# Od chemii reakcji do chemii podmiotów: organizacja materii w świetle książki The Age of Alchemy Kit Chapmana


**AUTOR**

Fundacja Dobre Państwo



## STRESZCZENIE / ABSTRACT

Artykuł analizuje przejście od prostej chemii reakcji do złożonych systemów biologicznych, opierając się na koncepcjach zawartych w książce Kita Chapmana. Autor argumentuje, że życie nie jest specyficzną substancją, lecz wynikiem szczególnej organizacji materii i przepływu energii. Kluczowym elementem abiogenezy jest funkcjonalne sprzężenie trzech procesów: replikacji informacji, metabolizmu oraz kompartmentalizacji. W przeciwieństwie do układów zamkniętych dążących do równowagi organizmy są układami otwartymi, które utrzymują wysoką strukturę dzięki ciągłej dyssypacji energii i pozostawaniu w stanie dalekim od równowagi termodynamicznej. Tekst podkreśla, że osobliwość życia nie tkwi w pojedynczych cząsteczkach, takich jak RNA czy DNA, lecz w ich integracji w system zdolny do ewolucji darwinowskiej.

The article analyzes the transition from simple reaction chemistry to complex biological systems, based on concepts contained in Kit Chapman's book. The author argues that life is not a specific substance, but the result of a particular organization of matter and energy flow. A key element of abiogenesis is the functional coupling of three processes: information replication, metabolism, and compartmentalization. Unlike closed systems striving for equilibrium, organisms are open systems that maintain high structure through continuous energy dissipation and by remaining in a state far from thermodynamic equilibrium. The text emphasizes that the singularity of life does not lie in individual molecules such as RNA or DNA, but in their integration into a system capable of Darwinian evolution.


Artykuł stanowi systematyczną analizę przejścia od chemii prebiotycznej do biologii, stawiając tezę, że życie nie jest wynikiem obecności tajemniczej substancji (elan vital),

lecz emergentną właściwością materii. Autor argumentuje, że granica między światem ożywionym a nieożywionym nie przebiega na poziomie składu atomowego, lecz w stopniu organizacji procesów. Kluczem do powstania życia jest funkcjonalne sprzężenie trzech modułów: metabolizmu, kompartmentalizacji (błon) oraz dziedzicznej replikacji informacji, działających w układzie otwartym, poza równowagą termodynamiczną. Tekst analizuje ewolucję od prostych syntez organicznych i hipotezy świata RNA, przez problem homeostazy, aż po współczesne próby budowy komórek minimalnych. Głównym przesłaniem jest uznanie życia za dynamiczny proces samorekonstrukcji, w którym materia przestaje być jedynie podmiotem reakcji chemicznych, a staje się podmiotem ewolucyjnym posiadającym własną historię i pamięć materialną.

**SŁOWA KLUCZOWE**

organizacja materii | The Age of Alchemy Kit Chapman | chemia prebiotyczna | abiogeneza | świat RNA | protocell | termodynamika układów otwartych | homeostaza dynamiczna | kompartmentalizacja | ewolucja darwinowska | biologia syntetyczna | homochiralność | rybozymy | sprzężenie funkcji | chemia systemów

# Życie jako organizacja a nie substancja

Gdy materia zaczyna pamiętać: chemia prebiotyczna, RNA, metabolizm i granica pomiędzy reakcją a życiem

Alchemiczne marzenie o eliksirze życia wyrastało z przekonania, że odpowiednio przygotowana materia może nie tylko zmienić własne właściwości, lecz także przekształcić kondycję człowieka: zatrzymać chorobę, spowolnić starzenie, przywrócić siły lub pozwolić przekroczyć biologiczną granicę trwania.

W tradycjach europejskich, chińskich i indyjskich dążenie do transformacji metali splatało się z poszukiwaniem transformacji organizmu. Autor książki ukazuje ten związek szczególnie wyraźnie w części dotyczącej Paracelsusa, rtęci, leków mineralnych oraz trucizn, opisując przekonanie, że przemiana substancji może zostać przełożona na przemianę ciała. Współczesna chemia porzuciła wizję uniwersalnego eliksiru, lecz postawiła pytanie głębsze niż wszystkie sformułowane przez dawnych adeptów: skoro organizm jest materialnym układem chemicznym, to jaka organizacja

materii sprawia, że zbiór cząsteczek nie tylko reaguje, lecz metabolizuje, reprodukuje informację, utrzymuje własne granice, adaptuje się i podlega ewolucji?

Problem pochodzenia życia jest z tego punktu widzenia najgłębszym zagadnieniem chemii transformacji. Nie chodzi w nim bowiem o otrzymanie kolejnej cząsteczki, lecz o wyjaśnienie przejścia od chemii, która po prostu zachodzi, do chemii, która zaczyna wytwarzać system podtrzymujący własne istnienie. Granica ta nie przebiega pomiędzy „materią martwą" i „żywą", zbudowanymi z różnych rodzajów atomów.

Organizmy korzystają z tego samego układu okresowego co oceany, minerały i atmosfera. Węgiel w białku jest tym samym pierwiastkiem, co węgiel w graficie; fosforan w DNA podlega tym samym prawom chemii co fosforan w minerale; woda cytoplazmy nie posiada szczególnej „siły życia". Różnica pojawia się na poziomie organizacji, przepływu energii, obiegu materii i informacji dziedzicznej oraz dynamicznego sprzężenia pomiędzy tymi procesami.

Dlatego pytanie o powstanie życia nie powinno być sprowadzane do kwestii tego, jak powstała „pierwsza cząsteczka życia". Żadna ze współczesnych podstawowych cząsteczek biologicznych sama w sobie nie jest żywa. DNA poza systemem odczytującym jego sekwencję pozostaje polimerem chemicznym; enzym bez metabolizmu i źródła substratów jest jedynie katalizatorem; błona pozbawiona procesów utrzymujących jej skład to struktura fizykochemiczna; RNA zdolne do określonej katalizy nadal nie tworzy samoistnie organizmu. Współczesna chemia systemów ujmuje zatem powstanie życia jako problem integracji co najmniej trzech klas funkcji: dziedzicznej replikacji, przemian metabolicznych oraz kompartmentalizacji, przy czym cały system musi pozostawać poza równowagą termodynamiczną i umożliwiać wariację oraz selekcję prowadzące do ewolucji darwinowskiej.

## Życie jako funkcjonalne sprzężenie procesów w układzie otwartym

To ostatnie zastrzeżenie – stan daleki od równowagi – ma znaczenie zasadnicze. Układ zamknięty spontanicznie dąży do stanu równowagi, w którym zanikają makroskopowe gradienty zdolne wykonywać pracę. Żywy organizm postępuje pozornie odwrotnie: przez pewien czas zachowuje wysoki poziom organizacji, utrzymuje gradienty jonowe, syntezuje makrocząsteczki, naprawia uszkodzenia i reprodukuje swoją strukturę.

Nie narusza to jednak drugiej zasady termodynamiki. Organizm jest układem otwartym; pobiera energię i materię o określonym potencjale chemicznym, przekształca je, a następnie eksportuje

ciepło oraz produkty o zwiększonej entropii. Lokalna organizacja jest utrzymywana dzięki ciągłej dyssypacji energii. Współczesna chemia nierównowagowa podkreśla, że właściwości przypominające życie – dynamiczne samoorganizowanie, cykle składania i rozpadu czy podtrzymywanie struktur – wymagają przepływu energii przez system, a nie biernego osiągnięcia trwałego minimum energetycznego. Rozróżnienie to pozwala uniknąć jednego z najczęstszych nieporozumień dotyczących powstania życia. Kryształ również potrafi rosnąć, porządkować materię i powielać geometryczny wzorzec, lecz robi to w sposób jakościowo różny od komórki. Nie posiada on bowiem oddzielonego od środowiska metabolizmu sprzężonego z systemem dziedzicznej informacji, która mogłaby mutować i wpływać na zdolność całego systemu do dalszego rozmnażania. Płomień z kolei pobiera paliwo, podtrzymuje się i może propagować, ale nie dziedziczy złożonej, zmiennej informacji opisującej mechanizmy własnego utrzymania. Wir w płynie zachowuje strukturę dzięki przepływowi energii, lecz nie posiada kodowanego mechanizmu reprodukcji. Poszczególne właściwości życia można zatem odnaleźć w układach nieożywionych; osobliwość życia polega na ich funkcjonalnym sprzężeniu.

Właśnie dlatego nie istnieje jedna, bezsporna definicja życia, która byłaby wystarczająca dla wszystkich problemów chemii, biologii ewolucyjnej, astrobiologii czy biologii syntetycznej. W zależności od stawianego pytania akcentuje się reprodukcję, ewolucję darwinowską, metabolizm, homeostazę, autonomię, zdolność przetwarzania informacji albo kompartmentalizację. W badaniach nad syntetycznymi komórkami problem ten pozostaje w pełni aktualny: współczesne przeglądy wskazują, że komórka łączy przestrzenną organizację, procesy informacyjne, metabolizm, odpowiedź na bodźce, replikację i zdolność adaptacji. Stworzenie systemu posiadającego wszystkie te cechy pozostaje ambitnym celem, którego nie da się osiągnąć prostym sukcesem inżynierii. Chemia pochodzenia życia nie może więc rozpoczynać się od magicznej chwili, w której „martwe stało się żywe”.

Bardziej adekwatny jest obraz ciągu progów organizacyjnych. Najpierw musiały istnieć źródła prostych związków organicznych. Następnie konieczne były mechanizmy ich koncentracji i selektywnego przekształcania. Musiały powstać polimery lub inne struktury zdolne przechowywać informację bądź wykazywać katalizę. Potrzebne były przedziały przestrzenne ograniczające rozpraszanie produktów, a reakcje musiały zostać sprzęgnięte ze źródłami energii. Wreszcie musiała pojawić się zależność pomiędzy cechą dziedziczoną a zdolnością systemu do pozostawiania potomnych struktur. Dopiero ten ostatni krok uruchamia szczególnie potężny mechanizm: selekcja zaczyna optymalizować chemię bez konieczności istnienia chemika. W tym kontekście należy umieścić klasyczne doświadczenie Stanleya Millera z 1953 roku.

# Synteza organiczna jako dowód możliwości chemicznej

Miller przepuszczał wyładowania elektryczne przez mieszaninę prostych gazów i pary wodnej, uzyskując między innymi aminokwasy. Historyczna doniosłość tego eksperymentu polegała na wykazaniu, że biologicznie istotne cząsteczki organiczne mogą powstawać abiotycznie z prostszych prekursorów pod wpływem dostarczonej energii. Nie należy jednak traktować tego doświadczenia jako laboratoryjnego odtworzenia dokładnych warunków panujących na młodej Ziemi. Skład najwcześniejszej atmosfery pozostaje przedmiotem badań geochemicznych, a silnie redukująca mieszanina użyta przez Millera nie jest prostym, powszechnie przyjmowanym modelem globalnej atmosfery Hadeiku. Współczesne rekonstrukcje uwzględniają złożoną historię odgazowania płaszcza, oceanów i atmosfery oraz ewolucję warunków redoks; badania chemii prebiotycznej analizują ponadto wiele lokalnych środowisk reakcyjnych zamiast jednego uniwersalnego "pierwotnego bulionu".

Taka korekta nie osłabia znaczenia doświadczenia Millera, lecz ustawia je we właściwym miejscu metodologicznym. Było ono dowodem możliwości chemicznej, a nie dowodem konkretnej ścieżki historycznej. Eksperyment może wykazać, że określona reakcja zachodzi w warunkach geochemicznie możliwych, ale nie dowodzi jeszcze, że właśnie w takich okolicznościach odegrała ona rolę na młodej Ziemi. Aby zbliżyć się do rzetelnej rekonstrukcji historycznej, konieczne jest łączenie chemii organicznej z geologią, geochemią, planetologią i mineralogią oraz wiedzą o dostępnych źródłach energii. Dzisiejsze modele rozpatrują między innymi płytkie zbiorniki, środowiska hydrotermalne, powierzchnie mineralne, strefy okresowego wysychania i nawadniania, fotochemię napędzaną promieniowaniem ultrafioletowym oraz transport reagentów pomiędzy różnymi niszami geochemicznymi. Najnowsze przeglądy podkreślają, że kluczowe etapy chemii prebiotycznej nie musiały zachodzić w jednym środowisku, lecz mogły opierać się na transporcie produktów między odmiennymi strefami reakcyjnymi. Jest to koncepcyjnie istotne, gdyż początek życia nie musiał przypominać pojedynczego eksperymentu zamkniętego w kolbie. Młoda planeta była ogromnym, heterogenicznym reaktorem chemicznym. Temperatura, pH, potencjał redoks, zasolenie, obecność minerałów, promieniowanie i cykle mokro-sucho mogły różnić się zarówno przestrzennie, jak i czasowo.

Warunki korzystne dla syntezy danej cząsteczki nie muszą być sprzyjające jej trwałości, a warunki sprzyjające polimeryzacji niekoniecznie są optymalne dla tworzenia błon. Wieloetapowa chemia mogła zatem wymagać transportu materiału między mikrośrodowiskami, podobnie jak współczesna synteza laboratoryjna wykorzystuje sekwencję odmiennych rozpuszczalników, temperatur i katalizatorów.

# Od chaosu reakcji do selektywności i katalizy RNA

Problem początku życia można postrzegać raczej jako kwestię odpowiedniej sekwencji środowisk niż poszukiwanie jednego, konkretnego "miejsca narodzin". Pojawia się tu trudność termodynamiczna, szczególnie istotna z punktu widzenia chemika. Życie opiera się na polimerach kondensacyjnych, takich jak białka i kwasy nukleinowe, podczas gdy środowisko wodne sprzyja hydrolizie wiązań – tych samych, których utworzenie wymaga odwodnienia lub chemicznej aktywacji monomerów. Woda jest zatem jednocześnie medium niezbędnym do życia i czynnikiem utrudniającym spontaniczne tworzenie jego podstawowych polimerów. Współczesna chemia prebiotyczna traktuje tę sprzeczność jako centralny problem, badając aktywowane prekursory, powierzchnie mineralne, cykle wysychania, specjalne reagenty kondensacyjne oraz środowiska, w których kinetyka tworzenia wiązań może konkurować z hydrolizą. Nie wystarczy jednak samo otrzymanie pojedynczych monomerów; biologia wymaga daleko idącej selektywności.

W eksperymencie organicznym często powstaje mieszanina wielu podobnych produktów, podczas gdy funkcjonalny biopolimer opiera się na ograniczonym zestawie składników i określonym typie wiązań. Chemia życia jest zatem niezwykle uporządkowaną małą wyspą w gigantycznej przestrzeni możliwych związków. Współczesne analizy pochodzenia życia wskazują właśnie na ten problem: prebiotyczna przestrzeń reakcji mogła być ogromna, podczas gdy współczesna biochemia wykorzystuje stosunkowo niewielką, silnie zintegrowaną sieć metabolitów. Wyjaśnienie abiogenezy wymaga zatem nie tylko wykazania, jak powstają związki organiczne, lecz także wyjaśnienia, w jaki sposób procesy fizykochemiczne mogły selekcjonować i koncentrować określone drogi spośród olbrzymiej liczby możliwości. Problem selekcji staje się jeszcze wyraźniejszy w przypadku chiralności. Współczesne białka wykorzystują zasadniczo aminokwasy jednej konfiguracji, natomiast cukry kwasów nukleinowych należą do określonego szeregu stereochemicznego. Reakcja prowadzona bez chiralnego źródła selekcji zazwyczaj daje racemiczną mieszaninę obu enancjomerów.

Tymczasem regularność stereochemiczna może mieć kluczowe znaczenie dla tworzenia precyzyjnych struktur polimerów i ich funkcji katalitycznej. Pochodzenie biologicznej homochiralności pozostaje więc jednym z głównych problemów chemii początku życia. Proponowane mechanizmy obejmują niewielkie początkowe asymetrie wzmacniane przez procesy krystalizacji, autokatalizy lub selektywnego niszczenia, jednak nie ma podstaw, by uznać którykolwiek z nich za bezspornie rozstrzygnięty historycznie. Najbardziej wpływową odpowiedzią na problem jednoczesnego pojawienia się informacji i katalizy jest hipoteza świata RNA. Jej siła wynika z niezwykłej dwoistości RNA: sekwencja nukleotydów może przechowywać informację, a odpowiednio zwinięta cząsteczka wykazywać aktywność katalityczną. Odkrycie rybozymów

dowiodło, że kataliza nie jest wyłączną domeną białek. Co więcej, centrum katalityczne rybosomu odpowiedzialne za tworzenie wiązań peptydowych ma zasadniczo charakter RNA, co stanowi jeden z najważniejszych molekularnych śladów dawnej roli kwasów rybonukleinowych. Współczesne przeglądy traktują świat RNA jako jeden z głównych modeli początkowych etapów ewolucji molekularnej, ale nie jako kompletnie zrekonstruowany historyczny film wydarzeń. Kluczowa zaleta RNA polega na połączeniu genotypu i części fenotypu w jednym typie polimeru – sekwencja jest informacją, która jednocześnie wpływa na sposób zwijania cząsteczki, a tym samym na jej zdolność katalityczną.

W prymitywnym systemie nie trzeba zatem od razu rozwiązywać całego problemu współczesnej translacji, w której DNA przechowuje informację, RNA ją przenosi i reguluje, a białka wykonują większość katalizy. RNA umożliwia prostszy etap, w którym cząsteczka informacyjna jest równocześnie chemicznie aktywna. Nie dowodzi to jednak, że pierwsze systemy dziedziczne były identyczne ze współczesnym RNA; możliwe są także wcześniejsze lub równoległe polimery chemiczne.

## Koewolucja niedoskonałych składników jako rozwiązanie paradoksu replikacji

Autor pokazuje natomiast, że "problem kury i jajka" pomiędzy genem i enzymem nie musi być logicznie nierozwiązywalny. Samo istnienie katalitycznego RNA nie rozwiązuje jednak problemu samoreplikacji. Aby system podlegał ewolucji darwinowskiej, informacja musi być kopiowana z dostateczną wiernością, lecz nie z wiernością absolutną. Gdy błędów jest zbyt wiele, informacja ulega utracie; gdy natomiast prawie nie występują, maleje materiał zmienności, na którym mogłaby działać selekcja. Powstaje zatem delikatny kompromis pomiędzy trwałością i zdolnością do innowacji.

Współczesne badania nad rybozymami oraz nieenzymatycznym kopiowaniem RNA wskazują na znaczący postęp, jednak kompletna i prebiotycznie wiarygodna ścieżka od prostych prekursorów do autonomicznie replikującego się systemu RNA pozostaje otwartym problemem badawczym. W tym miejscu ujawnia się szczególna trudność znana jako próg błędu, a w szerszym ujęciu – paradoks złożoności replikatora. Bardzo dokładna replikacja często wymaga skomplikowanej aparatury katalitycznej, lecz ta z kolei potrzebuje informacji przekazywanej między pokoleniami z wystarczającą precyzją. Prosty replikator może nie być na tyle wierny, by utrzymać sekwencję kodującą bardziej złożoną funkcję; trudniej natomiast uzyskać złożony replikator bez wcześniejszego systemu zachowującego skomplikowaną informację. Jednymi z teoretycznych

rozwiązań są wspólnoty współpracujących replikatorów, sieci autokatalityczne oraz kompartmentalizacja, która ogranicza konkurencję pasożytniczych sekwencji i pozwala selekcjonować całe zespoły funkcjonalne. Właśnie tutaj błona przestaje być opakowaniem, a staje się jednym z warunków ewolucji.

W roztworze produkty reakcji ulegają rozproszeniu, a korzystny katalizator może wytwarzać dobra dostępne również tym cząsteczkom, które nie ponoszą kosztu jego produkcji. Oddzielenie niewielkich populacji molekuł w mikroskopijnych przedziałach zmienia dynamikę selekcji. Jeśli określona sekwencja RNA zwiększa wzrost lub stabilność pęcherzyka, w którym jest zamknięta, korzyść ta zostaje przypisana konkretnemu przedziałowi. Powstaje w ten sposób zaczątek związku między genotypem a "organizmem" wyższego poziomu. Modelowe badania protocell pokazują, że pęcherzyki zbudowane z prostych kwasów tłuszczowych mogą rosnąć, konkurować o składniki błony i współdziałać z zamkniętymi wewnątrz katalizatorami, tworząc prymitywne modele selekcji komórkowej. Fizykochemicznie interesująca jest sama spontaniczność powstawania takich przedziałów.

Cząsteczki amfifilowe posiadają region hydrofilowy i hydrofobowy. W środowisku wodnym efekt hydrofobowy oraz inne oddziaływania sprzyjają tworzeniu struktur, w których części niepolarne ograniczają kontakt z wodą, podczas gdy części polarne pozostają z nią związane. Odpowiednie lipidy mogą zatem spontanicznie tworzyć micele lub dwuwarstwy zamykające przestrzeń wodną. Do utworzenia podstawowej błony nie jest konieczna świadoma instrukcja molekularna – reguły samoorganizacji dostarcza sama termodynamika. Nie oznacza to jednak, że wystarczy zmieszać lipidy i RNA, aby otrzymać życie; pojawiają się bowiem konflikty między wymaganiami różnych podsystemów.

Wczesne modele protocell z błonami z prostych kwasów tłuszczowych są interesujące ze względu na łatwość ich powstawania, lecz takie struktury mogą być destabilizowane przez kationy dwuwartościowe (zwłaszcza $Mg^{2+}$ ), mimo że magnez jest często niezbędny do stabilizacji struktury i aktywności katalitycznej RNA. Eksperymenty wskazują na możliwość częściowego rozwiązania tego konfliktu poprzez współdziałanie składników protocell, na przykład za sprawą katalitycznego generowania pochodnych kwasów tłuszczowych zwiększających stabilność błony. To przykład kluczowej zasady: życie mogło powstać nie przez znalezienie jednego idealnego komponentu, lecz przez koewolucję niedoskonałych składników, które wzajemnie kompensują swoje ograniczenia. Nowsze prace jeszcze mocniej uwydatniają tę możliwość.

W eksperymentach opublikowanych w 2025 roku wykazano, że cysteina może reagować z prostymi tioestrami, co prowadzi w wodzie do powstawania lipidów zdolnych organizować się w pęcherzyki.

Proces ten może być wspierany przez powierzchnie krzemionkowe, a powstające struktury okazały się zgodne z funkcjonowaniem wybranych rybozymów.

## Sprzężenie funkcji jako przejście od chemii do biologii

Nie jest to oczywiście demonstracja historycznego pochodzenia pierwszej komórki, lecz dowód na to, że prostsze prekursory mogą uczestniczyć w sprzężonych chemicznie procesach, prowadzących jednocześnie ku kompartmentalizacji i funkcji katalitycznej. Takie wyniki podważają zbyt uproszczoną wizję początku życia jako liniowego ciągu: najpierw RNA, potem błona, a na końcu metabolizm. Bardziej prawdopodobne wydaje się wzajemne napędzanie kilku niedoskonałych podsystemów.

Błona zwiększa lokalne stężenie RNA; RNA lub proste peptydy mogą sprzyjać stabilności błony; prymitywne reakcje metaboliczne dostarczają aktywowanych prekursorów, a gradient chemiczny napędza syntezę. Korzystne kombinacje pozostają funkcjonalne dłużej. Współczesna chemia systemów coraz częściej koncentruje się właśnie na integracji takich modułów zamiast poszukiwaniem jednej molekularnej "Ewy". Nie rozstrzyga to jednak sporu między koncepcjami "gene first" a "metabolism first". Ta druga rodzina hipotez zakłada, że przed powstaniem rozwiniętego systemu genetycznego mogły istnieć sieci reakcji chemicznych samopodtrzymujących przepływ materii i energii przy udziale minerałów, metali lub prostych katalizatorów. Zwolennicy tego podejścia wskazują na podobieństwa między geochemią a centralnymi przemianami współczesnego metabolizmu, zwłaszcza w obszarze reakcji redoks i chemii związków węgla katalizowanej przez metale. Eksperymenty potwierdzają, że część reakcji przypominających fragmenty dzisiejszych szlaków metabolicznych może zachodzić bez enzymów, w odpowiednich warunkach chemicznych. Nie wystarcza to jednak do wykazania istnienia autonomicznego, ewoluującego "metabolizmu bez genów"; problemem pozostaje kwestia dziedziczności, selekcji i utrzymania złożonej sieci.

Spór ten warto traktować nie jako pojedynek dwóch wykluczających się scenariuszy, lecz jako pytanie o kolejność sprzęgania funkcji. Dzisiejsze życie nie składa się z "samych genów" ani "samego metabolizmu". Informacja genetyczna pozostaje bezczynna bez energii i substratów, natomiast metabolizm oparty na skomplikowanych enzymach nie może być trwale dziedziczony bez informacji określającej ich wytwarzanie. Kluczowym problemem staje się zatem moment, w którym obieg informacji i obieg materii zaczęły wzajemnie się warunkować. Dopiero wtedy sekwencja molekularna mogła wpływać na funkcjonowanie systemu, a sukces tego systemu decydować o częstości występowania przyszłych sekwencji. W tym sprzężeniu znajduje się właściwy początek

biologicznego znaczenia informacji. Sama sekwencja nukleotydów jest jedynie układem chemicznym; staje się informacją biologiczną dlatego, że różnice w sekwencjach niosą systematyczne konsekwencje dla funkcji i są dziedziczone. Informacja nie jest zatem dodatkową, niematerialną substancją nałożoną na materię, lecz relacją między stanem fizycznym nośnika, mechanizmem jego kopiowania a konsekwencją funkcjonalną. Sekwencja RNA A jest biologicznie "informacyjnie różna" od sekwencji B wtedy, gdy ta różnica może zostać zachowana i wpływa na zachowanie systemu w sposób podlegający selekcji.

Z tego względu życie wprowadza do chemii pamięć. Zwykła reakcja chemiczna zależy od aktualnych warunków: stężeń, temperatury i potencjałów. System dziedziczny posiada dodatkowo zależność od własnej historii. Jeżeli określona sekwencja została wyselekcjonowana wcześniej, jej potomne kopie zmieniają prawdopodobieństwo przyszłych reakcji. Przeszłość zostaje utrwalona w materialnym nośniku i wpływa na przyszłość.

Biologia nie przestaje być fizyką i chemią, ale wprowadza historyczność niespotykaną w prostych układach równowagowych. Pojawienie się dziedziczności zasadniczo zmienia także logikę optymalizacji. Bez replikacji korzystna struktura chemiczna może powstać i zniknąć bez pozostawienia śladu. Gdy jednak różnice strukturalne są kopiowane, a ich skutki wpływają na tempo tej kopii, rozpoczyna się selekcja. Nie potrzebuje ona planu, przewidywania ani celu.

Wystarczy zmienność, dziedziczenie i różnicowy sukces reprodukcyjny. Proces ten może przez kolejne pokolenia akumulować rozwiązania, których jednorazowe, przypadkowe powstanie byłoby skrajnie mało prawdopodobne. Właśnie dlatego ewolucja stanowi tak istotny próg między złożoną chemią a biologią: wprowadza mechanizm kumulatywnego zachowywania funkcjonalnych innowacji.

Nie oznacza to, że "przypadek stworzył wszystko". Mutacje i inne źródła zmienności mogą mieć element stochastyczny, lecz selekcja nie jest losowym zachowywaniem wszystkich wariantów. Różnice w funkcji przekładają się na różnice w reprodukcji. Rozróżnienie to ma szczególne znaczenie w dyskusjach nad pochodzeniem życia, gdzie często myli się prawdopodobieństwo spontanicznego powstania współczesnej komórki z prawdopodobieństwem stopniowego powstawania prostszych układów podlegających selekcji. Abiogeneza nie wymaga hipotezy, że wszystkie elementy bakterii zostały jednorazowo i losowo złożone w jednym miejscu. Wymaga wyjaśnienia, jak powstał układ wystarczająco prosty, by się pojawić, i wystarczająco dziedziczny, by rozpocząć kumulatywną ewolucję.

# Życie jako proces a nie pojedynczy moment

Zagadnienie to wiąże się z jednym z najbardziej mylących terminów w literaturze popularnej: „pierwszy organizm". Początek biologii prawdopodobnie nie musiał być wyznaczony ostrą granicą jednostkową. Zanim pojawiła się stabilna genealogia komórkowa, mogła istnieć populacja częściowo izolowanych systemów, które wymieniały między sobą komponenty, cząsteczki i funkcje. Tym bardziej nie należy utożsamiać początku życia z LUCA – ostatnim uniwersalnym wspólnym przodkiem współczesnego życia komórkowego. LUCA był węzłem, z którego wywodzą się dzisiejsze linie bakterii i archeonów, a niekoniecznie pierwszym żywym systemem. Najnowsze rekonstrukcje pokazują zresztą, jak wielka przepaść musiała oddzielać pierwotną chemię ewoluującą od wspólnego przodka zachowanego w genealogii dzisiejszych organizmów. Analiza opublikowana w 2024 roku sugeruje, że LUCA mógł istnieć około 4,2 miliarda lat temu i dysponować genomem o rozmiarze porównywalnym z prostszymi współczesnymi prokariontami, kodującym tysiące białek.

Jest to jednak rekonstrukcja modelowa, obciążona istotnymi niepewnościami, której nie powinno się traktować jako ostatecznego datowania czy pełnego portretu organizmu. Jej znaczenie polega na wskazaniu, że LUCA mógł być już systemem znacznie bardziej złożonym niż hipotetyczne pierwsze protokomórki, a nawet członkiem rozwiniętego ekosystemu mikroorganizmów. Jeśli takie rekonstrukcje są choćby częściowo trafne, określenie „początek życia" obejmuje nie jedną transformację, lecz całą niewidoczną obecnie epokę ewolucji chemicznej i wczesnobiologicznej poprzedzającej LUCA. Pomiędzy prostymi związkami organicznymi a systemem wyposażonym w translację, kod genetyczny, błony, podstawowy metabolizm i mechanizmy utrzymania genomu musiało nastąpić wiele innowacji, po których nie pozostał łatwy zapis kopalny. Badacz początku życia rekonstruuje więc historię, której ogromna część została nadpisana przez późniejszą ewolucję. Szczególnie trudnym progiem było powstanie kodowanej syntezy białek. RNA może katalizować reakcje, ale to białka oferują znacznie szerszy repertuar chemiczny dzięki różnorodności łańcuchów bocznych aminokwasów. Współczesna translacja wymaga jednak skomplikowanego zespołu rybosomów, tRNA, syntetaz aminoacylo-tRNA, czynników translacyjnych i mechanizmów energetycznych.

Wyjaśnienie, w jaki sposób taki system wyłonił się z prostszej chemii, pozostaje centralnym problemem badań. Współczesne ujęcia coraz częściej opisują go jako rezultat molekularnego **bricolage**: elementy powstałe początkowo do innych funkcji mogły zostać wtórnie połączone w mechanizm translacji, zamiast pojawić się jednorazowo jako kompletny aparat kodujący. Jest to kluczowe z punktu widzenia teorii ewolucji złożoności. Układ złożony nie musi powstać od razu do swojej obecnej funkcji; poszczególne komponenty mogą wcześniej wykonywać prostsze zadania, a dopiero później zostać włączone do nowego systemu. Ewolucja biologiczna stale wykorzystuje takie

procesy ko-optacji. Jest to przeciwieństwo inżynierii projektowanej od końcowego celu: natura nie posiada projektu przyszłego rybosomu, lecz zachowuje lokalnie korzystne modyfikacje, które dopiero po wielu etapach zaczynają współtworzyć nową funkcję. Właśnie to odróżnia biologiczną ewolucję od alchemicznego ideału doskonalenia. Alchemia zakładała często kierunek od materii mniej doskonałej ku bardziej doskonałej; ewolucja natomiast nie posiada uniwersalnego szczytu.

Zwiększa ona lokalne dopasowanie do określonych warunków, wykorzystując historię już istniejących struktur. Organizm nie jest chemicznie „doskonały"; jest wystarczająco funkcjonalnym rezultatem ogromnej liczby kompromisów odziedziczonych po wcześniejszych etapach. Ten brak projektu szczególnie dobrze widać w metabolizmie. Współczesna komórka posiada skomplikowane sieci reakcji sprzężonych przez ATP, przenośniki elektronów, gradienty protonowe i dziesiątki klas kofaktorów.

## Życie jako zorganizowany przepływ energii i materii

Część tych rozwiązań może zachowywać ślady wcześniejszej chemii geologicznej, lecz z podobieństwa mechanizmów nie należy automatycznie wnioskować bezpośredniej ciągłości historycznej. Badania prebiotyczne wskazują, że pewne transformacje przypominające fragmenty centralnego metabolizmu mogą być katalizowane przez proste jony metali, rodniki czy powierzchnie mineralne. Zasadniczy problem polega jednak na zintegrowaniu takich reakcji w system, który nie tylko działa chwilowo, ale regeneruje składniki, sprzęga procesy korzystne energetycznie z niekorzystnymi oraz przekazuje strukturę sieci kolejnym generacjom przedziałów.

Współczesny metabolizm rozwiązuje problem energetyczny poprzez chemię sprzężenia. Reakcja termodynamicznie niekorzystna może zachodzić, jeśli zostanie powiązana z procesem wystarczająco korzystnym energetycznie, tak aby całkowita zmiana energii swobodnej pozwalała na przebieg procesu. ATP, gradient protonowy, NADH i inne nośniki umożliwiają przestrzenne oraz czasowe przenoszenie potencjału chemicznego. Życie nie posiada więc tajemnej „energii życiowej"; posiada niezwykle złożoną rachunkowość energetyczną. Jest to niemal ostateczne zaprzeczenie witalizmu: siła organizmu okazuje się nie specjalnym rodzajem energii, lecz wysoce zorganizowanym sposobem kierowania przepływem energii znanej fizyce.

Mitochondrium, błona bakteryjna czy chloroplast są urządzeniami energetycznymi o wyjątkowej subtelności. Łańcuchy transportu elektronów przekształcają różnice potencjałów redoks w gradient elektrochemiczny protonów, a syntaza ATP wykorzystuje ten gradient do syntezy wysokoenergetycznych wiązań fosforanowych ATP. Mechanizm ten łączy chemię redoks, elektrostatykę, mechanikę molekularną i katalizę. Dawna alchemia próbowała znaleźć jeden

reagent przekazujący materii moc transformacji; biochemia ujawniła coś znacznie bardziej złożonego – komórka potrafi rozdzielać i ponownie sprzęgać kanały przepływu energii z dokładnością umożliwiającą podtrzymywanie tysięcy reakcji równocześnie.

Kluczowe znaczenie ma tutaj błona. Nie jest ona jedynie skórą oddzielającą wnętrze od świata; jej selektywna przepuszczalność pozwala utrzymywać różnice stężeń jonów i metabolitów, bez których autonomiczny metabolizm nie mógłby istnieć. Granica staje się więc aparatem termodynamicznym. Komórka istnieje jako odrębny system właśnie dlatego, że nie znajduje się w pełnej równowadze z otoczeniem. Jej membrana stale negocjuje relację pomiędzy izolacją i wymianą. Całkowicie szczelna komórka umarłaby z braku substratów, całkowicie otwarta – utraciłaby gradienty i własną organizację.

W tym miejscu pojawia się niezwykła analogia do wcześniejszej historii chemii. Alchemik zamykał substancję w naczyniu, aby kontrolować przemianę; komórka sama buduje własne naczynie i reguluje jego przepuszczalność. Laboratorium staje się częścią obiektu.

## Życie jako system samorekonstruujący się poza prostym planem

Życie można zatem rozumieć jako chemię, która wytworzyła aparat do prowadzenia własnych reakcji. Co bardziej radykalne, aparat ten jest rekonstruowany na podstawie informacji przechowywanej przez sam układ. Żaden klasyczny reaktor przemysłowy nie koduje w swoim wnętrzu kompletnego systemu instrukcji umożliwiającego budowę kolejnego urządzenia, które z kolei otrzymałoby zmodyfikowaną kopię tych wytycznych. Komórka funkcjonuje w sposób zbliżony, choć metafora inżynieryjna ma swoje granice. DNA nie jest bowiem prostym planem technicznym – wynik rozwoju zależy także od struktury istniejącej komórki, regulacji, środowiska oraz licznych stanów epigenetycznych. Mimo to sprzężenie nośnika informacji z mechanizmem jego odczytu i reprodukcji stanowi jakościowo nową formę organizacji materii. Dlatego próby skonstruowania komórki minimalnej są współczesnym eksperymentem filozoficznym wykonanym metodami biologii molekularnej. Projekt JCVI-syn3.0 z 2016 roku doprowadził do powstania komórki zawierającej syntetycznie zaprojektowany, zredukowany genom liczący około 531 tysięcy par zasad i 473 geny, zdolnej do wzrostu w bardzo bogatym, kontrolowanym środowisku.

Co znamienne, mimo intensywnej redukcji genomu funkcji znacznej liczby zachowanych genów początkowo nie potrafiono precyzyjnie określić. Płynie z tego wyjątkowo pouczająca lekcja: nawet po stu pięćdziesięciu latach rozwoju biochemii i genetyki potrafimy skonstruować działający,

minimalizowany system, którego wszystkich niezbędnych elementów nadal w pełni nie rozumiemy. JCVI-syn3.0 nie jest jednak odtworzeniem pierwszego życia. Powstał on poprzez redukcję genomu współczesnej bakterii, wykorzystuje istniejącą maszynerię komórkową i działa w specjalnie przygotowanym środowisku. Jest to projekt **top-down**: autorzy rozpoczęli od istniejącego życia i usuwali elementy, pytając, jak daleko można uprościć system bez utraty zdolności do funkcjonowania. Badania nad początkami życia często wybierają kierunek odwrotny, **bottom-up**: próbują z prostych komponentów zbudować układ, który dopiero stopniowo nabywa właściwości podobne do życia. Obie strategie badają granicę żywego z przeciwnych stron, choć różnica metodologiczna między nimi jest ogromna.

Minimalizacja istniejącej komórki korzysta z miliardów lat ewolucji zapisanej w jej molekularnej architekturze. Budowa systemu **de novo** wymaga natomiast samodzielnego rozwiązania problemów kompartmentalizacji, syntezy białek, kopiowania materiału genetycznego, energetyki, homeostazy i podziału. Współczesne przeglądy syntetycznych komórek pokazują imponujący rozwój poszczególnych modułów – sztucznych błon, systemów ekspresji, molekularnej komunikacji czy przetwarzania informacji – jednak kompletna, autonomiczna komórka powstała od podstaw pozostaje wciąż celem badawczym. Ma to kluczowe znaczenie dla filozofii redukcjonizmu. Stwierdzenie, że życie jest zgodne z prawami chemii i fizyki, nie oznacza bowiem, że potrafimy natychmiast przewidzieć zachowanie całej komórki na podstawie równań opisujących pojedyncze cząsteczki. Liczba oddziaływań, skal czasowych i sprzężeń zwrotnych czyni problem systemowy niezwykle złożonym.

Najnowsze próby modelowania komórek minimalnych integrują dane dotyczące struktury, metabolizmu, ekspresji genów, dyfuzji i zmian w czasie właśnie dlatego, że żaden pojedynczy typ eksperymentu nie ujmuje całej dynamiki komórki. Redukcja ontologiczna – przekonanie, że system jest materialny – nie pociąga za sobą banalnej redukcji epistemologicznej, według której opis cząstek elementarnych wystarcza praktycznie do rozumienia organizmu.

## Życie jako emergentna właściwość organizacji materii

W tym miejscu pojęcie emergencji, które pojawiało się już przy analizie stopów i materiałów, nabiera szczególnego znaczenia. Życie nie wymaga „dodatkowej substancji życiowej”; jego właściwości wyłaniają się na poziomie organizacji niedostępnym dla opisu pojedynczej cząsteczki. ATP samo w sobie nie metabolizuje, DNA nie rozmnaża się samodzielnie, błona nie ewoluuje, a rybozym nie tworzy organizmu.

Gdy jednak odpowiednie procesy zostaną połączone w system sprzężeń zwrotnych, pojawiają się homeostaza, reprodukcja, adaptacja i ewolucja. Emergentność nie oznacza złamania praw niższego poziomu, lecz fakt, że zachowanie całości wymaga pojęć odnoszących się do relacji między składnikami. Można to ująć bardziej formalnie.

W pojedynczej reakcji interesuje nas mapa substratów i produktów oraz kinetyka przejścia. W sieci metabolicznej kluczowy staje się rozkład przepływów, sprzężenia zwrotne, punkty rozgałęzienia i stabilność stanów. W systemie genetycznym dochodzą przestrzenie sekwencji oraz zmiana prawdopodobieństwa przyszłych stanów w zależności od dziedziczenia. Z kolei w populacji protocell pojawia się selekcja między systemami. Każdy kolejny poziom nie unieważnia wcześniejszej chemii, lecz dodaje nowy typ dynamiki. Właśnie dlatego autor książki traktuje powstanie życia jako przejście od chemii reakcji do chemii podmiotów ewolucyjnych. Nie chodzi tu oczywiście o podmiotowość świadomą.

Chodzi o wyłonienie jednostek, których warianty mogą istnieć dostatecznie długo, reprodukować się i różnić sukcesem reprodukcyjnym. Gdy pojawia się taka jednostka selekcji, chemia zyskuje pamięć i historię. Od tego momentu skład systemów nie jest już wyłącznie konsekwencją równowagi i lokalnej kinetyki; staje się rezultatem tego, co okazało się funkcjonalne w poprzednich pokoleniach. Powstanie życia było prawdopodobnie najważniejszą transmutacją w historii Ziemi, choć nie powstał przy tym żaden nowy pierwiastek. Zmieniła się jedynie organizacja istniejącej materii. Atom węgla pozostał węglem, fosfor fosforem, a wodór wodorem, jednak ich konfiguracje zaczęły tworzyć systemy reprodukujące sposób własnej organizacji.

Była to przemiana, której alchemia nie mogła przewidzieć, gdyż szukała doskonałości substancji, podczas gdy życie okazało się przede wszystkim doskonałością nieustającego procesu – przy czym „doskonałość” należy tu rozumieć funkcjonalnie, a nie metafizycznie. Organizm nie trwa dlatego, że jego materia pozostaje niezmienna, lecz właśnie dlatego, że jest ona stale wymieniana.

Białka są syntetyzowane i degradowane, błony przebudowywane, DNA naprawiane, metabolity zużywane, jony transportowane, a komórki dzielone. To całkowite zaprzeczenie alchemicznego ideału trwałości. Złoto fascynowało tym, że opierało się przemianie; życie natomiast trwa dzięki zdolności do kontrolowanej przemiany bez utraty organizacji. To właśnie istota homeostazy. Nie jest ona stagnacją, lecz dynamicznym utrzymywaniem wybranych parametrów w dopuszczalnym zakresie mimo nieustannych przepływów. Organizm zachowuje temperaturę, pH, gradienty jonowe, potencjały redoks i stężenia wielu metabolitów nie poprzez zatrzymanie reakcji, lecz dzięki sprzężeniom zwrotnym dostosowującym ich szybkość. Stabilność życia jest stabilnością dynamiczną. Z fizykochemicznego punktu widzenia przypomina to bardziej wir utrzymujący formę przy ciągłej wymianie cząsteczek wody niż niezmienny kryształ.

Badania modelowych protocell pokazują, że nawet bardzo proste układy mogą wykazywać elementarne zachowania przypominające homeostazę. W doświadczeniach z pęcherzykami kwasów tłuszczowych wzrost objętości mógł zmieniać stężenie oligonukleotydów i tym samym regulować aktywność zamkniętych rybozymów, tworząc prosty fizyczny mechanizm stabilizujący aktywność w zmieniającym się przedziale.

Nie jest to oczywiście homeostaza organizmu, lecz dowodzi, że zachowanie regulacyjne nie musi rozpoczynać się od złożonego aparatu genetycznego; część regulacji może wynikać bezpośrednio z własności fizycznych przedziału. W tym miejscu granica między chemią a biologią staje się bardziej gradientem niż murem. Samoorganizująca błona jest chemią, rybozym kopiujący fragment RNA jest chemią, sieć autokatalityczna jest chemią. System zamykający takie reakcje w pęcherzyku nadal składa się wyłącznie z procesów chemicznych.

## Życie jako efekt organizacji pospolitych składników

Wraz z ich sprzęganiem może jednak pojawić się układ zdolny do selekcji, pamięci i adaptacji. Nie musiał istnieć moment, w którym natura "włączyła życie" niczym przełącznik. Możliwe jest raczej kontinuum systemów coraz silniej spełniających kryteria, które dziś kojarzymy z organizmem. Choć utrudnia to historyczną rekonstrukcję, naukowo jest to podejście znacznie ciekawsze. Zamiast szukać cudownej granicy, można badać każdy próg oddzielnie: kiedy chemia uzyskuje replikację, kiedy ta zostaje powiązana z funkcją, kiedy powstaje kompartment i kiedy przedziały zaczynają konkurować; kiedy reakcje zostają energetycznie sprzężone, informacja zaczyna regulować metabolizm, a pojawia się otwarta możliwość dalszej ewolucji. Każde z tych pytań daje się częściowo przenieść do laboratorium – to właśnie tutaj biologia syntetyczna spotyka chemię pochodzenia życia.

Próba zbudowania minimalnej komórki nie jest wyłącznie przedsięwzięciem technologicznym, lecz eksperymentem analitycznym nad tym, które własności są konieczne i jak muszą zostać sprzężone. Jeśli konstrukcja funkcjonalnego układu wymaga czegoś, czego teoria nie przewidziała, odsłania to lukę w naszym rozumieniu. Budowanie staje się zatem metodą poznania. Richard Feynman wiązał zrozumienie ze zdolnością tworzenia; w biologii syntetycznej zasada ta zyskuje wymiar eksperymentalny, choć nie należy jej absolutyzować – możliwość zbudowania układu jedną drogą nie dowodzi, że natura historycznie posłużyła się tą samą metodą. To rozróżnienie pomiędzy możliwością konstrukcji a rekonstrukcją historii powinno pozostać jednym z rygorów całej nauki o abiogenezie. Wykazanie, że określony układ protocell działa, nie oznacza, iż był on przodkiem życia. Uzyskanie nukleotydu w warunkach prebiotycznie prawdopodobnych (plausible conditions) nie

dowodzi, że reakcja ta dominowała cztery miliardy lat temu. Budowa syntetycznego genomu nie jest tożsama z odtworzeniem początku genomów.

Historia Ziemi nie pozostawiła pełnego protokołu laboratoryjnego. Dlatego współczesna nauka o pochodzeniu życia powinna zachowywać szczególną ostrożność wobec słowa „dowód". Dysponujemy dowodami możliwości poszczególnych reakcji, śladami molekularnymi w dzisiejszej biologii, modelami geochemicznymi, rekonstrukcjami filogenetycznymi i danymi geologicznymi. Nie istnieje jednak kompletna, bezsporna rekonstrukcja etapów prowadzących od geochemii prebiotycznej do pierwszego systemu podlegającego ewolucji darwinowskiej. Nawet najbardziej produktywne ramy, takie jak świat RNA, pozostają programami badawczymi o różnym stopniu empirycznego wsparcia dla poszczególnych ogniw. Ta niepewność nie świadczy o słabości nauki, lecz jest konsekwencją wyjątkowej trudności pytania.

Badamy bowiem nie tylko układ mikroskopijny, lecz zdarzenie historyczne sprzed miliardów lat, którego najwcześniejsze produkty zostały przekształcone przez ewolucję, tektonikę, geochemię i czas. Naukowa dojrzałość polega tutaj na odróżnianiu tego, co chemicznie możliwe, od tego, co geologicznie prawdopodobne, oraz obu tych kategorii od tego, co historycznie wykazane. Jednocześnie w ostatnich latach badania wyraźniej przesuwają się od poszukiwania pojedynczego, cudownego etapu ku chemii systemów. Przeglądy z lat 2024–2026 analizują integrację autokatalizy, kompartymentów, metabolizmu, źródeł energii i replikacji w systemach utrzymywanych poza równowagą; nowe eksperymenty pokazują coraz bogatsze sprzężenia pomiędzy pęcherzykami, peptydami i polimerami informacyjnymi. Kierunek ten jest metodologicznie przekonujący, gdyż współczesne życie nie jest rezultatem działania jednego rodzaju cząsteczek, lecz wielowarstwowej integracji procesów. Pytanie o początek życia domyka jeden z najstarszych sporów alchemii. Dawni adepci poszukiwali szczególnej materii o wyjątkowej mocy; nowoczesna nauka pokazuje natomiast, że nadzwyczajne właściwości nie muszą wynikać z obecności wyjątkowego składnika, lecz mogą wyłaniać się z organizacji pospolitych elementów. Węgiel, wodór, tlen, azot, fosfor i siarka nie są chemicznie cudownymi pierwiastkami.

## Życie jako emergentna organizacja procesów chemicznych

Cudowna – w sensie poznawczego zdumienia, a nie odstępstwa od praw natury – jest architektura relacji, w którą mogą zostać włączone. To zasadnicze przewartościowanie.

Alchemia pytała: jaka substancja ma moc życia? Biochemia odpowiada, że żywy jest system procesów. Nie istnieje pojedyncza cząsteczka posiadająca elan vital; istnieje za to metabolizm, reprodukcja, naprawa, translacja, kontrola gradientów, błony, kataliza, sygnalizacja oraz informacja dziedziczna, splecione w dynamiczną sieć. Życie nie jest dodatkowym składnikiem materii, lecz określonym sposobem, w jaki materia zachowuje organizację w czasie. Z perspektywy termodynamiki oznacza to istnienie układu nieustannie wykorzystującego energię, by przeciwstawić się utracie struktury. W teorii informacji chodzi o materialne utrzymywanie wzorców dziedzicznych, w chemii – o kontrolę ogromnej sieci sprzężonych reakcji, a w ewolucji – o zdolność tych wzorców do zmiany i różnicowej reprodukcji. Z kolei teoria systemów widzi tu powstanie jednostki, która utrzymuje własne warunki funkcjonowania poprzez regulację przepływów z otoczeniem. Żaden z tych opisów nie wyczerpuje definicji życia, lecz razem pokazują, dlaczego redukowanie go do jednej molekuły, genu czy reakcji jest intelektualnie niewystarczające.

Właśnie ta wielopoziomowość pozwala zrozumieć, dlaczego najstarsze alchemiczne aspiracje do przemiany człowieka były jednocześnie intuicyjnie trafne i mechanistycznie bezradne. Organizm rzeczywiście można modyfikować chemicznie: lek zmieni aktywność enzymu, hormon regulację genów, anestetyk świadomość, a antybiotyk metabolizm bakterii. Nie istnieje jednak jedna uniwersalna „materia życia", którą można ulepszyć poprzez oczyszczenie. Życie jest siecią zależności, więc ingerencja w jeden węzeł często wywołuje skutki w wielu innych. Dojrzała farmakologia nauczyła się przez to odchodzić od logiki eliksiru ku logice mechanizmu.

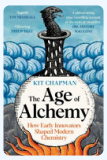
Biologia syntetyczna wykonuje kolejny krok: przechodzi od modyfikowania istniejących układów ku próbom konstruowania nowych. Chemia prebiotyczna czyni ruch przeciwny – od dzisiejszej złożoności ku najprostszym mechanizmom, z których mogła ona wyłonić się pierwotnie. Te trzy kierunki spotykają się w jednym pytaniu: jak organizacja molekularna wytwarza funkcję biologiczną? Można zatem stwierdzić, że współczesne badania nad pochodzeniem i konstrukcją życia są najbardziej wyrafinowaną postacią programu, który przez tysiąclecia ukrywał się pod językiem alchemicznej transformacji. Nie szukamy już receptury nieśmiertelności ani materii doskonałej; próbujemy zrozumieć warunki, w których chemia staje się samopodtrzymującym procesem, zdolnym zapamiętywać własną historię i poddawać ją selekcji.

Najbardziej niezwykły rezultat tych badań nie brzmi więc: „życie jest tylko chemią", gdyż słowo „tylko" usuwa właśnie to, co wymaga wyjaśnienia. Bardziej precyzyjne jest stwierdzenie, że życie jest tym, co może zrobić materia, gdy reakcje chemiczne zostaną zorganizowane w system dziedziczący, regulujący przepływy i zdolny do ewolucji. Nie potrzeba osobnego tworzywa – potrzeba nowego poziomu organizacji.

I w tym właśnie miejscu najstarsza alchemiczna intuicja o przemianie osiąga swoją najbardziej zadziwiającą postać. Złoto można otrzymać, zmieniając jądro atomowe; nowy materiał, zmieniając organizację atomów; lek – projektując architekturę cząsteczki. Życie wymaga natomiast przemiany innego rodzaju: takiego zorganizowania reakcji, aby produkt procesu stał się częścią mechanizmu podtrzymującego i reprodukującego sam proces. To jest transmutacja, której nie wykonuje pojedynczy tygiel. Jest nią przejście od materii mającej właściwości do materii mającej historię.

> W przeciwieństwie do alchemicznego ideału złota, które fascynowało swoją niezmiennością, życie trwa jedynie dzięki zdolności do nieustannego przepływu i kontrolowanej przemiany. Prawdziwa transmutacja nie polega więc na zmianie jednego pierwiastka w drugi, lecz na przejściu od materii, która posiada określone właściwości, do materii, która posiada historię. Czy zatem życie jest jedynie najbardziej wyrafinowaną formą organizacji chemicznej, czy może momentem, w którym wszechświat po raz pierwszy zaczął zapamiętywać samego siebie?

## Inspiracje

**[1]** 

**"The Age of Alchemy"** Kit Chapman

*Profile Books(GB) | ISBN: 9781805221166*

Dr **Kit Chapman** jest brytyjskim dziennikarzem naukowym, autorem i historykiem nauki. Uzyskał tytuł magistra farmacji i doktorat z historii i filozofii nauki na Uniwersytecie w Sunderland. Chapman wykładał na Uniwersytecie w Falmouth, a wcześniej był redaktorem w czasopiśmie „Chemistry World", wydawanym przez Królewskie Towarzystwo Chemiczne. Jego artykuły dziennikarskie i eseje ukazywały się w międzynarodowych publikacjach, takich jak „Nature", „New Scientist" i „The Daily Telegraph". Jako autor i popularyzator nauki, Chapman specjalizuje się w historii chemii, nuklearnictwie i innowacjach technologicznych. Do jego uznanych książek popularnonaukowych należą „Superheavy: Making and Breaking the Periodic Table", „Racing Green: How Motorsport Science Can Save the World" oraz „The Age of Alchemy", która opisuje globalną ewolucję wczesnych eksperymentów chemicznych.

*Dr **Kit Chapman** is a British science journalist, author, and historian of science. He earned a master's degree in pharmacy and completed a PhD in the history and philosophy of science at the University of Sunderland. Chapman has served as a lecturer at Falmouth University and previously worked as an editor for Chemistry World, published by the Royal Society of Chemistry. His journalism and essays have appeared in international publications, including Nature, New Scientist, and The Daily Telegraph. As an author and science communicator, Chapman specializes in the history of chemistry, nuclear science, and technological innovation. His acclaimed popular science books include Superheavy: Making and Breaking the Periodic Table, Racing Green: How Motorsport Science Can Save the World, and The Age of Alchemy, which chronicles the global evolution of early chemical experiments.*

*Falmouth University*

## Literatura uzupełniająca

### Książki

## Książki autora i dzieła przywołane w tekście:



**[1] "Superheavy"**

Kit Chapman

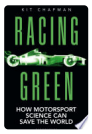
2019 | Bloomsbury Publishing | ISBN: 9781472953919



**[2] "Die Zeit der Alchemisten"**

Kit Chapman

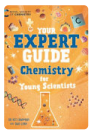
2026 | Aufbau Digital | ISBN: 9783841241504



**[3] "Racing Green"**

Kit Chapman

2022 | Bloomsbury Publishing | ISBN: 9781472982186



**[4] "Your Expert Guide: Chemistry for Young Scientists"**

Dr Chapman, Kit Chapman

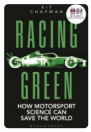
2026 | Wayland | ISBN: 9781526327383



**[5] "Chemistry for Young Scientists"**

Dr Kit Chapman

2025 | Hachette UK | ISBN: 9781526327376



**[6] "Racing Green: SHORTLISTED FOR THE 2022 RAC MOTORING BOOK OF THE YEAR PRIZE"**

Kit Chapman

2023 | Bloomsbury Sigma | ISBN: 9781472982193

## Książki autorów przywoływanych i literatura pokrewna:



**[7] "Molecular Mechanisms of Autonomy in Biological Systems"**

Tara Karimi

2018 | Springer | ISBN: 9783319918242



**[8] "Time, Life & Memory"**

Laurens Landeweerd

2020 | Springer Nature | ISBN: 9783030568535

## Artykuły naukowe

## Prace autorów przywoływanych w tekście:


**[1] "The theory of a general quantum system interacting with a linear dissipative system"**

Richard P. Feynman, F.L Vernon

1963 | Annals of Physics | DOI: 10.1016/0003-4916(63)90068-x

Źródło

**[2] "Very High-Energy Collisions of Hadrons"**

Richard P. Feynman

1969 | Physical Review Letters | DOI: 10.1103/physrevlett.23.1415

Źródło


## Artykuły naukowe autora:


**[3] "SUPERHEAVY"**

Kit Chapman

2019 | Bloomsbury Sigma eBooks | DOI: 10.5040/9781472974754

Źródło

**[4] "The transuranic elements and the island of stability"**

Kit Chapman

2020 | Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences | DOI: 10.1098/rsta.2019.0535

Źródło

**[5] "The oganesson odyssey"**

Kit Chapman

2018 | Nature Chemistry | DOI: 10.1038/s41557-018-0098-4

Źródło

**[6] "The first synthetic element"**

Kit Chapman

2019 | Nature | DOI: 10.1038/d41586-019-00236-4

Źródło

**[7] "Ei-ichi Negishi (1935–2021)"**

Kit Chapman

2021 | Nature | DOI: 10.1038/d41586-021-01828-9

Źródło

**[8] "Die Zeit der Alchemisten wie die moderne Chemie erfunden wurde"**

Kit Chapman, Hans-Peter Remmler, Aufbau-Verlag

2026

Źródło

**[9] "Alchemy: discredited pseudoscience or chemistry's worthy ancestor?"**

Kit Chapman

2025 | Nature | DOI: 10.1038/d41586-025-03309-9

Źródło

**[10] "The beams at the edge of physics"**

Kit Chapman

2021 | Physics World | DOI: 10.1088/2058-7058/34/02/28

Źródło

**[11] "Element Discovery and the Birth of the Atomic Age"**

Kit Chapman

2021 | Perspectives on the history of chemistry | DOI: 10.1007/978-3-030-67910-1_13

Źródło

**[12] "Elements of the Future"**

Kit Chapman

2019 | Chemistry International | DOI: 10.1515/ci-2019-0406

Źródło

Treść tworzy Fundacja Dobre Państwo.
Redaguje i publikuje APA ONE, autorski system redakcyjny Fundacji oparty na AI.
APA ONE Publishing System
Fundacja Dobre Państwo © 2026
Article ID: 7f00863a-5302-4ba6-8ad2-7eb0dec8a328