Gánti Tibor

Kontra Crick avagy AZ ÉLET MIVOLTA

GÁNTI TIBOR

KONTRA CRICK
AVAGY AZ ÉLET MIVOLTA

GÁNTI TIBOR

KONTRA CRICK AVAGY AZ ÉLET MIVOLTA

GONDOLAT
BUDAPEST
1989

Szakmailag ellenőrizte:
Csaba György

ISBN 963 282 199 8
© Gánti Tibor, 1989

AJÁNLOM E KÖNYVET

Francis Harry Compton CRICK-nek,

aki: Watsonnal együtt megkonstruálta a DNS kettős spirál modelljét, megalapozva ezzel a molekuláris biológiát;
aki: ugyancsak Watsonnal e modell segítségével feltárta, hogyan másolódik át az öröklődő információ a sejtosztódás során;
aki: sikerei csúcsán sem ült a babérjain, hanem újabb nagy problémák megoldásába fogott, és termékeny gondolatokat szőtt a genetikai kód eredetéről is;
aki: azt hiszi, de legalábbis hirdeti, hogy a földi élet más civilizációk által űrhajókon a Földre küldött baktériumoktól származik (amiben én nem hiszek);
és akinek mellesleg az agy működésével és az álomképzéssel kapcsolatban is figyelemre méltó ötletei támadtak.

E könyvben mégis az általa (és mások által) képviselt szemlélettel kívánok szembeszállni.

TARTALOM

I. A PROBLÉMÁK 9

Nem metségül 11

Pro Crick I

avagy az öröklődés mechanizmusa csodálatos 13

Kontra Crick I/1

avagy a macskanyávogás nincs beleírva a génbe 19

Kontra Crick I/2

avagy miért nem szaporodnak szűznemzéssel a férfiak? 25

Kontra Crick I/3

avagy nincsen kamat tőke nélkül 31

Pro Crick II

avagy a véletlen nem mindenható 35

Kontra Crick II/1

avagy a szabadság nem korlátlan 43

Kontra Crick II/2

avagy konyhakertet Édenkertre cseréljünk? 50

Kontra Crick II/3

avagy nem az élet, a civilizáció a ritka 56

II. A MEGOLDÁSOK 61

1. Nem ártana tudni, mit keresünk 63
2. Cseppfolyós szerkentyűk 71
3. Rend a semmiben 76
4. És ki a konstruktőr? 85
5. Kemotonok 93
6. Az Ősföld kemotonjai 104
7. Az ősszövegek születése 114
8. Célba értünk 129

Irodalom 133

I.
A PROBLÉMÁK

NEM MENTSÉGÜL,

csak a tények rögzítése végett. Ez a könyv vitairat. Vitairat a mai biológia egyoldalú génközpontúsága ellen. Nem a géneket tagadom. Nem is tagadhatom, létezésük tény, a biológia legfontosabb tényei közül való. Nem is tagadhatnám, hiszen akkor hitehagyó lennék. Több mint húsz évvel ezelőtt ugyanis magam írtam az első magyar nyelvű könyvet a molekuláris biológia eredményeiről, a nukleinsavak és fehérjék szerkezetéről, szintéziséről. Az a könyv ugyancsak a Gondolat Kiadó gondozásában jelent meg, *Forradalom az élet kutatásában* címmel. Amikor a kéziraton dolgoztam, a génnek még nem volt polgárjoga Magyarországon: ,,reakciós", ,,áltudományos" fogalomnak számított. Komolyan szorongtam, és nem ok nélkül, nem származik-e bajom a könyvben írottakból, hiszen uralkodó dogmákkal kellett szembeszállnom.

E dogmák alapjai akkor már kétségtelenül inogtak, falaik recsegtek-ropogtak. Mire a könyv megjelent (1966), a falak leomlottak. A génfogalom elfogadottá vált, a nukleinsavak szerkezete bekerült a tankönyvekbe, a DNS-molekula modellje, a híres Watson–Crick-féle kettős spirál hazánkban is közismertté vált. Közismertté és elismertté, ahogy az egész világon. Fényes pályát futott be, s változatlanul teljes pompájában ragyog. Olyannyira, hogy fényétől egyre nehezebb észrevenni az élő rendszerek egyéb, nem kevésbé fontos mechanizmusait. Ma már vakít, maga vált dogmává. A sors úgy hozta, hogy ismét dogma ellen foglaljak állást, de most már a *mindenható gén dogmája* ellen.

Francis Cricknek *Az élet mikéntje* című, szintén a Gondolatnál megjelent könyve csak az ürügyet adta ehhez. Nem a gének ellen akarok küzdeni, nem is Crick ellen. *A másik oldalért szállok síkra,* azért, ami ma árnyékban van. Hogy mi is ez, és miért érdemel figyelmet, arról mesélnek e könyv fejezetei.

PRO CRICK I

avagy az öröklődés mechanizmusa csodálatos

Hadd szóljak néhány szót Crick érdekében, bár egy világhírű, Nobel-díjas tudós aligha szorul erre rá. S nem szorul rá az a tudomány – a molekuláris genetika – sem, amelynek ő rakta le az alapjait James Watsonnal közösen. Mégsem érezném tisztességes eljárásnak, ha csak a másik oldalt mutatnám be.

Másfél évtizeddel ezelőtt a következőket írtam a *Természet Világa* hasábjain: „Kevés olyan tudomány van, amelynek a születésnapját pontosan meg lehetne jelölni. A molekuláris biológia ezek közé tartozik; születése napjának 1953. március 30-át tekinthetjük, amikor James Watson és Francis Crick a vasárnap délutánt velük töltő Elisabethnek, Watson nővérének gépbe diktálták a DNS-modellről alkotott elképzelésüket. Ekkor fogalmazódott meg végleges formában az a szöveg, amely három nap múlva már a *Nature* szerkesztőségében volt, és igen rövid idő alatt napvilágot látott. Ez a fogalmazvány indította el azt a lavinát, amely szinte hónapok alatt megteremtette az új tudományt, a molekuláris biológiát."

Miben állt és miért volt nagy ez a fölfedezés? Hiszen Watson és Crick mindössze egyetlen molekula térszerkezetéről alkottak elképzelést, méghozzá elnagyoltan, hamarjában felvázolva!

Az élő rendszerek kémiájának titkai a századelőn kezdtek feltárulni, az enzimek felfedezésével. Ezeket ekkor még fermentumoknak nevezték, mert tanulmányozásuk az alkoholos erjedés, a fermentáció vizsgálatával indult meg. A vegyészek már értették ekkoriban, hogy milyen mennyiségi összefüggések szerint lesz a $C_6H_{12}O_6$ összetételű szőlőcukorból az alkoholos erjedés során C_2H_6O összetételű alkohol. Két alkoholmolekulában összesen 4 szénatom, 12 hidrogénatom és 2

oxigénatom van. Ha a folyamatban 2 szén-dioxid (CO_2)-molekula is keletkezik – és kimérték, hogy ennyi keletkezik –, akkor a termékekben pontosan annyi szén-, oxigén- és hidrogénatom van, mint a cukor molekulájában. Nyilvánvaló tehát, hogy a cukormolekula atomjai éppen két alkoholmolekula és két szén-dioxid-molekula keletkezéséhez elegendők. Azt azonban sehogyan sem lehetett megérteni, hogy maga a kémiai reakció, azaz a cukormolekula atomjainak átcsoportosulása négy különálló molekulává hogyan, milyen mechanizmus révén megy végbe, hiszen az átalakítás laboratóriumban, a szokásos kémiai eszközökkel sehogyan sem volt lehetséges.

Pasteur mutatta ki, hogy az alkoholos erjedés csakis élőlények, nevezetesen élesztők segítségével hajtható végre. Így ha valaki az alkoholos erjedés folyamatát kezdte vizsgálni, az élet titkát is kutatta egyben. Ezt tette például Buchner, akinek sikerült az átalakítást sejtmentes élesztőkivonattal is megvalósítania, bizonyítva ezzel, hogy a folyamat nem az élesztő élő mivoltához, hanem valamilyen, az élesztősejtben található anyag (fermentum) jelenlétéhez kötött. Ezt az anyagot *zimáz*nak nevezte el. Mintegy négy évtized kellett hozzá, hogy a biokémikusok sokasága kiderítse: nem egy, hanem kilencféle anyagról van szó, mindegyikük fehérje, és a teljes átalakításnak egy-egy részfolyamatát végzik el. Ezeket a fehérjeféleségeket azonban ekkor már *enzim*eknek nevezték.

De mi az, hogy egy puszta anyag „elvégez" valamit, még ha az a valami nem is több, mint egy kémiai átalakítás? Egy munkát elvégezhet egy gép, egy automata vagy egy élőlény, de nem egy molekula. Pedig ezek a különleges enzimmolekulák nagyon is elvégzik az atomok átcsoportosításának munkáját, méghozzá nagyfokú munkamegosztással, azaz mindegyik enzim csak meghatározott kiindulási anyagon tud megfelelő atomátcsoportosítást végrehajtani, és csakis szigorúan meghatározott átcsoportosítást hajt végre.

A kémia már régóta ismer olyan anyagokat, amelyek képesek a kémiai átalakulások sebességét nagymértékben, sokszor rendkívül nagy mértékben növelni. Ezeket katalizátoroknak nevezi. Csakhogy a már korábban megismert katalizátorok sokféle kémiai folyamat sebességét növelik! Sem az átalakí-

tandó molekulát, sem az átalakítás mikéntjét nem válogatják meg. Az enzimek nagyfokú fajlagosságát nem lehetett megmagyarázni. És ugyanígy nem lehetett megmagyarázni azt sem, hogy az időközben megismert ezernyi enzim hogyan viselkedhet ezernyi módon, ha mindegyik *fehérje,* azaz ha mindegyik ugyanabból a húszféle aminosavból épül fel.

Az élet titka, hogy ilyen munkavégző anyagokat tud előállítani. De hányfélét! Mert az is kiderült, hogy ugyanarra a célra minden faj másféle, a fajra jellemző tulajdonságú enzimet készít, sőt fajon belül is vannak eltérések az egyedek fehérjéi között! A ma élő fajok száma önmagában véve is néhány millió: ha minden egyes faj csak ezer különböző enzimmel rendelkezik, az is több milliárd enzimféleséget jelent.

Mi az élő rendszerek trükkje, amivel ezt meg tudják csinálni? Ráadásul a fehérjék tulajdonságai öröklődnek! Azt pedig századunk közepe táján már egyértelműen tudták, hogy az öröklődő tulajdonságok valamilyen módon a sejtmagban található, bizonyos festékekkel különlegesen festődő anyaggal, a *dezoxiribonukleinsav*val (DNS-sel) hozhatók összefüggésbe. De hogyan, amikor a DNS óriásmolekulája mindössze négyféle építőkőből – négyféle monomerből, ún. nukleotidból – épül fel? És egyáltalán, hogyan lehetséges az, hogy az élőlények tulajdonságainak végtelen sorozatát valamilyen kémiailag egységes anyag szabja meg?

Ezek a kérdések a természet beláthatatlan mélységeit érintik. És szerencsés módon – vagy tán törvényszerűen, ki tudná megmondani? – egyszerre kerültek a kutatás reflektorfényébe századunk közepén. Pauling kiderítette, hogy a fehérjék aminosavakból felépülő hosszú polipeptidlánca spirálba tekeredik (α-spirál), mint a csigalépcső. Addig nem ismertek példát arra, hogy egy molekula *spirális szerkezetű* legyen. Később Perutz, majd Kendrew azt kezdték kutatni, hogy az ilyen spiralizált molekularészek – nem spiralizált szakaszok által megszakítva – hogyan tekerednek gombolyaggá, az ugyanis már ismert volt, hogy a fehérjemolekulák, legalábbis az enzimfehérjék, egészben véve gömbszerűek. Sanger a polipeptidláncok aminosavjainak sorrendjét próbálta földeríteni.

Ma már mindannyian Nobel-díjasok, mert megbirkóztak nem kis feladatukkal, és eredményeik nemcsak új tudományágat alapoztak meg – a molekuláris biológiát –, nemcsak a biológiai szemléletet formálták át totálisan, hanem munkájukból nőtt ki az is, amit ma géntechnológiának és modern biotechnikának nevezünk.

Először Linus Pauling kapott Nobel-díjat, a kitüntetés indoklásában az α-spirálszerkezet felismerése is szerepelt. A A többiek még csak a kezdeti, bizonytalan lépéseket tették meg, vagy még azokat sem. Ekkor fordult Pauling érdeklődése a nukleins avak molekulaszerkezete felé. Megpróbálta a nukleinsavláncot is spirálként felfogni. Az általa alkotott modell számos kísérleti mérési eredménnyel megegyezett, de néhány kísérleti adat ellentmondott neki. Mások is próbáltak modelleket alkotni, nem sokkal több sikerrel. Ez idő tájt találkozott egy cambridge-i laboratóriumban két fiatalember: az Amerikából érkezett, víruskutatónak készülő James Watson genetikus, és a nála idősebb, már tudományos tapasztalatokkal rendelkező, fizikus képzettségű Francis Crick. Gyümölcsöző találkozás volt, történetét James Watson meséli el a maga beállításában, *A kettős spirál* című híressé vált, sőt némi botrányt is kavaró, magyarul is megjelent könyvében.

A feladatot megoldották. Modelljük vázlatos volt ugyan, és akkor még nem is volt egzakt módon ellenőrizhető, de egyrészt nem mondott ellent egyetlen fizikai és kémiai mérési adatnak sem, másrészt megoldást kínált a Nagy Titokra: hogyan tárolódhat megszámlálhatatlan mennyiségű információ egy kémiailag definiált anyagban, egy óriásmolekulában, és ezek az információk hogyan másolódhatnak át az utódokba. A megoldás ma már szinte triviálisnak tűnik: bevált a Nobel-díjas fizikus, Schrödinger jóslata, miszerint a gének *aperiodikus kristály*ok. A Watson–Crick-modellben ez úgy jelentkezik, hogy a nukleinsavszálat alkotó nukleotidok szigorú mértani pontossággal követik egymást, mint a kristályrácsban a rácspontok (atomok, ionok vagy molekulák), de az egyes nukleotidféleségek egymásutánja semmiféle szabályos periodicitást nem mutat, aperiodikus. Mindazonáltal szigorúan meghatározott sorrendben követik egymást, mint az értelmes

szövegben a betűk, s ugyanilyen módon tárolják az információkat is.

A következő eredmény Sangeré volt, aki kimutatta, hogy a fehérjék húszféle aminosavjának sorrendjében sincs semmiféle szabályszerű periodicitás, az aminosavsorrend mégis szigorúan meghatározott, megint csak mint a betűk sorrendje a szövegben. Egyszerre érthetővé vált, hogyan épülhet fel ugyanabból a húszféle aminosavból megszámlálhatatlanul sokféle fehérje, hiszen egy húszbetűs ABC-vel is megszámlálhatatlanul sokféle szöveget lehet előállítani. Bebizonyosodott, hogy az enzimek fajspecificitását éppúgy az aminosavsorrend szabja meg, mint a működésbeli specificitásukat. Ám az még mindig nem volt érthető, hogy az aminosavsorrend mi módon szabja meg a fajspecificitást és a működésbeli specificitást.

Ezt a nagy kérdést Kendrew, majd Perutz oldotta meg. Kendrew a *mioglobin* nevű izomfehérje, Perutz pedig a *hemoglobin* nevű vérfehérje láncának a térbeli felgombolyodását határozta meg röntgendiffrakciós módszerrel. Kiderült, hogy e felgombolyodásban sincs semmiféle szabályszerűség, ám annak módja egy adott fehérjeféleség minden egyes molekulája esetében azonos: az aminosavsorrendből következik a felgombolyodás módja. Ez végtelen geometriai változatosság lehetőségét rejti magában; a különböző funkciójú fehérjék különböző alakúak lehetnek.

A kép fő vonalaiban világossá vált: a fehérjemolekulák funkcióját és specificitását geometriai alakjuk (pontosabban: funkciós csoportjaik térhelyzete) szabja meg, ezt pedig az aminosavsorrendjük. Miután az élőlények tulajdonságai alapvetően a bennük zajló kémiai átalakulásoktól függenek, a kémiai átalakulások az enzimek működésétől, az enzimek működése azok térszerkezetétől, térszerkezetük pedig az aminosavak sorrendjétől, nyilvánvaló, hogy a DNS csak úgy hordozhatja az öröklődő tulajdonságokra vonatkozó információkat, ha képes megszabni a fehérjeféleségek aminosavsorrendjét. Hogy valóban képes erre, azt a hatvanas évek kutatásai bizonyították be. A bizonyításban már nagyon sokan vettek részt, mert a mechanizmus roppant bonyolult. Lényege, hogy a DNS-be írt utasítások először átíródnak egy másik nuklein-

savféleségre (ribonukleinsav, azaz RNS), de ez még mindig négybetűs ABC-vel írt szöveg. Ezt a négybetűs szöveget fordítja le aztán a fehérjék húszbetűs ABC-jére egy igen összetett molekuláris gépezet. A hatvanas évek végére az öröklődés folyamata, valamint az öröklődő információkban rejlő utasítások végrehajtásának mechanizmusa részleteiben is tisztázódott, legalábbis a baktériumok szintjén. Megkezdődhetett a szintetizáló tevékenység, azaz előre kiválasztott tulajdonságú gének és enzimek előállítása élőlénytől független, kémiai szintézissel, majd meghatározott gének bevitele élőlényekbe, s ilyen módon az örökletes tulajdonságok tudatos, mesterséges megváltoztatása. Hát nem csodálnivaló eredmények ezek, akár csak így, madártávlatból felvillantva is?

Napjainkban az ipari hasznosításon fáradoznak világszerte. A *biotechnológia* a világ számos országában, de minden fejlett országban kiemelt kormányprogram, dollár-, font-, frank-, yen-, rubel- és forintmilliárdok áramlanak a területre, kutatók milliói derítik fel az egyre apróbb részleteket vagy fáradoznak a hasznosításon, emberek milliárdjai élvezik kutatásaik gyümölcsét, közvetlenül – gyógyszerként, vagy közvetetten – sokféle módon.

Mindezt egy molekulaszerkezeti modell indította útjára, a Watson és Crick alkotta kettős spriál modell. Lehet ezek után nem tisztelnem Cricket?

avagy a macskanyávogás nincs beleírva a génbe

Hogy a DNS hordozza az örökletes tulajdonságokat, az ma már kétségtelenül bizonyított tény. Az első bizonyítékot Avery közölte még 1942-ben: egy baktérium DNS-ét egy másik fajhoz tartozó baktériumba juttatva szemmel látható tulajdonságokat tudott öröklődően átvinni abba. Azóta – talán nem túlzás ekkora számot mondani – a közvetlen és közvetett bizonyító kísérletek milliói születtek meg a legkülönbözőbb megközelítések alapján. Ha a sejtek DNS-állományában valami módon változást idézünk elő (akár kémiai anyagok révén, akár sugárzással, akár mechanikai úton, akár pedig idegen DNS bevitelével vagy netán egy DNS-darab eltávolításával), akkor örökletesen megváltoznak az élőlény tulajdonságai. Ezt nemcsak baktériumokról, hanem az élőlények teljes skálájáról minden kétséget kizáróan megállapították.

Mesterséges géneket is előállítottak már szintetikusan, kémiai módszerekkel, sőt baktériumokba beépítve olyan anyagok termelésére tudják késztetni ezeket, amilyeneket az érintetlen természetben például csak az emberi test bizonyos sejtjei tudnak előállítani (inzulin, növekedési hormonok stb.). S mindezt már ipari méretekben hasznosítják!

De mi szól itt Crick ellen? Semmi. Hiszen megmondtam, nem Crick ellen akarok beszélni, hanem a másik oldal védelmében. De ha ezt teszem, egyben szólok az ez oldali szemlélet egyeduralma ellen is.

A gondolatsor elején el kell tűnődnünk azon, mit is jelent a *tulajdonság* szó az élőlények vonatkozásában. Kezdjük felülről. Az, hogy valaki milyen nyelven beszél, milyen vallású, milyen világnézetű, az illetőnek tulajdonsága ugyan, de nem biológiai, hanem társadalmi meghatározottságú tulajdonsága.

Hogy a gyermekei ugyanazt a nyelvet fogják beszélni, ugyanabban hisznek vagy nem hisznek, ugyanazzal a szemlélettel nézik a világot, az nem a biológiai öröklődés műve, hanem a társadalmi környezeté, amelyben élnek. Ezek szerzett tulajdonságok, csakúgy mint a tudás. Szerzett tulajdonságok a test betegség vagy baleset következtében létrejött változásai is, ezeknek sincs semmi közük a biológiai öröklődéshez.

A madarak énekével már nem ilyen egyszerű a dolgunk. Vannak olyan madarak (például a gerlék), amelyek biológiai úton öröklött „dallamokat" fújnak, és akkor is azokat fújják, ha soha nem hallották fajtársukat; s vannak olyanok, amelyek csak az éneklés képességét öröklik biológiai úton, de dallamaikat szüleiktől és más fajtársaiktól tanulják. A kutyaugatás is öröklődő tulajdonság, egy kutya akkor is fog ugatni, ha szüleitől és más kutyáktól elszakítva nevelik fel.

A farkaskutyák, ha elszabadulnak, elvadulva ugyanolyan módon űzik a vadat az erdőben, mint a farkasok, noha nemcsak ők nem tanulhatták ezt senkitől, de őseik hosszú sora sem. Ez a tulajdonságuk tehát generációkon át rejtetten öröklődött, biológiai úton. Ugyanezt tapasztaljuk a juhászkutyáknál is. A világhírű magyar juhászkutya, a puli, akkor is képes terelni a nyájat, ha nemcsak ő, de szülei se láttak soha birkát.

Az élőlények alakja is jellemző, biológiailag öröklődő tulajdonság. Az, hogy kezünkön, lábunkon öt ujjunk van, fajunkra és rokonságunkra jellemző, noha nincs két egyforma emberi kéz. A fák vagy a falevelek formája ugyancsak fajra jellemző, és öröklődik. A tölgyfa levelét vagy a juharlevelet, amely a kanadai lobogót díszíti, bárki egy pillantás alatt felismeri, noha sem két egyforma tölgyfalevél, sem két egyforma juharlevél nem létezik.

Ha a soksejtű élőlényekről áttérünk az egysejtűekre, az alakot még mindig meghatározó tulajdonságnak találjuk. Vannak ugyan olyan egysejtűek, amelyekről a szakember sem tudja egyetlen pillantással (persze mikroszkópon keresztüli pillantással) eldönteni, melyik fajhoz tartoznak, de az azért az alakról minden kétséget kizáróan megállapítható, hogy az illető egysejtű melyik fajcsoporthoz tartozik. A tudomány ezeket a fajcsoportokat nemeknek *(genus)* nevezi, bár természetesen

semmi közük sincs a szexuális értelemben vett nemekhez. És ha már itt tartunk, hadd mondjuk el, hogy a szexuális értelemben vett nem, vagyis hogy hím vagy nőnemű-e valaki vagy valami, az ugyancsak genetikailag meghatározott, olyannyira, hogy már a genetikai anyag, a kromoszómák alakjából megállapítható a szexuális hovatartozás (sokszor biztosabban is, mint a külső szexuális jegyekből).

A baktériumok esetében a sejtek alakja nem meghatározó. A baktériumsejt mintegy tízezerszer kisebb tömegű, mint az egysejtűek sejtje (vagy mint például az ember sejtjei), és geometriai strukturáltsága is összehasonlíthatatlanul primitívebb, ha egyáltalán van geometriai strukturáltsága. Nincs a világnak egyetlen mikrobiológusa, aki nem egyetlen pillantás, de akár többórás mikroszkópos vizsgálat után meg tudná mondani, hogy a látott baktériumsejt melyik fajhoz tartozik. A baktériumfajokat sejtszinten már csak kémiai tulajdonságaik alapján lehet elkülöníteni egymástól, részben azon az alapon, hogy milyen festékeket tudnak vegyi úton megkötni, részben azon, hogy milyen kémiai vegyületeket képesek tápanyagul felhasználni, illetve anyagcseretermékként kibocsátani. Az életnek ezen a legalacsonyabb fokán már a kémiai tulajdonságok az elkülönítés döntő kritériumai. Ezek a kémiai tulajdonságok természetesen genetikailag meghatározottak, azaz biológiai úton öröklődnek.

És most fordítsunk 180°-ot a gondolatmenetünkön, induljunk el pontosan az ellenkező irányból. A gének oldaláról.

Tudományosan bizonyított tény: a gének meghatározzák az öröklődő tulajdonságokat. A tudományt napjainkban uraló dogma viszont: *csak* a gének határozzák meg az öröklődő tulajdonságokat.

A gén nem más, mint egy DNS-darab, a DNS-molekulának egy olyan darabja, amelyben az alkatrészek (nukleotidok) sorrendje egyetlen funkcióra vonatkozó információt zár magába. Érthetőbben: olyan DNS-darab, amelyben a nukleotid-„betűk" teljes mondatot alkotnak. (Egy-egy ilyen mondat rendszerint több részre darabolva található a kromoszómákban, ez azonban gondolatmenetünkön mit sem változtat.)

Mire képes egy ilyen DNS-darab, azaz egy gén? Két dologra. Egyrészt képes a sejtosztódás során mintaként szolgálni az új DNS (új gén) képződéséhez, azaz a rajta mint mintán szintetizálódó új DNS-nek ugyanaz a nukleotidsorrendje (betűsorrendje), mint az eredeti DNS-é, vagyis a mondat értelme a mintaként szolgáló DNS-ben és a rajta szintetizálódó új DNS-molekulában meg fog egyezni. Ami számunkra ennél érdekesebb, az a „másrészt", vagyis az, hogy az adott DNS-szakasz nemcsak új DNS-, hanem új RNS-molekula szintéziséhez is mintaként szolgálhat, és ez esetben is megszabja a rajta szintetizálódó nukleinsav nukleotidszekvenciáját, azaz betűsorrendjét. Az RNS betűiből ugyanaz a mondat formálódik ki, mint a mintaként szolgáló DNS-darab betűiből. A tudomány ezt az RNS-t messenger-RNS-nek (mRNS), magyarul hírvivő-RNS-nek nevezi.

Akkor hát mire képes a hírvivő-RNS? Ő már csak egyetlen dologra, arra, hogy a fehérjeszintetizáló apparátusban mint betűsorrendminta meghatározza a készülő fehérjemolekulák aminosavsorrendjét. A fehérjeszintetizáló apparátus ugyanis, mint említettük, az mRNS négyféle nukleotidbetűjével írt „szöveget" lefordítja a fehérjemolekulák húszféle aminosavbetűjével írt „szövegre".

Ön, kedves olvasóm, most már maga teszi fel a kérdést: és mit tud az aminosavsorrend, a fehérjékbe írt szöveg? A válasz, ha röviden is, de már az előző fejezetben megadatott: meghatározza a fehérjelánc tekeredési módját, azaz térbeli, geometriai szerkezetét, ún. harmadlagos struktúráját. Ettől a tekeredési módtól, ettől a harmadlagos szerkezettől függ, hogy az adott fehérje enzim lesz-e, azaz valamely elemi kémiai reakciólépést fog-e milliószorosan-tízmilliószorosan felgyorsítani, és ha igen, melyiket; vagy mondjuk, olyan molekula, amely bizonyos DNS-szakaszok lezárását vagy kinyitását képes végezni, ezáltal szabályozva, hogy mely génekről készülhetnek az adott időpontban enzimek, és melyekről nem.

Eddig tart a gének tudása, és nem tovább. Az enzimeken keresztül meg tudják határozni, hogy milyen kémiai reakciók mehetnek végbe a szervezetben, a szabályozó fehérjéken ke-

resztül pedig, hogy azok mikor mehetnek végbe. Ez a baktériumok esetében többnyire megmagyarázhatja a tulajdonságok megjelenését. Ám önmagában már nem elegendő az egysejtűek, és végképp nem a soksejtűek tulajdonságainak leírásához.

Mert nincs olyan gén, amelyikbe az lenne beleírva, hogy az orrom sasorr vagy pisze, amelyikbe az lenne beleírva, hogy a kutyám képes-e állóra csaholni a vaddisznót vadászat közben, vagy nem. Pedig ezek is öröklődő tulajdonságok, és egy-egy gén megléte vagy hiánya ezeket is befolyásolja. Nincs olyan gén, amelyikbe a kutya ugatása vagy a macskanyávogás lenne „belekottázva". Pedig ezek is öröklődő tulajdonságok.

Azt persze a genetikusok is észrevették, hogy az öröklődés nem mindig olyan egyszerű, mint amilyennek a génfogalom ismeretében első pillantásra tűnt. Rájöttek, hogy vannak olyan öröklődő tulajdonságok, amelyek nem egy génbe vannak beírva, vagy egyáltalán semmilyen génbe sincsenek közvetlenül beírva, hanem különböző gének által vezérelt folyamatok *kölcsönhatásai* révén állnak elő. El is nevezték ezeket a tulajdonságokat „sok kis génes" tulajdonságoknak. Ez a kifejezés azonban félrevezető. Nemcsak azért, mert nincsenek kis gének meg nagy gének, hanem elsősorban azért, mert itt már nem a gének hatnak egymásra, hanem az általuk vezérelt folyamatok, s a tulajdonság ezen folyamatok interferenciája révén alakul ki. Ebből nyilvánvalóan következik, hogy ha ezen tulajdonságok kialakulását akarjuk megérteni, akkor már nem a géneket kell vizsgálnunk, hanem a kölcsönható folyamatokat, illetve a kölcsönhatások természetét. Ez viszont egészen más vizsgálati módszereket és más kutatói szemléletet kíván, mint amivel a mai genetika dolgozik.

Különösen így van ez a soksejtűek esetében, ahol már nemcsak a gének által vezérelt folyamatok közvetlen egymásra hatása szabja meg az öröklődő tulajdonságok nagy részének a megjelenését, de az ezek által meghatározott tulajdonságú sejtek – mint egységek – közötti kölcsönhatások is. Itt tehát a tulajdonságok nagy részének megjelenése többszörösen is áttételes: a gének szabják meg a sejtekben folyó kémiai reakciókat, ezek kölcsönhatása szabja meg másodlagosan a

nem egygénes öröklődésű sejtes tulajdonságokat, majd az így kialakult sejtek kölcsönhatásainak eredményeképpen jönnek létre a soksejtű szervezet makroszkopikusan észlelhető öröklődő tulajdonságai, mint például az egyedfejlődés jellegzetes folyamatai, az élőlények alaki jegyei, mozgások és egyéb tevékenységek végrehajtásának képessége és alighanem a madarak öröklődő „dallamai" vagy az öröklődő viselkedési formák is.

Ezek létrejötte, kialakulási mechanizmusa sem érthető meg *csupán* a gének tanulmányozásával, ehhez azoknak az igen bonyolult dinamikus rendszereknek az *organizációs törvény*eit is ismernünk kellene, amelyek a sejteken belül működnek, illetve a soksejtűeknél a sokféle sejt kölcsönhatásai révén alakulnak ki.

Persze ha egy gén megváltozik, vele megváltozik a sejt egyik kémiai reakciója vagy szabályozó folyamata is, ennek következtében módosulnak a reakciók közötti kölcsönhatások, így a sejtnek e kölcsönhatásokból eredő tulajdonságai is. A megváltozott tulajdonságú sejtek a soksejtű szervezet többi sejtjével kialakítható kölcsönhatásokat befolyásolják, s e láncolaton keresztül rendkívül változatos tulajdonságmódosulások jöhetnek létre. De hogy miképpen, az ma még teljesen ismeretlen, nem vagy alig vizsgálják. A változások mibenléte előre nem jósolható meg. Senki sem tudja megmondani, hogy a Contergan-bébik miért kar nélkül születtek, és miért nem, mondjuk, négy karral vagy kétszer akkora karral. Az öröklődést igazán akkor fogjuk érteni, ha ezeket a másodlagos és harmadlagos kölcsönhatási rendszereket is egzakt módon felderítjük.

avagy miért nem szaporodnak szűznemzéssel a férfiak?

A nagy angol orvos és természetbúvár, William Harvey mondta ki jó három és fél évszázaddal ezelőtt, hogy „minden élő petéből lesz". Ezt ma már korántsem tartjuk szükségszerűnek, már csak azért sem, mert az élőlények egy része, sőt talán a nagyobbik része ivartalanul vagy ivartalanul *is* szaporodik. A tételt azonban a gerincesekre, különösen pedig az emlősökre – legalábbis természetes viszonyok között – általános érvényűnek fogadhatjuk el.

Emlőspetét – azaz petesejtet – csak 1827-ben látott először az orosz Paer a kutya petefészkének vizsgálata közben, s ő fedezte fel az emberi petesejtet is. A spermiumokat viszont egy leideni diák már másfél évszázaddal korábban fölfedezte, igaz, ezeket sokáig az emberben élősködő állatkáknak tartották. Azt a tényt pedig, amit ma már minden kisiskolás tud, hogy az egyed fejlődése a petesejt és a spermiumok egyesülésével – az ún. megtermékenyítéssel – veszi kezdetét, a tudomány alig több mint egy évszázada ismeri. Rudolf Albert von Kölliker svájci kutató mutatta ki a múlt század közepén, hogy a pete is, a spermium is egyedi sejtek, de a kettő egyesülésével keletkezett „megtermékenyített" petesejt, az ún. zigóta is csak egyetlen sejt. Kölliker az 1861-ben írt embriológiai kézikönyvében fejti ki részletesen, hogy minden soksejtű szervezet egyetlen sejtből fejlődik ki sorozatos osztódások révén.

Mint annyi minden a biológiában, ez sem maradéktalanul igaz. Létezik ugyanis *szűznemzés* is, különösen az alacsonyabbrendűek között. A kerekesférgek csoportjában például vannak olyan fajok, amelyek egyedei között hímet eddig nem is találtak, és sok alsóbbrendű rákfaj is elsősorban szűznem-

zéssel szaporodik. A halak és az elevenszülő békák esetében szintén találkozunk rendszeres szűznemzéssel.

Igen érdekes a társas rovarok – méhek, darazsak, dongóméhek, hangyák – parthenogenezise, azaz szűznemzéses szaporodása. A háziméh nősténye, a méhanya csak a nászrepülés alkalmával, egyetlenegyszer párzik, de a felvett ondót évekig is megőrzi ondótáskájában, és szabályosan gazdálkodik vele: peterakáskor a peték egy részére nem bocsát ondót az ondótáskájából, ezek majd szűznemzéssel indulnak szaporodásnak. Belőlük lesznek a herék, azaz a hímek. A peték másik részére ondót bocsát az ondótáskából, ezek megtermékenyülnek. A megtermékenyült petékből nőivarú egyedek fejlődnek ki: a táplálás módjától függően vagy méhanya, vagy csökevényes ivarszervű dolgozók.

A tudomány persze nem elégszik meg azzal, hogy megfigyeli, leírja a jelenségeket: kísérletesen is létre akarja hozni azokat. Számos állatfaj petéjét sikerült különböző fizikai vagy kémiai behatásokkal parthenogenetikus úton, azaz megtermékenyítés nélkül fejlődésre bírni. Ezek között nemcsak alacsonyabbrendű állatok szerepelnek, nemcsak rovarok, tengeri sünök, halak, békák, gőték, hanem emlősállatok, például nyulak is. Sőt növények esetében az *androgenezis* is ismeretes, amikor a petesejt helyett a hímivarsejtnek megfelelő pollenből nevelődik fel a teljes növény, ahogy az a közismert szamócánál is előfordul természetes körülmények között is. Spermiumot azonban még sohasem sikerült fejlődésre bírni. Vajon miért? Miért nem szaporodnak a férfiak pusztán spermiumaik révén, szűznemzéssel?

A kérdés ebben a formában persze „költői", s korántsem tudományos, hiszen a férfiaknak nincs is olyan szervük, amely a spermiumból fejlődő embrió nevelését lehetővé tenné, ha a spermiumból egyáltalán lehetne embriót nevelni. Valamit azonban mégis lehet tenni, a tudomány ezt a módszert *merogóniá*nak nevezi. A merogónia nem más, mint hogy eltávolítva a petesejt magját s helyébe egy spermium maganyagát juttatva a petesejtet fejlődésre bírjuk: teljes egyed fejlődik ki belőle. A legeredményesebb kísérletet e téren selyemhernyókkal végezték.

A kedves olvasó, ha figyelmesen olvasta az eddigieket, néhány ellentmondást láthatott körvonalazódni. Mindenekelőtt említettük, hogy Kölliker megállapítása szerint a pete is egyedi sejt, a spermium is az, s az egyesülésükből keletkezett zigóta is *egyetlen* sejt. Hogy ez hogyan lehetséges, arra akkor derült fény, amikor elkezdték a sejtosztódás folyamán végbemenő események részleteit mikroszkóppal, majd genetikai módszerekkel is tanulmányozni. Testi sejtjeinkben ugyanis a genetikai információk két teljes példányban vannak meg. Ám azt is kimutatták, hogy a szaporítósejtekben – így a petesejtben és a spermiumban is – csak egy-egy példány található. A megtermékenyüléskor a két egypéldányos (haploid) ivarsejtből egy kétpéldányos (diploid) sejt, a zigóta keletkezik. Ez az ellentmondás tehát érthető lenne.

Az egypéldányos (haploid) sejtben is benne van minden, az élethez szükséges genetikai információ. Vannak is olyan élőlények, amelyeknél a szaporodás során haploid és diploid sejtek generációi váltják egymást. Az élethez az öröklődő információkból egyetlen teljes kópia is elegendő! Az egészséges petesejt pedig minden szükséges genetikai információt tartalmaz egy példányban, máskülönben a parthenogenezis, a szűznemzéssel való szaporodás lehetetlen lenne. Akkor viszont miért nem indulhat szaporodásnak a spermium? Talán nincs meg benne minden, az élethez szükséges információ?

Ennek ellentmond az előzőekben emlegetett merogónia jelensége, az, hogy ha a petesejt magját eltávolítjuk, és helyébe a spermium maganyagát juttatjuk, a petesejt fejlődésnek indulhat. A mageltávolítással az öröklődő információkat távolítottuk el a petesejtből, a spermium maganyagával öröklődő információkat vittünk bele, méghozzá más, a spermiumból származó öröklődő információkat. Ha a spermiumban nem lenne meg az élethez szükséges teljes információkészlet egy példányban, nem indulhatna fejlődésnek az a petesejt, amelynek magját a spermium maganyagával helyettesítettük! Az ellentmondás feloldása a spermiumok „érési" folyamatában rejlik. A herében keletkező spermiumok ugyanis még valódi (bár haploid) sejtek, citoplazmával, sejtalkatrészekkel. Vándorlásuk során, főképp a mellékherében, igen nagy átalakulá-

son mennek keresztül, amelynek legfőbb jellemzője, hogy eltűnik belőlük a citoplazma! Az élethez, az osztódáshoz, növekedéshez, szaporodáshoz nem elegendő önmagában a maganyag, még akkor sem, ha az „összes" genetikai információt tartalmazza. (Hogy az „összes"-t miért tettük idézőjelbe, nemsokára kiderül.) *Az élethez a citoplazma is szükséges.* És fordítva: *a citoplazma sem képes az életre önmagában,* ahhoz a maganyagra is szükség van! Pollenből azért fejlődhet olykor androgenezissel növény, mert a pollen érése során a citoplazma nem tűnik el teljesen.

Van tehát valami, vagy vannak valamik, amik nem a sejtmag, hanem a citoplazma révén adódnak át utódról utódra. Csak DNS-ből nem lehet életet kicsíráztatni. Sőt nem lehet DNS + RNS-ből sem, hiszen a sejtmag RNS-t is tartalmaz. És nem lehet DNS + RNS + enzimfehérjékből sem, ugyanis a sejtmagban enzimek is találhatók sok egyéb mellett. De valami vagy valamik hiányoznak, amik a citoplazmában viszont jelen vannak. Sőt nemcsak jelen vannak, de szaporodnak is, hiszen ha nem szaporodnának, sejtosztódáskor csak az eredeti mennyiség fele jutna belőlük az utódsejtekbe, a második generációba negyede, a harmadikba nyolcada és így tovább, amíg csak teljesen el nem fogynának.

Biológiában jártasabb olvasóimnak, legalábbis a kevésbé fiataloknak, bizonyára rémlik, hogy zajlott már a biológiában vita a citoplazmatikus öröklődésről. Zajlott bizony, két fordulóban is. Az első sajnos nem volt túl dicsőséges a tudomány számára, ezt a liszenkóizmus kényszerítette ki, amely a gének létét és szerepét is tagadta, mondván, hogy a szervezet egésze hordozza az információkat, és az élő szervezetekben nincs semmiféle kitüntetett tulajdonsághordozó, semmiféle gén. Ez a vita többnyire nem tudományos, hanem hatalmi érvekkel folyt. Sajnos nem egy embernek került az életébe, karrierjébe, hogy kitartott a tudományos igazság mellett. Erre utaltam a könyv bevezetőjében.

A második forduló, amely főként a hatvanas években zajlott, valódi tudományos vita volt. Egzakt tudományos módszerekkel bizonyítani lehetett, hogy az öröklődő tulajdonságok egy része valóban nem a sejtmag DNS-ében van kódolva.

A részletes kísérletes nyomozás végül is minden ilyen tulajdonság esetében valamilyen sejtszervecskéhez, többnyire a sejtlégzést végző mitokondriumokhoz vagy a fotoszintézist végző kloroplasztiszokhoz vezetett. A további kutatások viszont feltárták: e sejtszervecskéknek saját „maganyaguk", azaz saját DNS-ük van, s a rájuk magukra vonatkozó öröklődő információk egy részét ez a DNS kódolja. A tudomány tehát a „citoplazmatikus" öröklődés terén is a Watson—Crick-féle DNS-modellhez és DNS-replikációs mechanizmushoz jutott vissza.

A kör bezárult, a genetikusok megnyugodtak, hogy az öröklődést az élővilágban egyetlen szerkezet közvetíti. És ezen a tényen valóban nem változtat az, hogy egyes vírusok nem DNS-t, hanem RNS-t használnak az öröklődő információk tárolására, hiszen a kétféle nukleinsavnak nemcsak a felépítése, térszerkezete, hanem replikációja is teljesen analóg, így elvileg semmi újat nem jelent az öröklődő információk RNS-ben való kódolása. Így hát a genetikusok a „citoplazmatikus öröklődés" kérdését alapjaiban lezártnak tekintik. Igazuk is van, hiszen *a genetika által kutatott* minden öröklődő tulajdonságot sikerült a nukleinsavakban kódolt öröklődő információkra visszavezetni. Miért kételkednének?

E tökéletesen megalapozottnak látszó hiedelem mögött mégis van egy „de". A genetikusok valószínűleg teljesen egységesen felháborodnak majd – legalábbis az első pillanatban –, ha azt állítom, hogy tudományuk, az örökléstan, amióta csak egzakt tudománynak számít, soha nem magukat az öröklődő tulajdonságokat vizsgálta! Hát akkor mit? Az öröklődő tulajdonságok *változásait!* Már maga Mendel, a modern örökléstan megalapozója is a keresztezések során megjelenő változatok gyakoriságából vonta le törvényeit; Galton a változatok statisztikáját állította fel; Hugo de Vries a változatok hirtelen megjelenésére (mutáció) hívta fel a figyelmet; Morgan a változó tulajdonságok egymással való kapcsolódására alapozta kutatásait; Watson és Crick az öröklődő tulajdonságok kódolásának és az öröklődő változásoknak a molekuláris alapmechanizmusát tárták fel. De *ha vannak – és* meg fogjuk mutatni, hogy *vannak – olyan örökletes tulajdonságok, ame-*

lyek sem kromoszóma-, sem génmutációkkal *nem változtathatók,* amelyek a szokásos (közel rokon fajok közötti) keresztezésekkel nem variálhatók, akkor azokkal *a genetika* addig nemcsak nem foglalkozott, de *észre sem vette azokat!* Pedig a változtatható örökletes tulajdonságok csak az élővilág változatossága szempontjából lényegesek, az élet lényegét viszont a „nem változtatható" örökletes tulajdonságok hordozzák! A „változtatható" és „nem változtatható" kifejezéseket azért tettük idézőjelbe, mert valójában a „nem változtatható" tulajdonságok is megváltozhatnak, csak korántsem olyan egyszerűen, s korántsem olyan sokirányúan, mint azok, amelyeket a genetika vizsgál.

A hévforrásokban tenyésző kékalgák, a sarkvidéki zuzmók, a tengerben lebegő medúza, a fáról leső hiúz vagy a több ezer éves cédrus hordoznak közös, évmilliárdok óta változatlan tulajdonságokat. Ezeket szoktuk azzal a szóval összefoglalni, hogy ők mind: élnek. Hogy mi módon élnek, az a DNS-ben van kódolva, és változtatható. De hogy éljenek egyáltalán, az ahhoz szükséges, mégpedig szintén öröklődő tulajdonságokat részben a citoplazma oldata hordozza: nem kitüntetett makromolekulák, hanem a rendszer maga. Ezért nem mutábilisak.

avagy nincsen kamat tőke nélkül

Az első fejezetet az alkoholos erjedés felemlítésével kezdtük, mondván: Buchner bebizonyította, hogy nemcsak az élesztő, hanem az élesztőből készült sejtmentes kivonat is képes a cukrot alkohollá és szén-dioxiddá alakítani, mégpedig azért, mert azok a speciális anyagok – az enzimek –, amelyek az átalakulás egy-egy lépését katalizálják, a sejtmentes enzimkivonatban is működőképes formában vannak jelen. Századunk elején meg is indult ezeknek a kutatása. Csakhogy nem lehetett az erjedés enzimeit kutatni anélkül, hogy fel ne tárták volna magát az átalakulási folyamatot, vagyis azt, hogy milyen átalakulások sorozatán kell a cukormolekulának keresztülmennie, mígnem végül két alkohol- és két szén-dioxid-molekula lesz belőle.

A folyamat teljes bonyolultságában századunk harmincas éveire tisztázódott. Gyönyörű kémiai folyamatsor ez, valóságos futószalag, ahol az átalakítandó cukormolekula enzimről enzimre vándorol, s mindegyik enzim végez rajta valami kis átalakítást: az egyik hozzákapcsol valamit, a másik egy atomját más helyre rakja, ismét másik kettéhasítja stb., s végeredményben az eredetileg hatszénatomos cukormolekulából kétszénatomos alkoholmolekula lesz. Közben két széndioxid-molekulát is csinálnak belőle az enzimek, mintegy melléktermékként.

Bármennyire gyönyörű ez a kémiai műveletsor, attól azért tartózkodunk, hogy olvasóinkkal a részletek gyönyörűségét is megosszuk. De annyit el kell mondanunk, hogy az enzimek sokkal rafináltabb utat „választottak" az átalakításra, semhogy nekiesnének a hatszénatomos cukormolekulának, s szétvágnák két kétszénatomos molekulává (mint amilyen az alko-

holmolekula) és két egyszénatomossá (mint a szén-dioxid). Ehelyett azzal kezdik a műveletsort, hogy először a cukormolekula egyik, majd a másik végére egy-egy foszfátcsoportot akasztanak.

Ez a művelet energiaigényes. Nem lehet a vízben oldott foszfátokat csak úgy egyszerűen a cukormolekulákhoz kötni, a foszfátot először „energiadús" formába kell hozni, egy olyan molekuláris „szerkentyűhöz" kapcsolni, amely mintegy felhúzott állapotban van, és képes a foszfátot spontán a cukormolekulához szegecselni (a megfelelő enzim segítségével). Persze közben elveszti az energiáját. A tudomány ezt a „felhúzott állapotú" molekuláris szerkentyűt adenozintrifoszfátnak nevezi, de nem muszáj ezt a bonyolult nevet megjegyeznünk, mindenki rövidítve emlegeti, ATP néven. A szervezet számára az ATP-előállítás igen költséges, a sejtek a tápanyag energiájának nagy részét ATP-előállításra fordítják. Az ATP ugyanis mindenfajta élőlény általános energiahordozó vegyülete, így az anyagcsere kémiai reakcióhálózatainak azon lépéseihez, ahol energiabefektetésre van szükség, az élő szervezet energiaforrásként többnyire az ATP-t használja.

Miért jó az, hogy a sejt ahelyett, hogy egyszerűen felhasogatná a cukormolekulákat, először költséges módon, mintegy tőkét fektetve beléjük, foszfátcsoportokkal fölcicomázza azokat? Azért, mert ily módon nyílik lehetősége arra, hogy a cukormolekulákon az előbb említett rafinált átalakítássorozatot hajtsa végre az egyszerű hasogatás helyett. Ezen átalakítássorozat segítségével ugyanis kamatostul kapja vissza a tőkéjét: az átalakítás során ATP is termelődik, mégpedig pont kétszer annyi, mint amennyit fel kellett használni. Ám tőkebefektetés nélkül nincs kamat; hiába van benne egy lombikban minden enzim, amely az alkoholos erjedéshez szükséges, hiába van ott a cukor meg az egyéb segédanyagok, ATP nélkül e folyamat meg sem indul. A befektetett ATP viszont duplán megtérül: minden cukormolekula bomlása során 4 ATP-molekula keletkezik a befektetett 2 ATP-molekula után.

A tudomány az ilyen „kamatos kamattal" működő kémiai folyamatokat autokatalitikus reakcióknak vagy *autokatalitikus reakciórendszer*eknek nevezi. Nem az ATP-képződés az

egyetlen autokatalitikus folyamat, sőt a biokémiakönyvek észre sem veszik, meg sem említik, hogy az ATP az alkoholos erjedés során (és még sok más folyamatban) autokatalitikusan keletkezik, noha azt természetesen tárgyalják, hogy a reakció során „többlet-ATP" keletkezik.

Mi kell ahhoz, hogy egy autokatalitikus reakciósorozat a sejtben végbemenjen? Mindenekelőtt kell a nyersanyag, a mi példánk esetében a cukor. Azután kellenek az enzimek. Az enzimekre vonatkozó információk tárolódnak a nukleinsavakban, ezek változhatnak fajonként vagy akár azonos faj különböző egyedei között is. *És szükség van az autokatalizátorra magára,* ez a mi esetünkben az ATP. *Nemcsak az azt szintetizáló enzimekre vonatkozó információra, magára a kész autokatalizátorra is szükség van!* Enélkül a folyamat meg sem indul! A genetikai információk jelentik a tudást, amivel a tőkét kamatoztatni lehet. De az autokatalizátorok jelentik a tőkét, ami kamatoztatható! Ahogy tőke nélkül nincs kamat, úgy autokatalizátor nélkül sem nőhet az élőlény, bármennyi genetikai információ legyen is benne!

Szinte hallom biológus-biokémikus olvasóim felháborodását: de hiszen a sejteken belül ATP nemcsak a cukrok lebontásánál keletkezik, hanem számos más folyamatban is! Az igaz. Az élő sejt metabolizmusa nem más, mint kémiai körfolyamatok és autokatalitikus körfolyamatok rendkívül bonyolult rendszere. Sajnos mind ez ideig még egyetlen sejtnek sem tárták fel a teljes metabolikus hálózatát, így a tudomány még egyetlen élő sejtről sem tudja minden részletre kiterjedően, hogy benne mi miből keletkezik. De azt tudjuk, hogy e metabolikus reakcióhálózat egésze autokatalitikus módon viselkedik. Ahhoz tehát, hogy egy ilyen metabolikus hálózat megduplázódjon, nem elegendő az összes szükséges öröklődő információnak jelen lennie, hanem jelen kell lenniök a hálózat kis molekulasúlyú anyagainak is, vagy legalábbis azok egy részének. A spermiumból ezek hiányoznak. Megvan benne a tudás a tőke kamatoztatásához, de hiányzik a tőkéje, azaz hiányoznak belőle azok az anyagok, amiket a tudás segítségével meg lehetne sokszorozni.

A petesejt a tőkével is rendelkezik. A megtermékenyítés nyomán a kétféle tudás közösen kamatozik, így indul a petesejt fejlődésnek. Szűznemzéskor csak a saját, az anyától származó tudás. Mint láttuk, ez is elég lehet a citoplazma által hordozott tőke kamatoztatásához. A merogónia esetében, vagyis amikor a petesejt magját eltávolítják és a spermium magjával helyettesítik, az anyasejt tőkéjét a hímivarsejt magjába zárt tudás kamatoztatja.

Az élethez nem elég a tudást örökölni, a tőkét, a citoplazma anyagait is örökölni kell. A tudás az igazán változékony, de a tőkének sem kell mindig egyformának lennie. A genetika a „tudás" változásával és öröklésével foglalkozik. Ezen a szemüvegen keresztül nézi a világot Francis Crick is. A „tőkét", annak öröklődését, annak örökletes változásait ma senki nem kutatja, legalábbis ilyen szempontból nem. Pedig enélkül sem az élet lényege, sem a keletkezése meg nem érthető.

PRO CRICK II

avagy a véletlen nem mindenható

Alighogy bebizonyosodott, hogy az öröklődő információk nem mások, mint négyféle betűvel – a négy nukleotiddal – a DNS-molekulába írt szövegek, azonnal felmerült a kérdés, hogyan keletkezett az első ilyen szöveg. Mert a Watson–Crick-modell alapján egyszerűen meg lehetett magyarázni, hogy az öröklődő információk hogyan másolódnak át utódról utódra, még azt is, hogyan változhatnak meg, hogyan fejlődhettek az evolúció során. Az eredet kérdése azonban titok maradt.

A probléma nagyságát a következő hasonlattal lehetne érzékeltetni. Ha leültetnénk egy vak embert az írógép elé, aki a betűk helyét az írógépen nem ismeri, és megbíznánk azzal, hogy ütögesse összevissza a billentyűket, az illető nyilvánvalóan teljesen értelmetlen „szöveget" produkálna az írógép papírján. Ha elég soká folytatná a gépelést, mondjuk, egy napon keresztül, bizonyára akadna ebben a szövegben egy halom olyan betűcsoport, amelyik értelmes szót alkot. Ezek között leggyakoribbak a kétbetűs szavak lennének, ilyenek mint *só, kő, fa* stb. Lényegesen kevesebb hárombetűs szó lenne köztük, mint például *fal, kér, tűz* stb., de aligha akadna olyan komplikált szó, mint például ez: *dezoxiribonukleinsav.* Az sem valószínű, hogy két értelmes szót találjunk egymás mellett. Ha a vak ember egy évig gépelne, bizonyára sok olyan részt lehetne találni a szövegben, ahol két értelmes szó követi egymást, ám a teljes évi szövegtermésben is aligha találnánk egyetlen épkézláb mondatot, hacsak olyan egyszerű tőmondatot nem, mint amilyen az, hogy *ő ír.* Ha egész életében gépelne, talán előfordulna a szövegben néhány egyszerű mondatként értelmezhető betűsor, ám értelmük között aligha lehetne bármiféle logikai kapcsolatot találni.

A legegyszerűbb élőlény „genetikai szövegének" terjedelme is megfelel egy kisebbfajta könyvnek. Ráadásul nemcsak hogy tartalmaz értelmes „mondatokat", de az egész szöveg összefüggő, logikailag kapcsolt mondatokból áll. És nem akármilyen értelmű, hanem nagyon is meghatározott információtartalmú mondatokból: az adott élő rendszer működésére és csak arra vonatkozó információkat hordoz, de arra vonatkozóan minden olyan információt, amelyre mint öröklődő információra az adott sejtnek vagy szervezetnek szüksége van.

Nyilvánvaló: egy ilyen szöveg a másolásnál itt-ott becsúszó hibák révén változhat ugyan, de véletlenszerűen nem keletkezhet. Öröklődő információinkat szüleinktől örököltük, ők az ő szüleiktől és így tovább, visszafele az időben az idők végtelenségéig. Végtelenségéig?

Földünkön az élet mintegy négymilliárd évvel ezelőtt jelent meg. A genetikai szövegek másolódása utódról utódra eddig vezethető vissza, nem tovább. Hogyan keletkezett az első értelmes genetikai szöveg? Crick az emlegetett könyvében egy kártyaelosztás példája segítségével próbálja érzékeltetni: aligha képzelhető el, hogy egy ilyen bonyolult utasításokat tartalmazó értelmes szöveg csak úgy magától, véletlenszerűen összeálljon az idők folyamán. Ám valahogy mégiscsak létrejött, hiszen itt van a Földünkön billiószor billiónyi példányban, minden baktériumban, minden fa, fű, állat minden egyes sejtjében, beleértve saját sejtjeinket is. Vajon hogyan? Nehéz kérdés ez, a természettudományok legnehezebb kérdéseinek egyike. Legalább olyan nehéz, mint az öröklődés mikéntje. Ám ez utóbbit Watson és Crick megoldották. Nem lehetne az előbbi kérdést valami „huszárvágással" ugyancsak megoldani? Nincs valami pofonegyszerű megoldás, valami Kolumbusz tojása?

Valahogyan a véletlen szerepét kellene csökkenteni. Ha ki lehetne mutatni, hogy az értelmes szövegek keletkezésében nemcsak a véletlen játszott szerepet, hanem valami más is, valami természetes, spontán nukleinsavkémiai folyamat, ami a nukleotidokat oly módon terelte volna egymás mellé, hogy önként álljanak össze értelmes szövegekké vagy legalábbis ér-

telmes mondatokká, mindjárt könnyebben elképzelhető lenne az élet spontán keletkezése. Sajnos az immár több mint két évtizedes vizsgálódás, a rengeteg spekuláció együttesen sem hozott felszínre semmi olyan valós vagy akár csak elképzelt mechanizmust, ami a leghalványabb reményt is nyújtaná arra, hogy annak révén értelmes „nukleinsavmondatok" maguktól összeállhattak volna az élet keletkezésének körülményei között. Semmiféle olyan hatást nem sikerült találni, sem elképzelni, ami a nukleotidok spontán, minta nélküli összekapcsolódását úgy irányítaná, hogy abból értelmes mondat kerekedjék ki.

Ámbár, ha ilyen értelmes mondatok léteznének, azokkal talán lehetne kezdeni valamit. Legalábbis ezt próbálta meg Manfred Eigen, aki már Nobel-díjas volt, amikor ebbe a fába belevágta a fejszéjét. (A gyors kémiai reakciók kinetikájának vizsgálatában elért eredményeiért kapta a Nobel-díjat.) Gondolatmenetét a végsőkig leegyszerűsítve a következőképp érzékeltethetjük.

Tételezzük fel, hogy az ősi körülmények között, amelyek között az élet létrejött, valamiféleképpen keletkezhettek olyan nukleinsav-makromolekulák, amelyek értelmes genetikai információt hordoztak, azaz – a mi iménti szóhasználatunk szerint – keletkezhettek nukleinsavmondatok. Tételezzük fel továbbá – és itt kezdődik Eigen speciális gondolatmenete –, hogy e véletlenül keletkezett, összevissza értelmű, de önmagukban értelmes mondatok között volt egy, egyetlenegy, amelyiknek nagyon jól meghatározott, speciális értelme volt, mégpedig a következő: „csinálj egy másik mondatot, egy II. számút, meghatározott értelemmel". A kérdés persze most az, hogy mi volt ennek a II. számú mondatnak az információtartalma. Hát az, hogy „csinálj egy újabb mondatot, egy III. számút, meghatározott értelemmel". Az olvasó már könnyen kitalálhatja, hogy a III. mondat információtartalma pedig ez volt: „csinálj egy újabb mondatot, egy IV. számút, meghatározott értelemmel". Ez a sorozat persze mehetne a végtelenségig is, de Eigen konstrukciójában nem megy: a sorozat valamelyik tagjába – az egyszerűség kedvéért legyen ez a IV. mondat – az van beleírva, hogy „csinálj egy másik mondatot,

egy *I. számút,* meghatározott értelemmel". S hogy az I. mondatnak mi az értelme, azt már leírtuk.

A kör bezárult. S a kör ez esetben valósan, noha nem geometriailag értendő. Ha a folyamaton végigmegyünk, kiindulópontunkhoz jutunk vissza. A folyamatsor zárt ciklust alkot. Ha úgy tetszik, kémiai ciklust, hiszen különböző felépítésű makromolekulák (nukleinsavak) egymás utáni kémiai szintézise során a kiindulási makromolekula szintéziséhez értünk vissza. De ha úgy tetszik, információs ciklust alkot, hiszen mindegyik makromolekula más-más információt tartalmaz (a nukleinsavmondatok értelme eltérő), de végül is az eredeti információkészlethez jutunk vissza.

Eigen ezt a konstrukciót *hiperciklus*nak nevezte el, nem véletlenül. Ha ugyanis a teljes műveletsor egyszer végigmegy a maga útján, a kiindulási makromolekulából, az eredeti nukleinsavmondatból már két példányunk lesz. Ám most mindkét példány csatasorba léphet, s így az újabb ciklus végére 4, a harmadik végére 8, azután 16, 32 stb. példányunk lesz az eredeti egyből a negyedik, ötödik ciklus végén. Vagyis mondatunk szaporodik, akár a baktériumsejt, amelyből először 2 lesz, azután 4, 8, 16, 32, 64, 128 stb., ha van elég táptalaj és a szaporodást semmi sem zavarja. A mondatok tehát ugyanolyan matematikai törvényszerűségek szerint szaporodnak ebben az elméleti konstrukcióban, mint az élőlények. Ha a keletkezett mondatok számát a ciklus fordulatainak függvényében papíron ábrázoljuk, exponenciális görbét kapunk, amelynek szára, mint iskolai tanulmányainkból tudjuk, igencsak meredeken tör az ég felé – az elérhetetlenül nagy számok felé.

Az előző fejezetben már találkoztunk olyan kémiai folyamattal, amelynek során a kiindulási anyag mennyisége megduplázódik: ott ezt a folyamatot a kamatos kamathoz hasonlítottuk, s azt mondottuk, hogy az ilyen folyamatokat a kémia autokatalitikus folyamatoknak nevezi. Miért nem autokatalitikus ciklusnak nevezi akkor Eigen a hiperciklust?! Vagy miért nem exponenciális ciklusnak, ha már mindenáron új nevet akar adni neki?

Eigennek erre jó oka van. Szerinte a hiperciklus szaporodása nem is exponenciális, hanem *hiperbolikus*. Ez pedig óriási elvi különbség! Hogy miért? Bármilyen meredeken törnek is fölfelé az exponenciális görbék, a matematikai végtelent véges idő alatt mégsem érik el, bármilyen határtalanul hosszú is az a véges idő. A hiperbola szárai viszont nagyon is jól definiálható időpontban a matematikai végtelenbe futnak. Igaz, világunk véges, s így semmiféle létező lény nem sokasodhat a „végtelenségig". Mégis – a szaporodási stratégiák szempontjából, evolúciósan – egyáltalán nem közömbös, hogy egy rendszer exponenciális vagy hiperbolikus görbe szerint szaporodik-e.

De miért gondolja Eigen, hogy a hiperciklus hiperbolikus szaporodású? Már többször emlegettük, hogy a Watson—Crick-modell nemcsak azt a kérdést válaszolta meg, hogy hogyan tárolódik az öröklődő információ a nukleinsavakban, hanem következik belőle az is, hogy átmásolódik utódról utódra. Azt viszont még nem mondtuk el, hogy ez hogyan történik. A Watson–Crick-modell szerint a DNS-makromolekula két összekapcsolódott nukleinsavszálból áll. Természetesen mindegyik szálnak van valamilyen betűsorrendje. Sőt a két szál éppen a betűkön keresztül kapcsolódik egymáshoz, betűről betűre, hasonlóan ahhoz, ahogy a cipzár fogai egymásba kapaszkodnak fogról fogra. A két szál szét tud válni egymástól, ugyanúgy, mint a cipzár szárai, és ismét össze tud kapcsolódni, megint csak hasonló módon, mint a cipzár.

Van persze különbség is. A cipzár fogai mindkét száron egyformák, a nukleinsavszálakon viszont a „fogak", azaz a betűk (a kémia nukleotidbázisoknak nevezi ezeket) négyfélék, és bár mindenféle szabályos ismétlődés nélkül, de mégis meghatározott sorrendben követik egymást, hiszen éppen ez a sorrend hordozza a „nukleinsavszöveg" értelmét. A négyféle betű közül kettő nagyméretű, kettő pedig kicsi. Így ahhoz, hogy ez a nukleinsavcipzár működhessen, a hosszú betűnek mindig rövid betűvel kell kapcsolódnia és fordítva. A két hosszú betű jele *A* és *G*, a két rövidé *T* és *C*. Tovább bonyolítja a helyzetet, hogy nem akármelyik hosszú kapcsolódhat akármelyik röviddel, hanem eltérő alakjuk miatt az *A* csak a *T*-vel,

és a *G* csak a *C*-vel. Ez viszont annyit jelent, hogy bármiféle betűsorrend az egyik szálon pontosan meghatározza a betűsorrendet a másikon, mert a „cipzármechanizmus" csak így működik.

Mivel a „nukleinsavcipzárban" nem az azonos betűk kapcsolódnak párba, a két nukleinsavszál betűsorrendje nem egyforma, jóllehet egymás betűsorrendjét szigorúan meghatározzák. Tegyük fel, hogy az egyik szál betűi értelmes mondatot alkotnak. Nevezzük ezt a szálat pozitív szálnak. A másik, a negatív szál betűi ekkor aligha alkotnak értelmes mondatot. Pedig ez a szál is hordozza az értelmes mondat információtartalmát, hiszen ha csak a negatív szál van a birtokunkban, a betűk „párosodási" szabályai szerint föl tudjuk építeni rajta a pozitív, a mondat jelentését hordozó szálat! A két nukleinsavszál tehát olyasféle viszonyban van egymással, mint a fényképészetben a pozitív és negatív kópiák: bármelyikről a másik is megcsinálható.

Valóban megcsinálható bármelyik nukleinsavszálról a másik? Meg, méghozzá nem is egyféle módon. Megcsinálható úgy, ahogy az élő szervezet másolja a DNS-szálakat a sejtosztódás előtt, azaz enzimek segítségével, biokémiai úton, és megcsinálható enzimek nélkül, szerves kémiai módszerekkel. Végül – ha nem is tökéletesen, de azért úgy-ahogy – működik ez a másolómechanizmus spontán is, olyan körülmények között, amelyekről esetleg feltételezhető, hogy megfelelnek az Ősföldön uralkodó körülményeknek.

És most visszatérhetünk Eigen hiperciklusához, illetve annak feltételezett hiperbolikus szaporodásához. Ha ugyanis ilyen kettős szálú nukleinsavunk van, megfelelő körülmények között a pozitív és a negatív szál szétválik egymástól, és mindegyiken felépül a megfelelő kiegészítő szál. A pozitív szálon a megfelelő negatív, a negatív szálon a megfelelő pozitív, függetlenül attól, hogy az adott nukleinsav milyen információt hordoz, vagy hordoz-e egyáltalán értelmes információt. Természetesen a keletkező két kettős szál tökéletesen egyforma, és egyben ugyanolyan, mint az eredeti kettős szálú nukleinsav-molekula volt. Ha a folyamat megismétlődik, akkor a keletkezett 2 kettős szálú nukleinsav-molekulából 4,

majd 8, 16, 32, 64, 128... stb. darab lesz, vagyis nukleinsav-molekulánk szaporodik, pontosan az előzőkben leírt módon, exponenciálisan. Ha pedig az eredeti nukleinsav-molekulánk egy értelmes mondatot zárt magába, e mondat kópiái is ugyanilyen módon szaporodnak.

Ebben van Eigen hiperciklus-konstrukciójának zsenialitása. Annak (elvileg) minden „mondata" szaporodik, függetlenül attól, hogy egy olyan konstrukciónak a tagja, amely konstrukció – más mechanizmussal – ugyancsak szaporítja e szaporodó elemeket. Duplán is szaporodnak tehát Eigen hiperciklusának mondatkópiái, egymástól független utakon. Ám ez a „duplán" ez esetben nem egyszerűen kétszerest jelent, matematikailag a folyamat sokkal bonyolultabb. Eigen olyasformán fogja fel, mintha a szaporodás szaporodna, s azt állítja, hogy a kópiák számának növekedése hiperbolikus. Mások – miként e sorok szerzője is – Eigen ezen állítását (amely nem szigorú matematikai levezetésen alapszik) kétségbe vonják. De a mi szempontunkból most nem ez a lényeges, hanem az, hogy maga az elvi konstrukció rendkívül érdekes, s mint elvi konstrukció mindenképpen megérdemli a részletes és alapos tudományos vizsgálatot, függetlenül attól, hogy a rendszer hiperbolikusan szaporodik-e, vagy hogy a valóságban ilyen organizációjú rendszerek egyáltalán léteznek-e.

Manfred Eigen munkatársaival erre a konstrukcióra alapozva óriási elméleti, szellemi építményt hozott létre. Nem az egyes hiperciklusok működési tulajdonságait vizsgálja, hanem azt, hogy a hiperciklus-populációk – feltételezve, hogy hiperbolikusan szaporodnak – milyen módon képesek evolúción végighaladni, hogyan viselkednek az exponenciális szaporodású rendszerekkel szemben. Ez a nagy matematikai apparátust megmozgató elméleti munka bizonyára sok helyen fog gyümölcsözni a tudományokban. Ám az értelmes genetikai szöveg eredetére vonatkozó alapkérdésünkre a hiperciklus-elmélet sem ad választ, hiszen eleve feltételezi az első értelmes mondat spontán, véletlenszerű keletkezését.

A konstruálható mondatok száma gyakorlatilag végtelen. Ha feltételeznénk is, hogy az idők során a nukleotidbetűkből összeállhatott egyszer spontán, véletlenül egy épkézláb nuk-

leinsavmondat, az végképp nem hihető, hogy ez a mondat úgy hangzott, hogy „csinálj egy II. számú mondatot, amelybe az van beleírva, hogy csináljon egy III. számú mondatot, amelybe az van beleírva, hogy csináljon egy IV. számú mondatot, amelybe...". Kizárt dolog, hogy ilyen mukleinsavmondat a Világegyetem fennállása óta bárhol is létrejött volna valaha. És mi még egyszerűsítettük is a mondat információtartalmát, mert a hiperciklusmodellben ez a „csinálj" komplikáltabb módon, enzimeken keresztül valósulna meg, amelyek elkészítéséhez az információkat szintén ennek a véletlenül keletkezett nukleinsavmondatnak kellene tartalmaznia.

Igaza van hát Cricknek, amikor – az általános tudományos felfogással megegyezően – úgy véli, a földi élet nem kezdődhetett úgy, hogy véletlenül, spontán módon, a nukleotidbetűkből összeállt egy, az élethez szükséges minden alapvető információt tartalmazó nukleinsavmondat. Ez még akkor sem képzelhető el, ha Eigen hiperciklus-elméletét is figyelembe vesszük. Miután a nukleinsavmondatok milliárdjai ténylegesen léteznek Földünkön, eredetük magyarázatára két lehetőségünk marad. Vagy értelmes lények tudatosan konstruálták az első ilyen mondatokat, vagy..., de ezt a másik lehetőséget majd a további fejezetek során igyekszünk kifejteni.

Az első lehetőségen belül is kétféle hipotézis képzelhető el. Az első, hogy egy nem anyagi természetű lény, azaz valamilyen szellem vagy isten parancsára, vagy működése révén került a Földre az ősi genetikai információ. Ez is egy lehetőség, ám nem tartozik a természettudományok illetékességi körébe, miután a természettudományok csakis és kizárólag kísérletileg ellenőrizhető állításokkal tudnak bármit is kezdeni. A másik hipotézis már kísérletileg is ellenőrizhető, legalábbis elvileg: a Földre a genetikai információ más égitestről került, méghozzá föltehetőleg úgy, hogy tőlünk távoli, idegen civilizációk valamelyike, Földünket életre alkalmasnak találván, megfelelő élőlényekkel (baktériumokkal) megrakott űrhajót indított bolygónkra. Ez Crick szóban forgó könyvének lényege. A lehetőség nem kizárt. De ha a dolgok mélyére nézünk, nem biztos, hogy Crick ebbéli véleményével fogjuk azonosítani magunkat.

KONTRA CRICK II/1

avagy a szabadság nem korlátlan

Az a gondolat, hogy a földi élet más égitestekről származik, nem új keletű. „...azt is el kell hinnünk, hogy a világok és minden határolt összetett test... a végtelenből keletkezett, és hogy minden ilyen dolog, a nagyobbak és a kisebbek egyaránt, az anyag sajátos összesűrűsödéséből vált ki... Hinnünk kell továbbá, hogy minden világban vannak élőlények, növények és más dolgok, amelyeket mi ebben a világban látunk" – írta Epikurosz Athénban, több mint két évezreddel ezelőtt. A görög gondolkodók egy része úgy vélte, hogy a Világegyetem tele van elszórt életcsírákkal, amelyek mindig és mindenütt kicsíráznak és fejlődésnek indulnak, amikor és ahol megfelelő körülmények közé kerülnek. Ezt nevezik a pánspermia tanának.

A múlt század közepén és századunk elején a pánspermia tana újjáéledt. Előbb Helmholtz, később lord Kelvin mutatott rá, hogy kőmeteoritokba zárva élő csírák, baktériumspórák véletlenszerűen az egyik égitestről a másikra kerülhetnek (litopánspermia-tan), majd Arrhenius vetette föl 1903-ban, hogy a parányi baktériumspórák a világűrbe kerülve a sugárnyomás hatására nagy sebességre gyorsulhatnak fel, és így juthatnak egyik égitestről a másikra (radiopánspermia-tan). Az irányított pánspermia tana sem igazán új. J. Brooks és G. Shaw ugyanis 1973-ban megjelent könyvükben a földi élet eredetének egyik lehetséges magyarázataként a következőket írják: „Az élő rendszer valójában igazi masinának tekinthető, olyan masinának, amely speciális céllal valamilyen földön kívüli laboratóriumban készült, és amely véletlenül vagy meghatározott terv alapján a mi bolygónkra került."

Mai ismereteink szerint a pánspermia nem tekinthető lehetetlennek, jóllehet valószínűsége igencsak kicsi. Az élőlények kétségtelenül meglepő ellenállóképességről tesznek tanúbizonyságot: 105 °C-os tenger alatti hévforrásokban éppúgy megtalálták őket, mint az Antarktisz jégvilágában. Hortobágyi és Vigassy a csillebérci kísérleti reaktor primer és szekunder hűtőkörében élő és szaporodó kékalgákat talált, egy *Streptococcus mitis* nevű baktérium pedig három évet töltött egy tévékamera rezgésmentesítést szolgáló habszivacsában a Holdon, vákuumban, anélkül hogy életképességét elvesztette volna.

Az élőlények legegyszerűbb formái tehát kibírhatnak természetes körülmények között egy spontán űrutazást is. Ilyen űrutazás akkor fordulhat elő, ha egy, a Földnél jóval kisebb égitest felületére óriásmeteor vagy üstökös csapódik be. A becsapódási energia elég lehet ahhoz, hogy kisebb kődarabokat a kozmikus szökési sebességre gyorsítson, s így a világűrbe lökje azokat. Néhány, a Földön talált meteoritról feltételezik, hogy ilyen módon kerültek a Holdról, illetve a Marsról a Földre. A spontán pánspermia – legalábbis kozmikus viszonylatban kis távolságokon belül – nem elképzelhetetlen. Az irányított pánspermia pedig az ember Holdra lépésével *de facto* meg is valósult.

Mindezek figyelembevétele mellett azonban azt is világosan kell látnunk, hogy ha a különböző pánspermiatanok a földi élet eredetének esetleg adhatnák is magyarázatát, a végső kérdést legfeljebb csak elodázzák, de nem oldják meg. Mert ha a Földre az élet más égitestről került, azonnal fölmerül a kérdés: és *ott* hogyan keletkezett?

Természetesen ezt Crick is jól tudja, nem is csinál belőle titkot, le is írja a könyvében. Végül is valamikor meg kellett születniök a genetikai ősmondatoknak, akár a Földön keletkezett a földi élet, akár más égitesten. De eddigi tudásunk szerint annak, hogy ez pusztán véletlen alapon történjék, sem itt, sem másutt nem volt valószínűsége. Nem ismerünk ugyanis semmiféle olyan adatot, amely arra utalna, hogy a nukleotidbetűk értelmes szöveggé kombinálódásának a valószínűsége a Világegyetem bármely pontján nagyobb lenne, mint a Földön.

A nukleotidbetűk képződésének a valószínűsége persze a körülményektől függően helyről helyre változik, s ugyancsak változik a betűk puszta összekapcsolódásának a valószínűsége is. Érdemes tehát erre a kérdésre is rászánnunk néhány percet.

Mindenekelőtt azt kell tisztázni, hogy honnan származik a nukleotidbetűk, azaz a nukleotidmolekulák anyaga. Ezek ötféle atomból: hidrogén-, oxigén-, szén-, nitrogén- és foszforatomokból épülnek fel. Közülük a hidrogén az őselem, az az atomtípus, amelyik az ősrobbanás után elsőként keletkezett, és a Világegyetem anyagának ma is közel 90%-át alkotja. A többi már csillagkohókban keletkezett, és szupernóva-robbanások során szóródott szét a világűrben. A rádiócsillagászat tanúsága szerint éppen a kozmikus por- és gázfelhőkben fordulnak elő igen nagy mennyiségben, s e por- és gázfelhők egykori szupernóva-robbanások maradványai. Ám nemcsak maradványok, hanem leendő naprendszerek nyersanyagai is egyben. A mi Naprendszerünk is egy korábbi szupernóva-robbanáskor szétszóródott gázfelhőből keletkezett, mintegy négy és fél milliárd évvel ezelőtt. Úgy tűnik tehát, hogy a naprendszerek keletkezése és vele együtt a szerves vegyületek atomjainak – köztük a nukleotidokat felépítő atomoknak – e naprendszerekben való feldúsulása általános, törvényszerű folyamat az Univerzumban. A szerves vegyületeket felépítő elemek, az úgynevezett biogén elemek atomjai tehát nem egy-két kitüntetett helyen dúsultak fel a Világegyetemben, hanem száz- és ezermilliónyi különböző helyen, amelyeknek csak egyike a mi Naprendszerünk.

Egy-egy nukleotidbetű harminc-negyven atomból tevődik össze, meghatározott térbeli elrendezés szerint. Harminc-negyven atom elképesztően sokféle módon kapcsolódhat egymáshoz, alkothat térbeli struktúrát. Egy-egy nukleotidbetűnek csak egyetlenegy felel meg ezen megszámlálhatatlanul sok elrendeződés közül. Ha a struktúrák keletkezéséről úgy gondolkodnánk, ahogy Crick és mások a genetikai szöveg keletkezéséről, vagyis azt kérdeznénk: mi a valószínűsége annak, hogy az építőelemekből egy meghatározott struktúra (sokatomos molekula, genetikai szöveg, élő rendszer) csak

úgy, magától összeálljon, nyugodtan mondhatnánk: semmi, vagy legalábbis a nulla valószínűségtől csak olyan kismértékben tér el, hogy az csak a matematikusok számára lehet érdekes. Ám a kérdésfeltevés önmagában rossz. S ilyen alapon nemcsak a genetikai szövegről kellene feltételeznünk, hogy azt valakinek meg kellett konstruálnia, de már magukról a betűkről is.

A valóságban azonban nem harminc-negyven atom ütközik egyszerre, hogy összeálljon valamiféle molekulává, hanem mindig *csak kettő.* A két összekapcsolódott atom ütközik azután egy újabb atommal vagy esetleg már összeállt atomcsoporttal, és azokkal reagál, egyre nagyobb és nagyobb struktúrákat alkotva. A Földön ez a folyamat nehezen figyelhető meg, mert ezen két-három atomból álló atomcsoportoknak a többsége instabil, és azonnal reakcióba lép a környezetében levő anyaggal, de a kozmikus por- és gázfelhőkben, ahol a hőmérséklet alig haladja meg az abszolút zérus fokot, az anyagsűrűség pedig sokszorosan kisebb, mint a Földön előállított legjobb vákuumban, ezek a *szabad gyökök*nek nevezett atomcsoportok is hosszú ideig stabilan fennmaradhatnak.

Azt kellene tehát első lépésben megtudnunk, hogy milyen atomcsoportok jelennek meg az Univerzum távoli, hideg vidékein. Szerencsére a rádiócsillagászat erre nézve 1968 óta megbízható adatokat szolgáltat. Íme néhány kétatomos képződmény:

C≡N; C—H; H—H; O—H; C=O; C=C; N=O.

Ezek közül a H—H-t, vagyis a H_2-t rögvest felismerjük, ez nem más, mint a Földön is stabil, noha elég reakcióképes hidrogénmolekula, ilyen molekulákból áll a hidrogénpalackokban levő gáz is. Felismerhetjük a C=O-ban a mérges szénmonoxidot, amely a Földön a tökéletlen égéskor keletkezik, s amelyből bőven jut orrunk alá autóink kipufogócsövén keresztül. A többi atomcsoporttal a Földön nemigen találkozhatunk. De ha ezek egy-egy újabb atommal kapcsolódnak, már jól ismert vegyületek jelenhetnek meg. Ilyen, a Földön is megtalálható, három atomból álló molekula a HOH, azaz

H_2O: a számunkra létfontosságú víz, vagy ilyen a rendkívül mérgező cián-hidrogén, a HCN. A C=O-hoz vagy a C—H-hoz egy-egy hidrogénatomot kapcsolva még nem jutunk ismerős vegyületekhez, de újabb hidrogéneket hozzájuk csatolva már igen: a H_2CO a formaldehid (az izzadásgátló spray-k hatóanyaga), a CH_4 pedig a metán (földgázaink főkomponense). Érdekes, hogy az N—H-t ez ideig nem sikerült a kozmikus gázfelhőkben kimutatni, de az NH_2-t, valamint az NH_3-at igen, ez utóbbi pedig nem más, mint hűtőgépeink munkaanyaga, az ammónia, amelynek vizes oldatát szalmiákszesz néven ismerjük.

Számos más, egyszerűbb-bonyolultabb vegyületet azonosítottak rádiócsillagászati eszközökkel a csillagközi por- és gázfelhőkben, részben az itt bemutatott vegyületek származékait, részben egyéb vegyületeket is. Számuk napjainkban hetven körül jár. Nekünk azonban gondolatmenetünk továbbviteléhez e néhány anyag ismerete bőségesen elegendő, hiszen az itt bemutatott vegyületek a kémiai evolúció, vagyis a biológiai fontosságú szerves anyagok spontán keletkezése szempontjából létfontosságúak, majdhogynem azt állíthatnánk, hogy belőlük az élő szervezeteket alkotó anyagok mindegyike előállítható. Kivételt csak azok az anyagok képeznek, amelyek molekulájában a felsoroltakon kívül más elemek (például kén, foszfor, fémek stb.) is szerepelnek. Sőt tovább is mehetünk, mert ezekből az anyagokból nemcsak előállíthatók a biológiai fontosságú vegyületek, hanem maguktól is keletkeznek belőlük az ősföldi körülmények között.

Vízről, ammóniáról, metánról, ciánról és formaldehidről beszéltünk. Ezek közül az első három meglehetősen stabil vegyület, az utóbbi kettő viszont igen reakcióképes, a szerveskémikusok kedvelt reagense. Ám ha az első három vegyületet összekeverjük, és keveréküket ultraibolya fénnyel besugározzuk (vagy egyéb alkalmas módon közlünk vele energiát), e keverékekben is keletkezik formaldehid és cián, mégpedig folyamatosan, mert folyamatosan tovább is alakulnak egyéb szerves vegyületek keletkezése közben.

A cián és a formaldehid az életkeletkezés kulcsvegyületei. Saját magukkal, egymással és igen sok más vegyülettel is ké-

pesek kémiai reakcióba lépni. Ám azáltal, hogy bennük három-négy atom meghatározott térbeli elrendeződésben kapcsolódik egymáshoz, a belőlük felépíthető molekulaféleségek száma már nagyságrendekkel kisebb, mint a C-, O-, H-, és N-atomokból felépíthető vegyületeké, noha még ez a kisebb szám is igen nagy. Az anyagszerveződés *végtelennyi* lehetősége *nagyszámú* lehetőséggé szűkült le, és ennek a nagyszámú lehetőségnek már tekintélyes része a biológiai fontosságú vegyületek keletkezése felé vezet. Az egyszeri véletlen, a felfoghatatlan csoda felől tehát elindultunk a tudomány által is megfogható, szükségszerű vagy törvényszerű folyamatok felé.

A formaldehidmolekulából ugyanis, ha más formaldehidmolekulákkal reagál (polimerizálódik), cukrok egész sora keletkezik. E cukrok pedig komponensei, méghozzá alapvetően fontos komponensei az élő rendszerek anyagcsere-folyamatainak, sőt ott található közöttük a ribóz is, a nukleotidbetűk egyik alegysége.

A cián ugyancsak rendkívüli módon szeret polimerizálódni, különösen ammónia jelenlétében. Hosszú láncok keletkezhetnek így az atomok egyes és kettős kötésekkel való összekapcsolódása révén. De ezek – épp a kettős kötések miatt – még mindig reakcióképesek, és mint Matthews kimutatta, vízzel reagálva spontán alakulnak át aminosavakból felépülő fehérje jellegű vegyületekké. Oró viszont idestova negyedszázada azt is kimutatta, hogy a cián és az ammónia reakciója szükségszerűen elvezet a *purinbázis*ok keletkezéséhez is.

A purinbázisok számunkra roppant fontosak. Ők képezik ugyanis a nukleotidbetűk másik alegységét. Ha egy ribóz egy nukleotidbázissal kapcsolódik, akkor úgynevezett nukleozidot kapunk, s ennek már csak egy foszfátcsoporttal kell összekapcsolódnia, hogy elkészüljön a nukleotid, a genetikai szöveg egy betűje. Nem csoda folytán, nem véletlen folytán, hanem a kémiai törvényeknek megfelelő eseménysor eredményeképp.

Talán emlékszik a kedves olvasó, hogy azt mondottuk, a genetikai szövegek négyféle nukleotidbetűből álló ABC-vel van-

nak írva, s e négyféle betűt a mi ABC-nk *A, T, G* és *C* betűivel jelöltük. Azt is mondottuk, hogy e négyféle betűből kettő *(A* és *G)* nagyobb méretű, a másik kettő *(T* és *C)* kisebb. Nos, purinbázist a két hosszabb, az *A* és a *G* tartalmaz, nevezetesen az adenint és a guanint. Ezek kétgyűrűs vegyületek. Mindkettő keletkezik ősföldi körülmények között cianból és ammóniából. De mi a helyzet a két „rövidebb" nukleotidbetűvel, vagy ahogy a kémia nevezi, a két *pirimidinnukleotid*dal? Ezek is foszfátból, cukorból (ribózból) és szerves bázisból épülnek fel, mint az előző kettő, de bázisként nem kétgyűrűs purinbázist, hanem egygyűrűs pirimidinbázist tartalmaznak (ettől rövidebbek). Pirimidinbázisok viszont nem keletkeznek cianból és ammóniából az ősföldi körülmények között.

Említettük, hogy a formaldehid és a cián saját magával, egymással és egyéb vegyületekkel is képes kémiai reakcióba lépni. Nos az egyik vegyület a sok közül, amivel a cián reakcióba léphet, a formaldehid polimerizációja révén keletkező ribóz-foszfát. A cián és ammónia együttesen képesek a már kész ribóz-foszfátra primidingyűrűt építeni, ily módon pirimidinnukleotidokat előállítani.

Korántsem akarom azt állítani, hogy ezeknek a folyamatoknak minden részlete tisztázódott és egzakt módon bebizonyosodott. Azt azonban igen – és az elmondottaknak ez a legfontosabb tanulsága –, hogy a nukleotidbetűk keletkezésénél semmi esetre se vagyunk a puszta véletlenre utalva. Megjelenésük valószínűsége korántsem egyenlő az atomjaikból való véletlenszerű összeállásuk valószínűségével, hiszen akkor igencsak kevés nukleotidmolekula fordulna elő a világegyetemben. De ha a folyamatot több egymással összefüggő lépésre bontjuk, akkor azonnal megváltozik a helyzet: az egyes lépések eleve behatárolják a soron következő eseményeket, s a folyamat egésze egyáltalán nem a vak véletlen rulettasztalán, hanem a kémiai törvények által szigorúan meghatározott útvonalakon megy végbe. Ily módon a nukleotidbetűk – és mint ma már tudjuk, az élőlények keletkezéséhez és működéséhez szükséges egyéb vegyületek – megjelenése törvényszerűen és szükségképpen lejátszódó folyamat mindenütt a Világegyetemben, ahol arra a körülmények alkalmasak. De milyenek ezek az „alkalmas" körülmények?

avagy konyhakertet Édenkertre cseréljünk?

Tízezer és húszezer közé tehető azoknak a tudományos közleményeknek a száma, amelyek azt vizsgálták, hogy a feltételezett ősföldi körülmények között a biogén elemek atomjai által alkotott vegyületekből hogyan alakulnak ki a biológiai fontosságú szerves vegyületek. Ahelyett, hogy e vizsgálatokat itt részletesen ismertetnénk, néhány pontban összefoglaljuk azokat a legfontosabb következtetéseket, amelyek az eredményekből általánosságban levonhatók.

1. Bármilyen, a biogén elemek atomjaiból képződött egyszerű, nagy reakcióképességű atomcsoport (ion, gyök, molekula) vizes oldatban más hasonló atomcsoportokkal úgy reagál, hogy a keletkezett termékek között nagy számban találhatók biológiai fontosságú vegyületek.

2. Nagy számban keletkeznek biológiai fontosságú vegyületek a biogén elemek atomjaiból képződött egyszerű, *stabil* molekulák vizes oldatában is, ha a rendszerrel kellő mennyiségű energiát közlünk, s azt a rendszer komponensei elnyelik. E célra számos energiafajta felhasználható (hő, elektromos kisülés, UV-sugárzás, látható fény, radioaktív sugárzás, röntgensugárzás stb.).

3. Az ilyen módon keletkezett termékek között a biomolekuláknak szinte minden típusa megtalálható (aminosavak, karbonsavak, cukrok, cukor-foszfátok, aldehidek, nukleotidok, koenzim jellegű vegyületek, vitamin jellegű vegyületek, alkoholok, imidazolszármazékok stb.), noha korántsem található meg minden olyan vegyület, amely ma az élőlények anyagcseréjében előfordul.

4. A spontán keletkező termékek között a makromolekulák (proteinoidok, oligonukleotidok), valamint a mikrostruktú-

rák (membránok, mikrogömbök) primitív formái is spontán megjelennek.

5. Bár a terület e vonatkozásban korántsem tekinthető feltártnak, az eddigi eredmények azt sugallják, hogy az előző fejezetben emlegetett egyszerű kozmikus ősvegyületekből vizes oldatokban spontán keletkező ősleves mindazon anyagokat tartalmazza, amelyek az ősélőlények (őssejtek, protocellek, kemotonok, ,,jeewanu"-k stb.) kialakulásához szükségesek.

Őslevest emlegettünk, *vizes oldat*okat. De mi történik a Kozmosz ősvegyületeivel folyékony víz nélkül? A tudomány ma már erre is választ tud adni, miután lehetőség nyílt néhány meteor, holdtalaj- és kőzetminta, valamint a Mars talajából vett néhány minta szerves vegyületeinek vizsgálatára. A közel két évtizede kifejlesztett vizsgálati módszerek (például gázkromatográfiával összekapcsolt tömegspektrográfia) oly rendkívül érzékenyek, hogy segítségükkel már milliárdod grammnyi anyagmennyiséget is azonosítani tudunk egy-egy anyagkeverékben. Az ilyen módon végzett elemzések bebizonyították, hogy a meteoritok egy részében (kondritok) ugyanúgy fellelhető szerves anyag, mint a Hold talajában, noha roppant kis mennyiségben. (A Mars talajában nem sikerült szerves anyagot kimutatni, de ez feltehetőleg annak a következménye, hogy a Mars roppant erősen oxidáló légköre eloxidálta az eredetileg ott levő szerves anyagot.) A holdtalaj vagy a meteoritok szerves anyagából hiányoznak az igazán jellegzetes biovegyületek. Víz hatására viszont az ottani szerves anyagok egy része biológiai fontosságú vegyületekké alakulhat át.

A víz tehát nemcsak életünk fenntartásához nélkülözhetetlen, nemcsak anyagcsere-folyamatok közege, hanem nélküle már a kémiai evolúció során sem alakulhattak volna ki a biológiai vegyületek, nem jöhetett volna létre az a nyersanyagbázis, ami az élő rendszerek spontán képződéséhez szükséges volt. Életet – legalábbis földi típusú életet – csak ott kereshetünk, ahol víz is rendelkezésre áll.

A víz a Világegyetem leggyakoribb vegyületeinek egyike. És ahol az Univerzumban vízmolekulák képződnek, ugyanott szerencsés módon egyszerű szén- és nitrogéntartalmú mole-

kulák is létrejönnek, hiszen a biogén elemek mind könnyű elemek, és a kozmikus anyagszétválasztódási folyamatokban együtt maradnak. Ebből következően a kozmikus folyamatok eleve gondoskodnak arról, hogy az őslevesek ne tisztán vízből álljanak, hanem szerves anyagokban dús, az élet keletkezésére alkalmas levesek legyenek.

Persze nem a folyékony víz a gyakori a Világegyetemben. Mert víz létezhet gőz, gáz, aeroszol, folyadék, jég halmazállapotban, felületekre adszorbeálódva, makromolekulákhoz kötötten stb. Az ősleves kialakítására viszont csak folyadékfázisként alkalmas, csak a folyékony vízben mennek végbe a kémiai evolúció azon folyamatai, amelyek a biológiai fontosságú vegyületek képződéséhez vezetnek. Az élet keletkezéséhez tehát *folyékony* vízre, azaz tengerekre, pocsolyákra, de legalábbis lebegő vízcseppecskékre, aeroszolra van szükség, mint az utóbbit Woese feltételezte. A folyékony víz pedig már korántsem olyan gyakori a Világegyetemben, mint maga a H_2O-molekula.

Hol, merre lehet folyékony víz az Univerzumban? Erre a kérdésre a kozmikus evolúció folyamatainak ismeretében adhatunk választ. A kozmikus porszemcsék felületén egyaránt adszorbeálódnak a vízmolekulák és az egyszerű szerves vegyületek molekulái. Amikor a naprendszerek létrejötte során ezek a porszemcsék égitestekké (bolygókká, holdakká, nappá) tömörülnek, a felszabaduló gravitációs energia (és a radioaktivitás) következtében a keletkező égitestek fölmelegednek, a szemcsék felületéről a meleg miatt a víz és a szerves vegyületek elpárolognak. Így az alakuló égitestek körül hidrogént, vizet, valamint egyszerű szén- és nitrogénvegyületeket tartalmazó gázburok, az ún. ősatmoszféra alakul ki.

Az ősatmoszféra további sorsa az égitest nagyságától (gravitációs erejétől) és a központi égitesttől, a rendszer sugárzó napjától való távolságától függ. Ha a központi égitest nem sugározna hőt, a bolygók, holdak lehűlése során az atmoszféra komponensei sorban kifagynának a bolygó felszínére, és a komponensek egy része (víz, metán, etán) időlegesen folyadék formájában csapódna a felszínre, mielőtt megfagyna.

A legeslegkisebb atomokat, illetve azok molekuláit (H_2, He) azonban csak a nagy tömegű bolygók gravitációs ereje tudja megtartani, különben azok a csillagászati idők folyamán lassan a világűrbe távoznak, s a bolygó vagy hold atmoszféra nélküli, kihalt, hideg égitestté válik.

Az üstökösök például ilyen, a naptól roppant nagy távolságban, a világűr hidegében bolyongó, kis halott égitestek. Csak akkor melegszenek föl rövid időre, ha napközelbe kerülnek. Ám ekkor sem jelenik meg rajtuk folyékony fázis, mert az olvadó metán, víz és egyéb anyagok azonnal el is párolognak, ebből ered az üstökösök csóvája. Ezért azután nemcsak életet nem lehet remélni az üstökösök felszínén, de még csak azon biológiai fontosságú vegyületek és mikrostruktúrák sem keletkezhetnek rajtuk, amelyek az élet kialakulásának nyersanyagaiként szolgálnak. Elfogadhatatlan tehát az egyébként kitűnő csillagásznak, Fred Hoyle-nak az a föltételezése, hogy az üstökösökön élőlények élnének, sőt csóvájuk révén járványt okozó mikroorganizmusokkal hintenék be a Földet.

Más a helyzet a bolygókkal és holdjaikkal. A központi égitestnek (a napnak) igen nagynak kell lennie ahhoz, hogy az egész bolygórendszert összetartsa. Egy ilyen nagy égitest a keletkezése során oly nagy hőmérsékletre melegszik föl, hogy benne különféle atomátalakulási folyamatok indulnak be, amelyek az égitestet folyamatos hőtermeléssel izzásban tartják, így az állandóan hőt és fényt sugároz a bolygók és holdjaik felé. Ez a sugárzás melegíti a bolygók felszínét. A közeli bolygókét jobban, a távolabbiakét kevésbé. Ha a közeli bolygó kicsi, a túlságosan felmelegített atmoszféra komponenseit kis gravitációs erejével nem képes megkötni, így azok elszöknek a világűrbe, s a bolygó (hold) légkör nélkülivé válik, mint naprendszerünk legbelső bolygója, a Merkúr, vagy Földünk kísérője, a Hold. Ha a bolygó elég nagy ahhoz, hogy légkörét megtartsa, de túl közel van a Naphoz, felületéről minden illóanyag elpárolog, s felszínén nem marad folyadék. Ilyen állapotban van legközelebbi belső szomszédunk, a Vénusz.

A bolygórendszer napjától túl távol keringő égitestek túl hidegek ahhoz, hogy folyékony állapotú víz legyen rajtuk; például a Jupiter három legnagyobb holdját, az Europét, a Ganü-

médészt és a Kallisztót vízjég borítja. A még távolabbiakon (például a Szaturnusz Titán nevű holdján) már olyan hideg van, hogy ott a metán és az etán is folyékony állapotban van, a tengerek metánból és etánból állnak. A még távolabbi bolygók, holdak felszínén a metán és az etán is kifagy, szilárd alakban burkolva az égitest felszínét.

A „túl közeli" és „túl távoli" övezetek között azonban van egy olyan sáv, amelyben – ha ott megfelelő méretű bolygó kering – a napsugárzás melege a vizet állandóan vagy legalábbis időszakonként folyékony állapotban tartja. Ezt a sávot a nap *ökoszférá*jának nevezzük. A Föld a mi Napunk ökoszférájának kellős közepén kering, ezért van a felületén állandóan folyékony víz, ezért vannak tengereink, folyóink, ezért jön rendszeresen az áldásos eső. És ezért volt alkalmas a Föld arra, hogy felszínén a kémiai evolúció folyamatai végbemenjenek, és végül megszüljék az életet, amely azután benépesítette a Földet, hogy működésével a továbbiakban maga is alakítsa a bolygó felszíni viszonyait.

Az elmondottak persze nemcsak a mi Naprendszerünkre érvényesek, hanem általában bármely naprendszerre. S minthogy maga a naprendszer-keletkezés is általános folyamatnak tűnik a Világegyetemben, azt kell hinnünk, hogy nagyon-nagyon sok olyan szerencsés bolygó létezik Tejútrendszerünkben és a többi galaktikában, mint a Föld, felületükön folyékony vízzel és élővilággal. Azt tehát nemhogy nem tartjuk lehetetlennek, de igenis nagyon valószínűnek kell tekintenünk, hogy sok, nagyon sok más égitesten kialakult élet, sokukon talán értelmes élet is, akár civilizációval, űrhajózással, űrexpedíciókkal. E tekintetben nem vagyunk ellentmondásban Crickkel.

A gond ott kezdődik, hogy bármennyire törvényszerűnek és általánosnak tűnik is mindez, hitünk bármennyire is tudományosan megalapozott, a Földön kívül jelenleg még egyetlen olyan égitestet sem ismerünk, amelyen *bizonyítottan* van folyékony víz. A Vénusz és a Mars, amelyek az ökoszférán belül keringenek, csalódást okoztak. A Vénusz légköre az ún. üvegházhatás miatt túlságosan forróvá vált ahhoz, hogy felszínén folyékony víz legyen, a Marsot viszont az ott leszálló

Viking-szondák túl hidegnek és túl száraznak találták. Igaz, számos jele van annak, hogy a Marson időszakosan rövid időre megjelenhet folyékony víz, amint azt elméleti megfontolások is alátámasztják, de ez mégis mind a mai napig csak feltételezés. Az is valószínű, hogy a Jupiter Europé nevű holdján a jégkéreg alatt igen nagy tömegű víz van – de ma még ez is csak feltételezés. Végül még az sem bizonyosodott be mind a mai napig, hogy a mi Naprendszerünkön kívül más naprendszerek is léteznek, bár a csillagászati módszerek rendkívüli fejlődése nem hagy kétséget aziránt, hogy ennek bizonyítékai belátható időn belül a kezünkben lesznek.

Az a helyzet tehát, hogy – képletesen szólva – van egy kitűnő konyhakertünk, a Föld, amelyben az élet folyamatosan újratermeli önmagát, s amely minden bizonnyal alkalmas volt arra, hogy rajta az élet ne csak újratermelődjön, de meg is szülessen. És azt hisszük – nem alaptalanul bár, de mégiscsak hisszük –, hogy léteznek más konyhakertek is, ahol az élet szintén folyamatosan újratermeli önmagát, s amelyek ugyancsak alkalmasak voltak arra, hogy bennük az élet meg is szülessen. De Crick abban is hisz – s ezt a hitet már nem találjuk megalapozottnak –, hogy e konyhakertek között léteznek olyan Édenkertek, amelyek alkalmasabbak az élet kicsíráztatására, mint a többiek, s ahonnan a vetőmagot galaktikus kertészek űrhajókon szállították a többi konyhakertbe.

Vajon szükségünk van-e arra, hogy ilyen feltételezéssel éljünk? Van annak értelme, hogy egy jól termő konyhakertet – a Földet – egy elképzelt Édenkertre cseréljünk?

avagy nem az élet, a civilizáció a ritka

Amikor a régész egy régi település maradványait kezdi kiásni a földből, gondosan vigyáz arra, hogy sehol se ásson mélyebbre, mint másutt, hogy mindig csak azonos korú rétegeket bolygasson. Teszi pedig ezt azért, mert ha egy hely igazán alkalmas a letelepedésre, feltehető, hogy a vizsgált kort megelőzően is volt ott település, és azt megelőzően is, visszafele az időben a történelmi idők kezdetéig.

Mert amikor egy település háború, tűzvész miatt vagy egyéb okból elpusztul és lakatlanná válik, a területet a természet veszi birtokba, s a romokat lassan homokkal, porral, komposzttal, talajjal takarja le, eltüntetve az ember egykori nyomait. S mikor új telepesek jönnek, a régi romok fölé építik új házaikat, sokszor részben azok köveiből, tégláiból. A történelmi idők során azután az egymást váltó települések rétegződnek, néha hat-nyolc is egymás fölé, megmutatva a régésznek az időrendet, és egyértelművé téve, hogy a mélyebb rétegek régebbi korok embereiről nyújtanak tudósítást.

A régész néhány száz, néhány ezer, legfeljebb néhányszor tízezer évet megy visszafele az időben. Ám munkája, ha már több tízezer évet fog át, menthetetlenül ölelkezik az őslénykutatóéval. Mert az idő nemcsak az ember tevékenységének maradványaira rak jótékony, megőrző talajréteget, hanem az élővilágra is, s az egyre mélyebb rétegek egyre régebben élt állatok csontjait, vázát, virágok pollenjeit, fák leveleinek lenyomatát vagy éppen elkovásodott törzsét őrzik meg. Így az őslénykutató is időrendbe állíthatja az egymás fölött meglelt maradványokat, csak az ő dolga e tekintetben nehezebb a régészekénél, őt nem segítik írásos ősszövegek, történelmi emlékezések; rétegeit a geológiai mozgások esetleg össze-

keverték, elmozdították vagy akár fejtetőre is állították. Szerencsére van néhány olyan hely a Földön, ahol a rétegek bolygatatlanok maradtak (például a Colorado-kanyonban), s amelyek egyértelmű és biztos alapot adnak a geológus, paleontológus számára az egyéb bolygatott területek vizsgálatához is.

A régész persze években adja meg leletei korát, hiszen kezdettől támaszkodhatott a vele párhuzamosan dolgozó történészek írásbeli, rendszerint dátumozott vagy legalábbis dátumozható dokumentumokon alapuló munkáira. A paleontológus ugyanezt nem tehette, nemcsak azért, mert vele párhuzamosan nem dolgoztak történészek, s így ő maga kénytelen az őstörténész szerepkörét is betölteni, hanem főként azért, mert többnyire oly régi korokat vizsgál, amelyekből írásos dokumentumok már csak azért sem maradtak fenn, mert döntő többségükben ember egyáltalán nem is élt a Földön.

Századunk közepéig nem állt a paleontológusok rendelkezésére olyan módszer, amellyel leleteik abszolút korát megfelelő biztonsággal megállapíthatták volna. De relatív korokat már biztonsággal állapítottak meg: tudták, hogy az ember megjelenése előtt volt egy korszak, amikor már léteztek főemlősök, azt megelőzően más emlősök álltak a törzsfejlődés csúcsán. Az emlősök előtt hosszú-hosszú időszakokon keresztül a sárkánygyíkok uralkodtak a Földön, őelőttük az őshüllők, a kétéltűek, a rovarok. Még régebbi korokban csak a tengerekben volt élet. A legelső időszakot, amelyből még ősmaradványokat találtak, *kambrium*nak nevezték el (ma már régebbi korokból is vannak ősmaradványaink). Ami ezt megelőzte, annak egységes nevet adtak: *prekambrium,* azaz a kambrium előtti időszak.

Meglehetősen zűrös, nehezen áttekinthető ez a relatív korszakokra, alkorszakokra, alalkorszakokra és még ezeken belül is többszörösen tagolt időbeosztás, fölösleges is, hogy itt részletesen foglalkozzunk vele, noha például a *kréta,* a *jura,* a *triász* nevét alighanem mindenki hallotta.

Hanem amikor lehetőség nyílt arra, hogy ezek korát *abszolút időtartam*ban, azaz években is meghatározzák, ki-

derült, hogy időtartamuk korántsem egyenlő, a kréta vagy az *ordovícium* például 70 millió évig tartott, a triász vagy a *szilur* „csak" 35 millió évig. Az összes együtt a kambrium elejéig alig tett ki többet félmilliárd évnél, ma 580 millió évvel számolják. De a nagy meglepetés nem ez volt, hanem az, hogy a kambrium előtti kor, a prekambrium egymaga négymilliárd évet vett igénybe. És ez a tény elég érdekes ahhoz, hogy elgondolkozzunk fölötte.

A Föld kora 4,5 milliárd év. Az élet a Földön mintegy négymilliárd évvel ezelőtt jelent meg. Addig persze nem születhetett meg az élet, amíg a forró Föld le nem hűlt annyira, hogy rajta (fölötte) a folyékony vizes fázis megjelenjék. Hogy ez a lehűlés mennyi időt vett igénybe, nem tudhatjuk pontosan, de néhány száz millió évbe alighanem beletelhetett. Geológiai korszakokkal mérve tehát a Föld lehűlése után meglehetősen rövid idő alatt megjelent az élet a Földön. Hogy ez pontosan mennyi idő volt, megint csak nem tudhatjuk, a szakértők becslései eltérőek. Woese például azt hiszi, hogy az élet a folyékony víz megjelenésével egyidőben jelent meg, még mielőtt a Föld felszíne kellően lehűlt volna, fenn, a felhők vízcseppecskéiben. E sorok írója Woesétől eltérő érvek alapján ugyan, de ugyanezen az állásponton van: az élet a folyékony víz megjelenése után szinte azonnal megszületett. Mások 100-200 millió évet saccolnak az élet kialakulására a felszín lehűlése után.

További gondolatmenetünkhöz szerencsére nem annyira lényeges a pontos időtartam. A lényeges az, hogy az emberi civilizáció megjelenéséig négymilliárd év telt el, vagyis attól függően, hogy az élet keletkezéséhez 400, 40 vagy csak négymillió év volt szükséges, netán négy esztendő, tízszer, százszor, ezerszer, netán ezermilliószor hosszabb idő volt szükséges a civilizáció kialakulásához, mint az életéhez. Ez már önmagában is azt sugallja, hogy akár gyakori, akár ritka az élet az Univerzumban, a civilizáció százszor, ezerszer, netán ezermilliószor ritkább.

Gondolatmenetünkben tovább is léphetünk. Ugyanis az élet a négymilliárd évből három és felet a tengerben töltött, s csak az utolsó félmilliárd évben lépett ki a szárazföldre. De ez

a félmilliárd esztendő sokkal-sokkal több élőlényfajt, sokkal változatosabb élővilágot eredményezett, mint az előző három és fél; az evolúció folyamata szinte robbanásszerűen felgyorsult az élet partra vetődése után. És ez nem véletlen: az állandóan változó körülmények, a felfokozódó küzdelem a létért milliónyi új találmányt szültek az élővilágon belül, amelyek egyenként mind a fennmaradást, a túlélést szolgálták, de összességükben mégiscsak az evolúció felgyorsulását, egy rendkívül változatos, összetett élővilág kialakulását vonták maguk után. Megkockáztathatjuk a kijelentést: ha az élet nem lépett volna ki a szárazföldre félmilliárd évvel ezelőtt, aligha lenne ma civilizáció a Földön. Talán még abban sem tévedünk, hogy azokon az égitesteken, amelyek felszínét teljes egészében víz borítja, életet várhatunk ugyan, de civilizációt aligha.

De még ez sem minden. Az evolúció eddig feltárt általános törvényeit ismerve az ember azt gondolná, hogy a törzsfejlődés folyamata egyenletes: apró változások sokaságának felhalmozódásával új meg új változatok alakulnak ki, az ezek közötti különbözőségek fokról fokra faji különbségekké nőnek, az így létrejövő fajok szép lassan elterjedve egyre jobban kiszorítják a régebbieket, s ez a folyamat egyenletesen, mintegy határok nélkül zajlik évtízmilliókon és -százmilliókon keresztül, az élet megjelenése óta változatlanul. Valójában erről szó sincs. Az egyes geológiai korok közötti határok nem folyamatos átmenetek, s a határvonal nem mesterségesen és önkényesen kitűzött kezdőpont, mint az Újév a napok egymásutánjában. Az egyes geológiai korok, korszakok, időszakok határain az élővilág hirtelen és jellegzetesen megváltozott, a sokáig egyenletesen változó élővilágban egy csapásra állat- és növényfajok tömegei pusztultak ki teljesen vagy majdnem teljesen, s ugyancsak egy csapásra soha nem látott vagy eladdig jelentéktelen fajok sokasága vált uralkodóvá. E határok tehát alighanem óriási globális átalakulások, katasztrófák nyomainak őrzői.

A legutolsó és számunkra talán leglátványosabb ilyen kihalás 65 millió évvel ezelőtt történt, a kréta és a *tercier* határán, akkor pusztultak ki hirtelen az addig uralkodó óriáshüllők – a

Dinoszauruszok, Ichtioszauruszok, Pleioszauruszok, repülő hüllők stb. —, és egyben ekkor kezdődött az emlősök látványos evolúciója. De hangsúlyozzuk, ez csak a legutolsó globális katasztrófa volt, s korántsem az egyetlen az élet története során. A kihalások oka máig sem ismert, e legutóbbira talán egy kozmikus test földi becsapódása a legelfogadhatóbb magyarázat, számos tény látszik e feltételezést alátámasztani. Akármi okozta is e katasztrófát, tény, hogy az elmúlt 65 millió évben ilyen katasztrófa - szerencsénkre - nem fordult elő a Földön. Szerencsénkre, ismételjük, mert ha öt- vagy akár tizenöt-, huszonötmillió évvel ezelőtt egy újabb hasonló katasztrófa érte volna az élővilágot, nem valószínű, hogy ma lenne civilizáció a Földön.

Az tehát, hogy egy vizes bolygón kialakult élővilágból kifejlődik-e egyáltalán civilizáció, sok mindentől függ. Crick egy hipotetikus bolygó civilizált élőlényeiről így ír: „...el tudjuk képzelni, hogy amint átvizsgálták a világmindenség körülöttük elérhető közelségben levő kis szögletét, amely nem lehetett nagyobb, mint néhány tízezer fényévnyi térrész, úgy találták, hogy a »leveses« bolygók gyakoriak, az élet azonban ritka. Sok hely akad, ahol a feltételek az élethez megfelelőek, de a természetes szelekció működését lehetővé tevő kémiai mechanizmusok spontán kialakulásának elhatározó lépése ezek közül egyiken sem valósult meg." Az eddigiek azt sugallják, hogy ennek a fordítottja lehet igaz: ha valakinek módja lenne egyáltalán tízezer fényévnyi körzetben körülnézni, azt találná, hogy körzetében sok, hozzá hasonló élővilággal benépesült bolygó található, de nagyon kevés vagy talán egyetlenegy sem, amelyen civilizáció is kifejlődött volna.

Ha van valami, aminek a csíráit, magjait a „kozmikus vetésterületeken" érdemes elszórni, az - úgy tűnik - nem az élet, hanem a civilizáció. Ha egyáltalán van irányított pánspermia (márpedig van, hisz a földi űrhajózás is efelé halad), akkor az nem az életet fogja terjeszteni primitív baktériumok formájában, hanem a civilizációt, amelyhez azután másodlagosan maga az élővilág is csatlakozhat majd, különösen olyan égitestek felszínén, amelyek a kedvezőtlen körülmények miatt természetes otthont az élet számára nem nyújtanak.

II.
A MEGOLDÁSOK

1. NEM ÁRTANA TUDNI, MIT KERESÜNK

Mert bármennyire hihetetlen is, a tudomány úgy keresi az élet keletkezésének útját-módját, hogy azt sem tudja, mit is keres tulajdonképpen. Arra a kérdésre ugyanis, hogy *mi az élet,* a biológusok nem nagyon kívánnak felelni. Ez a vonakodás sajnos tudatlanságból ered, s részben hitetlenségből. Bármennyi csodálatos részletet derített is fel az élőlények működési mechanizmusaiból a tudomány, a biológusok mégis valahogy úgy érzik, az élet titka megfejthetetlen. Vagy ha nem, hát akkor azonosítják valami, az adott kornak megfelelő, éppen legmodernebbnek kikiáltott fölfedezéssel: a 18. és 19. század fordulóján a „szerves" vegyületekkel; a 19. század végén a protoplazmával; a 20. század elején a fehérjékkel; a közepén a sejtstruktúrákkal; napjainkban a DNS-sel és a belezárt genetikai információkkal. Ezek az olykor nyíltan kimondott, olykor csak lappangva ható hitek azonban alapvetően befolyásolták a tudományos kutatások menetét. Tegyük hozzá: rossz irányban.

Az elmúlt három évtized során alighanem száznál több olyan szimpóziumot, konferenciát, kongresszust rendeztek a világon, amelynek az volt a címe, hogy Az élet keletkezése – vagy valami hasonló. Legalább ugyanennyire tehető az ilyen és hasonló címeken megjelent könyvek száma. Cikkek ezreinek címében szerepelt az „életkeletkezés" szó, és idestova két évtizede jelenik meg az *Origin of Life* című folyóirat. És mivel foglalkoznak mindezek? Döntő többségük a szerves vegyületek (aminosavak, dikarbonsavak, cukrok, nukleotidbázisok stb.) spontán keletkezésével, a maradék a makromolekulák (fehérjék, nukleinsavak) vagy a membránok (mikrogömbök, marigranulumok stb.) keletkezésével, vagy épp a genetikai in-

formáció, netán a genetikai kód eredetével. Csak éppen magával az élet keletkezésével nem, hacsak nem valami filozófiai bőrbe bújtatott felületes, előszó vagy bevezetés jellegű, többnyire protokolláris szövegben.

Igaz, vannak néhányan, akik – tudatosan vagy tudattalanul, kimondva vagy épp kimondatlanul – valóban az élet keletkezését kutatják kísérleteikkel, s nem is egészen eredménytelenül. Fox mikrogömbjeire, de főként Folsome prebiotikus képződményeire, valamint Krishna Bahadur „jeewanu"-ira gondolunk. De ha egy kutató a tapasztalatai alapján úgy ítéli meg, hogy a kísérleteiben kapott képződmények élnek, s ezt nyilvánosság előtt még ki is meri mondani, gúnyos mosoly, lesajnáló vállveregetés a válasz, s az illető mint csendes őrült, azonnal kizárta magát a tudósvilágból. Pedig, mint látni fogjuk, egyáltalán nem lehetetlen, hogy e kísérletek egyikébenmásikában, netán jó néhányában lejátszódott a spontán biogenezis, vagyis a *de novo* életkeletkezés, de legalábbis annak tekintélyes része. Senki sem tudja ugyanis, hogy egy ilyen spontán képződött, ezredmilliméternyi átmérőjű gömböcskén mit vagy miket kellene mérni ahhoz, hogy el lehessen dönteni, él-e vagy sem. Senki sem tudja, hogy mit kellene mérni, mert senki sem tudja azt sem, hogy valójában mi is az, hogy élet.

A biológia az élet tudománya. Van egy másik tudomány, a fiziológia, amelyet ugyancsak az élet tudományának, „élettannak" tekintenek. Ám nincs egyetlen biológus és egyetlen fiziológus sem, aki azzal foglalkozna, hogy mi is az élet. Legalábbis olyan nincs, aki igazán komolyan, átfogóan, kellő mélységében és tudományos egzaktsággal foglalkozna vele. Két kutatót ismer a tudománytörténet, akik megsejtették az élet lényegét – egyiket sem ezért tartjuk számon. Az egyik Leibniz volt, Gottfried Wilhelm Leibniz, a filozófus és a differenciálszámítás feltalálója a 17—18. század fordulójáról, a másik Erwin Schrödinger, a Nobel-díjas osztrák atomfizikus, a mikrovilág hullámelméletének megalapozója. Természetesen mindketten koruk és szakmájuk nyelvén fejtették ki az életről vallott nézeteiket, ezért nem ismerték fel a biológusok igazán mondandójuk lényegét.

Napjaink tudósai, szakmájuktól függően, a kémia, a kibernetika, a kvantummechanika, a molekuláris biológia stb. speciális fogalmaival fejezik ki gondolataikat, rendszerint egymást sem értve. Azt azért mindenki megérti, ha azt mondjuk, hogy az élő rendszer *programvezérelt kibernetikai rendszer.* És nemcsak megérti, de el is fogadja, hiszen maga a kibernetika is nagyrészt az élő rendszerek szabályozott és vezérelt működésének tanulmányozása révén született meg, a programvezéreltségről pedig a genetikai program ismeretében mindenki tud. Ám ha Leibniz észrevette ugyanezt, hogyan fejezhette ki gondolatait? A „programvezérlés", „visszacsatolás", „kibernetika" stb. szavak abban az időben még meg sem születtek.

Leibniz az élőlényeket automatákként írja le, természeti vagy isteni automatáknak nevezve azokat. A *ma* tudósai ezért lekicsinylően megmosolyogják, az irányzatot mechanikus materializmusnak titulálják, és „primitív" jelzővel illetik. Azt állítják, hogy a mechanikus materialisták elképzelése szerint az élő rendszerekben mindenféle kerekek meg áttételek működnek.

Bizonyára voltak ilyenek is a követők között, akik a nagy gondolkodóknak csak a szavait tudták felfogni a gondolataik helyett. A nagyok azonban nem így képzelték, legalábbis Leibniz biztosan nem. Ám az egyetlen lehetőségük annak kifejtésére, hogy az élőlény vezérelten működő kibernetikai rendszer, az volt, hogy az akkor ismert hasonló rendszerekhez, vagyis a gépekhez, mechanikus automatákhoz hasonlították őket. A folyamatos működés, a szabályozottság, a vezéreltség az akkori időkben csak az ember alkotta gépekben, automatákban volt fellelhető és érthető. Nem volt hát más lehetőség, mint ezekhez hasonlítani az élő rendszereket.

Az ember alkotta automaták és az élő rendszerek mint automaták között azonban Leibniz szerint is alapvető különbség van. Erről a Monadológia 64. pontjában így ír: „ilyen szerves teste valamely élőnek nem más, mint isteni gépnek vagy természetbeli automatának egy neme, mely végtelenül felülmúlja mind a mesterséges automatákat. Mert az emberi művészet által létrehozott gép nem gép minden egyes részletében, s pél-

dául egy sárgaréz keréknek foga oly részletekkel és darabokkal bír, melyek már semmiféle mesterségest nem mutatnak, és mivel sem bírnak, ami a kerék rendeltetésének feltüntetése által a gépet elárulná. A természetnek gépei azonban, vagyis az élő testek, még legkisebb részeikben is egész a végtelenig még mindig gépek. Ez teszi a különbséget a természet és a művészet között, vagy jobban mondva az isteni művészet és a mienk között."

Az persze már egészen más kérdés, hogy a „végtelen" határa a végtelen kicsi irányában Leibniz idejében valahol a század- és ezredmilliméter között mozgott, és hogy még az állatok sejtes felépítését sem ismerték, nemhogy az öröklődés és az életfolyamatok molekuláris *mechanizmus*airól tudhattak volna. De ebben a „végtelen kicsi" világban még a legmodernebb biológia is mechanizmusokat kutat, az öröklődés mechanizmusát, a fehérjeszintézis mechanizmusát, a membránranszport mechanizmusát stb. A molekuláris biológiával foglalkozókat mégsem illetjük a lekicsinylő „mechanikus materialista" jelzővel, pedig ha valakik, ők valóban azok (persze jó értelemben). Hiszen ebben a világban, a makromolekulák, molekulák világában az események a szó szoros értelmében mechanikai lépéseken keresztül mennek végbe, csak a műveleteket végző alkatrészek tíz- vagy százezred milliméter nagyságrendűek. S hogy ezek a százezred milliméteres alkatrészek valóban szabályozott és vezérelt rendszerré, azaz automatává, egészen pontosan *fluid automatá*vá állnak össze, arról a továbbiakban még bőven lesz szó.

Amilyen könnyen el tudta határolni magát Leibniz a „kerekes" automata elképzeléstől, annyira nehezen birkózott a másik résszel, a vezérlő mechanizmussal. Észrevette, hogy az élő rendszer mint természeti automata nemcsak működik, de irányítottan működik. Méghozzá az irányítás nem kívülről jön, hanem belülről. Az élő rendszerben tehát kell lennie egy működő résznek (automata) és egy irányító résznek. De mi ez az irányító rész, mi a természete, hogyan működik?

Leibniz korában e kérdésekre válaszolni nem lehetett, de az irányító rész létére, működésére logikai úton következtetni igen. Ma már tudjuk, hogy a vezérlést az állati szervezet szint-

jén az idegrendszer látja el (de az agy működésének lényegét még ma sem ismerjük), a sejt szintjén pedig a genetikai anyag, a DNS, a belé zárt információk révén. Az információkat pedig a DNS bázisainak a sorrendje zárja magába.

A jelsorrend az természetesen nem anyag. De nem is független az anyagtól, hiszen a jelet magát valamilyen anyagi létező (jelen esetben purin- és pirimidinmolekulák szerkezete) hordozza. Anyagi tehát, vagy nem anyagi?

A kérdést filozófiai mélységben megválaszolni még ma sem egyszerű feladat. Elképzelhető, mekkora probléma volt ez Leibniz idejében, amikor nemcsak a vezérlés mechanizmusairól nem tudtak semmit, de magát a tényt, hogy az élőlény vezérelt rendszer, sem ismerték. Ráéreztek csupán, a viselkedésből visszakövetkeztettek, hogy valami ilyesminek kell lennie. De azért az élő rendszer dualizmusát (vezérlő és vezérelt rész) érzékelték, mint ahogy alighanem innen ered a különböző vallások test és lélek fogalma is.

A „másik" rész leírásával, magyarázatával Leibniz is nagyon küszködik, hol „belső elvnek", „entelekheiának", hol pedig „léleknek" nevezve azt. De ezt a „lelket" – az „életelvről és a plasztikai természetekről" szóló elmélkedéseiben – mereven elhatárolja a test nélküli, anyagtalan szellem értelmű lélektől: „. . .a szerves testek soha nincsenek lelkek nélkül és a lelkek soha nincsenek egészen elválasztva minden szerves testtől. . . Én tehát nem engedem meg, hogy volnának természetes módon egészen elkülönített lelkek, sem, hogy volnának minden testtől ment teremtett szellemek, mely tekintetben több régi egyházatya nézetével találkozom."

Roppant érdekes lenne részleteiben is végigvizsgálni, mi mindent írt Leibniz erről a lélekről, erről az entelekheiáról, hogyan próbálta tulajdonságait elemezni, hogyan próbálta a különbséget kifejteni a csak „érző" és a már „értelmes" lélek között stb. Ám erre e helyütt nincs mód, itt nem bocsátkozhatunk tudománytörténeti vizsgálódásokba. Ehelyett ugorjunk át két és fél évszázadot, és nézzük meg, hogy egy másik nagy gondolkodó, már századunk közepén, a maga modern, egzakt gondolkodásmódjával hogyan látta az életet.

Ez a másik gondolkodó, Erwin Schrödinger 1944-ben írta meg a *What is Life* című könyvecskéjét. Ebben a korban a „végtelen kicsi" már a billiomod centiméterekig zsugorodott, az elemi részecskék világáig. Ismerték már az öröklődés törvényeit, az örökletes tulajdonságok hirtelen változásait, a mutációkat, tudták, hogy a mutációk valahol a kromoszómák anyagában bekövetkezett változásokból erednek, ám az örökletes információk mibenlétéről, természetéről még semmit sem tudtak. Schrödinger volt az első, aki ezeknek a változásoknak a természetét megvilágította.

Módszere zseniálisan egyszerű, korrekt és egzakt volt. Delbrück, Tyimofejev és Zimmer egy munkája nyomán a röntgensugárzás által okozott mutációk gyakoriságából kiszámította, hogy a röntgenfotonnak egy ötvenmilliomod köbcentiméternyi térfogaton belüli piciny célpontot kell eltalálnia ahhoz, hogy egy-egy öröklődő változás a sugárzás hatására bekövetkezzék. Ez a térfogat pedig már a molekulán belüli tartományba esik. Az öröklődő információkat tehát valamilyen módon molekulákon belüli atomi csoportoknak kell hordozniuk. De hogyan?

A választ adjuk meg Schrödinger saját szavaival: „Az atomok jól rendezett társulása, amely eléggé ellenálló ahhoz, hogy rendezettségét állandóan megtartsa, az egyetlen elképzelhető struktúra, amely nagyszámú lehetséges (»izomer«) elrendezésre nyújt alkalmat, s elég nagy ahhoz, hogy a »determinációk« bonyolult rendszerét kis térfogatban egyesítse. Az atomok számának a struktúrában nem is kell nagyon nagynak lennie ahhoz, hogy szinte korlátlan számú elrendezés legyen lehetséges. Ennek érzékeltetéséül gondoljunk a Morse-kódra. Két különböző jelet, a pontot és a vonást használva, négynél nem több tagot tartalmazó rendezett csoportokban harminc a különböző lehetőségek száma. Ha a ponton és a vonáson kívül egy harmadik jelet is bevezetnénk, s tíznél nem nagyobb tagszámú csoportokat használnánk, ezzel 88 572 különböző »betűt« tudnánk képezni..." Az ilyen molekuláris szerkezeteket Schrödinger *aperiodikus szilárd testek*nek nevezte el, s erre az irodalomban elég gyakran – bár egyre csökkenő mértékben – hivatkoznak.

Az idézett sorok kilenc évvel a DNS molekulaszerkezetének felderítése előtt íródtak. A Watson–Crick-modell azután teljes mértékben igazolta a feltételezést: az öröklődés „aperiodikus kristálya", a DNS, négyféle jelet tartalmaz, s e négyféle jel több százas csoportokat (géneket) alkot. Érthető, hogy a variációs lehetőségek száma kimeríthetetlen, s igazak Schrödinger szavai: „...nem elképzelhetetlen, hogy a miniatűr kód leírjon egy nagyon komplikált, megadott fejlődési tervet, s tartalmazza az annak működésbe hozásához szükséges eszközöket is."

Amivel tehát Leibniz oly reménytelenül küszködött, azt, vagy legalábbis annak az alapját, a programtárolás elvét Schrödinger megtalálta. Ám Schrödinger sokkal mélyebben gondolkodott annál, semhogy azt hitte volna, hogy a program, vagy különösen, hogy az azt magába záró „aperiodikus szilárd test" lenne az élet maga, mint ahogy kései utódai közül oly sokan hiszik, sőt némelyek vallják is a konkretizálódott aperiodikus szilárd testtel, a DNS-sel kapcsolatban. Ő nagyon jól tudta, hogy bármennyire fontos, nélkülözhetetlen a program az élet szempontjából, az élet egészen más valami. Legjobb, ha ismét az ő szavait idézzük: „Mi az élet jellemző vonása? Mikor mondjuk az anyag egy darabkájáról, hogy él? Ha »csinál valamit«, mozog, anyagcsere-kapcsolatban áll környezetével stb., s mindezt sokkal hosszabb időn át »teszi«, mint ahogyan az élettelen anyagtól hasonló körülmények között elvárnánk."

Megjelent tehát a masina, a működő, a vezérelt rendszer Schrödinger elgondolásában is. Említettük, hogy az aperiodikus szilárd test (vagy kristály) fogalmát az irodalom emlegetni szokta. Még gyakrabban emlegeti az irodalom a *negentrópia* fogalmát, amelynek segítségével Schrödinger az élő „masinák", élő rendszerek működését a termodinamika oldaláról jellemezte. Az előzőkben idézett mondatát, azt, hogy csak az él, ami csinál valamit, ami működik, hogy az élő rendszer működő rendszer, vagyis hogy az élet nem más, mint a speciális működés, ezt nem idézik soha.

Pedig a lényeg ebben van. Abban, hogy az élő rendszer speciális módon működik, s ezt ráadásul programvezérelten te-

szi. Minimálisan két alrendszerből kell tehát összetevődnie, egy vezérelten működő s egy vezérlő alrendszerből. Egyik sem él a másik nélkül. Naivitás azt hinni, hogy az élet keletkezésének kérdése megoldható azzal, hogy megnézzük, keletkezhetett-e program önmagában. Nem keletkezhetett. Úgy tartoznak össze a vezérelt résszel, mint a magnetofon és a mágnesszalag. Nemcsak nem működik, nem is keletkezhetett az egyik a másik nélkül. Vagy mégis? Az első magnetofonok nem szalaggal, hanem acéldróttal működtek. A magnetofon, primitív módon ugyan, de úgy is funkcionál. A mágnesszalag viszont magnetofon nélkül egyáltalán nem fejlődhetett volna ki.

Amikor Crick és rajta kívül sokan azt a kérdést teszik fel, mi a valószínűsége, hogy genetikai információt tartalmazó DNS csak úgy magától keletkezzék a Világmindenségben, az körülbelül olyan, mintha azt kérdeznénk, mi a valószínűsége, hogy az ember szórakoztató műsort tartalmazó kazettát találjon fel a magnetofon (vagy más, azt hasznosító szerkentyű) nélkül. A válasz: semmi, hiszen a feltételezés értelmetlen. A genetikai kód eredetét sem lehet vizsgálni az azt leolvasó, hasznosító rendszer egyidejű keletkezésének vizsgálata nélkül. A kettő csak együtt funkcionál élőként, együtt keletkezett, együtt fejlődött. Mégpedig pont fordított sorrendben, mint ahogy a tudomány ma vizsgálja: nem a program jelent meg először, hanem a masina. Hiszen masinát lehet működtetni programvezérlés, sőt bármilyen vezérlés nélkül is, pusztán szabályozással. A masina tehát működhetett program nélkül, de ez fordítva nem igaz. A masinák fejlődése azután kifejleszthette a programvezérlést is. Végső soron a technika evolúciójában is ez történt. Kezdjük el tehát az életkeletkezés folyamatát az ellenkező oldalról, a masinák oldaláról vizsgálni.

2. CSEPPFOLYÓS SZERKENTYŰK

Schrödinger gondolatait elemezve azt mondtuk, hogy az élet lényegét tekintve olyan rendszer, amely *speciális módon* működik, s ezt ráadásul programvezérelten teszi. A program molekuláris tárolásának az alapelvét Schrödinger feltárta, a konkrét mechanizmusát pedig – a DNS szerkezetének felderítésével – Watson és Crick megadta. De mit értsünk azon, hogy a rendszer speciális módon működik?

A válaszért Leibnizhez kell visszanyúlnunk. Keresnünk kell azokat a masinákat, amelyek „még legkisebb részeikben is, egészen a végtelenig, mindig gépek", természetesen a „végtelent" a Leibniz idejében észlelhető „végtelen kicsinyre" korlátozva. Léteznek, létezhetnek ilyen gépek?

A leglátványosabb kémiai kísérletek kétségtelenül az úgynevezett *oszcilláló reakciók.* Bemutatásuk egyszerű: össze kell önteni két megfelelő összetételű színtelen folyadékot egy főzőpohárba és megkevergetni. Néhány másodperc múlva az oldat például hirtelen megkékül. Ismét néhány másodperc múlva kivilágosodik. Azután megint megkékül, majd megint kivilágosodik stb. És ez így megy ritmikusan mindaddig, amíg az oldatban lévő reagensek át nem alakulnak. A lényeg persze nem a kékülésben és a kivilágosodásban van, hiszen sok másféle oszcilláló kémiai reakciórendszert is lehet készíteni, hanem abban, hogy ez az oldat a tulajdonságait periodikusan változtatja, mint az óra ingája a helyzetét. Akár azt is mondhatnánk, hogy „ketyeg", mint az óra, s ha nagyon akarnánk, akár időmérésre is felhasználhatnánk. Sőt igen valószínű, hogy az élő rendszerek a belső idejük mérésére ilyen oszcilláló kémiai rendszereket alkalmaznak, legalábbis az anyagcsere reakciórendszerei között több ilyen oszcilláló rendszert találtak.

Ahhoz, hogy egy rendszer periodikusan működjék, valamilyen szerkentyű kell, olyan alkatrészekkel, amelyek a periodikus változáshoz, az oszcillációhoz szükséges visszacsatolást vagy visszacsatolásokat, gátlásokat biztosítják. Ha a pohárban levő folyadék oszcillálva működik, akkor ebben a folyadékban is kell lenniük olyan, meghatározott szerkezeti rendben elhelyezett alkatrészeknek, amelyek ezt a működést lehetővé teszik. De hol vannak ebben az oldatban ilyen alkatrészek? És miféle rendszerbe, rendbe vannak ezek az alkatrészek szervezve, ha ez az „óra" akkor is működik, amikor a folyadékot kevergetjük vagy rázzuk?

Ha az összeöntött „ketyegő" folyadékot két pohárba szétosztva megfelezzük, *mindkét* fél tovább működik, tovább ketyeg. Ugye, az ember által konstruált órák között ilyen felezhető órát nem ismerünk? Pedig ez a felezés tovább folytatható a „végtelenségig", legalábbis a Leibniz számára „végtelen kicsiig". Még a mikroszkopikus kicsinységű cseppek is oszcillálnak, „ketyegnek".

Ez a „kémiai óra", ez a folyékony szerkentyű minden apró részletében teljes funkció ellátására képes, ez nem úgy áll össze alkatrészekből, mint a rugós óra, a rádió vagy a porszívó, amelyeket nem lehet sok kis apró órára, rádióra vagy porszívóra szétvagdosni. A „kémiai órában", vagyis az oszcilláló kémiai reakcióban tehát valami olyanfajta masinára, gépre akadtunk, ami megfelel a Leibniz-féle természeti vagy isteni gép kritériumainak, amely minden kis részében gép.

Természetesen ma már tudjuk, hogy ez az aprózás nem folytatható a végtelenségig, csak addig, amíg a folyadék kontinuumnak tekinthető, azaz olyan kis térfogatig, amiben a reagáló atomok száma még elegendően nagy ahhoz, hogy viselkedésük statisztikus törvényekkel leírható legyen. Ám ma már azt is tudjuk, hogy a természeti vagy isteni automaták – az élő rendszerek – sem „gépek" minden kis részletükben, a kontinuumhatár alá a citoplazmacsepp mérete sem csökkenthető működőképességének megszűnése nélkül. Sőt ma már azt is tudjuk, hogy az „élet" alsó mérethatára – egyéb okok folytán – ennél nagyságrendekkel nagyobb térfogatoknál van. Lehetséges, hogy az élet „masinái" és az oszcilláló kémiai „masinák" közös alapelveken működnek?

Ezt a feltevésünket „kapásból" több megfigyeléssel is valószínűsíteni tudjuk. Aki látott már mikroszkóp alatt helyzetét változtató amőbát , az tudja, hogy miközben az amőbasejt állábakat „növesztve" odébbfolyik a mikroszkóp tárgylemezén, vagy éppenséggel táplálékát körülfolyja, a benne lévő citoplazma mindig szabályozottan, sőt vezérelten, programvezérelten működik. Ugyanígy megfigyelhető a citoplazma áramlása mikroszkóp alatt, például a *Vallisneria spiralis* nevű vízinövény sejtjeiben fotoszintézis közben, és igen sok más sejtben is. És e sejtek citoplazmája eközben teljesen szabályosan működik. A citoplazma tehát olyan masina, amelynek működését nem zavarja a keverés, belső organizációját nem rombolja le, szabályozott mivoltát nem teszi tönkre az „alkatrészek" kaotikus térbeli vándorlása. A citoplazma fluid automata, éppúgy mint az oszcilláló kémiai rendszer.

A korábbi fejezetek egyikében már volt szó arról, hogy a citoplazma és a sejtmag csak együtt képes fejlődésnek indulni, sem pusztán sejtmagból, sem pusztán egy petesejt mag nélküli citoplazmájából nem fejlődhet ki soksejtű élőlény. Ennek okára is rámutattunk: a sejtmag hordozza a fejlődésre, működésre vonatkozó információt, a citoplazma pedig az a masina, amely ezen információktól vezéreltetve működik, így a kettő alkot egy egységes egészet. Most ezt az állítást magára a sejtre is kiterjeszthetjük, hiszen nemcsak embrió nem lehet a petesejtből, ha akár a citoplazmája, akár a sejtmagja hiányzik; ezek nélkül egyáltalán semmilyen sejt nem működhet. Pontosabban: a legegyszerűbb, úgynevezett prokarióta sejtek, amelyek közé a baktériumok is tartoznak, meghatározott alakú és szerkezetű magot ugyan nem tartalmaznak, de bennük is megtalálható az a DNS-gubanc, amely az öröklődő információkat hordozza, citoplazmájuk működését vezérli.

Az öröklődő információk között szép számmal vannak olyanok, amelyek nélkül az adott sejt életképtelen, de olyanok is, amelyek hiányában a sejt még élhet és működhet, legfeljebb nem olyan hatékonyan vagy nem abban a közegben, mint a teljes információkészlet birtokában. A genetikának és géntechnológiának vannak is olyan módszerei, amelyekkel ez ténylegesen megvalósítható. Ám ez az információhalmaz nem

felezhető, negyedelhető vagy tizedelhető, azaz nem távolítható el tetszőleges hányada anélkül, hogy a sejt tönkre ne menne.

A citoplazma felezhető, harmadolható, negyedelhető, azaz a citoplazmának tetszőleges (nem túl nagy) hányada eltávolítható a sejtből anélkül, hogy a sejt elpusztulna. Egy német kutató, Hartmann egyetlen amőbából minden másnap kioperálta a citoplazma kb. harmadát, s ezt 130 napon keresztül ismételte anélkül, hogy ebbe az amőba belepusztult volna. A citoplazma tehát valóban a leibnizi értelemben vett „természeti automata", amely osztható, amelynek a fele, a negyede, a tizede még mindig teljes értékű automata, ugyanúgy, ahogy az oszcilláló kémiai reakció esetében láttuk.

Ha tehát a citoplazma „felezhető", azaz „természeti" automata is meg fluid automata is, akkor már csak azt kell megvizsgálnunk, hogy vajon kémiai automata-e. Minden gép, műszer, készülék, minden folyamatosan működő rendszer működése energiaáramláson alapszik. A rendszerbe valahonnan energia jut be, és természetesen el is távozik belőle, de eközben odabenn úgy manipulálódik, hogy egy része kénytelen a rendszert működtetni, míg a másik része felhasználatlanul, többnyire hő alakjában távozik. Az ember alkotta működő rendszerek, a gépek, készülékek, automaták a felhasznált energiát úgy manipulálják, hogy az az ember számára hasznos munkát végezzen. Például a szél- vagy a vízimalomban a szél mozgási vagy a víz helyzeti energiája (vagy legalábbis annak egy része) manipulált mechanikai energiaként a gabona megőrlésére használódik fel, amit egyébként az embernek igencsak fáradságos munkával kellene elvégeznie. Munkavégzés folyik a tévékép képzésénél is a képalkotó elektronsugár ide-oda térítgetése révén, noha ez a munkavégzés számunkra közvetlenül nem érzékelhető. Itt az elektromos energia manipulálódik a készülékben.

A robbanómotort kémiai energia hajtja. Ám ez a kémiai energia a robbanás pillanatában térfogati energiává alakul át, s elnyomva a dugattyút, a továbbiakban már mechanikai energiaként manipulálódik a motorban vagy a hozzá tartozó járműben.

Az élő rendszereket is kémiai energia működteti, a táplálék kémiai energiája. S ez a megállapítás még a növényekre is igaz, csak éppen a növények a táplálékot is maguk állítják elő fotoszintézis útján. A fejlettebb élő rendszerekben ez a kémiai energia ugyancsak átalakulhat mechanikai energiává, például mozgássá, erőkifejtéssé vagy akár elektromos energiává, nemcsak az elektromos rájában, de például saját idegrendszerünkben is. Az alapműködés azonban – az a működés, ami magát az életet jellemzi – mindig kémiai jellegű. A legegyszerűbb élő rendszerekben, például a mikoplazmákban vagy a termoplazmákban nem találunk semmiféle mechanikai működést vagy elektromos berendezést. Itt már csakis kémiai folyamatok mennek végbe, és a végzett hasznos munka is kémiai: a rendszer saját anyagának termelése a növekedés és a szaporodás céljára.

Ha viszont ezek az élő rendszerek úgy működnek szabályozottan és vezérelten, hogy a bejövő energia kémiai energia, a hasznos munkavégzés is kémiai munkavégzés, és közben a kémiai energia nem alakul át mechanikai vegy egyéb energiává, akkor az energia manipulálásának is kémiai úton kell történnie. Ebben az esetben pedig a citoplazma szükségképpen nemcsak fluid automata, nemcsak „felezhető" automata, hanem kémiai automata is, éppen úgy, mint az oszcilláló kémiai reakció.

Azt persze nem nehéz elhinni, hogy egy élő kémiai automata roppant bonyolult szerkezet lehet, még a legkisebb, legegyszerűbb, legprimitívebb élő rendszer esetében is. Nem célszerű tehát maguknak a kémiai automatáknak a működési alapelveit ilyen bonyolult rendszerek vizsgálatával kezdeni, ha van más, egyszerűbb lehetőség is. Márpedig van, hiszen e rendszerek egyik típusát, az oszcilláló kémiai reakciórendszert már be is mutattuk. Mielőtt tehát visszatérnénk az élet keletkezésének a vizsgálatához, célszerűnek látszik a fluid kémiai automaták működési alapelveit az egyszerűbb kémiai rendszereken keresztül megismerni, s az így megismert alapelveket alkalmazni az életkeletkezés folyamataira.

3. REND A SEMMIBEN

Egy óra kerekei jól látható, meghatározott rendben helyezkednek el. Az óra csak akkor működik, ha kerekei ebbe a rendbe illeszkednek, semmiféle más elrendezés nem biztosíthatja a megfelelő működést. Ez a rend teszi lehetővé a szerkezeten keresztülhaladó energia megfelelő manipulálását, azét az energiáét, amely a rugótól indul, s a kerekek alkotta kényszerpályák sorozatán keresztül jut el a számunkra hasznos munkát végző mutatókig. *Az óra és a többi mechanikai szerkezet működése éppen ezen alapszik, a mechanikai energiák egymáshoz kapcsolt kényszerpályákra terelésén.* Egyik kerék sem mozdulhat el úgy, hogy a másik ne mozdulna vele, és az is szigorúan meghatározott, hogy az egyik kerék elmozdulására mekkorát és milyen irányban mozdulhat el a másik.

Az energia az elektromos-elektronikus berendezésekben is kényszerpályák sokaságán halad végig, csak itt az energia elektromos, a kényszerpályák pedig drótokból, integrált áramkörökből, chipekből és egyéb vezető és félvezető alkatrészekből állnak. Ezek között is rend van, nagyon is szigorúan meghatározott rend, s a kényszerpályákat jelentő drótokat nem köthetjük összevissza, ha azt akarjuk, hogy megszólaljon a rádió vagy meginduljon a villanymotor.

De miféle rend lehet egy pohár oldatban, amit ráadásul kedvünk szerint kavargathatunk is? Mik vannak rendezett állapotban egy kémiailag oszcilláló folyadékban, és azok a valamik miféle rendben vannak? *Valamiféle rendnek lennie kell, hiszen a rendszeren áthaladó energia szabályozottan manipulálódik benne! Kell lenniük kényszerpályáknak, amelyeken az energia célzottan áthalad, és kell lennie valamiféle meghatározott rendnek, amely a kényszerpályák között olyan kényszer-*

kapcsolatokat teremt, hogy az oldat automataként, meghatározott funkciót ellátni képes automataként működhessen!

A kémiai reakciónak is van iránya. Ha máshonnan nem, hát onnan még a kémiában járatlan ember is tudhatja ezt, hogy a vegyészek a kémiai egyenletek két oldalát összekötő egyenlőségjel helyébe időnként nyilat szoktak rajzolni, jelezvén, hogy a reakció „balról jobbra" halad vagy éppen fordítva. Gyakran kettős, oda-vissza mutató nyilat találunk az egyenlőségjel helyén, ami azt jelenti, hogy a reakció „balról jobbra" is meg „jobbról balra" is végbemehet, a reakcióban részt vevő vegyületek koncentrációitól függően. Ez a nyíl egyúttal a kémiai energia áramlását is mutatja, hiszen az egyenlet két oldalán nemcsak az anyagmennyiségeknek, hanem az energiamennyiségnek is meg kell egyezni az energiamegmaradás törvénye értelmében.

De hát honnan hová áramlik ilyenkor az energia? Bármilyen módszerrel vizsgálunk is meg egy oldatot, amelyben valamilyen kémiai reakció megy végbe, semmiféle módszerrel nem észlelhető, hogy ott az energia jobbról balra, balról jobbra vagy akár felülről lefelé vándorolna, netán fordítva. Az oldatban az anyag és az energia egyenletesen oszlik el, és ez a homogén eloszlás mindvégig megmarad a reakció során. Mi értelme van akkor a vegyészek irányt jelző nyilának, ha az a geometriai tér semmiféle irányával nem azonosítható?'

Kemény kérdés ez, de elsősorban a filozófia számára. Mert gondolkodásunk, szemléletünk, természettudományunk mindent három alaptényezőre vezet vissza: az anyagra (beleértve természetesen az energiát is), a térre és az időre. Azt mondjuk, az anyag az, ami objektíve létezik, ez a létezés a térben valósul meg, és változásai tükrözik az időt. Az anyaggal és az idővel e tekintetben nem is kerülünk összetűzésbe, de a tudomány számos (vagy tán számtalan) olyan változást tud regisztrálni, amely mellé egyértelmű irányt lehet rendelni anélkül,

' Itt meg kell jegyezni, hogy olyan oszcilláló reakcióelegyek is készíthetők, amelyekben a „ketyegés" nemcsak időfüggő, de térfüggő is, ezekben színhullámok vándorolnak különböző irányokban. Ez azonban egészen más kérdés, nincs ellentétben a homogén oszcilláló reakcióelegyekkel kapcsolatban mondottakkal.

hogy ez az irány bármiféle módon azonosítható lenne a geometriai tér valamely irányával. A mindennapi életben magunk is tapasztalhatunk számos ilyen változást, például a gazdaságban vagy akár saját testünkön is. Például az öregedés olyan jellegzetesen egyirányú folyamat, amely – sajnos – soha vissza nem fordítható, iránya azonban a geometriai tér egyetlen irányával sem azonosítható.

A természettudományok ilyen irányú problémáira megoldást kínál a matematika. Ugyanolyan módon, ahogy egy test geometriai helyzetének időbeli változását számítja egyenleteivel és ábrázolja grafikonjaival, a testek bármely más, nem a geometriai elmozdulásból származó változását is képes számolni és ábrázolni. Úgy csinál, mintha lennének olyan terek, amelyekben a kiterjedést nem hosszmértékkel, hanem például súllyal vagy bármi más mérhető vagy számítható mértékkel lehetne megadni, s ezekben az elképzelt, elvont (absztrakt) terekben, az úgynevezett *állapotterek*ben vizsgálja a folyamatok menetét irány és sebesség szerint.

Elsősorban a fizika igazolta, hogy ez az eljárás rendkívül gyümölcsöző, segítségével a világ változásai mennyiségileg is pontosan kiszámíthatók és megjósolhatók, és hogy a kapott eredmények megfelelnek a valóságnak. Modern technikánk kifejlődését ezek a módszerek tették lehetővé. Ma a mérnöknek, amikor gépeinek, készülékeinek tervezésénél egyenleteit alkalmazza, eszébe sem jut, hogy tulajdonképpen absztrakt állapotterekben gondolkodva tervezi meg az egyébként valós térben működő masináit.

A kémia is sikerrel alkalmazta az absztrakt állapottereket (igaz, inkább csak a fizikai-kémiai számításokban), a biológián belül pedig az ökológiában nyernek egyre nagyobb jelentőséget a sokváltozós állapotterek. Ám a vegyészek eleddig jobbára csak egy-egy reakciólépésben gondolkodtak, s ha egy bonyolultabb vegyületet akartak szintetizálni, ahol a kiindulási vegyületen több, netán sok átalakítást kellett végrehajtaniuk ahhoz, hogy a kívánt termékhez eljussanak, akkor e lépéseket egyenként hajtották végre, többé-kevésbé tisztán kipreparálva a közbülső termékeket. Így „állapotteres" vizsgálataik is zömmel ilyen egylépéses reakciókra vonatkoztak, és ki sem

fejlődött olyan vizsgálati módszer, amely több, netán sok egyszerre zajló, egymással bonyolult keletkezési-átalakítási kapcsolatban levő reakció viszonyait vizsgálta volna.

Az élő szervezetekben, még a legegyszerűbbekben is, több ezer kémiai reakció megy egyszerre végbe, és mindegyik legalább két (gyakran három, négy vagy több) másik kémiai reakcióval áll közvetlen kapcsolatban, de ezeken keresztül közvetve az összes többivel is. A biokémia kezdte meg hát e rendkívül bonyolult kémiai reakcióhálózatok vizsgálatát, és azok minőségi jellemzésében igen szép sikereket ért el, földerítve, hogy mi miből keletkezik, és mivé alakul. Ám e hálózatok mennyiségi leírásában fiaskót szenvedett. Ennek oka az, hogy e mennyiségi vizsgálatokat a kémiai kinetika segítségével próbálta elvégezni, ami a folyamatok időbeli lefutását vizsgálja. Ez differenciálegyenletek segítségével történik, ám az ilyen reakcióhálózatokat leíró differenciálegyenletrendszerek túl bonyolultak ahhoz, hogy - legalábbis általános alakjukban - matematikailag kezelhetők legyenek.

Pedig a megoldás a *matematikai kezelhetőség*ben rejlik. Egy kémiai reakció végterméke ugyanis újabb reagensek segítségével tovább alakítható egy harmadik vegyülettté, az egy negyedikké, ötödikké stb. Iránya persze — az absztrakt kémiai állapottérben — nemcsak az első reakciónak van, hanem a másodiknak, harmadiknak stb. is, így ezek az irányok a kémiai állapottérben egy kényszerpályát jelölnek ki, amelyen a kémiai energia mintegy végigmenni kényszerül. Ha eltekintünk a folyamat időbeli lefutásának vizsgálatától, s csak mérleget készítünk, mint egy vállalat főkönyvelője a pénzforgalomról az év végén, az események egyszerű számtani műveletekkel könnyen kiszámíthatók. Ezt hívják kémiai sztöchiometriának, ennek egyenleteit a nagyközönség „kémiai egyenletek", a tudomány pedig „sztöchiometriai egyenletek" néven ismeri.

A sztöchiometria alapján kémiai kényszerpályánk anyag- és energiamérlege egyszerű összeadásokkal könnyen kiszámítható, akárhány elemi reakciólépésből áll is a kényszerpályát alkotó reakciólánc. Csődöt mondhat azonban a sztöchiometria, ha a reakciólánc elágazó, és biztosan csődöt mond, ha a reakcióláncban *sztöchiometriai visszacsatolás* van.

Mi az, hogy sztöchiometriai visszacsatolás? Mondottuk, hogy a kémiai reakció az absztrakt kémiai állapottérben kijelöl egy meghatározott irányt. Ha a reakció végtermékéhez egy újabb reagenst adunk, akkor ez a lépés egy újabb, az előzőtől eltérő irányt jelöl ki. Az átalakítást újabb és újabb reagensekkel ismételve mintegy „vándorolni" lehet ebben a nem létező, absztrakt térben. Hogy melyik reakciónak milyen az iránya, az a reagensektől függ. Vannak esetek, amikor az egymás után következő reakcióutak végül is a kiindulási pontunkhoz vezetnek vissza, vagyis több vagy sok kémiai átalakítás után ugyanaz a vegyület képződik újra a reakcióelegyünkben, mint amivel az egész reakciósort elkezdtük. Ez felfogható úgy is, mintha körbejártunk volna a kémiai állapottérben. Ezt a körbenjárást illettük a sztöchiometriai visszacsatolás kifejezéssel. Szerencsére a kémia – sokkal egyszerűbben – csak kémiai körfolyamatoknak nevezi ezeket.

A *kémiai körfolyamat*ok elsősorban a biokémiában gyakoriak, sőt mivel minden enzim katalizálta reakció maga is körfolyamat, a biokémia alapvetően a körfolyamatok kémiája. De körfolyamat a híres Szent-Györgyi–Krebs-ciklus vagy az ugyancsak híres Calvin-ciklus is, amelyben a szén-dioxid cukrokká alakul át a növényi fotoszintézis során. És most már megérthetjük azt is, miért mondhattuk azt az enzimről, hogy „elvégez" egy kémiai átalakítást, noha az enzim csak egy anyag, semmi más; hogyan lehet az, hogy egy anyag „működik". Az absztrakt kémiai állapottérben ugyanis az enzim éppen azáltal „jár" körbe-körbe, hogy más anyagokkal reagál, s miközben azok átalakulnak, az enzim eredeti formájába alakul vissza.

Ezt az egész folyamatot kétféle irányból lehet szemlélni. Vizsgáljuk meg a dolgot a benzinmotor példáján, mondjuk, egy négyütemű benzinmotorén. Ez szintén körfolyamatban működik, olyanban, amelynek négy elemi lépése, négy „üteme" van. Hozzászoktunk, hogy motorunkat a munkavégzés szemszögéből vizsgáljuk, hiszen munkavégzésre használjuk. Így azt mondjuk, hogy motorunk a benzin energiájával működik, miközben szén-dioxidot és vízgőzt bocsát ki (ugyanis ezek alkotják a kipufogógáz zömét).

Feltételezem, az olvasók meglehetősen megrökönyödnének, ha azt hallanák valahol, hogy a benzinmotor olyan szerkezet, amely a benzin szén-dioxiddá és vízzé való átalakulásának sebességét sokmilliószorosan felgyorsítja. Pedig ez *is* igaz. A kémia az igazságnak ezt az oldalát vette észre, amikor az enzimekben fölfedezte a katalizátorokat. Meglátta, hogy az enzimek (katalizátorok) olyan anyagok, amelyek képesek a kémiai átalakulásokat (akár sokmilliószorosan is) felgyorsítani. Ugyanakkor az enzimek kémiai motor természetét egyáltalán nem ismerte föl.

A katalizátorelv azért csak féligazság, mert sem a hogyan kérdésére, sem arra nem ad önmagában felvilágosítást, hogy az enzim honnan veszi működéséhez az energiát. Sokkal precízebb lenne az a megfogalmazás, hogy az enzim olyan kémiai motor, amelyet az átalakítandó anyag (szubsztrát) hajt, miközben maga a szubsztrát (alacsonyabb energiatartalmú) termékké alakul át. A szubsztrát az „enzimmotor" benzinje.

A hasonlat csak annyiban sántít, hogy a benzinmotor nem egyetlen kerék, hanem bonyolult szerkezet, míg az enzimciklus csak egyetlen „kémiai keréknek" felel meg. De ahhoz, hogy *kémiai* energiával *mechanikai* munkát végezzünk, összetett masina kell. Megmaradva az utóbbi energiafajtánál, a mechanikából is hozhatunk egyszerű példát. A vízkerék nem arra szolgál, hogy a magasban lévő vízből alacsonyan levő vizet csináljon, hanem fordítva: a magasan levő víz hajtja a vízkereket, miközben alacsony helyzeti energiájú vízzé alakul át.

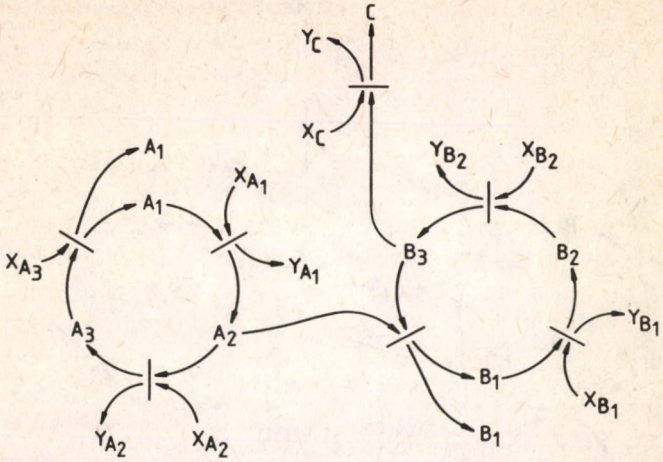
Azt mondottuk, hogy a biokémia alpvetően a körfolyamatok kémiája. Ez többszörösen is igaz. Igaz abban az értelemben, hogy az anyagcsere minden egyes kémiai reakcióját külön arra specifikus enzim katalizálja, vagyis minden kémiai átalakítás egy-egy kis kémiai körfolyamat. De igaz abban az értelemben is, hogy az anyagcsere-folyamatokban az enzim katalizálta reakciók maguk is kémiai körfolyamatokba (például Szent-Györgyi–Krebs-ciklus) szerveződnek. És ezek a ciklusok össze vannak kapcsolva. A sejt anyagcseréje olyan, mint egy ezernyi fogaskerékből álló szerkezet, csak nem a geometriai, hanem a kémiai állapottérben megszabott rend szerint működik.

Ez persze szemléltető hasonlatnak jó, mondhatná valaki, de az alapelvek itt egészen mások! Hol vannak a kerekek fogai? A kémiai ciklusok nem fogakkal kapcsolódnak egymáshoz, hanem úgy, hogy ami az egyik ciklusnak terméke, az a másiknak hajtóanyaga.

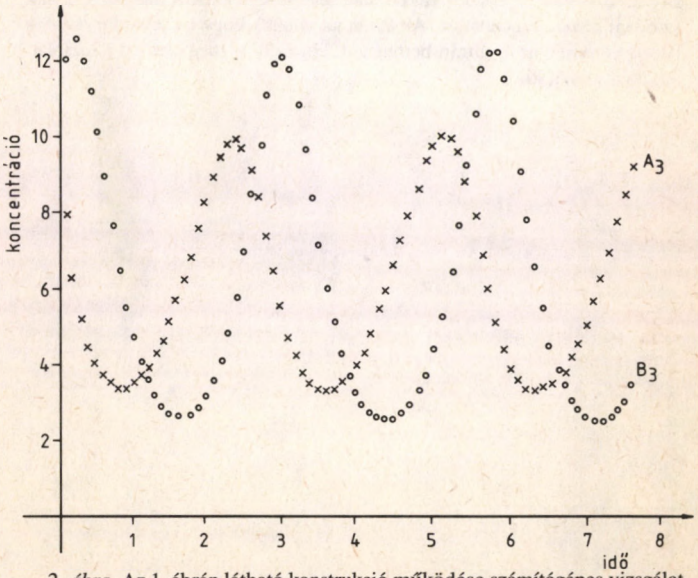
Hogy az alapelvek azonosak-e vagy különbözők, azt akkor tudnánk eldönteni, ha a kétféle masina mindegyikét matematikai módon le tudnánk írni. A klasszikus sztöchiometria azonban, mint mondottuk, nem alkalmas a kémiai körfolyamatok leírására. Szerencsére megszületett az ún. körfolyamati sztöchiometria, amely lehetővé teszi e ciklusok és az egyszerűbb hálózatok algebrai számítását, sőt a ciklusok kapcsolódási feltételeinek matematikai megfogalmazását is. És megdöbbentő módon *ugyanaz a matematikai egyenlet írja le a kémiai körfolyamatok kapcsolódási szabályait, mint a fogaskerekekéit.*

Ez persze egyáltalán nem jelenti azt, hogy a kémiai körfolyamatok fogaskerekek lennének. Azt viszont jelenti, hogy egy megfelelő absztrakt kémiai állapottérben (pontosabban sztöchiometriai állapottérben) gondolkodva, íróasztalnál ülve, mód nyílik fluid kémiai automaták egzakt tervezésére, hasonlóan ahhoz, ahogy a gépészmérnök a maga mechanikai automatáit vagy ahogy az elektromérnök a rádiót, a számítógépet tervezi.

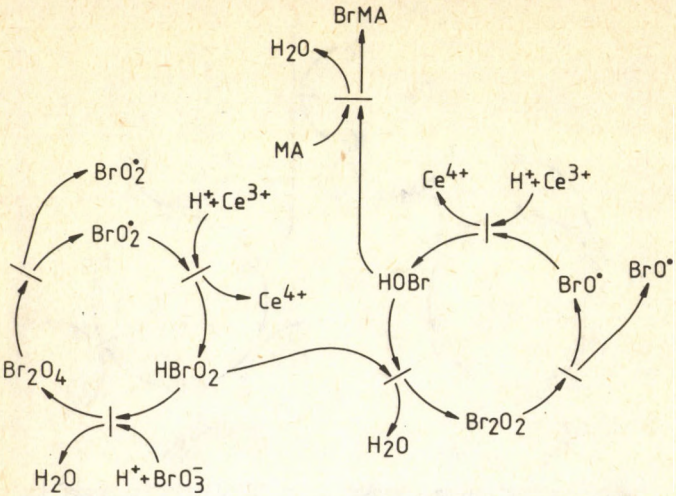
Itt nincs lehetőség arra, hogy e tervezés csínját-bínját ismertessük, ha az olvasó a részletek iránt érdeklődik, a megfelelő szakfolyóiratokban, illetve szakkönyvekben kell ezeknek utánanéznie. A szerző több egyszerűbb-komplikáltabb „kémiai masinát" tervezett íróasztal mellett, néhányat ipari technológiaként meg is valósított. Példaként – pusztán abból a célból, hogy érzékeltessük, hogyan is néz ki egy ilyen fluid masina „kapcsolási rajza" – az *1. ábrán* bemutatjuk a szerző egyik „ketyegő szerkezetének" tervét. A *2. ábra* azt mutatja be, hogy a számítógépes vizsgálatok szerint hogyan működik egy ilyen konstrukciójú kémiai masina. A *3. ábrán* viszont az látható, hogy a leghíresebb oszcilláló kémiai rendszer, az úgynevezett Belouszov–Zsabotyinszkij-reakció elemi lépései épp elhelyezhetők egy ilyen hálózatban.



1. ábra. Egy fluid masina, pontosabban egy „fluid ketyegő szerkezet" kapcsolási rajza, amelyet a szerző íróasztal mellett, pusztán a kémiai reakciók alaptulajdonságainak figyelembevételével konstruált.



2. ábra. Az 1. ábrán látható konstrukció működése számítógépes vizsgálat alapján. Jól látható, hogy az oldatban levő oldott anyagok koncentrációja „ide-oda leng", azaz oszcillál.



3. ábra. A leghíresebb kémiai oszcilláló rendszernek, amelyet felfedezőiről Belouszov—Zsabotyinszkij-reakciónak neveznek, a kutatók már felderítették az elemi kémiai folyamatait. Az ábrán jól látható, hogy e kémiai folyamatok között pontosan az 1. ábrán bemutatott, elméletileg megtervezett kapcsolatrendszer alakul ki.

3. ÉS KI A KONSTRUKTŐR?

Nagyszerű dolog, mondhatná a kedves olvasó, a tudomány odáig jutott, hogy valóságban nem létező kerekeket egy pusztán elképzelt térben láthatatlan rendbe tud elrendezni, s ezáltal olyan masinákhoz jut, amelyek valóságosan léteznek, működnek. Ez igazán csúcsteljesítmény. Az is nagyszerű felismerés, hogy az élő rendszerek is ilyen láthatatlan kerekekből, elképzelt térben összeállt, bonyolult fluid masinák. De ha ez igaz, akkor alighanem igazuk van azoknak, akik azt mondják, hogy ilyen magától nem keletkezhetett! Hiszen most már ott tartunk, hogy nemcsak a genetikai programnak kellett volna magától megszületnie, hanem az általa vezérelt masinának is magától kellett volna összeállnia! Nyilvánvalóan szükség volt egy konstruktőrre, aki egyrészt megtervezte a vezérlő programot, de másrészt megtervezte magát a vezérelt masinát is! Ki volt tehát a konstruktőr, aki ezeket a zseniális masinákat megtervezte, és ki volt a vegyész, aki e terveket megvalósította?

Ahhoz, hogy e kérdésekre választ adhassunk, először meg kell ismerkednünk a kémiai „kerekek" egy speciális típusával, az *önreprodukáló* kémiai „kerekekkel". A kémiában ilyenek is léteznek.

Az élő rendszerek önreprodukáló rendszerek, hiszen alaptulajdonságuk a szaporodóképesség. Ez trivialitás. Az már kevésbé magától értetődő, hogy önreprodukáló automatákat mesterségesen is lehetne készíteni, annál is inkább, mert ilyet sem mechanikus, sem pedig elektronikus kivitelben a mai napig senki nem készített. De Neumann János bebizonyította, hogy ez elvileg lehetséges, így reményünk van arra, hogy előbb-utóbb meg is valósul. Arra azonban Neumann János sem gondolt, hogy olyan automaták is létezhetnek, amelyek

úgy reprodukálódnak, hogy az egyes alkatrészeik, kerekeik reprodukálják magukat. Nem is gondolhatott, hiszen a „kemény" automaták esetében ennek geometriai, térbeli akadályai vannak. Gondoljuk csak el, mi lenne a következménye, ha az autónk úgy reprodukálná magát, hogy a főtengelye vagy a kerekei menet közben szaporodnának. A kémiai „kerekek" reprodukciójának viszont térbeli akadályai nincsenek, így a kémiában mind az alkotórészek önreprodukciója, mind pedig a masináknak az alkotórészek önreprodukciójával történő reprodukálása elvileg és gyakorlatilag is lehetséges.

Képzeljük el, hogy van egy kétszénatomos (és néhány egyéb atomot tartalmazó) molekulánk, amely reagálni tud egy egyszénatomos molekulával. Az eredmény egy háromszénatomos molekula. A következő reakcióban ez ismét reagál egy egyszénatomossal, így négyszénatomos molekulát kapunk. Ha ez ismét reakcióba lép egy egyszénatomossal, ötszénatomos molekula az eredmény. Tegyük fel, hogy ez az ötszénatomos instabil, és utolsó reakciólépésként kettéhasad egy kétszénatomos és egy háromszénatomos molekulára. Ha a kétszénatomos termék ugyanolyan, mint a kiindulási kétszénatomos molekulánk volt, akkor a kiindulási pontunkhoz érkeztünk vissza, azaz kémiai körfolyamatot kaptunk, hiszen a keletkezett végtermék ismét és ismét nekiindulhat és végigmehet a vázolt reakciók sorozatán, s minden egyes ciklusban egy-egy háromszénatomos molekula keletkezik. Akár azt is mondhatnánk tehát, hogy körfolyamatunk olyan kémiai masina, amely képes egyszénatomos molekulákból folyamatosan háromszénatomosokat gyártani.

De mi történik akkor, ha ebben a felvázolt reakciósorozatban már a négyszénatomos termék is instabil, s mielőtt reagálna egy újabb egyszénatomos molekulával, szétesik két (a kiindulásival azonos) kétszénatomos molekulára? Ekkor olyan masinát kapunk, amely egyrészt kétszénatomos molekulákat gyárt, másrészt maga is mindig visszaalakul kétszénatomossá. Vagyis a ciklus végén a kiindulási molekulánkból kettő van jelen. Most mindkettő reakcióba léphet, s mire végighaladnak a cikluson, már 4 darab lesz belőlük, a harmadik ciklus végére 8, majd 16, 32, 64, 128 stb., vagyis a körfolyamatképző mo-

lekulánk szaporodik! De hiszen ilyen kémiai rendszerekkel már találkoztunk a könyv elején. A szervezet általános energiahordozójáról, az ATP-ről elmondtuk, hogy szintén önreprodukáló folyamatban termelődik, s az ilyen folyamatokat autokatalitikus folyamatoknak neveztük. Sőt magáról a citoplazmáról is azt állítottuk, hogy autokatalitikus rendszer! Kimutattuk, hogy ilyenek nélkül nem működhet élőlény, hogy ez az a tőke, amit a genetikai anyagba írt tudás kamatoztatni képes.

Léteznek tehát önreprodukáló kémiai „kerekek". Nemcsak az említett ATP-szintézis ilyen, ilyen az előzőkben emlegetett Calvin-ciklus is, sőt a Szent-Györgyi–Krebs-ciklusnak is van egy fordított irányban működő, önreprodukáló változata, amelyet reduktív karbonsavciklusnak neveznek. Ezek nem olyan egyszerűek, mint amit itt szemléltetési céllal levezettünk, a molekulák is sokszénatomosak és meglehetősen bonyolultak, s a ciklusok sem három-négy lépésből állnak. S ráadásul minden egyes lépésük enzim katalizálta reakció. Az élet keletkezésekor viszont aligha álltak rendelkezésre a megfelelő enzimek az önreprodukáló „kerekek" kialakulásához. Vajon ismerünk olyan autokatalitikus körfolyamatokat, amelyek lépéseit nem enzimek katalizálják?

Tessék most már egy kissé részletesebben megnézni az előző fejezet végén bemutatott „ketyegő kémiai masina" két kerekét! Az *1. ábrán*, amely a folyamatokat elvont módon, általánosságban ábrázolja, azt látjuk, hogy az első körfolyamatban az A_1-gyel jelzett, a második körfolyamatban pedig a B_1-gyel jelzett komponens duplázódik meg a ciklus egy-egy fordulata során. Vagyis mindkét körfolyamat autokatalitikus, fluid ketyegő szerkezetünk kerekei önreprodukáló kerekek. A kémia nyelvén szólva: két autokatalitikus körfolyamat ravasz összekapcsolásával nyertük az oszcilláló kémiai rendszert.

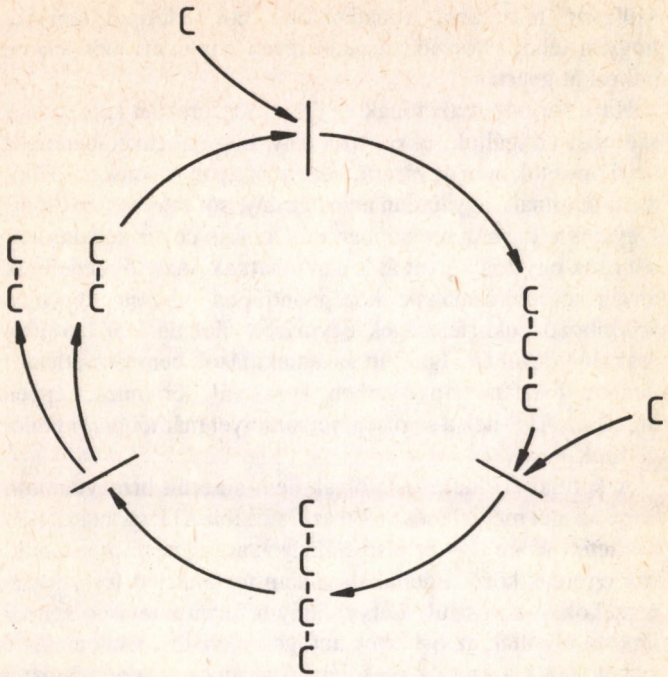
Ugyanerre az eredményre jutunk, ha a *3. ábrát* vizsgáljuk. Itt az első körfolyamatban a BrO_2, a másodikban a BrO mennyisége duplázódik meg egy-egy ciklus során, hogy azután a következő pillanatban már ez a megduplázódott mennyiség lépjen reakcióba, fordulatról fordulatra megkettőződve.

De ha ez így van – mondhatná valaki –, akkor ezen anyagok mennyiségének exponenciálisan növekednie kellene, nem pedig oszcillálnia, s a 2. *ábra* mégis oszcillációt mutat! Nos, éppen azért ravasz ez a konstrukció, mert az exponenciális növekedésből csinál oszcillációt. Ezt azáltal éri el, hogy a második körfolyamat az első körfolyamat anyagaiból „táplálkozik", miközben saját termékét is fogyasztja a BrMA-hoz (brómmalonáthoz) vezető kémiai megcsapolás. Olyan ez, mint a nyúl–róka viszony. A nyulak exponenciális szaporodását meggátolja a rókák szaporodása, a rókákét pedig az, hogy ha túlszaporodnak, éhen pusztulnak. Az ilyen kétkomponensű zsákmány–ragadozó viszonyról viszont Lotka és Volterra már századunk elején kimutatta, hogy az a populációk nagyságának oszcilláló változásához vezet.

No de, e kis kitérő után, amelyet pusztán az érdekesség kedvéért tettünk, térjünk vissza az önreprodukáló kerekeinkhez, az autokatalitikus reakciókhoz. Felsoroltuk az autokatalitikus körfolyamatok néhány olyan példáját, amelyekben szerves vegyületek keletkeznek, de azokról azt mondtuk, hogy túl bonyolultak. Azután bemutattuk, hogy a Belouszov—Zsabotyinszkij-reakció elemi lépései egyszerű autokatalitikus körfolyamatokba szervezhetők, de ott a körfolyamat komponensei nem szerves vegyületek. Vajon létezik *szerves vegyületekből álló* egyszerű, néhány lépéses autokatalitikus körfolyamat is?

Igen, mégpedig pont olyan, amilyent bemutattunk: kétszénatomosból olyan négyszénatomos molekulát csinál, amely két kétszénatomosra eshet szét. Az a neve, hogy formóz reakció. A kiindulási anyag a kétszénatomos glikolaldehid. Ez reagál az egyszénatomos formaldehidmolekulával, az eredmény a háromszénatomos glicerinaldehid. Ez egy további formaldehidmolekulával reagál négyszénatomos cukrot képezve, amely viszont szétesik két kétszénatomos glikolaldehid-molekulára. Ezekből kiindulva a folyamat kezdődik elölről *(4. ábra)*.

Idestova egy évszázada ismert ez a reakció. A valóságban persze ez sem ilyen egyszerű, hiszen számos mellékreakcióra is lehetőség van, például a négyszénatomos cukor ötszén-



4. ábra. A fluid masinák legígéretesebb tulajdonsága, hogy önreprodukáló alkatrészek is konstruálhatók belőlük, amelyekből önreprodukáló, sőt szaporodó automaták állíthatók össze. Az élő rendszerek is ilyen alapon biztosítják növekedésüket és szaporodásukat. Az ábra egy igen egyszerű „önreprodukáló kémiai kerék" működési elvét mutatja be, megfelelő kétszénatomos szerves molekula (glikolaldehid) példáján. Ha ez egy egyszénatomos molekulával (formaldehid) reagál, háromszénatomos molekulává (glicerinaldehid) alakul, amelyből egy újabb reakcióban négyszénatomos molekula (tetróz) lesz. Ez azonban el tud bomlani két kétszénatomos (glikolaldehid) molekulára, s ezzel a kiindulási molekulánk reprodukálódott. Ám a folyamat mindkét molekulával folytatódhat, a következő ciklusban 4, majd 8, 16, 32, 64 stb. glikolaldehid molekulát eredményezve. Az ábrán az áttekinthetőség kedvéért a molekuláknak csak a szénvázát tüntettük fel.

atomossá is átalakulhat, az hatszénatomossá, ezek visszacsatolódhatnak az alapreakcióhoz stb. Így igen bonyolult reakcióhálózat alakulhat ki, amely azonban – és most ez a lényeg – összességében is autokatalitikus. Egy csomó szabadalom is

született már arra vonatkozóan, hogy formaledehidből hogyan lehet a formóz reakció révén nagyipari méretekben cukrokat gyártani.

Ha a formóz reakciónak az élő rendszerekkel kapcsolatos szerepét vizsgáljuk, akkor az a tény, hogy a reakcióban részt vevő anyagok nem egyszerű, hanem nagyon is bonyolult hálózatot alkotnak, egyáltalán nem hátrány, sőt kifejezetten előny. Ugyanis a formóz reakcióban mindenféle cukor keletkezhet, sőt ezek egymás között át is alakulhatnak. Az élő rendszerek anyagcsere-hálózatának középpontjában viszont éppen a különböző cukorféleségek egymásba alakulásával létrejövő reakcióhálózat áll. Igaz, itt az átalakulások nem közvetlenül, hanem foszfátszármazékokon keresztül történnek, éppen annak az ATP-nek a segítségével, amelyet már többször emlegettünk.

A kémiai evolúció kutatóinak nem sikerült bizonyítaniuk, hogy az élet megjelenése előtt az Ősföldön ATP spontán keletkezhetett volna. Így az első élőlények anyagcseréjében a cukrok egymás közötti átalakulása sem történhetett foszfátszármazékokon keresztül. Lehet, hogy a formóz reakció kémiai lépései alkották az őslények anyagcsere-hálózatának alapját? Lehet, hogy a formóz reakcióhálózat anyagai képezték azt a tőkét, amit azután az élet kamatoztathatott?

A formaldehid a Világegyetem egyik leggyakoribb szerves vegyülete. Jelen volt az Ősföld atmoszférájában is, sőt nemcsak jelen volt, hanem a Nap ultraibolya sugarainak, a villámlásnak, a radioaktív, a kozmikus sugárzásnak stb. hatására folyamatosan keletkezett is a légkörben levő metánból. Két formaldehid-molekulából egy glikolaldehid-molekula képződik. Ez a reakció nagyon lassú ugyan, de végbemegy. A glikolaldehid és a formaldehid közötti további reakciók már meglehetősen gyors folyamatok, így biztosak lehetünk abban, hogy a formóz reakció az Ősföld egyik leggyakoribb kémiai folyamata volt. És feltehetően az egyik leggyakoribb kémiai folyamatrendszer a Világegyetem minden olyan pontján, ahol a víz folyékony fázisként megjelenik.

Az önreprodukáló „kereket" tehát nem kellett megtervezni, nem kellett sem matematikát alkalmazó konstruktőr, sem

lombikkal dolgozó vegyész ahhoz, hogy létrejöjjön. Konstruktőrnek ott volt a természet, lombiknak a formálódó ősbolygók. Az önreprodukáló kémiai kerekek tehát ember vagy más értelmes lény beavatkozása nélkül, maguktól keletkezhetnek az arra alkalmas körülmények között.

Említettük viszont, hogy a formóz reakció nem egyszerűen egy önreprodukáló kémiai kerék, azaz nem egy egyszerű autokatalitikus ciklus, hanem bonyolult önreprodukáló hálózat, amelyben többszörös visszacsatolás van, s amelyben mindenféle cukor keletkezhet. Ez a rendszer valójában már egy bonyolult kémiai masinaként fogható fel, önreprodukáló kémiai masinaként, hiszen említettük, hogy e bonyolult kémiai reakcióhálózat egésze is autokatalitikus tulajdonságú. Ha pedig így van, akkor nemcsak az önreprodukáló kémiai „kerék", hanem a bonyolultabb önreprodukáló kémiai masinák létrejöttéhez sem kell konstruktőr, azok is létrejöhetnek maguktól alkalmas körülmények között.

Bőven alátámasztja ezt az a rengeteg különféle kísérlet, amit a szerves vegyületek ősföldi körülmények közötti spontán keletkezésével, azaz a kémiai evolúcióval kapcsolatban végeztek a világ különböző laboratóriumaiban. Igaz, ezekben a kémiai evolúciós kísérletekben szinte soha nem azt vizsgálták, hogy milyen kémiai reakciórendszerek, milyen fluid kémiai masinák működnek, hanem azt, hogy milyen termékek keletkeznek. Ám az a tény, hogy e reakcióelegyekben néhány egyszerű alapvegyületből sokféle és nagyon bonyolult vegyület keletkezik, önmagában is bizonyítja, hogy ott nagyon sokféle kémiai folyamatnak kell egy időben és egymásra hatva végbemennie. A kérdés most már csak az, hogy ezek a spontán létrejövő kémiai masinák alkalmasak voltak-e arra, hogy az élő rendszerek masináiként fukcionáljanak.

A formóz reakcióban keletkező ötszénatomos cukrok egyike a ribóz. Ez ugyanaz a ribóz, mint amihez a ribonukleinsavakban a „betűjelként" szolgáló nukleotidbázis csatlakozik. A formóz reakció tehát alkalmas masina arra, hogy alapanyagot gyártson a vezérlőegység önreprodukciójához. A formóz reakció egy másik közbenső terméke a glicerinaldehid, amelyből glicerin keletkezhet, a biológiai membránok egyik

alapanyaga. A nyersanyagellátó szerepet tehát a formóz reakció a biológiai membránok felépítésében is képes betölteni. Mindezek alapján úgy tűnik, ez a reakciórendszer valóban alkalmas arra, hogy belőle spontán módon élő rendszerek fejlődjenek ki ősföldi körülmények között. De hogy ez valóban így van-e, annak eldöntéséhez ismernünk kellene az élő rendszerek alapkonstrukcióját. Szükségünk lenne annak a legegyszerűbb fluid masinának a tervrajzára, kapcsolási rajzára, amelyről már azt állítjuk, hogy él. Csak ezután vizsgálhatjuk meg, hogy a formóz rendszer funkcionálhat-e egy ilyen masina részeként.

5. KEMOTONOK

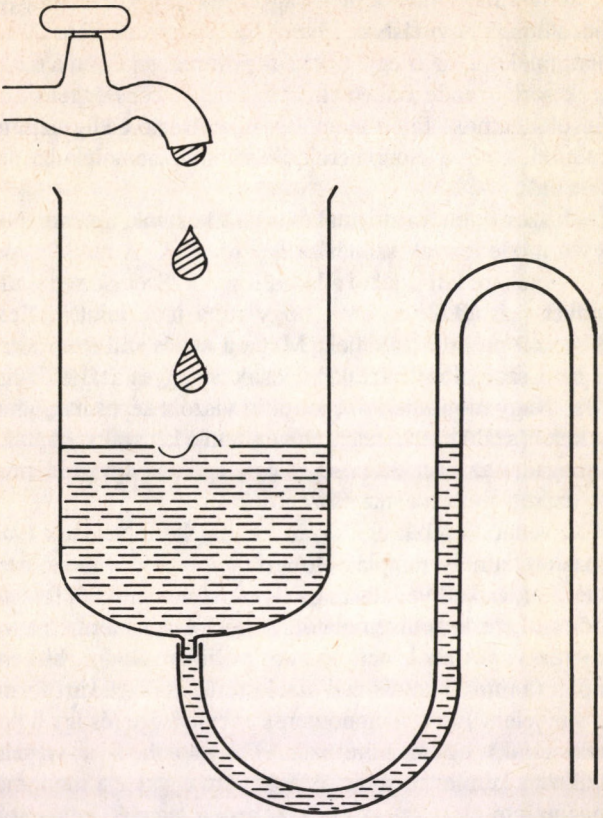
Hohó! - kontrázhat ismét az olvasó. Az rendben van, hogy ilyen fluid kémiai masinák keletkezhettek az őslevesben, még az önreprodukció követelménye sem akadály. Végtére is ezek a masinák nem mások, mint kémiai folyamatok, s kémiai folyamatok valóban működnek a természetben ma is, maguktól, ha nem is önreprodukáló kivitelben. Csakhogy azt mondtuk, az élő rendszerek programvezérelt kémiai masinák, s hol itt a program? Hogy a kémiai folyamatok között önszabályozás lép fel, s hogy egy bonyolultabb kémiai reakcióhálózatban a visszacsatolások révén a folyamatok szabályozottan mennek végbe, az elképzelhető. De a programvezérléshez külső beavatkozás kell, valami, ami a masinán kívüli információ alapján szabályozza, hogy a masina mikor, hogyan működjön. És végső fokon Crick sem azt mondta, hogy a *masina* nem jöhet létre, hanem azt, hogy a *program* spontán keletkezésének nincs számottevő valószínűsége!

Ez valóban így is van, ha programon valamiféle törvénykönyvet, mágneslemezre vagy -szalagra felvitt kódolt szöveget, de legalábbis valami lyukkártyába lyukasztott bonyolult lyukrendszert értünk. Csakhogy a technika sem ilyen bonyolult kódolt szövegekkel működtette vezérelt masináinak őseit, hanem nagyon is egyszerű, primitív szerkezetekkel! Miért gondoljuk akkor, hogy az élet fordítva járt el, és konstrukcióit a legbonyolultabb módokon kezdte megvalósítani?

E kérdés mélyebb megértéséhez tekintsünk meg először egy igen egyszerű programvezérelt mechanikai szerkezetet. Legyen ez egy alul kifolyóval ellátott edény, amelybe lassan víz csepeg. Ez persze önmagában még nem programvezérelt rendszer, hiszen ahogy csöpög bele a víz, úgy folyik is mind-

járt ki belőle. Programvezéreltté akkor válna, ha volna az alján egy olyan csap, amibe be lehetne programozni, hogy akkor, és csak akkor nyíljon ki, amikor az edényben az általunk kívánt tetszés szerinti mennyiségű víz már összegyűlt, s kiürülés után ismét zárjon. Ez persze roppant egyszerűen megvalósítható: a kifolyónyíláshoz hozzá kell erősíteni egy gumicsövet, azt először a kívánt magasságig fölfelé vezetni, s onnan visszahajlítani az edény alá. Így az edénybe csepegő víz eleinte nem tud elfolyni, s ahogy emelkedik a vízmagasság az edényben, úgy emelkedik a gumicsőben is. Egészen addig, amíg el nem éri a cső hajlatát. Ekkor ugyanis, ha a víz kitölti a cső teljes keresztmetszetét, akkor lefelé indulva maga után szívja az edényben levő vizet is; a bort is így fejtik a hordóból gumicsővel *(5. ábra)*. Amikor az edény kiürült, a folyamat kezdődik elölről. Hogy mennyi legyen az egy-egy alkalommal elfolyó víz mennyisége, az a gumicső visszahajlásának magasságával „programozható".

Ha valami ilyesmit meg tudnánk valósítani a kémiában is, akkor ott is egy primitív programvezérelt rendszerhez juthatnánk anélkül, hogy kódolt információt kellene a vezérléshez alkalmazni. Persze itt nem víznek kellene felgyűlnie egy edényben, hanem valamilyen vegyületnek egy oldatban. S az „elfolyásnak" sem gumicsövön keresztül kellene történnie, hanem kémiai úton, azaz a kérdéses vegyület átalakulásán keresztül. Úgy kellene átalakulnia, hogy többé vissza ne „folyhasson", vissza ne alakulhasson. Például úgy, hogy a kérdéses vegyület molekulái erősen összekapcsolódjanak, „szétszakíthatatlan" molekulaláncot alkossanak, azaz polimerizálódjanak. Programvezérelten működő rendszerünknek tehát kellene tartalmaznia egy kémiai masinát, amely egy polimerizációra képes vegyületet (ún. monomert) termel, továbbá egy olyan mechanizmust, amelyik biztosítaná, hogy ez a vegyület (a monomer) ne polimerizálódhasson mindaddig, amíg a kívánt töménységet (koncentrációt) el nem érte. Ha viszont már elérte, akkor induljon meg a polimerizáció, fogyassza el, „szívja el" a monomereket, visszaállítva egy alapkoncentrációt, amelyet a masina rész azután ismét elkezd növelni.



5. ábra. Ha programvezérlésről van szó, napjainkban mindenki automatikusan az elektronikára gondol, jóllehet az elektronika kifejlődése előtt is széles körben alkalmaztak mechanikus programvezérlést. Léteznek a programvezérlésnek egészen primitív formái is: az ábrán látható rendszerben az egy-egy alkalommal leszívódó víz mennyisége a szifonhajlat magasságának állításával „programozható". Hasonló — kémiai — rendszer valósítható meg a fluid masinák komponenseinek szakaszos „leszívására".

A monomer persze akkor kezd polimerizálódni, amikor ő akar, korántsem valami program szerint. Kivéve ha a polimerizáció úgynevezett templátpolimerizáció. Hogy ez micsoda? A templát szó mintát jelent. A templátpolimerizáció pedig

azt, hogy a monomerek nem vagy csak igen kis sebességgel kapcsolódnak egymáshoz, kivéve ha rendelkezésükre áll egy mintamolekula, azaz egy már kész polimer, amelyen a monomerek sorba rendeződhetnek, majd nagy sebességgel összekapcsolódhatnak. Így a templátpolimerizáció addig nem tud beindulni, amíg a monomerek oldatába mintamolekulát nem helyezünk.

De hiszen ilyen folyamattal már találkoztunk, azt mondtuk, hogy a nukleinsavak szintézise így történik. A nukleinsavak két összetekeredett szálból álló polimerek. Széttekeredés után mindkét szál alkalmas arra, hogy rajta mint mintafelületen egy új szál polimerizálódjék. Maga a kettős szál természetesen nem szolgálhat mintaként, csak az egyes szálak különkülön. Nagy monomerkoncentráció viszont képes megbontani a kettős szálú szerkezetet, elősegíteni a két szál szétválását. Ez megadja az elvi lehetőséget egy egészen egyszerű programvezérelt fluid masina összeállítására.

Kell vennünk tehát egy olyan kémiai körfolyamatot (vagy hálózatot), amely templátpolimerizációra képes monomereket termel, és kell vennünk egy ilyen monomerekből felépülő kettős szál szerkezetű templátot. A körfolyamat termeli a monomereket, ám azok nem tudnak polimerizálódni, hiszen a templát (a minta) kettős szál szerkezetű, azaz letakart formában van jelen. Ezért a monomerek mennyisége (és így a koncentrációjuk) egyre növekszik. Ez tekinthető a vízszintemelkedés kémiai megfelelőjének. Ám egyszer a monomerkoncentráció eléri azt az értéket, ami a templát kettős szálú szerkezetét megbontja, ekkor mindkét mintaszálon megindul a polimerizáció, és mindegyik szálon felépül egy teljesen új szál. Eközben természetesen a monomerek koncentrációja lecsökken, hisz egy részük felhasználódik az új szálak felépüléséhez. Ez a folyamat a tartályban levő víz leszívódásának felel meg. Amikor az új szál felépült, a régi és a rajta levő új szál ismét kettős szál szerkezetet alkot, és nem képes mintaként szolgálni. Megindulhat hát a monomerkoncentráció növekedése – azaz a tartály ismételt feltöltődése –, míg el nem éri azt az értéket, amelynél megbomlik a kettős szál szerkezet. Ekkor a folyamat kezdődhet elölről.

Elvileg tehát sikerült egy olyan fluid kémiai masinát felvázolni, amely a szifonos leszívató szerkezettel analóg primitív programvezérléssel működik. A különbség a vezérlési elvben az, hogy a szifonos rendszerben a feltöltődés mértékét, itt a „leszívatás" mértékét lehet szabályozni. A templátszerkezet megbontásához szükséges koncentráció ugyanis adott templátféleség esetén adott érték, az viszont, hogy egy-egy polimerizációs periódusban mennyi monomer fogy el (vagyis a monomerkoncentráció mennyire „szívódik le"), a jelen levő templátmolekulák számától és attól függ, hogy egy-egy új szál felépítéséhez hány darab monomerre van szükség, vagyis a mintaszálak hosszától.

Ám konstrukciónk még nem tökéletes. A polimerizációs periódusban ugyanis minden mintaszálon új szál keletkezik, vagyis a minták mennyisége megkétszereződik. Így a rendszer a következő ciklusban kétszer annyi, a harmadikban négyszer annyi stb. monomert fog felhasználni a polimerizációhoz. Ahhoz, hogy zavartalanul működhessen, gondoskodni kell arról, hogy a keletkező monomerek mennyisége is megduplázódjon ciklusonként. Az eddig mondottak már sugallják a megoldást: nem egyszerű kémiai körfolyamatot, hanem autokatalitikus körfolyamatot kell használni a monomerek gyártására. Így viszont egy olyan programvezérelt fluid masinához jutunk, amelynek az alkatrészei is önreprodukálók, és maga a rendszer is ciklusról ciklusra reprodukálja magát.

Hasonló módon, mint ahogy az *1. ábrán* látható oszcilláló fluid masinának, ennek a programvezérelt önreprodukáló kémiai masinának is el lehet készíteni az elvi „kapcsolási rajzát", az elemi reakciólépések feltüntetésével. És az emlegetett körfolyamati sztöchiometria lehetővé teszi, hogy a rendszer konstrukcióját, sztöchiometriai viszonyait pontosan, egzakt módon ki lehessen számítani, sőt az egész rendszert egyetlen körfolyamati bruttóegyenlettel mennyiségileg és minőségileg le lehet írni. Ám az elemi reakciólépések ismeretében a rendszer működését a kémiai kinetika módszereivel is vizsgálhatjuk, s így lehetőség nyílik az elvi konstrukció viselkedésének egzakt számítógépes szimulálására is. Az elvégzett számítások igazolták, hogy az ilyen rendszerek programvezérelt módon működnek.

Valami gond azért ezzel a rendszerrel mégiscsak van. Azt mondjuk, önreprodukáló, de ez az önreprodukció közvetlenül nem fogható meg, hiszen csak annyit tapasztalhat a vegyész, ha a megfelelő méréseket végrehajtja, hogy a rendszert alkotó komponensek koncentrációja lüktetésszerűen és egyre nagyobb mértékben növekszik. Az élő rendszerek önreprodukciója viszont térbeli szétválásban is kifejeződik; az élőlények szaporodnak. Ha tovább akarunk lépni az élő rendszerek felé, akkor biztosítani kell, hogy programvezérelt kémiai masinánknak burka is legyen, s amikor benne az anyagok mennyisége és a program megduplázódott, akkor a burok – ugyancsak megnövekedve – osztódjon ketté, szülessen két egyforma, burkolt és programvezérelt masina.

Joggal gondolhatja a kedves olvasó, hogy egy ilyen bonyolult feladatba már beletörik a bicskánk. Eddig ugyanis az absztrakt kémiai állapottérben bűvészkedtünk, minden geometriai korlátozástól mentesen. Most viszont nem kevesebbről van szó, mint arról, hogy ezen absztrakt kémiai állapottérben konstruált, szabályozottan, vezérelten működő, önreprodukáló masinánkat átvigyük a geometriai térbe, hogy annak működésbeli szabályozottsága szemmel látható evidencia legyen, hogy az eddig csak kémiai módszerekkel, közvetetten tanulmányozható oldatunk valóságosan növekvő és osztódó, vagyis a szó legszorosabb értelmében *szaporodó* fluid automatává váljon.

Pedig a megoldást tálcán kínálja a természet, s az egyáltalán nem is bonyolult. Kulcsa a *kétdimenziós folyadékok* tulajdonságaiban rejlik. Lehet, hogy ezekről nem sokan hallottak, ámbár szinte mindenkinek saját tapasztalatai is vannak velük. Avagy talán nem fújtunk szappanbuborékot? Nos, a szappanbuborék hártyája is kétdimenziós folyadéknak tekinthető. Külső mechanikai hatásra rugalmas szilárd testként viselkedik, ugyanakkor ha színeződését figyeljük, láthatjuk, hogy a hártya síkjában hogyan tud örvényleni, kavarogni, azaz ebben a síkban folyadékként viselkedik. Hasonló hártya burkolja az összes élő sejt felületét, csak az sokkal vékonyabb a szappanbuborékénál, mindössze két, egymással szembefordult molekularétegből áll. Ezért nem nyújtható, ellentétben a szappanbuborék sokkal vastagabb hártyájával.

Az olyan hosszúkás alakú molekulákból, amelyeknek egyik vége vízkedvelő, a másik víztaszító atomcsoportot tartalmaz, vizes oldatban önként képződnek kettős rétegű, kétdimenziós folyadék természetű molekuláris membránok. E membránok képződésük során rendszerint eleve kis gömbfelületeket képeznek, e mikroszkopikus nagyságú gömböket a tudományban *vezikulum* néven emlegetik. A kémiai evolúciós kísérletekben a feltételezett ősföldi körülmények között is spontán képződnek ilyenek, ezeknek azonban a keletkezési körülményeiktől függően más és más nevet adtak: mikrogömb, marigranulum, szferulum, jeewanu stb. Mi összefoglalóan a *mikrogömb* elnevezést fogjuk alkalmazni rájuk.

A mikrogömbök növekedésre is képesek. Ha az oldatban membránalkotó molekulák vannak jelen vagy képződnek, akkor azok igen hamar beépülnek a membránba. Természetesen minden beépült molekula megnöveli egy kissé a membrán felületét. A kis molekulák viszonylag könnyen átdiffundálnak e kétdimenziós membránokon, a nagyobb molekulák nehezen. Ha pedig egy nagyobb molekula még töltést is visel, akkor szinte egyáltalán nem tud keresztülhatolni a membránon.

A korábban emlegetett autokatalitikus hálózatok között vannak olyanok, amelyek nyersanyagai egyszerű kis molekulák, de köztitermékei már meglehetősen nagyok, esetleg még töltést is viselnek. A formóz ciklus például az apró fomaldehid (HCHO)-molekulákkal táplálkozik, s cukrot állít elő, a híres Calvin-ciklus szén-dioxidot (CO_2) fogyaszt, és erős elektromos töltéssel rendelkező cukorfoszfátokat termel, a reduktív karbonsavciklus (módosult, fordított Szent-Györgyi–Krebs-ciklus) ugyancsak CO_2-t fogyaszt, és nagymolekulájú, erős elektromos töltésű szerves savakat termel.

Ha a mikrogömbbe bezáródott folyadékban ilyen, nagyobb molekulasúlyú anyagokat termelő autokatalitikus ciklus működik, akkor ezen anyagok felhalmozódnak benne, azaz koncentrációjuk növekszik, hiszen nehezen vagy egyáltalán nem jutnak át a membránon, miközben a működésüket biztosító nyersanyagok, lévén kis molekulájúak, könnyen és folyamatosan bediffundálhatnak a külső térből a mikrogömb belsejébe.

A koncentráció növekedésével arányosan növekszik a belső térben a környezethez viszonyított ozmotikus nyomás is. Mivel a molekuláris kettős rétegből álló hártyák – ellentétben a szappanbuborék hártyájával – nem nyújthatók, a növekvő ozmotikus nyomás egy határérték felett kipukkasztja a mikrogömböt.

Egészen más a helyzet, ha a mikrogömbbe zárt autokatalitikus hálózat membránalkotó molekulákat is termel a saját anyagain kívül. Ekkor ugyanis, bár a mikrogömbbe zárt anyagok mennyisége növekszik, a belül termelődő membránalkotó molekuláknak a membránba való beépülése miatt a membrán is növekedni kezd, azaz a mikrogömb térfogata is növekszik. Hogy ekkor mi történik, az attól függ, hogy a belső anyagok termelése vagy a mikrogömb térfogatának a növekedése a gyorsabb.

Viszonylag egyszerű sztöchiometriai kényszerkapcsolatokkal elérhető, hogy a belső anyagokból időegység alatt ugyanannyi molekula keletkezzék, mint a membránképző anyagokból. Ez egy megfelelő felépítésű és kiindulási állapotában a környezettel ozmotikus egyensúlyban levő mikrogömb esetében például azt jelenti, hogy mialatt a mikrogömb belső anyagainak a mennyisége megduplázódik, kétszeresére nő a felülete is. A felülete, de nem a köbtartalma! A köbtartalom, azaz a térfogat ennél sokkal nagyobb mértékben növekszik, hiszen még iskolai tanulmányainkból tudjuk, hogy a gömb felülete az átmérő négyzetével, térfogata viszont a harmadik hatványával arányos.

Az a váratlan helyzet áll tehát elő, hogy bár a belső anyagok mennyisége folyamatosan, sőt exponenciálisan nő, a mikrogömb belseje kihígul, benne a koncentrációk csökkennek, pusztán azért, mert a gömböcske térfogatának a növekedése ennél lényegesen gyorsabb. Ha viszont a gömb belsejében a koncentráció kisebb, mint a környező folyadékban, akkor ott relatív ozmotikus vákuum alakul ki, a gömb vizet veszít, és behorpad.

A kétdimenziós folyadék membránok azonban különböző fizikai okok miatt mindenáron gömb alakot igyekeznek felvenni, semmiféle más zárt formájuk nem stabil mechanikai-

lag. A stabil állapot visszaállítására akkor (és matematikailag bizonyíthatóan csak akkor) nyílik lehetőségük, amikor belső anyagaik mennyisége is, felületük is éppen megduplázódott. Ekkor ugyanis szétválhatnak két egyforma – és az eredetivel azonos – gömbbé. A két gömb azonos koncentráció mellett nyilván kétszeres anyagmennyiséget, kétszeres felületet és természetesen mindössze kétszeres térfogatot jelent.

Persze az éppen osztódott gömböcskék mindegyikében elölről indulnak a folyamatok, növekszik a belső anyagok mennyisége, nő a felület, kialakul az ozmotikus vákuum, majd mindegyik újabb osztódáson megy keresztül, immár négy egyforma – és a kiindulásival is azonos – mikrogömböt eredményezve. A következő osztódásnál 8, majd 16, 32, 64, 128, 256 stb. gömb keletkezik, amelyek mind ugyanolyanok, és mikrogömb ősükkel is egyformák. Mikrogömbünk tehát valóságosan, térbeli értelemben véve is szaporodik. Sikerült az eddig pusztán bűvészmutatványnak tűnő, absztrakt kémiai állapottérben konstruált masinánk működését a valós geometriai térben lejátszódó eseménnyé alakítani. Sikerült találnunk egy elvet, amelynek segítségével nemcsak önreprodukáló, hanem a valós térben is szaporodó fluid automatát lehet konstruálni.

Ha egy ilyen szaporodó mikrogömböt odaadnánk egy mikrobiológusnak azzal, hogy határozza meg, melyik baktériumfajhoz tartozik – közölvén persze, hogy milyen táptalajon tenyészthető –, néhány hét múlva azt mondaná, hogy valószínűleg eddig ismeretlen mikroorganizmusról van szó, amely nagyságra ugyan a coccusokhoz hasonlít, de mivel nincs sejtfala, inkább a mikoplazmák és termoplazmák rokona lehet. Alighanem eszébe se jutna, hogy amit ő speciális tápoldaton „tenyésztett", az nem is élőlény. Nem jutna eszébe, hiszen a mikrogömb anyagcserét folytat, növekszik, és szaporodik.

Pedig e szaporodó mikrogömbök még nem élnek! Mikrobiológusunk is rájönne erre, mihelyt megpróbálna genetikai kísérletet végezni velük. Kiderülne, hogy nem lehet öröklődő változásokat létrehozni rajtuk, hiszen nincs genetikai anyaguk, nincs kódolt programjuk. Pedig öröklődő tulajdonságaik vannak, hiszen azt mondtuk, hogy az utódok ugyanolyanok,

mint a kiindulási mikrogömb. Öröklődő tulajdonságok vannak, öröklődő változások nincsenek. Ezek azok az öröklődő tulajdonságok, amelyekről a könyv elején beszéltünk; az élet legalapvetőbb öröklődő tulajdonságai közé tartoznak, de nem mutábilisak. Ezekről mondottuk, hogy kiesnek a genetika vizsgálódási köréből. Ezek a tulajdonságok azok, amiket nem valamiféle genetikai apparátus hordoz, hanem maga a konstrukció.

Azt állítottuk, hogy felületesebb vizsgálat alapján egy mikrobiológus élőlényeknek nézné őket, pedig nem azok, mert hiányzik belőlük a programvezérlés. Nincs programjuk, amelyet meg lehetne változtatni, ezáltal megváltoztatva magának a rendszernek a tulajdonságait is. Ha lenne ilyen programjuk, amely működésüket vezérelhetné, akkor változtatható öröklődő tulajdonságaik is lennének.

De hiszen mi már konstruáltunk egy programvezérelt önreprodukáló kémiai rendszert! Nem kell tehát mást tennünk, mint a szaporodó mikrogömb autokatalitikus hálózatát programvezérelt autokatalitikus hálózatra cserélni, olyanra, amely membránépítő molekulákat is szintetizál. És egy ravasz sztöchiometriai kényszerkapcsolással még az is elérhető, hogy a membrán mindaddig ne növekedjék, amíg a programot hordozó templátmolekulák meg nem kettőződtek, de a templát megkettőződése után a membrán növekedése és a mikrogömb osztódása gyorsan bekövetkezzék. Az így kapott rendszerek anyagcserét folytatnak, növekednek, szaporodnak, programvezérelten működnek, és öröklődő változásokra is képesek, noha bennük sorrenddel kódolt öröklődő információk még nincsenek. Az ilyen organizációjú rendszereket nevezzük *kemoton*oknak.

A kemotonoknak is el lehet készíteni a kapcsolási rajzát, ahogy azt az *1.* és *3. ábrán* az oszcilláló reakciórendszerekkel tettük. A kapcsolási rajz birtokában, a körfolyamati sztöchiometria segítségével föl lehet írni a folyamatok sztöchiometriai anyagmérleg-egyenleteit, ezek összesítésével meg lehet kapni az adott kemoton teljesen egzakt, minden egyes komponensre kiterjedő sztöchiometriai bruttóegyenletét, vagyis a rendszer organizációja mennyiségileg jellemezhető. Ha pedig ismerjük

az elemi kémiai lépések reakciósebességi állandóit, akkor meg lehet adni a rendszer folyamatait részleteiben leíró differenciálegyenlet-rendszert, s ezt számítógépen numerikusan integrálva, megkaphatjuk a rendszerben zajló folyamatok időbeli lefutását is az adott fizikai és kémiai körülmények között.

Mindezt persze e helyen nem részletezhetjük. Akit a szakmai – matematikai, kémiai – vonatkozások érdekelnek, megtalálhatja azokat a szerző *Chemoton elmélet I. A fluid automaták elméleti alapjai* című monográfiájában. De a nem szakemberek is megismerkedhetnek az elmélettel, ha nem is olyan alaposan, de olvasmányos formában, ha előveszik a szerzőnek *Az élet princípiuma* című könyvét.

6. AZ ŐSFÖLD KEMOTONJAI

Ha nincs is mód e helyen a kemotonok felépítésével és működésével közelebbről megismerkedni, azért az eddig elmondottak alapján főbb vonalaiban mégis áttekinthetjük működésüket, sőt azt is megvizsgálhatjuk, volt-e lehetőség arra, hogy ilyen szaporodó programvezérelt rendszerek az Ősföld vagy más hasonló, alakuló vizes bolygó felszínén spontán keletkezzenek. Hiszen ha az élővilág kemotonszerű rendszerek megjelenésén keresztül keletkezett, akkor egyrészt nem a véletlennek, hanem a kémiai szükségszerűségnek volt benne irányító és döntő szerepe, másrészt pedig akkor alkalmunk nyílik arra, hogy az élet kialakulásának folyamatát egzakt számításokkal végigkísérjük. Ez egyben annak a lehetőségét is magában hordozza, hogy a folyamatot ne alkimista jellegű, nagyrészt véletlenre alapozott, hanem egzakt módon előre megtervezett kísérletek segítségével próbáljuk meg reprodukálni.

Idézzük fel mindenekelőtt, hogy mit is tartalmaz egy kemoton. Tartalmaz először is egy önreprodukáló kémiai masinát, amely kis molekulájú, de nagy energiatartalmú vegyületekből nagyobb molekulájú, bonyolultabb vegyületeket állít elő. Az előállított vegyületek között megtalálhatók azok a vegyületek, amelyek magát a fluid masinát alkotják (ettől autokatalitikus, önreprodukáló a rendszer), találhatók olyan molekulák, amelyek mintafelületen (templáton) polimerekké tudnak kapcsolódni, és végül találhatók olyan vegyületek is, amelyek – kisebb-nagyobb átalakulás után – a membránba beépülve lehetővé teszik annak növekedését. Ez a kémiai anyagokat gyártó fluid masina a kemotonok első alrendszere.

A második alrendszer a vezérlő alrendszer. Ez tartalmazza azon kettős szál szerkezetű polimer molekulák sokaságát,

amelyek adott monomerkoncentráció esetén egyes szálakra tudnak szétválni, és mindegyik szál mintaként szolgál a polimerizációhoz. (Vegyészek számára írom: a mintafelületen valójában polikondenzáció játszódik le, s a kondenzációs termék az autokatalitikus hálózat egyik termékével reagálva adja a membránképző molekulát.) Azt, hogy egy polimerizációs ciklusban mennyi polimer fogy (és mennyi kondenzációs termék keletkezik), a mintamolekulák száma és hosszúsága egyértelműen meghatározza.

A harmadik alrendszer a kétdimenziós folyadék természetű molekuláris membrán, amely gömb alakban veszi körül a rendszert, átengedi a tápanyagok és a salakanyagok kis molekuláit, és visszatartja a rendszer belső anyagait. A rendszer által termelt membránképző molekulák spontán módon beépülnek a membránba, ami által a membrán felülete növekszik.

Talán nem árt egy kis kitérőt tenni, és megnézni a legegyszerűbb ismert élőlények, a mikoplazmák és termoplazmák felépítését. Ezekben megtaláljuk a sejtplazmát, amelynek autokatalitikus hálózatában a tápanyagokból új anyagok – magának az autokatalitikus hálózatnak az anyagai, a programvezérlő genetikai alrendszer (a nukleinsavak és fehérjék) alapanyagai, valamint a membránképző anyagok – szintetizálódnak, azután megtaláljuk a vezérlő alrendszert, amely a programot tartalmazó kettős szálú nukleinsavakból és a végrehajtást biztosító fehérjékből áll, valamint a kétdimenziós folyadék tulajdonságú membrán alrendszert, amely a táp- és salakanyagokat átengedi, de a belső anyagokat nem.

A kemotonok és a minden kétséget kizáróan élőnek elismert termo-, illetve mikoplazmák elvi felépítése tehát teljesen azonos, a különbség mindössze a vezérlés technikai megoldásában van. A kemotonokban az öröklődő programot a templátmolekulákat alkotó „jelek" (monomerek) mennyisége hordozza, és a vezérlés a legyártott anyagok mennyiségének szabályozásán keresztül, sztöchiometriai úton történik, a termo- és mikoplazmákban viszont a templátot felépítő jelek sorrendje hordozza az információkat, és a vezérlés fehérje enzimek segítségével, a kémiai folyamatok sebességének szabályozásával, katalitikus úton valósul meg. A kemotonok és a

termo-, illetve mikoplazmák funkcionális szerveződése tehát azonos, a különbség közöttük pusztán folyamataik vezérlésének és szabályozásának technikai megoldásában van.

És most már azt is megvizsgálhatjuk, hogyan is működik egy ilyen kemoton. Induljunk az osztódás pillanatától, attól a pillanattól, amikor az osztódás befejeztével az új egyed fölvette a tökéletes gömb alakot. Kemotonunk ekkor a környezetével ozmotikus egyensúlyban van, membránján keresztül folyamatosan diffundál be a tápanyag. Ez a diffúzió meglehetősen gyors, hiszen a tápanyagnak mindössze néhány tízezred milliméter utat kell megtennie, lévén a kemotongömb átmérője ezredmilliméter körüli.

Ahogy a tápanyagmolekulák átjutnak a membránon, mindjárt reakcióba lépnek az autokatalitikus reakcióhálózat anyagaival, s így a folyamatosan bediffundáló tápanyagokból folyamatosan termelődnek a belső anyagok, azaz magának a hálózatnak az anyagai, továbbá a membránképző molekulák előanyagai és a vezérlő mintamolekulák nyersanyagai, a monomerek. Ám e monomerek nem tudnak polimerizálódni, mert a mintamolekulák még kettős szál szerkezetűek, lefedik egymást. A monomerek tehát halmozódni kezdenek, koncentrációjuk növekszik. Hasonlóképpen növekszik a membránképző molekulák előanyagainak a koncentrációja is, ezek ugyanis még nem kész membránképzők, még nem tudnak beépülni a membránba, s ezért a membránfelület nem növekedhet.

Amikor a monomerek koncentrációja eléri azt az értéket, amelynél már megbomlik a kettős szál szerkezet, a mintamolekulák szálai szétválnak, mindegyik szálon megindul a monomerek egymáshoz kapcsolódása, azaz polimerizálódása (pontosabban polikondenzációja). A mintaszálakon új polimer szálak épülnek fel, eközben a monomerek nagy része elfogy, a koncentrációjuk visszaesik. A polimerizációs folyamatban melléktermékként keletkező molekulák viszont reakcióba lépnek a membránképző előanyagokkal, valódi membránképző molekulákká alakítva azokat. Ezek beépülnek a membránba, a membrán hirtelen növekedni kezd, megnő az általa bezárt térfogat. Kialakul az ozmotikus vákuum, a

membrángömb megnyúlik, középen befűződik, s két egyforma gömbbé válik. Az autokatalitikus hálózat molekulái és a templátmolekulák statisztikus eloszlásban, fele-fele alapon az egyik, illetve a másik membrángömbbe jutnak. És ekkor a folyamat természetesen kezdődik elölről.

A kemotonok pontos „kapcsolási rajzának", vagy ahogy a tudomány nevezi: anyagcseretérképének (metabolic map) megszerkesztése után minden egyes reakcióra fel lehet írni a reakció időbeli lefutását megadó kémiai kinetikai egyenletet. Ily módon egy sok-sok differenciálegyenletből álló egyenletrendszerhez jutunk, amelyet számítógép segítségével egy-egy konkrét esetre numerikusan integrálva meg lehet határozni egy-egy kemoton adott körülmények közötti viselkedését. A budapesti Műszaki Egyetemen, valamint a szegedi József Attila Tudományegyetemen Békés Ferenc és munkatársai, illetve Csendes Tibor számos ilyen számítógépes szimulációs vizsgálatot végeztek. Ezek a vizsgálatok egyértelműen bizonyították, hogy a kemotonok úgy működnek, ahogy azt logikailag kikövetkeztettük, s ahogy azt az élő rendszerektől elvárjuk.

Persze ezek a kemotonok még „csak" absztrakt konstrukciók, tervrajzukon csupán indexelt betűk szerepelnek, ahogy azt az oszcilláló rendszer esetében az *1. ábrán* bemutattuk, nem pedig konkrét vegyületek. Ám e betűk – legalábbis elvileg – konkrét vegyületekre cserélhetők, mint azt az oszcilláló rendszerek esetében a *3. ábra* bemutatja. A „csak"-ot pedig azért tettük idézőjelbe, nehogy bárki is azt gondolja, hogy lekicsinylést jelent. Ugyanis épp az absztrakt konstrukciók felállítása jelenti a tervezés döntő lépését, minden ember alkotta gép, készülék, mű absztrakt konstrukciók felállításán keresztül születik meg, jóllehet maga az absztrakt konstrukció nem mindig kerül papírra, gyakran puszta elképzelés formájában a feltaláló agyában marad. Az absztrakt konstrukció megszületése jelenti a feltalálást, a szabadalom is ezt az absztrakt konstrukciót védi, amelyet a találmányi leírás azután többféle kiviteli mód megadásával is bemutat a találmányt hasznosítani akaróknak.

A lényeg tehát az absztrakt konstrukcióban van, ám ennek valós szerkezetként is meg kell születnie ahhoz, hogy az em-

ber számára hasznosulhasson. Itt is ez a helyzet, a kemoton konstrukció ad egy lehetséges elvi megoldást. A nagy kérdés most már az, hogy ezen absztrakt konstrukció betűinek helyébe behelyettesíthetők-e olyan tényleges vegyületek, amelyek a konstrukció támasztotta feltételeknek eleget tesznek, azaz készíthető-e az *1. ábrá*hoz hasonló absztrakt tervrajzból a *3. ábrá*hoz hasonló, konkrét vegyületeket tartalmazó tervrajz.

Ebben a könyvben, ahol az életkeletkezés spontán útjait vizsgáljuk, a kérdést még tovább kell szigorítanunk. Készíthető-e kemotontervrajz, anyagcseretérkép úgy, hogy a betűk helyébe az ősatmoszférában található vegyületeket, a reakciók helyébe az ősatmoszférában végbemenő kémiai reakciókat írunk? Ha készíthető ilyen, az azt mutatja, hogy az élet spontán keletkezését nem valami egyszer történt, véletlen és valószínűtlen csodának kell felfognunk, hanem természeti törvények által irányított folyamatnak, amely mindig és mindenhol végbemegy, amikor és ahol a tervrajz által megszabott vegyületek jelen vannak, és reakciók végbemehetnek.

Az előző fejezetek gondos átolvasása már tálcán nyújtja a megoldást. A kemoton első alrendszeréül a formóz reakciót célszerű választani, hiszen:

1. nyersanyaga, a formaldehid, a Világegyetem egyik leggyakoribb vegyülete, feltételezhetően nemcsak jelen volt az ősatmoszférában, hanem metánból és vízből a nap ultraibolya sugarainak hatására folyamatosan keletkezett is;
2. a formóz reakció autokatalitikus reakcióhálózat, így sztöchiometriailag és kinetikailag alkalmas arra, hogy egy kemoton alrendszere legyen;
3. a formóz reakció cukrok egész sorát termeli, reakcióhálózatának közti termékei zömmel különböző cukorféleségek, és valamennyi földi élőlény anyagcsere-hálózatának vázát cukorféleségek egymásba alakulása képezi (igaz, ma cukorfoszfátok formájában);
4. a formóz reakció köztitermékei között szerepel a nukleinsavak egyik komponense, a ribóz, s ez lehetővé teszi a sztöchiometriai kapcsolást a formóz hálózat működése és a nukleinsav-szintézis között;

5. a köztitermékek között a glicerinaldehid is megtalálható, amely könnyen alakul át glicerinné, a biológiai membránok építőköveinek kiindulási anyagává. Ez viszont a formóz reakció és a membránképződés sztöchiometriai összekapcsolását teszi lehetővé.

A formóz reakció tehát igen alkalmasnak látszik arra, hogy a kémiai evolúció folyamatait az életkeletkezés irányába terelje, s a képződő élő rendszerek anyagcsere-hálózatának alapjául szolgáljon.

Kézzelfoghatóan kínálja magát a másik alrendszer, az információs alrendszer is, amelynek templát tulajdonságú, kettős szál felépítésű makromolekulákból, illetve azok megkettőződési folyamataiból kell állnia. Az élet keletkezésével és a kémiai evolúcióval foglalkozó szakemberek mind egyetértenek abban, hogy az ősi genetikai anyag nem a DNS, hanem az RNS, azaz a ribonukleinsav volt, Crick is ezt az álláspontot képviseli írásaiban.

A ribonukleinsavak felépítése majdnem azonos a dezoxiribonukleinsavakéval. Különbség főként abban van, hogy az RNS-ek cukor komponense nem dezoxiribóz, hanem ribóz, és hogy a „betűkként" szereplő négyféle bázis *(A, T, G, C)* közül az RNS-ben a timin *(T)* helyett uracil *(U)* található. Kísérletek sokasága bizonyítja, hogy ősföldi körülmények között a purinbázisok *(A, G)* spontán képződhetnek, de arra is vannak kísérleti adatok, hogy a primidinbázisok *(U, C)* is kialakulhatnak, nagy valószínűséggel már a ribózra épülve rá.

Az alapanyagok tehát hozzáférhetők, kérdés, hogy maga a templátpolimerizáció, azaz a mintafelületen történő RNS-képződés végbemehet-e ősföldi körülmények között. A folyamat termodinamikailag lehetséges, hiszen az élő szervezetekben folyamatosan végbemegy, csakhogy speciális enzimek segítségével. Ezek az enzimek lehetővé teszik, hogy az RNS mintán történő megkettőződését *in vitro,* azaz kémcsőben, lombikban, laboratóriumi körülmények között is lejátszassuk. De vajon megy-e a rakció enzimek nélkül is?

Ezt a kérdést számos kutató próbálta kísérletesen tisztázni. Az eredmények azt sugallják, hogy azokból a monomerekből,

amelyeket az élő szervezetek ma nyersanyagként használnak, enzimek nélkül nem lehet RNS-replikációt lejátszatni. Ám ha *más típusú* monomereket (nukleozid-trifoszfátok helyett például imidazolidokat) alkalmazunk, a mintafelület irányította RNS-szintézis, ha korlátozottan is, de végrehajtható. Ez egyrészt biztató, hiszen az eddigi kísérletek egyértelműen arra utalnak, hogy nukleozid-trifoszfátok ősföldi körülmények között nem keletkezhetnek, imidazolidok viszont igen, másrészt azonban nem túl biztató, hiszen az ilyen enzim nélküli RNS-szintézisek során általában csak néhány monomer kapcsolódik össze rövid szálakká, nem pedig száz vagy még több monomer hosszú szállá.

Ám az ide vonatkozó kísérletek során valamit nem vettek figyelembe. Nevezetesen azt, hogy ha a kísérleti oldathoz hozzáadott mintaszálon már felépült az új RNS-szál, a reakció szükségszerűen leáll, hiszen a képződött kettős szálú RNS szétcsavarodás nélkül már nem képes a mintamolekula szerepét betölteni. A rövid – hat-hét monomert tartalmazó – RNS-t a hőmozgás még le tudja választani a mintafelületről, ezért a szintézis tovább folyhat külön szálszétválasztási mechanizmus nélkül is, az ennél hosszabb szálak szintézise azonban már nem. Ahhoz, hogy hosszú szálak szintetizálódjanak, periodikusan változó körülmények kellenek: a szintézisre alkalmas körülményeket szálszétválasztásra alkalmas körülmények kövessék és fordítva. A kemotonokban, mint láttuk, ezek a feltételek enzimek nélkül is megvalósulnak a monomerkoncentráció periodikus változása révén, így minden reményünk megvan arra, hogy helyesen cselekszünk, ha ősföldi konkrét kemotonunk információs alrendszeréül enzim nélküli RNS-replikációs rendszert választunk.

Lényegesen nehezebb a dolgunk a harmadik, a membránalkotó alrendszerrel. Kísérletek sokasága bizonyítja ugyan, hogy kétdimenziós folyadék természetű membrángömbök a legkülönbözőbb elképzelhető ősföldi körülmények között spontán és nagy mennyiségben keletkeznek, azonban (az ún. termálproteinoid-membránok kivételével, amelyek itt nem jöhetnek számításba) egyetlen ilyen membránnak sem történt meg a részletes kémiai vizsgálata, nem tudjuk, milyen vegyü-

letek építik fel e membránokat. Annyit azonban tudunk – s ez nagyon lényeges –, hogy e membránkeletkezési kísérletek többségében a nyersanyagok között szükségszerűen ott kell lennie a formaldehidnek, azaz joggal feltételezhető, hogy a prebiotikus membránképződés is sztöchiometriai kapcsolatban van a formóz reakcióval. Ám a prebiotikus membránképződéshez vezető elemi reakciók, azok kapcsolatai, hálózatai teljességgel ismeretlenek.

Láthatjuk tehát: nem kevés, amit egy konkrét prebiotikus kemoton anyagcsere-hálózatának megtervezéséhez tudunk, de messze nem elegendő. Ismerjük az absztrakt kapcsolódási rendszert, amit konkrét vegyületekkel kellene kitölteni, három alrendszeréből kettőt kémiai reakciókkal részletekbe menően kitölthetünk, a harmadikról tudjuk, hogy létezett és kísérletileg létrehozható, de nem ismerjük a részleteit. Ismerünk néhány kapcsolódó szintetikus mellékrendszert, így a purin- és pirimidinbázisok képződését s néhány egyéb reakciót, és feltételezzük, hogy az RNS-szintézis a monomerek imidazolszármazékain keresztül ment végbe.

Ez még nem elég ahhoz, hogy az absztrakt kemotonmodell minden részletét az ősföldi körülmények között bizonyítottan végbement valós kémiai eseményekkel töltsük ki. Ahhoz viszont már bőségesen elegendő, hogy az absztrakt kemotonhálózat segítségével megkíséreljük a hiányzó részeket elméleti alapon pótolni, azaz megvizsgáljuk, hogy a meglevő kémiai folyamatokhoz milyen reakcióknak kellene csatlakozniok, hogy teljes kemotonhálózatot kapjunk.

Egy műegyetemi hallgató, Hidvégi Máté vállalkozott arra 1981-ben, hogy egyetemi diplomamunkájaként elvégzi ezt a kiegészítést. Munkája sikerrel járt, mintegy száz reakciólépést tartalmazó hálózatot fejlesztett ki, ezáltal egy konkrét és komplett kemoton-anyagcserehálózathoz jutott. A reakciólépések mintegy kétharmada az irodalomból ismert prebiotikus folyamat, a maradék prebiotikus előfordulására ugyan nincs bizonyíték, de a kémia törvényeinek nem mondanak ellent. A teljes hálózat minden vegyülete megduplázódik két osztódás között. E prebiotikus kemoton formaldehidet, cián-hidrogént és ammóniát eszik, karbamidot és szén-dioxidot bocsát ki anyagcseretermékként.

Nem állítjuk, hogy az őskemotonok pontosan ilyenek voltak. Azt még kevésbé állítjuk, hogy ez lenne az egyetlen konkrét lehetőség, sőt meggyőződésünk, hogy ugyanaz az absztrakt rendszer nagyon sokféle konkrét kémiai úton valósulhat meg, s ez csak egy a sok közül. Azt viszont ez a munka kétségtelenül bebizonyította, hogy a kemotonelmélet segítségével spontán keletkező, az életre jellemző tulajdonságokat mutató, programvezérelt, szaporodó fluid automaták egzakt és konkrét módon tervezhetők akár íróasztal mellett is, ha a megfelelő adatok ismertek. Úgy, ahogy a mérnök tervezi a maga gépeit, készülékeit a tervezőasztalánál.

Amint a munka elkészült, és kutatócsoportunk megvitatta, egy másik akkori egyetemi hallgató, Szathmáry Eörs vállalkozott arra, hogy e prebiotikus kemotonhálózat kémiai eseményeit a körfolyamati sztöchiometria segítségével végigszámolja. Jó hosszú számolás volt, írásvetítő fóliacsíkra felírva vagy öt méter hosszú, elkészítéséhez külön stratégiát kellett kidolgoznia s néhány nehézséget szellemes módon megoldania. De a számítás bebizonyította egyrészt azt, hogy a felállított anyagcsere-hálózat sztöchiometriailag korrekt, másrészt azt is, hogy a körfolyamati sztöchiometria még ilyen bonyolult önreprodukáló anyagcsere-hálózatok eseményeinek számolására is alkalmas. A végeredményül kapott bruttóegyenlet pontosan megadta, hogy az adott prebiotikus kemotonnak melyik közti termékéből mennyit kell tartalmaznia ahhoz, hogy működhessen és reprodukálhassa önmagát, hogy a reprodukcióhoz hány darab fomaldehid-, cián-, ammónia- és vízmolekulát kell megennie, s hány karbamid- és CO_2-molekula keletkezik eközben salakanyagként.

Láthatjuk tehát: ha nem abból a hiedelemből indulunk ki, hogy először lett a szöveg, azután a szövegbeli utasítás alapján gyártott enzimek, hanem abból, hogy az élő rendszerek fluid masinák, akkor a biogenezis egyszeri csodából mindjárt kémiai törvények által irányított szükségszerű folyamattá válik, amely a tudomány egzakt módszereivel nyomon követhető. Persze az élő rendszerekben a genetikai szöveg is létező valóság, csakúgy, mint a genetikai szöveg által meghatározott enzimek. Érvelésünk nem lenne teljes, ha ezek keletkezésére

nem tudnánk magyarázatot felvázolni. E magyarázatnak azonban már nem puszta statisztikai valószínűségen, a vak véletlenen, hanem nagyon is szűken behatárolt eseménysorozaton, a prebiotikus kemotonok evolúcióján kell alapulnia.

7. AZ ŐSSZÖVEGEK SZÜLETÉSE

Most érkeztünk el oda, hogy érdemes visszapillantanunk a könyv első felében írottakra, ahol is az élővilág tulajdonságai alapján azt bizonygattuk, hogy az öröklődő tulajdonságok két részre oszthatók: a *változékony* öröklődő tulajdonságokra, amelyek az élővilág evolúciójának, sokféleségének és hihetetlen alkalmazkodóképességének képezik az alapját, és a nem vagy csak *igen korlátozottan változó* öröklődő tulajdonságokra, amelyekben maga az élet, annak folyamatossága, az élővilág alapvető egysége fejeződik ki. Azt állítottuk, hogy a mai genetika a változékony tulajdonságokat vizsgálja, azok vannak a génekbe beírva (napjainkban „betűsorrenddel" kódolva), azok alkotják a genetikai programot, míg a nem változó tulajdonságokat maga a konstrukció, annak organizációja hordozza, ezek nincsenek makromolekulákba írva, s kiesnek a mai genetika vizsgálódási köréből. A kemotonmodell birtokában mindezt most tisztább, egyszerűbb, jobban áttekinthető példán vizsgálhatjuk meg. Vizsgálatainkat kezdjük a változékony öröklődő tulajdonságok szemrevételezésével.

Egy konkrét kemotonmodell – például az előző fejezetben bemutatott prebiotikus kemotonmodell – birtokában könnyen kiszámolható, hogy egy adott nagyságú kemotongömböcske membránjának hány darab membránépítő molekulából kell állnia. Ha például a prebiotikus kemotont 1 μm átmérőjű gömböcskének képzeljük el (a prebiotikus kísérletekben képződő mikrogömbök mérete ebbe a nagyságrendbe esik), akkor a membránképző molekula méreteinek ismeretében azt kapjuk, hogy ekkora gömbfelület beborításához kb. 10^7 darab, azaz mintegy tízmillió membránépítő molekula szükséges.

Ahhoz, hogy az adott kemoton 10^7 darab ilyen molekulát legyártson, a rendszer kémiai szerveződése következtében 10^7 darab nukleotidnak kell RNS-sé polimerizálódnia, ugyanis az egyes nukleotidok összekapcsolódásánál szabadulnak fel azok a molekulák (kondenzációs termékek), amelyek a membránelőanyagokkal reagálva a membránépítő molekulákat képezik. Ám mivel az RNS-szintézis mintafelületen történik (templátpolimerizáció), nem kapcsolódhat össze több nukleotid egymással, mint amennyi a mintában van. Az adott kemoton minta-RNS-molekuláinak tehát összesen 10^7 darab monomerből (nukleotidból) kell felépülniök.

Egy-egy prebiotikus RNS-szálat átlagosan mintegy száz nukleotid hosszúságúnak vehetünk. Szóban forgó kemotonunknak tehát kb. 100 ezer, átlagosan száz nukleotidból álló RNS-szálat kell tartalmaznia, amelyek mindegyikén felépül az új, kiegészítő szál. Így közvetlenül osztódás előtt 100 ezer kettős szálú RNS-molekula van az adott kemotonban, s ez a mennyiség az osztódás során statisztikusan feleződik, azaz kb. 50 ezer dupla RNS-szál jut mindkét utódba.

A feleződés azonban statisztikus, ami annyit jelent, hogy a két utódban nem darabra egyforma az RNS-molekulák mennyisége, könnyen előfordulhat, hogy az egyikbe, mondjuk, csak 49 900, a másikba viszont 50 100 RNS-molekula jut, azaz a kettős szálak szétválása után az egyikben 99 800, a másikban 100 200 RNS-mintaszál lesz. Nyilvánvaló, hogy az említett összefüggés miatt ugyanígy alakul az egy-egy ciklusban képződő membránmolekulák száma is, vagyis az egyik kemoton valamivel kisebb, a másik valamivel nagyobb utódokat hoz létre. Ám az RNS az utódok osztódásakor sem pontosan feleződik, így az RNS-molekulák mennyiségétől függően kialakul egy méreteloszlás, vagyis megjelenik a genetikai sokféleségnek, a populáció genetikai diverzitásának legelső formája.

Figyeljük meg tehát: a teljes RNS-készlet nukleotidszáma örökletesen meghatározza az adott kemoton geometriai méretét, s miután ez a szám az elmondott mechanizmus (és más, itt nem említett mechanizmusok) szerint változhat, az RNS változékony örökletes tulajdonságokat hordoz a rendszer egésze

számára. Az RNS felépítése azonban nemcsak a membránépítő molekulák mennyiségét szabja meg ebben a rendszerben, hanem a többi kémiai folyamat lefutását is, így az RNS-készlet – nukleotidjainak mennyiségével, valamint (itt nem részletezhető okból) négyféle nukleotidjának (*A, G, C, U*) egymáshoz viszonyított arányával – az adott kemoton számos más öröklődő tulajdonságát is meghatározza, s változékony módon határozza meg. Hangsúlyozni kell azonban, hogy ezeket a tulajdonságokat a mi konstrukcióinkban még nem a nukleotidok sorrendje, hanem azok mennyisége hordozza magában, s az örökletes vezérlés sztöchiometriai módon, vagyis a szintetizált vegyületek mennyiségén keresztül valósul meg, noha a replikáció során természetesen az RNS-molekulák betűsorrendje is átmásolódik, azaz a sorrendek is öröklődnek.

Már az itt bemutatott kezdetleges öröklődő változás is – mint említettük – genetikai diverzitás megjelenéséhez vezet. Ezen a szinten ez azt jelenti, hogy a méretek és a belső komponensek mennyisége a kemotonpopuláció egyes egyedeiben nem egyforma, s az eltérések örökletesek. Természetesen adott körülmények között az eltérő belső paraméterekkel rendelkező egyedek működése (reakcióik sebessége) eltérő, s így szaporodási sebességükben is különbségek vannak. Ez lehetővé teszi a kemotonpopulációk adott körülményeknek megfelelő öröklődő optimalizálódását a nemzedékek egymásutánjában. Hasonlóképpen lehetővé teszi azt is, hogy a körülmények megváltozása esetén a populáció örökletesen alkalmazkodjon az új körülményekhez. Természetesen ez az optimalizálódási és adaptációs mechanizmus a környezeti változások meglehetősen szűk körére, azaz elsősorban az ozmotikus viszonyokra és a különböző tápanyagok mennyiségi arányaira terjed csak ki, viszont az öröklődő tulajdonságokat még mindig nem a betűk sorrendje, csupán azok mennyisége és egymáshoz viszonyított aránya szabja meg a genetikai szövegben.

Mindez lehetővé teszi, hogy a nem változékony tulajdonságok szerepét egy kissé alaposabban megértsük. Már az egyszerű szaporodó gömb osztódásának ismertetésénél kitértünk arra, hogy ott öröklődésről beszélhetünk ugyan, hiszen az osztódás során két egyforma (és az eredetivel is azonos) mik-

rogömb keletkezik, de nincs genetikai program, amely a programot „kódolva" tárolná. Ez az öröklődő információ (épp a genetikai program hiánya miatt) nem változékony. Az öröklődő tulajdonságokat a rendszer egésze hordozza, éppen azáltal, hogy a rendszer önreprodukáló alrendszerekből épül fel.

A kemoton tulajdonképpen nem más, mint egy olyan szaporodó mikrogömb, amelybe egy (ugyancsak önreprodukáló tulajdonságú) templátpolimerizációs alrendszert építettünk be. Amíg azonban az autokatalitikus kémiai folyamat szükségszerűen változatlan körfolyamatot eredményez, a templátpolimerizációs folyamatokban a replikáció során olyan hibák következhetnek be, amelyek lehetővé teszik, hogy az újonnan képződött szál ne legyen teljesen azonos a mintamolekulával, amelynek felületén képződött. A templátpolimerizáció tehát olyan önreprodukáló kémiai folyamat, amely a polimer hossza, összetétele és monomersorrendje tekintetében változékonyságot enged meg az utódok között.

A templátpolimerizációhoz a kemoton autokatalitikus reakcióhálózata termeli a nyersanyagot. Akár a templátpolimerek száma, akár az összetételük, akár a hosszuk változik meg, egyidejűleg megváltozik a nyersanyagigényük is, és ezen keresztül visszahatnak az autokatalitikus reakcióhálózat mennyiségi viszonyaira éppúgy, mint a keletkezett membránépítőkövek mennyiségére. Ezért e templátmolekulák változása a kemoton többi alrendszerében is örökletes változást okoz az említett vonatkozásokban. A templátok monomersorrendjének (az RNS bázissorrendjének) változása – ha csak a sorrend változik, az összetétel nem – a templátpolimerizációs folyamat nyersanyagigényén nem változtat, így ezekben a konstrukciókban a sorrendnek még nincs szerepe. A templát megváltozása maga után vonhatja a kemoton nagyságának a megváltozását, eltolhatja a szintézisutak működésének egymáshoz viszonyított arányát, de nem tud beindítani új szintézisutakat vagy megszüntetni meglévőket. Ezek meglétét vagy hiányát az adott konstrukcióban ugyanis pusztán a kémiai lehetőségek határolják be.

Más a helyzet a mai élővilágban, ahol minden egyes reakciólépés enzimek jelenlétében megy végbe. Az enzimek

képesek az egyébként lehetséges kémiai reakciók sebességét milliószorosan-tízmillószorosan felgyorsítani. Ha a reakcióhálózat csupa enzimatikus reakcióból áll, működését a kémiai lehetőségeken belül teljes mértékben az enzimek jelen- vagy távolléte határozza meg, hiszen ha egy kémiailag lehetséges reakció a megfelelő enzim távollétében csak milliomodrésznyi hatékonysággal termel, az nyilvánvalóan olyan a rendszer egésze szempontjából, mintha nem is termelne. Így az enzimek jelen- vagy távolléte révén a mai élőlény nemcsak azt tudja szabályozni, hogy az egyes reakcióláncok milyen termelékenységgel dolgozzanak, hanem azt is, hogy milyen kémiai reakciók menjenek végbe – természetesen a kémia törvényei által megszabott lehetőségeken belül. Ez a szabályozás, mint azt a könyv elején kifejtettük, az enzimek aminosavsorrendjén keresztül történik, amit viszont a genetikai anyag nukleinsavának „betűsorrendje" határoz meg.

Itt érkeztünk el ahhoz a ponthoz, ahol azt a kritikus kérdést, hogy hogyan jöttek létre az ősszekvenciák, az ősi betűsorrendek, jogosan feltehetjük. Most már ugyanis megvan az a szaporodó, szabályozottan és programvezérelten működő masinánk, amelynek primitív programvezérlését „modern" programvezérlésre kellene cserélni. Most már nem a vak véletlenben, csodában kell hinnünk, hanem megvizsgálni, hogy a programvezérelt szaporodó fluid masináknak, azaz a kemotonoknak az evolúciója vajon nem szükségszerűen vezetett-e el a speciális, funkcióképes, a rendszer szempontjából előnyösen hasznosuló „betűsorrendek", szekvenciák kialakulásához. A vizsgálatok eredményeit e könyv szerzője folyóiratcikk formájában már 1983-ban megjelentette, de megtalálhatók részletesen kifejtve a *Chemoton-elmélet* című monográfia II. kötetében is. Itt hadd mutassuk be a gondolatmenet lényegét vázlatosan.

Talán ott kell kezdenünk, hogy elképzelünk magunknak egy ősi táplevesben szaporodó prebiotikus kemotonpopulációt. A kemotonok kb. ezredmilliméter átmérőjűek, s mindegyikben van kb. 50 ezer darab kettős szál szerkezetű, mintegy 100 nukleotid hosszúságú RNS-molekula.

Milyenek is ezek az RNS-molekulák? Ránézésre (persze „szubmikroszkopikus" ránézésre) olyan „kettős spirál" szerkezetűek, mint a Watson–Crick-féle DNS-modell. Ami kis eltérést mutatnak tőle, azzal most nem kell törődnünk. Mindegyik szál négyféle nukleotidból (*A, G, C, U*) épül fel. A két egymás köré tekeredő szálat a nukleotidokból képződött párok tartják össze: emlékezzünk, az *A* az *U*-val, a *G* a *C*-vel tud párt képezni. Azaz, ha az egyik szálon valahol *A*-t (adenint) találunk, behúnyt szemmel megmondhatjuk, hogy vele szemben a másik szálon *U* (uracil) található. Vagy ha ezen a szálon *G* van, akkor a másikon *C*-nek kell lennie vele szemben. Ha tehát az egyik szálon például úgy következnek egymás után a nukleotid betűk, hogy: *GACUGA* . . ., akkor a másik szálon *CUGACU* . . . a sorrend.

Mit gondol a kedves olvasó, az első kemotonokban milyen volt az RNS-ek betűsorrendje? Nyilvánvaló, hogy teljesen véletlenszerű, minden információ nélküli, hasonló a vak ember által gépelt szöveghez. És minden RNS-molekuláé más, hacsak nem kerültek ugyanabba a kemotonba egy-egy RNS „leszármazottai", replikái is, de most ezzel sem kell törődnünk. Azzal viszont igen, hogy minden értelmetlen szöveg tulajdonképpen két példányban van meg, egy „pozitív" és egy „negatív" példányban. Hiszen a kettős szál szerkezet miatt a szálak meghatározzák egymás sorrendjét. Ha a kettős szál szerkezet megbomlik, mindegyik szálon új szál épül fel: a pozitív szálon negatív sorrendnek, a negatívon pozitív sorrendnek megfelelő. A *GACUGA* sorrendűn *CUGACU,* a *CUGACU* sorrendűn *GACUGA* sorrendű szál épül fel. Így végső soron mindegyik sorrend hordozhatná ugyanazt az információt – ha ezeknek a sorrendeknek lenne valami értelmük. Egyelőre azonban nincs.

Nézzük hát meg, mi is történik egy kemotonban az RNS-molekulákkal, amikor a nukleotidok koncentrációja eléri a kettős spirál szerkezet megbontásához szükséges kritikus értéket. A kettős szálú szerkezet elég merev, csak hosszabb távon hajlítható, hasonló módon, mint – mondjuk – egy gégecső. A szétvált szálak azonban olyan hajlékonyak, mint egy lánc, összevissza tekerhetők, gombolyíthatók. Tekergeti is

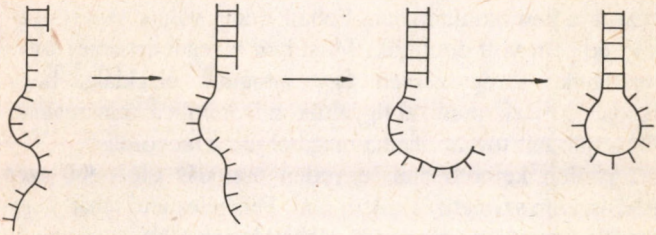
őket a hőmozgás másodpercenként milliószor jobbra-balra, s ha valami szupermikroszkóppal megnézhetnénk őket, azt hinnénk, sajtkukacokról látunk felvételt milliószorosan felgyorsítva. Ám ha most ezt a felvételt milliószorosan lelassítanánk, azt látnánk, hogy miközben az RNS-szál ide-oda tekeredik, a körülötte nyüzsgő nukleotidok sorban egymás után e szálhoz, majd egymáshoz kapcsolódnak, ki-ki a neki megfelelő párt választva magának. S ez így megy mindaddig, amíg a mintaszál utolsó nukleotidja is meg nem találta a maga párját. Ezzel befejeződik az új szál szintézise, egyszersmind kialakul a kettős szál szerkezet, melyben megduplázva van jelen az (egyelőre értelmetlen) információ, s a molekula visszanyeri eredeti, gégecsőszerű merevségét.

Ha lenne egy olyan csodamikroszkópunk, amellyel ezt az eseménysort milliószoros nagyításban és milliószoros lassításban megfigyelhetnénk, valószínűleg olyan csodás látványban lenne részünk, hogy alig tudnánk vele betelni. És ha elég sokáig néznénk, arra is rádöbbennénk, hogy nem minden RNS-molekulaszállal történik az, amit elmondtunk. Az új RNS-szál szintézise néha – és úgy véljük, nem is túl ritkán – másképp fejeződik be.

Az RNS-t felépítő nukleotidoknak két erős kémiai kötés létesítésére képes vegyértékük, két „karjuk" van, mondjuk, mint egy embernek. Mi egyszerre két emberbe tudunk belekarolni, persze mindegyik szomszédunk is belekarolhat egy-egy újabb emberbe, azok egy következőbe stb. A nukleotidok is így csinálják; minden nukleotid két másik nukleotidba tud belekarolni, azok újabbakba, az újabbak még újabbakba stb.: így épül fel az RNS-lánc. Az RNS-lánc minden nukleotidjának mindkét karja foglalt. Kivéve – a lánc két végén elhelyezkedő két szélső nukleotidot.

Most ismét idézzük fel a csodamikroszkópunkon látható képet. Az RNS-molekulaszálak, az egymásba karoló nukleotidok lánca ide-oda hajladozik, görbül, tekereg. Közben az egyik végén párt választanak a szabad nukleotidok, majd a mellettük levő, már párba állt nukleotidba karolnak. A következő pillanatban a másik oldalukra is elhelyezkedik egy megfelelő nukleotid, egymásba karolnak, azután a mellett a követ-

kező stb. Eközben a mintaszál még szabad része összevissza tekereg, és az egyik tekeredésnél véletlenül összeér a mintaszál vége – amelynek nukleotidja szabad karral rendelkezik – és az új szál éppen utolsónak beépült, még szabad karral rendelkező nukleotidja. A két szabad kar egybefonódik, és az új szál szintézisének – szabad kar híján – vége. Azaz itt már nincs is új meg régi szál, hiszen az épülő új szál a régi szál végével kart karba öltve egyetlen szállá kapcsolódott össze (*6. ábra*).



6. ábra. Abiogén hurok-RNS-képződés. A hőmozgás következtében összevissza tekergőző minta-RNS-szálat a rajta épülő új szál kimerevíti. Ám a mintaszál szabadon mozgó vége összekapcsolódhat a részben felépült új szállal, s ily módon hurok szerkezetű RNS jön létre. Az ilyen hurok-RNS-ekről készülő másolatok is hurok szerkezetűek. E folyamat eredményeként az abiogén RNS-szintézis termékei döntő többségükben hurok szerkezetűek.

Valami furcsa torzszülött keletkezett. Olyan szál, amelynek az eleje és a vége önmagával alkot kettős spirál szerkezetet. Olyan szál, amelynek az eleje és a vége ugyanazt az információt hordozza, csak éppen egymást kiegészítő szekvenciában, azaz ha az elején az van írva, hogy *GACUGA*, akkor a végén az található, hogy *CUGACU*. Még mindig értelmetlen ez az információ? Már korántsem. A szál két végének betűsorrendje azt az információt hordozza, hogy e molekula két végének kettős spirálba kell tekerednie, miközben a lánc közepe egyes szálú hurkot alkot. Vagyis a betűsorrend meghatározza e polimer térszerkezetét! Mit is mondtunk a könyv elején az enzimekről? Azt, hogy az aminosavsorrendjük meghatározza a térszerkezetüket, térszerkezetük pedig a funkciójukat. Az első lépést tehát megtettük. Találtunk egy olyan spontán me-

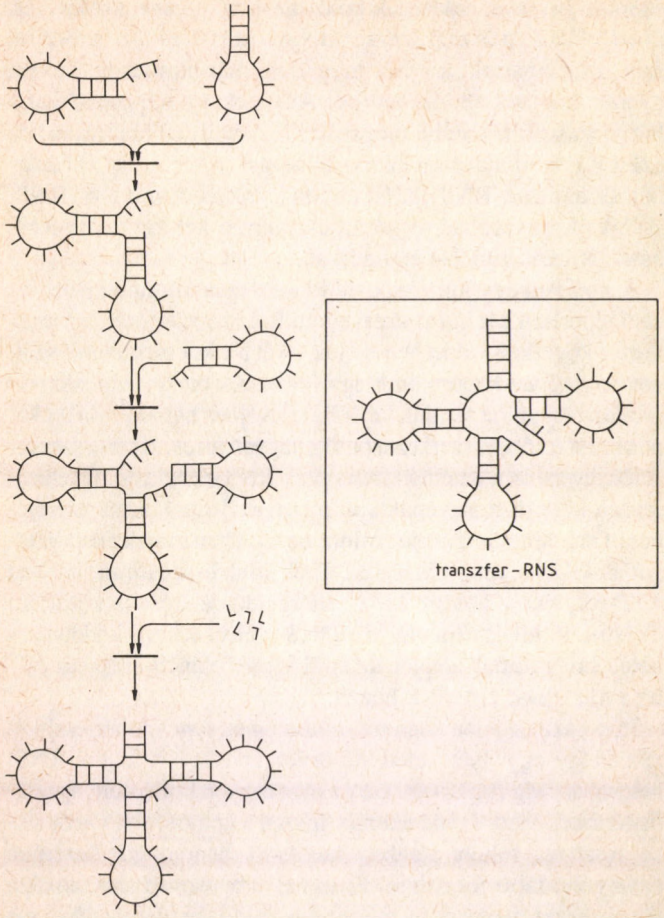
chanizmust, amely alkalmas arra, hogy a szekvencia által meghatározott szerkezetű RNS-eket állítson elő, mégpedig sorozatban! Mert az iménti szálról készülő másolat eleje és vége ugyancsak párba tud tekeredni, s az arról készülő újabb másolaté szintén! És ez a szerkezet nem akármilyen szerkezet, a mai élőlényekben is igen fontos szerepet tölt be, hurok-RNS-szerkezetnek nevezik.

Hátra van még a másik lépés. Szekvencia által meghatározott makromolekula-térszerkezeteink már vannak, de bizony e speciális szerkezetek még semmiféle funkcióval nem rendelkeznek a kemotonjainkban. Sebaj! Eddig voltak szekvenciáink, de nem volt értelmük. Most már vannak értelmes szekvenciáink, s egyszerűen úgy jutottunk el idáig, hogy csodamikroszkópunkkal figyeltük, mi történik a kemotonban. Figyeljük hát tovább, hátha magától jön a megoldás!

Egyetlen kemotonban, egyetlen osztódás előtt 100 ezer RNS-szálon szintetizálódik új szál. Feltételezhető tehát, hogy egyetlen osztódás során is jó néhány hurok-RNS képződik és kerül az utódokba. A következő osztódásnál újabb hurok-RNS-ek keletkeznek – és természetesen a régiek is megkettőződnek. A harmadik osztódásnál ismét keletkezik néhány új. Könnyen belátható, hogy a kemotonok megjelenése után populációjuk igen gyorsan olyan *evolúciós folyamat*on megy át, amelynek eredményeképpen a kemotonokban levő RNS-ek döntő többsége hurok szerkezetű lesz.

Tegyünk most egy ilyen kemotont „csodamikroszkópunk" alá, és figyeljük, mi történik benne. Azt láthatjuk, hogy a hőmozgás összevissza lökdösi e hurok szerkezetű RNS-eket, s ezek folyton-folyvást ütköznek, hol az anyagcserehálózat különböző molekuláival, hol más RNS-molekulákkal. Figyelmünket fordítsuk először ez utóbbi ütközésekre.

Ha az ütközésnél kettős spirál szerkezetű rész ütközik kettős spirál szerkezetű résszel, nem történik semmi más, mint hogy ellökődnek egymástól, ugyanis a kettős spirál szerkezetű részeknek sem szabad vegyértékeik, sem szabad másodlagos kötőhelyeik nincsenek. Ha hurok szerkezetű rész ütközik hurok szerkezetű résszel, rövid időre kapcsolat jöhet létre a két RNS-molekula között, hiszen a hurokban az RNS egyes szál



7. ábra. A hurok szerkezetű RNS-ek összekapcsolódhatnak egymással, igen bonyolult térszerkezetű RNS-makromolekulákat alkotva, amelyek térszerkezetét az RNS nukleotidsorrendje határozza meg. A replikáció során nemcsak a szekvencia másolódik át, hanem a bonyolult térszerkezet is „öröklődik". Az ilyen térszerkezetek nagyon sokféle, specifikus funkcióra alkalmasak. Az ábra jobb oldalán a fehérjeszintézisben kulcsszerepet játszó transzfer-RNS ún. lóhereszerkezete látható, a bal oldali rajz viszont azt mutatja, hogyan jöhet létre mindössze három hurok-RNS kapcsolódásával, abiogén úton efféle szerkezet.

szerkezetű, s a nukleotidoknak azok a gyenge kötőhelyei, amelyek a kettős szál szerkezetben a párképzést lehetővé teszik, itt szabadok, a nekik megfelelő más atomcsoportokkal gyenge kapcsolatba léphetnek. Ám ezeket a kapcsolatokat a hőmozgás előbb-utóbb megszakítja. Végül, ritkán ugyan, de azért jól meghatározott valószínűséggel, a végeikkel is ütközhetnek a hurok-RNS-ek. És ebben az esetben, mivel az RNS-szálak végein szabad vegyértékek vannak, két-két hurok-RNS össze is kapcsolódhat egymással.

A *7. ábrán* egy ilyen kapcsolódássorozatot mutatunk be. Az első lépésben két hurok szerkezetű RNS kapcsolódik egymáshoz, a következő lépésben ennek a két hurkot tartalmazó szálnak a végéhez kapcsolódik egy harmadik hurok. Ha a kapott szerkezetet síkba terítjük ki, lóherelevélhez hasonló alakot kapunk. Ez a lóhereszerkezet pedig nagyon híres. Ilyen a szerkezetük ugyanis a szállító (transzfer)-RNS-eknek, amelyeknek igazán központi szerepük van a mai élőlények anyagcseréjében. Ők a fehérjeszintézis mindenesei. Ők ismerik fel és válogatják ki az egyes aminosavakat, ők kötik össze az aminosavat ATP-vel, hogy kötésre kész, energiadús állapotba kerüljön, ők ismerik fel és olvassák le a DNS-szálról érkező kódolt üzenetet, hogy annak alapján az épülő fehérjelánchoz épp az előírt aminosavat csatolják hozzá.

Itt persze, a jelen kemotonunkban még nincs fehérjeszintézis, és így egy ilyen véletlenszerűen keletkezett lóhere-RNS-nek sincs még funkciója. De ez már nagyon bonyolult, speciális térszerkezettel rendelkezik, hiszen a kemotonban nem síkba feszítve, lóhere alakban található, hanem gömbszerűen összegubódzott formában. És ennek a bonyolult alakzatnak a térszerkezetét pontosan megszabja a szál betűsorrendje, s a róla készült másolatok is mind ugyanilyen térszerkezetet fognak fölvenni.

A betűsorrend azonban nemcsak a térszerkezetet szabja meg, hanem azt is, hogy a hurokrészekben található másodlagos kötőhelyek közül melyek kerülnek e fonalgubanc felszínére, s ott hogyan helyezkednek el. Ha visszaemlékszünk a könyv elején mondottakra, rá kell döbbennünk, hogy pontosan ugyanez volt az enzimek titka is: „betűsorrendjük" (ami-

nosavsorrendjük) meghatározta a fehérjemolekula térszerkezetét és azt, hogy a felületükön hol s milyen másodlagos kötőhelyek helyezkednek el. Már érezhetjük: közeledünk a szekvenciafüggő funkció kialakulásához.

Térjünk hát vissza csodamikroszkópunkhoz, s figyeljük most azt, mi történik, ha hurokszerkezetű RNS-ünk nem egy másik RNS-sel, hanem valami, az anyagcsere-hálózatban szereplő kis molekulával ütközik. (Ez egyébként sokkal-sokkal gyakoribb esemény.) Az anyagcserében szereplő kis molekuláknak is vannak másodlagos kötőhelyeik, amelyek révén más kis molekulákkal vagy makromolekulákkal (enzimekkel, hurok-RNS-ekkel) ideiglenes kapcsolatba lépnek. Az enzimek működése épp azon alapszik, hogy ezeket az ideiglenesen hozzájuk kapcsolódó kis molekulákat speciális térszerkezetük révén megfelelő térhelyzetben egymáshoz „nyomják", hogy azok ily módon erős kémiai kötéssel összekapcsolódhassanak, vagy fordítva: egy nagyobb molekulát ideiglenesen megfogva annak elektronszerkezetét úgy torzítják, hogy a molekula átalakuljon, például két kisebb molekulára törjön szét.

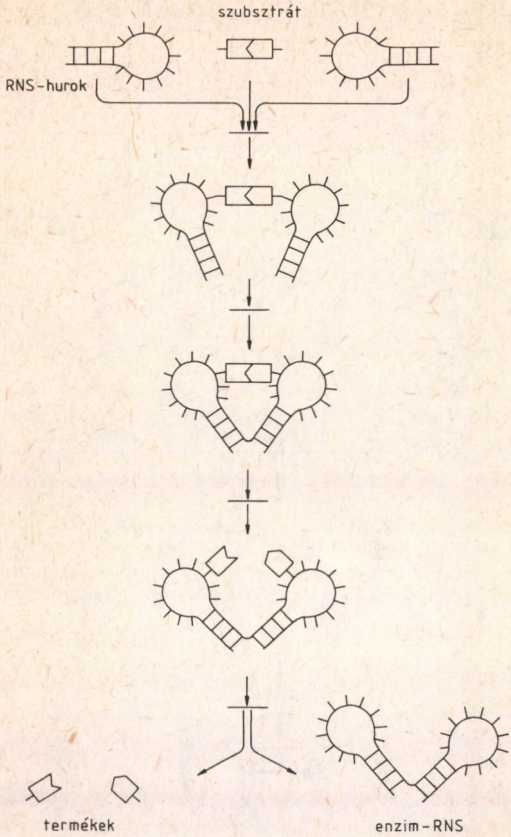
Egyszerűség kedvéért nézzük először ez utóbbi esetet, azaz vegyünk egy nagyobb molekulát, amelynek egyrészt van a két végén egy-egy ideiglenes kapcsolóhelye, másrészt az anyagcsere-hálózat reakciói szerint szét kell törnie két kisebb molekulára. Ahogy a hőmozgás ide-oda lökdösi ezt a molekulát és szomszédait, hol az egyik, hol a másik végén kapcsolódik össze rövid időre más molekulákkal. E más molekulák lehetnek éppen hurok szerkezetű RNS-ek is. S ha történetesen a két végéhez pontosan megfelelő hosszúságú RNS-hurkok kapcsolódnak, akkor azok kémiai kötéssel össze is forrhatnak, hiszen molekulánk összehozta őket térbelileg. S ebben a pillanatban megszületett az első *enzim*. Igaz, ez az enzim nem fehérje, hanem RNS, de ugyanazt a funkciót képes betölteni, mint a megfelelő enzimfehérje.

Nézzük tovább, mi történik azután, hogy a megfelelő hurok-RNS-ek összekapcsolódtak. Az elektronszerkezeti változások következtében az őket összehozó molekula kettéhasad, majd darabjait a hőmozgás lelöki az RNS-ről. De vissza-

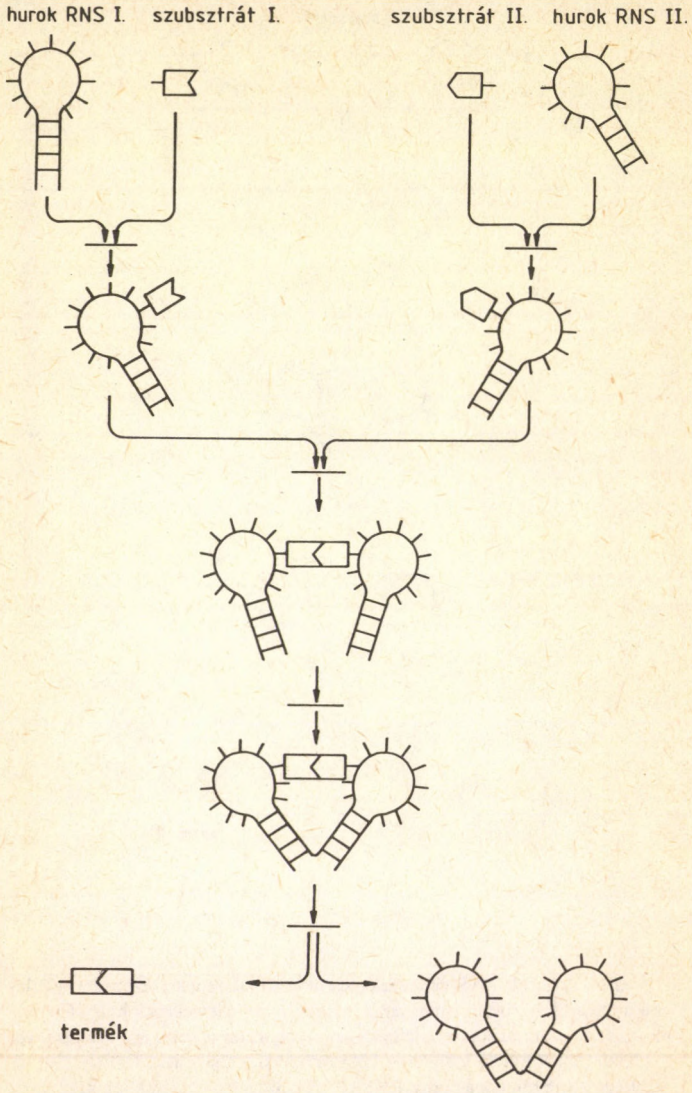
marad a két összekötött hurokból álló szerkezet, amelynek másodlagos kötőhelyei pont olyan térállásúak, hogy az őket összehozó molekulákkal azonos molekulák megragadására képesek (amelyek azután kettéhasadva ismét leválnak róluk). A hurkok tehát enzimmé váltak, hasító enzimmé, az őket összehozó molekula pedig a szubsztrátjukká. A teljes folyamatot vázlatosan a *8. ábra* mutatja be. Lényegében hasonló módon szerelődnek össze azon enzimek is, amelyek két kis molekulát egy nagyobbá képesek összekapcsolni *(9. ábra)*, vagy egy molekulán valamilyen átalakítást végeznek el.

Íme tehát, az enzimek keletkezéséhez sem kellett semmiféle csodás véletlen, az anyagcsere bármely molekulafajtája összeszerelhette a maga enzimét a hurok szerkezetű RNS-ekkel zsúfolt kemotonban. És ha egy kemotonban valamelyik anyagcserelépés gyorsítására már összeszerelődött egy enzim, akkor az a kemoton – mint azt számítógépes vizsgálataink igazoltuk – egy kissé gyorsabban fejlődött s hamarabb osztódott, mint az enzim nélküliek, így utódai gyorsabban elszaporodtak. Azután valamelyik utódban összeszerelődött egy másik enzimféleség is, ennek utódaiban megjelent a harmadik és így tovább. Úgy tűnik, a kemotonok rendkívül gyors evolúciós léptekkel eljuthattak oda, hogy minden egyes anyagcserelépésüket külön enzim katalizálja. Igaz, még nem enzimfehérje, csak enzim-RNS.

Itt újra tisztelegnünk kell Francis Crick előtt. Ő volt ugyanis az első, aki – már két évtizeddel ezelőtt – fölvetette, hogy a biogenezis során az RNS-ek enzim szerepet tölthettek be. Igaz, erre a feltételezésre nem az elmondott gondolatmenet nyomán jutott. E sorok írója egy évtizeddel később, már a kemotonelmélet alapján vont le hasonló következtetést. A tudományos világ azonban e gondolatokat elvetette, mondván: egyetlen példa sincs arra, hogy RNS enzim szerepet tölthetne be. Azóta újabb évtized telt el. És 1981-ben Lech és munkatársai fölfedezték: a mai élővilágban is működnek enzim-RNS-ek.



8. ábra. A hurok-RNS-ek összekapcsolódásának sem kell a puszta véletlenen múlnia. A hurokrészen ugyanis számos aktív, másodlagos kötés létesítésére alkalmas atomcsoport található, amelyek az anyagcserében szereplő vegyületek molekuláival ideiglenes kölcsönhatásba léphetnek. Ez lehetővé teszi, hogy e vegyületek a hurok-RNS-ekből mintegy összeszereljék saját enzimeiket. Az ábrán annak sematikus vázlata látható, hogy egy két kötőhellyel rendelkező molekula hogyan tud összeszerelni egy olyan enzim-RNS-t, amely képes a molekulát specifikusan elhasítani.



9. ábra. Nemcsak bontó, de szintetizáló enzimek is összeszerelődhettek hurok-RNS-ekből abiogén úton. Az ábra egy ilyen folyamatot mutat be vázlatosan.

8. CÉLBA ÉRTÜNK

Célba értünk. Megmutattuk, hogyan keletkezhettek az ősvizekben fluid masinák, önreprodukáló, majd a térben osztódó masinák, hogyan alakult ki a primitív programvezérlés, majd a szekvenciák, azután, hogy a véletlenszerűen kialakult szekvenciák hogyan kaptak értelmet a hurokszerkezetek révén, ezekből hogyan született meg a funkció, azaz hogyan születtek meg az enzimek és gének.

Hohó! – szól közbe most a figyelmes olvasó –, arra még nem találtunk megoldást, hogy a gének hogyan jöttek létre!

Dehogyisnem! Dehogyisnem! A megoldás megvan, noha eddig még valóban nem beszéltünk róla. Tessék csak végiggondolni, mi is történik egy enzim-RNS replikációjánál. Mindenekelőtt megbomlik a kettős szál szerkezet, s az RNS egyes szálú fonallá válik. Ezzel természetesen speciális térszerkezete is megszűnik, és az enzim funkciót sem tudja betölteni, viszont most mintaként, templátként szolgálhat egy új RNS-szál felépítéséhez. Az új szál szekvenciáját, „betűsorrendjét" természetesen a mintaszál szabja meg a párképzés szabályai szerint, vagyis ahol a mintában *A* van, ott az új szálban *U*, ahol az egyikben *G*, ott a másikban *C* stb. Az új szál szekvenciája tehát nem másolat, hanem – ahogy mondani szokták – kiegészítő szekvencia.

Nevezzük pozitív szálnak az enzimként szereplő szálat, a róla készült kiegészítő szekvenciájút pedig negatívnak. Nyilvánvaló, hogy a negatív szál térszerkezete hasonló lesz a pozitív széléhez, hiszen ahol a pozitív szál spiralizálódni tudott saját magával, ott ezt a negatív szál is megteheti, de az is nyilvánvaló, hogy nem rendelkezik azzal az enzimatikus tulajdonsággal, mint a mintája, hiszen ahol azon *A* volt, ott ezen *U*

van stb., azaz a funkciós csoportok, melyek révén kölcsönhatásba léphetne más molekulákkal, itt máshol, másként helyezkednek el. Van tehát két RNS-szálunk: egy pozitív és egy neki megfelelő negatív. A pozitív szálnak kétféle funkciója is van, föltekeredett állapotban specifikus enzimként működik, nyitott egyes szál formájában pedig mintaként szolgál a negatív szál felépüléséhez. De mi a negatív szál funkciója, ha enzim szerepe nincs?

Hát ő a *gén*. Rajta készül ugyanis a replikáció során a pozitív szál, ő hordozza azokat az információkat, amelyek az adott enzim (eRNS) felépüléséhez szükségesek. Ez az egyetlen funkciója, de ez a funkció döntő az élővilágban. Ha az ő szekvenciájában változás áll be, megváltozik az általa meghatározott enzim szekvenciája, szerkezete és működőképessége is. Vagyis nemcsak a gén született meg, hanem az a – mutációnak nevezett – örökletes változási mechanizmus is, amely központi szerepet játszik a mai genetikában. És épp ezen a mutációs mechanizmuson keresztül juthatunk el a fejlődés további állomásaira.

Az itt leírt RNS-replikációs mechanizmusok igen tökéletlenek, azaz nagyon nagy a hibás nukleotidbeépülés valószínűsége. Ma ezt úgy mondanánk, hogy ezeknek a rendszereknek igen nagy a mutációs rátájuk. A nagy mutációs ráta felgyorsítja az evolúciós folyamatot, lehetővé teszi egyre tökéletesebb, jobban működő, hatékonyabb enzimek és a hozzájuk tartozó génszekvenciák megjelenését. Ez azt jelenti, hogy az Ősföld kemotonjai igencsak rövid evolúciós úton eljuthattak enzimeik tökéletesedési folyamatának végére, azaz arra a fejlődési fokra, amikor anyagcseréjük minden lépését enzim (eRNS) katalizálta, s mindegyik enzim az elérhető legjobb konstrukció volt.

Amilyen előnyös volt a tökéletesedési folyamat elején a nagy mutációs ráta, amely újabb és újabb variánsokkal növelte a természetes szelekció válogatási lehetőségeit, olyan hátrányossá vált később. A szinte tökéletessé vált rendszerekben ugyanis szinte minden változás rontott a rendszeren. Előnyösebb lett volna az optimalizálódott gének információtartalmának megőrzése. Ez a szükséglet vezethetett el ahhoz a folya-

mathoz, amelynek során a génszekvenciák a sokkal stabilabb szerkezetű DNS-ekbe íródtak át, a katalizátor szerepét pedig arra alkamasabb szerkezetű makromolekulák, a fehérjék vették át. S közöttük információközvetítőként a mai napig megmaradt az RNS. Legalábbis a földi élővilágban.

Ennek az utolsó folyamatnak a lépéseit ma még felvázolni sem tudjuk. Ám az út, amelyen a kutatásnak végig kellene haladnia, kijelölhető, sőt az első lépéseket meg is tettük rajta. Mindenekelőtt bizonyítható, hogy azon enzimfehérjék koenzimjei, illetve aktív helyei, amelyek az evolúció első egymilliárd éve során fejlődtek ki (és ez a döntő többség), szinte kivétel nélkül nukleotidok vagy azokra visszavezethető molekulák (Korányi, Gánti 1980). Ez határozottan arra utal, hogy a fehérjék úgy vették át az RNS-ektől az enzim szerepet, hogy átvették belőlük a kötő-, illetve hatócsoportokat is. Ha pedig ez így volt, akkor a genetikai szótár, amely a nukleinsavak négybetűs ABC-jével írt szövegeket a fehérjék húszbetűs ABC-jével írt szövegekké fordítja át, szintén nem alakulhatott ki véletlenszerűen. Olyanná kellett alakulnia, hogy a már meglévő, bevált enzimhatású „nukleinsavszövegek" „fehérjeszöveggé" átfordítva azonos funkciójú és enzimhatású fehérjét eredményezzenek.

És valóban, előzetes vizsgálataink szerint, ha az enzimfehérjék aktív helyeinek és más konzervatív (vagyis az idők folyamán nem változó) részeinek aminosav-szekvenciáit a kódszótár segítségével „nukleinsavnyelvre" fordítjuk vissza, hurokszerkezeteket képező RNS-szekvenciákat kapunk. Úgy tűnik tehát, hogy a fehérje enzimek megjelenése a kemotonokban az evolúció során ugyancsak nem vakvéletlen, hanem törvényszerűen bekövetkező eseménysorozat volt. De azt a kemotont, amelyben az öröklődő információt a DNS hordozza és az anyagcsere-folyamatokat enzimfehérjék katalizálják, már nem kemotonnak nevezik, hanem sejtnek. Sejtnek, a biológia legbiológiaibb értelmében.

*

Az Ősföld légkörében zajló kémiai folyamatok logikusan egymásba kapcsolódó lépéseinek sorozatán keresztül az élő

sejtig jutottunk el. És e hosszú-hosszú eseménysorozatban sehol sem volt szükségünk semmiféle csoda, vakvéletlen vagy valószínűtlen esemény feltételezésére. Ha van az élet keletkezésében csoda, akkor az az, hogy az anyag a természet törvényeit követve egyre összetettebb, egyre bonyolultabb, egyre több funkciót ellátni képes rendszerekké szerveződik, egészen odáig, hogy a legbonyolultabb ilyen rendszerek – embernek nevezik ezeket – maguknak e szerveződési törvényeknek a megértésére és felderítésére is képesek.

Nem biztos, hogy az itt elmondottak minden részletükben helytállóak, hogy minden úgy történt, ahogy itt elmondottuk. De azt hiszem, elfogadhatóan bizonyítottuk: ha nem ragaszkodunk a fehérje masina nélküli keletkezéséhez, ha nem abból indulunk ki, hogy öröklődő programok jöttek létre, még mielőtt léteztek volna örökletes rendszerek, ha nem dogmaként kezeljük a ma divatos biológiai szemléletmódot, akkor az életkeletkezés kérdésére egyértelmű, világos válasz adható. S ennek az egyértelmű és világos válasznak egyik alapját éppen a Crick és Watson felderítette kettős spirál molekulaszerkezet képezi, de lényeges pontja az először Crick által feltételezett eRNS-ek létezése is.

Végezetül be kell vallanunk az olvasónak, hogy mindaz, amit itt olvasott, nem tudomány. Nem tudomány, csak tudományos logikai okfejtés. A tudomány – legalábbis az egzakt természettudomány – e logikai okfejtések mellé a bizonyításokat, a precíz elméleti levezetéseket, a számításokat is megköveteli. De hadd tegyük ehhez hozzá, hogy az itt elmondottak nagy része mögött már ott áll az egzakt tudományos elmélet is, a maga bizonyítékaival, levezetéseivel, számításaival. Akit ez is érdekel, megtalálhatja a szerző kétkötetes *Chemoton elmélet* című monográfiájában. Azt azonban már nem olvasni, csak megtanulni lehet. Mint minden más tudományt.

IRODALOM

Bahadur, K.: Synthesis of Jeewanu, the Protocell. *Zentralbl. Bacteriol.* Abt. 2. *121.* 291. (1967).

Békés F.: Simulation of Kinetics of Proliferating Chemical Systems. *Bio Systems, 7.* 189. (1975).

Chech, T. R.: RNA as an Enzyme. *Scientific American, 225.* 76–88. (1986).

Crick, F. H. C.: The Origin of the Genetic Code. *J. Mol. Biol. 38.* 567. (1968)

Crick, F. H. C.: *Life Itself – Its Origin and Nature.* Futura Publications (1982). Magyar kiadás: *Az élet miféntje.* Gondolat (1987).

Csendes T.: A Simulation Study on the Chemoton. *Kybernetes, 13.* 79. (1984).

Eigen, M.: Selforganization of matter and the evolution of biological macromolecules. *Naturwissenschaften, 58.* 465. (1971).

Eigen, M. – P. Schuster: *The Hypercycle. A Principle of Natural Self-Organization.* Springer-Verlag (1979).

Epikurosz legfontosabb tanításai. Officina Könyvtár (é. n.) Ford. Kövendi Dénes és Sárosi Gyula.

Fox, S. W.: A theory of macromolecular and cellular origins. *Nature, 205.* 328. (1965).

Gánti T.: *Forradalom az élet kutatásában.* Gondolat (1966).

Gánti T.: *Az élet princípiuma.* Gondolat (1971, 1978); Kriterion (1979); OMIKK (1983); Wiezda Powszechna (1986, lengyelül); OMIKK (1987, angolul).

Gánti T.: Organization of Chemical Reactions into Dividing and Metabolizing Units: the Chemotons. *Bio Systems, 7.* 15. (1975).

Gánti T.: Chemical Systems and Supersystems, I. Chemical Cycles. *Acta Chimica Acad. Sci. Hung. 91.* 357. (1976); II. Stoichiometry of Self-Reproducing Chemical Systems. Uo. *91.* (1976); III. Models of Self-Reproducing Chemical Supersystems: The Chemotons. Uo. *98.* 265. (1978).

Gánti T.: A prebiológiai evolúció értelmezése a chemoton elmélet alapján. *Biológia, 27.* 161. (1979).

Gánti T.: Az ősszekvenciák kialakulása. *Biológia, 31.* 47. (1983).

Gánti T.: Coupling of Autocatalytic Cycles as a Possible Explanation of Chemical Oscillators. *React. Kinet. Catal. Lett. 24.* 197. (1984).

Gánti T.: *Chemoton elmélet.* I. *A fluid automaták eleméleti alapjai.* OMIKK (1984); II. *Az élő rendszerek elmélete.* Uo. (1989).

Kendrew, J. C.: *Architecture of a protein molecule. Nature, 182.* 662. (1958).

Korányi P. – Gánti T.: Koenzimek, mint az ősi enzim-RNS-ek maradványai. *Biológia. 29.* 107–124. (1981).

Leibniz, G. W.: Értekezések. Franklin társulat (1907). Ford. Bauer Simon és Vida Sándor.

Matthews, C. N. – R. E. Moser: Peptide Synthesis from Hydrogen Cyanide and Water. *Nature, 215.* 1230. (1967).

Oró, J. – A. P. Kimball: Synthesis of purines under possible primitive Earth conditions. *Arch. Biochem. Biophys. 96.* 293. (1962).

Sanger, F.: The Sequence of Amino Acid Residues in Proteins. *J. Polymer Science, 49.* 3. (1961).

Schrödinger, E.: *What is Life?* McMillan (1944). Magyar kiadás: *Válogatott tanulmányok.* Gondolat (1970, 1985[2]). Ford. Nagy Imre.

Watson, J. D. – F. H. C. Crick: A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid. *Nature, 171.* 737. (1953).

Watson, J. D. – F. H. C. Crick: Genetical Implication of the Structure of Deoxyribonucleic Acid. *Nature, 171.* 964. (1953).

Woese, C. R.: A proposal concerning the origin of life on the planet Earth. *J. Mol. Evol. 13.* 95. (1979).

A fedélterv Gosztola Gábor munkája

A kiadásért felel a Gondolat Könyvkiadó igazgatója

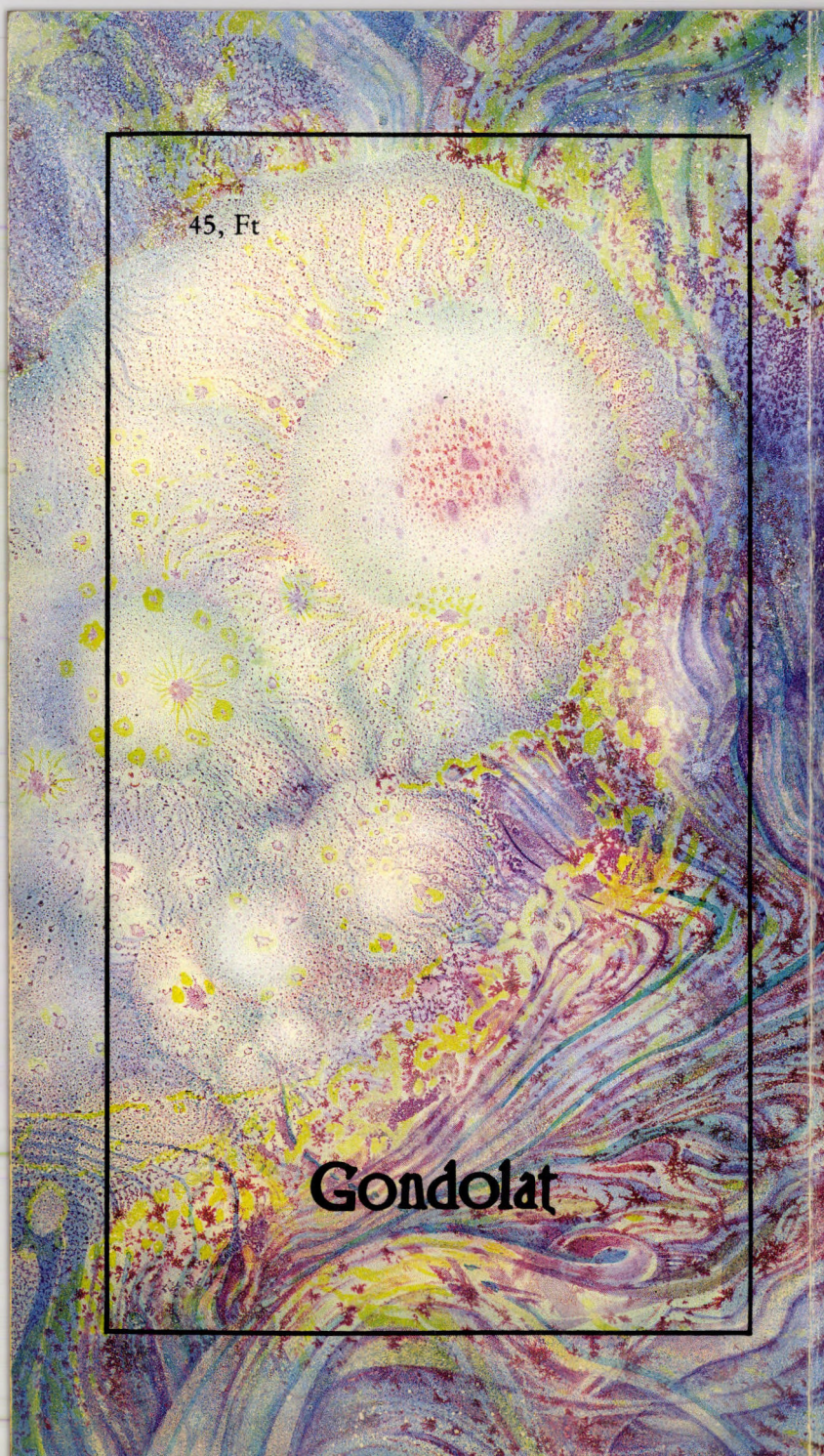
89/3623 Franklin Nyomda, Budapest
Felelős vezető: Mátyás Miklós igazgató

Felelős szerkesztő: Garai Attila
Műszaki vezető: Tóbi Attila
Műszaki szerkesztő: Szabó Gyula

Megjelent: 6,71 (A/5) ív terjedelemben,
az MSZ 5601–59 és 5602–55 szabvány szerint

„A hévforrásokban tenyésző kékalgák, a sarkvidéki zuzmók, a tengerben lebegő medúza, a fáról leső hiúz vagy a több ezer éves cédrus hozdoznak közös, évmilliárdok óta változatlan tulajdonságokat. Ezeket szoktuk azzal a szóval összefoglalni, hogy ők mind: *élnek*. Hogy mi módon élnek, az a DNS-ben van kódolva, és változtatható. De hogy éljenek egyáltalán, az ahhoz szükséges, mégpedig szintén öröklődő tulajdonságokat részben a citoplazma oldata hordozza: nem kitüntetett makromolekulák, hanem *a rendszer maga*. E kevésbé változékony tulajdonságok kialakulását és öröklődését ma jóformán senki nem kutatja, pedig enélkül sem az élet lényege, sem a keletkezése meg nem érthető."

Lényegében mi is ez a könyv? Fricska Francis Cricknek, *Az élet mikéntje* (Gondolat, 1987) címen megjelent űrbiológiai elmélkedéséért – vagy foglalata az életkeletkezés legföldönjáróbb elméletének? Bombamerénylet a molekuláris biológia hatalmas épülete ellen – vagy tudósítás egy másik építkezésről? Kérjük, vitassák meg négyszemközt: a népszerű vegyészmérnök–biológus–főszerkesztő GÁNTI Tibor és a pártatlan Olvasó.


45, Ft
Gondolat