¹⁹⁸⁸. Lloyd precyzuje, że uniwersalny komputer cyfrowy to taki, który może być zaprogramowany tak, aby symulować operację innego komputera cyfrowego. Oznacza to, że uniwersalny komputer cyfrowy może mieć sekwencję instrukcji, która pozwala mu na wykonywanie takiej samej sekwencji operacji, jaką wykonuje każdy komputer cyfrowy. Znany przykładem uniwersalności obliczeniowej jest fakt, że program, który działa na jednym komputerze, można przełożyć na wersję programu, która będzie operacyjna na innym komputerze. Program Microsoft Word można uruchomić zarówno na komputerze typu Mac, jak i PC. Amerykański fizyk przekonuje, że również wszechświat jest uniwersalnym komputerem. Materia może być skonfigurowana tak, aby prowadzić obliczenia. Wystarczy zaprogramować ją, aby naśladowała komputer typu Mac lub PC. Sam wszechświat jest uniwersalnym komputerem o najbardziej mikroskopowych poziomach. Atomy i cząstki elementarne mogą zostać zaprogramowane do wykonywania dowolnych cyfrowych obliczeń poprzez rzucenie na nie światła w odpowiedni sposób. Wszechświat jest nie tylko uniwersalnym komputerem, lecz także może wykonywać tego typu uniwersalne obliczenia na najwyższym poziomie mikroskopowym. Układ wcale nie musi być złożony, aby być uniwersalnym komputerem cyfrowym¹⁹⁸⁹. Prawa fizyki są proste, a mimo to leżą u podstaw uniwersalnych cyfrowych obliczeń. Wiele prostych i rozbudowanych układów, takich jak jednolite matryce bitów o nieskomplikowanych zasadach wzajemnych interakcji, jest obliczeniowo uniwersalnych.

Wszechświat to uniwersalny komputer, który jest efektywnie programowany przez losowe fluktuacje kwantowe¹⁹⁹⁰. Autor w tym punkcie zadaje

¹⁹⁸⁷ Tamże.

¹⁹⁸⁸ Por. tamże.

¹⁹⁸⁹ Por. tamże, s. 25.

¹⁹⁹⁰ Por. tamże.

pytanie o prawdopodobieństwo faktu, że wszechświat, poczynszy od prostego stanu, wytworzył tak złożone zachowania? Zagadnieniem tym zajmuje się gałąź matematyki – algorytmiczna teoria informacji¹⁹⁹¹. Centralną ilością w algorytmicznej teorii informacji jest algorytmiczna treść (zawartość) informacyjna¹⁹⁹². Algorytmiczna treść niektórych struktur jest równa długości najkrótszego programu komputerowego, zapisanego w odpowiednim języku komputerowym, który instruuje komputer do wytworzenia danej struktury. Wiele uniwersalnych komputerów ma bardzo prostą strukturę¹⁹⁹³. Oznacza to, że tylko krótki program jest wymagany, aby komputer mógł symulować inne komputery. Losowo zaprogramowany, uniwersalny komputer ma wysokie prawdopodobieństwo generowania różnego rodzaju innych uniwersalnych komputerów. Te komputery z kolei mają wysokie prawdopodobieństwo generowania kolejnych i tak dalej. Tego typu gałęziowa struktura obliczeniowa jest znanym elementem naszego wszechświata. Prawa fizyki „dyrygują uniwersalną komputacją” w jej najbardziej mikroskopowej skali, czyli na poziomie praw cząstek elementarnych. Komputery kwantowe stanowią wyraz tej najbardziej mikroskopowej mocy obliczeniowej. Nie jest więc zaskoczeniem, że wszechświat – w związku z mikroskopową uniwersalnością obliczeniową – wykazuje obliczeniową uniwersalność na kolejnym poziomie, na którym rządzą prawa chemii. Ta obliczeniowa uniwersalność chemiczna jest wyrażana przez sprzężone i nieliniowe równania reakcji chemicznych, które mogą kodować wszystkie rodzaje procesów obliczeniowych. Podobnie, nie powinno być zaskoczeniem, że prawa chemii pozwalają zaistnieć obliczeniowej uniwersalności na kolejnym poziomie przybierającym postać życia.

Lloyd podkreśla, że życie w swojej ziemskiej formie jest bardzo złożone, niemniej, aby uzyskać proste protożycie, potrzebnych jest tylko kilka funkcji¹⁹⁹⁴. Wszystko, czego wymaga protożycie, to istnienie układów fizycznych, które rozmnażają się z uwzględnieniem zmienności. O ile można by chcieć postawić inne wymagania w zakresie powstania życia, reprodukcja i zmienność wydają się wystarczające. Wielu związkom chemicznym udaje się rozmnażać w kontekście sieci interaktywnych reakcji chemicznych, w których związki chemiczne mogą katalizować lub ulepszać swoją produkcję jako część reakcji z innymi związkami¹⁹⁹⁵. W ramach procesów naturalnych reakcji chemicznych fluktuacje kwantowe produkują zmienność wyj-

¹⁹⁹¹ Por. tamże, s. 25–26.

¹⁹⁹² Por. tamże, s. 26.

¹⁹⁹³ Por. tamże, s. 27.

¹⁹⁹⁴ Por. tamże.

¹⁹⁹⁵ Por. tamże, s. 28.

ściowych danych reakcji chemicznych. Gdy tylko któraś z tych autokatalitycznych substancji wytworzy odmianę samej siebie (również autokatalityczną), rodzi i napędza się życie. Warianty, które są bardziej efektywne w wytwarzaniu swoich kopii, stają się bardziej powszechne w populacji chemicznej. Warianty, które są bardziej efektywne w swoich interakcjach z innymi związkami chemicznymi, również utrzymują się przy życiu, by rozmnożyć się kiedy indziej. Przypuszcza się, że protożywe substancje istniejące w ramach autokatalitycznych zbiorów były niegdyś znacznie prostsze od znanego obecnie życia. Badacz w następujących słowach streszcza swoją kwantową perspektywę wszechświata i życia: „Mechanika kwantowa czyni świat miejscowo skończonym i nieciągłym, co sprzyja realizacji obliczeń. To właśnie ta zdolność obliczeniowa pozwala generować złożoność wszechświata. Złożoność jednak nie wynika wyłącznie z obliczeń – wymaga także zmienności. Nie istnieje żaden konkretny punkt widzenia mechaniki kwantowej; naturą mechaniki kwantowej jest odzwierciedlanie wszystkich możliwości naraz. Losowy i probabilistyczny charakter mechaniki kwantowej wynika dokładnie z tego, że układy kwantowe eksplorują warianty: Tak i Nie, Prawda i Fałsz, Poziom i Pion lub 0 i 1 jednocześnie. Obliczenia kwantowe, reakcje chemiczne, a także samo życie, są ciągłym odkrywaniem i poszukiwaniem konsekwencji możliwości dopuszczanych przez prawa fizyki. W ostatecznym rozrachunku wszystkie detale, jakie widzimy wokół nas – ruchy powietrza i wody, mikroskopowa struktura komórek w liście drzewa – są wynikiem kwantowomechanicznych zdarzeń, które zostały przetworzone przez moc obliczeniową wszechświata. Mechanika kwantowa nadaje przyrodzie cyfrowy charakter, dostarczając jej bitów i przerzuceń bitów, które stanowią istotę wszechświata. Nadając światu jego istotę, mechanika kwantowa wyposaża go następnie w zmienność, będącą przysłowiową solą życia. Rezultatem jest to, co nas otacza”¹⁹⁹⁶.

Jim Al-Khalili, iracko-brytyjski fizyk, kierownik katedry fizyki teoretycznej na Uniwersytecie w Surrey, wraz z John Joe McFaddenem, iracko-brytyjskim biochemikiem wysuwają tezę, że niektóre z głębszych aspektów mechaniki kwantowej mogły podać pomocną dłoń życiu w jego powstaniu z „zupy pierwotnej”¹⁹⁹⁷. Analizują pewien aspekt „zupy pierwotnej” – kroplę cieczy uwięzioną w skalnej jamie¹⁹⁹⁸. Uważają, że kropla ta zawiera pewne protoreplikacyjne struktury – RNA lub polimery aminokwasów, które są na tyle duże, aby móc wytworzyć autoreplikator, jednak znajdują się w niewła-

¹⁹⁹⁶ Tamże, s. 29.

¹⁹⁹⁷ Por. J. Al-Khalili, J. McFadden, *Quantum coherence...*, s. 40.

¹⁹⁹⁸ Por. tamże.

ściwym regionie przestrzeni sekwencyjnej, a więc są niezdolne do rozmnożenia się we własnym zakresie. Przyjmują również, że protoautoreplikatory podlegają pewnemu procesowi mutacji, która zmienia swoją strukturę poprzez standardowe reakcje chemiczne, takie jak rozbijanie i tworzenie wiązań chemicznych. „Gdzieś tam – piszą Al-Khalili i McFadden – w ogromnej przestrzeni struktury chemicznej dostępnych protoautoreplikatorów istnieje prawidłowa struktura rzeczywistego, samoreplikującego się RNA lub peptydu, ale [...] dla ograniczonej liczby protoautoreplikacyjnych cząsteczek staje się to ogromnym problemem poszukiwawczym, który nie może być rozwiązany w żadnym rozsądnym czasie, a przynajmniej nie w systemie klasycznym. Problemem dla systemu klasycznego jest to, że proces mutacyjny tworzenia nowych konfiguracji/struktur jest bardzo powolny i w dodatku ograniczony przez liczbę cząsteczek dostępnych w kontekście dokonywania przeszukania. [...] Przy ograniczonej puli protoautoreplikatorów dostępnych w naszej pierwotnej zupie, biblioteka możliwych struktur tworzonych przez system będzie bardzo mała w stosunku do całkowitej powierzchni struktur, jakie należałoby przeszukać. Czas dostępny dla tego typu przeszukania wynosi oczywiście dziesiątki lub setki milionów lat, przez co niezwykle pożądane byłoby przyspieszenie mechanizmu przeszukiwania”¹⁹⁹⁹. Aby uczynić powyższe poszukiwania bardziej wykonalne, autorzy proponują potraktować bibliotekę struktur w „pierwotnej zupie” jako dynamiczną bibliotekę kombinatoryczną²⁰⁰⁰. Biblioteki kombinatoryczne są powszechnie stosowane w przemyśle farmaceutycznym do identyfikacji nowych związków leczniczych. Dynamiczna chemia kombinatoryczna umożliwia generowanie bibliotek w oparciu o ciągłą, wzajemną wymianę pomiędzy elementami składowymi biblioteki. Odwracalne reakcje chemiczne służą do montażu i spontanicznej interkonwersji bloków budulcowych celem nieprzerwanego generowania nowych struktur. Dynamiczne biblioteki kombinatoryczne są zatem w stanie wytworzyć wszystkie możliwe kombinacje tych bloków, w ramach czasu i środków chemicznych, jakimi dysponują. „Zupa pierwotna” może być więc uważana za dynamiczną bibliotekę kombinatoryczną zdolną do tworzenia nowych struktur poprzez odwracalne procesy, gdzie niektóre z tych nowych struktur mogą ostatecznie stać się autoreplikatorami. Nie ma jednak wystarczającej liczby cząsteczek w dynamicznej „zupie” kombinatorycznej, aby móc znaleźć autoreplikator w obrębie realnych ram czasowych. Autorzy dodają więc do dynamicznej biblioteki kombinatorycznej kolejny mechanizm, za pomocą którego ogniwa w bibliotece są ze sobą powiązane nie

¹⁹⁹⁹ Tamże.

²⁰⁰⁰ Por. tamże, s. 41.

tylko poprzez odwracalne reakcje, ale także poprzez mechanikę kwantową. Kwantowe tunelowanie jest znanym procesem w chemii, gdzie często nadaje mu się inną, bardziej chemiczną nazwę – tautomeryzacja. Wiele związków – na przykład zasady nukleotydowe – znajduje się w mieszaninach powiązanych struktur chemicznych określanych jako tautomery. Tautomeryczne struktury różnią się położeniem protonów w obrębie zasad nukleotydowych, tworząc enolowe lub ketonowe formy baz o różnych właściwościach parowania zasad. Każda cząsteczka zasady DNA nie jest ani w postaci ketonowej, ani enolowej, lecz musi istnieć jako superpozycja obu tych form połączonych przez protonowe tunelowanie²⁰⁰¹. „Wyobraźmy sobie – piszą Al-Khalili i McFadden – że nasza pula to kwantowa, dynamiczna biblioteka kombinatoryczna z wieloma cząsteczkami pojedynczego związku, które mogą istnieć w każdej superpozycji kwantowej wielu stanów tautomerycznych jednocześnie. Jeśli taka superpozycja kwantowa wszystkich możliwych stanów biblioteki kombinatorycznej może być utworzona przed wystąpieniem dekoherencji, wówczas staje się to bardzo skutecznym sposobem poszukiwania prawidłowego stanu, jakim jest stan prostego replikatora”²⁰⁰².

Co się jednak stanie, gdy prawidłowa struktura replikatora zostanie odkryta wskutek podążania dekoherencją? Czy ten wyjątkowy stan nie zostanie utracony zaraz po jego wykryciu, kiedy to funkcja falowa raz jeszcze ulegnie zmianie? Zdaniem autorów odpowiedź brzmi: „nie”²⁰⁰³. Piszą: „Załóżmy, że – po ukształtowaniu się – autoreplikator następnie robi to, do czego posiada unikalną zdolność – powiela się. Dynamika układu ulega wówczas drobnej, acz znaczącej zmianie. W tych warunkach, pole termiczne nie jest jedynym źródłem dekoherencji. Autoreplikacja obejmie cząsteczki prekursorowe w nowo utworzonych replikatorach. W tych okolicznościach autoreplikacja nieuchronnie zbliża system z jego środowiskiem, otoczeniem. W pewnym sensie możliwość samodzielnej replikacji stale bada system pod kątem zdarzeń tunelowych, które mogą tworzyć replikator. Co najważniejsze, badania te nie tylko obserwują, lecz także »wyłapują« stan replikatora ze względu na ich właściwość autoreplikacji”²⁰⁰⁴. Pozostaje jednak kwestia tego, jak długo tak delikatny i złożony stan kwantowy może zostać podtrzymany przy jednoczesnym utrzymaniu dekoherencji na dystans. Al-Khalili i McFadden nie sugerują, że każda cząsteczka wymagająca złożoności będzie za każdym razem badać wszystkie regiony przestrzeni biblioteki kombinatorycznej.

²⁰⁰¹ Por. tamże, s. 42.

²⁰⁰² Tamże.

²⁰⁰³ Por. tamże, s. 44.

²⁰⁰⁴ Tamże.

Będą to robiły tylko te cząsteczki, które są już na tyle blisko stanu replikatora, by być z nim powiązane przez tunelowanie kwantowe protonów lub nawet superpozycje o różnych kształtach. To „kształtowe współlistnienie” jest dobrze znane w wielu dziedzinach fizyki kwantowej. Na przykład w dziedzinie fizyki jądrowej izotop ołowiu ^{186}Pb posiada jądrowy stan przypominający superpozycję trzech różnych kształtów jednocześnie: kulisty, wydłużony i spłaszczony. Nawet w biologii tubuliny białka, które tworzą mikrotubule wewnątrz neuronów, zdają się znajdować w superpozycji dwóch różnych kształtów.

Trzymanie dekoherencji na dystans jest oczywiście trudnym zadaniem w złożonych, ciepłych i wilgotnych warunkach pierwotnej puli, które nie są warunkami, w których można by oczekiwać znalezienia znaczącej koherencji kwantowej²⁰⁰⁵. Istnieje jednakże wiele luk w naszej wiedzy o dekoherencji występującej w złożonych układach. Autorzy powołują się na ostatnie dowody dynamicznego tunelowania wskazujące, że nasze rozumienie koherencji kwantowej w układach dynamicznych jest dalekie od kompletnego²⁰⁰⁶. Ostatnie eksperymenty potwierdzające nadprzewodnictwo w domieszkowanym fulerenie przy 117K dowodzą, że pewne struktury organiczne mogą istotnie wspierać superpozycję kwantową²⁰⁰⁷. Niedawno wykazano również transport ładunków wzdłuż podwójnej helisy DNA przez tunelowanie kwantowe, jak również tunelowanie spójnych protonów w sieci wiązań wodorowych. Wewnątrzcząsteczkowe tunelowanie kwantowe jest odpowiedzialne za właściwości chemiczne w temperaturze pokojowej tradycyjnych związków chemicznych, takich jak benzen, i tautomerycznych postaci związków, takich jak nukleotydy. Mówi się także, że tunelowanie kwantowe elektronów i protonów może brać udział w wielu reakcjach enzymatycznych, zaś tunelowanie protonowe zostało wskazane jako dominujący mechanizm reakcyjny odpowiadający za przyspieszenie wykonywanej przez enzym dehydrogenazy aromatycznej aminy. Al-Khalili i McFadden podkreślają, że jeśli ich propozycja jest poprawna, wówczas trzeba znaleźć jakiś sposób na utrzymanie spójności kwantowej, przynajmniej pod względem biochemicznym (o ile nie biologicznym), jeśli chcemy znaleźć istotne skale czasowe. Istnieją dwa sposoby realizacji tego projektu²⁰⁰⁸. Pierwszym z nich jest osłanianie (*screening*) mające miejsce, gdy interesujący nas układ kwantowy może być utrzymany w izolacji względem swojego (dekoherentnego) otoczenia.

²⁰⁰⁵ Por. tamże.

²⁰⁰⁶ Por. tamże, s. 44–46.

²⁰⁰⁷ Por. tamże, s. 46.

²⁰⁰⁸ Por. tamże.

Obszar reakcyjny otoczony cząsteczką enzymu jest częściowo osłonięty od termicznych interakcji van der Waalsa reszty komórki. Podobnie podwójna spirala owinięta histonami może służyć jako osłona przed dekoherencją dla protonów kodujących w DNA. Druga możliwość dotyczy podprzestrzeni wolnych od dekoherencji. W celu zbudowania komputera kwantowego wiele uwagi poświęcono identyfikacji stopni swobody, które są niezależne od powiązania układu z jego środowiskiem. Paradoksalnie, gdy system bardzo silnie wiąże się ze swoim otoczeniem przez niektóre stopnie swobody, może on skutecznie „zamrozić” pozostałe stopnie swobody poprzez swego rodzaju efekt kwantowy Zenona, umożliwiając utrzymanie się spójnej superpozycji, a nawet splątania.

Konkludując, Al-Khalili i McFadden stwierdzają: „Istnieje oczywiście wiele trudności związanych z tym scenariuszem, ale – jak opisano powyżej – istnieje wiele trudności związanych ze wszystkimi wyjaśnieniami dotyczącymi pochodzenia życia. Jeśli powstanie życia zależało od mało prawdopodobnej sekwencji utrzymania koherencji kwantowej w ramach jakiejś małej pierwotnej puli, mogłoby to stanowić najbardziej prawdopodobny jak do tej pory scenariusz »źródła życia«. Propozycja ta ma jeszcze jedną zaletę, a mianowicie to, że można ją przetestować eksperymentalnie. Jak wspomniano wcześniej, nasza propozycja jest oczywiście ściśle związana z wykonalnością budowy komputera kwantowego i ciężko nam dostrzec, jak zalety tej pierwszej mogą zostać zbadane i przetestowane bez wcześniejszego pełnego zrozumienia możliwości tej drugiej”²⁰⁰⁹.

Współcześni fizycy korzystają z mechaniki kwantowej do zgłębiania języka genetycznego. Poniżej przedstawiono jedno z rozstrzygnięć w tym temacie autorstwa amerykańskiego fizyka Apoorvy D. Patela.

Patel opisuje niektóre z charakterystycznych cech życia z perspektywy teorii informacji²⁰¹⁰. Stwierdza, że życie jest zasadniczo nierównowagowym procesem, najczęściej charakteryzowanym pod kątem dwóch fundamentalnych zjawisk²⁰¹¹. Jednym z nich jest „metabolizm”. Liczne procesy biochemiczne są potrzebne do podtrzymania organizmu żywego i działanie tych procesów wymaga ciągłych dostaw energii swobodnej pobieranej z otoczenia. Drugim zjawiskiem jest „reprodukcja”. Konkretna struktura fizyczna nie jest w stanie trwać wieki ze względu na ciągłe zakłócenia środowiskowe i wynikające z nich szkody. Życie utrwała się więc za sprawą sukcesji pokoleń. Dla amerykańskiego fizyka jest oczywiste, że oba te zjawiska często

²⁰⁰⁹ Tamże, s. 47.

²⁰¹⁰ Por. A.D. Patel, *Towards understanding the origin of genetic languages* [w:] A.K. Pati, P.C.W. Davies, D. Abbott (eds), *Quantum aspects of life*, s. 187.

²⁰¹¹ Por. tamże, s. 188.

wbrew przeciwnościom „coś” utrzymują, chronią i poprawiają. Zastanawia się, czym jest to „coś”, co jest utrzymywane, chronione i poprawiane.

Wszystkie organizmy żywe składają się z atomów uporządkowywanych w różny sposób w procesach biochemicznych²⁰¹². Patel zauważa, że to nie same atomy, lecz ich aranżacje w złożonych cząsteczkach są nośnikiem informacji biochemicznej. W trakcie procesów biochemicznych organizmy żywe wiążą i rozwiązują różne molekuły, zmieniając po drodze atomowe aranżacje. Informacja biochemiczna sprowadza się do wyboru cząsteczek do użycia – gdzie, kiedy i w jaki sposób. Charakterystyka tej informacji, chociaż dość abstrakcyjna, niemniej jest kluczowa dla zrozumienia życia. Na poziomie fizycznym atomy się mieszają, cząsteczki podlegają stałym zmianom, a życie toczy się dalej. Na poziomie abstrakcyjnym manipulacja i zachowanie informacji wymagają budowy złożonych struktur. Informacja nie jest tylko własnością życia, lecz jego podstawą.

Patel podkreśla, że informacja jest rutynowo kwantyfikowana jako entropia możliwych form, jakie może przyjąć komunikat²⁰¹³. To, czego potrzebują jednak organizmy żywe, wymaga nie samej informacji, lecz informacji mającej znaczenie. Losowe rozmieszczenie elementów może posiadać dużą ilość informacji, ale jej praktyczność nie jest wcale oczywista. Cząsteczki życia są przeznaczone do przeprowadzania określonych funkcji i muszą trwać wystarczająco długo, aby mogły zrealizować swoje zadania. Znaczenie informacji biologicznej jest zawarte w chemicznych właściwościach cząsteczek, a odpowiednio stabilne środowisko komórkowe ułatwia kontrolowanie reakcji chemicznych²⁰¹⁴. Zdaniem badacza tym, co wykorzystują organizmy żywe, jest „wiedza”, gdzie: wiedza = informacja + interpretacja²⁰¹⁵. Wiedza musi być przekazywana za pomocą języka. Język wykorzystuje zbiór bloków budulcowych (na przykład litery alfabetu), których znaczenie jest stałe i których bogactwo rozmieszczeń (niezmiennie aperiodyczne) komponuje różne komunikaty. To właśnie połączenie informacji i interpretacji czyni języki użytecznymi w praktyce. Tak więc aby zrozumieć, jak funkcjonują organizmy żywe, należy zdaniem Patela skupić się na odpowiednich językach, których interpretacja pozostaje stała, podczas gdy wszystkie manipulacje przetwarzania informacji podlegają zmianom. Według autora praktyczny język nigdy nie jest skonstruowany w sposób arbitralny i zawsze obejmuje kryteria efektywności. Kryteria te muszą być powiązane z zadaniami, jakie mają być realizowane za pomocą języka. Autor

²⁰¹² Por. tamże.

²⁰¹³ Por. tamże.

²⁰¹⁴ Por. tamże, s. 188–189.

²⁰¹⁵ Por. tamże, s. 189.

dzieli je na dwie kategorie: pierwsza to stabilność znaczenia, to znaczy ochrona przed fluktuacjami powodującymi błędy, a druga to efektywne wykorzystanie zasobów fizycznych, czyli unikanie niepotrzebnego marnowania przestrzeni, czasu, energii i tym podobnych podczas przenoszenia komunikatu. „Obie kategorie – pisze Patel – często narzucają sprzeczne wymagania w stosunku do języka, zaś pytanie, do jakiego trzeba się odnieść, brzmi: czy istnieje optymalny język dla danego zadania i jeśli tak – w jaki sposób można go znaleźć? Z punktu widzenia inżyniera komputerowego pytanie to ma dwie części: oprogramowania (jakie są zadania? jakie są algorytmy?) i sprzętu (jak zadania są fizycznie realizowane?). Jest rzeczą oczywistą, że efektywność języka zależy tak samo od oprogramowania, jak od osprzętowania”²⁰¹⁶.

Amerykański fizyk zauważa, że w analizie złożoności obliczeniowej zasoby przestrzeni i czasu są często stawiane naprzeciw siebie, a algorytmy są klasyfikowane jako wielomian lub brak wielomianu²⁰¹⁷. W kontekście biologicznym względy efektywności nie są jednak takie same. „Czas jest bardzo cenny – pisze – podczas gdy przestrzeń jest w dużej mierze poszerzalna. Bioukłady mogą odczuwać niewielkie różnice w tempie wzrostu populacji i nawet ułamek procenta przewagi wystarcza, by jeden gatunek »wziął górę« nad innym przez wiele kolejnych pokoleń. Zasoby przestrzenne są często marnowane, również celowo. Na przykład: ile nasion produkuje roślina, gdy tylko jedno z nich może zapewnić ciągłość jej linii rozwojowej? Nie można przy tym nie wspomnieć, że to marnotrawstwo prowadzi do konkurencji i darwinowskiego doboru”²⁰¹⁸.

Patel przypomina, że ewolucja, centralny punkt w biologii, była przyczyną wielu kontrowersji głównie dlatego, że jest prawie niezauważalna (ewolucyjne ramy czasowe są rzędami wielkości większymi od czasu życia poszczególnych organizmów)²⁰¹⁹. Ewolucja pozostaje jednak jedyną zasadą naukową zapewniającą ramy, które obejmują wszelkie formy życia – od prostego pochodzenia po niezwykłą różnorodność. Informacja genetyczna stanowi ilościowy fundament ewolucji²⁰²⁰. Badacz przypomina kilka znanych faktów biologicznych dotyczących języki genetyczne²⁰²¹:

1. Języki genów i białek są uniwersalne. Te same 4 zasady azotowe nukleotydów i 20 aminokwasów znajdują zastosowanie w DNA, RNA i biał-

²⁰¹⁶ Tamże.

²⁰¹⁷ Por. tamże.

²⁰¹⁸ Tamże.

²⁰¹⁹ Por. tamże, s. 190.

²⁰²⁰ Por. tamże.

²⁰²¹ Por. tamże, s. 190–191.

kach – począwszy od wirusów i bakterii, kończąc na ludziach. Dzieje się tak pomimo tego, że w żywych komórkach występują także inne zasady nukleotydowe i aminokwasy. Jasno wynika z tego, że ma tu miejsce wybór konkretnych języków.

2. Informacja genetyczna jest kodowana w pobliżu granicy kompresji danych i maksymalnego pakowania. Oznacza to, że ma miejsce optymalizacja przechowywania informacji.
3. Ewolucja występuje na drodze losowych mutacji, które są lokalnymi zmianami w sekwencji genetycznej. Niemniej w dłuższej perspektywie tylko niewielka część mutacji ma szansę przetrwać, a dokładniej te z nich, które oferują pewną korzyść dla organizmu. Ten mechanizm optymalizacji jest określany mianem darwinowskiego doboru naturalnego.

Na przestrzeni lat podejmowano się wielu prób konstrukcji ewolucyjnych scenariuszy, które mogłyby wytłumaczyć powszechność języków genetycznych²⁰²². Patel dzieli je na dwie kategorie. Pierwsza z nich to hipoteza „zamrożonego wypadku”, czyli tego, że język jakoś powstał i stał się tak ważną częścią maszynerii życia, że wszelkie zmiany w nim byłyby bardzo szkodliwe dla organizmów żywych. Wymaga to, by narodziny mechanizmu genetycznego były wysoce niezwykle wydarzeniem, bez wystarczającego czasu na zbadanie innych możliwości. W tym gotowym rozwiązaniu nie ma zbyt wiele miejsca na analizę. Autor nie podpisuje się pod tym scenariuszem, opowiadając się zamiast tego za drugą kategorią, którą jest tak zwana hipoteza „optymalnego rozwiązania”. Zgodnie z nią język nabył swoją obecną formę metodą prób i błędów i pozostał w niej, ponieważ wszelkie zmiany mogłyby uczynić przetwarzanie informacji mniej konkurencyjnym. Tutaj wymaga się, by ewolucja mechanizmu genetycznego miała odpowiednio duży zakres, by móc generować wiele możliwości, gdzie w późniejszych sporach konkurencyjnych między tymi możliwościami górę bierze optymalne rozwiązanie. Patel zauważa, że istnienie mechanizmu optymalizującego nie czyni jednoznacznym wyboru między tymi dwoma kategoriami²⁰²³. „Powodem jest – pisze – to, że optymalizacja obejmująca wiele parametrów ma dużą liczbę minimów i maksimów, a proces optymalizacji polegający na samych lokalnych zmianach często zostaje »uwięziony« w lokalnych minimach skalowanej wielokrotności bez osiągnięcia sumarycznego optimum. W takich sytuacjach warunki początkowe i historia ewolucji stają się kluczowe w podejmowaniu decyzji o wyniku tego procesu i zazwyczaj to tam wyłania się kilku odizolowanych, przetrwałych kandydatów. Sumarycznie opty-

²⁰²² Por. tamże, s. 191.

²⁰²³ Por. tamże.

malne rozwiązanie jest oczywiście prostsze do osiągnięcia, gdy liczba lokalnych minimów jest mała i/lub zakres zmian wstępnych jest duży. Zakres optymalizacji jest więc kontrolowany zasadniczo przez stosunek czasu dostępnego na poszukiwanie różnych możliwości do czasu tranzycji pośród nich. Aby mechanizm genetyczny mógł osiągnąć swoją optymalną formę, różnorodność możliwości wypłuta przez „zupę pierwotną” musiała mieć prostego i szybkiego zwycięzcę²⁰²⁴. Autor precyzuje, że procedura optymalizacji wymaga procesu zmian i procesu doboru²⁰²⁵. Pierwszy z nich jest wewnętrzny, a drugi zewnętrzny, przy czym oba zachodzą na różnych poziomach w biologii. Zmiany są mutacjami, które zachodzą zasadniczo losowo na poziomie genetycznym. W ten sposób opisywany jest genotyp. Wybór odbywa się pod wpływem presji środowiskowych na poziomie całych organizmów i nie jest on wcale losowy, a raczej motywowany krótkoterminowym przetrwaniem. W ten sposób opisywany jest fenotyp. W ocenie autora istnieją dobre powody, by sądzić, że prymitywne organizmy żywe były jednokomórkowcami bez jądra, posiadającymi małe genomy i prosty mechanizm komórkowy. W takich układach poziomy genotypu i fenotypu były do siebie zbliżone, przez co wczesną ewolucję można uznać za problem bezpośredniej optymalizacji.

Dla amerykańskiego fizyka oczywiście jest, że ewolucja stopniowo odkrywała wyższe poziomy mechanizmów komunikacyjnych, przy czym zasięg komunikacji poszerzył się zarówno w przestrzeni, jak i czasie²⁰²⁶. Kontakt fizyczny się zmniejszył, pobór wzrósł, powstały formy zwięzłego języka i wypracowane zostały złożone mechanizmy translacyjne²⁰²⁷. Bardziej interesujący dla autora jest sposób, w jaki to wszystko zostało osiągnięte, gdzie kooperacja stopniowo zastępowała konkurencję. Przekonuje on, że nie jest to sprzeczne z doborem darwinowskim. Poziom fenotypu został przeniesiony wyżej, a składniki fenotypu są dziś znacznie bardziej skłonne do współpracy niż rywalizacji. Sformułowaniem matematycznym leżącym u podstaw tego zachowania są „powtarzane gry” (inaczej „supergry”), bez prognoz, ale z pewną ilością pamięci. Ewolucyjnie użyteczne cechy sformułował Patel następująco:

1. Starsze i niższe poziomy przetwarzania informacji są znacznie lepiej zoptymalizowane od nowszych, wyższych poziomów. Wynika to z faktu, że w procesie optymalizacji niższe poziomy miały mniej możliwości i więcej czasu na decyzję o ostatecznym rozwiązaniu.

²⁰²⁴ Tamże.

²⁰²⁵ Por. tamże, s. 192.

²⁰²⁶ Por. tamże.

²⁰²⁷ Por. tamże, s. 193.

2. Zdolność gromadzenia, wykorzystywania i przekazywania wiedzy wzrosła o rzędy wielkości w toku ewolucji. W dłuższej perspektywie zasięg wiedzy przytłoczy właściwości fizyczne pod kątem decydowania o przystosowaniu do przetrwania.

Wiedza jest istotnym motorem napędowym ewolucji, zapewniając jasny kierunek rozwoju nawet wtedy, gdy cel pozostaje niejasny.

Autor koncentruje się na analizie najniższego poziomu przetwarzania informacji, czyli języków genetycznych²⁰²⁸. Istnieją dwa z nich: język DNA²⁰²⁹ i RNA²⁰³⁰ z alfabetem czterech zasad nukleotydowych oraz język białek z alfabetem dwudziestu aminokwasów. Ich zadania są dość specyficzne i łatwe do zidentyfikowania²⁰³¹:

1. Podstawowym zadaniem DNA i RNA jest sekwencyjny montaż łańcucha bloków budulcowych na górze istniejącego wcześniej szablonu. DNA można nazwać „wyłącznie odczytową pamięcią” organizmów żywych. Gdy nie bierze udziału w procesie replikacji, informacja zawarta w DNA pozostaje beczynna w odizolowanym i chronionym stanie.
2. Białka są strukturalnie stabilnymi cząsteczkami o różnych wymiarach i kształtach oraz o dokładnych lokalizacjach aktywnych grup chemicznych. Pełnią one różne funkcje życiowe na drodze wysoce selektywnego wiązania się z innymi cząsteczkami. Oddziaływania cząsteczkowe są słabe i bardzo krótkie, przez co wiązanie wymaga dopasowania komplementarnych kształtów, to jest mechanizmu zamku i klucza w trzech wymiarach. Białka są tworzone zawsze w razie potrzeby na podstawie informacji zawartych w DNA i ulegają dezintegracji, gdy ich funkcja dobiegnie końca.

Zdaniem Patela identyfikacja tych zadań ułatwia zrozumienie, dlaczego istnieją dwa języki, a nie tylko jeden²⁰³². Pisze: „Pamięć potrzebuje stabilności długoterminowej; z drugiej strony szybka realizacja funkcji jest pożądana i oba języki wymuszają na sprzęcie różne rzeczy. [...] Tak naprawdę nasze komputery elektroniczne dokonują obliczeń za pomocą sygnałów elektrycznych, ale zapisują wyniki na dysku za pomocą sygnałów magnetycznych. Ten pierwszy typ kodowania nadaje się do szybkiego przetwarzania danych, zaś drugi – do ich długotrwałego przechowywania. Oba języki sprzętowe na

²⁰²⁸ Por. tamże.

²⁰²⁹ Kod genetyczny DNA tworzą cztery zasady azotowe: adenina (A), guanina (G), cytozyna (C) i tymina (T). Por. M. Cobb, *Największa tajemnica życia...*, s. 9.

²⁰³⁰ Kod genetyczny RNA został ostatecznie ustalony w 1967 roku. W RNA zamiast tyminy (T) występuje uracyl (U). Por. tamże.

²⁰³¹ Por. A.D. Patel, *Towards understanding the origin...*, s. 193–194.

²⁰³² Por. tamże, s. 194.

szczęście odpowiadają temu samemu binarnemu językowi oprogramowania i są dogodnie tłumaczone za pomocą praw elektromagnetycznych. W przypadku informacji genetycznej oba języki sprzętowe działają na różnych płaszczyznach – DNA jest łańcuchem liniowym, podczas gdy białka są strukturami trójwymiarowymi – wymuszając różność odpowiednich języków oprogramowania i stosunkową złożoność mechanizmu translacyjnego²⁰³³. Patel pragnie znaleźć optymalne języki dla realizacji zadań DNA/RNA i białek²⁰³⁴. W tym celu bada, jakie ograniczenia są nakładane na język celem minimalizacji błędów i minimalizacji zasobów. Minimalizacja błędów nieuchronnie prowadzi do języka cyfrowego, posiadając zestaw wyraźnie rozróżnialnych bloków budulcowych wykonujących nieciągłe operacje. W przypadku nienakładających się na siebie sygnałów niewielkie wahania są interpretowane jako szum i eliminowane z komunikatu przez zresetowanie wartości, natomiast duże zmiany stanowią istotną modyfikację znaczenia wiadomości. Utrata wartości pośrednich nie jest wadą, o ile rzeczywiste zastosowania wymagają jedynie wyników z ograniczonymi błędami. Minimalizację zasobów uzyskuje się, stosując niewielką liczbę bloków budulcowych wykonujących proste i szybkie zadania. Uniwersalny język jest następnie wypracowywany poprzez rozmieszczenie tych bloków na możliwie jak najwięcej różnych sposobów. W tym optymalizacyjnym ćwiczeniu „minimalny język”, czyli język z najmniejszym zbiorem bloków budulcowych dla danego zadania, ma wyjątkowy status²⁰³⁵:

1. Ma największą odporność na błędy, ponieważ nieciągłe zmienne rozmieszczone są tak daleko od siebie, jak tylko jest to możliwe w dostępnym zakresie fizycznych właściwości sprzętowych.
2. Posiada najmniejszy zestaw instrukcji, ponieważ liczba możliwych przekształceń jest automatycznie ograniczona.
3. Może funkcjonować przy dużym zagęszczeniu i szybkiej realizacji zadań, które z nadwyżką nadrabiają głębokość jego obliczeń.
4. Może uniknąć konieczności translacji, stosując proste reakcje fizyczne sprzętu.

Języki genetyczne są niewątpliwie cyfrowe; miało to kluczowe znaczenie w wytworzeniu ewolucji, jaką znamy dzisiaj.

Niektóre wskazówkowe informacje obejmują zdaniem Patela następujące zagadnienia²⁰³⁶:

²⁰³³ Tamże.

²⁰³⁴ Por. tamże.

²⁰³⁵ Por. tamże, s. 194–195.

²⁰³⁶ Por. tamże, s. 195.

1. Język cyfrowy pomaga w utrzymaniu zmienności, natomiast ciągle zmienne wyrównałyby wahania.
2. Ewolucja stanowi konsekwencję małej stopy błędów. Przy zbyt wielu błędach organizm nie będzie w stanie przetrwać, zaś bez mutacji nie będzie ewolucji.
3. Nawet niewielkie zmiany w nieciągłych zmiennych genetycznych generują znaczne zakłócenia w systemie i będą daremne, o ile układ nie może ich tolerować. Często duża liczba próbnych zmienności jest potrzebna, aby znaleźć odpowiednie kombinacje i posiadanie niewielkiej liczby nieciągłych możliwości pomaga. Ciągłe zmienne produkują stopniową ewolucję, która pojawia się w większych skalach fenotypowych, gdy wiele źródeł przyczynia się do uśrednienia konkretnej funkcji.
4. Przy większości próbnych zmienności odrzucanych jako nieproduktywne zmienne cyfrowe pozwalają zaistnieć ewolucji punktowej (takiej, gdzie nagle zmiany przeplatają się z długimi okresami przestoju).

Amerykański fizyk następnie zajmuje się zrozumieniem języka białek. Swoje analizy podsumowuje w formie pytań i odpowiedzi²⁰³⁷:

1. Jaki jest cel języka aminokwasów? Utworzyć cząsteczki białka o różnych rozmiarach i kształtach w trzech wymiarach, zawierające różne grupy chemiczne.
2. Jaka jest minimalna nieciągła geometrii dla projektowania struktur trójwymiarowych? Symplicjalna geometria czworościenna i rombowa siatka. Drugorzędne struktury białkowe (helisy alfa, trójluki, trójkusze) całkiem dobrze wpasowują się w rombowy przekrój.
3. Jakie są najlepsze fizyczne komponenty wykorzystywane do realizacji tej geometrii? Kowalencyjnie związane atomy węgla, a także $N + i H_2O$. Krzem jest bardziej obfity, ale nie może tworzyć struktur aperiodycznych niezbędnych do kodowania języka.
4. Jaki jest wygodny sposób składania tych elementów w pożądaną strukturę trójwymiarową? Syntetyzacja jednowymiarowych łańcuchów polipeptydowych, które przenoszą wiedzę o składaniu trójwymiarowych struktur. Problem upraszcza się wówczas do złożenia łańcuchów jednowymiarowych.
5. Co mogą robić boczne grupy łańcuchów polipeptydowych? Sprzyjają one poszczególnym kierunkom łańcucha polipeptydowego przez wchodzenie między sobą w interakcje. Wypełniają także ubytki w strukturze poprzez różnicowanie swojej wielkości.

²⁰³⁷ Por. tamże, s. 196.

Patel przedstawia kilka faktów na temat łańcuchów polipeptydowych²⁰³⁸:

1. Aminokwasy są łatwo wytwarzane w pierwotnej zupie chemicznej. Istnieją one nawet w obłokach międzygwiazdnych.
2. Aminokwasy są najmniejszymi cząsteczkami organicznymi posiadającymi zarówno grupę kwasową (-COOH) i grupę podstawową (-NH₂). Różnią się one od siebie pod względem różnych grup R, które stają się grupami bocznymi łańcuchów polipeptydowych.
3. Łańcuchy polipeptydowe są produkowane przez polimeryzację aminokwasów dzięki kwasowo-zasadowemu zobojętnianiu.
4. Transformacja łańcuchów polipeptydowych ze złożonych na rozłożone wymaga elastycznych połączeń i słabych, nielokalnych interakcji.
5. Transport polipeptydów przez błony jest skuteczniejszy w stanie rozłożonym niż złożonym, zapobiegając wyciekaniu w międzyczasie innych cząsteczek.

Język strukturalny łańcuchów polipeptydowych stanie się najbardziej uniwersalny, gdy wszystkie możliwe orientacje będą mogły zostać wygenerowane przez każdy segment aminokwasów²⁰³⁹. Nie można osiągnąć tego przez pojedynczą właściwość grup R. Patel zestawia aminokwasy wykorzystywane przez uniwersalny język białek. Dzieli je na kilka kategorii w zależności od właściwości chemicznych grup R, a ich masy cząsteczkowe czyni wskaźnikiem wielkości grup R. Język zagięć i falowań łańcuchów polipeptydowych jest nielokalny, to znaczy orientacja aminokwasów nie tyle jest określana przez samą grupę R, co raczej przez oddziaływania aminokwasów ze wszystkimi swoimi sąsiadami. Mimo to, analizując bazy danych dla białek, można znaleźć prawdopodobieństwa dla każdego aminokwasu w zakresie jego uczestnictwa w specyficznych strukturach drugorzędowych. Rozszyfrowanie rzeczywistych orientacji aminokwasów w białkach jest problemem składania białek. Nawet wówczas szacunkowe liczby obecnych aminokwasów można uzyskać za pomocą jednej „dawki” dodatkowych danych wejściowych. Aminokwasy dzieli się na dwie grupy, w zależności od właściwości odpowiednich dla syntetaz aminoacylo-tRNA (aaRS). W syntezie łańcuchów polipeptydowych cząsteczki tRNA są adapterami, w których jeden koniec jest dopasowany do kodonu genetycznego, a drugi koniec przyłączony do aminokwasu. aaRS są dwujęzycznymi cząsteczkami w mechanizmach translacyjnych, które wiążą odpowiedni aminokwas z tRNA odpowiadającym mu antykodonem. Istnieje unikalny aaRS dla

²⁰³⁸ Por. tamże, s. 196–197.

²⁰³⁹ Por. tamże, s. 197.

każdego aminokwasu, choć kilka różnych cząsteczek tRNA może nieść ten sam aminokwas.

A oto uwagi Patela dotyczące „klasy aminokwasów”²⁰⁴⁰:

1. 20 aminokwasów dzieli się na dwie grupy, po 10 aminokwasów w każdej.
2. Grupy dokonują podziału aminokwasów w taki sposób, że dla każdej właściwości grupy R, większe grupy R odpowiadają klasie I, a mniejsze – klasie II.
3. Przypisywanie aminokwasom klas może być interpretowane jako kod binarny dla wielkości ich grupy R oprócz zapewnienia im klasyfikacji pod względem właściwości chemicznych.
4. Nadany kod binarny ma jednoznaczne znaczenie strukturalne dla pakowania białek. Składanie łańcucha aperiodycznego w zwartą strukturę zawsze pozostawia wnęki o różnych kształtach i rozmiarach. Zastosowanie dużych grup R do wypełnienia dużych ubytków i niewielkich grup R do wypełnienia małych ubytków może wytworzyć zagęszczone, zwarte struktury.
5. Każda klasa zawiera specjalny aminokwas zaangażowany w operacje inne niż lokalne składanie łańcuchów polipeptydowych.

„Powyższe rozważania – pisze Patel – nie mówią nam, która sekwencja aminokwasów będzie prowadzić do budowy łańcucha polipeptydowego. To pozostaje nierozwiązanym aspektem kodowania, jak również właściwości chemicznych. Z drugiej strony wiadomo, że aminokwasy znajdujące się w miejscach aktywnych oraz w punktach końcowych struktur drugorzędowych określają domenę i aktywność białek, podczas gdy aminokwasy w pozostałych regionach pełnią mniej więcej funkcję czasoprzestrzennych wypełniaczy. Wśród tych wypełniaczy można dokonać wielu substytucji, które prawie w ogóle nie wpłyną na funkcjonowanie białka – w istocie analiza białkowych baz danych zrodziła probabilistyczne tabele substytucyjne dla aminokwasów. Musimy w jakiś sposób włączyć tę funkcję do naszego pojmowania strukturalnego języka białek tak, abyśmy mogli wykroczyć poza pojedyncze litery, słowa i zdania. Potrzebna jest nowa perspektywa i być może poniższy akapit posłuży za wskazówkę do osiągnięcia tego. Postaw sobie wyzwanie i przeczytaj go najszybciej jak potrafisz, nawet jeśli nie jesteś szczególnie dobrze zaznajomiony z krzyżówkami! Pisany angielski i białka są nielokalnymi językami. Ewolucji nie jest mimo wszystko obce stosowanie wartościowej idei – tutaj pewnej ilości równoległego i rozproszonego przetwarzania – raz po raz w kółko”²⁰⁴¹.

²⁰⁴⁰ Por. tamże, s. 197–200.

²⁰⁴¹ Tamże, s. 200.

Patela intryguje możliwość zrozumienie DNA – próbuje znaleźć minimalny język DNA i RNA. Swoją analizę podsumowuje w formie pytań i odpowiedzi²⁰⁴²:

1. Na czym polega zadanie przetwarzania informacji realizowane przez DNA? Na sekwencyjnym montażu uzupełniającej kopii na wierzchu wcześniej istniejącego szablonu poprzez wyniesienie pojedynczych zasad nukleotydowych z nieposortowanego zespołu. To samo zadanie jest realizowane przez matrycowe RNA (mRNA) w zespole łańcuchów polipeptydowych, lecz tam przebiega w etapach obejmujących trzy nukleotydy (triplet kodonów).
2. Jaki jest optymalny sposób realizacji tego zadania? Algorytm Grovera, który używa binarnych kwerend i wymaga dynamiki falowej. Optymalizuje on liczbę zapytań, zapewniając prędkość kwadratową przewyższającą dowolny algorytm Boole'a, niezależnie od wielkości zasobów przestrzennych, z jakich taki algorytm może korzystać. W implementacji fali klasycznej baza danych jest kodowana jako odrębne, falowe N-rodzaje, natomiast w kwantowym kontekście baza danych jest oznaczona przez $N \cdot \log 2$.
3. Jakie są fizyczne składniki potrzebne do realizacji tego algorytmu? System połączonych rodzajów fal, których superpozycja utrzymuje spójność fazową oraz dwie „refleksyjne operacje” (zmiany fazowane w n).

Aby wyjaśnić biologiczną perspektywę i zilustrować minimalistyczne wybory dokonywane przez organizmy żywe, badacz przedstawia kilka faktów na temat biochemicznego procesu składania²⁰⁴³:

1. Zamiast czekać na pojawienie się oczekiwanej złożonej biocząsteczki, o wiele bardziej skuteczne jest dokonanie jej syntetyzacji ze zwykłych, prostych składników.
2. Powinna istnieć wystarczająca liczba wyraźnie rozróżnialnych bloków budulcowych do stworzenia różnorodnych, wymaganych biomolekuł.
3. Bloki budulcowe krążą losowo w środowisku komórkowym, a następnie są pojedynczo pobierane i dodawane do liniowo rosnącego łańcucha polimerowego.
4. Komplementarne parowanie zasad nukleotydowych decyduje o dodaniu właściwego bloku na każdym etapie procesu składania.
5. Parowania zasad są pytaniami binarnymi – albo się tworzą, albo nie. Zaangażowane wiązania molekularne są wiązaniami wodorowymi.

Autor zauważa, że (klasycznie rzecz biorąc) alfabet binarny jest minimalnym alfabetem do kodowania informacji w łańcuchu liniowym, a dwie

²⁰⁴² Por. tamże, s. 201.

²⁰⁴³ Por. tamże, s. 201–202.

zasady nukleotydowe wystarczą do zakodowania informacji genetycznej²⁰⁴⁴. W rzeczywistości nasze komputery cyfrowe kodują wszystkie rodzaje informacji przy użyciu wyłącznie wartości zerowych i jedynkowych²⁰⁴⁵. Alfabet binarny jest najprostszym systemem i tym samym poprzedzałby układ czterech zasad nukleotydowych występujący w przyrodzie²⁰⁴⁶.

Amerykański fizyk stwierdza, że teoria informacji zapewnia potężne ramy dla wydobywania istotnych właściwości złożonych procesów życiowych i następnie analizowania ich w systematyczny sposób²⁰⁴⁷. Najprostsze procesy do zbadania to, według autora, te na najniższym poziomie. „Przeszliśmy długą drogę – pisze – od wczesnych dni informatyki i biologii molekularnej, dzięki czemu możemy dziś prowadzić znacznie bardziej szczegółowe badania. Teorie fizyczne często zaczynają jako teorie efektywne, gdzie predykcje teorii zależą od pewnych parametrów. Wartości parametrów muszą być albo odgórnie przyjęte, albo pochodzić z eksperymentów, efektywna teoria nie jest bowiem w stanie sama w sobie ich przewidzieć. Aby zrozumieć, dlaczego te parametry mają takie, a nie inne wartości, musimy przejść jeden poziom głębiej – zazwyczaj do mniejszych skal. Gdy głębszy poziom redukuje liczbę nieznanych parametrów, uważamy daną teorię za pełniejszą i bardziej zadowalającą. Poziom znajdujący się poniżej konwencjonalnej biologii molekularnej jest utrwalany przez struktury atomowe i dynamikę kwantową, stanowiąc naturalne miejsce do poszukiwania przyczyn stojących za »zamrożonym wypadkiem« życia. W istocie wspaniałe jest to, że na głębszym poziomie istnieją wystarczające składniki, by wyjaśnić »zamrożony wypadek« jako optymalne rozwiązanie. Pierwszą nagrodą wynikającą z tej analizy jest uzyskanie pobieżnego wglądu w to, jak optymalne rozwiązanie zostało odkryte”²⁰⁴⁸.

Patel zauważa, że ewolucja życia następuje poprzez losowe zdarzenia (na przykład mutacje), bez przewidywań i precyzyjnych zasad logiki²⁰⁴⁹. Jest to potężne kryterium przetrwania, w zwykłe niewygodnym i czasami wrogim środowisku, jakie wyznacza kierunek ewolucji. Mimo iż nie do końca rozumiemy, dlaczego organizmy żywe chcą się powielać, mamy zdaniem autora wystarczająco dużo dowodów, aby wykazać, że używają one wszelkich dostępnych zasobów, by to robić. „Ta walka o przystosowanie – pisze – pozwala nam przypisać bazowe wzory do ewolucji – nie zawsze doskonałe,

²⁰⁴⁴ Por. tamże, s. 202.

²⁰⁴⁵ Por. tamże, s. 202–203.

²⁰⁴⁶ Por. tamże, s. 203.

²⁰⁴⁷ Por. tamże, s. 215.

²⁰⁴⁸ Tamże, s. 215–216.

²⁰⁴⁹ Por. tamże, s. 216.

często zmienne, lecz mimo wszystko bardzo praktyczne. Poprzez zrozumienie tych wzorów możemy zawęzić poszukiwania prawdopodobnej drogi ewolucyjnej spośród wielu możliwości. Taka świadomość jest nieoceniona, gdy chcemy ekstrapolować w nieznaną przeszłość z niedoborem bezpośrednich dowodów – czyli dokładnie tak, jak ma to miejsce w przypadku chęci zrozumienia pochodzenia życia, jakim jest ono dzisiaj. Oczywiście, wnioski zyskują na wadze, gdy są poparte symulowanymi eksperymentami”²⁰⁵⁰.

Badacz przekonuje, że liczenie liczby bloków budulcowych w językach DNA i białek oraz znajdowanie w nich wzorców to dopiero początek długiej drogi do opanowania tych języków²⁰⁵¹. Kryteriami doboru naturalnego dla poszczególnych bloków będzie chemiczna prosta i funkcjonalne zdolności. Życie powstało nie tyle ze złożonych oddziaływań chemicznych mających miejsce w „zupie pierwotnej”, co raczej w momencie, gdy wiedza na temat funkcji biomolekuł zaczęła być przekazywana z pokolenia na pokolenie. Ta logika stawia świat RNA przed współczesnym mechanizmem genetycznym. W trakcie ewolucji bardziej wszechstronne strukturalnie polipeptydy, które skutecznie naśladują DNA, przejęły zadanie tworzenia złożonej biochemii, pozostawiając rolę przechowywania pamięci w DNA. „Prace opisane w tym rozdziale – pisze Patel – na pewno umocnią ten punkt widzenia, znajdujący prostszych poprzedników współczesnych języków genetycznych w stereochemicznych interakcjach akceptora tRNA i prostych aminokwasach drugiej klasy. Eksperymentalna weryfikacja tej hipotezy zasadniczo rozwiązałaby tajemnicę translacji, to jest który aminokwas odpowiada któremu kodonowi/antykodonowi. Wówczas bylibyśmy w stanie cofnąć się z naszą analizą dalej w przeszłość – do jeszcze prostszego języka rybozymów – i spróbować na tej podstawie dowiedzieć się, co działo się w świecie RNA”²⁰⁵². Przeciwny kierunek dociekań, to jest budowanie wyrazów i zdań z liter alfabetu stanowi zdaniem Patela coś znacznie więcej niż „teoretyczną przygodę” i jest ściśle związany z tym, co przyniesie przyszłość²⁰⁵³. Píše: „Chcemy zaprojektować biomolekuły realizujące konkretne zadania, co zmusza nas do odkrycia, w jaki sposób funkcje są kodowane w trójwymiarowym procesie składania białek. Jest to żmudne i niełatwe zadanie, obejmujące hierarchiczne struktury i subiektywną zmienność. Pewne wskazówki zdążyły jednak dać już o sobie znać i powinniśmy budować na nich nasze zrozumienie bardziej złożonych procesów życiowych. Możemy czuć niepewność i strach

²⁰⁵⁰ Tamże.

²⁰⁵¹ Por. tamże.

²⁰⁵² Tamże, s. 216–217.

²⁰⁵³ Por. tamże, s. 217.

wobec konsekwencji przebudowy samych siebie, lecz i to byłoby nieodłączną częścią ewolucji”²⁰⁵⁴.

Na życie z podwójnej perspektywy: mechaniki kwantowej i teorii złożoności obliczeniowej patrzy kanadyjski fizyk John Swain. Badacz ten przekonuje, że niektóre z największych odkryć ubiegłego wieku, zarówno fizyki i logiki – mechanika kwantowa i teoria złożoności obliczeniowej – mogą mieć ważny wpływ na nasze pojmowanie niezwykłego zjawiska, jakim jest życie²⁰⁵⁵. Weryfikuje on obawę niektórych przyrodników o to, że życie może nie być zgodne z założeniami mechaniki kwantowej. Rozważa też kwestię, czy od życia można oczekiwać sensownej, możliwej do zbadania definicji. W poszukiwaniu odpowiedzi zwraca się do teorii złożoności obliczeniowej.

Swain podkreśla, że biolodzy nie mają jasnej odpowiedzi na pytanie, co to jest życie²⁰⁵⁶, zaś fizycy i chemicy od dawna bezskutecznie szukają definicji tego fenomenu²⁰⁵⁷. Sam stoi na stanowisku, że zamiast odpowiadać na pytanie, co to jest życie, łatwiej i bezpieczniej jest sprecyzować konkretne cechy, które na ogół utożsamiamy z istotami żywymi²⁰⁵⁸. „*Summa summarum* – pisze – nic nie jest wypisane w kamieniu ani w gwiazdach – definicje są czymś, co tworzymy my sami w czasie, tak więc możemy je przyjmować lub odrzucać na podstawie ich przydatności”²⁰⁵⁹. Aby się o tym przekonać, autor przywołuje prostą, często przytaczaną definicję: żywa istota z założenia potrafi kopiować samą siebie²⁰⁶⁰. Zdaniem Swaina nie może być mowy o identycznych kopiach, gdyż w najlepszym wypadku są one bardzo zbliżone do oryginału. Innymi słowy, oczekiwanie od istot żywych powoływania do życia dokładnych kopii samych siebie jest nierozsądne, gdyż istoty te w rzeczywistości produkują jedynie „w miarę dobre” kopie²⁰⁶¹.

²⁰⁵⁴ Tamże.

²⁰⁵⁵ Por. J. Swain, *Quantum mechanics, computability theory and life* [w:] H.-P. Dürr, F.-A. Popp, W. Schommers (eds), *What is life? Scientific approaches...*, s. 329.

²⁰⁵⁶ Brytyjski matematyk Ian Stewart zauważa, że biolodzy formułują kilka rywalizujących ze sobą wersji definicji życia, ale żadna z nich nie jest w pełni satysfakcjonująca. Pisze: „Na jednym krańcu mamy definicje wymagające istnienia struktur chemicznych opartych na węglu i DNA. [...] Z punktu widzenia matematyki i fizyki życie ziemskie wygląda jak przykład [...] czegoś, co powinno być znacznie bardziej ogólnym *procesem*. Wielu biologów uważa podobnie. Nie odpowiada im definicja życia skupiająca się na tym, z czego jest ono zbudowane. Bardziej odpowiednie i mniej ograniczające wydaje się oparcie jej na tym, co ono robi i jak działa”. I. Stewart, *Matematyka życia. Jak równania pomagają odkrywać tajemnice natury*, tłum. B. Bieniok, E.L. Łokas, Prószyński i S-ka, Warszawa 2014, s. 391–392.

²⁰⁵⁷ Por. J. Swain, *Quantum mechanics, computability...*, s. 329.

²⁰⁵⁸ Por. tamże, s. 330.

²⁰⁵⁹ Tamże.

²⁰⁶⁰ Por. tamże.

²⁰⁶¹ Por. tamże, s. 338.

Kanadyjski fizyk próbuje następnie zmierzyć się z wysuwaną przez niektórych współczesnych mu autorów tezą, że istnieje niewielkie prawdopodobieństwo, by systemy samoreprodukujące się – a tym samym życie – miały rację bytu w świecie opisywanym przez mechanikę kwantową²⁰⁶². Według niego rozwiązania tego problemu nie należy upatrywać w mechanice kwantowej czy nawet ogólnie w fizyce, ale w dziedzinie teorii złożoności obliczeniowej. W związku z tym analizuje programy komputerowe jako modele maszyn lub organizmów, które istnieją w świecie fizycznym. Uzasadnieniem jest to, że działanie dowolnej maszyny lub organizmu może być odwzorowane na komputerze (klasycznym lub kwantowym). Autor deklaruje, że nie rozstrzyga, czy taka symulacja będzie łatwa, czy też nie, ani tego, czy będzie technicznie wykonalna, chce jedynie pokazać, że jest to zasadniczo możliwe. Innymi słowy, w zakresie, w jakim działania organizmów podlegających znanym prawom fizyki są obliczalne, możemy je zastąpić programami komputerowymi.

Swain analizuje pewien zbiór programów L , który ma za zadanie odwzorować istoty żywe zgodnie z jedną z definicji „życia”²⁰⁶³. Mogłoby to być na przykład – jak twierdzi – coś w rodzaju zbioru wszystkich programów, które potrafią wydrukować same siebie ze skończonej liczby błędów i zmian. Przekonuje, że dokładna definicja tego, co jest żywe, jest bez znaczenia²⁰⁶⁴. W teorii obliczeń istnieje bowiem twierdzenie Rice’a, które umożliwia obejście tej kwestii. Zanim je badacz sformułuje, przedstawi kilka niezbędnych do jego rozumienia definicji²⁰⁶⁵:

1. Jeśli dwa programy mają identyczne wyjścia dla identycznych wejść, mówimy o nich, że są równowagowe.
2. Właściwość funkcyjna jest określana jako właściwość, która pozostaje niezmienna dla wszystkich ekwiwalentnych programów. Oznacza to, że właściwość funkcyjna jest własnością algorytmu, a nie jego konkretnej realizacji²⁰⁶⁶.
3. Właściwość jest nazywana nieszablonową, kiedy dotyczy niektórych, nie wszystkich programów.

²⁰⁶² Por. tamże.

²⁰⁶³ Por. tamże.

²⁰⁶⁴ Por. tamże, s. 339.

²⁰⁶⁵ Por. tamże.

²⁰⁶⁶ Autor dla ilustracji odwołuje się do następującego przykładu: program, który wypisuje pierwiastki liczb, może być zapisany na więcej niż jeden sposób – na przykład z różnym wyborem wewnętrznych zmiennych. Można jednak mówić o akcie pierwiastkowania jako czymś, co nie jest zależne od szczegółów zapisu. Należy tylko ocenić program na podstawie tego, co robi lub co możemy wynieść z obserwacji jego działania. Por. tamże.

Mając wyjaśnione powyższe definicje, Swain formułuje twierdzenie Rice’a: nie wszystkie nieszablonowe właściwości funkcyjne są rozstrzygalne. Wyjaśnia je następująco: „Weźmy zbiór wszystkich programów, które są »zamknięte podczas funkcjonowania« w tym sensie, że jeśli pracują – produkują więcej programów, które są w zbiorach, które z kolei będą produkować więcej kolejnych programów i tak dalej. Powinno to stworzyć model zbioru rzeczy tworzących kopie samych siebie, gdzie kopie te są w pewien sposób zmienione (zmutowane), lecz nadal mogą powielać zapoczątkowany schemat. Z drugiej strony przynależność do tego zbioru jest nieszablonową własnością funkcyjną, a tym samym jest nierozstrzygalna”²⁰⁶⁷. Twierdzenie Rice’a mówi więc, że nie istnieje żaden skończony zbiór kroków (etapów w instrukcji), które mogą być zapisane tak, że pozwolą stwierdzić, czy coś jest żywe²⁰⁶⁸.

To, co zaczyna się od obawy, czy życie może być opisane przez mechanikę kwantową, prowadzi autora ostatecznie do podania w wątpliwość tego, czy istnieje definicja życia, która kiedykolwiek nas zadowoli²⁰⁶⁹. Wszelka nieszablonowa próba jest skazana na niepowodzenie z braku ogólnego sposobu opisanego tego, jak sprawdzić, czy arbitralna rzecz żyje, czy też nie. Swain idzie krok dalej, stwierdzając, że każda dopuszczalna definicja życia będzie musiała umożliwiać algorytmiczny sposób sprawdzenia, czy coś jest żywe.

W konkluzji kanadyjski fizyk stwierdza: „Być może będziemy musieli opracować wiele definicji życia, niektóre bardziej użyteczne od innych, w zależności od danej sytuacji. Nie powinno to być postrzegane jako niepowodzenie, tak samo jak niepowodzeniem nie można nazwać geometrii euklidesowej. Przeciwnie – myślę, że wskazuje to na duży potencjał biologii, którego nie miała ona jeszcze okazji wykorzystać. Nasze doświadczanie życia nadal ogranicza się do tego, co wiemy o Ziemi, i może wymagać ciekawej modyfikacji w miarę lepszego poznawania przez nas przestrzeni kosmicznej, a nawet kreować rzeczy (programy?), które będziemy mogli uznać w pewnym sensie za żywe”²⁰⁷⁰.

Indyjski fizyk Arun K. Pati i specjalista z dziedziny informatyki Samuel L. Braunstein stoją na stanowisku, że podstawowym zadaniem jest zrozumienie podstawowych funkcji życiowych na podstawie zasad kwantowo-mechanicznych²⁰⁷¹. Będzie to możliwe między innymi dzięki postępom w dziedzinie tworzenia sztucznego życia i automatów komórkowych.

²⁰⁶⁷ Tamże, s. 340.

²⁰⁶⁸ Por. tamże, s. 339.

²⁰⁶⁹ Por. tamże, s. 340.

²⁰⁷⁰ Tamże, s. 341.

²⁰⁷¹ Por. A.K. Pati, S.L. Braunstein, *Can arbitrary quantum systems undergo self-replication?* [w:] A.K. Pati, P.C.W. Davies, D. Abbott (eds), *Quantum aspects of life*, s. 229.

Pojęcie „sztuczne życie”²⁰⁷² zostało sformułowane przez Christophera Langtona²⁰⁷³. Ten amerykański naukowiec jest również odpowiedzialny za zaplanowanie badania życia w każdym możliwym środowisku oraz zwołanie pierwszej konferencji, która otwarcie zreorganizowała tę dziedzinę. Sztuczne życie posiada zróżnicowane korzenie intelektualne. Ponadto dzieli wiele głównych swoich założeń z innymi, starszymi dyscyplinami, takimi jak informatyka, cybernetyka, biologia, teoria systemów złożonych oraz sztuczna inteligencja. Pierwszy model sztucznego życia (bez określenia go jako takiego) wprowadził John von Neumann, węgierski fizyk, matematyk i informatyk²⁰⁷⁴, jednocześnie tworząc model samoreprodukującej się maszyny²⁰⁷⁵. Wykorzystał w tym celu stworzoną przez siebie ideę automatu komórkowego (ang. *cellular automaton*). Von Neumann starał się zrozumieć niektóre z podstawowych właściwości układów ożywionych, takich jak samoreprodukcja czy ewoluowanie złożonych struktur adaptacyjnych. Jego celem było stworzenie prostych systemów formalnych posiadających takie właściwości. Adrian P. Flitney, australijski fizyk, i Derek Abbott, fizyk angielski, szczegółowo opisują strukturę automatu komórkowego. Jest to system składający się z szeregu sąsiadujących ze sobą identycznych (każda następna jest kopią poprzedniej) komórek, przypominający planszę do gry²⁰⁷⁶. Każda z komórek może przyjąć jeden ze skończonej liczby stanów, które są synchronicznie aktualizowane w nieciągłych odstępach czasowych według deterministycznej reguły (nowy stan komórki zależy od jej obecnego stanu i stanu sąsiadujących z nią komórek)²⁰⁷⁷. Struktury automatów komórkowych opisywane są więc przez siatkę komórek, ich stany, przejścia i reguły tych przejść²⁰⁷⁸. Najprostsze automaty komórkowe są zbudowane z jednowymiarowej sieci komórek²⁰⁷⁹. Automaty komórkowe zapewniają środki do otrzymania złożonych zachowań z prostej sieci ko-

²⁰⁷² Ian Stewart wyróżnia dwie wersje „sztucznego życia”: „słabe sztuczne życie” – do uzyskania procesów charakterystycznych dla życia konieczne jest zastosowanie chemii, oraz „silne sztuczne życie” – stanowi ogólny (nie wyłącznie chemiczny) typ procesu, którego wystąpienie nie jest uzależnione od środowiska wykorzystywanego do jego implementacji. Por. I. Stewart, *Matematyka życia...*, s. 406.

²⁰⁷³ Por. M. Bedau, *Artificial life*.

²⁰⁷⁴ J. von Neumann, *Theory of self-reproducing automata*, University of Illinois Press, Urbana-Champaign 1966.

²⁰⁷⁵ Por. M. Bedau, *Artificial life*.

²⁰⁷⁶ Por. A.P. Flitney, D. Abbott, *A semi-quantum version of the game of life* [w:] A.K. Pati, P.C.W. Davies, D. Abbott (eds), *Quantum aspects of life*, s. 233.

²⁰⁷⁷ Zmiana stanu komórek to ewolucja automatu.

²⁰⁷⁸ Por. tamże, s. 233

²⁰⁷⁹ Por. tamże, s. 233–234.

mórek²⁰⁸⁰. Klasyczne automaty okazują się bardzo interesujące dla informatyków, niemniej budowa kwantowych automatów komórkowych stwarza szczególne trudności. Pierwowzorem automatów komórkowych była maszyna Turinga, wymyślona w latach trzydziestych XX wieku przez Alana M. Turinga.

Jednym z pierwszych i najbardziej znanych przykładów automatu komórkowego jest gra w życie (ang. *Life*), stworzona w 1970 roku przez brytyjskiego matematyka Johna H. Conwaya. Flitney i Abbott przypominają, że gra w życie toczy się na nieskończonej planszy, składającej się z kwadratowych komórek, z których każda może znajdować się w jednym z dwóch stanów: „martwym” lub „żywym”²⁰⁸¹. Stany komórek zmieniają się w nieciągłych odstępach czasowych zwanych „pokoleniami” tudzież „generacjami”. Stan pojedynczej komórki zależy wyłącznie od liczby jej żywych sąsiadów (komórka umiera z „przepełnienia” lub „izolacji”)²⁰⁸². Istnieje wiele różnych zasad, które mogą być stosowane do narodzin lub przetrwania komórki i wiele z nich pozwala zaistnieć różnym ciekawym strukturom, takim jak obiekty stabilne (statyczne, nieruchome) (wzory, które pozostają takie same bez względu na interwał czasowy – na przykład „łódź”), oscylatory (wzory, które się okresowo powtarzają, powracając do swego pierwotnego stanu – na przykład „żabka”), „statki” (zwykle zmieniające się okresowo, z każdym kolejnym cyklem przesuwają się o stałą liczbę jednostek w określonym kierunku – ich przykładem są „szybowiec” i „statek kosmiczny”)²⁰⁸³. Reguły Conwaya zapewniają równowagę między przeżyciem i wyginieciem żywych „organizmów”²⁰⁸⁴. Martwa (lub pusta) komórka w następnej jednostce czasu staje się żywa (rodzi się), jeśli ma obok siebie dokładnie trzech żywych sąsiadów, podczas gdy żywa komórka przetrwa wtedy i tylko wtedy, gdy ma obok siebie dwóch lub trzech żywych sąsiadów. Odpowiednio duży, losowy zbiór żywych komórek i martwych po pewnym czasie zazwyczaj rozpada się na zbiór nieruchomych istnień i oscylatorów²⁰⁸⁵.

Stephen Wolfram podzielił automaty komórkowe na cztery różne klasy, które wykazują coraz bardziej złożone zachowania²⁰⁸⁶. Grę w życie przyporządkował do klasy czwartej i charakteryzuje ją jako odznaczającą się zdolnością do samoorganizacji, czyli emergencji porządku z losowego stanu

²⁰⁸⁰ Por. tamże, s. 233.

²⁰⁸¹ Por. tamże, s. 234.

²⁰⁸² Por. tamże, s. 234–235.

²⁰⁸³ Por. tamże, s. 235–236.

²⁰⁸⁴ Por. tamże, s. 236.

²⁰⁸⁵ Por. tamże, s. 237.

²⁰⁸⁶ Por. tamże, s. 234.

początkowego. Informacja jest tracona w trakcie ewolucji automatów komórkowych. Znajomość stanu w danej chwili nie jest wystarczająca do określenia całej historii układu. Rozważane są również odwracalne (deterministyczne) automaty komórkowe, które mają szczególne znaczenie na przykład w modelowaniu odwracalnych zjawisk.

Już przez fizyka Richarda P. Feynmana rozważany był pomysł uogólnienia klasycznych automatów komórkowych do domeny kwantowej²⁰⁸⁷. Pierwszych poważnych prób zanalizowania kwantowych automatów komórkowych dokonali austriaccy fizycy Gerhard Grössing i Anton Zeilinger²⁰⁸⁸. Dziedzina kwantowych automatów komórkowych znajduje się dopiero w początkowej fazie swego rozwoju. Oto jak Flitney i Abbott charakteryzują tę nowo powstałą dziedzinę nauki: „Kwantowe automaty komórkowe są naturalnym modelem obliczeń kwantowych, gdzie wykorzystana może być dobrze rozwinięta teoria klasycznego automatu komórkowego. Kwantowe obliczenia wykorzystujące sieci optyczne lub tablice tak zwanych »mikrotrapów« są potencjalnymi kandydatami do eksperymentalnej realizacji użytecznych obliczeń kwantowych. Typowy dla takich układów jest fakt, że adresowanie poszczególnych komórek jest trudniejsze od sumarycznych zmian dokonanych w środowisku wszystkich komórek, co tym samym czyni je naturalnymi kandydatami do budowy kwantowych automatów komórkowych. Prosta idea kwantyzacji istniejącego klasycznego automatu komórkowego poprzez uczynienie miejscowej translacji unitarną jest problematyczna: sumaryczna zasada nieskończonej tablicy komórek rzadko jest opisywana przez dobrze zdefiniowanego unitarnego operatora. Trzeba zdecydować, czy dana miejscowa reguła unitarna prowadzi do »dobrze ukształtowanego«, jednolitego kwantowego automatu komórkowego, który odpowiednio przekształca prawdopodobieństwa, zachowując ich sumę podniesioną do kwadratu. Jedną z metod osiągnięcia niezbędnej odwracalności w kwantowych automatach komórkowych jest podział systemu na bloki komórek i zastosowanie wierszowych przekształceń unitarnych. [...] Odwracalne, jednowymiarowe, klasyczne automaty komórkowe są podzbiorem tych samych automatów w wersji kwantowej. [...] Pozostaje tylko sześć klasycznych automatów komórkowych, z których wszystkie są trywialne”²⁰⁸⁹. Dla przywołanych autorów kluczowym zagadnieniem będzie odpo-

²⁰⁸⁷ Por. tamże, s. 237. Por. R. Feynman, *Simulating physics with computers*, „International Journal of Theoretical Physics”, 6/7(21) (1982), s. 467–488.

²⁰⁸⁸ Por. G. Grössing, A. Zeilinger, *Quantum cellular automata*, „Complex Systems”, 2 (1988), s. 197–208. Por. G. Grössing, A. Zeilinger, *Structures in quantum cellular automata*, „Physica B”, 1–2(151) (1988), s. 366–370.

²⁰⁸⁹ A.P. Flitney, D. Abbott, *A semi-quantum version...*, s. 237–238.

wiedź na pytanie, czy w kwantowym modelu występują nowe efekty lub czy istniejące efekty da się odtworzyć w prostszych i bardziej ogólnych strukturach²⁰⁹⁰. „Poszukiwanie i klasyfikacja tych [kwantowych] automatów [komórkowych] – konkludują Flitney i Abbott – jest ważnym i wciąż nierozwiązanym zadaniem, może doprowadzić do zmian w dziedzinie kwantowej, porównywalnych do tych w dziedzinie klasycznej, które nastąpiły po eksploracji klasycznych automatów komórkowych. Kwantowe automaty komórkowe są realnymi kandydatami do osiągnięcia przydatnych obliczeń kwantowych”²⁰⁹¹.

Rolę mechaniki kwantowej w zrozumieniu dynamiki bioukładów zauważa i docenia w swoich dociekaniach amerykańska fizyczka Anita Goel. Zastanawia się ona nad kwestią, czy dynamika systemów biologicznych jest rządzona wyłącznie przez klasyczną fizykę, czy też mogą mieć na nią wpływ efekty kwantowe? Podkreśla, że nowe osiągnięcia wynikające z konwergencji fizyki, biologii i nanotechnologii prowadzą do krytycznego spojrzenia na konwencjonalne założenia dotyczące roli fizyki kwantowej w układach ożywionych²⁰⁹². Autorka wyraża przekonanie, że dwudziestowieczna fizyka odnosząca się do materii nieożywionej nie poradziła sobie dotąd w sposób zadowalający z życiem. Schrödinger w swojej książce *What is life?* pytał, czy prawa fizyki klasycznej wystarczają do zrozumienia życia. Zastanawiał się również, czy życie na swoim podstawowym poziomie może być w jakiś sposób zjawiskiem kwantowym albo przynajmniej czy mają na nie wpływ efekty kwantowe? Goel zauważa, że ostatnio taki sposób myślenia był odrzucany przez większość naukowców głównego nurtu, ponieważ biosystemy są złożonymi układami makroskopowymi, w obrębie których zakłada się, że kwantowe koherencje uległyby zniszczeniu dużo wcześniej, zanim ich efekty stałyby się istotne dla procesów biologicznych. Mimo że jest to powszechnie akceptowane, jednakże Goel twierdzi, że te kwantowe mechanizmy muszą odgrywać jakąś rolę w życiu, aczkolwiek nie kluczową. Elektroniczne struktury biomolekuł są mianowicie zdeterminowane przez prawa chemii kwantowej. Układy ożywione uważa ona za doskonałe laboratorium do testowania gry pomiędzy materią, energią i informacją²⁰⁹³. „Od wielu lat – pisze – fascynują mnie maszyny molekularne, które odczytują i zapisują informacje w formie molekuł DNA. Te nanomotory (materia) przekształcają

²⁰⁹⁰ Por. tamże, s. 244.

²⁰⁹¹ Tamże, s. 147.

²⁰⁹² Por. A. Goel, *Molecular evolution: a role for quantum mechanics in the dynamics of molecular machines that read & write DNA* [w:] A.K. Pati, P.C.W. Davies, D. Abbott (eds), *Quantum aspects of life*, s. 97.

²⁰⁹³ Por. tamże, s. 97–98.

wolną chemicznie energię w pracę mechaniczną, kopiując informację biologiczną przechowywaną w cząsteczce DNA. O motorach tych można myśleć jako o maszynach przetwarzających informacje, używających informacji ze środowiska, aby ewoluować albo dostosowywać sposób, w jaki odczytują DNA. W nieznanym dla nas jeszcze sposób informacja ze środowiska może łączyć się z dynamiką tych nanomaszyn i je modulować, gdy te replikują lub transkrybują informację genetyczną”²⁰⁹⁴. Autorka optuje za tym, że jest w pełni prawdopodobne, aby kwantowe efekty wpływały nie tylko na strukturę, ale również na dynamikę biomolekularnych motorów²⁰⁹⁵.

Przypomina, że natura umieszcza informacje w cząsteczkach DNA z niezwykłą efektywnością²⁰⁹⁶. Motory molekularne wielkości nanometrów replikują, transkrybują i przetwarzają te informacje. Nowe narzędzia do wykrywania pojedynczych cząstek i manipulowania nimi, uczyniły możliwym ujawnienie, jak rozmaite parametry w mikrośrodkowisku nanomotoru (na przykład enzymy) mogą kontrolować jego dynamikę. Na małą skalę szumy odgrywają istotną rolę przy poruszaniu się motoru razem z DNA. Informacja biologiczna w DNA jest replikowana, transkrybowana i przetwarzana przez molekularne maszyny, zwane polimerazami. Ten proces odczytywania i zapisywania informacji genetycznej może być silnie sprzężony albo regulowany przez środowisko motoru²⁰⁹⁷. Czynniki środowiskowe (na przykład temperatura czy koncentracja nukleozydowa) mogą bezpośrednio wiązać się z konformacyjną dynamiką motoru²⁰⁹⁸. Teoretyczne koncepcje związane z wytwarzaniem nanonarzędzi w celu badania i manipulowania pojedynczymi cząsteczkami objaśniają, jak rozmaite „gałki” w otoczeniu motoru mogą kontrolować jego dynamikę czasu rzeczywistego. Eksperymenty na pojedynczych cząsteczkach wykazały, że wzmożenie mechanicznego naciągu wywieranego na matrycę DNA może zauważalnie „wyregulować” prędkość, z jaką motorowy enzym polimerazy DNA (DNAp) replikuje DNA. Oprócz efektu regulacji odkryto, że gdy działają duże siły rozciągające, zachodzi wywołane naciągiem odwrócenie wektora prędkości motoru.

Goel stara się zrozumieć, jak mechaniczny naciąg polimeru DNA może kontrolować zarówno „regulację”, jak i „odwrócenie” w motorze molekularnym²⁰⁹⁹. Wywołane napięciem odwrócenie, zaobserwowane podczas eksperymentów na pojedynczej cząsteczce, jest podobne do naturalnego odwróce-

²⁰⁹⁴ Tamże, s. 98.

²⁰⁹⁵ Por. tamże.

²⁰⁹⁶ Por. tamże.

²⁰⁹⁷ Por. tamże, s. 98–99.

²⁰⁹⁸ Por. tamże, s. 99.

²⁰⁹⁹ Por. tamże, s. 100.

nia, które zachodzi po błędnym przyłączeniu DNA, kiedy to ścieżki reakcji sieci biochemicznej są kinetycznie rozdzielane w sposób faworyzujący ścieżkę egzonukleazy przed ścieżką polimerazy. Autorka próbuje stworzyć model pozwalający zrozumieć, jak czynniki środowiskowe (napięcie, skrętność, zewnętrzna akustyka, sygnały elektromagnetyczne) są w stanie bezpośrednio wiązać się z konformacyjną dynamiką motoru. Dzięki zrozumieniu, jak te rozmaite perturbacje wpływają na dynamikę molekularnego motoru, badaczka przewiduje, że będziemy mogli uzyskać bardziej całościowy obraz ich uzależnionej od kontekstu funkcji. Motory te są istotowo otwartymi układami i bardzo niewiele dzisiaj wiemy na temat tego, w jaki sposób (lokalnie lub globalnie) środowisko wiąże się z ich funkcją. Spoglądanie na motor jako na złożony system adaptacyjny, zdolny do wykorzystywania informacji pochodzących z jego otoczenia, aby ewoluować albo się uczyć, może rzucić nowe światło na sposoby przetwarzania informacji i komputacji na poziomie molekularnym. Dzięki temu, że staje się możliwe badanie dynamiki tych motorów w mniejszej skali długości i czasu, efekty kwantowe – jeśli są z nimi związane – będą łatwiejsze do eksperymentalnego wykrycia.

Goel analizuje stawiane przez fizyków fundamentalne pytania: Czy mechanizmy kwantowe odgrywają ważną rolę w życiu? Czy mechanizmy kwantowe mogą w jakiś sposób zwiększyć zdolności przetwarzania informacji bioukładów? Dylematy te umieszcza w kontekście badania zdolności przetwarzania informacji motorów odczytujących DNA. Sugeruje, że treść informacji albo liczba bitów magazynowanych w systemie motorowym DNA jest znacznie większa, niż się z reguły zakłada²¹⁰⁰. To zwiększenie gęstości magazynowanej informacji powoduje, że sam motor posiada kilka wewnętrznych mikroskopowych stanów. Zwyczajowo uważa się, że informacja w DNA jest magazynowana w samych zasadach DNA. W opozycji do tego Goel sugeruje, że w DNA motory służące replikacji i ich środowisko stanowią dynamiczną i złożoną sieć przetwarzania informacji o znacząco większej zdolności do przechowywania i przetwarzania informacji. Moc przetwarzania informacji zestawia autorka z rzeczywistą mocą generowaną przez motor w czasie zużywania przez niego energii, poruszając się mechanicznie wzdłuż ścieżki DNA. Badaczka przekonuje, że motory molekularne są doskonałym materiałem badawczym do analizowania wspólnej gry materii, energii i informacji. Cząsteczki te (materia) przekształcają swobodną, chemiczną energię na pracę mechaniczną z niezwykle efektywnością, a informacje ze środowiska odgrywają kluczową rolę przy kontrolowaniu albo modulowaniu ich dynamiki. Tym, czego potrzebujemy, jest dokładniejszy

²¹⁰⁰ Por. tamże, s. 105.

model konceptualny, w którym dynamika motoru molekularnego byłaby faktycznie i silnie połączona wymianą informacji i energii, zachodzącą między nim a środowiskiem. Autorka twierdzi, że okresy dekoherencji dla systemu motorowego DNA liczy się w minutach i godzinach, co pozwala mechanizmom kwantowym odgrywać ważną rolę. Aby efekty kwantowe działające na dynamikę motoru wzdłuż DNA mogły wkroczyć do sfery, w której możliwe jest ich eksperymentalne wykrycie, musi zostać spełnionych kilka wymogów:

- okresy dekoherencji muszą być wystarczająco długie,
- eksperymenty na pojedynczych cząsteczkach muszą być starannie zaplanowane, aby nie niszczyły koherencji,
- należy przyglądać się objawiającym się makroskopowym efektom kwantowym, włączając w to dowody na zachodzenie kwantowego przetwarzania informacji w obrębie tych systemów molekularnych.

Goel przypomina, że w swojej historycznej pracy Schrödinger jako pierwszy spekulował, że kwantowomechaniczne fluktuacje mogą wywoływać mutacje²¹⁰¹. W czasach nam bliższych opisano, w jaki sposób mechanika kwantowa może dostarczyć mechanizmów pozwalających rozumieć „mutacje adaptacyjne” (na przykład mutacje, które nie są czysto losowe, ale sterowane przez wymogi środowiskowe). Autorka sugeruje, że mutacje są fundamentalnie wbudowane w maszynierię replikacyjną. Argumentuje również, że te złożone systemy makromolekularne mogą mieć długie okresy dekoherencji, w porównaniu do czasu związanego z odczytywaniem zasad DNA przez motor, co sugeruje, że właściwości kwantowe nie ulegają rzeczywistej utracie w obrębie tych systemów.

Badaczka konkluduje: „Istnieją żarliwe starania, aby rozwinąć technologie, które mogłyby magazynować, odzyskiwać i przetwarzać informacje w nanoskali. Bioukłady wytworzyły już zdolność do wydajnego przetwarzania w nanoskali niezwyklej ilości informacji. Być może w przyszłości kwantowe technologie przetwarzania informacji znajdą swoją dotychczas najlepszą realizację w kontekście motorów biomolekularnych”²¹⁰².

* * *

Na wstępie rozdziału zaprezentowano głosy wybranych czołowych fizyków opowiadających się w spojrzeniu na fenomen życia bądź za redukcjonizmem, bądź za pewną formą antyredukcjonizmu. Przedstawiono koncepcje życia wybranych współczesnych obrońców redukcjonizmu. Bernd-Olaf

²¹⁰¹ Por. tamże, s. 106.

²¹⁰² Tamże.

Küppers przekonuje, że fenomen biologiczny może zostać kompleksowo wytłumaczony w ramach fizyki i chemii. Zakłada on, że fenomenem życia nie rządzą żadne inne zasady poza prawami fizyki i chemii. Niemiecki fizyk organizm żywy porównuje do kompleksowej maszyny, stojąc na stanowisku, że ogólną konstrukcję układu zarówno maszyny, jak i organizmów żywych określa specyficzna struktura warunków granicznych. Plany konstrukcyjne organizmów żywych odnajduje w ich genomie. Nie dostrzega on wyraźnej granicy pomiędzy ożywionymi i nieożywionymi układami. Współczesna fizyczka Evelyn Fox Keller także popiera i rozwija, chociaż w umiarkowany sposób, redukcjonistyczne stanowisko w biologii. Uważa za owocne prowadzone przez redukcjonistów badania od wiedzy na temat elementarnych molekularnych elementów składowych i ich interakcji, do właściwości systemowych. Keller podkreśla jednak, że takie redukcjonistyczne stanowisko jest różne od wyjaśnień fizycznych i chemicznych, do których byliśmy dotąd przyzwyczajeni. Autorka odwołuje się między innymi do przykładu chemotaksji bakteryjnych jako potwierdzenia przynajmniej częściowego sukcesu wysiłków zmierzających ku zredukowaniu wyjaśnień biologicznych do wyjaśnień fizyczno-chemicznych.

Paul Davies opowiada się za koncepcją emergencji, podkreślając złożoność fenomenu życia powodującą, że nie jest ono tylko prostą sumą elementów składowych, gdyż na każdym wyższym poziomie bioukładu pojawiają się nowe cechy, których nie można wyprowadzić z tych na niższym poziomie. Do kluczowych cech odróżniających istoty żywe od układów nieożywionych Davies zalicza: autonomię, reprodukcję, metabolizm, odżywianie, złożoność, organizację, rozwój, informację przekazywaną w genach od rodzica dla potomstwa, wysoce sprecyzowany i wyrafinowany kanał komunikacji między kwasami nukleinowymi i białkami, odbywający się za pośrednictwem kodu genetycznego, trwałość i zmianę, unikatowość i organizację. Brytyjski fizyk nie wyklucza, że życie powstało na bazie wyższego rzędu prawa „organizacyjnego”, które traktuje jako poszerzenie podstawowych praw fizyki. Także Nigel Goldenfeld i Carl R. Woese opowiadają się za podejściem holistycznym obejmującym swoim zasięgiem zjawiska zbiorowe. Fizycy ci podają wiele przykładów takich zjawisk ze świata drobnoustrojów, a wśród nich wymianę genów, komunikację między komórkami, wielokomórkowe kolonie o ustalonym podziale obowiązków, komórkowym różnicowaniu i wspólnym systemie obronnym, poziomy transfer genów, odbudowę genomów w obliczu poważnych presji środowiskowych i zbiorowe interakcje z wirusami. Badacze ci na zjawisko życia patrzą jako na nieuchronną konsekwencję praw fizyki statystycznej i teorii układów dynamicznych. Inny fizyk, Lebrecht von Klitzing, twierdzi, że redukcjonista nie jest w stanie dać

ostatecznej odpowiedzi na pytanie, co to jest życie. Chociaż każda komórka zawiera w sobie komplet informacji genetycznych, to jednak wykorzystana zostaje tylko ich część. Ponadto części genomu są w stanie zmieniać swoje położenie w sekwencji. Hans-Jürgen Fischbeck, inny niemiecki fizyk, podkreśla, że życie jest fenomenem samoorganizacji. Twierdzi, że samoorganizacja życia zasadniczo postępuje przez wymianę informacji. Według niego organizmy żywe jako „struktury dyssypatywne” konstruuja się poprzez samoorganizację uzależnioną od czynników zewnętrznych i wewnętrznych.

Dla wielu współczesnych fizyków, tak jak dla wspomnianego Hansa-Jürgena Fischbecka, życie jawi się jako najbardziej zdumiewający i najwspanialszy fenomen naszego świata. Nie jest ono czymś oczywistym. Nawet niewielkie zmiany w wielkościach stałych mogły wywołać sytuację, w której życie – takie, jakim je znamy – byłoby niemożliwe. Autorzy przypominają też, że od dawna zadawano pytanie: jaka jest istota tego niezwykłego zjawiska, jakim jest życie? Fischbeck wskazuje na trzy najbardziej charakterystyczne cechy życia: metabolizm, reprodukcja i dziedziczność. Wszystkie trzy właściwości mogą być szczegółowo wytłumaczone biochemicznie i biofizycznie. Wydawało się zatem oczywiste – to dominujący konsensus – że życie jest „niczym więcej” niż osobliwą, chociaż nadzwyczajną i najbardziej złożoną, wzajemną grą biomolekuł, wewnątrz ramy wyznaczonej przez chemię i fizykę. Różni się od natury nieożywionej wyłącznie pod względem fenomenalnym, ale nie pod względem esencjonalnej podstawy, w związku z tym pojawienie się życia na Ziemi uważane jest za stopniowe przejście od stanu nieożywionego do ożywionej natury.

Fenomen życia wciąż skrywa wiele tajemnic. Aby przybliżyć się do jego zrozumienia, nie wystarczy oprzeć się na bardzo upraszczającym rzeczywistość skrajnym podejściu redukcjonistycznym. Tymczasem, jak zauważa Paul Davies, jeszcze stosunkowo niedawno dużo rzadziej obrońców skrajnego redukcjonizmu można było spotkać wśród fizyków niż wśród biologów. „W tej chwili – pisze – możemy obserwować bardzo dziwne zjawisko. Fizycy coraz częściej doceniają znaczenie badania zasad organizacji cech wspólnych, społecznych i jakościowych układów złożonych; uznają, że takimi układami rządzą własne prawa i zasady, które sprawiają, że są one równie fundamentalne, jak cząstki elementarne, z których zbudowany jest świat. Równocześnie biolodzy ewoluują w przeciwnym kierunku – głoszą przesadny redukcjonizm i uważają organizmy żywe wyłącznie za zbiory pojedynczych części oddziałujących między sobą za pośrednictwem ślepych i bezcelowych sił”²¹⁰³. Davies wyraża pragnienie, by fizycy i biolodzy w zgłębia-

²¹⁰³ P. Davies, *Droga syntezy* [w:] J. Brockman (red.), *Trzecia Kultura...*, s. 425.

niu tajemnic życia podążali wspólną drogą, odchodząc od bardzo upraszczającego rzeczywistość poglądu redukcjonistycznego. „Niecierpliwie oczekuję – pisze – kiedy biolodzy przestaną łajać fizyków za odrzucenie redukcjonizmu. Obecnie głoszą oni redukcjonizm z zapałem neofitów i każda sugestia fizyków, że warto zejść ze ściśle redukcjonistycznej ścieżki, wywołuje gwałtowne reakcje biologów. Według mnie biolodzy są tak bezkompromisowymi redukcjonistami, gdyż nie są całkowicie pewni podstawowych dogmatów swej dziedziny, natomiast fizyka już trzysta lat temu zyskała niewzruszone podstawy i stać ją obecnie na swobodne spekulacje o układach złożonych. Mam nadzieję, że w ciągu najbliższych dziesięciu lub dwudziestu lat zniknie ten podział kulturowy między dwiema społecznościami uczonych i wszyscy znów będziemy mówić tym samym językiem”²¹⁰⁴.

Nadzieje brytyjskiego fizyka przynajmniej po części poczynają się spełniać. Od początku obecnego wieku daje się zauważyć wśród pewnej grupy biologów wyraźną niechęć do skrajnie redukcjonistycznego spojrzenia na fenomen życia. Wyłania się nowa gałąź biologii, zwana biologią systemów, której wielu rzeczników wyraża przekonanie, że aby zbliżyć się do wyjaśnienia fenomenu życia, należy skoncentrować się na zbiorowych i organizacyjnych aspektach, a nie na elementarnych składnikach. Czy biologia systemów zwiastuje początek nowego paradygmatu w badaniach nad życiem? Jest jeszcze za wcześnie, aby to rozstrzygnąć. Na odpowiedź trzeba będzie poczekać.

Dodatkowym wzmocnieniem nadziei Daviesa jest także rodzący się program biologii kwantowej, zwracający uwagę między innymi na holistyczne efekty kwantowe obecne w strukturach żywych na ich elementarnym poziomie. Holistyczne efekty kwantowe w biologii dostrzega Alfred Driessen. Za centralne w badaniu bardzo złożonych biosystemów uważa on dwa pojęcia: jedności i informacji. Ściśle powiązane z pojęciem jedności są dwa „nowe” zjawiska, które nie mają swoich klasycznych odpowiedników – splątanie i superpozycja. Driessen przekonuje, że klasyczne modele kulkowe cząsteczek nie mogą uwzględniać w sobie niezwyklej wydajności układu. Zamiast tego należy zastosować podejście systemowe, w którym całość jest jakościowo różna od agregacji swoich części składowych. Inny fizyk – Hans-Peter Dürr – opowiada się za hipotezą sugerującą bezpośrednie połączenia pomiędzy zjawiskami życia z fundamentalną i holistyczną strukturą rzeczywistości. Jego zdaniem bioukłady w swoim działaniu przypominają lasery. Tak jak lasery są układami otwartymi, które wymagają ciągłego dopływu energii, aby móc zachować zdolność wykonywania swoich funkcji, co

²¹⁰⁴ Tamże, s. 424.

czynią za sprawą metabolizmu poprzez spożywanie pokarmu. Dürr twierdzi, że analityczny pogląd na materiężywioną należy uzupełnić poglądem holistycznym. Hans-Jürgen Fischbeck zauważa z kolei, że związki znaczeniowe konstytuują autopoietyczne byty, takie jak komórki czy organizm. W jego oczach są one transempiryczne i – jeśli chodzi o ich treść – nierozpoznawalne z perspektywy fizyczno-chemicznej.

Współcześni fizycy z punktu widzenia mechaniki kwantowej analizują także problem pochodzenia życia. Paul Davies twierdzi, że mechanizmy kwantowe umożliwiły zrodzenie się życia bezpośrednio ze świata atomowego, bez pośrednictwa chemii. W organizmach żywych widzi procesory przetwarzające informacje. Informacja przepływa począwszy od wymiaru kwantowego, dlatego nie można nie brać pod uwagę kwantowych aspektów życia. Zgodnie z zaproponowaną przez Daviesa hipotezą przejście od stanu nieżywionego do życia było procesem zapośredniczonym kwantowo.

Najwcześniejsze formy życia zawierały elementy kwantowe. Seth Lloyd przedstawia opis tego, jak mechanika kwantowa odpowiada za cyfrowo-stochastyczny charakter wszechświata, następnie zagłębia się w to, jak właściwości te łączą się ze sobą poprzez proces obliczeniowy (proces komputacji), aby wytworzyć złożoność. Wskazuje na dwie cechy mechaniki kwantowej, które zagwarantowały powstanie życia: nieciągłość, która oznacza, że dowolny skończony układ kwantowy o ograniczonej energii ma skończoną liczbę rozpoznawalnych stanów, oraz losowość, zgodnie z którą wyniki niektórych zdarzeń kwantowych są z natury probabilistyczne. Przekonuje on, że obie te cechy oznaczają razem, że układy kwantowe muszą rodzić złożone systemy, takie jak życie. Jim Al-Khalili wraz z Johnjoe McFaddenem, twierdzą, że niektóre aspekty mechaniki kwantowej mają swoje zastosowanie przy wyjaśnianiu powstania życia z „zupy pierwotnej”. „Zupę pierwotną” autorzy charakteryzują jako dynamiczną bibliotekę kombinatoryczną zdolną do tworzenia nowych struktur poprzez odwracalne procesy. Do dynamicznej biblioteki kombinatorycznej autorzy dodają mechanizm, za pomocą którego ogniwa w bibliotece są ze sobą powiązane nie tylko poprzez odwracalne reakcje, ale także poprzez mechanikę kwantową. Tym mechanizmem jest kwantowe tunelowanie.

Apoorva D. Patel z perspektywy teorii informacji charakteryzuje kluczowe cechy życia, takie jak metabolizm i reprodukcja. Oba te zjawiska często wbrew przeciwnościom coś utrzymują, chronią i poprawiają. Tym „czymś” zdaniem amerykańskiego fizyka jest informacja. Informację uważa on za podstawę życia. Autor w teorii informacji dostrzega potężne ramy dla wydobywania i analizowania w systematyczny sposób istotnych właściwości złożonych procesów życiowych.

Życie z podwójnej perspektywy: mechaniki kwantowej i teorii złożoności obliczeniowej analizuje John Swain. Obawa, czy może być ono opisane mechaniką kwantową, zaprowadza autora ostatecznie do podania w wątpliwość tego, czy istnieje jakakolwiek definicja życia, która kiedykolwiek nas zadowoli. Kanadyjski fizyk przekonuje, że każda dopuszczalna definicja życia będzie musiała umożliwiać algorytmiczny sposób sprawdzenia, czy coś jest żywe, dlatego rozwiązań niektórych kluczowych problemów związanych z fenomenem życia szuka w teorii złożoności obliczeniowej. Pokazuje, że w zakresie, w jakim działania organizmów podlegających znanym prawom fizyki są obliczalne, możemy zastąpić organizmy programami komputerowymi.

Czy na dynamikę bioukładów mogą mieć wpływ efekty kwantowe? Odpowiedzi na to pytanie szuka Anita Goel. Uważa ona, że kwantowe mechanizmy muszą odgrywać jakąś rolę, aczkolwiek nie kluczową, w procesach biologicznych. Twierdzi, że elektroniczne struktury biomolekuł są zdeterminowane przez prawa chemii kwantowej, i argumentuje, że kwantowe efekty wpływały zarówno na strukturę, jak i dynamikę motorów biomolekularnych.

Arun K. Pati i Samuel L. Braunstein stoją na stanowisku, że zrozumienie podstawowych funkcji życiowych na podstawie zasad kwantowo-mechanicznych będzie możliwe między innymi dzięki postępom w dziedzinie tworzenia sztucznego życia i automatów komórkowych. Jednym z najbardziej znanych przykładów automatu komórkowego jest gra w życie Johna H. Conwaya. Pomysł dostosowania klasycznych automatów komórkowych do domeny kwantowej rozważany był przez fizyka Richarda P. Feynmana, a następnie przez Gerharda Grössinga i Antona Zeilingera. Odpowiedź na pytanie, czy w kwantowym modelu występują nowe efekty lub czy istniejące efekty da się odtworzyć w prostszych i bardziej ogólnych strukturach, wciąż pozostają bez rozstrzygnięcia.

Biologia kwantowa to ciekawy, bardzo rozwojowy projekt badawczy, wciąż jednak znajdujący się w stadium początkowym. Na konkretne efekty jej zastosowania trzeba będzie zapewne jeszcze trochę poczekać. Wysiłki podejmowane przez wielu współczesnych fizyków (i nie tylko) w celu przezwyciężenia kolejnych pomostów pomiędzy fizyką kwantową a biologią budzą szacunek i napełniają nadzieję, że może kiedyś fundamentalne pytanie postawione przez Schrödingera w jego historycznej pracy doczeka się pełnej odpowiedzi.

ZAKOŃCZENIE

Zamiarem autora niniejszego opracowania było ukazanie prób wyjaśnienia organizacji życia podejmowanych przez fizyków począwszy od lat trzydziestych minionego wieku. W tym celu odwołano się do ich prac z XX i początków XXI wieku w całości lub w części poświęconych problematyce biologicznej. Książka przedstawia podejmowane przez czołowych fizyków omawianego okresu próby odpowiedzi na historyczne pytanie, co to jest życie, w szerokim kontekście przemian dokonujących się w fizyce w XX wieku i w początkach obecnego stulecia. Odpowiedzi udzielane przez nich na pytanie, co to jest życie, stanowią ważny fragment zmagania człowieka zmierzających do wyjaśnienia tajemnicy życia.

Fizycy, wkraczając w latach trzydziestych ubiegłego wieku na swoistą *terra incognita*, jaką była dla każdego z nich nauka o życiu, byli przeświadczeni, że odwieczny sekret życia znajduje się na wyciągnięcie ręki. Z jednej strony rzeczywiście dzięki nim biologia przestała być „zbieraniem znaczków”, stając się atrakcyjną i dojrzałą dziedziną wiedzy. Zwiększyła się jej zdolność przewidywania i trwałość. Z drugiej jednak strony, w miarę wchodzenia w tajniki życia, pogłębiali jego treść, ale perspektywa jego pełnego wyjaśnienia wciąż była daleka. Mimo to mniejsze czy większe odejścia od fizyki były intelektualną emigracją o ogromnym znaczeniu dla biologii.

Chociaż Bohr nigdy nie planował prowadzenia badań eksperymentalnych w biologii, gdyż zdawał sobie doskonale sprawę ze swoich braków wiedzy w tej dziedzinie, odegrał ważną rolę w narodzinach biologii molekularnej. Jego wkład w powstanie biologii molekularnej w niczym nie przypominał tego w fizyce, co wiązało się z konkretnym modelem teoretycznym. Przeciwnie, jego główny udział w narodzinach nowej dziedziny biologicznej polegał na motywowaniu młodych fizyków nie tylko do teoretycznego pochylenia się nad zjawiskiem życia, ale także do praktycznych badań w tym obszarze. Odkrycie w 1953 roku przez Watsona i Cricka podwójnej helisy DNA było dla biologii tym, co fizycy na próżno spodziewali się odkryć w fizyce atomowej i zdawało się rozwiewać wszelkie tajemnice. Nadzieje Bohra na znalezienie w biologii zupełnie innych praw od tych występujących w fizyce okazały się jednak złudne. Punkt widzenia Bohra na biologię był w pewnym stopniu filozoficzny, jednak jego wpływ na innych fizyków

okazał się niezwykle silny, znalazł bowiem entuzjastycznego ucznia w osobie Maxa Delbrücka. Dyskusje na tematy biologiczne, które niemiecki fizyk prowadził z Bohrem, a zwłaszcza jego wykład *Light and life*, którego wysłuchał, zainspirowały go do rozpoczęcia własnych badań eksperymentalnych, zwieńczonych Nagrodą Nobla. Z kolei sam Delbrück również inspirował innych fizyków i chemików do zajęcia się problematyką biologiczną, między innymi poprzez organizowanie letnich kursów poświęconych fagom. Intelpekt i charyzma Delbrücka sprawiły, że stacja badawcza Cold Spring Harbor, gdzie organizowane były kursy, stała się magnesem biologii molekularnej przyciągającym setki fizyków, chemików i biologów (między innymi Salvadora Luriego i Alfreda D. Hersheya), których określano jako członków „Grupy Fagowej”. Erwina Schrödingera niektórzy wprost okrzyknęli protoplastą kodu genetycznego. Nie ulega wątpliwości, że jego spostrzeżenia dotyczące „zakodowanego scenariusza” wywarły wpływ na sposób myślenia o kodzie genetycznym wielu późniejszych badaczy życia, w tym samych prekursorów biologii molekularnej. George Gamow wyszedł poza to, co powiedział Schrödinger na temat „zakodowanego scenariusza”, przedstawiając swoją ideę „kodu diamentowego”, która okazała się ważnym etapem na drodze do sformułowania przez Cricka „centralnego dogmatu” biologii molekularnej.

Dlaczego autor podzielił pracę na rozdział wprowadzający i cztery rozdziały merytoryczne? Zasadniczy materiał zgromadził w powyższych rozdziałach, gdyż kierował nim ewolucjonizm, narastanie poglądów od pewnego rodzaju strachu przed fenomenem życia do wyraźnej próby zmierzenia się z nim. Pierwsi zaprezentowani badacze (mechanicyści) w pewnym sensie bali się fenomenu życia, gdyż nie wiedzieli, jak do niego podejść, a ci ostatni podjęli próbę jego pełnego wyjaśnienia (od negacji do jego przyjęcia).

Należy postawić kolejne pytanie: w imię jakich przesłanek powstała niniejsza praca? Tych przesłanek jest wiele. W polskiej czy światowej literaturze naukowej najwięcej prac poświęconych fenomenowi życia, z uwagi na status nauki, sytuje się w obszarze nauk biologicznych. Nie można wykluczyć innego wątku. Jak się mógł przekonać czytelnik, fenomen życia nie został pominięty w ramach fizyki.

Autor postawił następne pytanie: w imię czego fizycy podejmowali fenomen życia? Czy tylko w imię zwykłej obserwacji życie–nieżycie? Innymi słowy, czy tylko stawiając kwestię, czym się różni życie od nieżycia? Obserwując świat wydaje się, że sprawa zajęcia się przez fizyków fenomenem życia jest sprawą wielkiej wagi. Czy świat jest jednością, czy też jest różnorodnością? A jeżeli różnorodnością, to jaką? Czy tylko różnorodnością stopnia organizacji, czy też różnorodnością w sensie jakościowym? Czy mamy prawo oddzielić świat ożywiony od świata nieożywionego?

Podjmując niniejszą problematykę, autor kierował się jeszcze inną przesłanką, a mianowicie tą, że w biologii teoretycznej jest wiele syntez dotyczących badanych przedmiotów. Więcej jest syntez biologicznych, a mniej opracowanych w ramach fizyki, stąd niniejsza rozprawa ma charakter syntezy, której podstawą były prace fizyków od lat trzydziestych XX do początku XXI wieku. Myślą przewodnią było ukazanie sposobów rozumowania fizyków, a jednocześnie pokazanie rodzajów trudności, jakie napotykali podczas interpretacji fenomenu życia.

Kolejne pytanie, które zadał sobie autor brzmiało: co ta książka wnosi do nauki? Nie referuje się w niej jedynie poglądów na powstanie i istnienie życia wybranych fizyków, ale próbuje się je interpretować i dokonywać ich syntezy. Jak wynika z licznie zamieszczonych w monografii przypisów, aby przedstawić całość koncepcji życia każdego z omawianych autorów, należało sięgnąć do wszystkich możliwych źródeł, gdyż bardzo często poglądy fizyków zostały rozproszone po różnych publikacjach, a przez to w nie dość wyraźny sposób przedstawione, stąd należało je wszystkie wydobyć, uporządkować i opisać.

Autor zdaje sobie sprawę z faktu, że opracowanie nie wyczerpuje tematu. Ogranicza się ono zasadniczo do autorów anglo- i niemieckojęzycznych. Pominęto na przykład niektórych autorów francuskojęzycznych i innych, których poglądy na organizację życia autor zamierza opracować w przyszłości. Oczywiście jak przystało na syntezę, praca otwiera się na nowe problemy – to nie tylko organizacja życia, na której się głównie skupiono, ale również jej szersza interpretacja.

Warto zauważyć, że każdy z omawianych autorów może być przedmiotem osobnej publikacji. Jej tytuł mógłby wtedy na przykład brzmieć: *Fenomen życia u Erwina Schrödingera*. Z tej racji można powiedzieć, że przy tego typu syntezie wiele problemów występujących u przedstawianych autorów zostało pominiętych. Pisząc tę monografię autor zdawał sobie sprawę z tego, że można byłoby rozwijać temat w aspekcie horyzontalnym lub wertykalnym, czyli ukazać panoramę albo głębię każdego ujęcia danego zagadnienia. Obrano aspekt horyzontalny, aby w następnych pracach podjąć wymiar wertykalny, czyli omawiać koncepcje życia poszczególnych autorów osobno.

Należy wyraźnie zaznaczyć, że realizacja założonego w niniejszej rozprawie celu wymagała podejścia interdyscyplinarnego, w szczególności połączenia fizyki z biologią, a przy tym (niejako w tle) odwołania się do wielowiekowego dziedzictwa filozoficznego (filozofii, która stoi za analizowanym konceptem), co – *summa summarum* – jest bez wątpienia bardzo dużym wyzwaniem. Z jednej strony, takie interdyscyplinarne podejście wydaje się

konieczne do zarysowanie kluczowych powiązań pomiędzy tymi specjalizacjami, z drugiej jednak – nie mogło ono nie mieć bezpośredniego przełożenia na „głębokość” prowadzonych przez autora analiz materiału dostarczonego przez fizyków (autor nie jest fizykiem). Podobne dylematy muszą z natury towarzyszyć każdemu, kto poszukuje powiązań między kilkoma specjalizacjami, sam czując się kompetentnym tylko w jednej z nich (na przykład fizykowi podejmującemu temat życia). Interdyscyplinarny charakter problematyki, nad którą się pochylono, siłą rzeczy mógłby być inspiracją do dalszych pogłębionych analiz, tym razem przeprowadzonych przez samych zainteresowanych tym tematem fizyków.

Formułując pewne prognozy na podstawie tej pracy, można przewidywać, w jakim kierunku zwrócą się następne badania nad organizacją życia podejmowane przez fizyków. Autor przewiduje, że na pewno będą się rozwijać badania na poziomie kwantowym, ale nie można zaniedbywać poziomu „makro”. Wielu fizyków twierdziło, że należy rozwijać badania na poziomie „mikro”, ale równocześnie podkreślało, że rozwiązanie organizacji życia znajduje się na poziomie „makro”. Czy wszyscy fizycy dadzą się przekonać i odstąpią od redukcjonistycznego wyjaśnienia fenomenu życia? Wydaje się, że nie. Może nastąpić u nich jedynie zmiana formy redukcjonizmu, którą uważali do tej pory za słuszną. Redukcjonizm prawdopodobnie będzie przechodził ewolucję w kierunku komplementarności w stosunku do antyredukcjonizmu.

W nawiązaniu do powyższego stwierdzenia warto przywołać ciekawą uwagę, którą zgłosił James A. Marcum. Twierdzi on, że badanie problemów na określonym poziomie złożoności świata ożywionego powinno poprzedzać studia nad poziomami wyższymi oraz niższymi tej organizacji²¹⁰⁵. W takim ujęciu redukcjonizm i antyredukcjonizm są przeciwnymi biegunami tego samego kontinuum, w którym dostępne są również paradygmaty pośrednie, leżące pomiędzy stwierdzeniami typu „nic oprócz” a tymi z rodzaju „wszystko albo nic”. Marcum przekonuje, że takie paradygmaty pośrednie zapewniają kompletny obraz życia. Twierdzi, że aby zrozumieć życie, nie możemy uciec ani od programu redukcjonistycznego czy jego wyników, ani całkowicie porzucić poglądu holistycznego. Dla tego autora zarówno metody redukcjonistyczne, jak i holistyczne podejście do złożoności biologicznej są potrzebne w zależności od tego, jakie pytania zostaną postawione. Marcum podkreśla, że te zintegrowane paradygmaty często obejmują łączenie „przyczynowości skierowanej w górę”, pochodzącej z redukcjonistycznej biologii, z „przyczynowością skierowaną w dół” biologii holistycznej, generując tym

²¹⁰⁵ Por. J.M. Marcum, *The conceptual foundations...*, s. 35.

samym „przyczynowość okrężną”. Podczas gdy „przyczynowość skierowana w górę” zapewnia komponenty i procesy materialne i formatywne wyjaśniające zjawiska wyższego poziomu, to zjawiska te z kolei wpływają przyczynowo na komponenty niższego poziomu. Tym samym paradygmat pośredni łączy właściwości systemowe oraz molekularne w relacjach wzajemnych – takich, w których zmiana przyczynowa w jednym z tych rodzajów wywołuje zmianę w drugim. Innymi słowy, zjawiska niższego rzędu powodują zjawiska wyższego rzędu, które z kolei wywołują zjawiska niższego rzędu. Podobnie ma miejsce integracja kontroli genetycznej oraz epigenetycznej w celu zapewnienia pełnej regulacji zjawisk złożonych, co obejmować może wzajemne relacje pomiędzy genami, organizmami i środowiskiem.

Rola fizyków w wyjaśnianiu i przybliżaniu odwiecznych tajemnic życia wciąż jest nieoceniona. Urok próby zrozumienia życia stał się dla kolejnego pokolenia fizyków motywacją do zainteresowania się biologią. Przez swoją pracę przypominają i podkreślają znaczenie mechaniki kwantowej dla zrozumienia zjawisk zachodzących w organizmach żywych. Czy podejmowane przez nich wysiłki przerzucania kolejnych pomostów pomiędzy fizyką a biologią doprowadzą w końcu do ostatecznej odpowiedzi na historyczne pytanie postawione przez Schrödingera w jego epokowej pracy? Czas pokaże.

BIBLIOGRAFIA

- Aaserud F., 1990, *Redirecting science. Niels Bohr, philanthropy, and the rise of nuclear physics*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Abbott D., Davies P.C.W., Pati A.K., 2008, *Preface* [w:] A.K. Pati, P.C.W. Davies, D. Abbott (eds), *Quantum aspects of life*, Imperial College Press, London, s. xiii–xv.
- Abel D.L., 2012, *Is life unique?*, „Life”, 2(1), s. 106–134.
- Abir-Am P., 1985, *Themes, genres and orders of legitimation in the consolidation of new scientific disciplines: deconstructing the historiography of molecular biology*, „History of Science”, 23, s. 73–117.
- Adams D.H., 1989, *Self-organization and living systems: is DNA an ‘artificial intelligence’?*, „Medical Hypotheses”, 29, s. 223–229.
- Aderem A., 2005, *Systems biology: its practice and challenges*, „Cell”, 121, s. 511–513.
- Alexander S., 1950, *Space, time and deity*, The Humanities Press, New York.
- Al-Khalili J., McFadden J., 2008, *Quantum coherence and the search for the first replicator* [w:] A.K. Pati, P.C.W. Davies, D. Abbott (eds), *Quantum aspects of life*, Imperial College Press, London, s. 33–49.
- Al-Khalili J., McFadden J., 2016, *Życie na krawędzi. Era kwantowej biologii*, tłum. T. Krzysztoń, Prószyński i S-ka, Warszawa.
- Allen G.A., 1975, *Life science in the twentieth century*, John Wiley & Sons, New York.
- Allen G.E., 2005, *Mechanism, vitalism and organicism in late nineteenth and twentieth-century biology: the importance of historical context*, „Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences”, 36, s. 261–283.
- [Anon.], 1943, *The living cell and the atom*, „The Irish Times”, s. 4.
- [Anon.], 1943, *What is life: quantum theory of biology*, „The Irish Times”, s. 3.
- [Anon.], 1943, *X-rays harmful to the race*, „The Irish Times”, s. 1.
- Atlan H., 2011, *Intentional self-organization: emergence and reduction. Toward a physical theory of intentionality* [w:] S. Geroulanos, T. Meyers (eds), *Henri Atlan. Selected writings. On self-organization, philosophy, bioethics, and Judaism*, Fordham University Press, New York, s. 65–94.
- Ayala F.J., 1989, *Thermodynamics, information, and evolution: the problem of reductionism*, „History and Philosophy of the Life Sciences”, 1(11), s. 115–120.
- Ayala F.J., Arp R., 2010, *It is possible to reduce biological explanations to explanations in chemistry and/or physics: introduction* [w:] F.J. Ayala, R. Arp (eds), *Contemporary debates in philosophy of biology*, Wiley-Blackwell, Malden–Oxford–Chichester, s. 13–17.
- Baetu T.M., 2012, *Emergence, therefore antireductionism? A critique of emergent antireductionism*, „Biology and Philosophy”, 27, s. 433–448.
- Barbieri M., 2008, *Biosemiotics: a new understanding of life*, „Naturwissenschaften”, 95, s. 577–599.
- Bailly F., Longo G., 2016, *Biological organization and negative entropy: based on Schrödinger’s reflections*, Cornell University Library, <https://arxiv.org/abs/0801.2038> (10.10.2016).
- Battail G., 2011, *An answer to Schrödinger’s ‘What is life?’*, „Biosemiotics”, 4, s. 55–67.

- Bechtel W., 2013, *Addressing the vitalist's challenge to mechanistic science: dynamic mechanistic explanation* [w:] S. Normandin, Ch.T. Wolfe (eds), *Vitalism and the scientific image in post-enlightenment life science, 1800–2010*, Springer, Dordrecht, s. 345–370.
- Beck W.S., Liem K.F., Simpson G.G. (eds), 1991, *Life. An introduction to biology*, Harper Collins, New York.
- Bedau M., 2012, *Artificial life*, https://mywebpace.wisc.edu/lshapiro/web/Phil554_files/BedauArtLife.pdf (26.09.2012).
- Bedau M.A., 2010, *Four puzzles about life* [w:] M.A. Bedau, C.E. Cleland (eds), *The nature of life. Classical and contemporary perspectives from philosophy and science*, Cambridge University Press, Cambridge, s. 392–404.
- Bedau M.A., 1996, *The nature of life* [w:] M.A. Boden (ed.), *The philosophy of artificial life*, Oxford University Press, Oxford, s. 332–357.
- Bednarczyk A., 1984, *Filozofia biologii europejskiego Oświecenia. Albrecht von Haller i jego współcześni*, PWN, Warszawa.
- Beese W., 1991, *Max Delbrück: A physicist in Biology* [w:] W.R. Woodward, R.S. Cohen (eds), *World views and scientific discipline formation: science studies in the German Democratic Republic*, Springer Science+Business Media, Dordrecht, s. 415–421.
- Berlinski D., 1986, *The language of life* [w:] J.L. Casti, A. Karlqvist (eds), *Complexity, language, and life: mathematical approaches*, Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg–New York–Tokyo, s. 231–267.
- Bertalanffy L. von, 1928, *Kritische Theorie der Formbildung*, Verlag von Gebrüder Borntraeger, Berlin.
- Bertalanffy L. von, 1982, *Problemy życia*, tłum. A. Aduszkiewicz, „Literatura na Świecie”, 3–4(128–129), s. 126–153.
- Bertalanffy L. von, 1927, *Studien über theoretische Biologie*, „Biologisches Zentralblatt”, 47, s. 210–242.
- Bertalanffy L. von, 1932, *Theoretische Biologie. Erster Band: Allgemeine Theorie, Physikochemie, Aufbau und Entwicklung des Organismus*, Verlag von Gebrüder Borntraeger, Berlin.
- Bertalanffy L. von, 1944, *Vom Molekül zur Organismenwelt. Grundfragen der modernen Biologie*, Akademische Verlagsgesellschaft Athenaion, Potsdam.
- Beyler R.H., 2007, *Exporting the quantum revolution: Pascual Jordan's biophysical initiatives* [w:] J. Ehlers et al. (eds), *Pascual Jordan (1902–1980): Mainzer Symposium zum 100. Geburtstag*, Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte, Berlin, s. 69–81.
- Beyler R.H., 1994, *From positivism to organicism: Pascual Jordan's interpretations of modern physics in cultural context*, Harvard University Press, Cambridge.
- Beyler R.H., 1996, *Targeting the organism: the scientific and cultural context of Pascual Jordan's quantum biology, 1932–1947*, „Isis”, 2(87), s. 248–273.
- Bleuler P.E., 1933, *Die Beziehungen der neueren physikalischen Vorstellungen zur Psychologie und Biologie*, „Viertel Jahrschrift der naturforschenden Gesellschaft in Zurich”, 78, s. 152–197.
- Bleuler P.E., 1933, *Die Mneme als Grundlage des Lebens und der Psyche*, „Die Naturwissenschaften”, 5–7, s. 100–109.
- Bleuler P.E., 1931, *Mechanismus-Vitalismus-Mnemismus*, Julius Springer, Berlin.
- Bohm D., 1969, *Some remarks on the notion of order* [w:] C.H. Waddington (ed.), *Towards a theoretical biology. Vol. 2*, Edinburgh University Press, Edinburgh, s. 18–40.
- Bohr N., 1963, *Biologia a fizyka atomowa* [w:] N. Bohr, *Fizyka atomowa a wiedza ludzka*, tłum. W. Staszewski, S. Szpikowski, A. Teske, PWN, Warszawa, s. 26–39.

- Bohr N., 1963, *Fizyka a zagadnienie życia* [w:] N. Bohr, *Fizyka atomowa a wiedza ludzka*, tłum. W. Staszewski, S. Szpikowski, A. Teske, PWN, Warszawa, s. 150–151.
- Bohr N., 1963, *Jedność wiedzy* [w:] N. Bohr, *Fizyka atomowa a wiedza ludzka*, tłum. W. Staszewski, S. Szpikowski, A. Teske, PWN, Warszawa, s. 103–124.
- Bohr N., 1999, *Light and life revisited* [w:] D. Favrholt (ed.), *Niels Bohr. Collected works. Vol. 10. Complementarity beyond physics (1928–1962)*, Elsevier, Amsterdam, s. [164]–[169].
- Bohr N., 1998, *Physical models and living organisms* [w:] J. Faye, H.J. Folse (eds), *Causality and complementarity. Supplementary papers. Vol. IV. The philosophical writings of Niels Bohr*, Ox Bow Press, Woodbridge, s. 186–188.
- Bohr N., 1963, *Światło i życie* [w:] Niels Bohr, *Fizyka atomowa a wiedza ludzka*, tłum. W. Staszewski, S. Szpikowski, A. Teske, PWN, Warszawa, s. 12–25.
- Bohr N., 1961, *The quantum postulate and the recent development of atomic theory* [w:] N. Bohr, *Atomic theory and the description of nature*, Cambridge University Press, Cambridge, s. 52–91.
- Booger F.C., Bruggeman F.J., Hofmeyr J.-H. S., Westerhoff H.V., 2007, *Afterthoughts as foundations for systems biology* [w:] F.C. Booger, F.J. Bruggeman, J.-H. S. Hofmeyr, H.V. Westerhoff (eds), *Systems biology. Philosophical foundations*, Elsevier, Amsterdam, s. 321–336.
- Bragg M., Gardiner R., 2004, *Na barkach Gigantów. Wielcy badacze i ich odkrycia od Archimidesa do DNA*, tłum. J. Kuryłowicz, Prószyński i S-ka, Warszawa.
- Brenner S., 1998, *Biological computation* [w:] G.R. Bock, J.A. Goode (eds), *The limits of reductionism in biology*, Wiley, Chichester, s. 106–116.
- Brigandt I., Love A., 2010, E.N. Zalta (eds), *Reductionism in biology* [w:] *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <http://plato.stanford.edu/archives/fall2010/entries/molecular-biology> (13.06.2015).
- Brillouin L., 1969, *Nauka a teoria informacji*, PWN, Warszawa.
- Brillouin L., 1974, *Termodynamika – cybernetyka – życie*, cz. I, tłum. K. Malinowski, „Problemy”, 11, s. 36–38.
- Brillouin L., 1974, *Termodynamika – cybernetyka – życie*, cz. II, tłum. K. Malinowski, „Problemy”, 12, s. 37–39.
- Broad C.D., 1923, *The Mind and its place in nature*, Brace & Company–Taylor & Kegan Paul, Trench, Trubner, New York–London.
- Brockman J., 1996, *Problem początków* [w:] J. Brockman (red.), *Trzecia Kultura. Nauka u progu trzeciego tysiąclecia*, tłum. P. Amsterdamski, J. i M. Jannaszowie, M. Ryszkiewicz, M. Tempczyk, W. Turopolski, CIS, Warszawa, s. 359–362.
- Buchachenko A.L., 2013, *Reductionism is a criterion of truth but not a road to the temple*, „Herald of the Russian Academy of Sciences”, 6(83), s. 538–541.
- Budenholzer F., 2005, *What is life? – current scientific and philosophical perspectives*, „Method: Journal of Lonergan Studies”, 2(23), s. 127–147.
- Butler J.A.V., 1946, *Life and the second law of thermodynamics*, „Nature”, 158, s. 153–154.
- Butryn S., 2004, *Wpływ poglądów filozoficznych Nielsa Bohra na charakter kopenhaskiej interpretacji mechaniki kwantowej*, „Zagadnienia Naukoznawstwa”, 4(162), s. 699–711.
- Bünning E., 1935, *Sind Organismen mikrophysikalische Systeme? (Entgegnung an P. Jordan)*, „Erkenntnis”, 5, s. 337–347.
- Cairns J., Stent G.S., Watson J.D. (eds), 2007, *Phage and the origins of molecular biology*, Cold Spring Harbor Laboratory Press, Cold Spring Harbor Laboratory Press, New York.

- Carlson E.A., 1971, *An unacknowledged founding of molecular biology: H.J. Muller's contributions to gene theory*, „Journal of the History of Biology”, 4, s. 149–170.
- Carlson E.A., 1996, *The gene: a critical history*, W.B. Saunders Company, Philadelphia–London.
- Carroll S., 2017, *Nowa perspektywa. Pochodzenie życia, świadomości i wszechświata*, tłum. U. i M. Seweryńscy, Prószyński i S-ka, Warszawa.
- Ceccarelli L., 2001, *Shaping science with rhetoric. The cases of Dobzhansky, Schrödinger, and Wilson*, The University of Chicago Press, Chicago–London.
- Chadarevian S. de, 2003, *Designs for life: molecular biology after World War II*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Chong L., R.L. Bryan, 2002, *While-istic biology*, „Science”, 295, s. 1661.
- Chorąży M., 2011, *Wprowadzenie do biologii systemów*, „Nauka”, 1, s. 59–84.
- Clayton Ph., 2009, *Conceptual foundations of emergence theory* [w:] Ph. Clayton, P. Davies (eds), *The re-emergence of emergence. The emergentist hypothesis from science to religion*, Oxford University Press, Oxford, s. 1–31.
- Cobb M., 2017, *Największa tajemnica życia. Jak rozszyfrowano kod genetyczny*, tłum. A. Tuz, Prószyński i S-ka, Warszawa.
- Cohen S.S., 1975, *The origins of molecular biology. Review: 'The path to the double helix', by R. Olby*, „Science”, 187, s. 827–830.
- Conn H.W., 1899, *The story of the living machine*, D. Appleton and Company, New York.
- Corning P.A., 2008, *What is life? Among other things, it's a synergistic effect!*, „Cosmos and History: The Journal of Natural and Social Philosophy”, 1–2(4), s. 233–243.
- Corning P.A., Kline S.J., 1998, *Thermodynamics, information and life revisited, part I: to be or entropy*, „Systems Research and Behavioral Science”, 15, s. 273–295.
- Coster H.G.L., 1981, *Thermodynamics of life processes*, New South Wales University Press, Kensington.
- Crick F., 2004, *Of molecules and men*, Prometheus Books, New York.
- Crick F.H.C., 1965, *Recent research in molecular biology: introduction*, „British Medical Bulletin”, 21, s. 183–186.
- Crick F., 1996, *Szalona pogoń. W poszukiwaniu tajemnicy życia*, tłum. P. Golik, MARA-BUT–Oficyna Wydawnicza VOLUMEN, Gdańsk–Warszawa.
- Crutchfield J.P., Farmer J.D., Packard N.H., Shaw R.S., 1986, *Chaos*, „Scientific American”, 12(254),
http://csc.ucdavis.edu/~chaos/courses/ncaso/Readings/Chaos_SciAm1986/Chaos_SciAm1986.html (15.07.2014).
- Darden L., Tabery J., *Molecular Biology* [w:] E.N. Zalta (ed.), The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Fall 2010 Edition), <http://plato.stanford.edu/archives/fall2010/entries/molecular-biology/> (20.11.2014).
- Darlington C.D., 1939, *The evolution of genetic systems*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Darlington C.D., 1953, *The facts of life*, George Allen & Unwin, London.
- Darlington C.D., 1945, *Untitled review of 'What is life?', by E. Schrödinger*, „Discovery”, 6, s. 126.
- Davies P.C.W., 2008, *A quantum origin of life?* [w:] A.K. Pati, P.C.W. Davies, D. Abbott (eds), *Quantum aspects of life*, Imperial College Press, London, s. 3–18.
- Davies P.C.W., 2006, *Bóg i nowa fizyka*, tłum. P. Amsterdamski, Cyklady, Warszawa.
- Davies P.C.W., 2004, *Does quantum mechanics play a non-trivial role in life?*, „Biosystems”, 78, s. 69–70.

- Davies P.C.W., 1996, *Droga syntezy* [w:] J. Brockman (red.), *Trzecia Kultura. Nauka u progu trzeciego tysiąclecia*, tłum. P. Amsterdamski, J. i M. Jannaszowie, M. Ryszkiewicz, M. Tempczyk, W. Turopolski, CIS, Warszawa, s. 418–426.
- Davies P.C.W., 2004, *Emergent biological principles and the computational properties of the universe*, „Complexity”, 2(10), s. 11–15.
- Davies P.C.W., 2003, *Introduction: toward an emergentist worldview* [w:] N.H. Gregersena (ed.), *From complexity to life. On the emergence of life and meaning*, Oxford University Press, Oxford, s. 3–16.
- Davies P.C.W., 2014, *Kosmiczny projekt*, tłum. A. Bielaczyc, Copernicus Center Press, Kraków.
- Davies P.C.W., 2013, *Milczenie Gwiazd. Poszukiwania pozaziemskiej inteligencji*, tłum. U. i M. Seweryńscy, Prószyński i S-ka, Warszawa.
- Davies P., 2009, *Preface* [w:] Ph. Clayton, P. Davies (eds), *The re-emergence of emergence. The emergentist hypothesis from science to religion*, Oxford University Press, Oxford, s. ix–xiv.
- Davies P., 1999, *The fifth miracle. The search for the origin and meaning of life*, Simon & Schuster, New York.
- Davies P.C.W., 1989, *The physics of complex organisation* [w:] B. Goodwin, P. Saunders (eds), *Theoretical biology: epigenetic and evolutionary order from complex systems*, Edinburgh University Press, Edinburgh, s. 101–111.
- De Klerk G.J.M., 1979, *Mechanism and vitalism. A history of the controversy*, „Acta Biotheoretica”, 1(28), s. 1–10.
- Deichmann U., 2007, *A brief review of the early history of genetics and its relationship to physics and chemistry* [w:] S. Wenkel, U. Deichmann (eds), *Max Delbrück and Cologne. An early chapter of German molecular biology*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., New Jersey–London, s. 3–18.
- Delbrück M., 1949, *A physicist looks at biology*, Yale University Press, New Haven.
- Delbrück M., 1970, *A physicist's renewed look at biology: 20 years later*, „Science”, 168, s. 1312–1315.
- Delbrück M., 1976, *Light and life III*, „Carlsberg Research Communications”, 6(41), s. 299–309.
- Delbrück M., 1986, *Mind from matter. An essay on evolutionary epistemology*, Blackwell Scientific Publications, Victoria.
- Delbrück M., 1946, *Problems of modern biology in relation to atomic physics. A series of lectures given at the Vanderbilt University School of Medicine, April and May 1944*, Nashville.
- Delbrück M., 1940, *Statistical fluctuations in autocatalytic reactions*, „The Journal of Chemical Physics”, 8(1), s. 120–124.
- Delbrück M., 1945, *The burst size distribution in the growth of bacterial viruses (Bacteriophages)*, „Journal of Bacteriology”, 50, s. 131–135.
- Delbrück M., 1945, *What is life? and what is truth? A review of 'What is life?', by E. Schrödinger*, „Quarterly Review of Biology”, 20, s. 370–372.
- Delbrück M., Bailey W.T., 1946, *Induced mutations in bacterial viruses*, „Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology”, 11, s. 33–37.
- Delbrück M., Delbrück M.B., 1948, *Bacterial viruses and sex*, „Scientific American”, 7, s. 111–115.
- Delbrück M., Timofiejew-Riesowski N., Zimmer K., 1996, *O prirode gennyh mutacij i strukture gena* [w:] N. Timofiejew-Riesowski, *Izbrannye trudy*, Medicina, Moskva, s. 105–150.

- Depew D., Weber B., 1995, *Darwinism evolving. Systems dynamics and the genealogy of natural selection*, A Bradford Book The MIT Press, Cambridge–Massachusetts–London.
- Descartes R., 1989, *Człowiek. Opis ciała ludzkiego*, tłum. A. Bednarczyk, PWN, Warszawa.
- Dobzhansky T., Ayala F.J., Stebbins G.L., Valentine J.W., 1977, *Evolution*, W.H. Freeman & Company, San Francisco.
- Domondon A.T., 2006, *Bringing physics to bear on the phenomenon of life: the divergent positions of Bohr, Delbrück, and Schrödinger*, „Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences”, 37, s. 433–458.
- Donnan F.G., 1936, *Integral analysis and the phenomena of life*, „Acta Biotheoretica”, II, s. 1–10.
- Doyle R., 1992, *Mr. Schrödinger inside himself*, „Qui Parle”, 2(5), s. 1–20.
- Driesch H., 1905, *Der Vitalismus als Geschichte und als Lehre*, J. Barth, Leipzig.
- Driessen A., 2014, *Life and quantum biology, an interdisciplinary approach*, Cornell University Library, <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1109/1109.2584.pdf> (15.06.2016).
- Dronamraju K.R., 1999, *Erwin Schrödinger and the origins of molecular biology*, „Genetics”, 153, s. 1071–1076.
- Dupré J., 2010, *It is not possible to reduce biological explanations to explanations in chemistry and/or physics* [w:] F.J. Ayala, R. Arp (eds), *Contemporary debates in philosophy of biology*, Wiley-Blackwell, Malden–Oxford–Chichester, s. 32–47.
- Dupré J., 2014, *Processes of life. Essays in the philosophy of biology*, Oxford University Press, Oxford.
- Dürr H.-P., 2002, *Inanimate and animate matter: orderings of immaterial connectedness – the physical basis of life* [w:] H.-P. Dürr, F.-A. Popp, W. Schommers (eds), *What is life? Scientific approaches and philosophical positions*, World Scientific, New Jersey–London–Singapore–Hong Kong, s. 145–166.
- Dyson F., 1993, *Początki życia*, tłum. P. Golik, PIW, Warszawa.
- Elkana Y., 1992, *Erwin Schrödinger as historian – notes towards an interpretation* [w:] J. Götschl (ed.), *Erwin Schrödinger's world view. The dynamics of knowledge and reality*, Springer Science+Business Media, Dordrecht, s. 115–134.
- Ellis E.L., Delbrück M., 1939, *The growth of bacteriophage*, „The Journal of General Physiology”, 22, s. 365–384.
- Elsasser W.M., 1969, *Acausal phenomena in physics and biology, a case for reconstruction*, „American Scientist”, 57, s. 502–516.
- Elsasser W.M., 1987, *Eine Kritik am Reduktionismus* [w:] B.-O. Küppers (ed.), *Leben = Physik + Chemie? Das Lebendige aus der Sicht bedeutender Physiker*, Piper, München, s. 211–236.
- Elsasser W.M., 1962, *Physical aspects of non-mechanistic biological theory*, „Journal of Theoretical Biology”, 2(3), s. 164–191.
- Elsasser W.M., 1998, *Reflections on a theory of organisms: holism in biology*, John Hopkins, Baltimore.
- Elsasser W.M., 1961, *Quanta and the concept of organismic law*, „Journal of Theoretical Biology”, 1(1), s. 27–58.
- Elsasser W.M., 1964, *Synopsis of organismic theory*, „Journal of Theoretical Biology”, 1(7), s. 53–67.
- Elsasser W.M., 1974, *The transition from theoretical physics into theoretical biology* [w:] A.D. Breck, W. Yourgrau (eds), *History, and natural philosophy*, Plenum Press, New York, s. 135–163.
- Elsasser W., 1958, *The physical foundation of biology. An analytical study*, Pergamon Press, London.

- Favrholdt D., 1999, *Introduction* [w:] D. Favrholdt (ed.), *Niels Bohr. Collected works. Vol. 10. Complementarity beyond physics (1928–1962)*, Elsevier, Amsterdam, s. [3]–[26].
- Faye J., 1991, *Bohr on biology* [w:] *Niels Bohr: his heritage and legacy. An anti-realist view of quantum mechanics*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, s. 157–163.
- Faye J., 1988, *The Bohr-Høffding relationship reconsidered*, „Studies in History and Philosophy of Science”, 1(19), s. 321–346.
- Feynman R., 1982, *Simulating physics with computers*, „International Journal of Theoretical Physics”, 6/7(21), s. 467–488.
- Fischbeck H.-J., 2002, *On the essence of life – a physical but nonreductionistic examination* [w:] H.-P. Dürr, F.-A. Popp, W. Schommers (eds), *What is life? Scientific approaches and philosophical positions*, World Scientific, New Jersey–London–Singapore–Hong Kong, s. 217–233.
- Fischer E.P., Lipson C., 1988, *Thinking about science. Max Delbrück and the origins of molecular biology*, W.W. Norton & Company, New York–London.
- Fleming D., 1969, *Émigré physicists and the biological revolution* [w:] D. Fleming, B. Bailyn (eds), *The intellectual migration. Europe and America, 1930–1960*, Mass, Cambridge, s. 152–189.
- Flitney A.P., Abbott D., 2008, *A semi-quantum version of the game of life* [w:] A.K. Pati, P.C.W. Davies, D. Abbott (eds), *Quantum aspects of life*, Imperial College Press, London, s. 233–250.
- Fogel B., 2011, *Translator's preface* [w:] P.R. Sloan, B. Fogel (eds), *Creating a physical biology. The Three-Man Paper and early molecular biology*, The University of Chicago Press, Chicago–London, s. 213–220.
- Folse H.J., 1990, *Complementarity and the description of nature in biological science*, „Biology and Philosophy”, 5, s. 211–224.
- Frank P., 1935, *Jordan und der radikale Positivismus*, „Erkenntnis”, 5, s. 184.
- Freundlich H., 1924, *Kolloidchemie und Biologie*, „Die Naturwissenschaften”, 22, s. 233–239.
- Fröhlich H., 1983, *Coherence in biology* [w:] H. Fröhlich, F. Kremer (eds), *Coherent excitations in biological systems*, Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg–New York–Tokyo, s. 1–5.
- Fröhlich H., 1988, *Theoretical physics and biology* [w:] H. Fröhlich (ed.), *Biological coherence and response to external stimuli*, Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg–New York–London–Paris–Tokyo, s. 1–24.
- Fuerst J.A., 1982, *The role of reductionism in the development of molecular biology: peripheral or central?*, „Social Studies of Science”, 1(12), s. 241–278.
- Gagliasso E., 2003, *The metamorphosis of holism* [w:] V. Benci, P. Cerrai, P. Freguglia, G. Israel, C. Pellegrini (eds), *Determinism, holism, and complexity*, Springer Science+Business, New York, s. 339–348.
- Gallagher R., Appenzeller T., 1999, *Beyond reductionism*, „Science”, 284, s. 79.
- Gamow G., 1953, *Mr Tompkins learns the facts of life*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Gamow G., 1961, *What is life?*, „Transactions of the Bose Research Institute”, 24(4), s. 185–192.
- Gamow G., Yčas M., 1968, *Mr Tompkins inside himself. Adventures in the new biology*, George Allen & Unwin LTD, London.
- Gamow G., Yčas M., 1958, *The cryptographic approach to the problem of protein synthesis* [w:] H.P. Yockey, R.L. Platzman, H. Quastler (eds), *Symposium on information theory*

- in biology (Gatlinburg, Tennessee, October 29–31, 1956), Pergamon Press, London–New York–Paris–Los Angeles, s. 63–69.
- Ganten D., 2007, *What is life? On Erwin Schrödinger, his cat, and the Journal of Molecular Medicine*, „Journal of Molecular Medicine”, 12(85), s. 1291–1292.
- Gánti T., 2003, *The Principles of Life*, Oxford University Press, Oxford.
- Gare A., 2008, *Approaches to the question what is life?: Reconciling theoretical biology with philosophical biology*, „Cosmos and History: The Journal of Natural and Social Philosophy”, 1–2(4), s. 53–77.
- Gatherer D., 2010, *So what do we really mean when we say that systems biology is holistic?*, „BMC Systems Biology”, 4(22), <http://link.springer.com/article/10.1186/1752-0509-4-22>, (25.07.2015).
- Gayon J., 2010, *Defining life: synthesis and conclusions*, „Origins of Life and Evolution of Biospheres”, 40, s. 231–244.
- Gilbert S.F., Sarkar S., 2000, *Embracing complexity: organicism for the 21st century*, „Developmental Dynamics”, 1(219), s. 1–9.
- Gleick J., 2012, *Informacja. Bit, wszechświat, rewolucja*, tłum. G. Siwek, Znak, Kraków.
- Godfrey-Smith P., 2014, *Philosophy of biology*, Princeton University Press, Princeton–Oxford.
- Godula G., 1998, *Delbrück Max* [w:] Z. Otałęga (red.), *Encyklopedia biologiczna*, t. II, Opreś, Kraków, s. 359.
- Goel A., 2008, *Molecular evolution: a role for quantum mechanics in the dynamics of molecular machines that read & write DNA* [w:] A.K. Pati, P.C.W. Davies, D. Abbott (eds), *Quantum aspects of life*, Imperial College Press, London, s. 97–108.
- Goldenfeld N., Woese C., 2007, *Biology's next revolution*, „Nature”, 445, s. 369.
- Goldenfeld N., Woese C.R., 2011, *Life is physics: evolution as a collective phenomenon far from equilibrium*, „Annual Review of Condensed Matter Physics”, 2, s. 375–399.
- Goodenough U., 2005, *Reductionism and holism, change and selection, mechanism and mind*, „Zygon”, 2(40), s. 369–380.
- Goswami A., 2001, *The physicists' view of nature. Part 2. The quantum revolution*, Springer Science+Business Media, New York.
- Góra B., 1975, *Struktury biologiczne w nauce i nauczaniu. Studium z biologii teoretycznej i dydaktyki biologii*, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa.
- Götschl J., Leinfellner W., 1992, *Introduction* [w:] J. Götschl (ed.), *Erwin Schrödinger's world view. The dynamics of knowledge and reality*, Springer Science+Business Media, Dordrecht, s. 1–14.
- Gray J., 1933, *The mechanical view of life*, „Nature”, 132, s. 661–664.
- Grene M., 1961, *The logic of biology* [w:] *The logic of personal knowledge. Essays presented to Michael Polanyi on his seventieth birthday, 11th March 1961*, Routledge & Kegan Paul, London, s. 191–205.
- Gribbin J., 2014, *Skąd się wziął kot Schrödingera. Geniusz z Wiednia i kwantowa rewolucja*, tłum. S. Szymański, Prószyński i S-ka, Warszawa.
- Grössing G., Zeilinger A., 1988, *Structures in quantum cellular automata*, „Physica B”, 1–2 (151), s. 366–370.
- Grössing G., Zeilinger A., 1988, *Quantum cellular automata*, „Complex Systems”, 2, s. 197–208.
- Gumbrecht H.U., 2011, *The sustainability of Erwin Schrödinger's thought* [w:] H.U. Gumbrecht, R.P. Harrison, M.R. Hendrickson, R.B. Laughlin (eds), *What is life? The intellectual pertinence of Erwin Schrödinger*, trans. L.A. Villareal, Stanford University Press, Stanford, s. 1–11.

- Guye Ch.-E., 1947, *La second principe de la thermodynamique et l'évolution physico-chimique des organismes vivants* [w:] Ch.-E. Guye, *L'évolution physico-chimique*, Lausanne Librairie de l'Université, Lausanne, s. 97–139.
- Guye Ch.-E., 1925, *Physico-chemical evolution*, trans. J.R. Clarke, Methuen & Co. LTD., London.
- Haeckel E., 1906, *Monizm jako węzeł między religią a wiedzą. (Credo przyrodnika)*, tłum. M. Rosenfeld, Kraków.
- Haeckel E., 1960, *Zasady morfologii ogólnej organizmów*, tłum. J. Nowakowski i F. Piątek, PWN, Warszawa.
- Haldane J.B.S., 1945, *A physicist looks at genetics. A review of 'What is life?', by E. Schrödinger*, „Nature”, 155, s. 375–376.
- Haldane J.S., 1921, *Mechanism, life and personality. An examination of the mechanistic theory of life and mind*, John Murray, London.
- Haldane J.B.S., 1941, *New paths in genetics*, Allen & Unwin, London.
- Haldane J.B.S., 1934, *Quantum mechanics as a basis for philosophy*, „Philosophy of Science”, 1(1), s. 78–98.
- Hall O., 1998, *Preface* [w:] W.M. Elsasser, *Reflections on a theory of organisms: holism in biology*, John Hopkins, Baltimore, s. xxv–xxvii.
- Hameroff S., 2008, *That's life! – The geometry of π electron clouds* [w:] A.K. Pati, P.C.W. Davies, D. Abbott (eds), *Quantum aspects of life*, Imperial College Press, London, s. 403–434.
- Hartmann M., 1956, *Die Kausalität in Physik und Biologie* [w:] M. Hartmann, *Gesammelte Vorträge und Aufsätze. II. Naturphilosophie*, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, s. 144–156.
- Hartmann M., 1956, *Philosophie der Naturwissenschaften* [w:] M. Hartmann, *Gesammelte Vorträge und Aufsätze. II. Naturphilosophie*, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, s. 95–129.
- Hartmann M., 1956, *Prozeß und Gesetz in Physik und Biologie* [w:] M. Hartmann, *Gesammelte Vorträge und Aufsätze. II. Naturphilosophie*, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, s. 226–237.
- Hartmann M., 1956, *Quantenphysik und Biologie* [w:] M. Hartmann, *Gesammelte Vorträge und Aufsätze. II. Naturphilosophie*, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, s. 185–190.
- Hartmann M., 1970, *Was ist Leben?*, „Philosophia Naturalis”, 6, s. 125–140.
- Hausmann R., 2002, *To grasp the essence of life. A history of molecular biology*, trans. C. and R. Hausmann, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Hayes W., 1985, *Max Delbrück and the birth of molecular biology*, „Journal of Genetics”, 1(64), s. 69–84.
- Hayes W., 1993, *Max Ludwig Henning Delbrück (1906–1981). A biographical memoir*, National Academy of Sciences, Washington.
- Heilbron J.L., 1988, *The earliest missionaries of the Copenhagen spirit* [w:] E. Ullmann-Margalit (ed.), *Science in reflection. The Israel Colloquium: Studies in History, Philosophy, and Sociology of Science. Volume 3*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, s. 201–233.
- Hein H., 1969, *Molecular biology vs. organicism: the enduring dispute between mechanism and vitalism*, „Synthese”, 2(20), s. 238–253.
- Hein H., 1972, *The endurance of the mechanism-vitalism controversy*, „Journal of the History of Biology”, 1(5), s. 159–188.
- Heisenberg W., 1987, *Część i całość. Rozmowy o fizyce atomu*, tłum. K. Napiórkowski, PIW, Warszawa.

- Heisenberg W., 1942, *Gesammelte Werke. Collected Works. Abteil. C. Allgemeinverständliche Schriften. Band IV. Biographisches und Kernphysik*, Piper, München.
- Heitler W., 1987, *Über die Komplementarität von lebloser und lebender Materie* [w:] B.-O. Küppers (ed.), *Leben = Physik + Chemie? Das Lebendige aus der Sicht bedeutender Physiker*, München, Piper, s. 189–210.
- Heller M., Pabjan T., 2007, *Elementy filozofii przyrody*, Biblos, Tarnów.
- Heller M., Lubański M., Ślaga S., 1997, *Zagadnienia filozoficzne współczesnej nauki. Wstęp do filozofii przyrody*, ATK, Warszawa.
- Henderson M., 2010, *50 teorii genetyki, które powinienś znać*, tłum. K. Tońska, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa.
- Hendrickson M.R., 2011, *Exorcizing Schrödinger's ghost. Reflections on 'What is life?' and its surprising relevance to cancer biology* [w:] H.U. Gumbrecht, R.P. Harrison, M.R. Hendrickson, R.B. Laughlin (eds), *What is life? The intellectual pertinence of Erwin Schrödinger*, trans. L.A. Villareal, Stanford University Press, Stanford, s. 45–103.
- Hinshelwood C.H., Dean A.C.R., 1966, *Growth, function and regulation in bacterial cells*, Oxford University Press, Oxford.
- Hinshelwood C.H., 1946, *The chemical kinetics of the bacterial cell*, The Clarendon Press, Oxford.
- Holliday R., 2006, *Physics and the origins of molecular biology*, „Journal of Genetics”, 85, s. 93–97.
- Hoyningen-Huene P., 1991, *Theory of antireductionist arguments: the Bohr case study* [w:] E. Agazzi (ed.), *The problem of reductionism in Science*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, s. 51–70.
- Hoyningen-Huene P., 1994, *Niels Bohr's argument for the irreducibility of biology to physics* [w:] J. Faye, H.J. Folse (eds), *Niels Bohr and contemporary philosophy*, Springer Science+Business Media, Dordrecht, s. 231–255.
- Hull D.L., 1974, *The philosophy of biological science*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Hussey K., 2002, *Schrödinger's contributions to molecular biology*, „Dartmouth Undergraduate Journal of Science”, 2(4), s. 20–22.
- Huxley T., 1893, *The physical basis of life*, Macmillan, London.
- Irzhak L.I., 2005, *Christian Bohr. (On the occasion of the 150th anniversary of his birth)*, „Human Physiology”, 3(31), s. 366–368.
- Jacobs J., 1986, *Teleology and reduction in biology*, „Biology and Philosophy”, 1(4), s. 389–399.
- Jensen P., 1934, *Kausalität, Biologie und Psychologie*, „Erkenntnis”, 4, s. 165–214.
- Joaquim L., Freire O. Jr., El-Hani Ch.N., 2015, *Quantum explorers: Bohr, Jordan, and Delbrück venturing into biology*, „Physics in Perspective”, 3(17), s. 236–250.
- Joglekar A., 2012, *Physicists in biology; and other quirks of the genomic age*, „Scientific American”, 10 December, 2012, <http://blogs.scientificamerican.com/the-curious-wave-function/physicists-in-biology-and-other-quirks-of-the-genomic-age/> (16.07.2015).
- Jordan P., 1936, *Anschauliche Quantentheorie. Eine Einführung in die Moderne Auffassung der Quantenerscheinungen*, Verlag von Julius Springer, Berlin.
- Jordan P., 1938, *Biologische Strahlenwirkung und Physik der Gene*, „Physikalische Zeitschrift”, 39, s. 345–366.
- Jordan P., 1948, *Die Physik und das Geheimnis des Organischen Lebens*, Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig.
- Jordan P., 1932, *Die Quantenmechanik und die Grundprobleme der Biologie und Psychologie*, „Die Naturwissenschaften”, 20, s. 815–821.

- Jordan P., 1938, *Die Verstärkertheorie der Organismen in ihrem gegenwärtigen Stand*, „Die Naturwissenschaften”, 33(38), s. 537–545.
- Jordan P., 1935, *Ergänzende Bemerkungen über Biologie und Quantenmechanik*, „Erkenntnis”, 5, s. 348–352.
- Jordan P., 1959, *La physique et le secret de la vie organique*, Albin Michel, Paris.
- Jordan P., 1944, *Physics of the 20th century*, trans. E. Oshry, Philosophical Library, New York.
- Jordan P., 1934, *Quantenphysikalische Bemerkungen zur Biologie und Psychologie*, „Erkenntnis”, 4, s. 215–252.
- Jordan P., 1938, *Über die Elementarprozesse der biologischen Strahlenwirkung*, „Radiologica”, 2, s. 16–35; 166–184.
- Jordan P., 1987, *Über die exobiologische Hypothese* [w:] B.-O. Küppers (ed.), *Leben = Physik + Chemie? Das Lebendige aus der Sicht bedeutender Physiker*, Piper, München, s. 159–188.
- Jordan P., 1937, *Über die Rolle atomphysikalischer Einzelprozesse im biologischen Geschehen*, „Radiologica”, 1, s. 21–25.
- Judson H.F., 1995, *The eighth day of creation. Makers of the revolution in biology*, Penguin Books, London.
- Jurand A., 1957, *Budowa żywej materii*, „Wiedza Powszechna”, Warszawa.
- Kaempffert W., 1953, *Explorations in science*, The Viking Press, New York.
- Kaneko K., 2006, *Life: an introduction to complex systems biology*, Springer, Berlin–Heidelberg–New York.
- Kauffman S., 2007, *Beyond reductionism: reinventing the sacred*, „Zygon”, 4(42), s. 903–914.
- Kauffman S., 1974, *Elsasser, generalized complementarity, and finite classes: a critique of his antireductionism* [w:] K.F. Schaffner, R. Cohen (eds), *Proceedings of the 1972 Biennial Meeting Philosophy of Science Association*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht–Boston, s. 57–65.
- Kauffman S.A., 2010, *What is life? Was Schrödinger right?* [w:] M.A. Bedau, C.E. Cleland (eds), *The nature of life. Classical and contemporary perspectives from philosophy and science*, Cambridge University Press, Cambridge, s. 374–391.
- Kay L.E., 1985, *Conceptual models and analytical tools: the biology of physicist Max Delbrück*, „Journal of the History of Biology”, 2(18), s. 207–246.
- Kay L.E., 1992, *Quanta of life: atomic physics and the reincarnation of phage*, „History and Philosophy of the Life Sciences”, 14, s. 3–21.
- Kay L.E., 1993, *The molecular vision of life. Caltech, The Rockefeller Foundation, and the rise of the new biology*, Oxford University Press, New York–Oxford.
- Kay L.E., 2000, *Who wrote the book of life? A history of the genetic code*, Stanford University Press, Stanford.
- Keller E.F., 2013, *Czas wykraczania poza gen*, tłum. A. Derra i in. , „AVANT”, 1(4), s. 217–233.
- Keller E.F., 2010, *It is possible to reduce biological explanations to explanations in chemistry and/or physics* [w:] F.J. Ayala, R. Arp (eds), *Contemporary debates in philosophy of biology*, Wiley-Blackwell, Malden–Oxford–Chichester, s. 19–31.
- Keller E.F., 1995, *Metaphors of twentieth-century biology*, Columbia University Press, New York.
- Keller E.F., 1990, *Physics and the emergence of molecular biology: a history of cognitive and political synergy*, „Journal of the History of Biology”, 3(23), s. 389–409.

- Keller E.F., 2000, *The century of the gene*, Harvard University Press, Cambridge.
- Kendrew J.C., 2007, *How molecular biology started* [w:] J. Cairns, G.S. Stent, J.D. Watson (eds), *Phage and the origins of molecular biology*, Cold Spring Harbor Laboratory Press, New York, s. 343–347.
- Kiberstis P., Roberts L., 2002, *It's not just the genes*, „Science Translational Medicine”, 296, s. 685.
- Kitano H., 2002, *Systems biology: a brief overview*, „Science”, 295, s. 1662–1664.
- Kitano H., 2001, *Systems biology: toward system-level understanding of biological systems* [w:] H. Kitano (ed.), *Foundations of systems biology*, The MIT Press, Cambridge–London, s. 1–36.
- Kitcher P., 1984, *1953 and all that. A tale of two sciences*, „The Philosophical Review”, 3 (93), s. 335–373.
- Klitzing L. von, 2002, *Communication – basis of life* [w:] H.-P. Dürr, F.-A. Popp, W. Schommers (eds), *What is life? Scientific approaches and philosophical positions*, World Scientific, New Jersey–London–Singapore–Hong Kong, s. 167–177.
- Kopp C., 1980, *Oral history: Max Delbrück-how it was*, „Engineering and Science”, 5(43), s. 21–26.
- Korn R.W., 2005, *The emergence principle in biological hierarchies*, „Biology and Philosophy”, 1(20), s. 137–151.
- Kozuschek W., 2008, *Jan Ewangelista Purkinje (1787–1869) – pierwszy dyrektor Instytutu Zoologii we Wrocławiu*, „Seminaria Naukowe Wrocławskiego Towarzystwa Naukowego”, 7(58), s. 69–86.
- Krawczyńska T., 1999, *Kwantowe aspekty biologii według Erwina Schrödingera*, „Zagadnienia Filozoficzne w Nauce”, 24, s. 148–149.
- Krimbas C.B., Paul D.B., 1992, *Mikołaj W. Timofiejew-Riesowski*, tłum. A. Hoffman, „Świat Nauki”, 4, s. 60–67.
- Kuhn T.S., 1968, *Struktura rewolucji naukowych*, tłum. H. Ostromecka, PWN, Warszawa.
- Kuźnicki L., 2006, *Granice nauki*, Dom Wydawniczy ELIPSA, Warszawa.
- Küppers B.-O., 1987, *Einleitung. Inwieweit lassen sich die Lebenserscheinungen physikalisch-chemisch erklären?* [w:] B.-O. Küppers (ed.), *Leben = Physik + Chemie? Das Lebendige aus der Sicht bedeutender Physiker*, Piper, München 1987, s. 9–34.
- Küppers B.-O. (ed.), 1991, *Geneza informacji biologicznej. Filozoficzne problemy powstania życia*, tłum. W. Ługowski, PWN, Warszawa.
- Küppers B.-O. (ed.), 1987, *Leben = Physik + Chemie? Das Lebendige aus der Sicht bedeutender Physiker*, Piper, München.
- Küppers B.-O., 1985, *Molecular theory of evolution: outline of a physico-chemical theory of the origin of life*, trans. P. Woolley, Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg–New York–Tokyo.
- Küppers B.O., 1992, *Understanding complexity* [w:] A. Beckermann, H. Flohr, J. Kim (eds), *Emergence or reduction? – Essays on the prospects of nonreductive physicalism*, Walter de Gruyter, Berlin–New York, s. 241–256.
- Lagerspetz K.Y.H., 1969, *Individuality and creativity: is biology different?*, „Synthese”, 2(20), s. 254–260.
- Lamettie J., 1984, *Człowiek-maszyna*, tłum. S. Rudniański, PWN, Warszawa.
- Lane N., *Pytanie o życie. Energia, ewolucja i pochodzenie życia*, tłum. A. Tuz, Prószyński i S-ka, Warszawa 2016.
- László E., 1978, *Systemowy obraz świata*, tłum. U. Niklas, Państwowy Instytut Wydawniczy, Warszawa.

- Lederberg J., 1996, *What the Double Helix (1953) has meant for basic biomedical science* [w:] S. Sarkar (ed.), *The philosophy and history of molecular biology: new perspectives*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht–Boston–London, s. 15–26.
- Leinfellner W., 1992, *Schrödinger, the self and the genes* [w:] J. Götschl (ed.), *Erwin Schrödinger's world view. The dynamics of knowledge and reality*, Springer Science+Business Media, Dordrecht, s. 87–98.
- Lenartowicz P., 2009, *Sens i zakres pojęcia informacji genetycznej* [w:] J. Koszteyn (red.), *Vivere et Intelligere. Wybrane prace Piotra Lenartowicza SJ wydane z okazji 75-lecia jego urodzin*, WAM, Kraków, s. 133–144.
- Lenartowicz P., 2009, *Trzy koncepcje dynamiki biologicznej: arystotelesowska, neo-darwinowska, inteligentnego projektu* [w:] J. Koszteyn (red.), *Vivere et Intelligere. Wybrane prace Piotra Lenartowicza SJ wydane z okazji 75-lecia jego urodzin*, WAM, Kraków, s. 285–303.
- Letter from Bohr to Jordan, 23 June 1931, 1999 [w:] D. Favrholt (ed.), *Niels Bohr. Collected works. Vol. 10. Complementarity beyond physics (1928–1962)*, Elsevier, Amsterdam, s. [527]–[528].
- Lewes G.H., 1875, *The problems of life and mind. Vol. II*, James R. Osgood & Company, Boston.
- Libchaber A.J., 1999, *Biology and the flow of molecular information*, „Pramana”, 1(53), s. 85–91.
- Lloyd S., 2008, *Quantum mechanics and emergence* [w:] A.K. Pati, P.C.W. Davies, D. Abbott (eds), *Quantum aspects of life*, Imperial College Press, London, s. 19–30.
- Locy W., 1934, *Badacze życia*, tłum. J. Wilczyński, Gebethner i Wolff, Warszawa.
- Loeb J., 2012, *The mechanistic conception of life. Biological essays*, The University of Chicago, Chicago.
- Loeb J., 1906, *Wstęp do fizjologii i psychologii porównawczej*, tłum. Z. Szymanowski, Księgarnia Naukowa w Warszawie, Warszawa.
- Longo G., 2009, *From exact sciences to life phenomena: Following Schrödinger and Turing on programs, life and causality*, „Information and Computation”, 207, s. 545–558.
- Looijen R.C., 2000, *Holism and reductionism in biology and ecology: the mutual dependence of higher and lower level research programmes*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht.
- Lorenz K., 1977, *Odwrotna strona zwierciadła. Próba historii naturalnej ludzkiego poznania*, tłum. K. Wolicki, Państwowy Instytut Wydawniczy, Warszawa.
- Luisi P.L., 2010, *The emergence of life. From chemical origins to synthetic biology*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Luria S.E., Delbrück M., 1943, *Mutations of bacteria from virus sensitivity to virus resistance*, „Genetics”, 28, s. 491–511.
- Lwoff A., 1962, *Biological order*, MIT Press–Massachusetts Institute of Technology, Cambridge–Massachusetts.
- Łysenko T.D., 1948, *O sytuacji w biologii. Referat wygłoszony na Sesji Wszechzwiązkowej Akademii Nauk Rolniczych im. W.I. Lenina 31 lipca 1948 roku*, tłum. H. Birecka, Państwowy Instytut Wydawnictw Rolniczych, Warszawa.
- Mahner M., Bunge M., 1997, *Foundations of biophilosophy*, Springer-Verlag, Dordrecht.
- Malaterre Ch., 2013, *Life as an emergent phenomenon: from an alternative to vitalism to an alternative to reductionism* [w:] S. Normandin, Ch.T. Wolfe (eds), *Vitalism and the scientific image in post-enlightenment life science, 1800–2010*, Springer, Dordrecht, s. 155–178.

- Malaterre Ch., 2012, *Review: 'What is life? The intellectual pertinence of Erwin Schrödinger', by H.U. Gumbrecht, R.P. Harrison, M.R. Hendrickson, R.B. Laughlin*, „International Studies in the Philosophy of Science”, 2(26), s. 229–231.
- Manton I., 1945, *Comments on chromosome structure. A review of 'What is life?', by E. Schrödinger*, „Nature”, 155, s. 471–472.
- Moran F., Moreno A., Minch E., Montero F., 1997, *Further steps towards a realistic description of the essence of life*, „Artificial Life”, 5, s. 255–263.
- Markič O., 2004, *Causal emergentism*, „Acta Analytica”, 19(33), s. 65–81.
- Marcum J.A., 2009, *The conceptual foundations of systems biology: an introduction*, Nova Science Publishers, New York.
- Margulis L., Sagan D., 2000, *What is life?*, University of California Press, Berkeley–Los Angeles.
- Markus R.I., 1951, *Aleksander's philosophy: the emergence of qualities*, „Philosophy Phenomen Research”, 11, s. 58–74.
- May R., *Levels of organization in ecological systems* [w:] G.R. Bock, J.A. Goode, G.R. Bock, J.A. Goode (eds), *The limits of reductionism in biology*, Wiley, Chichester, s. 193–198.
- Mayr E., 1982, *The growth of biological thought. Diversity, evolution, and inheritance*, The Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge–London.
- Mayr E., 2002, *To jest biologia. Nauka o świecie ożywionym*, tłum. J. Szacki, Prószyński i S-ka, Warszawa.
- Mayr E., 1988, *Toward a new philosophy of biology. Observations of an evolutionist*, Harvard University Press, Cambridge.
- Mayr E., 2007, *What makes biology unique? Considerations on the autonomy of a scientific discipline*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Mazzocchi F., 2012, *Complexity and the reductionism-holism debate in systems biology*, „WIREs Systems Biology and Medicine”, 4(5), s. 413–427.
- Mączka J., 2002, *Wszecławiat strukturalny. Strukturalizm w dziele Joachima Metallmanna a strukturalizm współczesnej nauki*, Wyd. Diecezji Tarnowskiej, Tarnów.
- McCrea W., de Valera É., 1989, *Erwin Schrödinger and the Dublin Institute* [w:] C.W. Kilmister (ed.), *Schrödinger: centenary celebration of a polymath*, Cambridge University Press, Cambridge, s. 119–135.
- McElheny V.K., 2004, *Watson and DNA. Making a Scientific Revolution*, Basic Books, New York.
- McFadden J., 2015, *Mechanika kwantowa i biologia* [w:] J. Al-Khalili, *Kwanty. Przewodnik dla zdezorientowanych*, tłum. U. i M. Seweryńscy, Prószyński i S-ka, Warszawa, s. 259–260.
- McKaughan D.J., 2005, *The influence of Niels Bohr on Max Delbrück: revisiting the hopes inspired by "Light and Life"*, „Isis”, 96, s. 507–529.
- Mendelsohn E., 2001, *Edmund Beecher Wilson* [w:] E. Mendelsohn (ed.), *Life sciences in the twentieth century. Biographical portraits*, Charles Scribner's Sons, New York, s. 177–185.
- Mendelsohn E., 2001, *Edward Lawrie Tatum* [w:] E. Mendelsohn (ed.), *Life sciences in the twentieth century. Biographical portraits*, Charles Scribner's Sons, New York, s. 159–160.
- Mendelsohn E., 2001, *George Wells Beadle* [w:] E. Mendelsohn (ed.), *Life sciences in the twentieth century. Biographical portraits*, Charles Scribner's Sons, New York, s. 7–8.
- Mendelsohn E., 2001, *Hermann Joseph Muller* [w:] E. Mendelsohn (ed.), *Life sciences in the twentieth century. Biographical portraits*, Charles Scribner's Sons, New York, s. 124.
- Mendelsohn E., 2001, *Jacques Loeb* [w:] E. Mendelsohn (ed.), *Life sciences in the twentieth century. Biographical portraits*, Charles Scribner's Sons, New York, s. 108–110.

- Mendelsohn E., 2001, *John Desmond Bernal* [w:] E. Mendelsohn (ed.), *Life sciences in the twentieth century. Biographical portraits*, Charles Scribner's Sons, New York, s. 8–11.
- Mendelsohn E., 2001, *John Scott Haldane* [w:] E. Mendelsohn (ed.), *Life sciences in the twentieth century. Biographical portraits*, Charles Scribner's Sons, New York, s. 79–80.
- Mendelsohn E., 2001, *Otto Fritz Meyerhof* [w:] E. Mendelsohn (ed.), *Life sciences in the twentieth century. Biographical portraits*, Charles Scribner's Sons, New York, s. 116.
- Meyer[-Abich] A., 1926, *Das Mechanismus-Vitalismusproblem im Lichte neuerer logischer Forschung*, „Biologisches Zentralblatt”, 46, s. 213–229.
- Meyer[-Abich] A., 1968, *Die Überwindung des Mechanismus durch den Holismus* [w:] *Actes Du Huitième Congrès International de Philosophie à Prague (2–7 Septembre 1934)*, Kraus Reprint Limited, Nendeln, s. 39–46.
- Meyer[-Abich] A., 1935, *Krisenepochen und Wendepunkte des biologischen Denkens*, Gustav Fischer, Jena.
- Meyerhof O., 1934, *Betrachtungen über die naturphilosophischen Grundlagen der Physiologie*, „Die Naturwissenschaften”, 20, s. 311–314.
- Mill J.S., 1962, *System logiki dedukcyjnej i indukcyjnej*, t. I, tłum. Cz. Znamierowski, PWN, Warszawa.
- Misieć J., 1987, *Komplementarności zasada* [w:] Z. Cackowski, J. Kmita, K. Szaniawski, P.J. Smoczyński (red.), *Filozofia a nauka. Zarys encyklopedyczny*, Ossolineum, Warszawa, s. 305–313.
- Mitchell R., 2013, *Experimental life: vitalism in romantic science and literature*, The Johns Hopkins University Press, Baltimore.
- Mohr H., 1989, *Is the program of molecular biology reductionistic?* [w:] P. Hoyningen-Huene, F.M. Wuketits (eds), *Reductionism and systems theory in the life sciences. Some problems and perspectives*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht–Boston, s. 137–159.
- Monod J., 1979, *Przypadek i konieczność. Esej o filozofii biologii współczesnej*, tłum. J. Bukowski, Biblioteka Głosu, Warszawa.
- Mora P.T., 1963, *Urge and molecular biology*, „Nature”, 199(4890), s. 212–219.
- Morange M., 1998, *A history of molecular biology*, Harvard University Press, Cambridge.
- Morange M., 2006, *Post-genomics, between reduction and emergence*, „Synthese”, 3(151), s. 355–360.
- Morange M., 2011, *Recent opportunities for an increasing role for physical explanations in biology*, „Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences”, 42, s. 139–144.
- Morgan C.L., 1927, *Emergent evolution*, Williams & Norgate, London.
- Moss L., 2003, *What genes can't do*, MIT Press, Cambridge.
- Moore W., 1993, *Schrödinger: life and thought*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Mukherjee S., 2017, *Gen. Ukryta historia*, tłum. J. Dzierzgowski, Czarne, Wołowiec.
- Mukunda N., 1999, *Linking life to the quantum – Schrödinger's views revisited*, „Journal of Genetics”, 1(78), s. 71–72.
- Muller H.J., 1946, *A physicist stands amazed at genetics*, „Journal of Heredity”, 37, s. 90–92.
- Mullins N.C., 1972, *The development of scientific speciality: the Phage Group and the origins of molecular biology*, „Minerva”, 10, s. 51–82.
- Nadeau R., Kafatos M., 2001, *Non-local universe: the new physics and matters of the mind*, Oxford University Press, Oxford.
- Nagel T., 1998, *Reductionism and antireductionism* [w:] G.R. Bock, J.A. Goode (eds), *The limits of reductionism in biology*, Wiley, Chichester, s. 3–10.

- Nakamura H., 1996, *The definition of life* [w:] M. Rizzotti (ed.), *Defining life: the central problem in theoretical biology*, University of Padova, Padova, s. 167–186.
- Nanjundiah V., 1999, *Delbrück's publications in biology*, „Resonance”, 11, s. 35–53.
- Nanjundiah V., 2004, *George Gamow and the genetic code*, „Resonance”, 7(9), s. 44–49.
- Needham J., 1943, *Evolution and thermodynamics* [w:] J. Needham, *Time, the refreshing river (essays and Addresses, 1932–1942)*, George Allen & Unwin, London, s. 207–232.
- Needham J., 1943, *Integrative levels; a revaluation of the idea of progress* [w:] J. Needham, *Time: the refreshing river (essays and addresses, 1932–1942)*, George Allen & Unwin, London, s. 233–272.
- Needham J., *Metamorphoses of scepticism*, 1943 [w:] J. Needham, *Time, the refreshing river: essays and addresses, 1932–1942*, Allen & Unwin, London, s. 7–27.
- Needham J., 1936, *Order and life*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Neumann J. von, 1966, *Theory of self-reproducing automata*, University of Illinois Press, Urbana-Champaign.
- Neurath O., 1935, *Jordan, Quantentheorie und Willensfreiheit*, „Erkenntnis”, 5, s. 179–181.
- Nicolis G., Prigogine I., 1989, *Exploring complexity. An introduction*, W.H. Freeman & Company, New York.
- Noble D., 2008, *The music of life. Biology beyond genes*, Oxford University Press, Oxford.
- Nurse P., 1998, *Reductionism and explanation in cell biology* [w:] G.R. Bock, J.A. Goode (eds), *The limits of reductionism in biology*, Wiley, Chichester, s. 93–101.
- O'Connor T., Wong H.Y., *Emergent properties*, 2002/2015 [w:] E.N. Zalta (ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <http://plato.stanford.edu/entries/properties-emergent/> (21.07.2015).
- Ogryzko V.V., 2008, *Erwin Schrödinger, Francis Crick and epigenetic stability*, „Biology Direct”, 3, <http://link.springer.com/article/10.1186/1745-6150-3-15> (15.04.2015).
- Olby R., 1971, *Schrödinger's problem: what is life?*, „Journal of the History of Biology”, 1(4), s. 119–148.
- Olby R., 1994, *The path to the double helix. The discovery of DNA*, Dover Publications, New York.
- O'Malley M.A., Dupré J., 2005, *Fundamental issues in systems biology*, „BioEssays”, 27, s. 1270–1276.
- Oparin A.I., 1961, *Life. Its nature, origin and development*, tłum. A. Synge, Oliver & Boyd, Edinburgh–London.
- Oparin A.I., 1951, *The problem of the origin of life*, „Modern Quarterly”, 6, s. 135–146.
- Oparin A.I., 1953, *Zagadnienie pochodzenia życia w świetle współczesnego przyrodznawstwa*, tłum. H. Jakubczyk [w:] *Filozoficzne problemy współczesnej biologii*, Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa, s. 236–253.
- Oparin A.I., 1967, *Życie a inne formy ruchu materii* [w:] G.M. Frank, A.M. Kuzin, I.W. Kuzniecowa, N.N. Liwyszcz, M.F. Wiedienow (red.), *O istocie życia*, tłum. A. Bednarczyk, Książka i Wiedza, Warszawa, s. 13–55.
- Patel A.D., 2008, *Towards understanding the origin of genetic languages* [w:] A.K. Pati, P.C.W. Davies, D. Abbott (eds), *Quantum aspects of life*, Imperial College Press, London, s. 187–219.
- Pati A.K., Braunstein S.L., 2008, *Can arbitrary quantum systems undergo self-replication?* [w:] A.K. Pati, P.C.W. Davies, D. Abbott (eds), *Quantum aspects of life*, Imperial College Press, London, s. 223–231.
- Pattee H.H., 1967, *Quantum mechanics, heredity and the origin of life*, „Journal of Theoretical Biology”, 3(17), s. 410–420.

- Pattee H.H., 1968, *The physical basis of coding and reliability in biological evolution* [w:] C.H. Waddington (ed.), *Towards a theoretical biology. Vol. 1*, Edinburgh University Press, Edinburgh, s. 67–93.
- Pattee H.H., 1969, *Physical problems of heredity and evolution* [w:] C.H. Waddington (ed.), *Towards a theoretical biology. Vol. 2*, Edinburgh University Press, Edinburgh, s. 268–284.
- Pattee H.H., 1968–1972, *The problem of biological hierarchy* [w:] C.H. Waddington (ed.), *Towards a theoretical biology. Vol. 3*, Edinburgh University Press, Edinburgh, s. 117–136.
- Pauling L., 1989, *Schrödinger's contribution to chemistry and biology* [w:] C.W. Kilmister (ed.), *Schrödinger: centenary celebration of a polymath*, Cambridge University Press, Cambridge, s. 225–233.
- Pauling L., Delbrück M., 1940, *The nature of the intermolecular forces operative in biological processes*, „Science”, 92, s. 77–79.
- Penrose R., 2008, *Foreword* [w:] A.K. Pati, P.C.W. Davies, D. Abbott (eds), *Quantum aspects of life*, Imperial College Press, London, s. vii–x.
- Penrose R., 1998, *Przedmowa* [w:] E. Schrödinger, *Czym jest życie? Fizyczne aspekty żywej komórki*, tłum. S. Amsterdamski, Prószyński i S-ka, Warszawa, s. 11–12.
- Perutz M., 1989, *Erwin Schrödinger's 'What is life?' and molecular biology* [w:] C.W. Kilmister (ed.), *Schrödinger: centenary celebration of a polymath*, Cambridge University Press, Cambridge, s. 234–251.
- Perutz M.F., 1998, *I wish I'd made you angry earlier. Essays on science, scientists, and humanity*, Oxford University Press, Oxford–New York.
- Perutz M.F., 1987, *Physics and the riddle of life*, „Nature”, 326, s. 555–558.
- Pichot A., 1999, *Histoire de la notion de gene*, Flammarion, Paris.
- Pichot A., 1993, *Histoire de la notion de vie*, Gallimard, Paris.
- Pietzsch J., 1962, *The Nobel Prize in physiology or medicine 1962 – perspectives*, http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/1962/perspectives.html (16.07.2015).
- Pittendrigh C., 1976, *Czym jest życie?*, rozm. przepr. W. Osiatyński, „Kultura”, 41, s. 5.
- Plamondon A., 1975, *Contemporary reconciliation of mechanism and organicism*, „Dialéctica”, 4(29), s. 213–221.
- Plonka P., 1998, *Aperiodyczność* [w:] Z. Otałęga (red.), *Encyklopedia biologiczna*, t. I, Opres, Kraków, s. 170.
- Poczobut R., 2009, *Między redukcją a emergencją. Spór o miejsce umysłu w świecie fizycznym*, Wyd. Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław.
- Poczobut R., 2006, *System – struktura – emergencja* [w:] M. Heller, J. Mączka (red.), *Struktura i emergencja*, PAU–OBI–Biblos, Kraków–Tarnów, s. 11–38.
- Polanyi M., 1968, *Life's irreducible structure*, „Science”, 160(3834), s. 1308–1312.
- Popowicz K., 2009, *Lamarkizm społeczny a rasizm i eugenika we Francji*, Wyd. Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa.
- Prigogine I., Allen P.M., Henman R., 1997, *The evolution of complexity and the laws of nature* [w:] E. Laszlo, J. Bierman (eds), *Goals in a global society*, Pergamon Press, New York, s. 1–63.
- Pross A., 2012, *What is life? How chemistry becomes biology*, Oxford University Press, Oxford.
- Quastler H., 1953, *Introduction* [w:] H. Quastler (ed.), *Essays on the use of information theory in biology*, University of Illinois Press, Urbana, s. 1–4.
- Quastler H., 1958, *The domain of information theory in biology* [w:] H.P. Yockey, R.L. Platzman, H. Quastler (eds), *Symposium on information theory in biology (Gatlinburg, Tennessee, October 29–31, 1956)*, Pergamon Press, London–New York–Paris–Los Angeles, s. 187–196.

- Rapoport A., 1958, *Discussion* [w:] H.P. Yockey, R.L. Platzman, H. Quastler (eds), *Symposium on information theory in biology* (Gatlinburg, Tennessee, October 29–31, 1956), Pergamon Press, London–New York–Paris–Los Angeles, s. 196.
- Ratner V.A., 2001, *Nikolay Vladimirovich Timofiejew-Riesowski (1900–1981): twin of the century of genetics*, „Genetics”, 158, s. 933–939.
- Reichenbach H., 1932, *Kausalität und Wahrscheinlichkeit in der Biologie*, „Klinische Wochenschrift”, 11, s. 251–53.
- Reichenbach H., 1935, *Metaphysik bei Jordan?*, „Erkenntnis” 5, s. 178–179.
- Reitz J.R., Longmire C., 1950, *Living matter and physical laws*, „Physics Today”, 3, s. 15–19.
- Rheinberger H.-J., Müller-Wille S., 2008, *Gene concepts* [w:] S. Sarkar, A. Plutynski (eds), *A companion to the philosophy of biology*, Blackwell, New York, s. 3–21.
- Richardson R.C., 2007, Stephan A., *Emergence*, „Biological Theory”, 1(2), s. 91–96.
- Riedl R., 1992, *Schrödinger's negentropy concept and biology* [w:] J. Götschl (ed.), *Erwin Schrödinger's world view. The dynamics of knowledge and reality*, Springer Science+Business Media, Dordrecht, s. 59–69.
- Ritter W.E., 1919, *The unity of the organism or the organismal conception of life*, Richard G. Badger, Boston.
- Robert J.S., 2008, *Molecular and systems biology and bioethics* [w:] D.L. Hull, M. Ruse (eds), *The Cambridge companion to the philosophy of biology*, Cambridge University Press, Cambridge, s. 361–371.
- Roberts H., 1945, *A difficult question brilliantly unanswered. A review of 'What is life?', by E. Schrödinger*, „New Statesman and Nation”, 29, s. 146.
- Roll-Hansen N., 1978, *Drosophila genetics: a reductionist research program*, „Journal of the History of Biology”, 1(11), s. 159–210.
- Roll-Hansen N., 1984, *E.S. Russell and J.H. Woodger: the failure of two twentieth-century opponents of mechanistic biology*, „Journal of the History of Biology”, 3(17), s. 399–428.
- Roll-Hansen N., 2011, *Niels Bohr and Max Delbrück: balancing autonomy and reductionism in biology* [w:] P.R. Sloan, B. Fogel (eds), *Creating a physical biology. The Three-Man Paper and early molecular biology*, The University of Chicago Press, Chicago–London, s. 145–178.
- Roll-Hansen N., 1979, *Reductionism in biological research. Three historical case studies*, Institute for Studies in Research and Higher Education, Oslo.
- Roll-Hansen N., 2000, *The application of complementarity to biology: from Niels Bohr to Max Delbrück*, „Historical Studies in the Physical and Biological Sciences”, 30, s. 417–442.
- Rose S., 1998, *What is wrong with reductionist explanations of behaviour?* [w:] G.R. Bock, J.A. Goode (eds), *The limits of reductionism in biology*, Wiley, Chichester, s. 176–186.
- Rosen R., 2000, *Essays on life itself*, Columbia University Press, New York.
- Rothschild L.J., 2009, *The role of emergence in biology* [w:] Ph. Clayton, P. Davies (eds), *The re-emergence of emergence. The emergentist hypothesis from science to religion*, Oxford University Press, Oxford, s. 151–165.
- Ruse M., 1989, *Introduction* [w:] M. Ruse (ed.), *Philosophy of biology*, Macmillan Publishing Company, New York, s. 1–26.
- Ruse M., 1982, *Teleology redux* [w:] J. Agassi, R.S. Cohen (eds), *Scientific philosophy today. Essays in honor of Mario Bunge*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, s. 299–309.
- Ruse M., 1973, *The philosophy of biology*, Hutchinson University Library, London.
- Ruse M., 1971, *Two biological revolutions*, „Dialéctica”, 25, s. 17–38.
- Russell E.S., 1930, *The interpretation of development and heredity. A Study in biological method*, The Clarendon Press, Oxford.

- Sarkar S., 1996, *Biological information: a skeptical look at some central dogmas of molecular biology* [w:] S. Sarkar (ed.), *The philosophy and history of molecular biology: new perspectives*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht–Boston–London, s. 187–231.
- Sarkar S., 2013, *Erwin Schrödinger's excursus on genetics* [w:] O. Harman, M.R. Dietrich (eds), *Outsider scientists: routes to innovation in biology*, The University of Chicago Press, Chicago–London, s. 93–109.
- Sarkar S., 2002, *Genes versus molecules: how to, and how not to, be a reductionist* [w:] M.H.V. Van Regenmortel, D.L. Hull (eds), *Promises and limits of reductionism in the biomedical sciences*, John Wiley & Sons, Hoboken, s. 191–206.
- Sarkar S., 2008, *Genomics proteomics, and beyond* [w:] S. Sarkar, A. Plutynski (eds), *A Companion to the philosophy of biology*, Blackwell, New York, s. 58–73.
- Sarkar S., 2005, *Molecular models of life. Philosophical papers on molecular biology*, A Bradford Book–The MIT Press, Cambridge–London.
- Sarkar S., 1996, *Philosophy, history, and molecular biology – introduction* [w:] S. Sarkar (ed.), *The philosophy and history of molecular biology: new perspectives*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht–Boston–London, s. 1–13.
- Sarkar S., 1991, *What is life? revisited*, „BioScience”, 9(41), s. 631–634.
- Schaffner K.F., 1967, *Antireductionism and molecular biology*, „Science”, 157, s. 644–647.
- Schaffner K.F., 1969, *The Watson-Crick model and reductionism*, „The British Journal for the Philosophy of Science”, 20, s. 325–348.
- Schaffner K.F., 1969, *Theories and explanations in biology*, „Journal of the History of Biology”, 2, s. 19–33.
- Schlick M., 1935, *Ergänzende Bemerkungen über P. Jordan's Versuch einer quantentheoretischen Deutung der Lebenserscheinungen*, „Erkenntnis”, 5, s. 181–183.
- Schneider E.D., Kay J.J., 1994, *Life as a manifestation of the second law of thermodynamics*, „Mathematical and Computer Modelling”, 6–8(19), s. 25–48.
- Schneider E.D., Sagan D., 2005, *Energy flow, thermodynamics, and life*, The University of Chicago Press, Chicago–London.
- Schrödinger E., 1942, *Biologica I [notebook]* [w:] *Archive for history of quantum physics, Schrödinger scientific papers, post-1928*, Microfilm no. 42, Section 10.
- Schrödinger E., 1998, *Czym jest życie? Fizyczne aspekty żywej komórki*, tłum. S. Amsterdamski, Prószyński i S-ka, Warszawa.
- Schrödinger E., 1936, *Indeterminism and free-will*, „Nature”, 138, s. 13–14.
- Schrödinger E., 1935, *Science and the human temperament*, trans. J. Murphy, George Allen & Unwin, London.
- Schrödinger E., 1993, *Warum sind die Atome so klein?*, „Forschungen und Fortschritte”, 9, s. 125–126.
- Scott A.C., 2007, *The nonlinear universe. Chaos, emergence, life*, Springer Science+Business Media, Berlin–Heidelberg–New York.
- Segrè G., 2011, *Ordinary geniuses. Max Delbrück, George Gamow, and the origins of genomics and Big Bang cosmology*, Viking Penguin, London.
- Seitz F., 1998, *Elsasser* [w:] W.M. Elsasser, *Reflections on a theory of organisms: holism in biology*, John Hopkins, Baltimore, s. xix–xxiv.
- Seitz F., 1992, *The science matrix. The journey, travails, triumphs*, Springer-Verlag, Heidelberg.
- Selleri F., 1999, *Wielkie spory w fizyce kwantowej*, tłum. B. Lange, Wyd. Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk.
- Semon R., 1920, *Die Mneme als Erhaltendes Prinzip im Wechsel des Organischen Geschehens*, Verlag von Wilhelm Engelmann, Leipzig.

- Sherrington Ch., 1940, *Man on his nature: Gifford lectures, 1937–8*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Shippen K., 1961, *Ludzie, którzy badali tajemnice życia*, tłum. C. Lewandowska, T. Zajaczkowski, Nasza Księgarnia, Warszawa.
- Simmons J., 1997, *Erwin Schrödinger (1887–1961) i mechanika falowa* [w:] J. Simmons, *100 najwybitniejszych uczonych wszech czasów*, tłum. P. Amsterdamski, Świat Książki, Warszawa, s. 87–90.
- Simmons J., 1997, *Max Delbrück (1906–1981) i bakteriofagi* [w:] J. Simmons, *100 najwybitniejszych uczonych wszech czasów*, tłum. P. Amsterdamski, Świat Książki, Warszawa, s. 266–269.
- Simmons J., 1997, *Niels Bohr (1885–1862) i atom* [w:] J. Simmons, *100 najwybitniejszych uczonych wszech czasów*, tłum. P. Amsterdamski, Świat Książki, Warszawa, s. 25–29.
- Simon M.A., 1971, *The matter of life. Philosophical problems of biology*, Yale University Press, New Haven–London.
- Simpson G.G., 1964, *This view of life. The world of an evolutionist*, Harcourt, Brace & World, New York.
- Sinnott E.W., Dunn L.C., 1939, *Principles of genetics*, McGraw Hill, London.
- Sloan P.R., 2011, *Biophysics in Berlin: The Delbrück Club* [w:] P.R. Sloan, B. Fogel (eds), *Creating a physical biology. The Three-Man Paper and early molecular biology*, The University of Chicago Press, Chicago–London, s. 99–142.
- Sloan P.R., 2012, *How was teleology eliminated in early molecular biology?*, „Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences”, 43, s. 140–151.
- Smuts J.C., 1927, *Holism and evolution*, MacMillan and Co., London.
- Sorger P.K., 2005, *A reductionist's systems biology*, „Current Opinion in Cell Biology”, 17, s. 9–11.
- Spicker S.F., 1987, *Biochemical reductionism or obscurantist vitalism? – a new passage between Scylla and Charybdis*, „Biology and Philosophy”, 2(4), s. 509–515.
- Spielberg N., Anderson B.D., 1997, *Fizyka. Siedem teorii, które wstrząsnęły światem*, tłum. J. Błaszczyk, Amber, Warszawa.
- Stent G.S., 2007, *Introduction: waiting for the paradox* [w:] J. Cairns, G.S. Stent, J.D. Watson (eds), *Phage and the origins of molecular biology*, Cold Spring Harbor Laboratory Press, New York, s. 3–8.
- Stent G.S., 1986, *Introduction and overview* [w:] M. Delbrück, *Mind from matter. An essay on evolutionary epistemology*, Blackwell Scientific Publications, Victoria, s. 1–18.
- Stent G.S., 1989, *Light and life: Niels Bohr's legacy to contemporary biology*, „Genome”, 31(1), s. 11–15.
- Stent G.S., 1998, *Looking for other laws of physics*, „Journal of Contemporary History”, 3(33), s. 371–397.
- Stent G.S., 2007, *Max Delbrück, 1906–1981* [w:] J. Cairns, G.S. Stent, J.D. Watson (eds), *Phage and the origins of molecular biology*, Cold Spring Harbor Laboratory Press, New York, s. 363–378.
- Stent G.S., 1974, *Molekuljarnaja genetika*, trans. Ju. Zografa, T. Ilinoj, V. Nikiforova, Mir, Moskva.
- Stent G.S., 1968, *That was the molecular biology that was*, „Science. New Series”, 160(3826), s. 390–395.
- Stent G.S., 1969, *The coming of the golden age. A view of the end of progress*, The Natural History Press, New York.
- Stent G.S., Calendar R., 1978, *Molecular genetics: an introductory narrative*, W.H. Freeman & Company, San Francisco.

- Stern K.G., 1947, *Nucleoproteins and gene structure*, „Yale Journal of Biology and Medicine”, 19, s. 937–949.
- Stephan A., 1992, *Emergence – A systematic view on its historical facets* [w:] A. Beckermann, H. Flohr, J. Kim (eds), *Emergence or reduction? – Essays on the prospects of nonreductive physicalism*, Walter de Gruyter, Berlin–New York, s. 25–48.
- Stewart I., 2014, *Matematyka życia. Jak równania pomagają odkrywać tajemnice natury*, tłum. B. Bieniok, E.L. Łokas, Prószyński i S-ka, Warszawa.
- Stone L., Lurquin P.F., 2009, *Geny, kultura i ewolucja człowieka. Synteza*, tłum. W. Branicki, W. Więckowski, Wyd. UW, Warszawa.
- Strawiński W., 2002, *Brytyjski emergentyzm*, „Przegląd Filozoficzny”, 1(41), s. 133–142.
- Summers W.C., 2011, *Physics and genes: from Einstein to Delbrück* [w:] P.R. Sloan, B. Fogel (eds), *Creating a physical biology. The Three-Man Paper and early molecular biology*, The University of Chicago Press, Chicago–London, s. 39–60.
- Swain J., 2002, *Quantum mechanics, computability theory and life* [w:] H.-P. Dürr, F.-A. Popp, W. Schommers (eds), *What is life? Scientific approaches and philosophical positions*, World Scientific, New Jersey–London–Singapore–Hong Kong, s. 329–342.
- Symonds N., 1988, *Schrödinger and Delbrück: their status in biology*, „Trends in Biochemical Sciences”, 13, s. 232–234.
- Symonds N., 1986, *What is life? Schrödinger's influence on biology*, „Quarterly Review of Biology”, 2(61), s. 221–226.
- Szarski H., 1976, *Mechanizmy ewolucji*, Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Wrocław.
- Szewczyk K., 1993, *Biologia i sens. Studium witalizmu Jacoba von Uexküll'a*, Zakład Etyki i Filozofii Medycyny Akademii Medycznej w Łodzi, Łódź.
- Szilard L., 1929, *Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen*, „Zeitschrift für Physik”, 53, s. 840–856.
- Ślaga S., 1968, *Charakterystyka koncepcji organizmalnej*, „Roczniki Filozoficzne”, 3(16), s. 105–125.
- Ślaga Sz.W., 1979, *Eigena fizyczny model ewolucji prebiotycznej* [w:] K. Kłósak (red.), *Z zagadnień filozofii przyrodznawstwa i filozofii przyrody*, t. III, Wyd. ATK, Warszawa, s. 121–152.
- Tabery J., Piotrowska M., Darden L., 2015, *Molecular biology* [w:] E.N. Zalta (ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <http://plato.stanford.edu/entries/molecular-biology/> (21.07.2015).
- Teich M., 1975, *A single path to the double helix. A review of 'The path to the double helix' by R. Olby*, „History of Science”, 13, s. 264–283.
- Thaler D.S., 1996, *Paradox as path: pattern as map* [w:] S. Sarkar (ed.), *The philosophy and history of molecular biology: new perspectives*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht–Boston–London, s. 233–248.
- Twardowski M., 2013, *Czy biologia jest chemią?*, „Zagadnienia Filozoficzne w Nauce”, 52, s. 203–221.
- Twardowski M., 2013, *Czy możliwe jest sztuczne życie?*, „Studia Sandomierskie”, 20, s. 191–208.
- Twardowski M., 2015, *Czym jest życie? – od mniemań do wiedzy*, „Meritum”, 5, s. 26–38, <http://www.researchgate.net/publication/281455091> (28.04.2016).
- Twardowski M., 2015, *Determinizm biologiczny w centrum debaty fizyków lat trzydziestych i czterdziestych dwudziestego wieku*, „Studia Sandomierskie”, 22, s. 275–281.
- Twardowski M., 2013, *Fenomen życia w oczach chemika Addy'ego Prossa*, „Chemik”, 12, s. 1162–1172.

- Twardowski M., 2016, *Fenomen życia w oczach fizyka Maxa Delbrücka* [w:] K. Kropiwiec M. Szala (red.), *Nauka, filozofia, kultura – rozważania interdyscyplinarne*, Wyd. Naukowe Tygiel, Lublin, s. 47–58
- Twardowski M., 2015, *Kategoria „celowości” we współczesnej dyskusji filozoficzno-biologicznej* [w:] K. Bałkowski, K. Maciąg (red.), *Filozofia nauki – wybrane zagadnienia*, Fundacja na rzecz Promocji Nauki i Rozwoju Tygiel, Lublin, s. 49–66.
- Twardowski M., 2016, *Kategoria redukcji w refleksji filozoficzno-biologicznej Edwarda O. Wilsona* [w:] K. Kropiwiec, M. Szala (red.), *Nauka, filozofia, kultura – rozważania interdyscyplinarne*, Wyd. Naukowe Tygiel, Lublin, s. 106–119.
- Twardowski M., 2016, *Kategoria redukcji we współczesnej dyskusji filozoficzno-biologicznej* [w:] K. Bałkowski, P. Wiatr (red.), *Filozoficzne problemy nauk przyrodniczych*, Fundacja na rzecz Promocji Nauki i Rozwoju Tygiel, Lublin, s. 55–73.
- Twardowski M., 2004, *Koncepcja życia w ujęciu reprezentatywnych przyrodników dwudziestego wieku. Praca doktorska napisana na seminarium filozofii przyrody ożywionej i filozofii ochrony środowiska pod kierunkiem Ks. Prof. dra hab. Stanisława Zięby (Maszynopis)*, Katolicki Uniwersytet Lubelski, Lublin.
- Twardowski M., 2016, *Koncepcja życia Paula Daviesa* [w:] K. Bałkowski, P. Wiatr (red.), *Prawda i byt – między filozofią a nauką*, Wyd. Naukowe Tygiel, Lublin, s. 71–85.
- Twardowski M., 2015, *Kontrowersje wokół natury życia w pismach fizyków dwudziestego wieku* [w:] K. Bałkowski, K. Maciąg (red.), *Filozofia nauki – wybrane zagadnienia*, Fundacja na rzecz Promocji Nauki i Rozwoju Tygiel, Lublin, s. 86–102.
- Twardowski M., 2015, *Krótką (pre)historia sporu o naturę życia* [w:] K. Bałkowski, K. Maciąg (red.), *Filozofia nauki – wybrane zagadnienia*, Fundacja na rzecz Promocji Nauki i Rozwoju Tygiel, Lublin, s. 103–118.
- Twardowski M., 2016, *Krótko o antyredukcyjnej filozofii biologii Johna Duprè* [w:] K. Bałkowski, P. Wiatr (red.), *Prawda i byt – między filozofią a nauką*, Wyd. Naukowe Tygiel, Lublin, s. 86–97.
- Twardowski M., 2016, *Krótko o antyredukcyjnej filozofii biologii Michaela Polanyi’ego* [w:] K. Kropiwiec, M. Szala (red.), *Nauka, filozofia, kultura – rozważania interdyscyplinarne*, Wyd. Naukowe Tygiel, Lublin, s. 120–131.
- Twardowski M., 2016, *Krótko o redukcjonistycznej filozofii biologii Evelyn Fox Keller* [w:] K. Bałkowski, P. Wiatr (red.), *Prawda i byt – między filozofią a nauką*, Wyd. Naukowe Tygiel, Lublin, s. 98–111.
- Twardowski M., 2016, *Krótko o roli emergencji w biologii* [w:] K. Kropiwiec, M. Szala (red.), *Nauka, filozofia, kultura – rozważania interdyscyplinarne*, Wyd. Naukowe Tygiel, Lublin, s. 7–22.
- Twardowski M., 2016, *Kwantowa teoria życia Pascuala Jordana. Rekonstrukcja i krytyka* [w:] K. Bałkowski, P. Wiatr (red.), *Prawda i byt – między filozofią a nauką*, Wyd. Naukowe Tygiel, Lublin, s. 112–124.
- Twardowski M., 2015, *Natura życia we współczesnej dyskusji filozoficzno-biologicznej* [w:] P. Szczepańczyk, A. Kleśta, H. Wiśniewski (red.), *Życie... i o nim interdyscyplinarnie*, Unitas, Warszawa, s. 170–192.
- Twardowski M., 2015, *Neowitalistyczna koncepcja życia Piotra Lenartowicza*, „Studia z Historii Filozofii”, 2(6), s. 83–100.
- Twardowski M., 2011, *Nauka przekierowana: Niels Bohr, filantropia, i narodziny fizyki jądrowej (Fragmenty)*, „Roczniki Filozoficzne”, 1, s. 51–78.
- Twardowski M., 2006, *Nielsa Bohra koncepcja życia*, „Roczniki Filozoficzne”, 1, s. 161–178.

- Twardowski M., 2016, *Perspektywa systemowa w wyjaśnianiu układów biologicznych* [w:] K. Kropiwek, M. Szala (red.), *Nauka, filozofia, kultura – rozważania interdyscyplinarne*, Wyd. Naukowe Tygiel, Lublin, s. 35–46.
- Twardowski M., 2016, „Praca trzech” – niezwykle owoce współpracy biologa z fizykami z filozofią w tle [w:] K. Bałkowski P. Wiatr (red.), *Prawda i byt – między filozofią a nauką*, Wyd. Naukowe Tygiel, Lublin, s. 125–137.
- Twardowski M., 2016, *Waltera Elsassera koncepcja życia* [w:] K. Bałkowski, P. Wiatr (red.), *Prawda i byt – między filozofią a nauką*, Wyd. Naukowe Tygiel, Lublin, s. 199–212.
- Urbanek A., 2000, *Biologia XX wieku – główne nurty rozwoju*, „Kosmos”, 3, s. 305–319.
- Urbanek A., 1987, *Emergentyzm* [w:] Z. Cackowski, J. Kmita, K. Szaniawski, P.J. Smoczyński (red.), *Filozofia a nauka. Zarys encyklopedyczny*, Ossolineum, Warszawa, s. 141–150.
- Urbanek A., 1987, *Redukcjonizm* [w:] Z. Cackowski, J. Kmita, K. Szaniawski, P.J. Smoczyński (red.), *Filozofia a nauka. Zarys encyklopedyczny*, Ossolineum, Warszawa, s. 564–576.
- Urbanek A., 1979, *Redukcjonizm we współczesnej biologii*, „Nauka Polska”, 11(173), s. 89–97.
- Urbanek A., 1973, *Rewolucja naukowa w biologii*, Wiedza Powszechna, Warszawa.
- Waddington C.H., 1969, *Some European contributions to the prehistory of molecular biology*, „Nature”, 221, s. 318–321.
- Wanjohi G.J., 1975, *Monod's biological reductionism*, „Thought and Practice”, 1–2(2), s. 67–71.
- Ward P., 2010, *Hipoteza Medeï. Czy życie na Ziemi zmierza do samounicestwienia?*, Prószyński i S-ka, Warszawa.
- Weaver W., 1970, *Molecular biology: origins of the term*, „Science”, 170, s. 581–582.
- Weber B., 2014, *Life* [w:] E.N. Zalta (ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <http://plato.stanford.edu/archives/fall2014/entries/life/> (20.11.2014).
- Welch G.R., 1989, *Of men, molecules, and (ir)reducibility*, „BioEssays”, 6(11), s. 187–190.
- Welch G.R., 1995, *T.H. Huxley and the 'protoplasmic theory of life': 100 years later*, „Trends in Biochemical Sciences”, 11(20), s. 481–485.
- Wenkel S., Deichmann U. (eds), 2007, *Max Delbrück and Cologne. An early chapter of German molecular biology*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., New Jersey–London.
- Wharton J.F., 1946, *Probing the ultimate mystery. A review of 'What is life?', by E. Schrödinger*, „Saturday Review of Literature”, 29, s. 7–9.
- Wicken J.S., 1987, *Evolution, thermodynamics, and information. Extending the Darwinian program*, Oxford University Press, New York–Oxford.
- Wiener N., 1960, *Cybernetyka i społeczeństwo*, tłum. O. Wojtasiewicz, Książka i Wiedza, Warszawa.
- Wigner E.P., 1961, *The probability of the existence of a self-reproducing unit* [w:] *The logic of personal knowledge. Essays presented to Michael Polanyi on his seventieth birthday, 11th March 1961*, Routledge & Kegan Paul, London, s. 231–238.
- Wilkins M., 2005, *The third man of the double helix. The autobiography*, Oxford University Press, Oxford.
- Williams R.J.P., 2002, *Emergent properties of biological molecules and cells* [w:] M.H.V. Van Regenmortel, D.L. Hull (eds), *Promises and limits of reductionism in the biomedical sciences*, John Wiley & Sons, Hoboken, s. 15–34.
- Williams N., 2015, *Irene Manton, Erwin Schrödinger and the puzzle of chromosome structure*, „Journal of the History of Biology”, 48, s. 1–35.

- Wilson E.B., 1923, *The physical basis of life*, Yale University Press, New Haven.
- Wilson E.O., 2002, *Konsiliencja. Jedność wiedzy*, tłum. J. Mikos, Wyd. Zysk i S-ka, Poznań.
- Winterstein H., 1938, *Der mikrophysikalische Vitalismus*, „Erkenntnis”, 7, s. 81–91.
- Wise M.N., 1994, *Pascual Jordan: quantum mechanics, psychology, national socialism* [w:] M. Renneberg, M. Walker (eds), *Science, technology and national socialism*, Cambridge University Press, Cambridge, s. 224–254.
- Wiseman H., Eisert J., 2008, *Nontrivial quantum effects in biology: a skeptical physicists' view* [w:] A.K. Pati, P.C.W. Davies, D. Abbott (eds), *Quantum aspects of life*, Imperial College Press, London, s. 381–401.
- Witkowski J.A., 1986, *Schrödinger's 'What is life?': entropy, order and hereditary code-scripts*, „Trends in Biochemical Sciences”, 6(11), s. 266–268.
- Woese C.R., 2004, *A new biology for a new century*, „Microbiology and Molecular Biology Reviews”, 2(68), s. 173–186.
- Wolkensztejn M.W., 1974, *Biologia i fizyka*, tłum. J. Bielewicz, „Problemy”, 6, s. 44–46.
- Wolkensztejn M.W., 1969, *Biologia molekularna*, tłum. M. Bogdasarian, K. Berens, PWN, Warszawa.
- Wolkensztejn M.W., 1994, *Physical approaches to biological evolution*, Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg.
- Woodger J.H., 1967, *Biological principles. Reissued, with a new introduction*, Routledge & Kegan Paul, London.
- Wooldridge D.E., 1966, *The machinery of life*, McGraw-Hill Book Company, New York.
- Wright R., 2005, *Nonzero. Logika ludzkiego przeznaczenia*, tłum. Z. Łomnicka, Prószyński i S-ka, Warszawa.
- Wróblewski Z., 2009, *Rozmowa z Piotrem Lenartowiczem SJ* [w:] J. Koszteyn (red.), *Vivere et Intelligere. Wybrane prace Piotra Lenartowicza SJ wydane z okazji 75-lecia jego urodzin*, WAM, Kraków, s. 26–58.
- Vajskopf V., 1977, *Fizika v dvadcatom stoletii*, trans. A. Beda, A. Davydov, Atomizdat, Moskva.
- Van der Steen W.J., 1970, *The relation of biology to physics and chemistry. An evaluation of some recent issues in the philosophy of science*, „Acta Biotheoretica”, 3(19), s. 186–211.
- Van Regenmortel M.H.V., 2004, *Reductionism and complexity in molecular biology*, „European Molecular Biology Organization”, 5(11), s. 1016–1020.
- Voit E.O., 2003, *Reductionism in the biomedical sciences*, „Drug Discovery Today”, 2(8), s. 66.
- Voit E.O., Schwacke J.H., 2007, *Understanding through modeling. A historical perspective and review of biochemical systems theory as a powerful tool for systems biology* [w:] A.K. Konopka (eds), *Systems biology. Principles, methods, and concepts*, CRC Press, Boca Raton–London–New York, s. 28–82.
- Yoxen E., 1979, *Where does Schrödinger's 'What is life?' belong in the history of molecular biology?*, „History of Science”, 17, s. 17–52.
- Zaniewski R., 1953, *Teorie o pochodzeniu i rozwoju życia a naturalizm chrześcijański*, Katolicki Ośrodek Wydawniczy „Veritas”, Londyn.
- Zięba S., 1982, *Analiza filozoficzna bioelektronicznej koncepcji życia*, „Roczniki Filozoficzne”, 3 (1982), s. 81–94.
- Zięba S., 2000, *Bohr Niels* [w:] A. Maryniarczyk (red.), *Powszechna encyklopedia filozofii*, t. I, Polskie Towarzystwo Tomasza z Akwinu, Lublin, s. 620.

- Zięba S., 2007, *Emergentyzm* [w:] A. Maryniarczyk (red.), *Powszechna encyklopedia filozofii*, t. VIII, Polskie Towarzystwo Tomasza z Akwinu, Lublin, s. 133–135.
- Zięba S., 1986, *Rozwój mechanistycznej koncepcji życia w piśmiennictwie francuskim XX wieku*, RW KUL, Lublin.
- Zięba S., 2013, *Życie. Koncepcja emergentystyczna*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa.
- Zięba S., 2016, *Życie. System biologiczny*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa.
- Zilsel E., 1935, *P. Jordans Versuch, den Vitalismus Quantenmechanisch zu Retten*, „Erkenntnis”, 5, s. 56–64.
- Zucker A., 1981, *Holism and reductionism: a view from genetics*, „The Journal of Medicine and Philosophy”, 6, s. 145–163.

INDEKS OSOBOWY

- Abbott Derek, 12, 283, 352, 358, 375, 397–400, 416, 428, 438, 453–457, 471, 474, 477–479, 483, 486, 487, 494
- Abel David, 36, 471
- Alexander Samuel, 67, 68, 79, 471
- Al-Khalili Jim, 12, 140, 141, 336, 337, 352, 375, 398, 399, 402, 414, 422, 434–438, 464, 471, 484
- Allen Garland, 14, 19–21, 43, 49, 58, 86, 90, 95, 115, 184, 190, 192, 197, 235, 301, 320, 334, 471
- Anderson Thomas, 133, 137
- Appenzeller Tim, 243, 477
- Arystoteles, 43, 44, 46, 65, 342, 404
- Astbury William Thomas, 320
- Atlan Henri, 75, 471
- Avery Oswald, 131, 202, 275, 296, 297, 322, 324, 329
- Baer Karl Ernst von, 46
- Baetu Tudor, 83, 84, 471
- Bailly Francis, 368–370, 374, 471
- Barbieri Marcello, 272, 471
- Barthez Paul Joseph, 44
- Bateson William, 195, 196
- Battail Gerard, 341–344, 373, 471
- Bauer Alexander, 184
- Beadle George, 199, 200, 270, 295, 298, 322, 484
- Bedau Mark, 226, 297, 324, 454, 472, 481
- Benzer Seymour, 319, 328, 372
- Berlinski David, 273, 472
- Bernal John Desmond, 216, 320, 485
- Bernard Claude, 20, 384, 385
- Bertalanffy Ludwig von, 53, 54, 151, 245, 472
- Berthollet Claude Louis, 15
- Bichat Marie François Xavier, 44
- Bleuler Paul Eugen, 55–58, 156, 157, 160, 472
- Bóg, 14, 27, 300, 386, 474
- Bohm David, 335, 336, 472
- Bohr Christian, 94, 95, 480
- Bohr Niels, 7, 9–11, 51, 88, 89, 91, 93–106, 108–111, 113–119, 126, 129, 134–136, 139–142, 151–153, 159, 163–165, 169, 172, 173, 176–178, 180, 181, 184, 265, 284, 306, 313–318, 321, 353, 371, 372, 417, 466, 471–473, 476, 477, 480, 483, 484, 488, 490, 493, 494
- Bois-Reymond Emil du, 141
- Boltzmann Ludwig, 180, 204–206, 208, 213, 218, 220, 222, 238, 285, 305, 360, 431
- Bordeu Théophile de, 44
- Born Max, 147
- Boveri Theodor, 195
- Braunstein Samuel, 453, 465, 486
- Brenner Sydney, 39, 473
- Brillouin Leon, 205, 218, 268, 269, 274, 294, 473
- Broad Charlie, 68, 78, 473
- Brown Robert, 16, 175, 209
- Buchachenko Anatolii, 40, 41, 473
- Buchner Eduard, 16
- Bünning Erwin, 153, 154, 473
- Burnet Frank Macfarlane, 128
- Butler John, 283, 284, 308, 473
- Cannon Walter Bradford, 20
- Carlson Elof, 125, 270, 322, 474
- Carroll Sean, 306, 329, 474
- Carter Brandon, 311
- Ceccarelli Leah, 298, 299, 307, 474
- Chong Lisa, 243, 245, 474
- Christiansen Christian, 95
- Clausius Rudolf, 204, 223
- Clayton Philip, 65, 67, 69, 72, 78–81, 83, 84, 474, 475, 488

- Cobb Matthew, 121, 122, 124, 128, 194–197, 199, 200, 202, 231, 275, 321, 322, 327, 329, 443, 474
- Conway John, 74, 455, 465
- Corning Peter, 203–205, 207, 222, 239, 310, 311, 474
- Correns Carl, 195
- Crick Francis, 26, 29, 40, 47, 70, 137, 138, 169, 202, 223, 224, 226, 227, 273, 275, 282, 283, 286, 319, 323, 329, 330, 335, 339, 347, 349, 353, 372, 407, 466, 467, 474, 486, 489
- Crowther James, 148
- Darlington Cyril, 190, 261, 266, 267, 301, 302, 474
- Darwin Charles, 33, 182, 189, 203, 235, 267, 314, 338, 340, 341, 345, 355, 402
- Davies Paul, 12, 22, 34, 35, 65, 67, 69, 77–80, 83, 283, 311, 352, 358, 375, 386–389, 397, 398, 399, 400, 416–424, 426–428, 438, 453, 454, 457, 461–464, 471, 474, 475, 477–479, 483, 486–488, 492, 494
- Delbrück Max, 9, 11, 88, 89, 95, 97, 98, 102, 114–141, 147, 150–152, 162, 163, 169, 177, 179, 184–186, 190, 209, 214, 215, 261, 265, 266, 271, 287, 288, 294, 295, 298, 304–307, 312–320, 322, 323, 371, 372, 467, 472, 475–484, 486–493
- Demerec Milislav, 133
- Demokryt z Abdery, 14, 46
- Descartes René (Kartezjusz), 14, 53, 476
- Dessauer Friedrich, 148
- d'Hérelle Felix, 127, 128
- Dirac Paul, 98, 334
- Donnan Fryderyk, 110, 111, 187, 188, 476
- Driesch Hans, 19, 46, 47, 158, 476
- Driessen Alfred, 12, 375, 401–405, 463, 476
- Dujardin Félix, 16
- Dunn Leslie Clarence, 190, 261, 490
- Dupré John, 38, 245, 251, 252, 254, 382, 476, 486
- Dürr Hans-Peter, 12, 375, 391, 392, 405–409, 411–414, 451, 463, 464, 476, 477, 482, 491
- Dyson Freeman, 282, 283, 322, 476
- Ehrenfels Christian von, 50
- Einstein Albert, 85, 99, 121, 180, 272, 315, 352, 358, 491
- Eisert Jens, 12, 375, 400, 494
- Elkana Yehuda, 270, 271, 322, 476
- Ellis Emory, 127, 130, 131, 476
- Elsasser Walter, 9, 11, 89, 114, 145, 158, 163–172, 177–179, 476, 479, 481, 489, 493
- Ephrussi Boris, 199
- Ewald Paul, 55, 184
- Faraday Michael, 304
- Fechner Gustav Theodor, 180
- Feynman Richard, 456, 465, 477
- Fischbeck Hans-Jürgen, 392–397, 415, 416, 462, 464, 477
- Fischer Ernst Peter, 52, 117, 138, 141, 149, 150, 152, 153, 168, 169, 477, 479, 485
- Fisher Ronald, 197
- Fleming Donald, 88, 99, 102, 116, 119, 120, 133, 134, 136, 140, 150, 151, 181, 213, 215, 282, 323, 477
- Flitney Adrian, 454–457, 477
- Fox Maurice, 119
- Frank Philipp, 161, 477
- Freundlich Herbert, 184, 477
- Frimmel Franz, 182
- Fröhlich Herbert, 411, 477
- Gallagher Richard, 243, 477
- Gamow George, 10, 115, 117, 266, 282, 319, 330, 333–335, 372, 467, 477, 486, 489
- Ganten Detlev, 325, 329, 478
- Gánti Tibor, 286, 478
- Gayon Jean, 7, 14, 43, 478
- Gibbs Josiah Willard, 192, 204, 206, 218, 222, 277, 308, 360, 431
- Gilbert Scott, 63, 478
- Gleick James, 204, 392, 393, 478
- Goel Anita, 457–460, 465, 478
- Goldenfeld Nigel, 12, 375, 389–391, 461, 478
- Goldschmidt Richard, 199
- Goodwin Brian, 246, 388, 475
- Góra Barbara, 111–113, 478
- Goswami Amit, 72, 73, 478

- Götschl Johann, 270, 280, 367, 368, 476, 478, 483, 488
Greene Marjorie, 168, 478
Grössing Gerhard, 456, 465, 478
Guye Charles Eugene, 205–207, 479
- Haeckel Ernst, 17, 19, 53, 182, 194, 479
Haldane John Burdon Sanderson, 72, 190, 191, 197, 200, 261, 266, 279, 288, 295, 298, 479
Haldane John Scott, 20, 51, 479, 485
Hameroff Stuart, 358, 359, 373, 479
Hartmann Max, 153–156, 294, 332, 479
Harvey William, 90
Hasenöhrle Friedrich, 180
Heisenberg Werner, 9, 11, 88, 96–99, 113, 114, 139, 140, 147, 164, 183, 188, 326, 479, 480
Heitler Walter, 9, 11, 70, 89, 114, 115, 172–178, 202, 210, 212, 216, 221, 315, 480
Helmholtz Hermann von, 206, 207
Henderson Lawrence Joseph, 20, 195, 200, 480
Hendrickson Michael, 185, 186, 194–198, 200–203, 205, 212, 214, 223–231, 234, 235, 239, 241–243, 251, 262, 263, 272, 273, 299, 319, 478, 480, 484
Hering Ewald, 55
Hershey Alfred, 118, 133, 137, 319, 322, 372, 467
Hevesey Georg von, 110
Hill Archibald Vivan, 106
Hinshelwood Cyril, 191, 193, 480
Høffding Harald, 94, 95, 102, 477
Holliday Robin, 286, 480
Holweck Fernand, 148
Hooke Robert, 16
Hoyle Fred, 311
Hull David, 14, 21, 40, 44, 45, 86, 87, 165, 170, 242, 480, 488, 489, 493
Hund Friedrich, 70
Hussey Kristin, 181, 185, 318, 323, 480
Huxley Thomas Henry, 17, 18, 200, 201, 480, 493
- Jacobs Jonathan, 41, 480
Jensen Paul, 157, 160, 480
- Johannsen Wilhelm, 195, 196
Jordan Pascual, 9, 11, 14, 88, 89, 108, 114, 140–163, 168, 169, 177–179, 183, 184, 472, 473, 477, 480, 481, 483, 486, 488, 489, 492, 494, 495
- Kacser Henrik, 246
Kaempffert Waldemar, 269, 481
Kafatos Menas, 94, 111, 485
Kauffman Stuart, 64, 171, 324, 338–341, 344–347, 372, 373, 425, 481
Kay James, 360–363, 373, 489
Kay Lily, 109, 110, 115–120, 124, 126, 127, 129, 131, 132, 137–139, 182, 282, 318, 481
Keller Evelyn Fox, 12, 227, 231, 306, 307, 323, 324, 375, 382–385, 461, 481, 482, 492
Kelvin Lord (Thomson William), 283
Kiberstis Paula, 243, 482
Kitano Hiroaki, 248, 255, 256, 260, 261, 482
Kline Stephen, 203–205, 207, 222, 239, 310, 311, 474
Klitzing Lebrecht von, 12, 375, 391, 392, 461, 482
Kolcow Nikolaï, 202
Krough August, 110
Krueger Albert, 128
Kühn Alfred, 199, 200
Kuhn Thomas, 92, 406, 407, 482
- La Mettrie Julien Offray de, 15, 141
Lacassagne Antoine, 148
Lagerspetz Kari, 170, 482
Lamarck Jean-Baptiste de, 182
Lane Nick, 336, 337, 482
Langton Christopher, 454
Laplace Pierre, 141, 214, 315, 318
László Ervin, 235, 246, 247, 482
Lavoisier Antoine, 15
Leeuwenhoek Antoni van, 16
Leinfellner Werner, 280, 367, 368, 478, 483
Levene Phoebus, 275
Lewes George Henry, 65, 67, 68, 483
Liebig Justus von, 15, 114
Lindemann Frederick, 181
Lipson Carol, 117, 138, 141, 149, 150, 152, 168, 169, 477

- Loeb Jacques, 18–20, 53, 483, 484
 London Fritz, 70, 115, 172, 202, 210, 212, 216, 221, 315, 359
 Longmire Conrad, 330–332, 488
 Longo Giuseppe, 276, 277, 368–370, 374, 471, 483
 Lorenz Konrad, 64, 65, 483
 Lotka Alfred, 205
 Luisi Pier, 35, 36, 75, 76, 78–81, 483
 Luria Salvador, 118, 125, 132, 133, 137, 319, 322, 323, 372, 467, 483
 Lwoff André, 91, 128, 186, 194, 273, 293, 294, 483
- Lysenko Trofim, 299, 300, 483
- Mach Ernst, 180
 MacLeod Colin, 202, 275, 296, 322
 Malaterre Christophe, 69–74, 224, 483, 484
 Marcum James, 21, 23–25, 35, 65–69, 72, 75, 77, 242, 244, 246, 247, 251, 253, 257, 259, 469, 484
 Margulis Lynn, 285, 395, 484
 Mason Max, 34
 Maturana Humberto, 395
 Maxwell James Clerk, 85, 160, 204, 218–220, 281, 304, 431
 Mayr Ernst, 15, 17, 21, 37, 38, 47, 48, 91, 166, 484
 Mazzocchi Fulvio, 244, 249–252, 254, 259, 260, 484
 McCarty Maclyn, 202, 275, 296, 322
 McClintock Barbara, 199
 McCrea William, 185, 284, 484
 McElheny Victor, 138, 484
 McFadden Johnjoe, 140, 141, 336, 337, 352, 398, 399, 402, 414, 422, 434–438, 464, 471, 484
 Meitner Lise, 115, 117, 118, 152
 Mendel Gregor, 27, 146, 194–196, 201, 232, 246, 328
 Meyer-Abich Adolf, 52, 151, 485
 Meyerhof Otto Fritz, 106, 107, 108, 485
 Mill John Stuart, 65–68, 78, 485
 Miller Stanley, 71, 72
 Misiek Józef, 97, 98, 109, 485
 Mohl Hugo von, 17
 Mohr Hans, 40, 485
- Monod Jacques, 29–31, 225, 485, 493
 Moore Walter, 185–188, 485
 Mora Peter, 47, 485
 Morange Michael, 88, 91, 92, 94, 98, 116, 119, 120, 125, 127, 128, 130, 131, 133, 137, 249, 274, 275, 282, 297, 298, 319, 407, 485
 Morgan Conwy, 68, 485
 Morgan Thomas Hunt, 127, 133, 196–199, 232, 275, 300
 Moss Lenny, 115, 131, 133, 185, 209, 210, 212, 213, 220, 221, 232, 233, 312, 325, 485
 Mukunda Narasimhaiengar, 181, 184, 185, 266, 284, 307, 312, 485
 Muller Herman Joseph, 106, 120, 125, 129, 139, 158, 198, 266, 284, 291, 305–307, 325, 474, 484, 485
 Mulliken Robert, 70
- Nadeau Robert, 94, 111, 485
 Nakamura Haboku, 296, 297, 486
 Nanjundiah Vidyanand, 118, 127, 130, 139, 333, 334, 486
 Needham Joseph, 58, 191, 192, 193, 486
 Neumann John von, 226, 245, 246, 454, 486
 Neurath Otto, 159, 486
 Newton Izaak, 14, 44, 45, 72, 85, 96, 105, 219, 261, 357
 Nicolis Grégoire, 279, 280, 486
 Niel Cornelius van, 119
 Noble Denis, 64, 486
 Northrop John, 128
 Novick Aaron, 119
- Ockham William, 83
 Ogryzko Vasily, 283, 347–355, 373, 486
 Olby Robert, 94, 115, 118, 123, 132, 137, 184, 209, 210, 212, 214, 216, 219, 221, 266, 294, 319–322, 324, 325, 328, 330, 474, 486, 491
 O'Malley Maureen, 245, 251, 252, 254, 486
 Onsager Lars, 281
 Oparin Aleksander, 72, 300, 301, 486
- Paine Thomas, 277
 Painter Theophilus, 199

Pasteur Ludwik, 127, 285
 Patel Apoorva, 12, 375, 438–444, 446–450, 464, 486
 Pati Arun, 12, 283, 352, 358, 375, 397–400, 416, 428, 438, 453, 454, 457, 465, 471, 474, 477–479, 483, 486, 487, 494
 Pattee Howard Hunt, 108, 302, 336, 486, 487
 Pauling Linus, 70, 150, 151, 223, 276, 295, 298, 299, 308–310, 330, 487
 Penrose Roger, 283, 304, 336, 357, 358, 373, 399, 400, 487
 Perutz Max, 121, 122, 150, 151, 181, 185, 213, 295, 296, 305, 306, 487
 Phycomyces, 139
 Pichot André, 275, 302, 313, 487
 Pietzsch Joachim, 181, 215, 324, 329, 487
 Pinel Philippe, 44
 Pisum sativum, 194
 Pittendrigh Colin, 295, 487
 Plamondon Ann, 43, 62, 168, 487
 Planck Max, 88, 96, 110, 140, 181, 208, 219–222, 472
 Plotyn, 65
 Polanyi Michael, 69, 168, 172, 266, 289, 478, 487, 492, 493
 Porfiriusz, 342
 Prigge Richard, 151
 Prigogine Ilya, 235–237, 239, 279, 280, 368, 486, 487
 Pross Addy, 32, 33, 487, 492
 Proust Joseph Louis, 15
 Przibram Karl, 183
 Purkinje Jan Evangelista, 16, 17, 482

 Quastler Henry, 335

 Rashevsky Nicolas, 246
 Ray L. Bryan, 243, 245
 Regenmortel Marc van, 38–40, 489, 493, 494
 Reichenbach Hans, 161, 162, 488
 Reitz John, 330, 331, 332, 488
 Reynolds Craig, 74
 Riedl Rupert, 367, 368, 374, 488
 Ritter William Emerson, 50, 488
 Roberts Leslie, 243, 482
 Roll-Hansen Nils, 31, 58, 63, 83, 94, 95, 101–106, 109, 114, 127, 128, 134, 135, 137–139, 196, 314, 316, 317, 488
 Rompe Robert, 147
 Rosen Robert, 246, 302, 303, 488
 Rothschild Lynn, 80, 81, 488
 Roux Wilhelm, 46
 Ruse Michael, 27, 28, 31, 32, 48, 62, 138, 242, 407, 488, 489
 Ruske Ernst, 137
 Russell Bertrand, 246
 Russell Edward Stuart, 58, 59, 63, 83, 488, 489

 Sagan Dorion, 285, 360, 363–365, 367, 373, 395, 484, 489
 Sarkar Sahotra, 34, 39, 40, 63, 90, 91, 138, 181, 195, 224, 225, 230, 231, 249, 255, 266, 281, 282, 478, 483, 488, 489, 491
 Sauvages François Boissier de, 43
 Schaffner Kenneth, 26, 27, 108, 138, 171, 481, 489
 Schleiden Matthias Jacob, 16
 Schlesinger Max, 128
 Schlick Moritz, 160, 489
 Schneider Eric, 360–365, 367, 373, 489
 Schrödinger Erwin, 9–12, 98, 120, 125, 141, 150, 180–191, 193–198, 200–203, 205, 207–231, 234, 235, 239, 243, 251, 261–263, 265–319, 321–341, 344, 346, 347, 351, 353, 355–360, 363–365, 367–374, 387, 388, 397, 398, 417, 457, 460, 465, 467, 468, 470, 471, 474–476, 478–491, 493, 494
 Schultze Maksymilian, 17
 Schwacke John, 245, 250, 256, 257, 260, 494
 Schwann Theodor, 16
 Scott Alwyn, 271, 272, 411, 489
 Segrè Gino, 117, 119, 162, 163, 282, 489
 Seitz Frederick, 163, 168, 172, 489
 Semon Richard, 55–58, 180, 182, 314, 490
 Shannon Claude, 222, 226, 245, 246, 312, 341
 Sherrington Charles Scott, 20, 190, 191, 261, 490
 Simmons John, 91, 97, 98, 115, 117, 127, 131, 181, 184, 322, 490
 Simon Francis, 292
 Sinnott Edmund Ware, 190, 261, 490

Slater John, 70
 Smuts Jan Christian, 50, 51, 490
 Spencer Herbert, 205
 Spinoza Baruch, 180
 Stahl Georg Ernest, 43
 Stanley Wendell, 128
 Steen Wim van der, 170, 171, 494
 Stent Gunther, 99, 117, 128, 130, 131, 210, 215, 311, 312, 318, 319, 320, 326–328, 372, 473, 482, 490, 491
 Stern Kurt, 326, 372, 491
 Stewart Ian, 451, 454, 491
 Sturtevant Alfred, 199
 Summers William, 121, 125, 491
 Sutton Walter, 195
 Swain John, 12, 375, 451–453, 465, 491
 Symonds Neville, 120, 202, 266, 319, 322, 323, 491
 Szarski Henryk, 62, 491
 Szilard Leo, 119, 281, 282, 323, 491

 Tatum Edward, 200, 270, 295, 298, 322, 484
 Teich Mikulas, 324, 491
 Thomsen Vilhelm, 95
 Timofiejew-Riesowski Nikołaj, 118, 120–125, 129, 147, 184, 186, 190, 209, 261, 307, 322, 475, 482, 488
 Tschermak Erich von, 195
 Turing Alan, 226, 245, 246, 276, 455, 483
 Twort Frederick, 127

 Urey Harold, 71

 Valera Éamon de, 181, 185, 186, 284, 484
 Varela Francisco, 395
 Voit Eberhard, 50, 245, 250, 256, 257, 260, 494
 Volta Alessandro, 96
 Vries Hugo de, 189, 195

 Waddington Conrad, 109, 302, 325, 336, 472, 487, 493
 Wanjohi Gerald, 30, 31, 493

 Warburg Otto, 106
 Watson James, 26, 70, 128, 134, 137, 138, 223, 224, 226, 273, 275, 282, 283, 286, 318, 319, 323, 326, 329, 330, 335, 339, 349, 372, 407, 466, 473, 482, 484, 489, 490
 Weaver Warren, 34, 493
 Weber Bruce, 35, 130, 240, 318, 476, 493
 Weismann August, 194, 338, 340
 Welch G. Rickey, 17, 201, 285, 296, 493
 Wharton John, 277–279, 493
 Whitehead Alfred North, 246
 Wicken Jeffrey, 35, 356, 357, 373, 493
 Wiener Norbert, 226, 245, 246, 269, 312, 493
 Wigner Eugene, 171, 493
 Wilkins Maurice, 119, 319, 327, 328, 330, 372, 493
 Williams Robert, 39, 40, 493
 Wilson Edmund Beecher, 18, 19, 287, 484
 Wilson Edward, 29, 33, 492, 494
 Winterstein Hans, 159, 494
 Wiseman Howard, 12, 375, 400, 494
 Witkowski Jan, 190, 267, 494
 Woese Carl, 12, 41, 42, 375, 389, 390, 391, 461, 478, 494
 Wöhler Friedrich, 16
 Wolff Caspar Friedrich, 46
 Wolfram Stephen, 455
 Wolkensztejn Michail, 166, 169, 494
 Woodger Joseph Henry, 58, 60–63, 83, 246, 488, 494
 Wright Robert, 322, 494
 Wright Sewall, 197

 Yoxen Edward, 181, 183–186, 190, 191, 193, 222, 266, 267, 292, 300, 312, 323, 327, 330, 332, 333, 494

 Zeilinger Anton, 456, 465, 478
 Zilsel Edgar, 107, 108, 157, 158, 495
 Zimmer Karl G., 118, 120–125, 147, 184, 186, 190, 209, 261, 307, 322, 475

INDEKS RZECZOWY

- adenina, 443
akcelerator cząstek, 92
aktomiozyna, 421
alfabet Morse'a, 215, 272, 307
algorytm Boole'a, 448
algorytm Grovera, 448
algorytm stada, 74
algorytmiczna teoria informacji, 433
allele, 232, 233
allosteria, 225
aminokwasy, 26, 71, 72, 76, 77, 80, 131, 201, 202, 225, 227, 233, 274, 310, 334, 335, 343, 440, 441, 443, 445–447, 450
amoniak, 71
analityczna metodyka, 15
anatomia, 15, 133, 225, 263
animacja, 7, 43
animizm, 43
antykodony, 77, 446, 450
antyredukcjonizm, 11, 22, 63, 84, 105, 106, 376, 460, 469
aperiodyczny kryształ, 186, 188, 212–214, 221–223, 225, 226, 262, 270–273, 275, 279, 280, 285, 286, 290, 291, 299, 302, 304, 305, 315, 325, 327–329, 337, 357, 358, 417
apikalne komórki, 77
astrobiologia, 72
atomizm, 246
atomy, 8, 14, 20, 22, 27, 36, 61, 67, 70, 75, 77, 91, 96–98, 100, 101, 103, 104, 113, 114, 122–124, 126, 127, 129, 135, 136, 145, 146, 153, 156, 178, 183, 188, 201, 204, 206–212, 214–216, 218, 219, 249, 270, 272, 273, 278, 293, 296, 304, 326, 329, 333, 336, 341, 344, 351, 357, 376, 378, 381, 386, 398–400, 402, 404, 406, 408, 411, 415, 423, 426, 431, 439, 445, 471, 479, 490
ATP (adenozynotrifosforan), 41, 241, 242, 306, 421
atraktor, 73, 74, 280, 363, 366
augustianie, 194
autokataliza, 198
automat komórkowy, 12, 74, 426, 453–457, 465
autonomia, 37, 46, 73, 77, 102, 104, 151, 152, 160, 368, 370, 376, 382, 388, 391, 461
autopojęza, 395
bakterie, 76, 118, 119, 127–133, 149, 188, 193, 202, 228, 230, 231, 234, 235, 241, 322, 334, 379, 384, 385, 388, 390, 392, 402, 428, 441
bakteriofagi, 97, 115, 117, 118, 127–131, 133, 137, 139, 228, 298, 490
białka, 30, 35, 39, 76, 82, 128, 129, 131, 201, 202, 225–227, 230–234, 237, 242, 244, 251, 256, 261, 263, 273, 277, 296, 299, 308–310, 324, 334, 335, 348, 349, 372, 388, 395, 398, 403, 437, 441, 443–447, 461
bifurkacja, 73, 258, 366
biochemia, 11, 16, 72, 81, 106, 119, 129, 137, 175, 182, 193, 194, 200, 201, 223, 235, 255, 261, 299, 327, 398, 450
bioenergetyka, 223, 229, 234, 251, 263
biofizyka, 119, 125, 146, 147, 327
biofor, 194
biogeneza (pochodzenie życia), 311, 387, 419, 425, 427
bioinformatyka, 242
biologia kwantowa, 10, 140, 147, 148, 157, 337, 399, 401, 427, 463, 465, 471, 482
biologia mechanistyczna, 14–17, 58, 141, 142
biologia molekularna, 11, 26, 27, 30–32, 34, 39, 41, 42, 47, 48, 69–73, 85, 101,

108, 117–119, 125, 127, 131–133, 138, 141, 169, 170, 182, 191, 216, 223–225, 227–231, 233, 243, 248–250, 254, 255, 260, 262–264, 267, 272–274, 276, 282, 285, 297, 308, 311, 318–324, 327–329, 334–336, 338, 347–350, 356, 360, 372, 376, 380, 382, 383, 387, 393, 397, 406, 411, 413, 415–418, 449, 466, 467, 494
 biologia organizmalna, 54
 biologia rozwojowa, 35, 84, 285
 biologia systemów, 245, 251–256, 260, 261, 263, 264, 347, 349, 383, 463, 474
 biologiczna swoistość, 26
 bioluminescencja, 76
 biosfera, 38, 389, 395
 biosystemy, 110, 166–168, 178, 244, 350, 396, 405, 457, 463
 biotechnologia, 360, 401
 biotoniczne prawa, 83, 166, 168, 169, 178
 biotop, 395
 bit, 204, 222, 234, 393, 419, 420, 422, 423, 428–432, 434, 459, 478
 błony biologiczne, 76, 390

 cechy dominujące, 195
 cechy recesywne, 195
 centralny dogmat, 30, 202, 227, 231, 249, 250, 273, 335, 347, 348, 349, 467
 chemia flogistonowa, 15
 chemia kwantowa, 70, 178, 280, 400, 457, 465
 chemia prebiotyczna, 69–72
 chemia syntetyczna, 71
 chemia systemowa, 72
 chemotaksje bakteryjne, 384, 461
 chromatyna, 348
 chromosomowa teoria dziedziczności, 195, 196
 chromosomy, 31, 57–59, 113, 135, 149, 155, 158, 186, 194–197, 199, 201, 202, 209, 213–216, 225, 230, 262, 269, 270, 272–274, 276–278, 283, 288–291, 295, 298, 301, 305, 306, 324, 326, 337, 484, 494
 chronoholizm, 111
crossing over, 197, 279, 289
 cukry, 82
 cybernetyka, 218, 226, 246, 268, 269, 312, 377, 384, 454, 473, 493
 cytoplazma, 225, 348
 cytoszkielet, 359
 cytozyna, 443
 cząstki elementarne, 22, 36, 89, 96, 157, 169, 192, 272, 353, 399, 415, 429, 431–433, 462
 czynniki dziedziczenia, 135, 146, 194, 195, 196

 dedukcja, 66, 68–71, 82, 100, 105, 114, 129, 166, 171, 201, 289, 333, 485
 dekodowanie, 37, 276
 dekoherencja, 12, 354, 359, 373, 414, 415, 420–423, 426, 427, 430, 436–438, 460
 demon Maxwella, 160, 281
 determinizm, 23, 30, 37, 88, 93, 142, 157, 166, 302, 315, 321, 372, 394, 492
 DNA (kwas dezoksyrybonukleinowy), 28–32, 35, 39, 41, 71, 82, 85, 94, 111, 128, 131, 137, 138, 194, 202, 216, 223–228, 230–234, 240, 241, 243, 244, 249, 250, 252, 254, 262, 263, 273, 275, 277, 279, 280, 282–285, 296, 299, 319, 322, 324, 329, 334–340, 344, 345, 347–349, 351, 357–359, 361, 362, 365, 372, 373, 378–380, 382, 386, 393, 395, 398, 407, 411, 416, 419, 421, 423, 426, 436–438, 440, 443, 444, 448, 450, 451, 457–460, 466, 471, 473, 478, 484, 486
 dobór naturalny (selekcja naturalna), 35, 189, 240, 292, 341, 346, 380, 400, 403, 418, 420, 441, 450
Drosophila melanogaster, 120, 121, 126, 127, 129, 133, 155, 186, 190, 196, 198, 199, 288, 312, 403, 488
 druga zasada termodynamiki, 169, 183, 192, 193, 203, 205–207, 218, 229, 235, 240, 268, 281, 283, 284, 297, 299, 305, 330, 331, 356, 360–365, 367, 373, 374, 392
 „drzewo decyzyjne”, 425
 dusza, 7, 14, 43, 44, 48, 54, 58, 274, 300
 dyfuzja, 74, 188, 398, 417, 426
 dynamiczna biblioteka kombinatoryczna, 435, 436, 464

- dyssypacja, 366, 392
 dziedziczenie, 32, 56, 87, 118, 124, 146,
 149, 155, 182, 185, 186, 194–197, 208,
 276, 309, 319, 321, 332, 357, 373, 376,
 392
 dziedziczność, 55, 71, 108, 109, 113, 118,
 135, 138, 146, 182, 189, 190, 194,
 195, 198, 214, 228, 267, 283, 286,
 291, 301, 302, 317, 320, 324, 325,
 327, 328, 340, 344, 347, 351, 369,
 373, 397, 407, 462
 „efekt motyla”, 248
 „efekt pozycji”, 199
 egzaptacje, 81
 egzergia, 366
 egz nukleaza, 459
 egzony, 233
 ekosystem, 38, 240, 286, 361–363
 ekscyton, 359
 eksperyment z dwoma szczelinami, 223,
 404
 ekspresja genów, 23, 34, 123, 225, 227,
 228, 234, 249, 255, 256, 356, 378
 ekwipotencjalność, 46
 elektromagnetyzm, 272, 304
 elektrony, 96, 129, 136, 164, 167, 176, 206,
 328, 353, 359, 399, 402, 404, 411,
 412, 423, 428, 429, 437
 elementarizm, 50
 emanacja, 65
 embriologia, 45, 46, 63, 84, 193, 243
 emergencja, 63–67, 69–81, 83, 84, 240,
 241, 260, 339, 362, 363, 377, 386,
 455, 461, 487, 492
 emergentyzm, 13, 42, 63, 64–70, 75, 77,
 80–83, 86, 397, 491, 493, 495
 energia swobodna, 192, 193, 293, 296, 306,
 310, 364, 367, 368, 374, 438, 459
 engram, 56–58, 182
 entelechi, 46
 entelechia, 46, 54, 59, 65
 entropia, 168, 169, 183, 192, 203–205, 207,
 217, 218, 222, 223, 234, 235, 238,
 239, 241, 268, 269, 273, 274, 276,
 279, 281, 282, 284, 285, 291–295,
 297, 299, 305–313, 330–332, 335,
 363, 364, 366–370, 374, 392, 431, 439
 enzymy, 26, 36, 77, 128, 199–202, 223,
 231, 232, 236, 241, 242, 255, 270,
 275, 276, 291, 295, 299, 307, 310,
 312, 313, 322, 348, 349, 391, 399,
 400, 421, 437, 438, 458
 epigeneza, 45, 46
 epistaza, 243
 epistemologia, 7, 8, 10, 11, 13, 23–25, 79,
 84, 88, 97, 99, 101, 105, 116, 117,
 126, 139, 142, 152, 158, 169, 172,
 177, 182, 203, 265, 271, 296
 era cennej prostoty, 228
 era heroiczna, 223, 224, 226–228, 234, 243,
 262
Escherichia coli (*E. coli*), 149, 228, 230, 241,
 392
 esencjalizm genetyczny, 23
 eter, 334
 eukarionty, 230, 231
 ewolucja, 36, 42, 59, 62, 68, 73, 75, 111,
 135, 163, 170, 192, 194, 197, 203,
 205, 206, 235–237, 239, 251, 259,
 281, 285, 291, 301, 314, 337–339,
 341, 346, 347, 354, 355, 362, 363,
 372, 380, 389, 391, 393, 402, 407,
 420, 440–445, 447, 449–451, 454,
 456, 469, 482, 491
 fatalizm genetyczny, 23
 fenotyp, 22, 23, 196–198, 226, 227, 233,
 243, 244, 276, 343, 418, 442
 fermentacja, 16, 55
 filogenetyka, 72
 fitness, 81
 fizjologia, 20, 51, 94, 106, 112, 113, 120,
 138, 144, 147, 149, 153, 165, 177,
 206, 214, 251, 298, 327, 483
 fizyka klasyczna, 15, 42, 88, 95, 98, 100,
 101, 135, 138, 143, 175, 336, 337,
 344, 357, 373, 394, 402, 403, 405,
 414, 457
 fizyka subatomowa, 22
 fizykalizm, 23, 173
 flogiston, 43, 44, 277
 fluid vitalny, 44, 45
 fluktuacje kwantowe, 352, 426, 428, 430–
 433, 460
 fluktuacje stochastyczne, 204, 307, 308, 351

fotosynteza, 155, 420
 fraktale, 286, 370
 fulguracja, 64
 funkcja biologiczna, 100, 101, 272, 384, 398, 417, 418
 funkcja falowa, 167, 176, 359, 420, 422, 424, 436
 funkcje biologiczne, 81, 417, 427

 gamety, 288
 gatunki, 27, 31, 38, 56, 73, 76, 170, 174, 190, 267, 283, 303, 341, 344, 362, 390, 396, 416
 genetycyzm, 23
 genetyczny kod, 8, 85, 121, 138, 203, 213, 215, 223, 225, 227, 228, 230, 262, 263, 273, 275, 278, 281, 282, 284, 309, 318, 321, 334, 338, 343, 378, 388, 393, 429, 443, 461, 467, 474
 genetyka klasyczna, 27, 197, 209, 228, 246, 328
 genocentryzm, 212
 genom, 35, 40, 47, 85, 124, 224–227, 229–234, 244, 248, 249, 251, 254, 255, 263, 273, 275, 276, 281, 290, 291, 304, 338, 340, 343, 344, 369, 377–380, 390–392, 416, 442, 461, 462
 genomika, 8, 242, 244, 250, 252, 254, 255
 genotyp, 22, 23, 146, 196–198, 226, 418, 442
 geny, 22, 23, 27, 31, 32, 34, 36, 39, 40, 57, 59, 76, 92, 117, 118, 120–126, 128, 130, 133, 135, 136, 146–150, 154, 155, 183, 186, 189–191, 194–202, 208–210, 213–216, 221, 224–235, 240, 243, 244, 246, 248, 249, 251, 254, 256, 257, 259–263, 269, 270, 273, 274, 276–278, 282, 283, 284, 286, 288, 289, 291, 292, 294–299, 301, 302, 304–307, 309, 310, 312, 321, 322, 325–330, 332, 337, 338, 350, 361, 362, 365, 382, 388–391, 393, 407, 440, 461, 470, 481, 485, 491
 geometria euklidesowa, 453
 gestaltyzm, 11, 49
 glider, 426
 Gödla twierdzenie, 395

 gra w życie, 426, 455, 465
 grawitacja, 45, 272, 304, 387
 guanina, 443

 helikalna struktura, 290
 hemoglobina, 76, 94, 225, 309
 heterokataliza, 198, 199
 heteropatyczne prawo, 66, 67
 hipoteza „optymalnego rozwiązania”, 441
 hipoteza „zamrożonego wypadku”, 441
 histereza, 28
 histony, 348, 349, 438
 holizm, 11, 48, 50, 52, 53, 59, 86, 111, 244, 246, 260, 264, 375, 414
 holograf, 413
 homeodynamika, 258
 homeostaza, 37, 40, 226, 257–259, 384
 hybrydy, 194, 401

 immanentna analiza, 10
in vitro, 135, 206, 250
 informacja genetyczna, 30, 31, 47, 71, 124, 131, 225, 227, 249, 271, 275, 283, 319, 328, 329, 335, 340, 345–347, 351, 356, 357, 378, 379, 391, 393, 417, 423, 440, 441, 444, 449, 458, 462, 483
 informatyka, 12, 226, 246, 276, 383, 449, 453, 454
 integratywizm, 11, 48
 interaktory, 35
 introny, 233
 intuicja, 7, 270, 273
 inżynieria molekularna, 228
 izomer, 212

 jądro komórkowe, 16, 38, 120, 121, 158, 194, 195, 208, 225, 230, 234, 442
 jatro-fizycy, 152
 jatro-kwantyści, 152
 „jeden gen – jeden enzym” hipoteza, 200, 270, 276, 295, 312, 322
 jeżowiec, 19, 46

 klonowanie, 228, 422
 kod diamentowy, 334, 335, 467
 kodon, 225, 343, 446, 448, 450

kodowanie, 37, 119, 191, 225–227, 276,
 282, 307, 326, 338, 344, 345, 393,
 443, 445, 447, 448
 kolonia, 76, 229, 239, 389, 390, 461
 komora Wilsona, 144
 komórka jajowa, 45, 113, 158, 196, 197,
 214, 219, 378
 komórki Bénarda, 74, 240, 361, 363
 komplementarności zasada, 9, 11, 88, 97–
 100, 108–112, 115, 117, 119, 126,
 129, 137, 138, 140, 152, 153, 169, 177,
 178, 284, 306, 314, 321, 371, 417, 485
 kompozycjonizm, 11, 49
 komputer cyfrowy, 429, 431, 432, 449
 konkurencja, 426, 440, 442
 kontekstowe badania, 5, 12, 375, 397, 398
 kooperacja, 442
 kopenhaska szkoła, 9, 11, 13, 89, 180, 181
 korelacje EPR, 415, 416
 kowalencyjne wiązania, 201, 202, 216, 226,
 283, 299, 346
 kreatywność, 167, 168, 386
 krystalografia rentgenowska, 203, 225
 kryształy, 61, 191, 201, 212, 216, 236, 237,
 270, 272, 273, 299, 304, 325, 328,
 329, 358, 364, 365
 kubity, 419, 420, 422, 423, 428, 448
 „kulkowo-szkieletowy” model, 417
 kwantowa koherencja, 403, 410, 415, 420,
 422, 425, 437, 438, 457
 kwantowa superpozycja, 402, 418, 419, 422,
 424, 436, 437, 438
 kwantowe automaty komórkowe, 10, 426,
 455–457
 kwantowy efekt Zenona, 418, 422, 438

 laser, 74, 410, 463
 licznik Geigera, 144
 limfocyty, 271
 lipidy, 82, 241

 łańcuch przyczynowy, 23, 257, 263

 magnetorecepcja, 352
 makroskopowy system, 22
 maszyna Turinga, 455
 maszyny Bernarda, 384, 385

 materia, 8, 13, 14, 16, 17, 20, 29, 33, 34,
 37, 39, 44, 45, 47, 49, 52, 55, 56, 58,
 63, 68, 69, 81, 85, 89, 90, 99, 102–
 106, 108, 109, 111, 122, 127, 164,
 166, 174–176, 178, 185, 191–193,
 200, 205, 206, 209, 213, 215, 216,
 218–220, 229, 235, 237, 239–241,
 269, 280, 281, 292, 296, 297, 299–
 301, 304, 307–309, 317, 324, 326,
 331, 335, 337, 341, 342, 352, 354,
 367, 370, 373, 376–380, 382, 386,
 387, 393, 397, 401, 402, 404, 405,
 408, 409, 411, 412, 414, 416, 417,
 422–424, 426, 457, 459, 464, 481,
 486
 mechanicyzm, 7, 10, 13–15, 18, 21, 43, 46,
 48, 49, 52–54, 56–59, 65, 67, 75, 86,
 87, 95, 103, 142, 300, 318, 376, 402
 mechanika klasyczna, 21, 85, 100, 114,
 152, 377
 mechanika kwantowa, 9, 11, 21, 69, 70, 85,
 88–90, 92, 95–100, 108, 109, 119,
 127, 137, 140, 141, 143, 146, 149,
 151, 152, 157–159, 164, 165, 167,
 168, 171, 173, 177, 179, 181, 186,
 190, 210, 213, 223, 283, 284, 288,
 294, 299, 300, 302, 304, 308, 315,
 317, 319, 323, 326, 329, 333, 336,
 337, 339, 351, 355, 358, 372, 373,
 398–401, 403–405, 407, 410, 417–
 421, 424, 427, 428, 430–432, 434, 436,
 438, 451–453, 457, 460, 464, 465, 470,
 473
 mechanika macierzowa, 140, 147
 metabolizm, 26, 37, 129, 154, 167, 201,
 217, 241, 242, 279, 283, 293, 297,
 312, 320, 367, 380, 388, 392, 394,
 395, 397, 411, 438, 461, 462, 464
 metabolomika, 244
 metagenomika, 390
 metoda PCR, 231, 416
 micele, 145
 mikroskopowy poziom, 83, 204, 318, 428,
 432
 mikroświat, 83
 mikrotrapy, 456
 mioglobina, 76, 80
 mitochondria, 40, 175

mnem, 55, 56, 58, 182, 314
 mnemizm, 11, 48, 55–57
 mocznik, 16, 71
 model Rayleigha-Bénarda, 74
 molekuly, 8, 14, 20, 26, 28, 29, 35, 37, 41, 59, 70–72, 75, 87, 123, 124, 129, 130, 135, 145, 146, 149–151, 154, 155, 175, 201, 202, 208, 212, 213, 223, 224, 227–229, 235, 236, 249, 254, 258, 262, 263, 278, 288, 289, 294, 295, 298, 304, 320, 329, 333, 362, 364, 376, 378, 381, 393, 397, 408, 415, 417, 423, 426, 439, 457
 morfogeny, 246
 motor molekularny, 458–460
 mozaika tytoniu, 127, 128
 mózg, 22, 57, 174, 235, 247, 278, 358, 373, 393, 432
 mutacje, 33, 34, 73, 118–126, 132, 133, 146–149, 156–158, 186, 189, 190, 196, 198, 199, 209, 212, 219, 226, 234, 276, 279, 288, 289, 291, 301, 302, 305, 306, 321, 325, 326, 346, 399, 405, 426, 435, 441, 442, 445, 449, 460
 mutanty, 128, 198

 nadciekłość, 358
 nadprzewodnictwo, 358, 422, 437
 Nagroda Nobla, 11, 106, 118, 120, 137, 179, 181, 193, 197, 198, 223, 285, 308, 325, 467
 nanomaszyny, 401, 458
 nanomotory, 457, 458
 nanotechnologia, 352, 401, 457
 natura życia (istota życia), 7–9, 11, 13, 14, 30, 36, 48, 54, 57, 60, 65, 72, 87, 88, 93, 113, 115, 119, 140, 163, 180, 182, 185, 260, 262, 300, 309, 333, 387, 397, 486, 492
 natura, 15, 17, 46, 47, 52, 53, 68, 88, 98, 111, 188, 189, 207, 210, 245, 272, 278, 291, 321, 325, 394, 423, 424, 458, 462
 naturalizm, 44, 81, 494
 negentropia (ujemna entropia), 205, 234, 268, 269, 294
 neolamarkizm, 56, 141
 neowitalista, 19, 169
 neurony, 41, 235, 247, 358, 437
 neutrina, 422
 neutrony, 429
 nieoznaczoności zasada, 88, 96–99, 113, 139, 160, 164, 183, 188, 193, 222, 301, 302, 305
 nieprzyczynowość, 143–145, 155, 156, 160
 nominalna jednostka, 341–343
 nukleotydy, 32, 36, 71, 213, 232, 236, 334, 343, 378, 391, 400, 411, 416, 421, 437, 440, 448

 odporność, 128, 132, 133, 248, 259, 384, 390, 444
 odwrotna transkryptaza, 231
 ontogenetyczny rozwój, 154
 ontologia, 7, 8, 23–25, 31, 34, 35, 43, 79, 84, 102, 104, 105, 142, 174, 175, 210, 253, 376, 381, 404
 operonowy model, 225, 249
 oprogramowanie, 261, 406, 419, 440, 444
 organelle, 29, 30, 33, 36, 40, 82, 175, 194, 227, 359, 395
 organicyzm, 11, 13, 48–53, 55, 58, 62, 63, 86, 141, 168, 245
 organizm, 8, 14–31, 34, 35, 37–41, 43–52, 54–68, 71, 73, 75–77, 81, 82, 87, 90, 91, 94, 95, 100, 101, 103–108, 110–115, 117, 123, 126, 128–130, 133, 135, 137, 139, 143–146, 148, 152–158, 162, 164–167, 169–178, 182, 183, 186, 188, 193, 196–198, 202, 203, 205–209, 213–215, 217–219, 221, 224, 226–231, 233–236, 239–246, 248–251, 256–258, 260, 261, 263, 268, 269, 272–276, 278, 279, 283, 284, 286, 287, 290, 292–295, 299–301, 303, 305, 306, 308–311, 313, 316, 319–321, 326, 331, 332, 335, 337, 344–346, 348, 351, 359, 360, 363–365, 368–370, 374, 376–380, 384–393, 395, 396, 399, 402–404, 408, 410, 415, 417–421, 438–443, 445, 448, 449, 452, 455, 461, 462, 464, 465, 470, 479
 organizmalizm, 11, 48, 50
 oscylatory, 455
 osłanianie (screening), 421, 437
 osprzętowanie, 418, 440

 pamięć holistyczna, 168
 panpsychizm, 54

paradoks wartości C, 230
 paradygmat, 14, 195, 244, 260, 276, 285,
 361, 362, 406–408, 463, 469, 470
 paramagnetyzm, 209
 partenogeneza, 19
 periodyczny kryształ, 188, 213, 271, 290,
 291, 304
 plejotropia, 243
 podwójna helisa DNA, 71, 131, 138, 224,
 226, 273, 282, 283, 329, 333, 339,
 411, 437, 466
 polimeraza DNA, 41, 228, 231, 427, 458,
 459
 populacja, 8, 119, 170, 197, 233, 257, 434,
 440
 porządek z nieporządku, 219, 220, 234,
 262, 325, 369
 porządek z porządku, 219–222, 262, 306,
 335, 337–339, 356, 370, 373
 Potwór Spiegelmana, 400
 prawa biotoniczne, 171
 prawdopodobieństwo, 57, 83, 102, 146,
 161, 162, 191, 195, 204, 211, 218,
 220, 238, 280, 293, 294, 309, 340,
 344, 380, 409, 412, 413, 424–426,
 433, 446, 452, 456
 preformacjonizm, 46, 199
 profagi, 128
 Projekt poznania ludzkiego genomu, 244,
 251
 prokarioty, 225, 230
 promieniowanie, 120–122, 124, 126, 129,
 136, 137, 148, 149, 157, 158, 183,
 186, 189, 190, 198, 209, 289, 290,
 326, 331, 333, 361, 408
 proteomika, 244
 protony, 167, 399, 421, 429, 436–438
 protoplazma, 16, 17, 57, 191, 200, 201, 336
 protożycie, 429, 433
 przeciwciała, 150, 223
 przejścia fazowe, 74, 75, 271, 339
 przestrzeń Hilberta, 85, 422
 przyczynowość, 21, 25, 54, 56, 78, 82, 83,
 143, 144, 146, 156, 160, 161, 166,
 227–229, 231, 260, 262, 360, 377,
 396, 416, 469
quorum sensing, 76
 radioizotop, 110
 rasa, 189
 reakcja Biéłousowa-Żabotyńskiego, 74, 240
 redukcja, 20, 24–26, 29, 33, 49, 50, 64, 73,
 160, 166, 171, 219, 220, 249, 296,
 310, 357, 361, 409, 414, 420, 487,
 492
 redukcjonizm, 7, 8, 10, 13, 21–25, 29–31,
 33–36, 38, 40–42, 63, 67, 75, 86, 87,
 102, 105, 109, 117, 152, 163, 227,
 229, 244, 246, 249, 250, 260, 263,
 264, 375, 376, 381, 382, 389, 394,
 397, 402, 409, 460, 462, 463, 469,
 493
 reguła $\sqrt{n}$, 209
 reguła Pauliego, 398, 417
 replikacja, 33–35, 37, 71, 111, 118, 126,
 128, 129, 132, 136, 137, 149, 190,
 213, 215, 224, 226, 228, 231, 232,
 298, 299, 302, 312, 319, 339, 340,
 343, 349, 355, 365, 400, 407, 422,
 423, 426, 427, 436, 443, 459
 replikatory, 35, 422, 423, 424, 425, 426,
 436, 437
 replikaza Q, 400
 rezonans, 149–151, 359, 410, 418, 426
 Rice’a twierdzenie, 452, 453
 RNA (kwas rybonukleinowy), 129, 225,
 227, 230–232, 241, 249, 252, 263,
 273, 275, 324, 335, 340, 358, 365,
 372, 398, 400, 419, 423, 434, 435,
 440, 443, 444, 448, 450
 ruchy Browna, 175, 209
 rudzik europejski, 403
 rybosomy, 41, 82, 225, 227, 230
 rybozymy, 450
 samoorganizacja, 37, 73, 75, 76, 224, 228–
 230, 236, 240, 251, 258, 263, 281,
 345, 347, 356, 361, 373, 380, 392,
 394, 395, 455, 462
 sarkoda, 16, 17
 Schrödingera równanie, 216, 285, 308, 388
 sekwencjonowanie, 35, 36, 224, 225, 248,
 251, 255
 semantyka, 393, 394, 396
 sieci neuronowe, 243, 379

- siła życiowa (*vis vitalis*), 11, 16, 47, 48, 65, 90, 94, 95, 105, 260, 398
- socjobiologia, 29
- spin kwantowy, 353, 402, 423, 426, 428
- splątanie kwantowe, 12, 352–355, 359, 373, 399, 402, 418, 419, 422, 423, 438, 463
- sprzężenie zwrotne, 37, 73, 77, 227, 232, 235, 236, 246, 249, 255, 259, 384, 385, 424
- superpozycja, 359, 402, 436, 448, 463
- supersymetria, 418
- synapsy, 41, 149
- synergia, 82
- syntaktyka, 393
- syntetaza aminoacylo-tRNA, 77
- syntezowe badanie, 278
- systematyka, 15
- sztuczna inteligencja, 454
- sztuczne życie, 29, 74, 75, 401, 453, 454, 465, 491
- środowisko, 13, 16, 26, 39, 51, 61, 103, 111–113, 119, 123, 129, 139, 154, 207, 218, 226, 234, 235, 237, 240, 241, 250, 257, 274, 285, 297, 301, 302, 309, 310, 313, 322, 340, 346, 354, 355, 358, 363–365, 367, 374, 381, 384, 385, 390, 392, 393, 400, 405, 415, 421–424, 427, 436, 438, 439, 448, 454, 456, 458–460, 470, 492
- świadomość, 56, 182, 306, 381, 474
- tautomeria, 436
- tautomerizacja, 436
- technologia kwantowa, 401, 460
- „teoria celu”, 122, 125, 142, 148, 149, 151, 209
- teoria chaosu, 72, 73, 247, 394, 409
- teoria ewolucji, 33, 45, 87, 239, 345, 376
- teoria informacji, 169, 222, 226, 246, 269, 281, 282, 335, 338, 341, 344, 428, 438, 449, 464, 473
- teoria kwantów, 93, 99, 100, 114, 117, 143, 156, 188, 210–212, 220, 316, 415
- teoria systemów złożonych, 454
- Teoria Wszystkiego, 22
- teoria względności, 21, 85, 92, 373, 388, 407
- teoria złożoności obliczeniowej, 401, 451, 452, 465
- teoria złożoności, 247, 248
- teoria wzmacniacza, 145, 146, 149, 152, 158, 160
- termodynamika, 12, 85, 117, 183, 184, 186, 192, 203, 205, 208, 218, 222, 229, 234, 235, 239, 240, 261, 268, 269, 282, 283, 285, 296, 297, 299, 306, 308, 309, 312, 318, 333, 335, 338, 360, 362, 365, 367, 369, 373, 375, 473
- tlen, 15, 28, 35, 36, 66, 76, 83, 94, 106, 107, 200, 201, 225, 241, 292, 293
- Todea*, 290
- transkrypcja, 224, 225, 227, 230, 231, 249
- translacja, 222, 224, 225, 227, 230, 231, 249, 282, 362, 444, 450, 456
- transpozony, 234
- tunelowanie kwantowe, 399, 418, 427, 436, 437, 464
- umweltsyizm, 11, 49
- uniwersalny komputer cyfrowy, 432, 433
- uracyl, 443
- vis essentialis*, 46
- What is life?*, 5, 9, 11, 12, 32, 125, 150, 181–185, 187, 190, 191, 193, 194, 202, 209, 219, 223, 224, 230, 234, 261, 263, 265, 266–268, 271, 272, 274, 276–280, 282, 283, 285–289, 294–296, 298–300, 304–308, 310–314, 318, 319, 321–329, 333–336, 338, 341, 344, 351, 356, 358, 360, 368, 371–374, 391, 392, 395, 397, 405, 417, 451, 457, 471, 473–482, 484, 487–489, 491, 493, 494
- wiedeńska szkoła, 11
- Wielki Wybuch, 333
- wirusy, 118, 127–131, 133, 191, 216, 228, 231, 271, 298, 312, 380, 381, 390, 400, 402, 404, 441, 461
- witalizm, 8, 11, 13, 16, 19, 43–49, 52–54, 56–58, 62, 63, 65, 67, 69, 75, 81, 86, 90, 95, 105, 117, 141, 157–159, 169, 170, 172, 241, 491

witaminy, 82	166, 170, 192, 214, 228, 230, 235, 237,
wynikowe efekty, 66, 68	239, 240, 243, 248, 256, 260, 261, 279,
	280, 285, 310, 321, 364, 365, 369, 370,
„zakodowany scenariusz”, 186, 212, 214,	379, 384, 386, 388, 389, 396, 401, 402,
225, 226, 262, 270, 272–274, 277, 283,	405, 409, 413, 418, 419, 423, 425, 428,
306, 315, 321, 324, 334, 337, 371,	431, 434, 436, 440, 444, 451, 452, 461,
467	464, 465, 469
złożoność, 21, 22, 25, 32, 33, 36–38, 41,	„zupa pierwotna”, 434, 435, 442, 450, 464
42, 63, 70, 75, 76, 78, 81, 95, 129, 163,	zygota, 28

Monografia ma charakter refleksji nad pracami fizyków, którzy podejmują problemy dotyczące świata biotycznego [...]. Autor nie ogranicza się tylko do zreferowania ich poglądów, dokonuje także ich interpretacji na podstawie posiadanej wiedzy metodologicznej i merytorycznej. Powyższy problem w takim zakresie, z wykorzystaniem tak ogromnej literatury niemieckiej i angielskiej, nie był podejmowany w naszym środowisku. Sam zaś proces interpretacji tych stanowisk wymagał znajomości nie tylko języka, metodologii, ale także biologii [...]. Autor swobodnie posługuje się językiem fizyki i biologii zarówno w referowaniu poglądów fizyków, jak i w ich ocenie.

ks. prof. dr hab. Stanisław Zięba
Instytut Biotechnologii, Katolicki Uniwersytet Lubelski
Jana Pawła II w Lublinie

Tematem rozprawy jest opis udziału twórców współczesnej fizyki w próbach zrozumienia fenomenu życia i ogarnięcia go metodologią naukową [...]. Opracowanie dotyczy ważnego i niezwykle interesującego zagadnienia z pogranicza współczesnej biologii i fizyki, a temat został przedstawiony w sposób rzetelny, kronikarsko kompetentny oraz wyczerpujący. Mam nadzieję, że pozycja ta jest dobrym krokiem w kierunku niezbędnego zbliżenia myśli fizycznej, biologicznej i filozoficznej w zgłębianiu wielkiej tajemnicy życia [...]. Wyrażam przekonanie, że publikacja będzie stanowić wartościową i nowatorską książkę w dorobku Wydawnictwa UR.

prof. dr hab. Tadeusz Lulek
Instytut Fizyki, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

ISBN 978-83-7996-458-1

