

SCIENTIFIC
AMERICAN

KOSMOLOGIA I CZĄSTKI ELEMENTARNE

ŚWIAT NAUKI

Lipiec 2007

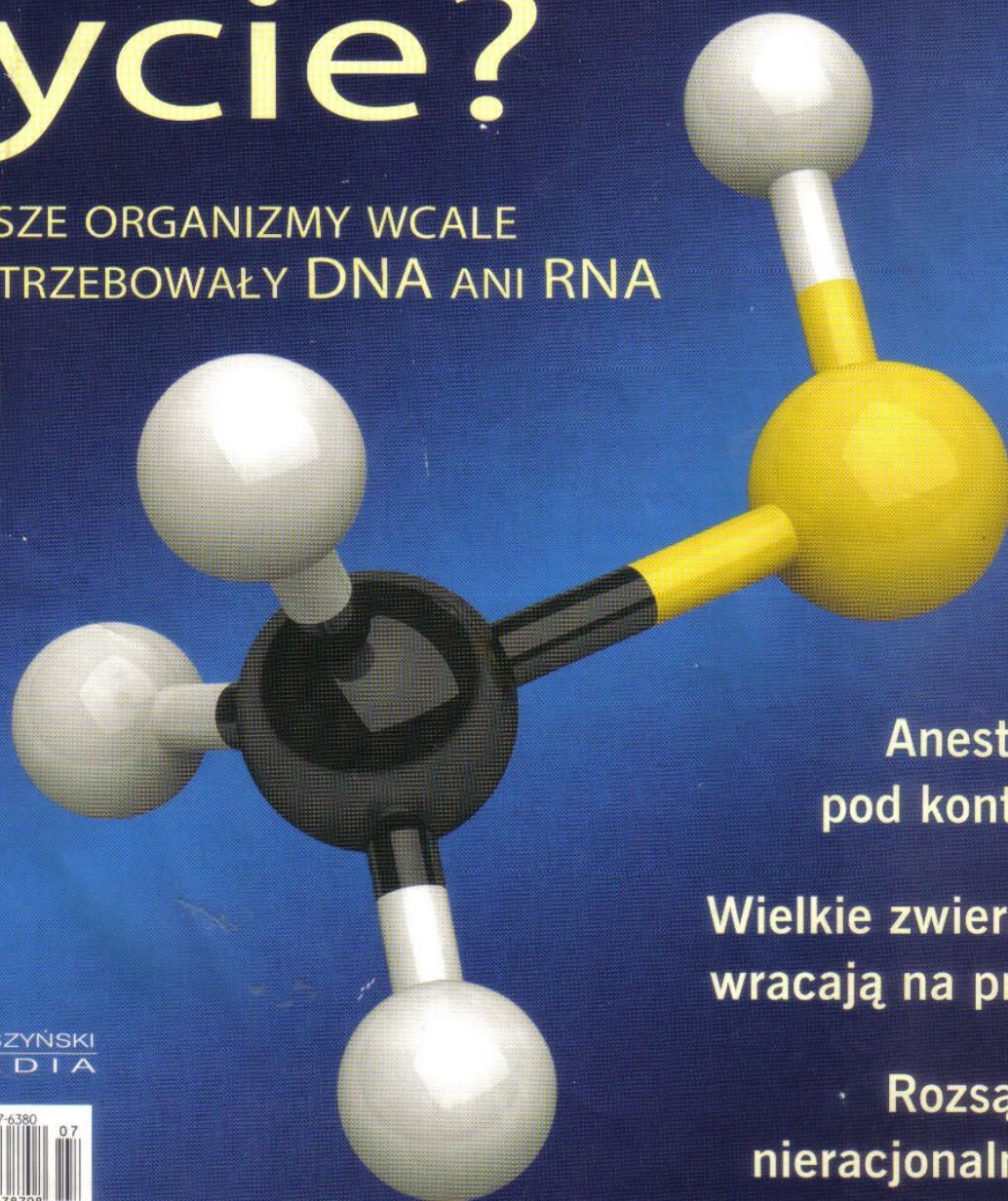
Nr 7 (191)

Cena 10 zł 99 gr (w tym 7% VAT)

www.swiatnauki.pl

Jak zaczęło się życie?

PIERWSZE ORGANIZMY WCALE
NIE POTRZEBOWAŁY DNA ANI RNA



Anestezja
pod kontrolą

Wielkie zwierzęta
wracają na prerię

Rozsądna
nieracjonalność

PRÓSZYŃSKI
MEDIA



Prostsze
**POCZĄTKI
ZYCIA**



Nagle pojawienie się dużych samokopiujących się cząsteczek, takich jak RNA, jest niemal niemożliwe. Życie powstało raczej jako sieć wzajemnie oddziałujących małych cząsteczek, sterowana przepływem energii

Niezwycię odkrycia rodzą niezwykle stwierdzenia. James Watson wspomina, że gdy tylko z Francisem Crickiem ustalili, jaka jest przestrzenna budowa kwasu deoksyrybonukleinowego (DNA), Crick „jak na skrzydłach wleciał do pubu Eagle, by ogłosić wszem i wobec, że odkryliśmy tajemnicę życia”. Rozszyfrowana struktura – elegancka podwójna helisa – zasługiwała na tak entuzjastyczne przyjęcie. Umożliwia ona bowiem przechowywanie informacji w języku, w którym cztery cząsteczki chemiczne, zasady azotowe, odgrywają taką samą rolę, jak 26 liter alfabetu w języku angielskim.

Ponadto informacja jest zapisana w dwóch długich łańcuchach, a każdy z nich określa, co znajdzie się w drugim. To sugeruje mechanizm powielania informacji: nici podwójnej helisy DNA rozplatają się, a nowe elementy budulcowe, z których składa się DNA, czyli nukleotydy zawierające zasady, układają się wzdłuż rozdzielonych nici i łączą ze sobą. W miejsce jednej helisy powstają dwie, każda będąca wierną repliką oryginału.

Dokonanie Watsona i Cricka zapoczątkowało lawinę odkryć dotyczących mechanizmów działania komórek, a nowa wiedza dała impuls do spekulacji na temat początków życia. Laureat Nagrody Nobla Hermann Joseph Muller napisał, że materiał genetyczny to „żyjące tworzywo, współczesny reprezentant pierwszych przejawów życia”, opisywanych przez Carla Sagana jako „prymitywny, swobodny nagi gen w roztworze materii organicznej”. (W tym kontekście „organiczna” oznacza związki węgla, zarówno budujące organizmy, jak i te, które w nich nie występują). Zaproponowano też wiele definicji życia. Stwierdzenie Mullera jest zgodne z tzw. definicją NASA: życie to samopodtrzymujący się układ chemiczny, który może ulegać darwinowskiej ewolucji.

Richard Dawkins tak opisał początki tej najwcześniejszej formy życia w swojej książce

Samolubny gen: „Aż pewnego razu całkiem przypadkowo powstała cząsteczka o szczególnych własnościach. Będziemy ją nazywać »replikatorem«. Nie musiała być wcale ze wszystkich największa ani najbardziej skomplikowana, odznaczała się wszakże niezwykle cechą: mogła tworzyć swoje własne kopie”*. Kiedy Dawkins pisał te słowa 30 lat temu, najlepszym kandydatem do tej roli wydawał się DNA. Później naukowcy zwrócili się w stronę innych cząsteczek, które mogły być najwcześniejszymi replikatorami, ale ja i wielu innych sądzimy, że oparcie modelu początków życia na pierwotnym replikatorze jest obarczone błędem. Wolimy inną ideę, która wydaje się bardziej prawdopodobna.

Kiedy światem rządził RNA

KONCEPCJA DONIOSŁEJ ROLI DNA szybko okazała się kontrowersyjna. Jego replikacja nie może zajść bez pomocy białek – związków należących do grupy dużych cząsteczek, których budowa chemiczna bardzo różni się od DNA. Co prawda, i białka, i DNA są łańcuchami połączonych ze sobą małych elementów, ale DNA jest zbudowany z nukleotydów, natomiast białka – z aminokwasów. Białka to komórkowe woły robocze. Najbardziej znani ich przedstawiciele, enzymy, przyspieszają reakcje chemiczne, które bez nich zachodziłyby zbyt wolno, by organizmy miały z nich pożytek. Białka używane dziś przez komórki są budowane według instrukcji zakodowanych w DNA.

Powyższy opis przywodzi na myśl znany problem: co było pierwsze, jajko czy kura? DNA zawiera przepis na budowę białka. Ale tej informacji nie da się wykorzystać ani skopiować bez pomocy białek. Zatem która z dużych cząsteczek pojawiła się najpierw: białko (kura) czy DNA (jajko)?

Możliwe rozwiązanie pojawiło się wraz z wkroczeniem na arenę kolejnego zawodnika – kwasu rybonukleinowego, czyli RNA. Jest on zbudowany

Wcześniejsza, dłuższa wersja tego artykułu ukazała się na stronie: www.sciam.com.
Reakcje internautów pomogły przekształcić ją w niniejszy tekst.

z nukleotydów, podobnie jak DNA, ale okazał się wyjątkowo uniwersalny i w naszych komórkach odgrywa wiele różnych ról. RNA jednego typu przenosi informacje z DNA do struktur produkujących białka, rybosomów. RNA innych typów wchodzi w skład rybosomów lub współdziałają z nimi podczas syntezy białek. Wypełniając swoje rozliczne obowiązki, RNA może przyjmować formę podwójnej helisy, i wtedy upodabnia się do DNA, albo zwinętej pojedynczej nici, czym bardziej przypomina białka.

Na początku lat osiemdziesiątych naukowcy odkryli rybozomy – cząsteczki RNA działające jak enzymy. Wydawało się, że pytanie o jajko i kurę doczekało się prostej odpowiedzi: życie zaczęło się wraz z powstaniem pierwszej samokopiującej się cząsteczki RNA. W słynnym artykule opublikowanym w 1986 w *Nature* noblista Walter Gilbert napisał: „Można wyobrazić sobie świat RNA zawierający jedynie cząsteczki RNA, które służą do katalizowania syntezy samych siebie. [...] Pierwszy etap ewolucji dotyczy więc cząsteczek RNA wykazujących aktywność enzymatyczną, niezbędną do złożenia swoich kopii ze składników nukleotydowej zupy”. W tej wizji pierwsza samoreplikująca się cząsteczka RNA, wylaniająca się z materii nieożywionej, realizowała wszystkie te funkcje, które teraz pełnią RNA, DNA i białka.

Hipotezę, że w ewolucji życia RNA pojawił się przed białkami i DNA, wspierały dodatkowe poszlaki. Na przykład wiele reakcji enzymatycznych wymaga uczestnictwa małych cząsteczek zwanych kofaktorami. Te kofaktory często zawierają rybonukleotyd, który jednak, jak się wydaje, nie pełni żadnej funkcji. Uznano, że takie struktury to „molekularne skamieniałości”, relikty świata, w którym biochemią rządził RNA, bez udziału DNA czy białek.

Jednak ta i inne poszlaki wspierają tylko tezę, że RNA pojawiło się przed

DNA i białkami. Nic natomiast nie mówią o początkach życia, które mogą się datować na okres poprzedzający powstanie RNA, kiedy niepodzielnie panowały inne cząsteczki. Naukowcy niestety na ogół nie rozdziwiają tych dwóch aspektów i oba obejmują jednym pojęciem „świat RNA”. W tym tekście będę stosować nazwę „najpierw RNA” na określenie hipotezy, że powstanie RNA było kluczowe dla powstania życia, aby odróżnić ją od znacznie mniej istotnego przypuszczenia, że RNA po prostu powstał wcześniej od DNA i białek.

Z próżnego i Salomon...

HIPOTEZA „NAJPIERW RNA” musi wyjaśniać fundamentalną kwestię: jak powstała ta pierwsza samoreplikująca się cząsteczka? Tymczasem realizacja wizji Gilberta, że RNA „po prostu” uformował się w nieożywionej zupie nukleotydowej, nie jest prosta.

Cegiełki, z których jest zbudowany RNA, czyli nukleotydy, mają jak na cząsteczki organiczne dość złożoną budowę. Każda zawiera cukier, fosforan i jedną z czterech zasad azotowych. Składa się zatem z dziewięciu lub 10 atomów węgla, wielu atomów azotu i tlenu oraz fosforu reszty fosforanowej (nie wspominając o wodorach), połączonych w precyzyjną strukturę przestrzenną. Atomy te dałoby się zestawić na wiele innych sposobów, uzyskując tysiące nukleotydów, które mogłyby się znaleźć w miejscu standardowych. A ta liczba i tak wydaje się śmiesznie mała w porównaniu z setkami tysięcy, a nawet milionami stabilnych cząsteczek organicznych o zbliżonych rozmiarach, które nukleotydami nie są.

Pomysł, że odpowiednie nukleotydy mogły mimo wszystko powstać, opiera się na dobrze znanym eksperymencie, opisanym w 1953 roku przez Stanleya L. Millera. Miller poddał działaniu wyładowań elektrycznych mieszaninę

prostych gazów, uważaną wówczas za przypominającą wczesną atmosferę ziemską, i otrzymał aminokwasy. Aminokwasy znaleziono również w meteorycie Murchison, który spadł w Australii w 1969 roku. Wygląda na to, że natura hojnie dostarcza akurat tych szczególnych cegiełek budulcowych. Swobodnie ekstrapolując te wyniki, niektórzy naukowcy i popularyzatorzy doszli do wniosku, że wszystkie składniki żywej materii można z łatwością odtworzyć w doświadczeniach podobnych do eksperymentu Millera lub znaleźć w meteorytach. To jednak nieprawda.

Aminokwasy, w tym te, które znaleziono lub wytworzono w doświadczeniach podobnych do eksperymentu Millera, mają znacznie prostszą budowę niż nukleotydy. Definiując je motyw to grupa aminowa (jeden atom azotu i dwa wodoru) oraz grupa karboksylowa (atom węgla, dwa atomy tlenu i atom wodoru) przyłączone do tego samego atomu węgla. Najprostszymi z 20 aminokwasów, które budują występujące w przyrodzie białka, ma w cząsteczce tylko dwa atomy węgla, a w 17 z 20 aminokwasów liczba atomów węgla w cząsteczce nie przekracza sześciu. W eksperymencie Millera powstały głównie związki (w tym aminokwasy) zawierające dwa lub trzy atomy węgla. Żadnych nukleotydów nie udało się uzyskać za pomocą wyładowań elektrycznych ani też znaleźć w meteorytach. Najwidoczniej materia nieożywiona ma skłonność do tworzenia cząsteczek zawierających raczej mniej niż więcej atomów węgla, i trudno ją podejrzewać o życzliwe konstruowanie nukleotydów niezbędnych do rozwoju życia w formie, jaką znamy.

Koncepcji „najpierw RNA” zadano tym samym celny cios. Jej zwolennicy stworzyli jednak dyscyplinę zwaną syntezą prebiotyczną. Próbowali wykazać, że są w stanie otrzymać RNA i jego składniki w laboratorium w sekwencji dokładnie kontrolowanych reakcji, wykorzystując takie warunki i materiały wyjściowe, jakie ich zdaniem istniały w przeszłości na Ziemi. Uciekali się przy tym do różnych sztuczek, na przykład dowolnie manipulowali stężeniami substratów. Można te prace podsumować następującą analogią: wyobraźmy sobie golfistę, który po zaliczeniu wszystkich 18 dołków doszedł do wniosku, że pileczka

Przegląd / Początki życia

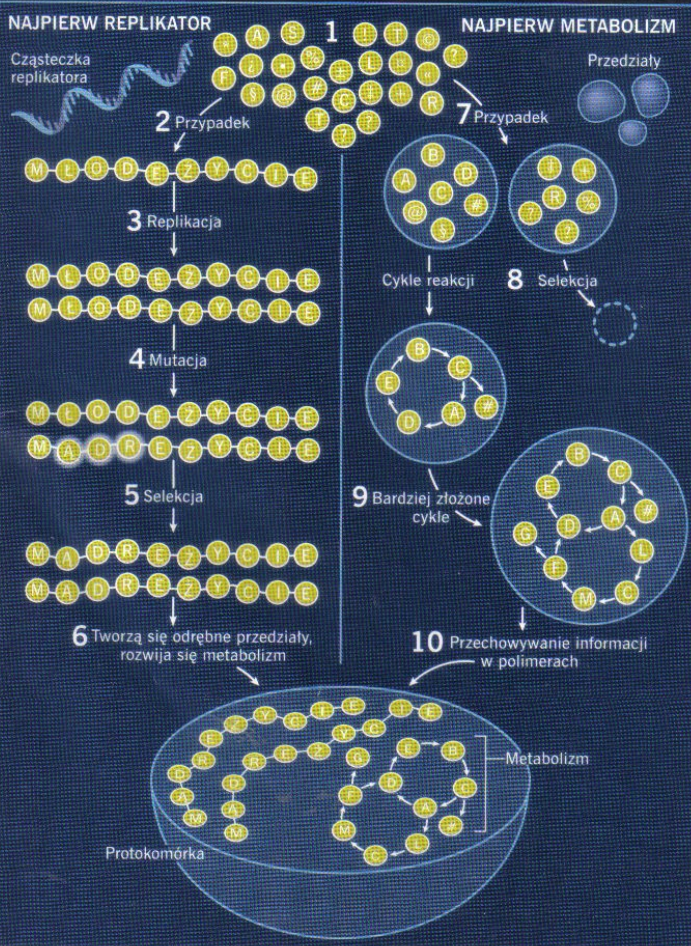
- Poglądy na rozwój życia z materii nieożywionej można podzielić na dwie klasy – hipotezy „najpierw replikator”, według których przypadkowo powstała duża cząsteczka zdolna do replikacji (np. RNA), i hipotezy „najpierw metabolizm”, według których małe cząsteczki utworzyły ewoluującą sieć reakcji napędzanych przez źródło energii.
- Zwolennicy hipotezy „najpierw replikator” muszą wyjaśnić, w jaki sposób mogła powstać tak skomplikowana cząsteczka, kiedy ewolucja jeszcze nie zachodziła.
- Zwolennicy hipotezy „najpierw metabolizm” muszą pokazać, że kiedy Ziemia była młoda, mogły rozwinąć się sieci reakcji zdolne do wzrostu i ewolucji.

REPLIKATOR CZY METABOLIZM

Naukowe hipotezy na temat powstania życia z materii nieożywionej można z grubsza podzielić na dwa konkurujące oboje: hipotezy „najpierw replikator” i hipotezy „najpierw metabolizm”. Oba modele wychodzą od cząsteczek będących produktami niebiologicznych procesów chemicznych, przedstawionych tu jako kółka z symbolem (1).

W modelu „najpierw replikator” niektóre z tych związków łączą się w łańcuch, przypadkowo tworząc cząsteczkę – być może jakiś rodzaj RNA – zdolną do samoreplikacji (2). Taka cząsteczka produkuje dużo kopii samej siebie (3); część z nich zawiera mutacje, ale nadal może się powielać (4). Zmutowane replikatory, które są lepiej przystosowane do warunków, zastępują wcześniejsze wersje (5). W końcu ten proces ewolucji musi doprowadzić do rozwoju odrębnych przedziałów (takich jak komórki) i metabolizmu, w którym mniejsze cząsteczki wykorzystują energię do przeprowadzania użytecznych procesów (6).

Metaboliczna droga do życia zaczyna się, kiedy spontanicznie powstaną odrębne przedziały (7). Część z nich zawiera mieszaninę związków, mogących wejść w cyklę reakcji (8); cykle z czasem stają się coraz bardziej złożone (9). W końcu układ musi przejść do przechowywania informacji w polimerach (10).



JEN CHRISTIANSEN

mogłaby równie dobrze rozegrać tę rundę sama, pod jego nieobecność. Wykazał nawet, w jakich warunkach jest to możliwe – trzeba tylko połączyć siły natury (np. trzęsienia ziemi, wiatry, tornada czy powodzie) i dać im dostatecznie dużo czasu, aby uzyskać efekt. Wróćmy jednak do RNA: jego spontaniczne powstanie nie wymaga złamania żadnych praw fizyki, ale prawdopodobieństwo tego zdarzenia jest niezwykle małe.

Niektórzy chemicy zasugerowali więc, że najpierw powstał prostszy replikator podobny do RNA, który rzucił życiem w „świecie przed RNA”. Zapewne taka pierwsza samokopiująca się cząsteczka również miałyby zdolności katalityczne, podobnie jak RNA. A skoro współczesna biologia nie znalazła żadnego śladu po tym hipotetycznym pierwotnym replikatorze i katalizatorze, RNA musiał w jakiś czas po swoim powstaniu całkowicie przejąć jego funkcje.

Ale nawet gdyby natura mogła przyrządzić pierwotną zupę zawierającą odpowiednie cegiełki (nukleotydy lub ich prostsze zamienniki), ich spontaniczne złożenie się w jakikolwiek replikator jest jeszcze bardziej nieprawdopodobne niż zaistnienie samej zupy. Wyobraźmy sobie, że powstał roztwór zawierający odpowiednie składniki budulcowe, a warunki sprzyjają ich łączeniu się w łańcuchy. Jednak w takim roztworze oprócz cegiełek odpowiednich musiałyby istnieć nieprzeliczone ilości nieodpowiednich, które – włączone w powstający polimer – uniemożliwiłyby jego dalszą replikację. Najprostszym przykładem takiej defektywnej cząsteczki jest terminator – element mający tylko jedno z dwóch „ramion” wymaganych do tworzenia łańcucha.

Obojętna natura teoretycznie powinna łączyć elementy losowo, a więc tworzyć ogromnie zróżnicowaną mieszaninę krótkich łańcuchów, zamiast znacznie dłuższych o jednakowej struk-

O AUTORZE

ROBERT SHAPIRO to emerytowany profesor chemii New York University. Jest autorem lub współautorem ponad 125 publikacji, głównie w dziedzinie chemii DNA. Zajmował się m.in. mechanizmami uszkodzenia materiału genetycznego przez związki chemiczne obecne w środowisku, które mogą prowadzić do powstawania mutacji i nowotworów.

turze, niezbędnej do uzyskania funkcji katalitycznych i replikacji. Prawdopodobieństwo powstania dłuższych łańcuchów jest zaś tak niezwykle małe, że nawet jednorazowy sukces byłby wyjątkowo szczęśliwym trafem.

Życie małych cząsteczek

LAUREAT NAGRODY NOBLA Christian de Duve nawoływał do „odrzucenia zdarzeń tak mało prawdopodobnych, że można je nazwać cudami, zjawisk, które znajdują się poza zakresem kompetencji badań naukowych”. Zgodnie z tym postulatem DNA, RNA, białka i inne skomplikowane makrocząsteczki nie mogą być brane pod uwagę jako pierwsi przedstawiciele życia. Powinniśmy się raczej zająć mieszaninami małych cząsteczek, których aż w nadmiarze dostarcza nam przyroda nieożywiona.

Tak się składa, że od dziesięcioleci istnieje kilka konkurencyjnych hipotez, dla których mieszanina małych cząsteczek stanowi naturalny przedmiot badań. Posługują się one termodynamiczną, a nie genetyczną definicją życia, zgodnie ze schematem zaproponowanym przez Sagana w *Encyclopedia Britannica*: za strukturę ożywioną można uznać wyodrębnioną część przestrzeni, w której dzięki przepływowi energii cyklicznie wzrasta uporządkowanie (spada entropia). Zainteresowanie zespołami małych cząsteczek wywodzi się z idei radzieckiego biolo-

ga Aleksandra Oparina. Uwzględniając je hipotezy powstania życia różnią się w szczegółach. Przedstawię zatem pięć powszechnie uznawanych warunków (dodając kilka własnych).

1. To, co żywe, musi być oddzielone od nieożywionego fizyczną barierą. Życie wyróżnia się wysokim stopniem organizacji, jednak drugie prawo termodynamiki wymaga, żeby Wszechświat zmierzał w kierunku wznoszącego nieuporządkowania, czyli entropii. Zatem entropia może maleć na ograniczonej przestrzeni tylko wtedy, gdy jest z tym związany jej większy wzrost w innej części przestrzeni. Kiedy żywe komórki rosną i mnożą się, przekształcają energię chemiczną albo promieniowanie w ciepło. Wydzielone ciepło zwiększa entropię środowiska, kompensując jej spadek w żywych układach. Fizyczna bariera utrzymuje rozdział świata na oazy życia i nieożywione środowisko, w którym życie musi sobie radzić.

Dziś żywe komórki oddzielone są od środowiska skomplikowanymi dwuwarstwowymi błonami zbudowanymi ze związków chemicznych należących do lipidów. Kiedy powstawało życie, jego separację od otoczenia zapewniały zapewne jakieś naturalne granice. Tę hipotezę wspierają obserwacje Davida W. Deamera z University of California w Santa Cruz, który zauważył w meteorytach struktury przypominające błony. Inne propozycje naturalnych granic,

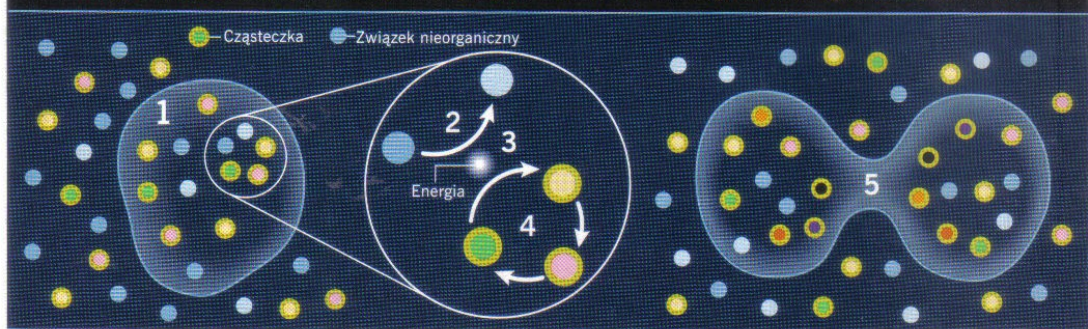
których dzisiejsze życie nie wykorzystuje, to błony na siarczku żelaza, powierzchnie skal (w przypadku których oddziaływania elektrostatyczne oddzielają wybrane cząsteczki od ich środowiska), małe zbiorniki wodne i aerozole.

2. Proces organizacji jest napędzany przez źródło energii. Żeby utrzymać się przy życiu, jemy węglowodany i tłuszcze, a następnie łączymy je z tlenem, który wdychamy. Mikroorganizmy są bardziej wszechstronne – mogą wykorzystywać związki nieorganiczne zamiast jedzenia czy tlenu. Niemniej ostatecznie za każdym razem dochodzi do reakcji redoks. Polega ona na przekazaniu elektronów z atomu bogatego w elektrony (reduktora) do atomu uboższego w elektrony (utleniacz). Rośliny mogą zaś bezpośrednio pobierać energię słoneczną i używać jej do podtrzymywania funkcji życiowych. W określonych okolicznościach komórki wykorzystują inne formy energii – na przykład różnice w kwasowości po przeciwnych stronach błony. Jeszcze inne formy, jak radioaktywność czy nagłe zmiany temperatury, być może napędzają życie gdzieś indziej we Wszechświecie.

3. Uwolnienie energii musi być sprzężone z procesami organizacji, które tworzą i podtrzymują życie. Uwolniona energia nie zawsze daje się zastosować. Spalanie benzyny w silniku samochodu wytwarza dużo energii chemicznej, ale dopóki nie

METABOLICZNA DROGA DO ŻYCIA

Potrzeba co najmniej pięciu procesów, aby małe cząsteczki stworzyły pewnego rodzaju życie, definiowane jako lokalne zwiększenie uporządkowania za pomocą cykli reakcji chemicznych napędzanych przepływem energii. Po pierwsze, musi powstać bariera oddzielająca siedlisko życia (przedziały) od nieożywionego środowiska (1). Potrzebne jest źródło energii, tu przedstawione jako związek nieorganiczny (*niebieski*) wchodzący w reakcję, w której wydziela się ciepło (2). Uwolniona energia musi napędzać reakcję chemiczną (3). Musi powstać sieć reakcji chemicznych, której złożoność będzie wzrastać, umożliwiając adaptacje i ewolucję (4). I ostatni warunek – sieć reakcji musi wchłaniać materiały szybciej, niż je traci, a przedziały muszą się powielać (5). Cząsteczki przechowujące informacje (takie jak RNA czy DNA) są zbędne; dziedziczone informacje to skład i stężenie związków w sieci.



zostanie ona użyta do obracania kół, auto nie pojedzie. Potrzebne jest mechaniczne połączenie albo sprzężenie. Codziennie nasze komórki rozkładają kilogramy nukleotydu o nazwie ATP. Energia uwalniana w tej reakcji służy do napędzania procesów biochemicznych, które bez tego zachodziłyby zbyt wolno lub wcale. Interwencja enzymu dodatkowo je przyspiesza, a kiedy reakcje mają wspólny związek pośredni, powstają między nimi połączenia. Zgodnie z hipotezą drobnocząsteczkową w naturze istnieje dostatecznie dużo sprzężonych reakcji i prymitywnych katalizatorów, by dać początek życiu.

4. Musi powstać chemiczna sieć, która pozwoli na adaptację i ewolucję. Teraz przechodźmy do sedna sprawy. Wyobraźmy sobie na przykład, że w wyniku energetycznie korzystnej reakcji redoks związku nieorganicznego związek organiczny A jest przekształcany w związek organiczny B, a dzieje się to w ograniczonej przestrzeni. Taką kluczową transformację nazywam reakcją napędową, ponieważ jest ona motorem napędzającym procesy organizowania się. Gdyby B po prostu przekształcał się z powrotem w A albo uciekał z miejsca reakcji, nie mogłoby to prowadzić do zwiększenia stopnia organizacji. Gdyby jednak B przekształcał się w A wieloetapowo, powiedzmy, z B w C, z C w D, a z D w A, wówczas funkcjonowanie etapów takiego cyklicznego szlaku (cyklu) byłoby faworyzowane, ponieważ odbudowuje zapasy związku A, a to pozwala na kontynuowanie użytecznego uwalniania energii w reakcji redoks związku nieorganicznego [ramka na stronie 47].

Będą też zachodziły reakcje poboczne, na przykład przekształcanie się cząsteczek D w inny związek, E, który nie należy do cyklu ABCD. Ponieważ cykl jest napędzany, faworyzowana jest transformacja E w D, która dostarcza materiałów do kontynuowania cyklu i maksymalizuje uwalnianie energii towarzyszące reakcji napędowej.

Cykl może też adaptować się do zmieniających się okoliczności. W dzieciństwie fascynowało mnie zawsze, jak woda wyciekająca z nieszczelnego hydrantu znajdowała ujście do najbliższego ścieku. Jeśli śmieci lub spadające liście blokowały jej drogę, woda piętrzyła się, dopóki nie znalazła innej ścieżki omijającej przeszkodę. I podobnie: gdyby zmiana kwasowości lub jakiejś innej

O co pytają czytelnicy?

Robert Shapiro odpowiadał na pytania czytelników internetowej wersji tego artykułu na blogu Scientific American. Oto wybrane fragmenty dyskusji.

Czy hipoteza „najpierw metabolizm” wskazuje na jeden czy na kilka niezależnych początków życia? – JR

Odp.: Wiele początków wydaje się według scenariusza „najpierw metabolizm” bardziej prawdopodobne. Gerald Feinberg i ja rozważaliśmy zagadnienie obcego życia (nieopartego na RNA, DNA czy znanej nam biochemii) w naszej książce z 1980 roku zatytułowanej *Life beyond Earth* (Życie poza Ziemią). Naukowcy na konferencji prowadzonej przez Paula Daviesa na Arizona State University w grudniu 2006 roku uznali, że obce formy życia mogą nawet istnieć, nieodkryte, na naszej planecie. Większości mikroorganizmów widzialnych pod mikroskopem nie da się hodować na zwykłych pożywkach hodowlanych, więc nie zostały scharakteryzowane. Obce drobnoustroje mogą też istnieć w takich siedliskach na Ziemi, w których warunki są zbyt ekstremalne nawet dla najwytrzymalszych form znanego nam życia.

Dlaczego musimy zademonstrować reakcje „najpierw metabolizm” w naczyniu laboratoryjnym? Czy nie możemy przeprowadzić symulacji komputerowej? – Dave Evanoff

Odp.: Stuart Kauffman, Doron Lancet i inni wykorzystali symulacje komputerowe, żeby pokazać możliwość powstania samopodtrzymującego się cyklu. Takie symulacje nie pozwoliły jednak na określenie składu mieszanek chemicznych i warunków fizycznych wymaganych dla zaistnienia samopodtrzymujących się sieci. Nie znamy jeszcze wszystkich szlaków reakcji otwartych dla mieszaniny prostych związków organicznych, a co dopiero ich stałych termodynamicznych. Nawet gdyby takie dane były dostępne, większość chemików nie dałaby się przekonać samymi symulacjami komputerowymi i żądałaby wyników doświadczalnych.

Potrzebne jest jakieś wyjaśnienie faktu, że wszystkie cząsteczki biologiczne wykazują jednakową skrętność. – John Holt

Odp.: Jeśli przekształcenia związków nieorganicznych, które napędzały cykl reakcji opisany w moim artykule, wybiórczo wykorzystywały tylko jedną formę chiralną związku A, wówczas produkt B i inni uczestnicy cyklu również mogliby występować tylko w jednej formie. Kontrola chiralności, czyli skrętności, staje się istotna, kiedy małe chiralne cząsteczki łączą się, tworząc większe cząsteczki. Współczesne enzymy mogą zawierać 100 połączonych aminokwasów, wszystkie o tej samej chiralności (lewoskrętne – L-aminokwasy). Gdyby we wrażliwym miejscu enzymu umieścić D-aminokwas zamiast jego lewoskrętnego odbicia lustrzanego, wówczas zmieniłaby się struktura przestrzenna enzymu, który mógłby utracić swoją funkcję.

cechy środowiska utrudniła etap szlaku prowadzącego od B do A, pośredni metabolit gromadziłby się tak długo, dopóki nie znalazłaby się inna droga jego przekształcenia. Kolejne zmiany tego typu przebudowałyby początkowy cykl w sieć. Takie badanie chemicznego „krajobrazu” metodą prób i błędów pozwoliłoby także odkryć związki, które katalizują ważne etapy cyklu, zwiększając tym samym wydajność, z jaką sieć wykorzystuje źródło energii.

5. Sieć musi rosnąć i powielać się. Żeby przetrwać i wzrastać, sieć musi gromadzić więcej materiału, niż go traci. Dyfuzja składowych sieci do świata zewnętrznego jest faworyzowana przez entropię, i do pewnego stopnia będzie zachodzić. W wyniku pewnych reakcji ubocznych mogą powstawać gazy, które ulatują z układu, albo związki wytrą-

cające się z roztworu. Gdyby suma tych procesów przekroczyła tempo, w jakim sieć uzyskuje materiał, układ uległby zniszczeniu. Wyczerpanie paliwa z zewnątrz miałyby taki sam skutek. Możemy sobie wyobrazić, że na młodej Ziemi startowało wiele takich układów, angażujących różne reakcje napędowe i różne zewnętrzne źródła energii. W końcu szczególnie odporny „zapuścił korzenie” i zaczął napędzać sam siebie.

Musiąco wówczas dojść do powstania systemu reprodukcji takiego układu. Jeśli jest wyodrębniony przez błonę lipidową, siły fizyczne mogą ją rozzerwać, kiedy stanie się dostatecznie duży (Freeman Dyson z Institute for Advanced Study w Princeton w New Jersey określił taki system mianem „świata jako torby ze śmieciami”, czyli przeciwieństwa „uporządkowanej i eleganckiej sceny”

świata RNA). Układ, który funkcjonuje w jamce w kamieniu, może przelać się do sąsiedniej jamki. Jakikolwiek będzie mechanizm, rozbitcie na oddzielne jednostki chroni układ przed całkowitym wyginieciem w wyniku lokalnej katastrofy. A gdy już powstały niezależne jednostki, mogły ewoluować w różnych kierunkach i konkurować między sobą o substraty. Tak dokonałoby się przejście od życia, które powstaje z materii nieożywionej pod działaniem dostępnych źródeł energii, do życia, które przystosowuje się do środowiska zgodnie z prawami darwinowskiej ewolucji.

Zmiana paradygmatu

OPISANE SYSTEMY zwykle były klasyfikowane jako „najpierw metabolizm”, co sugeruje, że nie zawierają mecha-

nizmów dziedziczenia. Innymi słowy, na pierwszy rzut oka nie zawierają cząsteczki czy struktury, która pozwalałaby na powielanie i przekazywanie potomkom zawartej w niej informacji (czyli na dziedziczenie). Jednak zbiór małych elementów zawiera tę samą informację, co lista, która je opisuje. Na przykład moja żona daje mi listę zakupów. Zakupy, które przynoszą ze sklepu, zawierają tę samą informację, co lista. Doron Lancet z Instytutu Weizmann w Rehovot w Izraelu nazwał dziedziczną informację przechowywaną w małych cząsteczkach, a nie w listach takich jak DNA czy RNA, „genomem złożonym”.

Drobnocząsteczkowa koncepcja początków życia wymaga pewnych założeń (wydzielona przestrzeń, zewnętrz-

ne źródło energii, reakcja napędowa sprzężona z tym źródłem, sieć chemiczna obejmująca tę reakcję i prosty mechanizm reprodukcji). Jednak te wymagania są ogólne, i ich spełnienie wydaje się dużo bardziej prawdopodobne niż samoczynne uformowanie się złożonych wieloetapowych szlaków koniecznych do powstania cząsteczki, która jest replikatorem.

Przez lata w wielu pracach teoretycznych rozwijano poszczególne hipotezy należące do klasy „najpierw metabolizm”, ale wykonano niewiele doświadczeń, które by je potwierdzały. W tych przypadkach, kiedy opublikowano opisy eksperymentów, miały one zwykle pokazywać, że poszczególne etapy proponowanego cyklu mogą rzeczywiście zachodzić. Najwięcej nowych danych dostarczyli prawdopodobnie Günter Wächtershäuser i jego współpracownicy z Technische Universität München. Przedstawili oni etapy cyklu obejmującego łączenie i rozdzielanie aminokwasów w obecności katalizujących siarczków metali. Energia napędzająca przekształcenia pochodzi z utleniania tlenku węgla do ditlenku węgla. Badacze nie pokazali jeszcze działania całego cyklu ani nie udowodnili, że może się sam napędzać i ewoluować. Żeby ocenić słuszność koncepcji drobnocząsteczkowych, potrzeba doświadczenia, w którym uda się zaobserwować te trzy cechy.

Na początek najważniejsza będzie identyfikacja kandydatów na reakcje napędzające – przekształceń małych cząsteczek (A w B, jeśli mamy się trzymać wcześniejszego przykładu), sprzężonych z obfitym źródłem energii zewnętrznej (np. utlenianiem tlenku węgla lub innego związku nieorganicznego). Kiedy zidentyfikuje się prawdopodobną reakcję napędzającą, nie powinno być konieczne określenie z góry pozostałych składników układu. Wybrane składniki (w tym źródło energii) i mieszkankę innych małych cząsteczek wytwarzanych w naturalnych procesach (które mogły obficie występować na młodej Ziemi) trzeba by połączyć w odpowiednim naczyniu reakcyjnym. Gdyby powstała ewoluująca sieć, jej składniki gromadziłyby się i zmieniały w czasie. Mogłyby powstać nowe katalizatory, które zwiększałyby tempo kluczowych reakcji, spadałaby więc ilość niepotrzebnych materiałów.

Replika ze „świata RNA”

Steven A. Benner z Westheimer Institute for Science and Technology w Gainesville na Florydzie uważa, że modele „najpierw RNA” mają się świetnie.

Mimo że niektórzy ogłosili już upadek hipotezy „najpierw RNA” z powodu wyjątkowego nieprawdopodobieństwa spontanicznego powstania RNA, pojawiają się wyniki kolejnych badań potwierdzające tę koncepcję.

To prawda, że większość cząsteczek organicznych pod wpływem energii (np. uderzenia pioruna czy ciepła z wulkanów) przekształca się w substancję przypominającą asfalt, która bardziej nadaje się do budowania drogi niż żywego organizmu. Ale modele „najpierw metabolizm” w zakresie, w którym oparte są na jakikolwiek rzeczywistych związkach chemicznych, muszą wyjaśniać podobny paradoks: cząsteczki wystarczająco reaktywne, żeby brać udział w przemianie materii, są też wystarczająco reaktywne, żeby ulec rozkładowi. Nie ma tu łatwych rozwiązań.

Mój zespół, tak jak wiele innych, powrócił więc do elementarza nauk przyrodniczych: przeprowadzić doświadczenia, żeby dowiedzieć się, jak RNA mógł powstać na Ziemi.

Na przykładzie cukru rybozy, od którego nazwy pochodzi R w akronimie RNA, zobaczyliśmy ostatnio, jak problem uważany za nierozwiązywalny był w istocie jedynie jeszcze nierozwiązany. Przez długi czas ryboza opierała się próbom stworzenia jej drogą syntezy prebiotycznej (reakcji między mieszkankami cząsteczek, które prawdopodobnie istniały na pradawnej Ziemi), ponieważ zawiera grupę karbonylową – atom węgla połączony podwójnym wiązaniem z atomem tlenu. Grupa ta wykazuje i „dobrą” reaktywność (możliwość uczestniczenia w przemianach materii), i „złą” reaktywność (łatwość przekształcenia się w substancję smolopodobną). Stanley L. Miller 10 lat temu uznał, że niestabilność rybozy spowodowana przez obecność grupy karbonylowej „wyklucza użycie rybozy i innych cukrów jako reagentów prebiotycznych. Oznacza to, że ryboza i inne cukry nie były składnikami pierwszego materiału genetycznego”.

Ale prebiotyczna zupa potrzebuje miski zrobionej z odpowiednich związków nieorganicznych, a nie szklanej probówki. Całkiem porządną miskę można dziś znaleźć w Dolinie Śmierci w Kalifornii. Niedługo środowisko było tam na zmianę suche i wilgotne, obfitowało w związki organiczne pochodzące z akrecji dysku protoplanetarnego oraz (co najważniejsze) w nieorganiczne, zawierające bor. Dlaczego bor jest ważny? Ponieważ stabilizuje węglowodany takie jak ryboza. A jeśli zmieszać boran (tlenek boru) ze związkami organicznymi obficie występującymi w meteorytach i strzelić w nie piorunem, z formaldehydu powstają spore ilości rybozy, która nie ulega rozkładowi.

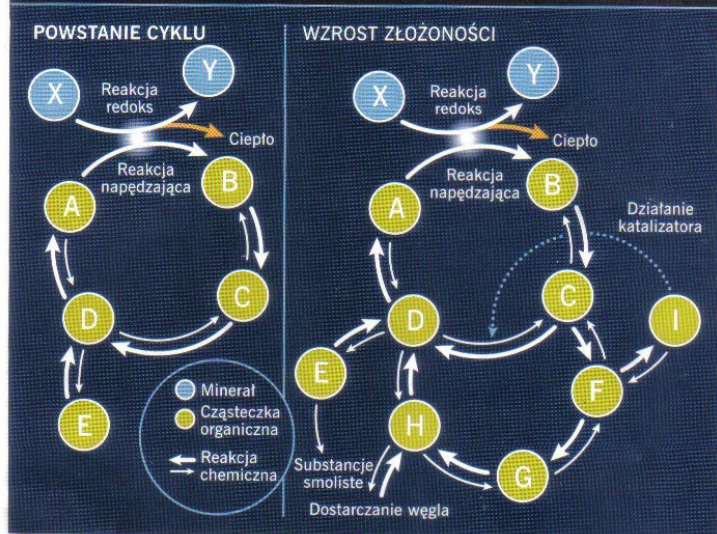
Fakt, że problem uznany za „nierozwiązywalny” doczekał się takiego prostego wyjaśnienia, nie oznacza, że pierwsza forma życia na pewno wykorzystywała RNA jako materiał genetyczny. Ale powinien ostrzegać przed porzucaniem pewnych kierunków badań tylko dlatego, że pojawiły się problemy, których jeszcze nie udało się rozwiązać.

EWOLUCJA SIECI CHEMICZNYCH

Hipoteza „najpierw metabolizm” wymaga powstania sieci reakcji chemicznych, która staje się coraz bardziej złożona i adaptuje się do zmian w środowisku.

POWSTANIE CYKLU: Źródło energii (tu tzw. reakcja redoks przekształcająca związek nieorganiczny X w związek nieorganiczny Y) jest sprzężone z reakcją przekształcającą cząsteczkę organiczną A w cząsteczkę B. Kolejne reakcje (B w C, C w D itd.) tworzą cykl prowadzący z powrotem do A. Reakcje obejmujące cząsteczki spoza cyklu (E) będą wprowadzały więcej materiału do cyklu.

WZROST ZŁOŻONOŚCI: Jeśli zmiana warunków zahamuje jedną z reakcji w cyklu (np. C w D), mogą powstać inne szlaki. Tu znalazło się obejście, w którym C jest przekształcane w D przez związki pośrednie F, G i H. Inne rozwiązanie to włączenie do sieci reakcji katalizatora (I), którego działanie (*linia przerywana*) odblokowuje przekształcenie C w D. Aby przetrwać, ewoluująca sieć musi przyciągać ze środowiska zawierające węgiel materiały szybciej, niż traci je przez dyfuzję i reakcje uboczne, takie jak powstawanie substancji smolistych, które wytrącają się z roztworu.



Reaktor wymagałby wejścia (dostarczającego energii i substratów) i wyjścia (odprowadzającego odpady i związki niebędące częścią sieci). W takich doświadczeniach łatwo zidentyfikować niepowodzenia. Energia rozpraszała się bez wytworzenia jakichkolwiek znaczących zmian w stężeniach innych związków albo związki przekształcałyby się w smołopodobne strąty zatykające urządzenie. Gdyby nam się udało, dowiedzielibyśmy się, jak mogły wyglądać pierwsze kroki na drodze do powstania życia. Niekoniecznie odtwarzałyby one to, co rzeczywiście wydarzyło się na Ziemi. Najważniejsze jest przecież dowiedzenie ogólnej zasady, co byłoby punktem wyjścia do dalszych

badzeń. Niewykluczone, że istnieje wiele dróg, a wybór jednej z nich dyktują lokalne warunki środowiskowe.

Zrozumienie pierwszych etapów rozwoju życia nie wskazałoby konkretnych zdarzeń, które doprowadziły do

rozwoju znanych nam współczesnych organizmów opartych na DNA, RNA i białkach. Niemniej, wiedząc, że ewolucja nie jest przewidująca, możemy przypuszczać, że nukleotydy pojawiły się w szlakach metabolicznych w zupełnie innym celu niż gromadzenie informacji, może na przykład jako katalizatory albo magazyny energii chemicznej (nukleotydy ATP do dziś pełni tę funkcję). Dopiero jakieś przypadkowe zdarzenie lub okoliczności mogły doprowadzić do połączenia nukleotydów w cząsteczkę RNA. Dziś jedną z najbardziej oczywistych funkcji RNA jest asystowanie przy tworzeniu wiązań między aminokwasami podczas syntezy białek. Pierwsze RNA mogły służyć temu samemu celowi, nie mając preferencji do konkretnych aminokwasów. Trzeba by zatem było wielu kolejnych kroków ewolucji, żeby wynaleźć skomplikowane mechanizmy replikacji i specyficznej syntezy białek, które działają dziś w organizmach żywych.

Jeśli ogólny paradygmat drobno-cząsteczkowego początku życia uda się potwierdzić, zmienia się nasze oczekiwania co do miejsca życia we Wszechświecie. Niezwykle mało prawdopodobny początek życia, taki jak w scenariuszu „najpierw RNA”, sugeruje, że w kosmosie jesteśmy sami. Biochemik Jacques Monod ujął to tak: „Wszechświat nie był brzemienne życiem, biosfera nie nosiła w sobie człowieka. Nasz numer padł jak w kasynie w Monte Carlo”. Alternatywna koncepcja sieci małych cząsteczek harmonizuje z poglądem biologa Stuarta Kaufmana: „Jeśli to wszystko prawda, życie staje się znacznie bardziej prawdopodobne, niż przypuszczaliśmy. Nie tylko Wszechświat jest naszym domem, ale także rosną szanse na to, że dzielimy go z nieznanymi jeszcze towarzyszami”.

* Richard Dawkins *Samolubny gen*; Prószyński i S-ka 1996, przekład Marek Skoneczny.

JEŚLI CHCESZ WIEDZIEĆ WIĘCEJ

Narodziny życia na Ziemi. Leslie E. Orgel; *Świat Nauki* XII/1994.

Kolebka życia. O narodzinach i najstarszych śladach życia na Ziemi. J. William Schopf; PWN, 2006.

Dzieje życia na Ziemi. Jerzy Dzik; PWN, 2003.

Hipotetyczna rola autokatalitycznych właściwości kwasów nukleinowych w biogenezie. Katarzyna Adamala, Sławomir Piłkuła, *Kosmos*, tom 53, nr 2, s. 123-131. Dostępne na stronie: <http://kosmos.icm.edu.pl/PDF/2004/123.pdf>

Prebiotic Chemistry and the Origin of the RNA World. Leslie E. Orgel; *Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology*, tom 39, nr 2, s. 99-123, 1 IV 2004. Dostępne na stronie: <http://www.crbmb.com/cgi/content/full/39/2/99>

Self-organizing Biochemical Cycles. Leslie E. Orgel; *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, tom 97, nr 23, s. 12503-12507, 7 XI 2000. Dostępne na stronie: <http://www.pnas.org/cgi/content/full/97/23/12503>