

AZ ÉRTELEM MEGKÍSÉRTÉSE

Gánti Tibor

AZ ÉLET ÁLTALÁNOS
ELMÉLETE

Az élet mivolta

Az élet princípiuma

Az élet és a halál szintjei

MŰSZAKI KÖNYVKIADÓ, BUDAPEST

© Gánti Tibor, 2000

© Műszaki Könyvkiadó, 2000

Ez a könyv a *Kontra Krick avagy az élet mivolta* (Gondolat, Budapest, 1989),
Az élet principiuma (4. magyar nyelvű kiadás, OMIKK, Budapest, 1983) kiadványok
valamint *Az élet és a halál szintjei* (Workshop on Life, Modena, 2000) előadás
szövegeinek felhasználásával készült

ISBN 963 16 27 02 0

„Az egész élet, a legegyszerűbb organizmusoktól a legbonyolultabbakig, beleértve természetesen az embert is, a külső környezettel való egyensúlyozások fokozatosan rendkívül bonyolulttá váló hosszú sora. Eljön az idő – ha távoli is még –, amikor a matematikai analízis, a természettudományi analízisre támaszkodva, egyenletek fenséges formuláiba foglalja ezeket az egyensúlyozásokat, egyenletbe foglalva végül önmagát is.”

(Pavlov)

ELŐSZÓ

„Mert bármennyire hihetetlen, a tudomány úgy keresi az élet keletkezésének útját-módját, hogy azt sem tudja, mit is keres tulajdonképpen.”

Gánti Tibor

Az alapkérdések – valójában gyermeki kérdések – megválaszolása gyakran a legnehezebb. Nem véletlenül kerül például a megfontolt, kísérletező kutató a végtelen terek és idők kérdését, az energia, információ és anyag közti lehetséges kapcsolatok kutatását.

Vannak azonban megkerülhetetlen alapkérdések. „Mi az élet?”, „Hogyan keletkezett az élet?”. Ezek ott settenkednek körülöttünk akkor is, ha menekülünk megválaszolásuk elől.

Egy átlagos biológus számára az élet – evidencia. Olyan, mint hálnak a víz, embernek a levegő ..., létének forrása. Rövid ideig sem létezhet nélküle és ezért természetesnek, adottnak veszi. Gánti Tibor nem átlagos biológus; őt éppen az élet lényege, az élettelen és élő közötti átmenet foglalkoztatta folyamatosan. Ez az érdeklődés korán, még tanulóévei alatt felismeréssé érett, a felismerésből elmélet, majd szemléletformáló kötetek, monografikus munkák születtek. Közben – könyveit olvasva – felnőttek új nemzedékek. A szellemi szövetségesek és ellenfelek kooperatív és kompetitív gondolatai nyomán – magyar nyelvterületen, itthon és otthon ... szerte a világban – kialakult az evolúciós biológiai gondolkodásnak egy sajátos, új irányzata, iskolája. Gánti Tibor esetében is teljesült Sylvester János (1539) iskolateremtő parancsolata ... „*Tudós mesterek, tegyétek tudósokká tanítványaitokat*”.

A közvetlen és közvetett tanítványok legjobbjainak munkája nyomán formálódik a nemzetközi elismerés: az idő érleli gyümölcseit. A chemotonelmélet kidolgozója viszont közben megtapasztalhatta az örök igazságot arról, hogy aki túl korán ébred, az ... sötétben ébred. És aki túlságosan előre merészkedik az ismeretlenben, arra minden bizonnyal saját csapatai is löni fognak. Ez a felderítők mindenkori sorsa és kockázata. Mindenkori elégtétele viszont az, hogy egymaga tárt fel egy területet követői előtt.

Ez az előszó is egy ilyen követés eredménye: saját tanítványaimnak a chemotonelmélettel való szembesülése nyomán született. Engedtetsek meg, hogy röviden felidézzem ezt – az általános tanulságokkal is szolgáló – történetet.

Az evolúciótan oktatása során az élő és élettelen anyag egymáshoz való viszonyának, az élet keletkezésének tudásalapú magyarázata rendszeresen előkerül (évente több alkalommal is) az előadásokon és szemináriumokon. Fontos kérdés ez, mert valójában ezen a ponton válik el a hit és a tudás. A kérdéseket is ennek megfelelően kell kezelni, nem szabad sérteni az emberek hitét és nem szabad csorbítani a tudásba vetett bizalmát. De világossá kell tenni számukra e között a két fontos és sajátosan emberi intellektuális

képesség közötti különbséget – különös tekintettel az egyetemekre is begyűrűző agresszív szektáriánus jelenségekre. Kötéltánc ez a javából minden empatikus oktató számára és ezen a kötélén segített évről évre sikeresen egyensúlyozni a chemotonelmélet.

Szokás szerint előkerült az élő minimálrendszeres kérdés a legutóbbi tanévben is. Megtörtént az élet lényegére választ kereső elméletek bemutatása, majd a hallgatók feladata volt saját alakuló tanári értékrendjük szerint rangsorolni a bemutatott elméleteket. Az eredmény a korábbi évek rangsoránál is egyértelműbb volt, gyakorlatilag valamennyi megkérdezett Gánti Tibornak a chemotonelméletét tartotta a legátfogóbbnak, legésszerűbben felépítettnek, olyannak, amely hallgatóként és leendő tanárként leginkább segíti – a részletek és az összefüggések szintjén egyaránt – annak a megértését, hogy milyen emberi logikával követhető egy élettelenből élőbe átbillenő anyagi rendszer kialakulása.

A hallgatói értékelések szemináriumi megbeszélése során született meg a gondolat: osszuk meg a közösségi véleményt a chemotonelmélet kidolgozójával. Őt diák fogalmazta, majd közel ötvenen írták alá azt a levelet, melyben megköszönték Gánti Tibor kitartó fáradozását a gondolatrendszer kidolgozásában. Tették ezt úgy, hogy sejtelmük sem volt az elmélet új magyar és angol kiadására vonatkozó előkészületekről. Postafordultával érkezett a válasz, melyből – erkölcsi tanulságként is – ide kívánczik az alkotómunka elismerésére vonatkozó néhány gondolata:

„Az elismerés különböző formáinak – legyen az szóbeli dicséret, írásos elismerés (mint a Ti leveletek), valamiféle kitüntetés, díj stb. – a társadalom szempontjából fontos szerepe van. A társadalmat ugyanis az emberi munka tartja fenn, de az emberi alkotás viszi előre. Azok a társadalmak fejlődnek gyorsan, kerülnek a világ élvonalába, ahol az alkotásokat megbecsülik és ahol a társadalom tagjait alkotásra ösztönzik.

Társadalmi szempontból az alkotás elismerésének más a szerepe a fiatal és az öreg alkotó esetén. A fiatalnál egy dicséret, egy díj, egy kitüntetés elsősorban biztatás. ... Az idős generáció esetén az alkotás elismerésének társadalmi szerepe más. Itt már nem a további alkotásokra való ösztönzés a főszerep. Itt egy-egy díj, egy-egy kitüntetés már elsősorban a társadalomnak szól. Azt mondja a társadalom tagjainak, hogy ide figyeljete, ilyen alkotásokat hozzatok létre, így dolgozzatok, így legyetek hasznosak a társadalom számára. ... Ez nagyon fontos manapság, amikor a médiából ömlenek a negatív példák, amikor a bennünket körülvevő környezet ... az élvezetre és nem az alkotásra ösztönöz.”

A Műszaki Könyvkiadó – azzal, hogy újra kiadja az élet princípiumára vonatkozó, immár tudománytörténeti távlatokban is szemlélhető gondolatokat – a fiatal és a kevésbé fiatal nemzedékek számára egyaránt hasznos munkát végez.

Hogy miért hasznos az új magyar kiadás a most felnövekvő tanár, mérnök és kutató nemzedéknek, azt évről évre jelzik számomra az arra legilletékesebbek: az élet iránt érdeklődő biológus, környezetkutató, mezőgazdász hallgatók. A kiadónak a társadalom egésze felé küldött üzenetét viszont – Bernard Shaw egyik mondását parafrázálva („Bizonnyára jól dolgozhattam, mert sohasem tüntettek ki.”) – a következőkben lehetne talán összefoglalni:

Néha éppen az mutatja egy ember munkájának maradandó értékét, hogy nem baráti hivatalosságok, hanem a társadalom értékítélete adja meg számára – gyakran csak hosszú idő múltán – a kitüntető elismerést. És szerencsés az, aki elég hosszú életű, hogy ezt megérje.

Az egyetemes és a magyar biológia bővelkedik megkésett elismerésekben. Saját szűkebb érdeklődési körömből Gelei József kromoszómákkal kapcsolatos kutatásainak immár közel évszázados, Festetics Imre „genetikai törvényeinek” közel kétszáz éves és Lencsés György 1500-as években íródott hatkötetes magyar élettudományi nagymonográfiájának immár fél évezredes csipkerózsika-álmára utalnék itt csupán.

A chemotonelmélet sorsa – ezekkel összehasonlítva – szerencsésnek mondható: folyamatosan élt és egyre jobban hatott az utóbbi ötven esztendőben. Most a magyar kiadással párhuzamosan készülő oxfordi kiadása révén pedig remélhetőleg kilép a nagyvilág nyilvánossága elé és hatni fog – immár az egész világon.

Mert – bármennyire hihetetlen – a tudomány még ma is úgy keresi az élet keletkezésének útját-módját, hogy azt sem tudja, mit is keres tulajdonképpen.

Veszprém, 2000. június

Szabó T. Attila

Első látásra meglepőnek tűnhet, hogy egy olyan biológus (is) ír előszót Gánti Tibor prebiológiai evolúcióval kapcsolatos kutatási eredményeit összegző könyvéhez, aki szakterületileg igen távol áll ettől a témakörtől, hiszen érdeklődésének középpontjában a szupraindividuális organizációval foglalkozó tudomány, a szünbiológia áll.

A kiadó megtisztelő felkérésének mégis örömmel tettem eleget, aminek több oka is van. Az indoklást rögtön a legfontosabbal, egy objektív okkal kezdem. Ez a téma, az élő rendszerek kialakulásának és általános sajátosságainak a kérdése mindmáig egy olyan talányos gondolati kör, aminek mágneses hatása alól szinte egyetlen gondolkodó ember sem tudja kivonni magát. Nem véletlen, hogy Gánti Tibornak *Az élet princípiuma* című könyvében is számos érdekes és elgondolkodtató idézet szerepel erről a témakörrel, s nemcsak biológusoktól, hanem a legkülönbözőbb szakterületek képviselőitől, a filozófustól az atomfizikusig. Az is megfigyelhető ugyanakkor, hogy az álláspontok korántsem egységesek, sőt mindegyik tudós inkább a saját tudományos érdeklődésének (szakterületi „csőlátásának”) megfelelően viszonyul a problémához, s többségük erről az oldalról tesz hozzá valamilyen érdemi és egyéni véleményt, a ma még számos nyitott kérdés mielőbbi tisztázásának reményében. Ennek ellenére a megnyugtató megoldás még késik, s az is lehet, hogy sokáig homályban fog maradni. Ez azonban korántsem jelentheti azt, hogy hagyjunk fel a rejtély megfejtésének igényével.

Nagy öröm tehát, hogy akadnak olyan elkötelezett kutatók, mint Gánti Tibor, aki ennek a problémakörnek már fiatal korában a bűvkörébe került, s onnan nem is akart szabadulni. Hosszas alkotó munkával kiérlelt egy elgondolást, amit elméleti és gyakorlati téren

igyekezett alaposan körüljárni, hitelesen igazolni, s elkötelezetten, a kudarcoktól sem meginogva, a kétkedőknek egyre újabb érvekkel válaszolva mindmáig érvelni elképzelései mellett. Koch Sándor azt írja *Az élet mikéntje* című könyv előszavában, hogy Francis Crick könyvének a valódi és örökzöld értéke az ő szemében a bátorsága. Én ugyanezt tartom Gánti Tiborról, akinek volt „mersze” egy kis ország csekély lehetőségeinek ismeretében és a belterjesség kötöttségeinek tudatában egy ilyen témába belekezdeni, s az itthoni méltatlan körülmények között mindvégig kitartani.

Természetesen megértem Gánti Tibort. Hiszen az ő vállalkozása egy roppant izgalmas kaland, a csaknem megismerhetetlennel való szüntelen birkózás és viaskodás, ami viszont egy élénk fantáziájú, de racionálisan gondolkodó ember számára egyúttal a legnagyobb gyönyörűség is. Számomra különösen az volt igazán elismerésre méltó Gánti Tibor eddigi, remélhetően még újabb eredeti ötletekkel és eredményes megoldásokkal folytatódó életművében, hogy az állandóan eléje tornyosuló objektív nehézségek és szubjektív ítéletek sem törték meg alkotókedvét és lelkesedését, s úgy hitt a saját igazában, hogy kész volt a vitatott kérdéseket, az ellenérveket, sőt még a támadásokat is higgadtan mérlegelni, sőt képes volt azoknak az érdemi részét saját javára fordítani. S mindezt itthon vitte véghez, a sokszor elkeserítően szegényes és kicsinyes hazai környezetben, lemondva a nemzetköziséggel járó tágabb lehetőségekről, a kétségtelen szakmai és személyes előnyökről.

Végül engedtessek meg, hogy szerepvállalásom indoklásául néhány szubjektív okot is felsorakoztassak, a teljesség igénye nélkül. Engem kezdettől fogva lebilincsel Gánti Tibor intuitív gondolatisága, munkáit egyetemista koromtól kezdve élénk érdeklődéssel olvastam, majd oktattam is. Meglepődve tapasztaltam ugyanis, hogy azok a hallgatók, akik a mi szünbiológiai (vagy „köznapibban”, s ezért nem teljesen szakszerűen fogalmazva: ökológiai) szakterületünk iránt érdeklődve vagy elkötelezve jönnek az egyetemre, mennyire nem ismerik, s ezért nagyon gyakran alábecsülik ezeknek az általános kérdéseknek a jelentőségét.

Én viszont úgy látom és azt vallom, hogy az élő rendszerek legáltalánosabb sajátosságainak átfogó ismerete nélkül nem lehet a szupraindividuális organizációt sem megérteni. Ahhoz pedig, hogy az élő rendszerek „mibenlétét” (Szent-Györgyi Albert találó kifejezését idézve) feltárjuk, szerkezeti és működési (strukturális és funkcionális) viszonyait megértsük, az életben maradás lehetőségeit és feltételeit tisztázzuk, elengedhetetlenül szükségesnek érzem a kialakulás körülményeinek és menetének minél pontosabb felderítését, biztos ismereteink sok apró és meglehetősen hiányos részleteiből egy világos vonalvezetésű elmélet segítségével egy elfogadható mozaik összerakását.

Mindezeknek az ismereteknek a hiányában véleményem szerint a szünbiológiát sem lehet eredményesen művelni, meggyőződéseim ugyanis, hogy az élő rendszerek általános törvényszerűségei a szupraindividuális organizáció szintjén is érvényesek. Külön öröm számomra, hogy a graduális és a posztgraduális hallgatóimtól kapott pozitív visszajelzések megerősítettek ebben a hitemben.

Gánti Tibor könyvének gerincét a chemotonelmélet képezi, lényegében e köré szerveződik minden gondolata, legyen szó az élő rendszerek kémiai alkotóelemeitől kiindulva az életkritériumokon át az elméleti biológiai kitekintésig.

Külön érdeme viszont munkájának, hogy nem vész el a részletekben, egységes egésszé igyekszik szintetizálni a napjainkig rendelkezésre álló fizikai, kémiai és biológiai ismereteket, segítségül hívva ehhez a korszerű kibernetikai és matematikai ismereteket, alkalmazva a modellezés és a számítógépes szimuláció eszköztárát is.

Az élő rendszerek tulajdonságainak megfejtésénél és magyarázatánál alulról, az élettelen természet elemei felől indulva építkezik. Ez azonban nem leegyszerűsítést jelent, hanem a reverzibilis és az irreverzibilis folyamatokból álló, rendkívül bonyolult, sok helyen és változatos módon összekapcsolódó reakciójárat útvesztőiben történő egyértelmű eligazodást, a lényegi tulajdonságok és folyamatok kiemelését segíti.

Soha nem téveszti a szerző szem elől, hogy ezek az elemi történések egy olyan egéssé (szintetikus) egésszé állnak össze, amelyek az élő rendszereket („mivoltukat”) kizárólagosan jellemzik, s ezáltal módot adnak a kialakulás körülményeinek és menetének („mikéntjének”) egzakt értelmezésére is. Ez tekinthető munkája legnagyobb, elvitathatatlan erényének.

Gánti Tibor elméletén kívül természetesen léteznek más hipotézisek is az élő rendszerek lényegéről és keletkezéséről. Mérvadó véleményalkotásra abban a kérdésben, hogy az e kérdéskörrel foglalkozó elgondolások közül melyik és mennyiben tartható elfogadhatónak vagy reálisnak, nem érzem magam illetékesnek. De ennek „eldöntését” a tudomány jelenlegi állásánál nem is érzem igazán fontosnak, hiszen az ebben a kérdésben történő állásfoglalást illetően ma még a személyes szimpátia, az ismeretség, sőt a hit misztikus világa is döntő tényező lehet.

Lényegesnek inkább azt tartom, hogy legyünk nyitottak ezeknek a kérdéseknek a tanulmányozására, céljaik és motivációik befogadására, s igazi humanistához méltóan igyekezzünk minél szélesebb körben tájékozódni, s ennek eredményeit magunkban feldolgozni. Ehhez az izgalmas gondolati felfedezőúthoz melegen ajánlom mindenkinek (tehát nemcsak a szakembereknek) szíves figyelmébe Gánti Tibor jelenlegi, összegző szándékú könyvét.

Szeretném remélni, hogy az olvasó ezt a könyvet nemcsak haszonnal fogja forgatni, hanem némi büszkeséggel is, hiszen a szerző révén ebben a világszerte fokozott és általános érdeklődésre számot tartó témakörben kis hazánk is méltó és rangos helyet érdemelt ki meggyőződésem szerint a világ tudományos közvéleményében.

Debrecen, 2000. június

Dévai György

BEVEZETÉS

Ez a könyv a chemotonelmélet alapján kívánja feltárni az élet mibenlétének titkát, az élő és élettelen rendszerek között lévő minőségi különbségek alapvető hátterét, valamint ezen ismeretek birtokában felvázolni a spontán életkeletkezés folyamatának kulcslépéseit. A chemotonelmélet alapfelismerése 1952 novemberében született. Ez lényegében 50 esztendő, azaz fél évszázados távlatot jelent. Fél évszázad a hétköznapi életben is történelmi távlat, még inkább történelmi távlat a tudományokban, legfőképpen pedig történelmi távlat a biológia tudományában, amely még a tudományok között is kiemelkedő gyorsaságú fejlődést mutatott a huszadik század második felében. A chemotonelméletet először 1971-ben publikáltam *Az élet princípiuma* című könyvben. Azóta is eltelt közel 30 esztendő. A tudománytörténetben, a biológia történetében e három évtized is történelmi távlatot jelent. Azt tehát, hogy a chemoton elmélet alapgondolatai mennyire helytállóak, már ilyen távlatból lehet megítélni. Érdemes ezért egy rövid visszapillantással áttekinteni az elmélet történetét 1952-től napjainkig.

Mindannak, amit ma molekuláris biológiának nevezünk, 1952-ben még a gondolati csírái sem léteztek. Azt ugyan már sejtették, hogy az öröklődés valamilyen módon kötődik a dezoxiribonukleinsavhoz, de ennek módjáról, mechanizmusáról még halvány elképzelések sem léteztek. Egyedül Ervin Schrödinger *Mi az élet?* című könyvecskéjének egy-két bekezdése próbált utalni arra, hogy elvileg egy aperiodikus kristály képes lehet igen nagy mennyiségű információ molekuláris tárolására. De hogy ez hogyan valósulhat meg egy sejt magjában lévő DNS-ben, arra még gondolati utalások sem láttak napvilágot. Hasonlóképpen semmiféle ismeret nem volt a fehérjék szerkezetére vonatkozóan sem. Azt tudták, hogy aminosavakból épülnek fel, tudták, hogy óriásmolekulák, de hogy ezek az óriásmolekulák milyen szerkezeti felépítésűek, az aminosavak milyen sorrendben helyezkednek el – ha egyáltalán létezik valamiféle meghatározott sorrendjük – és hogy mindezek hogyan képesek meghatározni a fehérjeenzimek kémiai funkcióit, erre vonatkozóan sem rendelkezett a biológia semmiféle elképzeléssel.

Az anyagcsere kémiai átalakulásának egy-két útja már ismert volt. Mindenekelőtt a biológiai cukorbontás kémiai reakciósorozata volt lényegében feltárt, sokat lehetett tudni a biológiai oxidáció szerves savakhoz kötődő kémiai átalakulásainak egymáshoz kötődő sorozatáról, sőt ekkor már ismert volt a Krebs-ciklus is mint az első biológiai körfolyamat. Néhány autokatalitikus folyamatot már a század elején felfedeztek, de nem biológiai, hanem kémiai területen. Az autokatalízis körfolyamat-természete azon-

ban nem volt ismert és az autokatalízisre vonatkozó biokémiai példák szintén ismeretlenek voltak.

Az említett folyamatok molekuláris hátterei az ötvenes és hatvanas években kezdtek tisztázódni. A DNS molekuláris szerkezetére 1953-ban derült fény a Watson–Crick-modell révén, amelyik egyúttal felfedte az információátvitel és információmásolás molekuláris mechanizmusát is. A fehérjék primer szerkezete, azaz az aminosavsorrend mibenléte és meghatározottsága az 50-es évek vége felé kezdett tisztázódni. Ugyanebben az időben kiterjedt röntgenvizsgálatok révén vált ismertté a fehérjék szekunder és terciér szerkezete, azaz az aminosavlánc spirálszerkezete, valamint a fehérjemolekula térbeli tekeredésének módja.

Mindezek fantasztikus felfedezések voltak, amelyek egy új tudományág, a molekuláris biológia alapjait vetették meg. Kiderült, hogy az öröklődő információk tárolását, ezek másolását, replikációját, valamint az enzimszintézishez való átírását és az enzimek működését a biológiai makromolekulák molekuláris szerkezete biztosítja. A következő évtizedekben feltárult az élő rendszerek sejtszintű működésének a genetikai program által történő vezérlése és az enzimek szintézisének keresztül történő szabályozása. Miután ezek a felfedezések időrendben egybeestek a kibernetika és a számítástechnika első lépéseinek kifejlődésével, e két, egyébként távoli tudományterület egymást erősítette olyannyira, hogy az élő sejtek programvezérlésével és működésük szabályozásával foglalkozó molekuláris biológia a század második felében szinte egyeduralmukodóvá vált. A világ biológiai kutatóintézeteinek döntő többsége ezeket kutatta, a tudományos publikációkban alapvetően az ezzel kapcsolatos vizsgálati eredmények kaptak szabad utat.

De a világ a huszadik század második felében elfeledkezett arról, hogy a programvezérlésnek valamilyen működő rendszert kell vezérelnie és az enzimes szabályozásnak valamilyen működő rendszert kell szabályoznia. Hogy mi ez a működő rendszer, azzal a huszadik század második fele nem foglalkozott. Sok felfedezés született ugyan egyes vegyületek bioszintézisének feltárására és a 60-as évek második felére már megszülettek az ún. metabolic networkök, vagyis anyagcsere-hálózati térképek, sőt egyes gyógyszer-gyárak reklám céljából ilyen anyagcseretérképeket szerkesztettek, és ezek számos biokémikus szobájának falán megtalálhatók voltak. E folyamatok összességével, vagyis magával azzal a „masinával”, amely az élet működését jelenti, amelynek a működését szabályozzák az enzimes rendszerek különböző szintű mechanizmusai, amelynek a működését az enzimes rendszeren keresztül vezérli a genetikai állomány nukleotid sorrendjébe írt információ, ezzel a huszadik század második felének kutatói egyáltalán nem foglalkoztak. Pedig az élet titka éppen ezekben a rendszerekben van, ezek organizációjában, szerveződésében, működésében.

A chemotonelmélet lényegében ezzel a masinarésszel foglalkozik. Alapfelismerése, mint mondtuk, 1952 novemberében született. Ebben az időben azt már világosan lehetett látni, hogy az élő szervezetekben a folyamatok kémiai átalakulások útján mennek végbe, hogy azoknak a szervezett, szabályozott történéseknek a sorozata mögött, amelyek az élő sejtekben végbemennek, kémiai reakciók egymáshoz kapcsolódó rendszereinek a

működése rejtőzik. Maga az alapfelismerés abból indult ki, hogy kivétel nélkül minden élő rendszer rendelkezik két, egymással ellentétes tulajdonsággal. Az egyik az alkalmazkodás, ami azt eredményezi, hogy a folyamatosan változó külső körülmények ellenére az élő sejt lényegében mégis megőrzi tulajdonságait és működőképességét az általánosan előforduló vagy legalábbis a számára alkalmas létfeltételek között. Ha úgy gondolkozunk, hogy ezen alkalmazkodási folyamatok mögött kémiai-biókémiai reakciók rendszereinek kell lenni, akkor egyszerűsítve azt mondhatjuk, hogy egy reverzibilis reakciókból álló összetett reakcióhálózat – végsőkéig leegyszerűsített formájában egy reverzibilis reakciókból álló körfolyamat – elvileg képes ilyen alkalmazkodásra.

A másik tulajdonság, ami kivétel nélkül minden élőlényben megtalálható, az egyedfejlődés eseménysorozata, amely soha meg nem fordítható események egymás után következő sorozatából áll. Ez igaz nemcsak a soksejtűekre (azaz egy felnőttből soha nem lehet csecsemő), de igaz a sejtekre is, amelyek az ún. sejtciklus során különböző eseményeket produkálnak úgy, hogy az eseménysorozat egymás után következő történései közül bizonyos pontokon a folyamatok ugyan megállíthatók, de soha vissza nem fordíthatók. Ha e mögött is biokémiai mechanizmusokat keresünk, nagy általánosságban azt kell mondani, hogy erre a reverzibilis reakciókból álló reakcióhálózat nem alkalmas, itt vagy irreverzibilis reakciókból, vagy legalábbis irreverzibilis reakciólépéseket is tartalmazó körfolyamatról kell, hogy szó legyen. Az élő rendszereknek tehát biokémiai szempontból legalább két, egymástól eltérő alrendszert kell tartalmazniuk, ahol az egyikben a reverzibilis kémiai átalakulásokból álló reakcióhálózatok dominálnak, a másikat viszont irreverzibilis történések határozzák meg.

A fenti két általános tulajdonság mellett az élőlényeknek teljesen általános tulajdonsága a növekedés-szaporodás képessége is. Ez azt jelenti, hogy az előbb említett két alrendszer mindegyikének külön-külön is kell rendelkeznie a növekedés (szaporodás) képességével. Ez akkor lehetséges, ha kémiai szempontból nézve mindkét alrendszer autokatalitikus tulajdonsággal rendelkezik.

Az 1952-ben született alapfelismerés tehát a következő volt: az élő rendszerek mindegyike kell, hogy tartalmazzon az autokatalitikus tulajdonságú, reverzibilis reakciókból álló anyagcseré-hálózati rendszert és kell, hogy tartalmazzon egy ugyancsak autokatalitikus tulajdonságú, de irreverzibilis reakciólépésekkel meghatározottan egyirányúan működő reakciórendszert.

Az előbbi reakciórendszer abban az időben elképzelhető volt már, az utóbbira azonban még semmiféle konkrét fizikai-kémiai valóság nem utalt. Egy évvel később, 1953-ban a Watson–Crick-modell felfedezésével nyilvánvalóvá vált, hogy e második alrendszer funkcióját a nukleinsav-szintézissel kapcsolatos mechanizmusok képesek betölteni.

Egy alapfelismerés bármilyen lényeges is, önmagában még nem elmélet. Az elmélethez az alapfelismerést összhangba kell hozni a tényleges valósággal, összhangba kell hozni a kapcsolódó tudományágakkal, részletesen ki kell dolgozni, egzakt formába kell önteni, azaz kísérletekkel ellenőrizhető és matematikailag számítható formába kell hozni. Minderre a tudományok állása az adott időpontban még messze nem volt alkalmas – és természetesen a szerző, mint ebben az időben egyetemi hallgató, ezek kidolgozására még nem

volt képes. Közel húsz esztendőnek kellett eltelnie ahhoz, hogy az alapfelismerésből egy kezdeti formájában megfogalmazódott elmélet váljék, amely az említett könyv formájában 1971-ben jelent meg *Az élet princípiuma* címmel.

Ez a húsz esztendő eléggé kritikus volt a tudományok története szempontjából. A világ ekkor két részre szakadt, a keleti blokkban a tudományok fejlődése téves utakra tért. Hazánkban, mint a keleti blokkhoz tartozó államok egyikében a genetika tudománya reakciós (idealista) tudománynak, azaz üldözendőnek számított. De nem volt létjogosultsága a kibernetikának sem, és ezzel kapcsolatosan elvetendőnek ítélték mindenféle modellezést. Az első húsz év energiáinak nagy része ezek kivédésére kellett, hogy fordítódjék. Szerencsére 1971-ben ez a torzulás már erejét veszítette, így a modellezés létjogosultságával, a kibernetikai gondolatok igazságának védelmével *Az élet princípiuma* első kiadásában már nem kellett foglalkozni. Ebben az első húsz esztendőben a chemotonelmélet fejlődése az élővilág jelenségeinek analízisén alapult, vagyis a bonyolult biológiai rendszerek egyszerűsítésére és az alapvetően lényeges tulajdonságok kiemelésére koncentrált. *Az élet princípiuma* első kiadása ennek jegyeit viseli magán. Ahogy a könyv megjelent, sokak figyelmét vonta magára, és intenzív pezsgés indult meg körülötte pozitív és negatív irányban egyaránt. Így egyrészt fiatalokból álló, önkéntes munkacsoport szerveződött spontán módon köré, másrészt például 1972-ben az Eötvös Loránd Tudományegyetem biológus pártszervezete egy párttaggyűlésen azt akarta elérni, hogy az elméletet nyilvánítsák reakciós, idealista elméletté, amely megmérgezi az ifjúságot. Szerencsére ez a szándék a taggyűlésen elbukott és a követelés nem került az MSZMP Központi Bizottsága elé.

Az elmélet fejlődésével párhuzamosan egyre inkább előkerült az élet keletkezésének kérdése. Ez irányította rá a figyelmet arra, hogy az élő minimálrendszer megismerése, vagyis annak az elvi rendszernek a feltárása, amely már életjelenségeket mutat, de nem tartalmaz a lényeg szempontjából felesleges (bár az adott környezeti feltételek mellett esetleg feltétlenül szükséges) mechanizmusokat, nemcsak felülről közelíthető meg, hanem alulról, a kémiai rendszerek oldaláról is. A hetvenes évek a chemotonelmélet igen nagy fejlődését hozták magukkal, és így egyrészt sor került a chemotonmodell számítógépes szimulációs vizsgálataira, másrészt kidolgozásra kerültek azok a kémiai-matematikai módszerek, amelyek lehetővé tették a chemotonmodell egzakt kvantitatív vizsgálatát. Egyidejűleg kiderült az is, hogy a két alrendszer mellé kell egy harmadik alrendszer is, egy valami, ami az egész rendszert egyben tartja és amely a rendszer megduplázódása során biztosítja a rendszer térbeli kettéválasztódását, azaz szaporodását. Ennek először a matematikai formulázása született meg, anélkül hogy mögé konkrét kémiai-biológiai valóságot lehetett volna rendelni. 1972 nyarán aztán megjelent a *Science* című folyóiratban Singer és Nicholson cikke a kétdimenziós folyadék természetű membránok szerkezetéről, és ezzel a chemotonmodell harmadik, addig csak matematikailag létező alrendszere is fizikai valóság alapot kapott. *Az élet princípiuma* című könyv második kiadásában, amely 1978-ban jelent meg, ezeket az új eredményeket is célszerű volt figyelembe venni, ezért a chemotonmodellről, a chemotonelméletéről szóló rész e második kiadásban teljes

átírásra került. Azóta több mint húsz év telt el, a könyv további négy kiadásban (azaz összesen hat kiadásban) jelent meg, és e szövegen semmit nem kellett változtatni. A jelen könyvben, amely lényegében hetedik kiadásnak is tekinthető, ez az 1978-as megfogalmazású szöveg változás nélkül található meg.

1952 óta a biológiában iszonyatos mennyiségű új felfedezés született. Egyetlen olyan sem volt köztük, amely a chemotonelméletnek ellentmondott volna. Ellenben számos olyan született, amelynek a lehetőségét a chemotonelmélet elvi alapon előre jelezte és amely felfedezések az elmélet helyességét utólag igazolták. *Az élet princípiumában* az elmélet az élet oldaláról van megközelítve. Arra a kérdésre kerestük a választ, hogy mitől élő az élő, miért különbözik alapvetően az élettelenről, hol az élő és a holt határa, mi a titka az élő szervezetek speciális, mindentől eltérő, de az összes élőre jellemző tulajdonságainak. Ahogy azonban az elmélet fejlődött és egyre egzaktabbá vált, úgy világosodott meg, hogy a kérdéskört jobban kell általánosítani. nevezetesen arról van szó, hogy az élő rendszerek működésének alapvető titkai a kémiai reakciókból összeálló, komplexen működő ún. fluid automatákban keresendők, azaz olyan rendszerekben, amelyek masinaként működnek, amelyek működése szabályozható és vezérelhető, de amelyek nem vagy nem feltétlenül tartalmaznak szilárd alkatrészt, amelyekben minden szabályozott és vezérelt folyamat folyadékban, kémiai úton zajlik. Ezeket ma fluid automatáknak nevezzük (bár *Az élet princípiumában* még a lágy automata kifejezés szerepel, és ezen tudománytörténeti okokból ebben a könyvben sem változtattunk).

Az elmélet fejlesztése során nyilvánvalóvá vált, hogy a chemotonmodellhez, vagyis az élő rendszerek minimál modelljéhez úgy is el lehet jutni, ha a kémia oldaláról indulunk el, építőelemnek a kémiai reakciókat vesszük és azokat szervezzük össze olyan rendszerekké, melyek szabályozott, sőt programvezérelt kémiai automatákká tudnak összeállni úgy, hogy bennük szilárd alkatrész egyáltalán nem található. A chemotonelméletnek ez a része, *A fluid automaták elméleti alapjai*, 1984-ben jelent meg a chemotonmonográfia I. köteteként az Országos Műszaki Információs Központ és Könyvtár (OMIKK) kiadásában. A monográfia II. kötete, amely *Az élő rendszerek* alcímet viseli, ugyanitt 1989-ben látott napvilágot. Az elméletnek ez a rendkívül széles körű fejlődése lehetővé tette, hogy az élő rendszerek mibenlétét ne csak fölülről, komplex, bonyolult biológiai rendszerek oldaláról közelítsük meg az egyszerűbb felé haladva, hanem tegyük ugyanezt a kémia oldaláról az egyszerűtől a bonyolultabb felé, és akkor automatikusan kialakul egy logikus eseménysorozat, ahogyan az élő rendszerek a bolygók fejlődése során az élettelenből kialakultak. Ezt a logikai levezetést tartalmazza az 1989-ben megjelent *Kontra Crick – avagy az élet mivolta* című könyvem. Ennek születési körülményei érdekesek, mert ez válasz volt Francis Cricknek *Az élet mikéntje* címmel megjelent könyvére, amelyben azt fejtegeti, hogy a biológiai információk spontán módon nem alakulhattak ki. Crick fejtegetése az idők során elavult, maga Crick sem azonosul már a könyvében foglaltakkal, így a *Kontra Crick – avagy az élet mivolta* című könyv első része, amely ennek kritikáját tartalmazza, ma már érdektelen. A második rész viszont, amely az élet keletkezésével kapcsolatos megoldásokat tartalmazza, ma is, több mint tíz év után aktuálisabb, mint valaha.

Ezért a jelen könyvben ez a rész található meg, sőt ez képezi ennek a könyvnek az első részét, mely az élet keletkezése mint egy eseménysor végigkövethetősége révén talán olvasmányosabb, mint a filozofikusabb beállítottságú *Az élet princípiuma*.

E könyv anyaga az évtizedek alatt nemhogy veszített volna aktualitásából, de éppen soggal egyre inkább a tudomány reflektorfényébe került. Nyilván ezért határozott úgy az Oxford University Press, hogy ezt az összeállítást megjelenteti angol nyelven. Ha megjelenik, az tekinthető *Az élet princípiuma* 8. kiadásának. Ám a chemotonelmélet több, mint ami e könyvben található. E könyvben csak a logikai levezetések vannak teljes részletességgel a nyilvánosság elé tárva. A szakmai részletek a már említett kétkötetes monográfiában, az OMIKK által kiadott *Chemoton elmélet* című műben találhatók. Az azonban már igazi szakkönyv, amely kémiai, biokémiai, biológiai szaktudással rendelkező és speciálisan a téma iránt érdeklődők számára íródott.

Ahhoz, hogy az elmélet szakmailag is kiteljesedjék nagyon sok segítséget nyújtottak azok a fiatalok, akik a 70-80-as években az elmélet körüli kutatómunkába kapcsolódtak be. Akkoriban zömmel egyetemi hallgatók voltak, akik diplomamunkáikat készítették e témakörben. Ma befutott szakemberek, nem egy közülük nemzetközi hírnű professzor. Hadd soroljam fel itt a teljesség igénye nélkül neveiket: Békés Ferenc, Nagy Ákos, Szathmáry Eörs, Hidvégi Máté, Korányi Pál, Újhelyi Mária, Csendes Tibor, Schlemmer László, Demeter László, Gáspár Csaba, Korpádi Mátyás, valamint a mikrogömbök osztódásának fizikai-kémiai részét kidolgozó Verhás József. Rajtuk kívül kiemelten köszönetet kell mondanom dr. Gyarmati István fizikaprofesszornak, akitől nagyon sokat tanultam az elmélet egzakttá tétele tekintetében és aki sok segítséget nyújtott a chemotonelmélet kifejlesztésében.

2000 májusa, Nagymaros

a szerző

AZ ÉLET MIVOLTA

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 sejtsztruktúrákkal; napjainkban a DNS-sel és a bezárt genetikai információkkal. Ezek az olykor nyíltan kimondott, olykor csak lapangva 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 információ, 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 egyikében-másikában, 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, ezredmil-

liméternyi 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 egzaktussággal 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 kerek 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 képzeltek, 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 például egy sárgarézs 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*aikról tudhattak volna. De ebben a „végtelen kicsi” világban még a legmodernebb biológia is mechanizmusokat kutat, az öröklődés mechanizmusát, a fehérjeszintézis mechanizmusát, a membrántranszport 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 léte, működésére logikai úton következtetni igen. Ma már tudjuk, hogy a vezérlést az állati szervezet szintjén 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 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”, „entelekheának”, hol pedig „léleknek” nevezve azt. De ezt a „lelket” – az „élet-elvről 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 teremtetett szellemek, mely tekintetben több régi egyházatya nézetével találkozom.”

Roppant érdekes lenne részleteiben is végigvizsgálni, mi mindent írt Leibniz erről a lélekről, erről az entelekheiről, hogyan próbálta tulajdonságait elemezni, hogy próbálta a különbséget kifejtetni a csak „érző” és a már „értelmes” lélek között stb. Am 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, négyenél 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 testeknek* nevezte el, s erre az irodalomban elég gyakran – bár egyre csökkenő mértékben – hivatkoznak.

Az idézett sorok kilenc évvel a DNS molekulaszervezetének 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 többszázas 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 anyag-tól 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 *negentrópiá* fogalmát, amelynek segítségével Schrödinger az élő „masinák”, élő rendszerek működését a termodinamika oldaláról jellemezte. Az előzőekben 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 teszi. Minimálisan két alrendszerből kell tehát összevödnie, egy vezérelten működő s egy vezérlő alrendszerből. Egyik sem él a másik nélkül. Naivítás 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 élökként, együtt keletkezett, együtt fejlődött. Mégpedig pont fordított sorrendben, mint ahogy a tudomány ma vizsgálja: nem a program jelent meg először, hanem a masina. Hiszen a masinát lehet működtetni programvezérlés, sőt bármilyen vezérlés nélkül is, pusztán szabályozással. A masina tehát működtethetett program nélkül, de ez fordítva nem igaz. A masinák fejlődése azután kifejleszthette a programvezérlést is. Végző soron a technika evolúciójában is ez történt. Kezdjük el tehát az életkeletkezés folyamatát az ellenkező oldalról, a masinák oldaláról vizsgálni.

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 alapelvét Schrödinger feltárta, konkrét mechanizmusát pedig – a DNS szerkezetének felderítésével – Watson és Crick megadta. De mit értünk azon, hogy a rendszer speciális módon működik?

A válaszáért 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 szintelen folyadékot egy főzőpohárba és megkevergetni. Néhány másodperc múlva az oldat például hirtelen megkékül. Ismét néhány másodperc múlva kivilágosodik stb. És ez így megy ritmikusan mindaddig, amíg az oldatban lévő reagensok 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 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 megfellezzük, *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 akadunk, 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” táplálékát körülfolylja, 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 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 oka: 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 energiaáramlason 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 vízáramlásban 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 képkötő 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, erő kifejtéssé vagy akár elektromos energiává, nemcsak az elektromos rájában, de például saját idegrendszerünkben is. Az alpműködés 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 vagy 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 vizsgálatához, célszerűnek látszik a fluid kémiai automaták működési alapelveit az egyszerűbb kémiai rendszereken keresztül megismerni, s az így megismert alapelveket alkalmazni az életkeletkezés folyamataira.

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, csipekből 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 kémiaiilag 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 kényszerkapcsolatokat teremti, hogy az oldat automataként, meghatározott funkciót ellátni képes automataként működhessen!*

A kémiai reakciónak is van iránya. Ha máshonnan nem, hát onnan még a kémiában járatan 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 egyeznie 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 módszer-

rel 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 nyílának, 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, 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 *állapotterekben* 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 mérnököknek, 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. Am a vegyészek eddig jobbra 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 közben keletkező termékeket. Így „állapotteres” vizsgálataik is zömrel ilyen egy lépéses reakciókra vonatkoztak, és ki sem fejlődött olyan vizsgálati mód-

* 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.

szer, amely több, netán sok egyszerre zajló, egymással bonyolult keletkezési-átalakítási kapcsolatban levő reakció viszonyait vizsgálta volna.

Az élő szervezetekben, még a legegyszerűbekben 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, földelítve, hogy mi miből keletkezik, és mivé alakul. Ám e hálózatok mennyiségi leírásában fiasót 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 differenciálegyenlet-rendszerek 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 vegyületté, 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 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 elkezd-tük. Ez felfogható úgy is, mintha körbejártunk volna a kémiai állapottérben. Ezt a körbenjárást illetjük a sztöchiometriai visszacsatolás kifejezéssel. Szerencsére a kémia – sokkal egyszerűbben – csak kémiai körfolyamatoknak nevezi ezeket.

A *kémiai körfolyamatok* 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 cukorrá 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 megrökönyödnek, 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 fél igazság, 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) terméké 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 energiatípusánál, a mechanikából is hozhatunk egyszerű példát. A vízkerék nem arra szolgál, hogy a magasban lévő vízből alacsonyabban levő vizet csináljon, hanem fordítva: a magasban levő víz hajtja a vízkereket, miközben alacsony helyzeti energiájú vízzé alakul át.

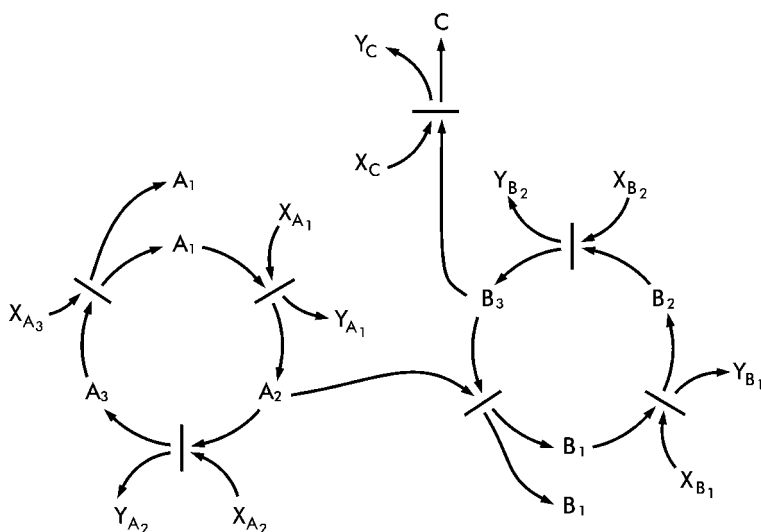
Azt mondtuk, hogy a biokémia alapvetően a körfolyamatok kémiája. Ez többszörösen is igaz. Igaz abban az értelemben, hogy az anyagcsere minden egyes kémiai reakcióját külön arra specifikus enzim katalizálja, vagyis minden kémiai átalakítás egy-egy kis kémiai körfolyamat. De igaz abban az értelemben is, 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 anyagcsereje 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.

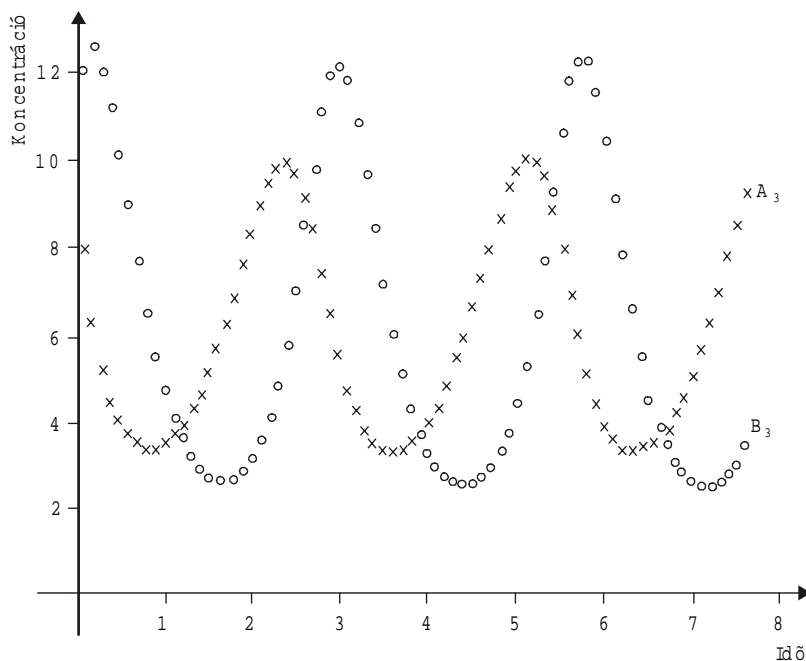
Hogy az alapelvek azonosak-e vagy különbözők, azt akkor tudnánk eldönteni, ha a kétféle masina mindegyikét matematikai módon le tudnánk írni. A klasszikus sztöchiometria azonban, mint mondtuk, nem alkalmas a kémiai körfolyamatok leírására. Szerencsére megszületett az ún. körfolyamati sztöchiometria, 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 állapot térben (pontosabban sztöchiometriai állapot térben) 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.

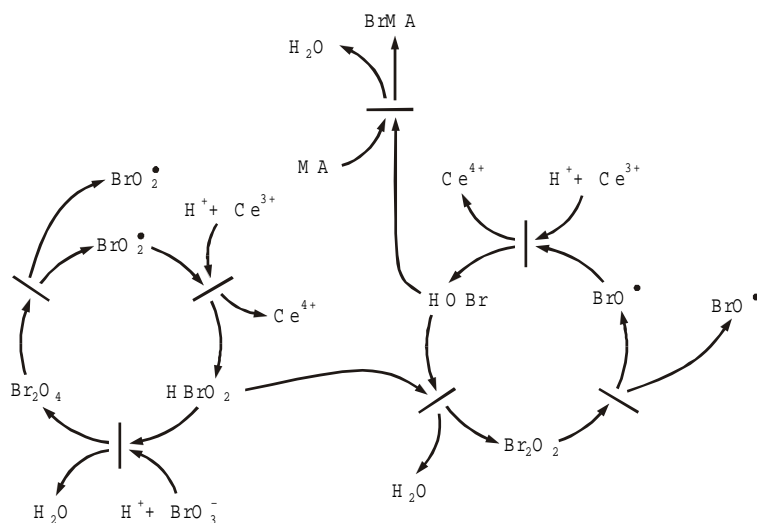
Itt nincs lehetőség arra, hogy e tervezés csínját-bínját ismertessük, ha az olvasó a részletek iránt érdeklődik, a megfelelő szakfolyóiratokban, illetve szakkönyvekben kell ezeknek utánanéznie. A szerző több egyszerűbb-komplikáltabb „kémiai masinát” tervezett íróasztal mellett, néhányat ipari technológiaként meg is valósított. Példaként – pusztán abból a célból, hogy érzékeltsük, 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 Belousov-Zhabotinskyj-reakciónak neveznek, a kutatók már felderítették az elemi kémiai folyamatait. Ezen az ábrán jól látható, hogy a kémiai folyamatok között pontosan az 1. ábrán bemutatott, elméletileg megtervezett kapcsolatrendszer alakul ki.

ÉS KI A KONSTRUKTÓR?

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 keletkezhettek! 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 trivialis. Az már kevésbé magától értetődő, hogy önreprodukáló automatákat mesterségesen is lehet készíteni, annál is inkább, mert ilyen sem mechanikus, sem pedig elektronikus kivételben a mai napig senki nem készített. De Neumann János bizonyította, 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 masinának az alkotórészek önreprodukciójával történő reprodukálása elvileg és gyakorlatilag is lehetséges.

Képzeliük 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 mo-

lekulára. 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 molekulánk szaporodik! A szervezet általános energiahordozója, az ATP szintén önreprodukáló folyamatban termelődik, s az ilyen folyamatokat autokatalitikus folyamatoknak nevezzük. Sőt maga a citoplazma is autokatalitikus rendszer! Ilyenek nélkül nem működhet élőlény, 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 redukatív karbonsavciklusnak neveznek. Ezek nem olyan egyszerűek, mint amit itt szemléltetési céllal levezettünk, a molekulák is sok szénatomosak 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” kiaakulásához. 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 kerekai önreprodukáló kerek. A kémia nyelvén szólva: két autokatalitikus körfolyamat ravasz összekapcsolásával nyertük az oszcilláló kémiai rendszert.

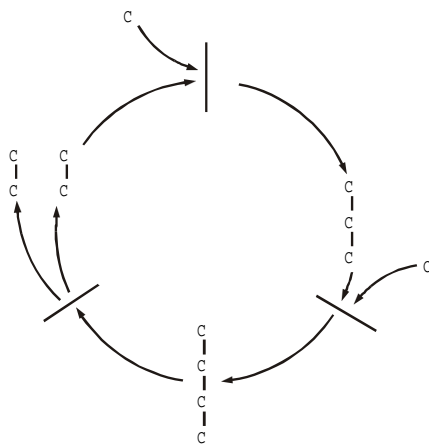
Ugyanerre az eredményre jutunk, ha a *3. ábrát* vizsgáljuk. Itt az első körfolyamatban a BrO_2 , a másodikban a BrO mennyisége duplázódik meg egy-egy ciklus során, hogy azután a következő pillanatban már ez a megduplázódott mennyiség lépjen reakcióba, fordulatról fordulatra megkettőződve.

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 azért éri el, hogy a második körfolyamat az első körfolyamat

anyagaiból „táplálkozik”, miközben saját termékét is fogyasztja a BrMA-hoz (bróm-malonáthoz) 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 kerekünkhez, 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 lépésű autokatalitikus körfolyamat is?

Igen, mégpedig pont olyan, amilyent bemutattunk: kétszénatomosból olyan négy-szénatomos molekulát csinál, amely két kétszénatomosra eshet szét. Az a neve, hogy formóz reakció. A kiindulási anyag a kétszénatomos glikolaldehid. Ez reagál az egy-szénatomos 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 előlről (4. ábra).



4. ábra. A fluid masinák legigéretesebb 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.

Idestova egy évszázada ismert ez a reakció. A valóságban persze ez sem ilyen egyszerű, hiszen számos mellékreakcióra is lehetőség van, például a négyszénatomos cukor ötszénatomossá is átalakulhat, az hatszénatomossá, ezek visszacsatolódnak 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 formaldehidből hogyan lehet a formóz reakció révén nagyipari méretekben cukrot 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 sikerül 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 formaldehidmolekulából 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 kerek tehát egy 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 bonyolultabb 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 a bonyolult kémiai reakcióhálózat egésze is autokatalitikus tulajdonságú. Ha pedig így van, akkor nemcsak az önreprodukáló kémiai „kerék”, hanem a bonyolultabb önreprodukáló kémiai masinak létrejöt-

téhez sem kell konstruktőr, azok is létrejöhetnek maguktól alkalmas körülmények között.

Bőven alátámasztja ezt az a rengeteg különféle kísérlet, amit a szerves vegyületek ős-földi körülmények közötti spontán keletkezésével, azaz a kémiai evolúcióval kapcsolatban végeztek a világ különböző laboratóriumában. 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 funkcionáljanak.

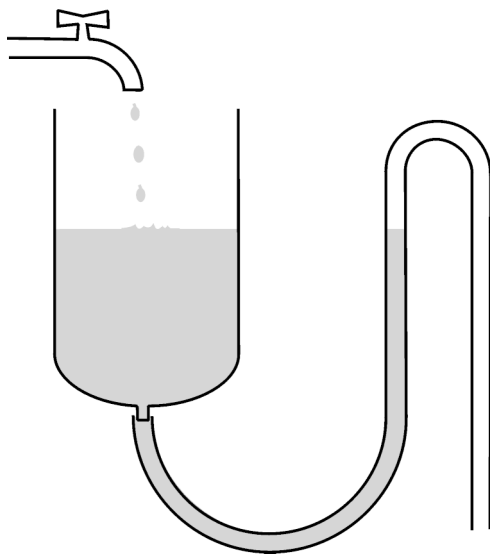
A formóz reakcióban keletkező ötszénatomos cukrok egyike a ribóz. Ez ugyanaz a ribóz, mint amihez a ribonukleinsavakban a „betűjelként” szolgáló nukleotidbázis csatlakozik. A formóz reakció tehát alkalmas masina arra, hogy alapanyagot gyártson a vezérlőegység önreprodukciójához. A formóz reakció egy másik közbenső terméke a glicerinaldehid, amelyből glicerín 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 ős-földi 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.

CHEMOTONOK

Hohó! – kontrázhat ismét az olvasó. Az rendben van, hogy ilyen fluid kémiai masinák keletkezhetnek az őslevesben, még az önreprodukció követelménye sem akadály. Végére is ezek a masinák nem mások, mint kémiai folyamatok, s kémiai folyamatok valóban működnek a természetben ma is, maguktól, ha nem is önreprodukálható 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, hogy 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 működötté 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 mindjárt 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 előlről. Hogy mennyi legyen az egy-egy alkalommal elfolyó víz mennyisége, az a gumicső visszahajlásának magasságával „programozható”.



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 valósul meg a fluid masinák komponenseinek szakaszos „leszívására”.

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 alapkonzentrációt, amelyet a masina rész azután ismét elkezd növelni.

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 rendelkezükre 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, 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 külön-külön. 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 meg bomlik a kettős szál szerkezet. Ekkor a folyamat kezdődhet előlről.

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 „leszívás” 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 bruttó-egyenlettel 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, önreprodukció, 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 beletörök 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 növekvő és osztódó, vagyis a szó legszorosabb értelmében *szaporodó* fluid autómátává 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, ámbar szinte mindenkinek saját tapasztalatai is vannak velük. Avagy talán nem fújunk szappanbuborékot? Nos a szappanbuborék hártája is kétdimenziós folyadéknak tekinthető. Külső mechanikai hatásra rugalmas szilárd testként viselkedik, ugyanakkor ha színeződését figyeljük, láthatjuk, hogy a hártája síkjában hogyan tud örvényleni, kavarni, azaz ebben a síkban folyadékként viselkedik. Hasonló hártája burkolja az összes élő sejt felületét, csak az sokkal vékonyabb a szappanbuboréknál, mindössze két, egymással szembefordult molekularétegből áll. Ezért nem nyújtható, ellentétben a szappanbuborék sokkal vastagabb hártájával.

Az olyan hosszúk 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 a 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 közttermékei már meglehetősen nagyok, esetleg még töltést is viselnek. A formóz ciklus például az apró formaldehid- (HCHO -) molekulákkal táplálkozik, a cukrot állít elő, a híres Calvin-ciklus szén-dioxidot (CO_2) fogyaszt, és erős elektromos töltéssel rendelkező cukorfoszfátokat termel, a redukzív karbonsavciklus (módosult, fordított Szent-Györgyi–Krebs-ciklus) ugyancsak CO_2 -t fogyaszt, és nagy molekulájú, erős elektromos töltésű szerves savakat termel.

Ha a mikrogömbbe bezáródott folyadékban ilyen, nagyobb molekulásúlyú 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 hártályak – ellentétben a szappanbuborék hártályával – 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 mechanikailag. 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 előről 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 kiindulással 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 állapotterben 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 baktériumfajtaéhoz tartozik – közölvén persze, hogy milyen táptalajon tenyészthető –, néhány hét múlva azt mondaná, hogy valószínűleg eddig ismeretlen mikroorganizmusról van szó, amely nagyságára 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, amelyek az élet legalapvetőbb öröklődő tulajdonságai közé tartoznak, de nem mutábilisak. Ezekről mondtuk, hogy kiesnek a genetika vizsgálódási köréből. Ezek a tulajdonságok azok, amelyeket 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 sorrendel kódolt öröklődő információk még nincsenek. Az ilyen organizációjú rendszereket nevezzük *chemoton*oknak.

A chemotonoknak is el lehet készíteni a kapcsolási rajzát, ahogyan 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 chemoton 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.

AZ ŐS-FÖLD CHEMOTONJAI

Ha nincs is mód e helyen a chemotonok 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 Ős-Föld vagy más hasonló, alakuló vizes bolygó felszínén spontán keletkezzenek. Hiszen ha az élővilág chemotonszerű 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 alkímista jellegű, nagyrészt véletlenre alapozott, hanem egzakt módon előre megtervezett kísérletek segítségével próbáljuk meg reprodukálni.

Idézzük fel mindenekelőtt, hogy mit is tartalmaz egy chemoton. 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 chemotonok 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 monomer 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 chemotonok és a minden kétséget kizáróan élőknek elismert termo-, illetve mikoplazmák elvi felépítése tehát teljesen azonos, a különbség mindössze a vezérlés technikai megoldásában van. A chemotonokban 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 fehérjeenzimek segítségével, a kémiai folyamatok sebességének szabályozásával, katalitikus úton valósul meg. A chemotonok 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 chemoton. Induljunk az osztódás pillanatától, attól a pillanattól, amikor az osztódás befejeztével az új egyed fölvette a tökéletes gömb alakot. Chemotonunk ekkor a környezetével ozmotikus egyensúlyban van, membránján keresztül folyamatosan diffundál be a tápanyag. Ez a diffúzió meglehetősen gyors, hiszen a tápanyagnak mindössze néhány tizedred milliméter utat kell megtennie, lévén a chemotongömb átmérője ezredmilliméter körüli.

Ahogy a tápanyag-molekulák 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 számai 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, közepén 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 előlről.

A chemotonok 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 chemoton adott körülmények közötti viselkedését. A budapesti Műszaki Egyetemen Békés Ferenc és munkatársai, illetve Szegeden Csendes Tibor számos ilyen számítógépes szimulációs vizsgálatot végeztek. Ezek a vizsgálatok egyértelműen bizonyították, hogy a chemotonok úgy működnek, ahogy azt logikailag kikövetkeztettük, s ahogy azt az élő rendszerektől elvárjuk.

Persze ezek a chemotonok még „csak” absztrakt konstrukciók, tervrajzokon csupán indexelt betűk szerepelnek, ahogy azt az oszcilláló rendszer esetében az *1. ábrán* bemutatunk, 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 pusztán elképzelés formájában a feltaláló agyában marad. Az absztrakt konstrukció megszületése jelenti a feltalálást, a szabadság 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 ember számára hasznosulhasson. Itt is ez a helyzet, a chemoton 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. ábrához* hasonló absztrakt tervrajzból a *3. ábrához* hasonló, konkrét vegyületeket tartalmazó tervrajz.

Ebben a könyvben, ahol az életkeletkezés spontán útjait vizsgáljuk, a kérdést még tovább kell szigorítanunk. Készíthető-e chemotontervrajz, anyagcseretérkép úgy, hogy a betűk helyébe az ósatoszférában található vegyületeket, a reakciók helyébe az ósatoszférában 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 chemoton első alrendszeréül a formóz reakciót célszerű választani, hiszen:

– nyersanyaga, a formaldehid, a világegyetem egyik leggyakoribb vegyülete, feltételezhetően nemcsak jelen volt az ósatoszférában, hanem metánból és vízből a nap ultraibolya sugarainak hatására folyamatosan keletkezett is;

– a formóz reakció autokatalitikus reakcióhálózat, így sztöchiometriailag és kinetikailag alkalmas arra, hogy egy chemoton alrendszer legyen;

– 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 cukorfoszfatok formájában);

– a formóz reakció közttermékei között szerepel a nukleinsavak egyik komponense, a ribóz, s ez lehetővé teszi a sztöchiometriai kapcsolást a formóz hálózat működése és a nukleinsav-szintézis között;

– a közttermékek 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.

A ribonukleinsavak felépítése majdnem azonos a dezoxiribonukleinsavakéval. Különbség főként abban van, hogy az RNS-ek cukorkomponense nem dezoxiribóz, hanem ribóz, és hogy a „betűként” szereplő négyféle bázis (*A*, *T*, *G*, *C*) közül az RNS-ben a timin (*T*) helyett uracil (*U*) található. Kísérletek sokasága bizonyítja, hogy ős-földi körülmények között a purinbázisok (*A*, *G*) spontán képződhetnek, de arra is vannak kísérleti adatok, hogy a pirimidinbázisok (*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 ős-földi körülmények között. A folyamat termodinamikailag lehetséges, hiszen az élő szervezetekben folyamatosan végbemegy, csak hogy 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 reakció 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 egy-

részt biztató, hiszen az eddigi kísérletek egyértelműen arra utalnak, hogy nukleozid-trifoszfátok α -földi 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 száklakká, nem pedig száz vagy még több monomer hosszú szállá.

Am 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 folytathat külön szálszétválasztási mechanizmus nélkül is, az ennél hosszabb szálak szintézise azonban már nem. Ahhoz, hogy hosszú szálak szintetizálódjanak, periodikusan változó körülmények kelljenek: a szintézisre alkalmas körülményeket szálszétválasztásra alkalmas körülmények kövessék és fordítva. A chemotonokban, mint láttuk, ezek a feltételek enzimek nélkül is megvalósulnak a monomerkoncentráció periodikus változása révén, így minden reményünk megvan arra, hogy helyesen cselekszünk, ha α -földi konkrét chemotonunk információs alrendszerét 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 α -földi 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 vegyületek építik fel e membránokat. Annyit azonban tudunk – s ez nagyon lényeges –, hogy e membránkeletkezési kísérletek többségében a nyersanyagok között szükségszerűen ott kell lennie a formaldehydnek, azaz joggal feltételezhető, hogy a prebiotikus membránképződés is sztöchiometriai kapcsolatban van a formóz reakcióval. Am a prebiotikus membránképződéshez vezető elemi reakciók, azok kapcsolatai, hálózatai teljességgel ismeretlenek.

Láthatjuk tehát: nem kevés, amit egy konkrét prebiotikus chemoton anyagcsere-hálózatának megtervezéséhez tudunk, de messze nem elegendő. Ismerjük az absztrakt kapcsolódási rendszert, amit konkrét vegyületekkel kellene kitölteni, három alrendszerből 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 chemotonmodell minden részletét az α -földi körülmények között bizonyítottan végbement valós kémiai eseményekkel töltsük ki. Ahhoz viszont már bőségesen elegendő, hogy az absztrakt chemotonhálózat segítségével megkíséréljük a hiányzó részeket elméleti alapon pótolni, azaz megvizsgáljuk, hogy a meglevő kémiai folyamatokhoz milyen reakcióknak kellene csatlakozniuk, hogy teljes chemotonhálózatot kapjunk.

Egy műegyetemi hallgató, Hidvégi Máté vállalkozott arra 1981-ben, hogy egyetemi diplomamunkájaként elvégezze ezt a kiegészítést. Munkája sikerrel járt, mintegy száz reakciólépést tartalmazó hálózatot fejlesztett ki, ezáltal egy konkrét és komplett chemoton-anyagcsere-hálózathoz 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 chemoton formaldehidet, ciánhidrogént 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 chemotonelmélet 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 tervezőasztalnál.

Amint a munka elkészült, és kutatócsoportunk megvitatta, egy másik akkori egyetemi hallgató, Szathmáry Eörs vállalkozott arra, hogy a prebiotikus chemotonhálózat kémiai eseményeit a körfolyamati sztöchiometria segítségével végigszámolja. Jó hosszú számolás volt, írásvetítő fóliacsíkra felírva vagy öt méter hosszú, elkészítéséhez külön stratégiát kellett kidolgozni 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 chemotonnak melyik közti termékéből mennyit kell tartalmaznia ahhoz, hogy működhessen és reprodukálhassa önmagát, hogy a reprodukcióhoz hány darab formaldehid-, 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 szükségyszerű 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 pusztán statisztikai valószínűsége, a vak véletlen, hanem nagyon is szűken behatárolt eseménysorozaton, a prebiotikus chemotonok evolúcióján kell alapulnia.

AZ ÖSSZÖVEGEK SZÜLETÉSE

Most érkeztünk el oda, hogy az öröklődő tulajdonságok két részre oszthatók: a *változó-kony* öröklődő tulajdonságokra, amelyek az élővilág evolúciójának, sokféleségének és lehetetlen 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. A mai genetika a változó-kony 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 chemotonmodell birtokában mindezt most tisztább, egyszerűbb, jobban áttekinthető példán vizsgálhatjuk meg. Vizsgálatainkat kezdjük a változó-kony öröklődő tulajdonságok szemrevételezésével.

Egy konkrét chemotonmodell – például az előző fejezetben bemutatott prebiotikus chemotonmodell – birtokában könnyen kiszámolható, hogy egy adott nagyságú chemotongömböcske membránjának hány darab membránépítő molekulából kell állnia. Ha például a prebiotikus chemotont $1\ \mu\text{m}$ 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 chemoton 10^7 darab ilyen molekulát legyártson, a rendszer kémiai szerveződése következtében 10^7 darab nukleotid 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 chemoton minta-RNS-molekuláinak tehát összesen 10^7 darab monomerből (nukleotidból) kell felépülniük.

Egy-egy prebiotikus RNS-szálat átlagosan mintegy száz nukleotid hosszúságúnak vehetünk. Szóban forgó chemotonunknak 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 chemotonban, 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, mond-

juk, 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-mintasál lesz. Nyilvánvaló, hogy az említett összefüggés miatt ugyanígy alakul az egy-egy ciklusban képződő membránmolekulák száma is, vagyis az egyik chemoton 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 chemoton 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 chemoton 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 chemotonpopuláció 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 chemotonpopulációk 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 megértjük. 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) mikrogömb keletkezik, de nincs genetikai program, amely a progamot „kódolva” tárolná. Ez az öröklődő információ (épp a genetikai program hiánya miatt) nem változékony. Az öröklődő tulajdonságokat a rendszer egésze hordozza, éppen azért, hogy a rendszer önreprodukáló alrendszerekből épül fel.

A chemoton tulajdonképpen nem más, mint egy olyan szaporodó mikrogömb, amelybe egy (ugyancsak önreprodukáló tulajdonságú) templátpolimerizációs alrendszer 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 chemoton 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 membrán-építőkövek mennyiségére. Ezért a templátmolekulák változása a chemoton 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 chemoton 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-tízmilliószorosan felgyorsítani. Ha a reakcióhálózat csupa enzimátikus reakcióból áll, működését a kémiai lehetőségeken belül teljes mértékben az enzimek jelen- vagy távolléte határozza meg, hiszen ha egy kémiaileg lehetséges reakció a megfelelő enzim távollétében csak milliomodrésnyi 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 az enzimek aminosavsorrendjén keresztül történik, amit viszont a genetikai anyag nukleinsavának „betűsorrendje” határoz meg.

Itt érkezünk el ahhoz a ponthoz, ahol azt a kritikus kérdést, hogy hogyan jöttek létre az összekvenciák, 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 masinának, azaz a chemotonoknak 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 részle-

tesen 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 chemotonpopulációt. A chemotonok 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 szálát 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, behunyt 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 nukleotidbetűk, hogy: *GACUGA*..., akkor a másik szálon *CUGACU*... a sorrend.

Mit gondol a kedves olvasó, az első chemotonokban 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 chemotonba 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 *CACUGA* sorrendűn *CUGACU*, a *CUGACU* sorrendűn *CACUGA* sorrendű szál épül fel. Így végső soron mindegyik sorrend hordozhatná ugyanazt az információt – ha ezeknek a sorrendeknek lenne valami értelmük. Egyelőre azonban nincs.

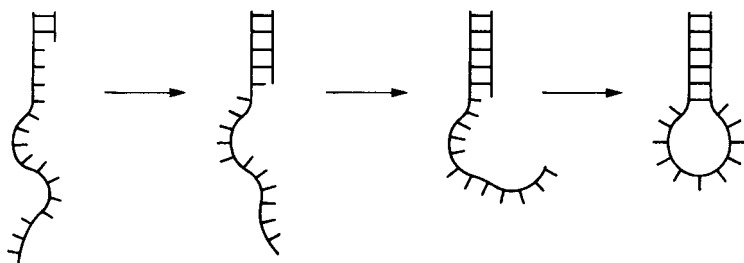
Nézzük hát meg, mi is történik egy chemotonban az RNS-molekulákkal, amikor a nukleotidok koncentrációja eléri a kettős spirál szerkezet megbontásához szükséges kritikus értéket. A kettős szálú szerkezet elég merev, csak hosszabb távon hajlítható, hasonló módon, mint – mondjuk – egy gégecső. A szétvált 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, sajtukakacokról 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 rádőbbennénk, 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 láncja 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 következő stb. Eközben a mintaszál még szabad része összeviszza 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).

Valami furcsa torzszülett 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



6. ábra. Abiogén hurok-RNS-képződés. A hőmozgás következtében összeviszza tekergőző minta-RNS-szálat a rajta épülő új szál kimerevíti. Ám a mintaszál szabadon mozgó vége összekapcsolódhat a részben felépült új szállal, s így 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.

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 mechanizmust, amely alkalmas arra, hogy a szekvencia által meghatározott szerkezetű RNS-eket állítson elő, mégpedig sorozatban! Mert az iménti szárlól 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.

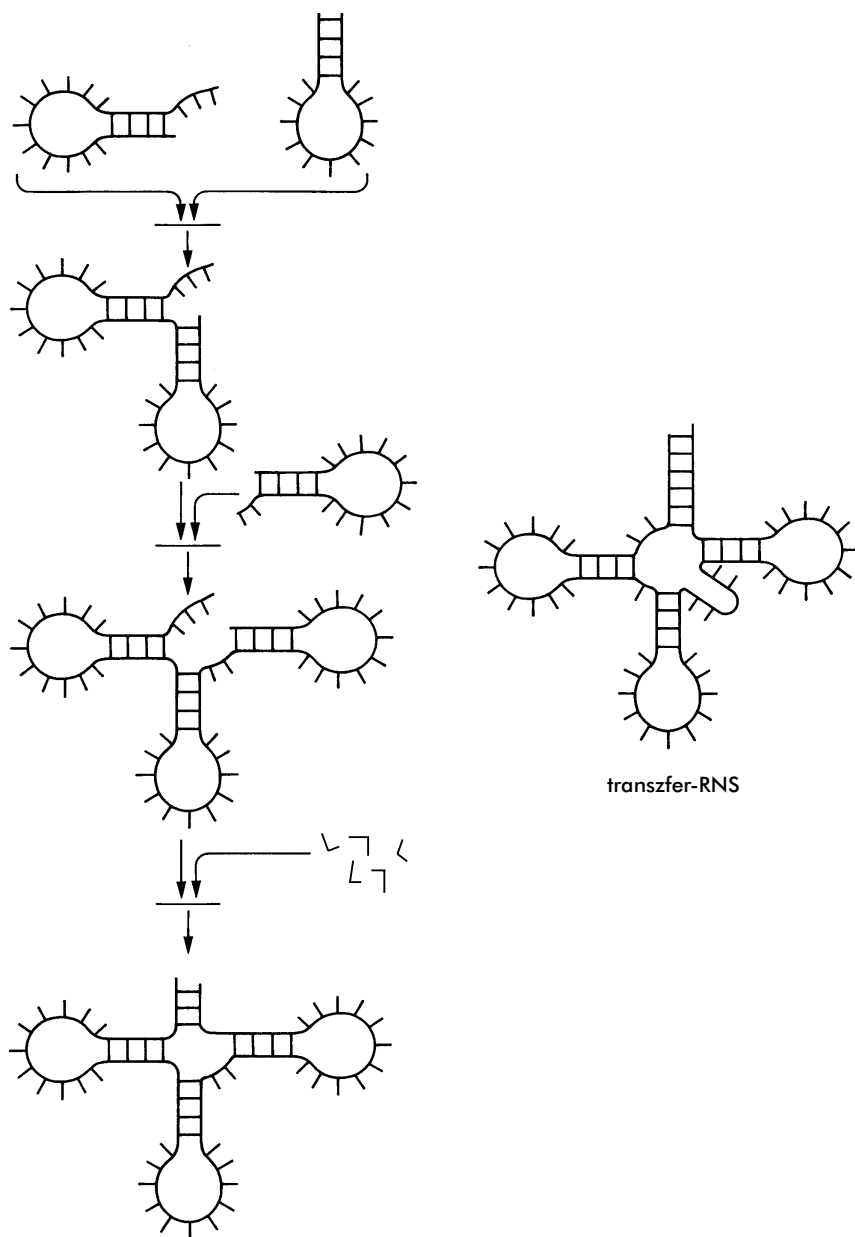
Hátravan még a másik lépés. Szekvencia által meghatározott makromolekula-térszerkezeteink már vannak, de bizony e speciális szerkezetek még semmiféle funkcióval nem rendelkeznek a chemotonjainkban. Seba! Eddig voltak szekvenciáink, de nem volt értelmük. Most már vannak értelmes szekvenciáink, s egyszerűen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

Egyetlen chemotonban, 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 chemotonok megjelenése után populációjuk igen gyorsan olyan *evolúciós folyamaton* megy át, amelynek eredményeképpen a chemotonokban levő RNS-ek döntő többsége hurok szerkezetű lesz.

Tegyünk most egy ilyen chemotont „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 anyagcsere-hálózat 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 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



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.

híres. Ilyen a szerkezetük ugyanis a szállító- (transzfer-) RNS-eknek, amelyeknek igazán központi szerepük van a mai élőlények anyagcseréjében. Ők a fehérjeszintézis mindenei. 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-szárlól érkező kódolt üzenetet, hogy annak alapján az épülő fehérjelánchoz épp az előírt aminosavat csatolják hozzá.

Itt persze, a jelen chemotonunkban 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 chemotonban nem síkba feszítve, lóhere alakban található, hanem gömbszerűen összegubózkodott formában. És ennek a bonyolult alakzatnak a térszerkezetét pontosan megszabja a szál betűsorrendje, s a róla készült másolatok is mind ugyanilyen térszerkezetet fognak fölvenni.

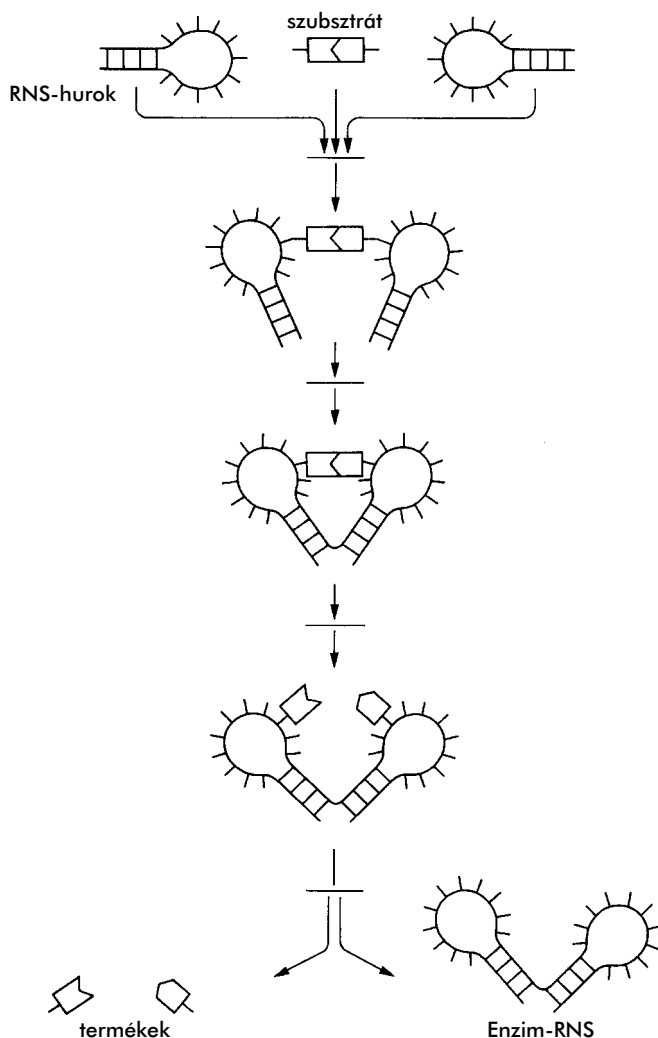
A betűsorrend azonban nemcsak a térszerkezetet szabja meg, hanem azt is, hogy a hurokrészekben található másodlagos kötőhelyek közül melyek kerülnek a fonalgubanc felszínére, s ott hogyan helyezkednek el. Ha visszaemlékszünk, rá kell döbbernünk, hogy pontosan ugyanez volt az enzimek titka is: „betűsorrendjük” (aminosavsorrendjük) 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.

Az 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

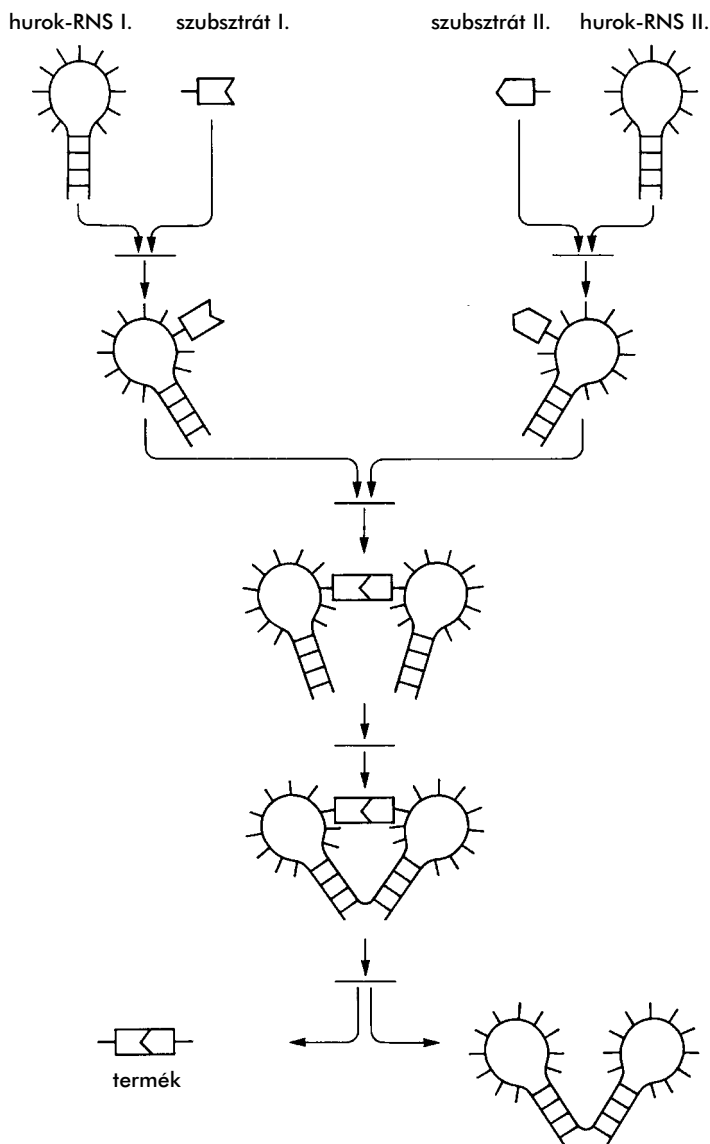
kettéhasad, majd darabjait a hőmozgás lelöki az RNS-ről. De visszamarad a két összekötött hurokból álló szerkezet, amelynek másodlagos kötőhelyei pont olyan térállásúak, hogy az őket összehozó molekulákkal azonos molekulák megragadására képesek (amelyek azután kettéhasadva ismét leválnak róluk). A hurkok 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 enzi-



8. ábra. A hurok-RNS-ek összekapcsolódásának sem kell a pusztá véletlen múnia. 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.

mek 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 összeszerelhetette a maga enzimét a hurok szerkezetű RNS-ekkel zsúfolt chemotonban. És ha egy chemotonban valamelyik anyagcsere lépés gyorsítására már összeszerelődött egy enzim, akkor az a chemoton – mint azt számítógépes



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

vizsgálatainkkal 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 chemotonok rendkívül gyors evolúciós léptekkel eljuthatnak 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 chemotonelmélet 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.

CÉLBA ÉRTÜNK

Célba értünk. Megmutattuk, hogyan keletkezhetek 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!

Dehogyan! Dehogyan! A megoldás megvan, noha eddig még valóban nem beszéltünk róla. Tessék csak végiggondolni, mi is történik egy enzim-RNS replikációjánál. Mindenekelőtt meg bomlik 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 szálaban *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 enzimeként szereplő szálat, a róla készült kiegészítő szekvenciáját pedig negatívnak. Nyilvánvaló, hogy a negatív szál térszerkezete hasonló lesz a pozitív száléhoz, 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 enzimatisz tulajdonsággal, mint a mintája, hiszen ahol azon *A* volt, ott ezen *U* van stb., azaz a funkció csoportok, melyek révén kölcsönhatásba léphetne más molekulákkal, itt más hol, 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 enzimeként 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 működőképesége 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 tökéletesnek, 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 ő-Föld chemotonjai 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 információ-tartalmának megőrzése. Ez a szükséglet vezethetett el ahhoz a folyamathoz, amelynek során a génszekvenciák a sokkal stabilabb szerkezetű DNS-ekbe íródtak át, a katalizátor szerepét pedig arra alkalmasabb 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. 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 húsbetűs 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 (vagy az idők folyamán nem változó) részeinek aminosav-szekvenciáit a kódszótár segítségével „nukleinsavnyelvre” fordítjuk vissza, hurokszerkezeteket képző RNS-szekvenciákat kapunk. Úgy tűnik tehát, hogy a fehérjeenzimek megjelenése a chemotonokban az evolúció során ugyancsak nem vakvéletlen, hanem törvényszerűen bekövetkező eseménysorozat volt. De azt a chemotont, amelyben az öröklődő információt a DNS hordozza és az anyagcsere-folyamatokat enzimfehérjék katalizálják, már nem chemotonnak nevezzük, hanem sejtnek. Sejtnek, a biológia legbiológiaiabb értelmében.

Az ő-Föld 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 molekulaszervezet 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.

AZ ÉLET PRINCÍPIUMA

BEVEZETŐ GONDOLATOK

Mit neveziünk egzakt tudománynak? Az egzakt tudományok, mint amilyen például a matematika, geometria, mechanika, elektromosságtan, termodinamika, kémia stb. közös alapvető jellemzője, hogy rendelkeznek olyan modellrendszerrel, amelyik a valós világ jelenségeit a zavaró momentumoktól megtisztítva, csak a vizsgált specifikus jelenségek tiszta formában történő előállítása révén modellezni tudják, a tárgyalt jelenségeket minőségi és mennyiségi vonatkozásban le tudják írni, matematikai formákban meg tudják fogalmazni.

Ebben a megfogalmazásban két kiemelkedő pont van. Egyrészt hangsúlyozni kell, hogy *bármelyik egzakt tudományágat tekintjük is, az a valós világnak csak egy részét, azt is csak meghatározott szempontból, a többi jelenségtől függetlenül modellezi.* A másik, amit hangsúlyozottan kell kiemelni, hogy *az egzakt tudományok nem a valós világ jelenségeit tudják abszolút pontossággal tárgyalni, hanem csak saját modellrendszerüket.* A valós világ jelenségeit csak közelítik. Ez a közelítés az egzakt tudomány modellrendszerét bonyolulttá teszi, minél pontosabban akarjuk segítségével a valós világot közelíteni, annál bonyolultabbá válik az egzakt tudományok matematikai apparátusa is.

Nézzünk erre példákat. A matematika alapját a természetes számsor képezi. A természetes számsor a valóságban nem létező, tehát tulajdonképpen abszurd absztrakcióval él, hogy a valós világban léteznek teljesen azonos, identikus dolgok. Ha veszünk egy ilyen dolgot – egyet –, majd veszünk egy másik ugyanilyen dolgot – ismét csak egyet –, ez együtt kettőt ad. Így indul a természetes számsor: egy meg egy az kettő. A valóságban azonban nincs két teljesen egyforma dolog és így a matematika legalapvetőbb fogalmai: az egység és a természetes számsor a valóságban nem létező, sőt annak ellentmondó, tehát abszurd absztrakciók maradnak csupán. Mindamellet ezek az absztrakciók rendkívül gyümölcsözőek, nélkülük a világot nem lehetne mennyiségileg leírni.

A geometria nem kevésbé abszurd absztrakciókra épül. Alapfogalma, a geometriai pont kétszeresen is abszurd fogalom: egyrészt magában hordozza a matematika alapabszurditását, az egységet, hiszen minden geometriai pont egység, és mint ilyen egymással identikus. Másrészt magában hordozza a geometria alapabszurditását is, nevezetesen azt, hogy kiterjedés nélküli, nincs kiterjedése és mégis valami. Ám éppen ez az abszurditás teszi lehetővé, hogy segítségével a térbeli létezés és mozgás abszolút pontossággal leírható legyen, hiszen a hiba lehetőségét éppen a pont kiterjedésnélkülisége zárja ki a leírásból teljes mértékben. Nem kevésbé abszurd absztrakciók a geometria többi alapvető fogalmai sem, az egyenes, amelyiknek csak egy irányban van kiterjedése, a sík, amelyik

csak két irányban terjed ki, a párhuzamos, ahol a két egyenes csak a végtelenben találkozik stb., de ilyen maga a végtelen is.

Ezen abszurdítások ellenére, sőt éppen ezek alapján tudja a geometria a saját modellvilágát abszolút pontossággal tárgyalni. Így tudja a téglalap, a kör, az ellipszis, a kocka, a gúla, a kúp, a gömb stb. tulajdonságait matematikai módszerekkel pontosan leírni.

De világosan kell látni azt is, hogy mindezek absztrakciók csupán, a valós világban sem egyenes, sem párhuzamos, sem sík, sem téglalap, sem kocka, sem gúla, se pedig gömb nem létezik. Amikor a geometria e modellrendszer segítségével a valós világot tárgyalja, elhanyagolást csinál, lemond abszolút pontosságáról, és csak a feladat által megszabott szükséges mértékben közelíti a valós világ jelenségeit, eseményeit. Ez a közelítés rendkívül eredményes, a gyakorlati élet számára úgyszólván minden feladat megoldható segítségével.

Nem kevesebb ellentmondást tartalmaz a mechanika sem, sőt alapfogalma, a tömegpont további ellentmondások forrása. Amellett, hogy egyrészt egység, ami önmagában ellentmondás, kiterjedés nélküli is, vagyis a geometria ellentmondását is magában hordozza, és még tömege is van annak ellenére, hogy nincs kiterjedése. Ez újabb ellentmondás, hiszen a valós világban nem létezik olyan tömeggel bíró test, amelyiknek ne lenne kiterjedése. Éppen ezért válik lehetségessé, hogy a mechanika is úgy állítsa elő modellrendszerében a saját témakörébe tartozó jelenségeket, hogy azok matematikai módszerekkel tökéletes pontossággal tárgyalhatók és e modellrendszer segítségével a valós világ jelenségei a szükséges mértékben közelíthetők. És hogy a közelítés pontossága milyen rendkívüli lehet, arra ma nem kell jobb példát felhozni, mint a rakétechnikát, amelyben egy-egy rakéta százmillió kilométeres utak megtétele után néhány száz méteres pontossággal éri el célját.

Az elektromosságtan hasonló absztrakciókból indul ki, hiszen, hogy csak a pontnál maradjunk, az elektromosságtan alapját is a pontszerű elektromos töltések képezik.

Nem szükségszerű, hogy minden egzakt tudományág közvetlenül az abszurdításokig vigye vissza alapfogalmait. A kémia alapfogalmait más tudományok már elfogadott fogalmaira vezetheti vissza – matematikai, fizikai fogalmakra –, és így modellrendszerében az abszurdítások csak közvetve jelentkeznek. De a kémia kialakulása idején alapfogalmai (elem, vegyület, atom, molekula, vegyérték, kémiai kötés stb.) absztrakciók voltak, bár nem abszurdítások. Később kiderült, hogy ezek az absztrakciók leszármaztathatók más tudományágak jelenségeiből, és így ma előttünk ezek realitásként jelennek meg.

A biológia jelenleg zömmel leíró és kísérletes tudomány. Az egzakt elméleti biológia kialakulásához meg kell keresnie saját legalapvetőbb fogalmait, azokat axiomatikus pontossággal definiálnia, ezekből kiindulva olyan modellrendszert felépítenie, amivel – legalábbis elvileg – az élővilágban előforduló bármilyen jelenség modellezhető, a modell mennyiségileg és minőségileg matematikai módszerekkel leírható. Ezek az elmondott követelmények voltaképpen nem jelentenek mást, mint az elméleti biológia megszületését, amelyre évtizedek óta vár az élet tudománya.

Az elmúlt évtizedekben jelentek meg könyvek elméleti biológia címmel, létezik nemzetközi elméleti biológiai folyóirat, anélkül azonban, hogy maga a tényleges elméleti

biológia is megszületett volna. Ezek voltaképpen más, már egzakt tudományoknak, elsősorban a matematikának, fizikának és kibernetikának az eredményeit alkalmazzák a biológiai tudományokban, zömmel olyan igénnyel, hogy a jelenségeket matematikai eszközök segítségével mennyiségileg is leírják. Ez azonban még nem elméleti biológia.

Az elméleti biológia alapját olyan modellrendszernek kell képeznie, amely az élővilág legegyszerűbb rendszereinek absztrakt modelljeire épül és amelyből a bonyolultabb biológiai jelenségek modelljei logikai úton, matematikai formulákkal is megfogalmazhatóan levezethetők.

Ilyen alapvető modellek a biológiában eddig csak a biológia egyes részterületein születtek. Alapvetően jónak bizonyult – bár nem matematizálhatónak – az ellenanyag-képződésnek, illetve az enzimek szubsztrátspecifitásának kulcs-zár-modellje. Ennél lényegesen gyümölcsözőbb volt és egy új tudományágat (a molekuláris biológiát) alapozott meg James Watson és Francis Crick DNS-modellje, amely a genetika alapegységére, a génre állított fel rendkívül gyümölcsöző absztrakt modellt. Segítségével értelmezhetővé vált az öröklődő tulajdonságok tárolása, és az öröklődés során az utódoknak történő átadása. Erre épült a másik ilyen hasznosnak bizonyult modell, a Jacob–Monod-féle regulációs modell. E két utóbbi modell alapvetően változtatta meg a biológiai szemléletet mindössze egyetlen évtized leforgása alatt. A reájuk felépülő új tudományág, a molekuláris biológia az élet kutatása terén hallatlan távlatokat nyitott meg.

A DNS-modell és a regulációs modell mindemellett nem kellően alkalmas a mennyiségi viszonyok kifejezésére. Eltekintve attól, hogy e két modell a biológiának csak bizonyos részterületeire vonatkozik, az elméleti biológiának olyan modellrendszerre van szüksége, amelyik a jelenségek minőségi és mennyiségi leírására egyaránt alkalmas. Úgy tűnik, hogy a chemotonelmélet ezt a szerepet be tudja majd tölteni. E könyv első kiadása óta a chemotonelmélet nagymértékben továbbfejlődött, minőségileg és mennyiségileg képes leírni a legegyszerűbb, már élőnek tekintendő rendszerek működését, leszármaztatható belőle az élővilág kifejlődése és számos bonyolultabb, összetettebb biológiai jelenség. E nagy fejlődés tette szükségessé, hogy e könyv második kiadásának harmadik része teljes átírással kerüljön.

A lezajlott viták eredményeképpen ma már számos kritériumot, jelenséget és alapgalmat is sokkal egyértelműbben és tisztábban lehet megfogalmazni, mint egy évtizeddel ezelőtt. És ez szükséges, hiszen az elmélet és vele az új szemléletmód nagymértékben terjed, több egyetemen kerül oktatásra, szerepel az egyetemi felvételi vizsgák anyaga között, meglehetősen az érdeklődés előterébe került nemcsak biológiai, de fizikai, kémiai, kibernetikai és rendszerelméleti vonatkozásban is.

Az élővilág egyedeiből, individuumokból épül fel, a szerveződési hierarchia különböző szintjein. Ezek az individuumok mint élő egységek lehetnek prokarióták, eukarióták, soksejtűek. A chemotonelmélet ezen individuumok elméleti tárgyalását kíséri meg, elsősorban prokarióta szinten. Nem alkalmas azonban a biológián belül sem statisztikus törvényeknek engedelmeskedő jelenségek leírására. Így például a populációgenetikai problémák vizsgálatára, biocönózisok jelenségeinek leírására stb. elvileg más módszereket kell alkalmazni. Ezeken a területeken az elméleti biológia az utóbbi években számottevő

haladást ért el és gyümölcsöző matematikai modelleket állított fel. Ebben a könyvben ezekkel nem foglalkozunk, vizsgálataink a biológiai individuumok működési törvényszerűségeit ölelik fel, a chemotonelmélet s a belőle az utóbbi években levezetett eredmények alapján.

A következőkben leírtak tehát a chemotonelmélet e jelenlegi, fejlettebb stádiumát tükrözik. Mindazonáltal ez nem jelent befejezett állapotot. Az élővilág változatossága rendkívüli, az egész áttekintése, minden jelenség számbavétele, a definíciók oly módon történő megfogalmazása, hogy azok sehol ne kerüljenek ellentmondásba az egyes biológiai jelenségekkel, de ugyanakkor az egész élővilágra érvényesek legyenek, nagyon nehéz feladat, amelyet nem lehet egy lépésben megvalósítani, hanem csak folyamatos csiszolás útján. Ezért valószínűnek látszik, hogy az itteni megfogalmazások a jövőben tovább csiszolódnak, bár alapvetően feltehetőleg nem változnak már.

AZ ÉLET EGYSÉGEI

Minden egzakt tudomány alapját annak egységei képezik. Egység alatt itt nem a tudományág mértékrendszereinek egységeit értjük, hanem azokat a végső legegyszerűbb egységeket, amelyek még hordozzák az illető tudományág által vizsgált speciális sajátosságokat. Ebben az értelemben tehát a geometriának nem a centiméter, a mechanikának nem a grammtömeg az egysége, hanem a geometriai pont, illetőleg a tömegpont. Nézzük meg ezt részletesebben, ezúttal a kémia példáján.

Ha egy pohár vizet megfeleziünk, mindkét fele a víz tulajdonságait mutatja. Ha a felezést tovább folytatjuk, negyed, nyolcad, tizenhatod, harmincketted stb. pohár vizet állítva elő, a részek még mindig a víz tulajdonságait mutatják. Ám ezt a felezést nem folytathatjuk a végtelenségig. Eljutunk egy olyan legkisebb egységhez, amely még a víz általános tulajdonságaival rendelkezik, de amelyet ha kettévágunk, e tulajdonságok elvesznek, s a részek többé nem mutatják a víz jellegzetes sajátosságait. A kémia ezen gondolatmenet alapján jutott el a molekula fogalmához, és tárgyköre éppen azon minőségi és mennyiségi tulajdonságoknak a vizsgálata, amelyek megjelennek, amikor egy molekula más, kisebb részecskékből keletkezik, vagy fordítva, amelyek akkor tűnnek el, ha egy molekula kisebb részekre bomlik. A kémiának tehát a molekula ilyen végső, elvi egysége.

Hasonlóan jó példát nyújt a kristálytan is. Tudjuk, hogy például a konyhasó kristályai jellegzetes szimmetriaviszonyokat mutatnak, a kristályalapjaik és éleik által bezárt szögek állandóak, optikai sajátosságaik iránytól függően változnak ugyan, de ugyanazon irányból minden nátrium-klorid-kristályban azonosak. Azt is tudjuk, hogy ha a konyhasókristályt széttörjük, az számos kristályára esik széjjel, de a kristályok mindegyike ugyanazokat a jellegzetes kristálytani sajátosságokat mutatja. E tördelést azonban nem lehet a végletekig folytatni, elérkezünk egy olyan legkisebb, a gyakorlatban már elő sem állítható kristálydarabkához, az úgynevezett elemi cellához, amely a konyhasókristálynak még minden jellemző sajátosságát mutatja, de amelyet, ha tovább tördelünk, e sajátosságok eltűnnek. Az elemi cellák a kristálytan alapegységei.

De vajon mik a biológia alapegységei? A válasz egyszerűnek tűnik: azok a legkisebb egységek, amelyek még élnek, de amelyeket, ha megbontunk, az életre jellemző tulajdonságok eltűnnek. Ha azonban ezt az elvet az élővilág gyakorlatára akarjuk alkalmazni, ellentmondások sorozatával találjuk magunkat szemben. Amikor a csirkének elvágjuk a nyakát, a csirke megszűnik élni. A középkor elterjedt kivégzési módszere a lefejezés volt. Ezzel az elítélt megszűnt élni. Ezekből az következne, hogy a csirke vagy az ember az élet

egysége. Ha azonban a csirkének csak a lábát vagy a szárnyát vágjuk le, vagy egy ember baleset következtében karját vagy lábát veszti, ezzel nem vesztek el életére jellemző tulajdonságai, nem szűnt meg élni.

Az elmondottakkal ellentétes ellentmondásokba is keveredhetünk. A szétvagdossot giliszták, hidrák „regenerálódnak”, mindegyik darabból egész állat lesz. Ezek szerint a fél gilisza is él? A tizedrész hidra is él? Vagy gondoljunk Szent-Györgyi Albert példájára: a békából kipreparált szív még órákon keresztül dobog, működik, különösen, ha gondoskodunk arról, hogy megfelelő összetételű oldat áramoljon rajta keresztül. Él-e a kioperált békaszív? Megszokott szemléletünk azt sugallja, hogy igen. A neve is „túlélő” békaszív. De ha a békaszív él, akkor tulajdonképpen mi él, a béka vagy annak egyes részei? S ha a békaszívet szétvagdossuk, az egyes izomdarabkák tovább mozognak, működnek, élnek!

A víruskutatásnak és oltóanyag-termelésnek ma már elengedhetetlen segédeszköze a szövettenyésztet. Szövettenyésztet valamely állatból vagy növényből kimetszett darabkának mesterséges tápoldaton történő kezelésével nyernek. Ebben a szövet egyes sejtei továbbra is táplálkoznak, funkcionálnak és szaporodnak. Ilyen szövettenyésztet az állat halála után kimetszett szövetdarabból is lehet készíteni, és a nyert sejteket esetleg évtizedeken keresztül is továbbszaporíthatjuk mesterségesen. Mi él hát, az állat, annak szövetei vagy sejtei?

Szivacsállatokat kendőn átpasszírozva a sejtszuspenzióban levő sejtekből új állatok képesek kifejlődni. A növények gyökeréből vagy leveléből vett egyetlen sejtből a teljes, normális növényt fel lehet nevelni (klónozás). Az újságok ezeket természeti paradoxonokként említik. Pedig nem a természet mond ellent saját törvényeinek, hanem a mi szemléletmódunk nem kellően megalapozott!

Az emberi élet kritériumának évezredekken keresztül a szívverést tekintették. Amíg valakinek a szíve dobogott, addig az illető élt, s amikor megszűnt dolgozni, akkor vált halottá. A szív működése tehát nem magának a szív életének, hanem az ember életének volt kritériuma. Ám a néhány év óta rendszeresen végzett szívátültetések ezt a szemléletet teljesen felborították. Élő embernek kiveszik a szívét – s az illető tovább él, s beleültetik mellkasába egy halott ember „élő” szívét.

Vajon a gyilkos védekezhet-e a bíróság előtt azzal, hogy nem vette el áldozata életét, hiszen annak sejtei laboratóriumban a szövettenyésztetben tovább élnek, sőt esetleg az áldozat szíve, veséje szervátültetés révén mint szív és vese is tovább „él” más emberekben? És ha sikerrel megvalósul a „klónozás” az embernél is, mint a növényeknél említettük?

Baj van a szemléletünkkel. Elvesztettük az élet határait. Száz évvel ezelőtt ezek a fogalmak egységesek voltak: az oroszán akkor pusztult el, ha agyonlőtték, a fa akkor, ha kiszáradt. Ma, amikor kristályosítják, sőt szintetizálják a vírusokat, a klinikai halálból visszahoznak embereket, a halottból kivett sejteket évtizedekig továbbtenyésztik, egyetlen szomatikus (testi, nem ivari) sejtből teljes szervezetet varázsolnak elő, kiveszik az ember „éltető” szervét, és egy halott „élő” szervével pótolják, az élő fogalma további boncolgatásra szorul.

Ahhoz, hogy az élő egységeket, a biológia alapegységeit teljes pontossággal meghatározzuk, szükség van néhány további fogalom tisztázására is. Ezekkel a következők

fejezetben fogunk megismerkedni. Az élő rendszerek pontos definícióját csak ez után adhatjuk majd meg. E helyen, amikor az élet egységeit első közelítésben vesszük vizsgálat alá, még nem törekszünk teljes pontosságra.

Induljunk ki abból az ellentmondásból, hogy egy soksejtű szervezet halála után részei továbbra is élőként viselkedhetnek. A béka például mint béka él, hiszen sajátos élő állapotra jellemző tulajdonságokat mutat: táplálkozik, lélegzik, mozog, ingerlékeny. Kétségtelen az is, hogy e jelenségeket például a béka gerinccsatornájának elroncsolásával meg lehet szüntetni. Ezzel valamilyen élő egység működését szüntettük meg.

A megölt béka bélhámsejtjeit tegyük szövettenyésztő táptalajba. Megfelelő körülmények között e sejtek továbbra is anyagcserét folytatnak, ingerlékenyek, sőt szaporodnak is. Kétségtelen tehát, hogy míg az előbb valamely élő rendszer működését megszüntettük, vagyis egy élő egységet nem élővé tettünk, itt, az organizációnak alacsonyabb szintjén, a sejtek szintjén élő egységek újabb sokaságával találkozunk.

Ha ezeket a sejteket mikroszkóp alatt vizsgáljuk, láthatjuk, hogy szerkezetük meglehetősen bonyolult és tartalmaznak olyan, mikroszkóppal is alig látható részecskéket, például a mitokondriumokat, amelyek további belső, csak elektronmikroszkóppal látható szervezettséget mutatnak, amelyek a sejten belül, a sejt szaporodásától függetlenül szaporodnak és amelyekről már említettem, hogy nagyfokú genetikai önállósággal is rendelkeznek.

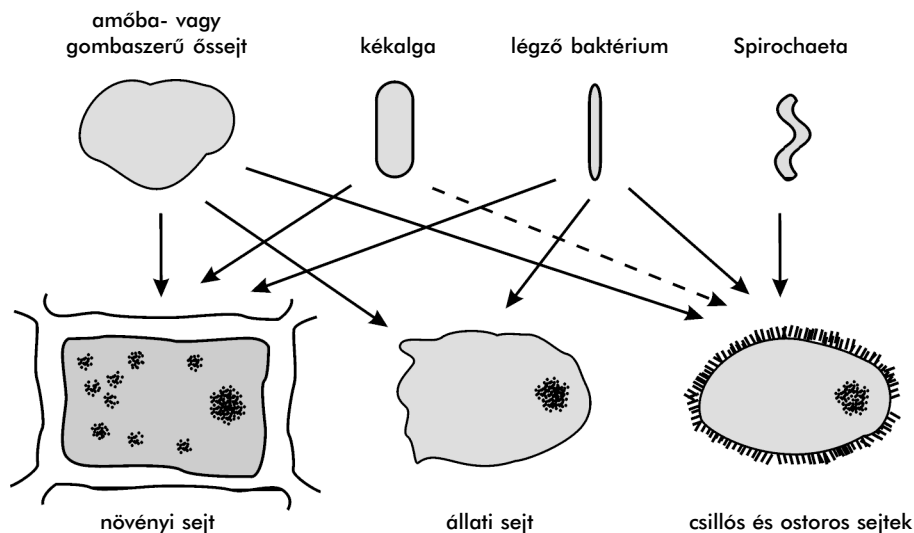
A sejteket mechanikailag szétroncsolva, a sejtek életét tönkretéve a sejt megszűnik élő egység lenni. Ezzel szemben, ha a mitokondriumait megfelelő módon összegyűjtjük, és a sejttől függetlenül meghatározott körülmények közé helyezzük, azok önállóan tovább működnek, anyagcserét folytatnak, végzik az oxidációs folyamatokat, amelyek végrehajtása a sejten belül is alapvető feladatuk volt.

Vajon ezek az izolált mitokondriumok élnek? A kérdésre nem könnyű felelni. Izolált mitokondriumokat még senkinek sem sikerült szaporítania. De a kloroplasztokat, a növényi sejtek fotoszintézist végző részecskéit egyszeres osztódáson a sejten kívül is sikerült már keresztülvinni, mesterséges táptalajban.

Ha ez így van, akkor *az életnek a szerveződés három különböző szintjén léteznek egységei.* Léteznek bizonyos sejtservecskék szintjén, léteznek a sejt szintjén és léteznek a sejtekből felépült soksejtű szervezet szintjén. *Mindhárom szint saját külön élettel rendelkezik, amelynek megszüntetése nem szünteti meg közvetlenül a másik kétszintű egységek életét.* Célszerű ezt nemcsak felülről lefelé, hanem alulról felfelé, az egyszerűbbtől a bonyolultabb felé haladva is megvizsgálni.

Az egysejtűek világát két nagy csoportra szokás osztani. Az egyiket prokariótáknak nevezik, mert nincs olyan szerkezetileg jól elkülönült sejtmagjuk, mint a másik csoportnak, amelyet eukariótáknak neveznek. A prokarióták közé a legegyszerűbb – és feltehetőleg a legősibb – élőlények tartoznak: gömbszerű és pálcika alakú baktériumok, kéalgák, spirális alakú mikroszkopikus lények: a spirochaeták. A prokariótáknak sem mitokondriumaik, sem kloroplasztjaik nincsenek.

Ma már elég általánosan elfogadják azt a feltételezést, hogy valamikor az ősi időkben amőba- vagy gombaszerű, lélegezni és fotoszintézist végezni nem tudó, tehát csak kész



10. ábra. Mai feltételezés szerint az összetettebb (növényi, állati sejtek, csillós sejtek) egyszerűbb, mag nélküli, úgynevezett prokarióta sejtek egyesüléséből keletkeztek.

szerves anyag erjedés lebontásával élő ősi sejtek egyrészt biológiai oxidációra képes baktériumokat bekeleztek be, amelyek megtartották viszonylagos önállóságukat a sejten belül is, mitokondriumokká váltak, és így kialakultak az ősi állati sejtek, másrészt viszont a fermentatív őssejtek fotoszintézisre képes kéalgákat bekeleztek be, amelyek szintén megőrizve önállóságukat kloroplasztá váltak a sejten belül, és így kialakultak a növényi sejtek. Egyesek még azt is feltételezik, hogy az élénk mozgásra képes, dugóhúzó alakú spirochaetákból lettek a csillókkal mozgó egysejtűek csillói.

Ha ezek a feltételezések minden kétséget kizáróan beigazolódnak, akkor világossá válik, hogy az eukarióta sejtek maguk is összetett élőlények, amelyek több élőlény összeműködésével képeznek egyetlen bonyolultabb, magasabb szinten élő rendszert úgy, hogy közben az alacsonyabb szintű rendszerek élete is megmarad a magasabb egységen belül. Erre egyébként ma is számos példát lehet megfigyelni. Az egysejtűek gyakran bekeleznek be algákat úgy, hogy azok nem emésztődnek fel a sejt belsejében, hanem tovább élnek, működnek és szaporodnak, és az egysejtű osztódása közben számuk a két utódsejtben statisztikusan feleződik. Ugyanakkor olyan élőlényekről, amelyekről korábban azt hitték, hogy fotoszintézist végző lények, kiderült, hogy sötétben tenyésztve a zöld testecskék szaporodása leáll és sokszoros osztódás után olyan utódok keletkezhetnek, amelyek zöld színtestecskéket egyáltalán nem tartalmaznak, tehát fotoszintézisre képtelenek. Táplálék jelenlétében mégis képesek tovább élni és szaporodni.

Amikor a biológia végső, elvi elemi egységeit keressük – az olyan jellegű végső egységet, mint amilyen a geometriának a pont, a mechanikának a tömegpont, az elektromosságtannak az elemi töltés vagy a kémiának a molekula –, akkor nyilván nem kereshetjük ezt a szerveződésnek azon a szintjén, amelyen a soksejtűek vannak, de még azon a szín-

ten sem, ahol az eukarióta sejtek. Az elméleti biológia alapvető egységei valahol a prokarióták szerveződési szintjén keresendők.

A prokarióták azonban még maguk is meglehetősen bonyolult rendszerek, bár további élő részekre már nem bonthatók. Az általunk ismert prokarióták nem a legegyszerűbb ősi rendszerekkel azonosak, hanem azoknak évmilliárdos evolúció során tökéletesedett formái. Mindenekelőtt ismeretes, hogy a prokarióták belső folyamatait is nagyon bonyolult és többszörös szintű szabályzórendszerek szabályozzák és vezérik. Elég, ha csak a molekuláris biológia eredményeire gondolunk, hiszen azok mechanizmusai, a DNS-szintézis, az információk RNS-re történő átírása, a fehérjék, enzimek szintézisének mechanizmusa, az aminosavak sorrendjének meghatározása mind-mind baktériumokon, vagyis prokariótákon lett feltárva és ismereteink zöme nagyrészt ma is csak a prokariótákra vonatkozik.

Ezen általunk legegyszerűbbnek ismert élő szervezeteknek a működését is rendkívül bonyolult enzimes mechanizmusok irányítják. A biológusok állítják, hogy a tulajdonságok mögött a megfelelő enzimek jelenléte vagy hiánya bújik meg, s ha valamely biokémiai folyamathoz tartozó enzim nincs jelen a sejtben, az a folyamat nem is mehet végbe. Az élővilág jelenlegi szintjén ez igaz.

A kémia ennek éppen az ellenkezőjét állítja. Az enzimek, mint tudjuk, katalizátorok. A kémia szerint a katalizátorok csak gyorsítják azokat a kémiai folyamatokat, amelyek katalizátorok nélkül is végbemennek, csak sokkal lassabban. A két állítás között tulajdonképpen nincs ellentmondás. Az enzimek ugyanis az egyes kémiai reakciók sebességét tíz-százmilliószorosan is képesek gyorsítani, és nyilvánvaló, hogy az a folyamat, amely a sejtben belül egy enzim hiánya miatt tízmilliószor lassabban megy végbe, mint enzim jelenlétében, biológiai szempontból nyugodtan tekinthető úgy, mintha egyáltalán nem is menne végbe.

Az élő szervezetben, sejtben, még a legegyszerűbb prokarióta sejtben is rendkívül sokféle kémiai reakció megy végbe egyidejűleg. Minthogy egy-egy vegyület nemcsak egyféle kémiai reakcióban vehet részt, a különböző kémiai reakciók egymással összekapcsolódnak, bonyolult, egységes, összefüggő reakcióhálózatot alkotva. A biológus ezt a hálózatot úgy szemléli, mint amit a jelen lévő enzimek határoznak meg. A vegyész úgy gondolja, hogy a hálózat alaptulajdonságait a különböző kémiai vegyületek átalakulásai, reakciólehetőségei alakítják ki, és ebből az realizálódik, amit a jelen lévő enzimek lehetővé tesznek.

A sejt bonyolult enzimrendszerei tehát csak szabályozni tudnak, szabályozzák egy olyan rendszer működését az egyes részműködések gyorsítása vagy lassítása által, amely rendszer magában hordozza a rendszerre alapvetően jellemző tulajdonságokat. Az élő rendszerek alapvető sajátosságait tehát nem az enzimes rendszer hordozza, az csak gyorsítja és szabályozza azokat az eseményeket, amelyek bekövetkezésének lehetőségét a szabályozott rendszer tulajdonságai hordozzák.

Amikor a biológia végső elemi egységeit keressük, akkor lényegtelen, hogy az a szabályozás mennyire hatékony formái segítségével valósul meg. Nem az enzimes szabályozásban, hanem az enzimek által szabályozott rendszerben kell keresni a biológia végső, alapvető egységeit.

HALMAZOK ÉS RENDSZEREK

A nyelvben a kollektív emberi tudás tükrözi a környező emberi valóságot. E tükrözés nem tudatos, de néha nagyon finom árnyalatokra is kiterjed, és finoman, híven árnyaltan differenciálja a világ jelenségeit. A tudomány viszont, a maga pontos módszereivel kategorizálja a világ sokféleségét, és mivel e kategóriáknak nevet kell adnia, a neveket a nyelv közhasználatú szavaiból kölcsönzi, azok értelmét szigorúan, de néha meglehetősen önkényességgel definiálva.

A tudományos értelmezés nem mindig azonos a köznapi értelmezéssel. Mivel a tudományos értelmezés mesterséges, a nyelvi viszont évszázadok alatt csiszolódott, ez utóbbi gyakran pontosabban és árnyaltabban tükrözi a realitást. Így van ez a halmaz és a rendszer kifejezésekkel is.

A halmaz kifejezés a nyelvhasználatban a dolgok sokaságának rendetlen csoportjára utal. Ha azt mondjuk, hogy egy halom téglá, nem gondoljuk, hogy az rendbe lenne rakva. Ugyanakkor a rendszer szó mint a rend szó leszármazottja szabályosságot, rendet, szervezettséget sugall. Nem így a tudományos szóhasználat. A matematika, amely létrehozta meglehetősen új ágát, a halmazelméletet, halmaznak tekinti a dolgok (elemek) mindenféle sokaságát, függetlenül attól, hogy a sokaságon belül rend van-e vagy rendetlenség. A termodinamika viszont, amely a fizikának mintegy két évszázados, nagyon fontos ága, a világ bármely valós vagy képzeletbeli falakkal körülhatárolt részét (vagyis egy halmazt) rendszerként definiálja, ugyancsak függetlenül attól, hogy a falakon belül rend van-e vagy rendetlenség.

Az utóbbi két évtizedben kifejlődött néhány új tudományág közé tartozik a kibernetika és a rendszerelmélet. A kibernetika működő, dinamikus rendszerekkel foglalkozik, a rendszerelmélet mindenfélével. Közös bennük, hogy csak olyanokkal, amelyeken belül rend uralkodik, vagyis ahol a rendszer egyes részei, úgynevezett elemei a többi elemekkel jól meghatározható szerveződési kapcsolatban vannak. A kibernetika és rendszerelmélet rendszerfogalma tehát alapvetően ellentétben van a termodinamika rendszerfogalmával.

Ha fellelőzzük a legkülönbözőbb rendszerelméleti és kibernetikai könyveket, a rendszerdefiníciók sokaságára bukkanunk, ezek azonban mind valamilyen meghatározott nézőpontból születtek és egymásnak nemritkán ellent is mondanak. A biológiában a rend alapvető jelentőségű. Nem véletlen, hogy a rendszerelmélet egyik megalapítója, Ludwig von Bertalanffy éppen biológus volt, az élő rendszerek szerveződési törvényszerűségeit kutatta, és eközben bukkant a szerveződés olyan általános alapösszefüggéseire, amelyek nemcsak az élővilág egyedeire, hanem minden olyan létezőre érvényesek, amelyeknek belső rendezettségük, szervezettségük van.

Amikor a biológiai rendszerek, az élő rendszerek legalapvetőbb törvényeit keressük, munkánk előfeltétele e rendszerek alapvető fogalmainak értelmezésében való megállapodás. A különböző tudományágak, sőt azok egyes részterületei sem azonos értelemben használják a fogalmakat. Biológiai használatra ezeket újra fogalmazzuk, függetlenül attól, hogy más tudományágak értelmezésével mennyire egyezünk. Úgy tűnik azonban, hogy a rendszerekkel kapcsolatban a következőkben megfogalmazottak a természet más, nem élő területein is érvényesek.

Mindenekelőtt a halmaz szót értelmezzük. Értjük rajta a dolgok (elemek) sokaságát, függetlenül attól, hogy e sokaságon belül rend vagy rendetlenség uralkodik-e. Ennek alapján a halmazokat eleve két nagy csoportra kíváncsi bontani, a rendezetlen halmazokra és rendezett halmazokra vagy rendszerekre. A rendezetlen halmazokkal a továbbiakban nem foglalkozunk.

A rendszerek egy részében geometriai rend uralkodik: a téglarakás, a katonai menetoszlop jó példák erre. Más rendszerekben a rend nem ennyire nyilvánvaló, de rögtön látható, hogy részei nem akárhogyan, hanem megfelelő összefüggés szerint tartoznak egymáshoz: ilyenek például a gépek, a rádió stb. A rendszerek ismét más csoportjában az összefüggések a rendszer részei között csak időben, működésükben ismerhetők fel. Ha a naprendszeréről pillanatfelvételt készítünk, égitestek rendezetlen halmazát kapjuk, a méhkasról vagy hangyabolyról készített felvétel méhek vagy hangyák tömegének összevisszaságát mutatja. Am ha időben, működésükben figyeljük meg e halmazokat, szembetűnik szervezettségük, rendszer voltuk.

Az első csoportot elnevezhetjük geometriai rendszernek, mert a rendszertelen halmaztól a benne megjelenő geometriai szimmetriatulajdonságok különböztetik meg. Ezzel a továbbiakban nem lesz gondunk. A másik két csoportra az jellemző, hogy dinamikus, működő rendszerek, amelyek olyan minőségileg új funkcionális sajátosságokat mutatnak működés közben, amelyek belső szervezettségükből fakadnak, s amely tulajdonságok megszűnnek a belső szervezettségük hiányában. Ezek tehát dinamikus rendszerek. Alapvető különbség, hogy az egyik csoport rendezett működését szilárd anyagok által felépített geometriai struktúra (de nem szimmetriák!) biztosítja, a másik csoport rendszereinek az elemeit ilyen szilárd anyagokból felépülő geometriai struktúra nem köti össze, közöttük a kölcsönhatások a téren keresztül érvényesülnek, és éppen ezért geometriai struktúrájukban módosíthatók, lágyak. Az előbbieket *kemény rendszereknek*, az utóbbiakat *lágyszereknek* nevezhetjük. Az élőlényekre a lágyszerek automata kifejezést valószínűleg Neumann János alkalmazta először.

A hangyaboly (nem az építményt, hanem a hangyák közösségét értve rajta) rendszer, dinamikus és lágyszerek, hiszen működésének szabályozása és vezérlése a „tér át” történik, elemei, a hangyák között a kölcsönhatási módok szaganyagok (feromonok), csápbeszéd stb. révén, és nem szilárd geometriai struktúrán, alkatrészekon, vezetékeken keresztül valósulnak meg.

A hangyaboly elemei a hangyák. A hangyák azonban maguk is rendszerek a szerveződési hierarchia eggyel alacsonyabb szintjén, méghozzá dinamikus rendszerek. De vajon lágyszerek-e? Geometriailag nagyon is határozott és jellemző alakú kitenyőpáncéljuk



11. ábra. A hernyó és a belőle kifejlődött gyönyörű pillangó között nem a geometriai szerkezet, hanem a rejtett, lágy organizáció a közös!

van, a hangya egyes testrészei „alkatrészekkel” és „vezetékekkel” vannak egymáshoz kapcsolva, mozgása, tevékenysége ezeken keresztül van szabályozva és vezérelve. De csak részben. Tevékenységüket, fejlődésüket hormonok is szabályozzák, amelyek „térben” hatnak, életműködésük ugyancsak anyagcseréjük lágy folyamatain keresztül valósul meg. Ráadásul bábosodáskor a lárv geometriai struktúrája szétbomlik, és új struktúra alakul ki úgy, hogy közben a hangyaegyed élete megmarad. A hangyaegyed élete ugyan belső organizáltságának következménye, de elsődlegesen nem annak geometriai, hanem „lágy” strukturaltságához kötött! A hernyó és a belőle kifejlődött gyönyörű pillangó között nem a geometriai szerkezet, hanem a rejtett, lágy organizáció a közös! Az élőlények alapvetően lágy rendszerek, legyen az puhatestű, pl. medúza vagy polip, vagy akár a legkeményebb tölgyfa vagy diófa.

A hangya a soksejtű állatok közé tartozik. Mint rendszernek a sejtek az elemei. A szerveződési hierarchia eggyel alacsonyabb szintjén a sejtek maguk is rendszerek, dinamikus rendszerek, lágy rendszerek. Élő rendszerek, mindegyik sejtnek külön, önálló élete van, amelynek működése azonban éppúgy alá van vetve a hangya mint a hierarchia magasabb fokán álló rendszer működésének, ahogy a hangyáé függvénye a hangyaboly „életének”.

A hangya is él, a sejtek is élnek. A hangyabolyt elpusztíthatjuk úgy, hogy az egyes hangyák életben maradhatnak, az egyes hangyákat elpusztíthatjuk, a hangyaboly „életben” marad. Ugyanakkor, ha a hangyát elpusztítjuk, sejtjei életben maradhatnak, és fordítva, a hangya egyes sejtjeit elpusztíthatjuk, maga mégis életben marad. A hangya élete tehát sem a sejtjeinek életével, sem a hangyaboly „életével” nem azonos. Mindegyik a szerveződés más-más szintjén levő rendszer, más-más szintjén él. Egymillió hangya nem hangyaboly, egymilliárd hangyasejt sem hangya. A hangyát hangyává, rendszerré, dinamikus rendszerré, élővé belső organizációja teszi, a sejtek működése közötti lágy organizáció. A hangyabolyt hangyabollyá, azaz rendszerré, dinamikus rendszerré, „élővé” a hangyák tevékenysége, működése közötti lágy organizáció teszi. És mi teszi a sejtet élővé? Belső eseményeinek, történéseinek lágy organizációja. *Ha az élet titkát, alaptörvényeit, princípiumát keressük, e lágy organizáció összefüggéseit kell felderíteniünk.*

A téglarakásról említettük, hogy rendszer. Ha a téglarakást úgy felezzük meg, hogy a téglák rendjét nem bontjuk meg, mindkét fele rendszer marad úgy, hogy csak mennyiségi tulajdonságai változnak, minőségi tulajdonságai az eredeti és mindkét új rendszernek azonosak. Ha egy kőso kristályra kalapáccsal ráütünk, számos apró kristálydarabkára esik széjjel. Az eredeti sókristály azonos minőségi tulajdonságokat mutat a kristálydarabkával: a szimmetriaviszonyok, a lapok és élek által bezárt szögek, optikai sajátságok stb. mind azonosak. Egy kontinens vasúthálózata rendszert alkot. Ha a kontinensen háború tör ki, e rendszer két vagy több részre tagolódik, külön önálló kisebb rendszerekre esik széjjel. De mindegyik rész tovább funkcionál, mindegyik továbbra is mutatja a vasút minőségi sajátosságait.

A rádió is rendszer. Ha a rádiót két vagy több darabra vágjuk, nemcsak mennyiségi, de minőségi tulajdonságai változnak: nem tudjuk úgy kettévágni, hogy *mindkét* rész rádió maradjon. Egy gépkocsi is rendszer. De a gépkocsit sem tudjuk úgy két részre vágni, hogy mindkét rész gépkocsi maradjon. A hangya is rendszer. A hangyát sem tudjuk úgy két vagy több részre vágni, hogy mindegyik rész élő hangya maradjon.

Az előbbieket *osztható rendszereknek*, az utóbbiakat *egységrendszereknek* nevezhetjük el. Az *élő rendszerek* alapvetően *egységrendszerek*. Az osztható rendszerek mindig több, rendszerint sok egységrendszerből tevődnek össze, ezen belül egymással bonyolult kapcsolatban lehetnek, összeolvadhatnak, átfedhetik egymást.

Ha az élet alaptörvényeit keressük, azt a biológiai egységrendszerek organizációs módjában kell keresnünk, még hozzá a legegyszerűbb biológiai egységrendszerek, a sejt, a mitokondrium, a kloroplaszt és csilló nélküli legegyszerűbb sejtek, a prokarióta sejtek szintjén. De még az egységrendszer fogalma sem kellően tiszta fogalom ahhoz, hogy segítségével az élet alapelveit megkeressük. Könnyen beláthatjuk ezt a következő példánkon:

A rádióknak eltávolíthatjuk a dobozát, kezelőgombjait, számos alkatrészét úgy, hogy a készülék tovább szól, működik, minőségi tulajdonságai nem változnak. A gépkocsinak eltávolíthatjuk a lámpáit, karosszériáját és számos alkatrészét, még mindig gépkocsi marad. E rendszereknek tehát vannak olyan részeik, amelyek eltávolítása nem befolyásolja a rendszerre alapvetően jellemző minőségi tulajdonságokat. Ezzel szemben egy ecetsav-molekulából nem távolíthatunk el egyetlen atomot sem úgy, hogy az továbbra is az ecetsav tulajdonságait mutassa. Egy oxigénatomot két hidrogénre cserélve benne etilalkohol-molekulát kapunk – egészen új minőségi tulajdonságokkal –, s ha ebből egy hidrogénatomot elveszünk, acetaldehidhez jutunk, amelynek ismét új minőségi tulajdonságai vannak.

Ezért neveztük az előző fejezetben a molekulákat a kémia végső, elemi egységeinek. A kristálytan végső elemi egységeinek az elemi cellát tekintettük, amely néhány atomból, ionból vagy molekulából áll aszerint, hogy atom-, ion- vagy molekulakristályról van-e szó. Ezekből az elemi cellákból egyetlen atomot, iont vagy molekulát, tehát egyetlen építőelemet sem lehet eltávolítani anélkül, hogy a kristálytani jellemző minőségi tulajdonságok ne szűnnének meg. Ezek a rendszerek nem tartalmaznak semmi fölöslegeset, a minimális számú alrendszerből, elemből épülnek fel, amely az adott minőségi tulajdonság megjelenéséhez szükséges. Ezért ezeket a rendszereket *minimálrendszereknek* fogjuk nevezni.

Az új minőségi tulajdonságok a minimálrendszerek organizációjának következményei.

Az első fejezetben azt mondtuk, hogy az egzakt tudományok saját területük végső, elemi egységeire, illetve azok absztrakt, elvi modelljeire épülnek. Ezt a megfogalmazást most pontosabbá tehetjük azzal, hogy azt mondjuk: *az egzakt tudományok saját minimálrendszereik absztrakt modelljeire épülnek.* És most már az is világos, hogy miért: e minimálrendszerekben jelennek meg először az adott tudományágak témakörét kitevő minőségi tulajdonságok: az atomban (hidrogénatomban) az atomfizikai tulajdonságok, a molekulában a kémiai tulajdonságok, az elemi cellákban a kristálytani tulajdonságok. Az új minőségi tulajdonságok e minimálrendszereken érthetők meg legkönnyebben, tárgyalhatók matematikailag legpontosabban, és e *minimálrendszerek modelljeit lehet matematikailag abszolút pontossággal tárgyalni.* A dinamó minimálrendszere a mágneses térben elforduló dróthurok, a rádióé az egyenirányítóból, tekercsből, kondenzátorból és hallgatóból álló „detektoros” rádió.

És ez független attól, hogy a minimálrendszerek a valóságban ténylegesen léteznek-e vagy sem! A molekula mint a kémia minimálrendszere ténylegesen létezik és stabil, a mágneses térben előforduló dróthurok legfeljebb oktatási céllal készül, a kristálytani elemi cella pedig önmagában nem is létezik, mert instabil, s csak a kristályon belül, más hasonló elemi cellák millióival együtt válik stabillá. *Az új minőségi tulajdonság megjelenése mégis e minimálrendszerekhez kötött, s a tulajdonságok tudományos tárgyalását e minimálrendszerek modelljei, és azok mennyiségi összefüggéseinek pontos leírása teszi lehetővé.*

Az élőlények, mint már említettük, egységrendszerek. De a mai élővilágban nincs egyetlen olyan élő rendszer sem, amelyik minimálrendszer lenne! Gondoljuk meg például, hogy emberből mi mindent lehet sebészi úton eltávolítani anélkül, hogy az ember megszűnne élni vagy ember lenni! A sejtnek számos tulajdonsága, képessége megszüntethető mutagén behatásokkal anélkül, hogy a sejt elpusztulna. A ma élő rendszerek rendkívül sok járulékos „alkatrésszel”, képességgel, tulajdonsággal rendelkeznek, amelyek nem magához az élethez, csak a fejlődés mai fokán, adott környezeti feltételek mellett, az élővilág közösségén belüli, kifinomult, differenciált, kvalifikálódott élethez szükségesek!

Ha az élet alapelvét keressük, akkor a legegyszerűbb élő rendszert kell vizsgálat alá vennünk, azt a minimálrendszert, amelyik már hordozza az életre mint olyanra jellemző tulajdonságokat, de amelyikből már semmit sem lehet elvenni anélkül, hogy e tulajdonságok el ne vesznének. Ez a minimálrendszer lesz az élet végső, elemi egysége, ez lehet egy egzakt elméleti biológia legalapvetőbb fogalma. A biológia e végső elemi egységét, minimálrendszerét, annak szerveződési módját, működési törvényszerűségeit fogjuk a továbbiakban megismerni, és megvizsgáljuk, hogy ezekből a minimálrendszerekből hogyan vezethetők le az élővilág jelenségei. *E végső elemi egységeket, ezeket a minimálrendszereket fogjuk chemotonoknak nevezni, s hogy miért, az is kiderül majd a továbbiakban.* Előbb azonban a dinamikus rendszerek általános működési tulajdonságaival és törvényszerűségeivel is meg kell ismerkednünk, legalábbis madártávlatból.

MŰKÖDÉS ÉS STABILITÁS

A nyelv a változásokat két csoportra, a történésre és működésre osztja. A történésnél valami olyan változásról van szó, amelyik egyszer „történik meg”, valamely anyagi halmaz vagy rendszer egyik állapotából egy másik állapotába megy át. A működés folyamatos változást jelent, azt, hogy egy anyagi rendszer folyamatosan képes változni úgy, hogy közben tulajdonképpen változatlan marad. Ellentmondás ez?

Egy kőbányában végrehajtott robbanásnál egyszeri, ugyanúgy meg nem ismételtető folyamat megy végbe: a robbanás megtörtént. Ha az autó robbanómotorjába befecskendőzött robbanóelegyben megtörténik a gyújtás, itt is bekövetkezik a robbanás, de itt a folyamat sokszorosán megismételhető, a robbanás ugyanolyan módon és ugyanazokkal a következményekkel sok milliószor újra és újra végbevihető. A robbanómotor működik.

Mindkét esetben kémiai energia szabadul fel, s mindkét esetben munkavégzésre, sőt irányított, hasznos munka végzésére használandó fel a felszabadult energia vagy legalábbis annak tekintélyes része. Az első esetben azonban egyszeri munkavégzésről, az utóbbinál folyamatos munkavégzésről van szó. *Folyamatos munkavégzés csak megfelelő munkavégző rendszerek segítségével lehetséges, amely munkavégző rendszerek jellegzetessége, hogy bennük a változások csak kényszerpályák sorozatán keresztül történhetnek úgy, hogy közben a rendszer belső organizációs sajátosságai változatlanok maradnak.*

A folyamatos munkavégzésnek tehát két általános előfeltétele van: az egyik a felszabaduló és munkává alakítható energia, a másik a munkavégzést végrehajtó rendszer. Nézzük meg először részletesebben a munkavégzés energetikai feltételeit.

Szemléletmódunkat – és rendszerint a fizikusok szemléletmódját is – a munka mechanikai fogalma uralja, amely szerint a munka egyenlő az erő és az erő irányába történő elmozdulás szorzatával. Ha tehát nincs erő, nincs munkavégzés. Akkor sincs munkavégzés, ha erő van, de elmozdulás nincs. Itt pedig már ellentmondásokhoz juthatunk. Nézzük meg ezt először egy példán.

Tételezzük fel, hogy egy vashíd építésénél az egyik vasszerkezeti elemet negyedórán keresztül kétméteres magasságban kell tartani, hogy a megfelelő szerelést, a csavarok beillesztését, meghúzását stb. el lehessen végezni. A feladatot elvileg többféle módon meg lehet oldani, nézzünk ezek közül néhány példát. Már előre hangsúlyoznunk kell, hogy a szerkezet magasba emelése mindenképpen munkabefektetést igényel, de az adott magasságban való tartása megoldható munkavégzés nélkül és munkavégzés árán egyaránt.

Az első megoldásnál építünk egy kétméteres ideiglenes állványzatot, ennek a tetejére helyezzük a többtonnás vasszerkezeti elemet, s szerelés alatt a vasszerkezetet az ideiglenes állványzat tartja. Ebben az esetben a vasszerkezeti elem kétméteres magasságban való tartása nem igényel munkabefektetést, mert a vasszerkezeti elemre ható gravitációs erőt az állványzat mechanikai szilárdsága révén egy ugyanolyan nagyságú, de ellentétes irányú erővel kiegyenlíti: mechanikai egyensúly lép fel.

A második megoldásnál nem építünk állványzatot, hanem kellő számú építőmunkás tartja feje felett negyedórán keresztül a vasszerkezetet. A fizikus szerint munkavégzés nem történik, hiszen nincs elmozdulás. Az építőmunkásoknak azonban a leghatározottabban az a véleményük, hogy nehéz fizikai munkát végeztek. S a biológiai vizsgálatok igazolják: szervezetükben ugyanazok a jelenségek észlelhetők, mint amikor „mechanikai értelemben vett” fizikai munkát végeznek.

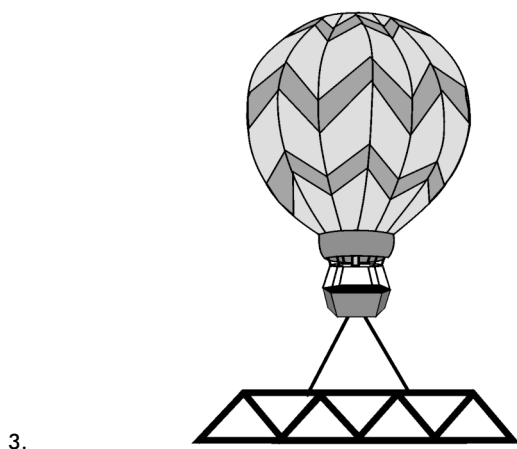
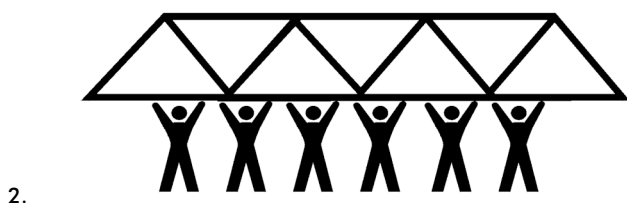
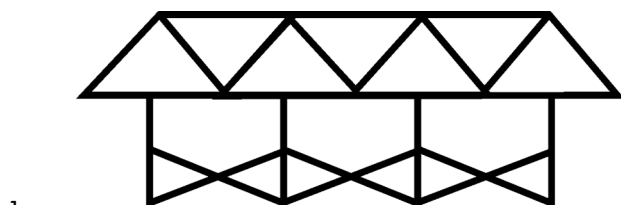
A harmadik megoldásnál a szerkezetet léghajóhoz kötjük, s a léghajót levegőnél könnyebb gázzal töltjük meg addig, amíg a vasszerkezettel együtt a levegőbe nem emelkedik. Az irányításhoz szükséges kisebb beavatkozásoktól eltekintve a vasszerkezet magasban tartásához most nem szükséges munkavégzés, mert a szerkezetre ható gravitációs erőt a léghajó felhajtóereje mint húzóerő kompenzálja.

A negyedik megoldásnál a léghajót helikopterre cseréljük fel. Itt a helikopternek egyértelműen többletmunkát kell végeznie a vasszerkezet levegőben tartása során: ez a többletmunka megmutatkozik a megnövekedett üzemanyag-fogyasztásban, a végzett mechanikai munka kiszámítható a megmozgatott levegő megnövekedett mennyiségéből stb. Ebben az esetben tehát a vasszerkezet magasban tartásához egyértelműen, mindenki szerint mechanikai munkavégzés szükséges.

Ugyanannak az állapotnak (vasszerkezet 2 m magasban) a fenntartásához az első és harmadik esetben bizonyíthatóan nem szükséges munkavégzés, a második esetben fizikai munkavégzés nem szükséges, csak valamiféle „biológiai” munka, a negyedik esetben viszont állandó mechanikai munkavégzésre van szükség.

A látszólagos ellentmondás feloldásához a fizika néhány alaptételéhez kell visszanyúlnunk. Az egyik: minden anyagi halmaz vagy rendszer spontán törekszik egyensúlyi állapot elérésére. Csakhogy sokféle egyensúlyi állapot lehetséges: a mechanikailag egyensúlyban levő tárgy nem biztos, hogy hőmérsékleti egyensúlyban van, a kémiaiilag egyensúlyban levő lehet, hogy mágneses vagy elektromos szempontból nincs egyensúlyban stb. Példánkban mechanikai egyensúlyról volt szó, s ennek előfeltétele, hogy a tárgyra ható mechanikai erők vektoriális összege nulla legyen. Az első és harmadik esetben ez eleve adott, a tárgyra ható gravitációs erőt az első példában az állványzatban fellépő torzulások által létrehozott erők, a harmadik példában a léghajó fajsúlyából eredő felhajtóerők eleve kompenzálják, s így a mechanikai egyensúly feltételei eleve adottak.

A második és negyedik példában azonban ilyen statikus mechanikai egyensúly statikusan ható erő hiányában nem léphet fel, e két esetben tehát a rendszer mechanikailag nincs egyensúlyi állapotban. Mivel mint említettük, minden anyagi halmaz vagy rendszer spontán törekszik az egyensúlyi állapot elérésére, *egyensúlytól távoli állapotban csak*



12. ábra. Négyféle mód egy vasszerkezet magasban tartásához: az első és harmadik esetben nincs munkavégzés, a negyedik esetben állandó mechanikai munkavégzés szükséges. És a második esetben? A fizikus szerint nincs munkavégzés, de ezt a vasszerkezetet tartó munkások alighanem kétségbe vonnák. Jogosan.

folyamatos energiabefektetés, azaz folyamatos munkavégzés árán lehet egy halmazt vagy rendszert fenntartani. Ez a folyamatos munkavégzés a helikopter esetében mechanikai munkavégzésben nyilvánult meg. Amikor azonban a vasszerkezetet emberek tartották, a munkavégzés nem mechanikai, hanem kémiai úton történt.

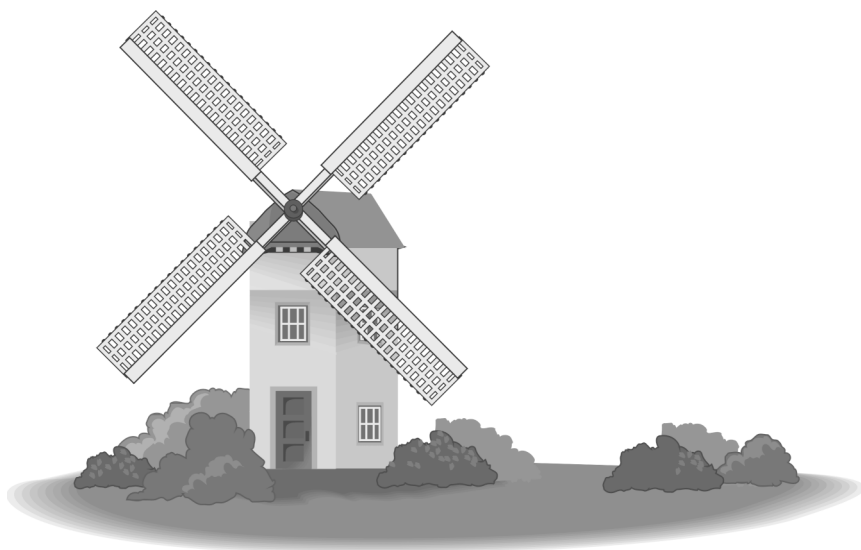
A kémiai munkavégzés fogalmának megértéséhez a munka mechanikai definíciója nem elegendő. A termodinamika munkadefiníciója szerint:

$$-\Delta U = -(Q + L),$$

ahol ΔU a (termodinamikai értelemben vett) rendszer belső energiataralom-változása, Q a keletkezett hő, L a végzett munka. (A negatív előjel arra utal, hogy a rendszer a belső energiájából veszített azáltal, hogy hőt adott le és munkát végzett.) Ebben a definícióban tehát a munka nem elmozduláshoz és erőhöz, hanem energiaváltozáshoz és keletkezett hőhöz kötött.

A munkavégzés mindig valamely munkavégző rendszer segítségével megy végbe, amely a felszabaduló energiát mintegy kényszerpályára tereli, s nem engedi, hogy teljes egészében hővé alakuljon. A benzingőzlámpában például a benzin elégetésénél felszabaduló energia szinte teljes egészében hővé alakul, a robbanómotorban döntő többségében mechanikai energiává.

Az ember a kémiai energiát gépeiben kevés kivétellel mechanikai energiává alakítja át, s a hasznos munkát mechanikai munka formájában végzi. Az akkumulátorokban és elemekben a kémiai energia közvetlenül elektromos energiává alakul. A vegyiparban és a kémiai laboratóriumokban viszont gyakran előfordul, hogy kémiai energiát kémiai ener-



13. ábra. A szélmalom a munkavégzés során állandóan változik, de úgy, hogy végül mégis változatlan marad.

giává alakítanak át, vagyis egyik vegyület lebontását közvetlenül más vegyület szintézisére használják fel. Ez is munkavégzés, kémiai munkavégzés.

Az élő szervezetek alapvető munkavégzési formája éppen a kémiai munkavégzés. A sejtek a tápanyagokat „lebontják”, azaz kisebb belső energiatartalmú vegyületekké alakítják át, s a felszabaduló energiát az elkerülhetetlen hőveszteség mellett saját testanyagaik szintézisére használják fel, ezáltal biztosítva folyamatos növekedésüket és szaporodásukat. A sejtek egy része szükség esetén a kémiai energiát a kémiai munkavégzés mellett mechanikai, elektromos munka végzésére vagy fény kibocsátására is fel tudja használni. Példánkban tehát, amikor a dolgozók mozdulatlanul tartották a vasszerkezetet a magasban, volt munkavégzés, mert a gravitációs erő ellensúlyozására izmaik feszültségét folyamatos kémiai munkavégzés árán tarthatták csak fenn.

Említettük, hogy folyamatos munkavégzés csak megfelelő munkavégző rendszer segítségével lehetséges, amely a munkavégzés során úgy változik, hogy végül mégis változatlan marad. A robbanómotorban a robbanás a hengert kimozdítja helyzetéből, de a motor úgy van megszerkesztve, hogy az elmozdulás kényszerpályán történik, s a munkavégzés után a dugattyú a kiindulási helyzetébe tér vissza. A szélmalom, a vízturbina, az elektromotor, az eszterga, a gyalugép stb. mind-mind zárt kényszerpályán mozog, s a folyamatos működés munkavégzős ciklusok egymást követő láncolatára bontható. E ciklikusság, periodicitás a mechanikai munkavégző szerkezeteknél szemléletesen belátható. Nem mechanikai munkavégző rendszerek folyamatos munkavégző képessége is ciklikus folyamatokon – a továbbiakban az egyszerűség kedvéért körfolyamatokon – alapszik, közismert nem mechanikai munkavégző rendszer például a hűtőgép, ahol a munkavégző rendszerben a hűtőgáz megy át különböző nyomású és hőmérsékletű állapotok ciklikus sorozatán.

Az élő rendszerek dinamikus, működő rendszerek, az élet maga a rendszer folyamatos, szervezett működését jelenti, amely csak állandó munkavégzés árán tartható fenn. Az élő szervezetek tehát nincsenek egyensúlyban, élő állapotukra éppen az jellemző, hogy folyamatosan egyensúlytól távoli állapotban tudják tartani magukat, természetesen folyamatos energiafelhasználás árán. Ugyanakkor mégis stabilak, mert az állandó változások ellenére is fenn tudják tartani saját állapotukat. S ez ismét egy – az elterjedt szóhasználatból eredő – látszólagos ellentmondás.

Az egyensúly és stabilitás a mindennapi szóhasználatban azonos vagy közel azonos értelmű fogalmak, mindkettőre mondhatjuk, hogy egyensúlyi vagy stabilis állapotban levő halmaz vagy rendszer tulajdonságai időben nem változnak (vagy legfeljebb az egyensúlyi helyzet körül ingadoznak, oszcillálnak). A termodinamika azonban leszűkítette az egyensúly fogalmát a zárt halmazok vagy rendszerek stabilis állapotára. Ebből következik, hogy az élő rendszerek nem lehetnek egyensúlyi állapotban, hiszen nyílt rendszerek, amelyeken anyag áramlik keresztül a táplálkozás mint alapvető életjelenség révén.

Később kiderült, hogy a nyílt rendszereknek is lehet olyan (stabilis) állapotuk, amelyben halmaz vagy rendszer tulajdonságai időben változatlanok, ez akkor áll elő, ha a rendszerbe időegység alatt ugyanannyi anyag lép be, mint amennyi eltávozik onnan. Ezt az állapotot *stacionárius vagy steady state állapot*nak nevezik. A stacionárius állapot stabilitá-

sának elméleti alapjait az irreverzibilis termodinamika dolgozta ki. Ez időben egybeesett Bertalanffy organizmikus koncepciójának elterjedésével. A stacionárius állapotot maga Bertalanffy is az élőlények stabilitásának alapjaként tekintette, s azóta ez a felfogás a biológiai irodalomban széles körben elterjedt, sőt nemegyszer magát a homeosztázist is a stacionárius állapottal azonosítják.

Sajnos ez tévedés. A stacionárius állapot a definíciója szerint olyan nyílt rendszerek állapota, amelybe időegység alatt ugyanannyi anyag lép be, mint amennyi eltávozik onnan. Az élő rendszerek viszont alapvetően növekedő (akkumuláló) rendszerek, amelyekbe több anyag lép be, mint amennyi eltávozik belőle. Növekedő rendszer pedig elvileg nem lehet stacionárius állapotban, s így minden olyan munka, amely az élő rendszerek stabilitását a steady state állapotban levő nyílt rendszerek irreverzibilis termodinamikai számításaira próbálja visszavezetni, elvileg is rossz utakon jár.

A stabilitás kérdése természetesen nemcsak mechanikai vagy termodinamikai probléma, hanem szinte minden rendszer alapproblémája, a természetes anyagi rendszerektől az ember alkotta készülékeken keresztül a gazdasági és politikai rendszerekig. Érthető tehát, hogy napjainkban a stabilitás kérdése a legkülönbözőbb tudományágakban felmerül, s így stabilitási vizsgálatokat végeznek gazdasági rendszerekre, stabilitási kritériumokat állítanak fel szabályozáselméleti és automataelméleti vonatkozásokban, Ashby „kibernetikai” stabilitási kritériumokat dolgozott ki, sőt egy „kibernetikai homeosztátot” konstruált. (Ez utóbbi azonban – az általános hiedelemmel ellentétben – nem homeosztázist produkál, mert homeosztázis az akkumuláló rendszerek „egyensúlyi” állapota, az Ashby-féle homeosztát viszont nem akkumulációs rendszer.)

Mi sem természetesebb ezek után, hogy a stabilitás kritériumait mint legáltalánosabb megfogalmazást, absztrakt matematikai módszerekkel is megpróbálták megfogalmazni. Ljapunov orosz matematikus ezt a munkát már a múlt század végén elvégezte, az azóta végzett matematikai stabilitásvizsgálatok rendszerint az ő munkáin alapulnak, az adott rendszerre vonatkozó úgynevezett Ljapunov-függvényeket keresik. Ám Ljapunov már a vizsgálati alapelvekben kimondta, hogy ha egy rendszer energiája állandóan fogy vagy állandóan növekszik, akkor nem lehet stabil állapotban, s így az akkumulációs rendszerek eleve ki vannak zárva a Ljapunov-féle stabilitás érvényességi köréből.

Az élővilágban akár a prokarióta, akár az eukarióta sejteket, a soksejtű organizmusokat, a populációkat vagy közösségeket nézzük, alapvető tulajdonságuk az akkumuláció, a növekedés, szaporodás. Ám e rendszerek növekedésük közben is megtartják „belső állandóságukat”, homeosztázisukat, dinamikus válaszokkal kompenzálják a külső környezet számukra nem kívánt változásait. E kompenzálás az élő rendszerekben, a sejtekben és organizmusokban alapvető biokémiai mechanizmusokon keresztül valósul meg. E biokémiai mechanizmusok azonban ugyanazok, amelyek a tápanyagok kémiai energiáját irányított, hasznos munkavégzésre tudják felhasználni.

A munkavégző rendszerekkel kapcsolatban említettük, hogy bennük a változások kényszerpályák sorozatán keresztül kell, hogy történjenek. A külső válaszok kompenzálása csak szabályozás révén mehet végbe, ez ugyancsak a változások kényszerpályák sorozatán keresztüli történését feltételezi. Végül a növekedés és szaporodás megkívánja, hogy

a folyamatok vezérelten menjenek végbe, s ehhez ugyancsak előfeltétel a változások kényszerpályákon történő sorozata.

A mechanikai szerkezetekben a kényszerpályák jelenléte mindennapi szemléletünk számára természetes, az inga lengésétől a fogaskerekek forgásán keresztül a dugattyú kényszermozgásáig ezzel nap mint nap találkozunk. Az elektromos és elektronikus készülékekben az áram mint változás, mozgás láthatatlan, de tudjuk, hogy a vezetékek e változás kényszerpályái, s ha e kényszerpályákat „rövidre zárjuk”, elromlik a készülék. De ha az élő rendszerekben az energia átalakítása, a munkavégzés, a szabályozás és a vezérlés kémiai úton, oldatban történik, hol vannak és milyen természetűek a kényszerpályák? *Amikor az élet titkát, az élet alapelvét keressük, akkor az oldatokban végbemenő munkavégzésére, szabályozásra és vezérlésre képes, kémiai változásokból álló rendszerek „kényszerpályáinak” mibenlétét és organizációját kell keresnünk.*

E könyv szerzője mondta ki először, hogy *az életfolyamatok alapját – és egyben az élő szervezetek stabilitását, homeosztázisát –, az élő rendszerekben végbemenő kémiai körfolyamatok, illetve azok bonyolultabb megjelenési formái, a zárt vonalú reakcióhálózatok képezik.* A kémiai körfolyamatok alkotják azt a „kémiai motort”, amely képes a kémiai energiának folyamatos irányított munkává való átalakítására, vagyis működéské. És egyben e körfolyamatok ciklikus volta biztosítja azok változatlanóságát, stabilitását, vagyis azt, hogy a rendszer a folyamatos változás, működés ellenére mindig ugyanaz, organizációs szempontból változatlan marad. Hogy a körfolyamatok által biztosított stabilitás nincs ellentétben az akkumulációs folyamatokkal, a növekedéssel és a szaporodással, azt már a chemotonok szerveződésének levezetésénél fogjuk ismertetni.

AZ ÉLET KRITÉRIUMAI

Az élő rendszerek minőségileg különböznek az élettelen rendszerektől, vagyis az élő rendszereknek vannak olyan minőségi sajátosságai, vagy a minőségi sajátosságaik olyan csoportosulásai, amelyek kizárólagosan az élővilágban fordulnak elő, és az élettelen természetben nem találhatók meg. A továbbiakban – elfogadva Varró Rózsa definícióját – az élőben található e közös jellemzőket életkritériumoknak nevezzük, azokat a törvényeket, amelyek ezen jellegzetességeket egyetlen egységbe foglalják, az élet princípiumának tekintjük, és az életet magát mint minden élő közös, általános absztrakcióját már nem biológiai, hanem filozófiai kategóriaként fogadjuk el. Így az élet kritériumait e fejezetben tárgyaljuk, az élet princípiumát a chemoton organizációjával kapcsolatban ismerjük meg. Az életnek mint filozófiai kategóriának tanulmányozásával e könyvben nem foglalkozunk.

Az élet kritériumainak helyes kiválasztása és axiomatikus pontosságú megfogalmazása az elméleti biológia alapköve. A könyv első részében láthattuk, hogy a klasszikus biológia ezt lényegében két évezred alatt sem tudta megoldani. E helyen a klasszikus életkritériumoktól, az úgynevezett „életjelenségek”-től teljesen eltérő, új kritériumrendszert közlünk. E kritériumrendszer első ízben a könyv előző kiadásában látott napvilágot. A biológia rendkívül szerteágazó világában az alapvetően közöset és jellemzőt azonban nem egyszerű kiszűrni, hiszen aligha akad olyan kutató, aki az élővilág minden részét kellő mélységben ismerné. Ezért az eredetileg, 1971-ben publikált kritériumrendszer az idők folyamán kissé módosult, csiszolódott, a könyv e jelen kiadásába így már többszörösen javított változata kerülhetett bele mind tartalmát, mind pedig fogalmazásmódját illetően. Mindezek ellenére e megfogalmazást maga a szerző sem érzi még véglegesnek sem tartalmát, sem axiomatikus pontosságát tekintve, bár alapvető változásra feltehetően nem lesz már szükség.

Az élet sajátos szerveződésű anyagi rendszerek működése. Az élet tehát nem valamely kémiai értelemben vett anyagnak, valamely speciális vegyületnek – például fehérjének vagy nukleinsavnak –, hanem speciális organizációjú rendszernek a tulajdonsága. Ezért helytelen élő anyagról beszélni, helyesebb élő anyagi rendszert említeni.

Egy rendszer akkor és csak akkor élő, ha benne sajátosságosan összetett folyamatok (életfolyamatok) mennek végbe. Ezen folyamatok összessége, azaz a rendszer működése különleges jelenségeket eredményez, amelyek alkalmasak arra, hogy segítségével az élt a nem éltől elkülönítsük.

Egy rendszer, amely alkalmas arra, hogy benne a kérdéses folyamatok végbemenjenek, lehet működő és lehet nem működő, de működőképes állapotban. E rendszer mű-

ködő állapotában *élő*, nem működő, de működőképes állapotában viszont nem *élő*, csak *életképes* (de nem holt). Ez utóbbi állapot felel meg a latens életnek, a klinikai halálnak, a nyugalomba jutott magvak állapotának, a beszárított mikroorganizmusoknak, fagyasztott szervezeteknek. Ez az állapot nem *élő* és nem holt állapot.

A halál irreverzibilis változás, amely a rendszert visszafordíthatatlanul működésképtelenné teszi. Következésképpen az élet megfelel e speciális rendszerek működő állapotának, a halál pedig a működésképtelen állapotnak. De létezik egy közbenső állapot is ezeken kívül, a funkcióképes, de nem funkcionáló állapot, azaz az életképesség állapota, amelyben a rendszer nem él, mert a sajátos folyamatok nem zajlanak benne, de nem is holt, mert folyamatai bármikor megindulhatnak, ha a körülmények arra alkalmassá válnak.

Az életfolyamatok összessége, azaz az *élő* rendszer működése olyan speciális jelenségek eredménye, amelyek általánosan alkalmasak az *élő* állapot jellemzésére. Ezek között vannak olyanok, amelyek *kivételesen minden élőlényben, életének minden időpontjában* megtalálhatók, amelyeknek állandó és együttes jelenléte nélkül a rendszer tehát nem él. Ezek együttes jelenléte nélkülözhetetlen kritériuma az *élő* állapotnak, ezért ezeket *reális (abszolút) életkritériumoknak* fogjuk nevezni. Van viszont az életjelenségeknek egy olyan csoportja, amelyek jelenléte nem szükséges kritériuma az egyes egyedek *élő* állapotának, de amelyek az *élővilág* fennmaradása szempontjából nélkülözhetetlenek. Ezeket is életkritériumoknak tekintjük, de az előzőektől eltérően nem abszolút, hanem *potenciális életkritériumoknak* nevezzük őket.

A REÁLIS (ABSZOLÚT) ÉLETKRITÉRIUMOK

Az élő rendszernek inherens módon egységnek kell lennie

Egy rendszert akkor tekintünk egységnek (egésznek), ha tulajdonságai nem tehetők össze addíció segítségével részeinek tulajdonságaiból, és ha az egész nem osztható úgy részekre, hogy a részek hordozzák az egész tulajdonságait.

Az egységet képező rendszer (egységrendszer) elemeinek nem egyszerű uniója, hanem új egység, amely részeinek tulajdonságaihoz képest új minőségi tulajdonságokat hordoz. Ezek az új tulajdonságok a rendszer elemeinek a rendszer organizációja szerint történő kölcsönhatásai révén vannak meghatározva. Csak a rendszer mint egész rendelkezik ezeknek a tulajdonságoknak a totalitásával.

A biológiai rendszerek inherens módon, azaz belső lényegükből fakadóan képeznek egységet. A biológiai rendszerek tehát egységrendszerek, az élet mindig egy egységrendszer tulajdonsága. Az az állítás, hogy e rendszerek inherens módon egységek, nem mond ellent annak a ténynek, hogy a rendszernek lehetnek járulékos részei, azaz az egységrendszereknek nem kell minimálrendszereknek lenniük.

Mivel a biológiai rendszerek konstrukcionálisan és funkcionálisan egyaránt genetikailag meghatározottak, így a rendszer biológiai egysége is genetikailag meghatározott, illetve a genetikai előírat az *élő* egységre vonatkozóan is hordoz információt.

Az élő rendszernek anyagcserét kell folytatnia

Az anyagcsere alatt értjük, hogy a külső környezetből anyag és energia jut aktív vagy passzív módon a rendszerbe, ott ezeket a rendszer kémiai úton saját belső anyagaivá alakítja át melléktermékek keletkezése közben, a kémiai reakciók a belső anyagok szabályozott és vezérelt növekedését, valamint a rendszer energiaállítását eredményezik, végül a hulladékanyagok aktív vagy passzív módon elhagyják a rendszert.

A „külső” és „belső” kifejezések itt nem a térbeli elkülönítésre vonatkoznak, hanem arra, hogy az anyag szerves része-e az élő rendszer mint egységrendszer belső organizációjának. Tartalék tápanyagok, mint például a glikogén vagy a keményítő, akkor is külső anyagoknak számítanak, ha térbelileg az élő rendszeren belül helyezkednek el.

Az élő rendszernek inherensen stabilnak kell lennie

Az inherens stabilitás sem az egyensúllyal, sem pedig a stacionárius állapottal nem azonos. Jelenti a rendszer belső folyamatainak olyan speciális organizációs módját, amely lehetővé teszi, hogy a rendszer folyamatos működése, továbbá a külső környezet változásainak ellenére is állandó maradjon. Azt jelenti, hogy noha a külső paraméterek változása által okozott, az élő rendszeren belül bekövetkezendő dinamikus változások révén a rendszer állandóan válaszol a külső hatásokra, mint egész mindig ugyanaz marad. Azt is jelenti, hogy az élő rendszerben végbemenő állandó kémiai átalakulások ellenére a rendszer maga sem bomlik le, sőt növekszik, ha szükséges.

Ez az inherens stabilitás több a homeosztázisnál, mert a homeosztázis már belőle következik. Az inherens stabilitás organizációs tulajdonság, amely, mint később látni fogjuk, az élő rendszerben végbemenő elemi kémiai és fizikai folyamatok és állapotok hálózatának (networkjének) természetes következménye. A nyugvó mag, a fagyott szövettenyészet, a liofilizált mikroorganizmus vagy a beszáradt féreg vagy protozoa egyáltalán nincs sem homeosztázisban, sem pedig stacionárius állapotban, noha mindegyik rendelkezik az inherens stabilitás kritériumával, ami abban nyilvánul meg, hogy megfelelő körülmények között ismét élővé válnak. Az inherens stabilitással rendelkező rendszer tehát csak működés közben mutat homeosztatisz tulajdonságokat, így ez a kritérium magában foglalja a homeosztázis kritériumait is.

Az inherens stabilitással rendelkező élő rendszer tehát életképes, de nem élő állapotban nem mutat homeosztázist, innen megfelelő körülmények között ismét életre kelthető, és ekkor egyúttal homeosztatisz tulajdonsággal is bír.

A homeosztázis-fogalom a híres amerikai fiziológustól, Cannontól származik. Az élőlényeknek létezik úgynevezett „belső környezete” (ezt néha tévesen a sejt közötti állománnyal azonosítják), amely állapotában és összetételében eltér a külső környezettől, és amelynek állapotát az élő rendszer, legyen az akár sejt, akár soksejtű szervezet, a külső változások ellenére is igyekszik változatlanul tartani. A belső környezetnek ezt az állandóságot nevezte el Cannon homeosztázisnak. Mint már láttuk, a belső környezetnek ez az állandósága a növekedő és szaporodó rendszereknek is sajátossága, így a homeosztázis sem az egyensúllyal, sem a stacionárius állapottal, sem az Ashby-féle „kibernetikai homeosztát” állapotával, sem a Ljapunov-féle stabilitásokkal nem azonosítható.

Az élő rendszerek belső környezetének fenntartása, vagyis a homeosztázis azonban nem valósulhat meg másként, mint a külső környezetben bekövetkezett változások érzékelése és az azokra adott kompenzáló jellegű aktív válaszok révén. Az érzékenység (ingerlékenység) tehát a homeosztázis megvalósulásának módja, annak mechanizmusa. S hogy ez hogy valósulhat meg molekuláris lágy rendszerekben, azt a chemotonelmélettel kapcsolatban részletesen ismertetni fogjuk.

Az inherens stabilitás tehát mint életkritérium magában foglalja a homeosztázis kritériumát, valamint az érzékenység, ingerlékenység legáltalánosabb értelemben vett kritériumait is, így ezek külön kritériumként való feltüntetése felesleges lenne.

Az élő rendszernek olyan alrendszerrel kell rendelkeznie, amely a teljes rendszer számára hordoz használható információkat

Minden létező hordozza a saját felépítésére, keletkezésére és működésére vonatkozó információkat. Léteznek viszont olyan rendszerek, amelyek képesek saját maguktól független dolgokra és eseményekre vonatkozó információkat is hordozni. Ilyenek például a könyvek, a mágnesszalagok, lyukkártyák, hanglemezek stb.

A természetben ilyen „többletinformáció”-hordozó kapacitással egyedül az élő rendszerek bizonyos alrendszerei, például a genetikai állomány, az agy, az immunrendszer stb. rendelkeznek. Ezek nemcsak saját magukra vonatkozóan, hanem az egész élő rendszerre, esetleg az élő rendszeren kívüli világra vonatkozóan is hordoznak információkat. Az információhordozó alrendszerek jelenléte kivétel nélkül minden élő rendszer sajátossága és az élővilág kifejlődésének elengedhetetlen kritériuma.

Egy rendszerben kódolt információ akkor válik valóban információvá, ha létezik egy másik olyan rendszer, amely ezt az információt képes leolvasni és hasznosítani. Így az élő rendszerekre az is jellemző, hogy az információtároló alrendszereikben levő információt leolvasni és hasznosítani, sőt a szaporodás során az információkat átmásolni, azaz replikálni képesek. Nemcsak az információk tárolása jellemző az élőlényekre, hanem az információs műveletekre való képesség is.

Az élő rendszerekben végbemenő folyamatoknak szabályozottaknak és vezérelteknek kell lenniük

Minden dinamikus, azaz folyamatosan működő rendszer létének feltétele folyamatainak szabályozottsága. Az élő rendszerek mint dinamikus lágy rendszerek ugyancsak rendelkeznek ezzel a tulajdonsággal. A szabályozás az élő rendszerekben elsősorban kémiai alapmechanizmusokon keresztül megy végbe. Magát a szabályozást tulajdonképpen nem is kellene külön kritériumként felsorolni, hiszen sem az anyagcsere, sem a homeosztázis nem valósulhat meg a rendszer folyamatainak szabályozottsága nélkül, s így ezek a kritériumok a rendszer szabályozottságát eleve feltételezik.

A szabályozás azonban önmagában csak a rendszer létének és működésének fenntartását képes biztosítani. Az élővilágban azonban egyirányú folyamatok is lejátszódnak: a növekedés, a szaporodás, a differenciálódás, az egyedfejlődés, a törzsfjlődés olyan egy irányban végbemenő, vissza nem fordítható folyamatok, amelyek csak szabályozással nem valósulhatnak meg, amelyekhez a szabályozáson kívül vezérlésre is szükség van.

A vezérlés az élő rendszereken belül ugyancsak molekuláris mechanizmusok segítségével megy végbe.

POTENCIÁLIS ÉLETKRITÉRIUMOK

Az élő rendszernek a növekedés és szaporodás képességével kell rendelkeznie

A növekedés és a szaporodás a klasszikus életjelenségek közé tartoznak, jelenlétük az élővilágban általános és nélkülözhetetlen. Magának az élő állapotnak azonban nem kritériumai, a kultúrnövények és háziállatok egy része eleve szaporodásképtelen, az ivartalanított állatok sem képesek utódok létrehozására, az öregedő állatok is elveszthetik növekedő- és szaporodóképességüket anélkül, hogy ezzel életüket is elvesztenék. Jelenlétük az egyedi életnek nem kritériuma, az élővilág létének azonban igen, így a potenciális életkritériumok közé kell sorolnunk őket.

Külön kell indokolni, hogy e két életjelenséget miért vontuk össze egyetlen kritériumba. Az életkritériumoknak természetesen az élővilág bármely élő egyedére nézve helytállóaknak kell lenniük a szerveződési hierarchia bármely szintjén. A növekedés és a szaporodás azonban a törzsfajlódás meghatározott szintjén vált el egymástól: a hasadással szaporodó prokariótáknál, de számos osztódással szaporodó eukarióta sejt esetében is maga a növekedés csak egy része a szaporodási folyamatnak. Jól mutatta ezt meg Hartmann kísérlete, aki a normális körülmények között kétnaponként osztódó amőbát 130 napon keresztül naponta megoperálta úgy, hogy a sejtmag érintetlenül hagyása mellett citoplazmájának mintegy egyharmadát naponta eltávolította. Az amőba a kezelésbe nem pusztult el, de a 130 napon keresztül egyetlen alkalommal sem osztódott, mert soha nem érte el a szükséges növekedési stádiumot.

A soksejtű organizmusok szaporodása csak közvetetten kapcsolódik növekedésükhöz, amely növekedés viszont közvetlen következménye sejteik szaporodásának. A növények esetében egyébként is vitatható, hogy a dugványozással történő szaporítás növekedésnek, szaporodásnak vagy regenerálódásnak fogható-e fel. Ezért célszerű a növekedés-szaporodás képességét egyetlen kritériumba összevontan tárgyalni.

Az élő rendszernek rendelkeznie kell az öröklődő változásra való képességgel, továbbá az evolúció képességével, vagyis azzal a képességgel, hogy generációik igen nagyszámú sorozatain keresztül egyre összetettebb, bonyolultabb, specializáltabb formái jelenhessenek meg

Öröklődésen azt értjük, hogy az élő rendszerek képesek saját magukkal azonos vagy magukhoz hasonló egyedek vagy ilyenek létrejöttét biztosító kezdemények létrehozására. A szaporodás fogalma azonban az öröklődést is magában foglalja, így a szaporodás kritériumként való felvétele mellett az öröklődést külön kritériumként tekinteni redundancia lenne.

Nem fejlődhetett volna ki azonban az élővilág, ha az öröklődés szigorú lenne, vagyis ha az utód tulajdonságai minden esetben azonosak lennének a szülők tulajdonságaival vagy tulajdonságainak kombinációival, hiszen ebben az esetben új változatok, új tulajdon-

ságok nem jelenhetnének meg az élő rendszerek között. Ezért külön kritériumként szükséges felvenni az öröklődő változás képességét, vagyis azt, hogy az utódban olyan tulajdonságok is megjelenhetnek, amelyek az elődök sorozatának végtelen láncolatában sehol sem voltak találhatók. Ez a képesség nélkülözhetetlen feltétele az élővilág kialakulásának, de nem feltétele az egyed élő állapotának, ezért a potenciális életkritériumok közé soroljuk.

Az öröklődő változás képessége csak szükséges, de valószínűleg nem elégséges feltétele az élővilág evolúciójának. Az evolúciónak előfeltétele az egymással nem egyenértékű öröklődő változatok megjelenésének lehetősége. Ez a tulajdonság az élővilágban általánosan fellelhető, de természetesen az egyedi életnek nem kritériuma, ezért a potenciális életkritériumok közé soroljuk.

Az élő rendszereknek halandóknak kell lenniük

Ez a kritérium egyáltalán nem szerepelt *Az élet princípiuma* című könyvem első kiadásában felsorolt kritériumok között. Varró R.: *Dialektika az élő természetben* című könyve, valamint Hortobágyi professzorral való diszkussziók készítették a potenciális életkritériumok közé sorolására. Gyakran úgy tekintik, mint az utolsó életjelenséget, Hortobágyi pedig nyolc plusz egy életjelenséget tart nyilván, ahol a plusz egy a halál.

A halál kétségtelenül jellemző az élő rendszerekre abban az értelemben, hogy élettelen rendszer nem hallhat meg. Ez azonban csak azt jelenti, hogy a két fogalom egymással kapcsolt és egymást kizáró fogalompárt alkot. De a halál valóban nélkülözhetetlen az élővilág fennmaradása szempontjából, hiszen ez biztosítja a szerves anyag körforgását a természetben. Halál nélkül ma is csak azok az első összejek léteznének a Földön, amelyek először éltek fel a bioszféra szervesanyag-tartalmát.

Az egyedi halál tehát nélkülözhetetlen az élővilág szempontjából, így feltétlenül életkritérium, de nem kritériuma az élő állapotnak, sőt az egyedi életnek sem, hiszen az egyedi élet megszűnhet halál nélkül is. A hasadással és mitózissal osztódó sejtek esetében például a DNS a szemikonzervatív replikációs mechanizmus miatt a két utódsejtben úgy oszlik meg, hogy az egyes utódsejtek DNS-molekuláinak az egyik szála az anyasejtből származik, míg a másik újonnan szintetizálódott. A többi anyag e két utódsejtben statisztikusan oszlik meg, statisztikusan egyenlő arányban tartalmazzák az anyasejt eredeti anyagait és az újonnan szintetizálódott anyagokat. Így két egyformán fiatal sejt keletkezik, amelyből egyiket sem lehet anyasejtnak, illetve leánysejtnak tekinteni. E sejtek mint élő egyedek élete tehát úgy szűnik meg az osztódás során, hogy nem marad vissza hulla, potenciálisan hallhatatlanok, legalábbis nemzedékeik folytonossága tekintetében.

Az egyed életének megszűnése nemcsak sejt szinten, hanem a soksejtűek szintjén is történhet halál nélkül. Az egyszerűbb soksejtű állatokat pl. hidrákat, planáriákat, gilisztákat két vagy több darabra lehet vágni úgy, hogy mindegyik rész teljes állattá egészül ki, az eredeti egyed – a sejtosztódáshoz hasonló módon – úgy szűnik meg létezni, hogy nem marad vissza hulla. Ugyanez a növényvilágban a kertészeti gyakorlatból ismeretes (dugványozás, vegetatív szaporítás).

A halál tehát életkritérium, de potenciális kritérium, vagyis csak az élővilág létének kritériuma.

A felsorolt kritériumok a hely- vagy helyzetváltoztató mozgás kivételével az összes klasszikus életjelenséget magukban foglalják, de szigorúbb és jobban definiált formában. Ezen túlmenően további olyan kritériumokat is tartalmaznak, amelyek általános életkritérium-jellege csak a molekuláris biológia eredményeinek ismeretében derül ki. Ilyenek például az információs műveletek vagy a folyamatok szabályozott-vezérelt volta. Ezek szerint a felsorolt életkritériumok sokkal szigorúbb megkötések tartalmazznak egy rendszer élő voltával kapcsolatban, mint a klasszikus életjelenségek.

Mivel a potenciális életkritériumok nem képezik az egyedi élet előfeltételét, így *minden rendszert élőnek kell tekinteniünk, amelyik a reális (abszolút) életkritériumokat kielégíti*, függetlenül a rendszer konkrét anyagi felépítésétől vagy a rendszert alkotó anyagok kémiai minőségétől.

Ez a definíció lehetőséget teremt arra, hogy az élet alaptörvényeit teljes általánosságban tárgyalhassuk, függetlenül azok konkrét megvalósulási formáitól. Ez a definíció tehát nem kötődik a fehérjékhez, nukleinsavakhoz, de még a szénvegyületekhez sem, és ha az exobiológia – azaz a Földön kívüli élet tudománya – nem szénalapú élő rendszereket fedezne fel a jövőben, e definíció alapján azok is tárgyalhatók lennének.

Összefoglalva tehát:

Reális (abszolút) életkritériumok:

1. Inherens egység
2. Anyagcsere
3. Inherens stabilitás
4. Információhordozó alrendszer
5. Vezéreltség

Potenciális életkritériumok:

6. Növekedés-szaporodás
7. Öröklődő változás képessége és evolúcióképesség
8. Halandóság

AZ ÉLŐ SEJT ALRENDSZEREI

Az előző fejezetek mindegyikében más és más irányból indulva, és más utakon haladva ugyan, de ugyanoda jutottunk: meghatároztuk, mit kell tennünk, hogy az élet alapelvét, az élet princípiumát megismerjük. És az eltérő utaknak megfelelően mindegyik esetben más követelményhez jutottunk. Ezek a követelmények nem ellentmondóak, hanem kiegészítik egymást, nem árt tehát most összefoglalni őket, hogy tennivalónk világosan álljon előttünk, s elkezdhessük az érdemi munkát is.

Mindenekelőtt megállapítottuk, hogy az élet mibenlétének és törvényeinek a megismerése csak egzakt elméleti biológia segítségével lehetséges. Az egzakt tudományok absztrakt elméleti modelleken alapulnak: Meg kell tehát konstruálni az elméleti biológia absztrakt modellrendszerét, olyan modellrendszert, amely matematikai módszerek révén abszolút pontossággal leírható, és amelynek segítségével a valós biológiai jelenségek a szükséges pontossággal közelíthetők.

Megállapítottuk továbbá, hogy az egzakt tudományok modellrendszerei a tudományágak absztrakt alapegységeiből indulnak ki, olyan alapegységekből, amelyek teljesen tisztán, zavaró momentumok nélkül hordozzák a tudományára jellemző minőségi tulajdonságot. Meg kell tehát a biológiai absztrakt alapegységét keresni, azt az egységet, amely a lehető legtisztábban mutatja a biológia jellemző minőségi tulajdonságát: az életet.

Megállapítottuk azt is, hogy olyan rendszerek, amelyek az alapvető biológiai tulajdonságot, az életet mutatják, a szerveződési hierarchiának több szintjén találhatók. Amikor az alapegységet keressük, akkor ezt az organizációs hierarchia legalacsonyabb olyan szintjén kell keresni, ahol az élet már megjelenik, vagyis a prokarióta sejtek szintjén.

De azt is megállapítottuk, hogy a ma ismeretes prokarióta rendszerek is túlságosan bonyolult rendszerek, amelyek már hosszú evolúciós tökéletesedés révén fejlődtek ki és bonyolult enzimes szabályozó rendszerek segítségével működnek. De a lényeg nem az enzimes szabályozó rendszerekben van, mert ezek bár a sejtműködés hatékonyságát rendkívüli mértékben fokozzák, és ma enzimes szabályozás nélkül természetes élő rendszer nem működhet, az életre vonatkozó alapvető sajátosságokat az a rendszer hordozza, amit az enzimes rendszer szabályoz. Az élet alapelvét tehát annak a rendszernek a szerveződési módjában kell keresni, amit az enzimes rendszer szabályoz, ennek a szerveződési, működési törvényszerűségeit kell felderíteni.

Megállapítottuk továbbá, hogy az ember által létrehozott dinamikus, működő technikai rendszerekkel ellentétben az élő rendszerek alapvetően lágy rendszerek, azaz folyamataik nem szilárd alkatrészekből, szigorú térbeli összerendeléssel egymáshoz kapcsolt alkatrészek segítségével mennek végbe, hanem alapvetően oldatokban, térben nem rögz-

zített kémiai reakciók révén, de mégis organizált, szabályozott módon. Az élet lényegét e lágy rendszerek szerveződési és működési törvényeiben kell keresni.

További szigorítást – és egyben szűkítést – jelentett, hogy kimutattuk: az élet egységrendszerek sajátossága, alapelvét tehát a lágy egységrendszerek szerveződési módjában kell keresni.

De azt is kimutattuk, hogy az egységrendszerek még nagyon sok járulékos résszel rendelkezhetnek, amelyek elfedhetik az előre jellemző organizációs mód lényegét. Minimálrendszereket kell tehát keresnünk, olyan minimálrendszereket, amelyek már mutatják az élet jellegzetességeit, mert mint arról volt szó, az új tulajdonságok megjelenése a minimálrendszerek organizációs módjához kötött. Ez az állítás egyenértékű azzal a más oldalról következtetett megállapítással, hogy a biológia elvi alapegységeit kell megtalálni. A feladat tehát: az élet jellegzetességeit mutató lágy minimálrendszer matematikailag abszolút pontossággal tárgyalható absztrakt modelljét kell felállítani.

Viszont azt is megállapítottuk, hogy az élő rendszerek működő, dinamikus rendszerek, amelyek működésük során, a bennük végbemenő állandó változások ellenére belső stabilitást mutatnak. Ha folyamatok mennek bennük végbe, akkor nem lehetnek egyensúlyi állapotban, ha belső stabilitást mutatnak, akkor a rendszer állandóan távol van az egyensúlytól, s említettük, hogy egy rendszer egyensúlytól távoli állapotban csak állandó munkavégzés árán tartható fenn. Az élő rendszerekben ez az állandó munkavégzés a tápanyag energiájának, vagyis kémiai energiának a rovására történik, és a munkavégzés alapvetően kémiai munkavégzés. Olyan lágy minimálrendszer absztrakt modelljét kell tehát felállítani, ami folyamatos kémiai munkavégzésre képes.

Említettük, hogy a folyamatos munkavégzés előfeltétele, hogy a munkavégző rendszerben történő változások „kényszerpályákon” haladjanak. Ezzel szemben arra is rámutattunk, hogy a lágy rendszerek elemei térben kötetlenek. A „kényszerpályák” tehát nem lehetnek térbeli kényszerpályák, mint a mechanikai, elektromos és elektronikus készülékek esetében, hanem valami más típusú kényszerpályák, olyanok, mint a hűtőgépben levő hűtőgáz állapotainak változása (bár az élő rendszerekben a halmazállapot-változásoknak aligha lehet lényeges szerepük). Amikor tehát az élő rendszerek működésének alaptörvényszerűségeit akarjuk felderíteni, akkor a folyamatos működésre képes lágy kémiai rendszerek „kényszerpályáinak” szerveződési módját kell feltárnunk.

De még ez sem minden. Az összes ilyen lehetséges rendszerek közül csak azok élő rendszerek, amelyek teljesítik az abszolút életkritériumokat. S ha ilyen – legalábbis elvben – sikerül konstruálni, akkor élő rendszert konstruáltunk ugyan, de ez még nem szükségszerűen alkalmas élővilág kifejlesztésére. Ehhez a potenciális életkritériumokat is ki kell elégítenie.

Megvan tehát a feladat, pontosan tudjuk, hogy mit kell tennünk. S ez egyáltalán nem kis feladat. Megoldása első pillanatra reménytelennek látszik. És valóban reménytelen is lenne, ha nem lehetne segítségül venni a rendszer–alrendszer viszonyt, amellyel a feladatot egyszerűbb részfeladatokra lehet bontani.

A halmazok és rendszerek tulajdonságainak már egy külön fejezetet szenteltünk, ebben mégsem esett szó az alrendszerekről. Most tehát az alrendszerek fogalmával is meg kell ismerkednünk, s ezt tegyük egy példa segítségével. Vegyünk példaként egy autót.

Azt mondtuk, hogy egy rendszer jellemző minőségi tulajdonságai annak szerveződési – jelen esetben konstrukciós módjából erednek és nem találhatók meg elemeinek a tulajdonságaiban. Az autó tulajdonságai, hogy például közlekedési eszköz, az utakon gurulni képes, hogy a mozgáshoz szükséges energiát benzin elégetésével nyeri, hogy bele lehet ülni stb. nem találhatók meg a sebességváltó fogaskerekeiben, a motor szelepeiben, a kormánykerékben, a gumiabroncsban stb., csak az ezekből megfelelő módon összeszerelt rendszerben. E minőségi tulajdonságok között azonban vannak olyanok, amelyek bár a kész autónak is minőségi sajátosságai, megjelenhetnek az autó egy-egy részének összeszerelésekor. Így például a futómű-alváz részrendszer már alkalmas arra, hogy az utakon guruljon, noha nem képes önálló mozgásra és nem lehet beleülni. A motor a benzin elégetésével mozgási energiát szolgáltat, noha nem lehet vele az utakon közlekedni.

A teljes rendszer azon részrendszereit, amelyek egy-egy, a teljes rendszerben is jellegzetes és szükséges minőségi tulajdonságot már önmagukban hordoznak, a továbbiakban a teljes rendszer alrendszereinek nevezzük. Így az autó alrendszereinek tekinthetjük a futómű-alváz-kormánymű részrendszert, például a motort, a karosszériát, a fűtőrendszert, a világító rendszert stb. A teljes dinamikus rendszer az alrendszereinek összekapcsolt működtetésével jön létre. Hordozza alrendszerei jellegzetes tulajdonságait, de alrendszereinek tulajdonságaihoz képest is hordoz még új minőségi tulajdonságot: az autó esetében például azt, hogy közlekedni lehet vele, amit egyik említett alrendszerével sem lehet.

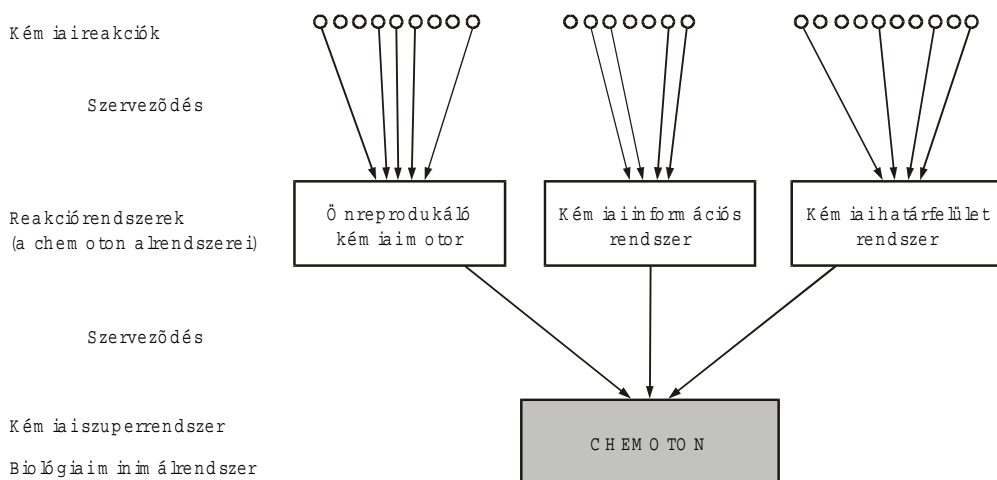
Az élő rendszereket is fel lehet alrendszerekre bontani. Egy emberben például külön alrendszer a szív-véredény rendszer, az agy-idegrendszer, a légző rendszer, a vizeletkiválasztó rendszer, a hormonális rendszer stb., amelyeknek mind vannak olyan sajátos minőségi tulajdonságai, amelyek az egész rendszerre is jellemzők. Az emberre mint egészre is jellemző, hogy szíve dobog, hogy gondolkodik, lélegzik stb. Az emberre jellemző minőségi tulajdonságokat azonban csak ezen alrendszerekből szerveződött teljes rendszer hordozza. Ez a teljes rendszer, az ember mint dinamikus rendszer, alrendszereiből úgy épül fel, hogy alrendszereinek működése van összekapcsolva: az egyik funkciója elengedhetetlen feltétele a másik működésének, ez a harmadikénak és fordítva. Nem magára az alrendszerre, hanem annak funkciójára van szükség: művesével, műszívvel vagy vastüdővel is lehet élni, ha a mű-alrendszerek tökéletesen ellátják az eredeti alrendszer funkcióját.

Ezek után már nemcsak azt látjuk, hogy *mit* kell tennünk, hanem az is kezd kibontakozni, hogy *hogyan* kell azt megvalósítani. *Meg kell keresnünk a legegyszerűbb élő rendszerek alrendszereit, majd megkonstruálni az egyes alrendszerek minőségi tulajdonságait mutató lágy rendszerek, még hozzá minimálrendszerek absztrakt modelljeit, végül az alrendszereket egyetlen, funkcionálisan egységes rendszerbe kell egyesíteni. Ha mindent jól hajtottunk végre, a legegyszerűbb élő rendszer absztrakt modelljéhez kell eljutnunk.*

Három alapvető alrendszer található meg minden sejtben: a sejtplazma, a sejthártya és a genetikai állomány. A különféle sejtekben ezenkívül számos sajátos funkciójú alrendszer található még, ezek azonban nem fordulnak elő kivétel nélkül minden sejtben. Feltételezhetjük tehát, hogy ha e három alrendszer funkcióit megismerjük, majd megkonstruáljuk ezek megfelelő absztrakt modelljeit, s a modelleket egyetlen rendszerbe szervezzük, a sejt absztrakt modelljét kapjuk meg.

A három alrendszer közül talán a *sejtplazma* funkciója a legbonyolultabb. Mindenekelőtt ő a kémiai motor. A sejtplazmában található az a rendszer, amelyik a tápanyagok kémiai energiáját hasznos munkává alakítja át. Azután ő a homeosztatisztikus alrendszer, amelyik a külvilág behatásait kompenzálja, azokra dinamikusan válaszol: tehát felelős a sejt dinamikus és organizációs stabilitásáért. Egyben az érzékenyséért, ingerlékenyséért is felelős, hiszen a homeosztázis megvalósulási módja maga az érzékenység. Mindezek megvalósításához az szükséges, hogy benne a folyamatok szabályozottan menjenek végbe, tehát a citoplazma hordozza az élő sejt mint lágy rendszer szabályozott mivoltát. Végül a citoplazma szolgáltatja a saját maga, valamint a másik két alrendszer növekedéséhez és reprodukciójához a szükséges nyersanyagokat: a citoplazma tehát önreprodukáló lágy rendszer. (Ez a megállapítás nincs ellentétben azzal a ténnyel, hogy a citoplazma reprodukciójának vannak olyan feltételei is, amelyeket a másik két alrendszer biztosít.)

A *sejthártya* elsődleges feladata, hogy összetartsa a citoplazmát. Itt a lágy rendszerek létezésének egy olyan általános előfeltételével találkozunk, amelyekre a kemény rendszerek esetében nincs szükség. *Minden rendszer létezésének alapfeltétele* ugyanis, *hogy az elemei között levő távolság kisebb legyen, mint az őket rendszerbe szervező kölcsönhatások maximális hatótávolsága*. A kemény rendszereknél ez eleve adott. Az óra fogaskerekei eleve egymáshoz kapcsolódnak, a rádió alkatrészeit vezetékek kötik össze stb., így a kemény rendszerek organizációs módja eleve biztosítja az elemek közötti kölcsönhatások kialakulását. A lágy rendszerek esetében ez már nem természetes: egy katonai alakulat csak olyan nagyságú területen működhet, amelyen belül a parancsnok eljuttathatók a katonákhoz, az állatsorda csak úgy funkcionálhat, ha egyedei látó- és hallótávolságon belül vannak, a hangyaállam feromonjainak hatáskörén belül, s a sejt sem működhetne, ha anyaga egy úszómedencényi



14. ábra. Megfelelő kémiai reakciók dinamikus rendszerbe szerveződése új minőségi tulajdonságokat mutató reakciórendszereket eredményez. E rendszerekből – mint elemekből vagy alrendszerekből – a szerveződési hierarchia magasabb fokán álló rendszereket, kémiai szuperrendszereket lehet nyerni. Ezek egyik típusát alkotják a chemotonok, amelyek biológiai minimálisrendszerek is egyben.

vízben lenne szétesztva, mert a molekulái között a szükséges kémiai kölcsönhatások a molekulák közötti nagy távolságok (vagyis a nagy hígítás) miatt nem alakulhatnának ki.

A lágy rendszereknél tehát külön feltétel elemeik szükséges térbeli közelsége. Ezt az emberi társadalom szintjén értelmi tevékenység biztosítja, az állatsordáknál zömmel ösztönök; a rovarállamoknál feltehetően az illatanyagoknak van benne alapvető szerepe. A sejt és az organizmus szintjén a térbeli összetartozást határhártyák biztosítják, amelyek az élőlény saját belső anyagait nem engedik át magukon, s így az élő rendszer anyagainak tartózkodását meghatározott térrészre korlátozzák, biztosítva ezáltal a kémiai munkavégzés és szabályozás létrejöttéhez szükséges optimális anyagkoncentrációkat.

A sejt azonban anyagcserét folytat: nem elég, ha a sejthártya a rendszer belső anyagait nem engedi a külső térbe jutni, az is szükséges, hogy a külső anyagokból azokat, amelyekre a sejtnak tápanyagként szüksége van, átengedje magán, lehetővé tegye, hogy a tápanyagok a külső térből a sejt belső terébe jussanak. Végül az anyagcsere során salakanyagok, felesleges anyagcseretermékek is keletkeznek, ezeknek is át kell jutniuk a sejthártyán, de ellenkező irányban, a sejt belsejéből a külső környezetbe. A sejthártyának mint a sejt második alrendszerének a feladata tehát egyrészt a sejt térbeli körülhatárolása, másrészt az első alrendszer, a citoplazma működéséhez szükséges feltételeknek a külvilág felől való biztosítása.

A harmadik alrendszer, a *genetikai állomány* alapvető feladata a sejt öröklődő tulajdonságaira vonatkozó információk tárolása, azokról másolat készítése a sejt osztódása során. Amíg a sejt folyamatainak *szabályozása* a citoplazma feladata volt, a sejt életfolyamatainak *vezérlése* a genetikai állomány feladata, ez tartalmazza azt a programot, amely a sejt fejlődésében egyirányú, visszafordíthatatlan események sorozataként jelenik meg.

Amikor tehát a sejt absztrakt minimálrendszerét keressük, három alrendszer absztrakt modelljét kell megkonstruálnunk:

1. *Egy olyan lágy (kémiai) rendszer absztrakt modelljét, ami a kémiai motor; kémiai munkavégzés szerepét betölti, ami belső kémiai organizációja következtében stabil működésű, amiben megjelenik a kémiai szabályozás, és végül ami saját maga és más rendszerek számára anyagok szintézisére képes.*

2. *Egy olyan lágy (kémiai) rendszer absztrakt modelljét, amelyik térbeli szeparálásra, kémiai anyagok szelektív átengedésére, és nyersanyagai jelenlétében növekedésre képes.*

3. *Végül egy olyan kémiai rendszer absztrakt modelljét, amelyik információ tárolásra és az információ átmásolására, vagyis önreprodukcióra képes a megfelelő nyersanyagok jelenlétében.*

A továbbiakban bemutatjuk, hogy konstruálhatók az egyes alrendszerek funkcióinak megfelelő tisztán kémiai rendszerek, majd egyesítve az 1. és 2., továbbá az 1. és 3. kémiai rendszert olyan kémiai szuperrendszereket kapunk, amelyekben új, biológiai jellegű minőségi tulajdonságok jelennek meg, végül a *három rendszer egyesítésével kapott kémiai szuperrendszerben – a chemotonban – mindazon tulajdonságok megjelennek majd, amelyeket mint életkritériumokat kiválasztottunk.*

Fogjunk hozzá, tervezzük meg az életkritériumokat kielégítő minimálrendszer modelljét!

A KÉMIAI MOTOR

Említettük, hogy a folyamatos munkavégzéshez olyan munkavégző rendszer szükséges, amely munkavégzés közben állapotát változtatja, de mindig visszatér eredeti kiindulási helyzetébe, vagyis körfolyamatban „dolgozik”. Erre példaként a benzinmotort, elektromotort, szélmalmot, sőt a hűtőgépet hoztuk fel. Kémiai munkavégzésnél, ahol kémiai energiát kémiai rendszer használ fel, alakít át folyamatosan, magának a munkavégző kémiai rendszernek kell körfolyamatban dolgoznia.

Mit jelent a kémiai körfolyamat? Semmi esetre sem azt, hogy a molekulák körbe-körbe mászkálnának, már csak azért sem, mert vizes oldatban trilliónyi molekulát lökdös összevissza a hőmozgás, és semmivel sem tudnánk az egyes molekulákat arra készíteni, hogy körbe-körbe mászkáljanak. A kémiai körfolyamat azt jelenti, hogy az egyes molekulák kémiai reakció révén más molekulává alakulnak, majd ezek ismét más molekulákká, ezek ismét másokká, de úgy, hogy a sokszoros átalakulás végén az eredeti, a kiindulási molekulákat kapjuk vissza, amelyek ezt a folyamatot most már kezdhetik előlről.

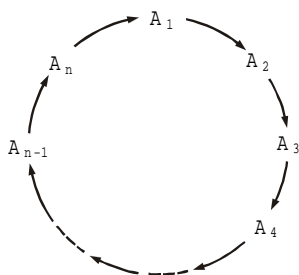
Ha a molekulákat A betűvel jelöljük, s a minőségi eltéréseket egy kis indexszel, akkor a folyamat első lépése:

	$A_1 \rightarrow A_2$	[1.1]
a második	$A_2 \rightarrow A_3$	[1.2]
és tovább:	$A_3 \rightarrow A_4$	[1.3]
	.	
	.	
	.	
végül	$A_{n-1} \rightarrow A_n$	[1.n-1]
az utolsó:	$A_n \rightarrow A_1$	[1.n]

Vagyis a folyamat végén visszaérkezünk kiindulási molekulánkhöz. Ha matematikailag összegezni akarnánk, hogy mi is történt összesen, kiderül, hogy az égvilágon semmi, hiszen minden egyes tag előfordul az egyenletek bal oldalán is és jobb oldalán is, mindegyik oldalon egyszer-egyszer, így az összevonásnál kiesnek.

A kémiában e betűrövidítések megállapodászerűen anyagmennyiségeket jelentenek, így tehát, ha A_1 csak A_2 -vé, ez csak A_3 -má alakulhat át stb., akkor az [1.1]–[1.n] egyenletek szerint ebben a rendszerben nem történhet olyan kémiai folyamat, amelynek eredményeképpen a rendszer összanyagmennyisége változna, akkor sem, ha a rendszer „működik”, azaz benne kémiai folyamatok mennek végbe!

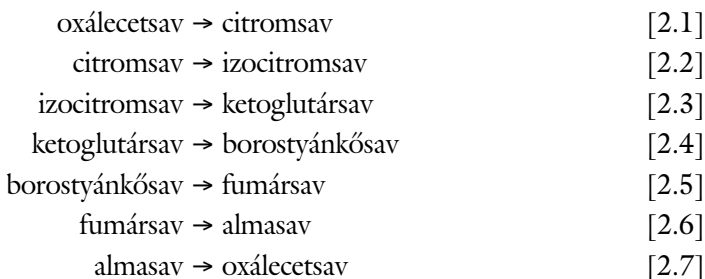
Ezzel az egyszerű lépéssel, ahogy mondani szokás, „két legyet ütöttünk egy csapásra”. Mindenekelőtt világosan kitűnik belőle, mit is jelentenek a „kényszerpályák” a lágy rendszerekben. Átalakulásokat, változásokat; kémiai rendszerekben kémiai átalakulásokat, azaz reakciókat, azt, hogy adott vegyület nem akármilyen, hanem csak a „kényszer” által megengedett kémiai átalakuláson mehet keresztül. Azt, hogy adott esetben A_1 -ből csak A_2 , ebből csak A_3 , ebből csak A_4 lehet stb.

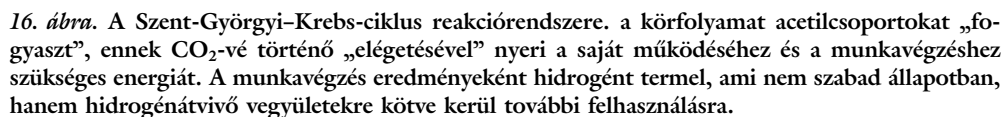


15. ábra. A kémiai körfolyamatban a molekulák minden egyes reakciólépésben átalakulnak ugyan, de a folyamat (egy ciklus) végén a kiindulási molekulává alakulnak vissza. Az ilyen körfolyamat kielégíti Ashby kibernetikai stabilitáskritériumát is.

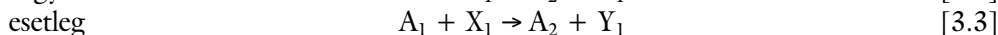
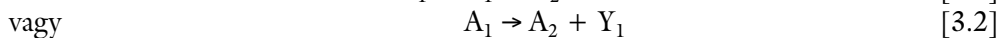
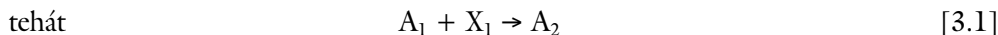
De kitűnik ebből az is, hogy kémiai rendszerben hogyan lehet inherens dinamikus stabilitást teremteni. Úgy, hogy a kémiai reakciók alkotta „kényszerpályát” zárttá tesszük, visszavezetjük a kiindulási állapotba, kémiai körfolyamatot hozunk létre. Adott esetben biztosítjuk, hogy az A_n visszaalakuljon A_1 -é, s ezáltal a folyamat kezdődhessék előlről, s mehessen folyton körbe-körbe. Így a rendszer inherensen, azaz belső lényegéből kifolyólag válik stabillá, hiszen körfolyamat mivolta következtében nem tud mást csinálni, mint folyton-folyton visszaalakul önmagába. Ez egyben kielégíti Ashby „kibernetikai” stabilitáskritériumát is, amelyet ő úgy fogalmaz meg, hogy a „transzformációk sorozata nem hoz létre új állapotokat”. (Vigyázat, az inherens stabilitás nem azonos a termodinamikai stabilitással!) Ugyanakkor ez a stabilitás még nem az akkumulációs, a növekvő rendszerek stabilitása, de mint később látni fogjuk, annak is alapja. Bebizonyítható, hogy ez az inherens stabilitás nemcsak az egyszerű reakcióciklusra, hanem a kémiai kényszerpályák bármilyen bonyolult zárt hálózatára is fennáll.

Az első biokémiai körfolyamatot Szent-Györgyi Albert előzetes felfedezéseire támaszkodva Hans Krebs ismerte fel, ez ma mint Szent-Györgyi–Krebs-ciklus, citromsav ciklus vagy trikarbonsavciklus ismeretes. Ebben szerves savak alakulnak át egymásba:

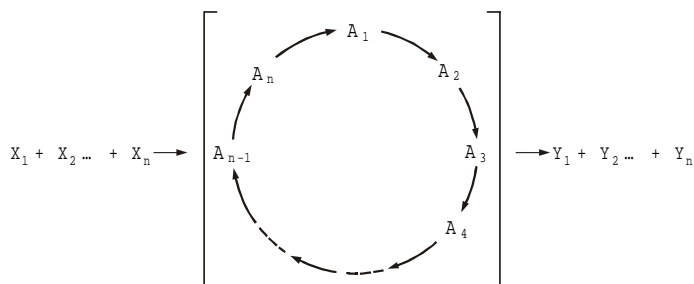




E kérdések azért merülnek fel, mert eddig a kémiai körfolyamatokat egyoldalúan, hiányosan, csak a „körpályára” kényszerített vegyületek szempontjából vizsgáltuk. A kémiai reakciók – a néhány úgynevezett intramolekuláris átalakulástól eltekintve – két különböző reakciópartner egymásra hatása révén mennek végbe vagy legalább két reakcióterméket szolgáltatnak, így az A_1 átalakulásához egy X_1 reakciópartner kell, vagy egy Y_1 reakciótermék is keletkezik az A_2 -n kívül:

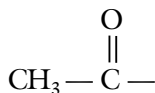


Ugyanez természetesen a többi reakciólépésre is fennáll.

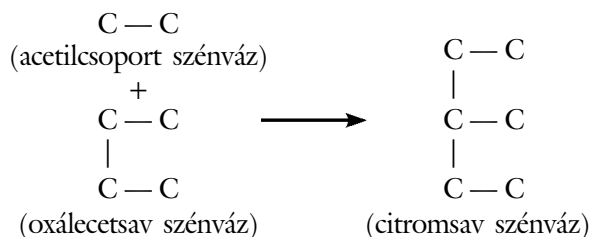


17. ábra. Kémiai körfolyamat csak külső energia, legtöbbször az elhasznált nyersanyagok ($X_1 + X_2 + \dots + X_n$) kémiai energiájának felhasználása révén működhet. A keletkező termékek ($Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n$) összes energiája kisebb, mint a felhasznált nyersanyagoké.

Ha a Krebs-ciklust ebből a szempontból is megvizsgáljuk, kiderül, hogy szó sincs perpetuum mobiléről, ebben szívet „égetnek el” szén-dioxiddá, s a felszabaduló energia hajtja a ciklust körbe-körbe. A ciklusnak az első lépésben ugyanis az oxálcetsavhoz egy kétszénatomos, úgynevezett acetilcsoport kapcsolódik:



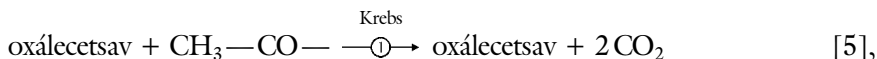
s így a négyszénatomos oxálcetsav-molekulából hatszénatomos citrátmolekula lesz:



A további átalakulások során a citromsavról fokozatosan két szén-dioxid-molekula hasad le, miközben négyszénatomos termék – végső soron a kiindulási oxálcetsav marad vissza. Ahelyett, hogy a kémiai részletekbe merülnénk, vezessük be a következő jelölést:



ami jelenti, hogy az oxálcetsav-molekula a Krebs által felfedezett kémiai kényszerpályán, azaz reakciók sorozatán egyszer körbement. E jelöléssel most már írhatjuk, hogy



amiből világosan látszik, hogy mialatt egy oxálcetsav-molekula egyszer „körbemegy” a cikluson, két szénatom „ég el” szén-dioxiddá. Csakhogy ennél az „elégésnél” alig szabadul fel hő, az energia éppen a körfolyamat működtetésére fordítódik.

Világos tehát: szó sincs örökmozgóról, a kémiai körfolyamat a külső reakciópartner (jelen esetben az acetilcsoport) kémiai energiájának rovására megy körbe úgy, hogy a keletkezett melléktermékek kémiai energiataralma kisebb, mint a felhasznált reakciópartnerké, a nyersanyagoké. És csak addig működhet ez a motor, amíg rendelkezésre áll a nagyobb energiataralmú nyersanyag, a külső reakciópartner. Ezzel az egyik kérdésünkre meg is feleltünk. Változatlanul fennmarad még a másik kérdés, mire jó egyáltalán egy ilyen kémiai motor?

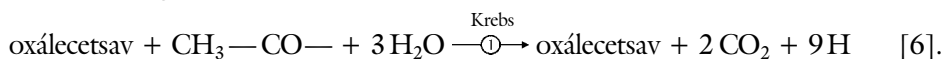
Általánosságban már megfeleltünk rá az első fejezetek egyikében: munkavégzésre, kémiai munka végzésére, hasznos, irányított munka végzésére. Itt tehát a mechanizmus tisztázása marad hátra.

Kémiai munkavégzésről lévén szó, nézzünk először egy példát. Legyen ez a rakéták hajtóanyagának, a hidrogénnek az előállítása. A hidrogént azért használják a rakéták hajtóanyagaként, mert vízzé való elégetésekor igen nagy mennyiségű energia szabadul fel, súlyához képest igen jó hatásfokkal lehet belőle energiát nyerni. A hidrogént nagyüzemi légi vízből állítják elő, a víz bontásához szükséges energiát elektromos energia szolgáltatja. Lehet kémiai energia segítségével is hidrogént nyerni a vízből, a technika körülményei között azonban az elektromos energia felhasználása az előnyösebb.

Érdekes módon az élő szervezetek évmilliárdokkal ezelőtt észrevették, hogy milyen előnyös energiaforrás a hidrogénnek vízzé való elégetése: az aerob (levegőt igénylő) szervezetek energiaszolgáltatása döntő mértékben erre a folyamatra épül. Csak itt nem gázalakú hidrogén, hanem speciális módon kémiaiilag kötött hidrogén ég el vízzé, s nem magas hőmérsékleteken, hanem bonyolult kémiai reakciókon keresztül, hogy a felszabaduló energia minél kisebb része vesszen el hő formájában. De hogyan jut a szervezet elégethető hidrogénhez?

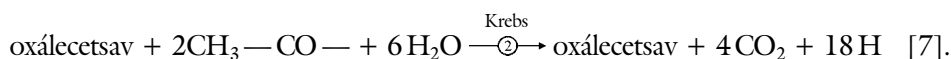
Akik egy kicsit is konyítanak a kémiához, észrevehették, hogy az [5] egyenlet hibás. Szén van ugyan elég a két CO₂ keletkezéséhez, de az oxigén bizony hárommal kevesebb az egyenlet bal oldalán, mint a jobbon, az egyenlet jobb oldaláról pedig három hidrogén hiányzik, s a megoldás éppen ebben van. A körfolyamat lépései között ugyanis három

olyan van, amelyiknek a víz külső reakciópartnere. Ezeknek a vízmolekuláknak az oxigénje kerül a szén-dioxidokba, a fennmaradó hidrogének pedig a hidrogénátvivő vegyületekhez kötődnek „elégetésre” készen:

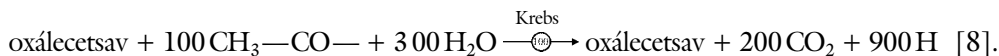


Valójában tehát a citrátciklus vízbontás segítségével hidrogént állít elő, s ehhez a szénnek szén-dioxiddá való oxidációjánál felszabaduló energiát használja fel! Ez tehát valóban folyamatos munkavégzésre alkalmas lágy rendszer, olyan, amelyik kémiai energia hasznosítása révén irányított, hasznos munkavégzésre képes! (Félreértések elkerülése végett megjegyezzük, hogy még a [6] egyenlet is egyszerűsített és hiányos.)

Azt még ellenőriznünk kell, hogy valóban folyamatosan képes-e ez a rendszer a munkavégzésre. A [6] egyenlet azt jelenti, hogy egyetlen oxálecetsav-molekula, ha a ciklus minden kémiai átalakulásán egyszer végbemegy, akkor egy acetilsoportból és három vízmolekulából csinál két szén-dioxid-molekulát és kilenc hidrogénatomot. Mivel a ciklus végén visszanyerjük az oxálecetsav-molekulát, ez még egyszer végigmehet a cikluson, így összesen négy CO_2 -t és tizennyolc H-t termelve, amit egyenlettel így fejezhetünk ki:



Annak sincs akadálya, hogy ezt a folyamatot százszor ismételjük meg, ekkor az eredmény:



Valóban a folyamat addig folytatható, amíg van $\text{CH}_3 - \text{CO} -$ és víz.

A kémiai körfolyamat tehát folyamatosan képes az irányított hasznos kémiai munka végzésére.

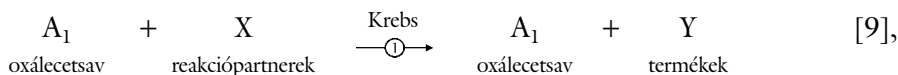
Most célszerű lenne a megállapításokat általánosítani, hiszen számtalan kémiai és biokémiai körfolyamat létezik, s ezeknek vannak jellegzetes, közös sajátosságaik. Az általánosításhoz azonban általános formalizmus is szükséges. Máskor arra szoktam biztatni olvasóimat, hogy a számukra nehéz avagy unalmas részeket könyveimben lapozzák át: most azt kell kérnem, hogy a következőknek *szenteljének igen nagy figyelmet*. Mert sokak számára talán elriasztó, hogy *látszólag* matematika következik: ám ez csak a látszat. Egyszerű elemi számtant fogok használni, abból is csak az összeadást, csak itt-ott lesz benne egy-egy szorzás is. (Aki számára furcsának tűnik, hogy ezt előrebocsátom, azoknak elárulom, hogy körülbelül ugyanannyian vetették szememre, hogy a chemotonelmélet pusztán bonyolult matematikai formalizmus, amelynek semmi köze a biológiai valósághoz, mint ahányan, hogy üres biológiai halandzsza, mert nem alkalmaz modern matematikai módszereket, például halmazelméletet.) A chemotonelmélet megértéséhez minimális formalizmusra valóban szükség van, s ennek az alapját képezi a körfolyamat általános leírása. Kérem tehát azokat is, akik a betűjelzésektől és egyenletektől undorodnak, e minimális formalizmuson azok is rájárák át magukat, a többi gyerekjáték lesz ezek alapján. Viszonzásul megpróbálom nagyon egyszerűen, primitíven levezetni az egyenleteket.

Jelöljük a körfolyamat egyes belső komponenseit (a Krebs-ciklus esetén a szerves savakat) $A_1, A_2, A_3 \dots A_k$ -val. Így az oxálecetsav lesz az A_1 , a citromsav az A_2 stb. Az egyes reakciólépésekhez szükséges reakciópartnereket $X_1, X_2, X_3 \dots X_n$ -nel, a keletkezett termékeket $Y_1, Y_2, \dots Y_n$ -nel. Ezekkel eddig sem sokat törődtünk, vonjuk tehát őket össze, mivel a körfolyamathoz úgylis mindegyikre szükség van. Legyen tehát

$$X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n = \sum_{i=1}^n X_i \text{ egyszerűen } X,^*$$

$$Y_1 + Y_2 + Y_3 + \dots + Y_n = \sum_{i=1}^n Y_i \text{ egyszerűen } Y.$$

Az X tehát a következőkben egyszerűen azt jelenti, hogy minden reakciópartner a szükséges mennyiségben jelen van a reakcióelegyben, az Y pedig, hogy minden termék a reakcióegyenleteknek megfelelő mennyiségben keletkezik. A Krebs-ciklus működését leíró [6] egyenletet ezek után úgy írhatjuk, hogy:

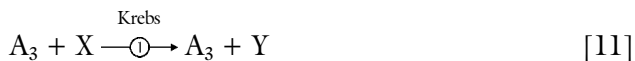


amely egyenletet úgy is értelmezhetjük, hogy ha egy oxálecetsav-molekula (A_1) az összes szükséges reakciópartner jelenlétében a Krebs-ciklus által jelzett minden átalakuláson egyszer keresztülment, akkor visszaalakul oxálecetsavvá, és közben minden jelzett reakciótermékből keletkezik egy (vagy a kémiai reakcióegyenletek által előírt mennyiségű) molekula. Ez idáig nyilvánvalóan igaz, hiszen még semmi mást nem csináltunk, mint a Krebs-ciklus egyes vegyületeit betűkkel helyettesítettük.

Csakhogy a kört éppen az jellemzi, hogy se eleje, se vége, bárhol el lehet kezdeni. Éppígy a körfolyamatot is. Oxálecetsav-molekula helyett citromsav- (A_2) molekulát helyezve a reakcióelegybe, míg az körbemegy a Krebs-ciklus által jelzett minden állapotton és ismét citromsavvá válik, ugyanazokat és ugyanannyi reakciópartnert használ fel, és ugyanolyan és ugyanannyi reakcióterméket termel, mintha oxálsav-molekula ment volna körbe a körfolyamat reakcióin. Igaz tehát az is, hogy



és ugyanezen az elven



vagy



és így tovább. A körfolyamat bármelyik komponensének egy molekulája meg végig egy teljes cikluson, ugyanazokat a reakciópartnereket használja fel, és termékeket termeli.

* A Σ (szumma) jel a sokszoros összeadás rövidített jelzése. A $\sum_{i=1}^{10} X_i$ például azt jelenti, hogy az X_1 -et, X_2 -öt, X_3 -at stb. egészen az X_{10} -ig összeadjuk.

A kémiában azonban nem egy molekulával szokás dolgozni, hanem nagyon sokkal. Így a [9], [10], [11] stb. egyenletek megállapodásszerűen mólnyi ($6 \cdot 10^{23}$ db molekulányi) mennyiségre is vonatkozhatnak, akkor is igazak maradnak. Sok molekula esetén viszont már nem biztosítható, hogy mindig csak A_1 vagy csak A_2 stb. komponens található a rendszerben, hanem azok keveréke:

$$A_1 + A_2 + \dots + A_n = \sum_{i=1}^n A_i, \text{ egyszerűsítve: } A.$$

Mivel pedig bármelyik komponens, ha egyszer körbemegy, ugyanazokat használja fel és termeli, így az egyes komponensek helyébe azok keveréke is írható:



és ez a lényeg, mert ez az egyenlet azt mondja ki, hogy a Krebs-ciklus savainak bármilyen keverékét visszük reakcióba, ha a keverék minden egyes molekulája egyszer megy végig a ciklus reakcióin, ugyanazokhoz a termékekhez jutunk, ugyanolyan mennyiségben.

És elszakadva végül is a Krebs-ciklustól, kimondhatjuk, hogy bármilyen A kémiai körfolyamat $A_1, A_2 \dots A_n$ komponenseinek bármilyen keverékére fennáll, hogy ugyanazokat a reakciókomponenseket termeli, ugyanolyan mennyiségben, ha minden egyes molekula az A körfolyamat minden reakciójában egyszer vesz részt:



Szinte hallom, ahogy biológus beállítottaságú olvasóim most felsóhajtanak: micsoda felesleges, értelmetlen dolog! Kémikus lelkületű olvasóim pedig azon háborognak, hogy micsoda primitív, s ráadásul pontatlan, hibás egyenlet! Bármennyire feleslegesnek látszik is, ez az épület alapja, s ha ezt világosan értik, a többi könnyű lesz, s rögvést biológiai érdekességek is származnak belőle. A kémikusoknak viszont azt kell mondanom: igazuk van, de a pontos egzakt sztöchiometriai leírás túl bonyolult, s ha érdekli őket, azt is megtalálhatják a könyv végén felsorolt irodalmak segítségével.

És most nézzük meg, mi mindent tud elárulni ez a primitív, egyszerű [14] egyenlet. Rögtön feltűnik, hogy az A az egyenlet bal és jobb oldalán egyformán szerepel, matematikailag akár el is hagyhatnánk! Valóban a kémikusok eddig vajmi keveset törődtek vele egyenleteikben, ha ilyen vegyületekkel találkoztak, azt az egyenletekben nem tüntették fel. Észrevették, hogy vannak olyan anyagok, amelyek elősegítik egyes kémiai átalakulások végbemenetelét anélkül, hogy mennyiségük változna a reakció folyamán, de azt nem vették észre, hogy ezek körfolyamatban működnek. Ezért elnevezték ezeket katalizátoroknak, és egyszerűen kihagyták őket egyenleteikből, vagy legfeljebb a nyíl fölé írták őket, jelezve, hogy azért ezekre is szükség van. Arra koncentráltak, hogy mi alakul át mivé.

A biológust azonban nem az érdekli, hogy mi alakul át mivé, hiszen tudja, hogy az állatok a szerves vegyületeket szén-dioxidra és vízre, az élesztő a cukrot alkohollá és

szén-dioxiddá, a növények a szén-dioxidot és vizet szerves vegyületekké és oxigénné alakítják át. A biológust elsősorban az érdekli, ami az átalakítást csinálja, ami nélkül a folyamat nem megy, ami (a növekedéstől eltekintve, amivel a következő fejezet foglalkozik) az egyenlet mindkét oldalán ott van, vagyis az A. És ez az A a legegyszerűbb esetben egy kémiai körfolyamatot jelent, a legbonyolultabban pedig egy fejlett élőlény, mondjuk az ember metabolikus kémiai reakcióhálózatát.

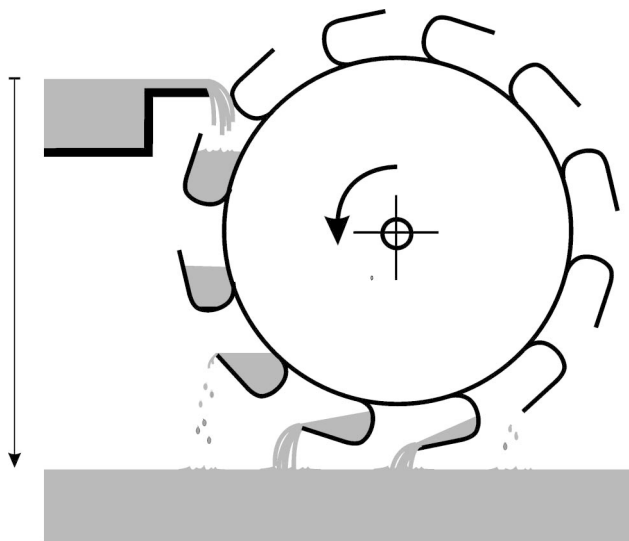
Berzelius az élesztőt nem élőlénynek, hanem egyszerű katalizátornak tekintette, amely a glükóz alkohollá alakulását katalizálja: persze ő nem ismerhette az élesztők működésének rendkívüli bonyolultságát. És tulajdonképpen mégsem tévedett túl nagyot: az alapvetően az egyszerű katalizátorban és az élesztő bonyolult anyagcseréjében egyaránt a körfolyamatok hordozzák, azok, amelyek az egyenlet mindkét oldalán meg kell, hogy jelenjenek.

Azután a [14] egyenlet rejtve magában hordozza már az inherens stabilitást is: menjenek bár végbe a kémiai folyamatok, az A nem változik.

De éppen, mivel az A nem változik, a [14] egyenletből egyben az is előtűnik, hogy a folyamat hajtóereje a nyersanyagban, a „tápanyag”-ban az $X \rightarrow Y$ átalakulásban van. A folyamat termodinamikailag akkor lehetséges, ha a nyersanyagok összességének nagyobb az energiatartalma, mint a termékek összességének:

$$E_x > E_y.$$

(Illetve a termodinamikusok kedvéért pontosan: ha a nyersanyagok összességének a szabadentalpia-tartalma nagyobb, mint a terméké, vagyis $G_x > G_y$.) A „kémiai motor” tehát csak akkor működik, ha a nyersanyag a kémiaiilag nagyobb energiaszintről az alacsonyabbra kerül.



18. ábra. A kémiai motor éppen úgy áll a kémiai energia csökkenésének az útjába, munkává alakítva az energiakülönbség egy részét, ahogy a vízkerék áll a víz helyzetienergia-csökkenésének útjába.

nyabbra kerül, éppúgy, mint a vízimotornál, azaz a vízturbinánál a víz a magasabb helyzeti energiájáról az alacsonyabbra, vagy az elektromotornál az áram a magasabb feszültségű helyről az alacsonyabbra.

A biológusokat ez a kémiai motor kell, hogy érdekelje, a kémiai körfolyamatrendszer, mert ez az élet működésének az alapja. Ez a kémiai motor az, amely úgy áll a kémiai energia csökkenésének az útjába munkára használva fel e csökkenést, ahogy a vízturbina a víz helyzetenergia-csökkenésének, az elektromotor az áram feszültségcsökkenésének, a szélmalom a levegő nyomásienergia-csökkenésének útjába, ugyancsak hasznos munkára fogva a felszabaduló energiának e motorok által „elcsent” hányadát.

Végül még egy utolsót kell leolvasnia a biológusnak a [14] egyenletből: a kémiai motor működésének előfeltétele ugyan, hogy a tápanyagok energiatartalmának (szabadentalpia-tartalmának) összege nagyobb legyen, mint a termékek energiatartalmának összege, ez azonban nem jelenti azt, hogy *egyes* termékek energiatartalma ne lehetne magasabb akár a tápanyagok mindegyikénél is, ha ezt a többi termék alacsony energiatartalma kompenzálja. E következtetés fontossága a következő fejezetben derül majd ki igazán.

NÖVEKVŐ RENDSZEREK

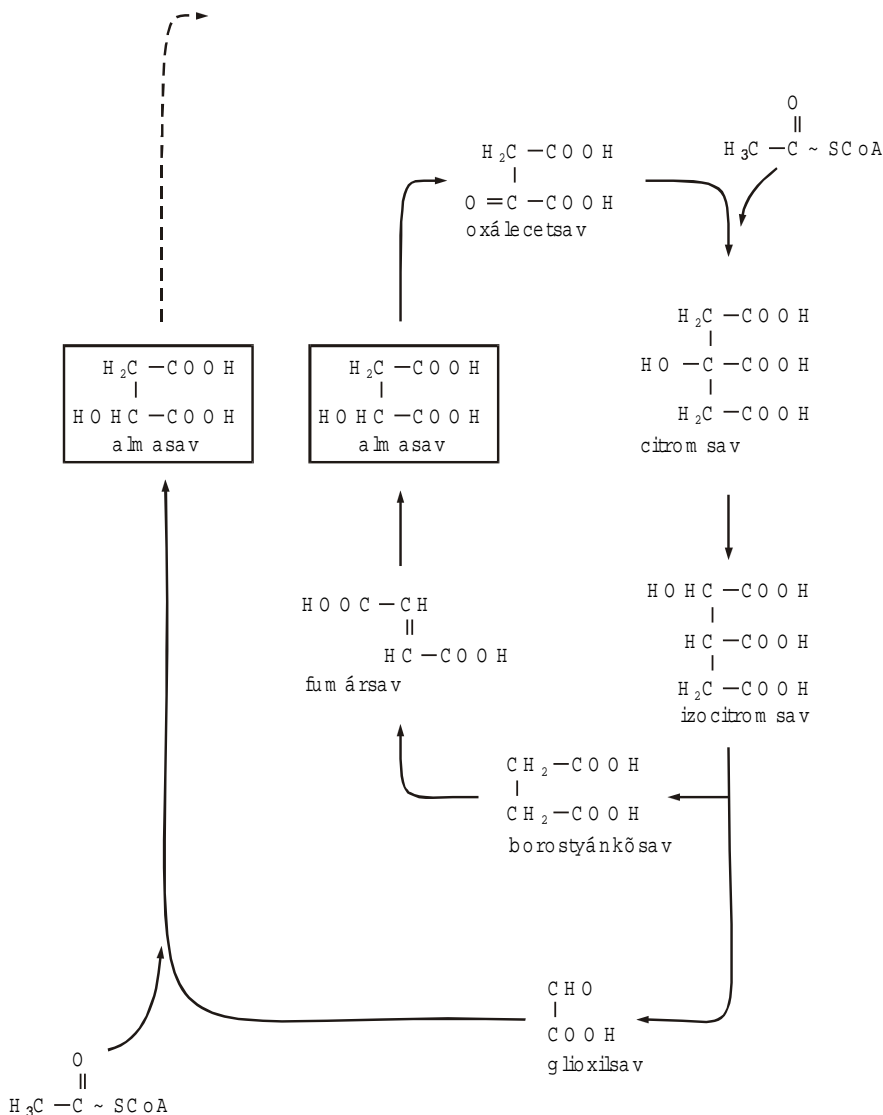
Erős a csábítás, hogy kémiai motorunk tulajdonságait összevessük a sejt egyik alrendszérének, a protoplazmának a tulajdonságaival. Nyilvánvalóan vannak közös sajátosságaik: mindkettő működő rendszer, mindkettő lágyszisztéma, mindkettő kémiai energia felhasználásával működik, mindkettő inherensen stabil, mindkettő képes a „tápanyagokat” más kémiai anyagokká alakítani, új vegyületeket folyamatosan előállítani stb. De számos különbség is van közöttük, s ezek között is a legalapvetőbb, hogy a protoplazma akkumulációs, azaz növekedésre képes rendszer, a kémiai körfolyamat viszont nem.

A kristály is növekedik a telített oldatban, ám ez nem aktív, ez passzív növekedés, egészen más természetű, mint azon dinamikus rendszerek növekedése, amelyeket akkumulációs rendszereknek nevezünk. Ez utóbbiak növekedéséhez nem szükséges telített oldat, sokszor nagyon is híg oldatokból veszik fel a növekedésükhöz szükséges anyagokat. Azután szó sincs arról, hogy anyagaikat készen kapnák, más anyagokból maguk készítik azokat, kémiai reakciók segítségével.

De hiszen ismerünk olyan anyagokat, amelyek kémiai reakciók segítségével saját maguk szintézisét tudják elősegíteni, autokatalizátoroknak nevezi őket a kémia, mert saját maguk termelődését, szintézisét katalizálják. Innen pedig már csak egy lépés a megoldás: mondtuk, hogy a katalizátorok körfolyamatban működnek, vagyis a katalizátor (szigorúan véve a homogén katalizátor) nem egyetlen anyag, egyetlen vegyület, hanem egy körfolyamatrendszer, amelynek bármelyik komponense azonos módon funkcionál. Az autokatalízis mögött tehát nem egyetlen anyag, egy autokatalizátor áll, hanem egy autokatalitikus kémiai körfolyamat, egy kémiai reakciórendszer.

A mechanizmus alapelve egyszerű. A kémiai körfolyamatról mondtuk, hogy munkát végez, irányított kémiai munkát, azaz vegyületeket állít elő, különböző kémiai anyagokat szintetizál. Hogy milyen anyagokat, arra vonatkozólag mindössze egyetlen általános kikötést tettünk: a termékek össz-energia- (szabadentalpia-) tartalma kisebb kell, hogy legyen, mint a nyersanyagoké. Ezen a kikötésen belül teljes a szabadság, s hogy egy kémiai körfolyamat konkrétan milyen vegyületek szintézisére képes, azt már az adott konkrét körfolyamat tulajdonságai szabják meg. A Krebs-ciklus például hidrogéneket (pontosabban hidrogénezett hidrogénátvivő vegyületeket) szintetizált. Más körfolyamat, más vegyületek szintézisét végzi el. S miért ne lehetne olyan körfolyamat, amelyik saját belső komponenseinek valamelyikét képes szintetizálni? Valóban, ilyen körfolyamatokat az elmúlt két évtized alatt megismertek a biokémikusok, csak éppen autokatalitikus jel-

legüket nem ismerték fel. A szerző mutatott rá 1970-ben hogy az almasavciklusnak, továbbá a Calvin-ciklusnak nevezett körfolyamatrendszerek, valamint az adenin ATP-vé való foszforilálása ilyen autokatalitikus körfolyamatok. Mivel az autokatalízis fogalmát a kémiában, de különösen a biokémiában nem mindig egyértelműen használják, a továbbiakban ezeket az autokatalitikus körfolyamatokat önreprodukáló körfolyamatoknak fogjuk nevezni, annál is inkább, mert ez jobban fedi a kémiai rendszerek specifikus sajátosságait.



19. ábra. A malátciklus önreprodukáló, autokatalitikus körfolyamat. A kiindulási almasav mennyisége egyetlen ciklus alatt megkettőződik, ehhez a rendszer acetil-koenzim-A-t használ fel.

Ha ismét a Krebs-ciklusból indulnánk ki: ez akkor lenne önreprodukáló körfolyamat, ha mondjuk egy oxálecetsav-molekula elindulna a reakció-kényszerpályákon, s mire a végéhez érne, két oxálecetsav-molekula lenne jelen:



De ilyen is van, ez az úgynevezett almasavciklus, vagy más néven malátciklus. Még a körfolyamat komponensei is majdnem azonosak a Krebs-cikluséval, csak a „kényszerpályák” és a reakciópartnerek mások – és természetesen mások a végtermékek. A malátciklusban a beépült acetilcsoportok nem égnék el szén-dioxiddá, hanem két acetilcsoportból egy négyszénatomos sav, az almasav, majd ebből oxálecetsav szintetizálódik:



a ciklus egy fordulata alatt tehát a kiindulási oxálecetsav megduplázódik. Folyamatos működés esetén a következő ciklusba már kétszeres oxálecetsav-mennyiség kerül:



s így a második ciklus végére az eredeti oxálecetsav mennyisége négyszereződik. Könnyen belátható, hogy a harmadik ciklus végén nyolcszoros, a negyedik végén tizenhatszoros, majd harminckétszeres, hatvannégyszeres stb. mennyiség lesz jelen az oxálecetsavból, vagyis a kiindulási anyag mennyisége a ciklus „körülfordulásainak” függvényében a kettő hatványai szerint növekedik!

Természetesen, mivel a körfolyamat bármelyik tagja azonos módon funkcionál, a [16] egyenletnek megfelelő egyenletet a ciklus bármelyik tagjára felírhatunk, így például a citromsavra (A_2):



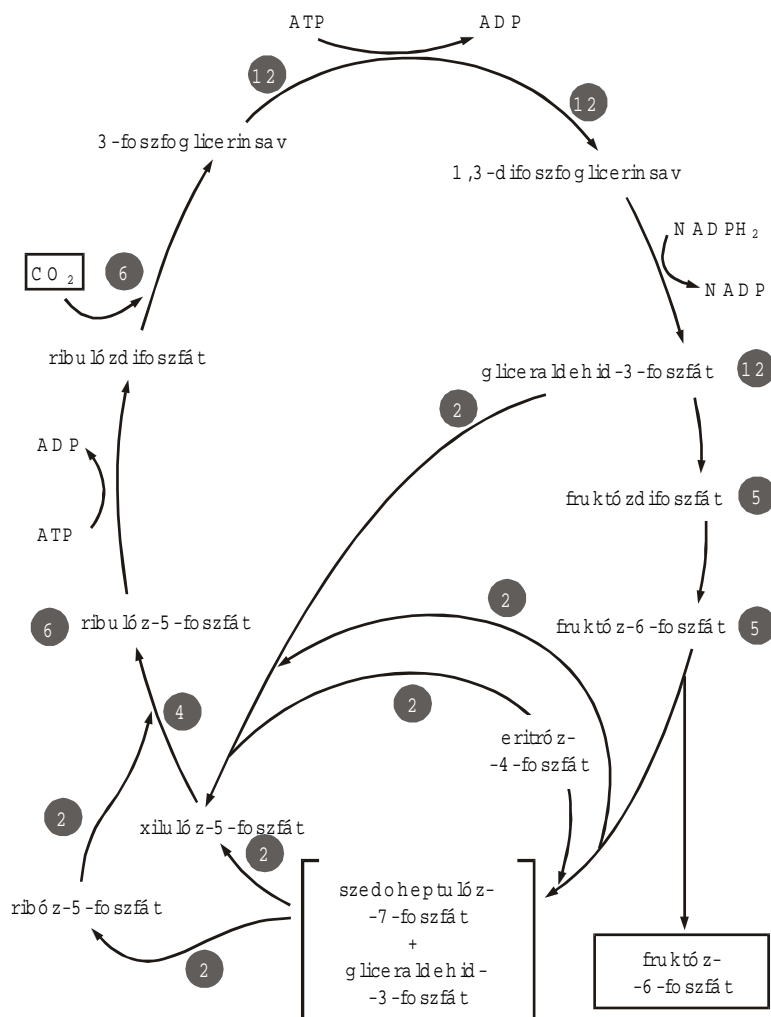
vagy az almasavra (A_7)



Ebből már következik, hogy – miként az egyszerű kémiai körfolyamatok esetében – az önreprodukáló körfolyamat működése is független attól, hogy melyik komponense milyen arányban van jelen, és így felírható, hogy



vagyis nem egyetlen anyag szintéziséről, hanem a teljes önreprodukáló körfolyamat-rendszer szintéziséről van szó!



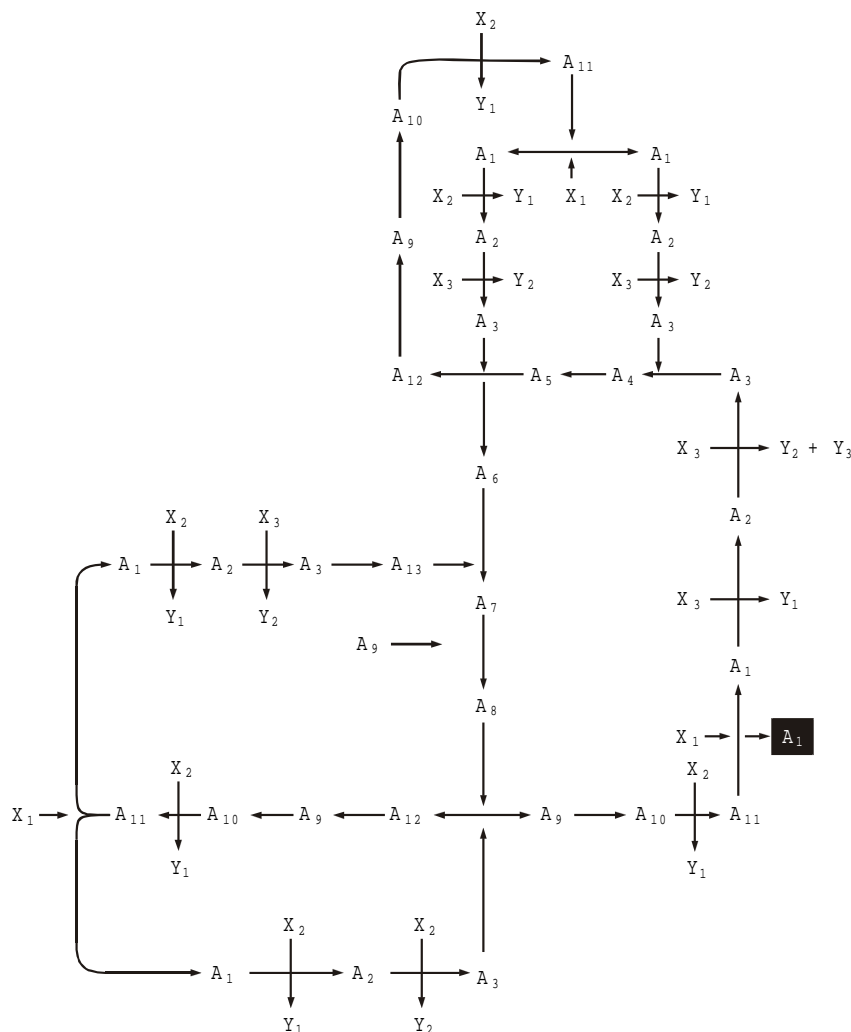
20. ábra. A Calvin-ciklus egyszerűsített ábrázolásmódja. A ciklus belső anyagai egymásba átalakuló cukorfoszfátok, „tápanyag” szén-dioxid, átvívó vegyülethez kötött hidrogén, és ugyancsak átvívó vegyülethez kötött foszfát. A körfolyamat ez utóbbi két vegyületből nyeri azt az energiát, amelynek segítségével a szén-dioxidot cukorfoszfátokká, végső soron saját anyagaivá alakítja át.

Nem minden önreprodukáló körfolyamat ilyen egyszerű, vannak köztük nagyon is bonyolult rendszerek. Példaképpen vizsgáljuk meg az úgynevezett Calvin-ciklus működését, amely a fotoszintézis során a szén-dioxid beépítését végzi a növényekbe, illetve a szén-dioxidból szerves anyagokat, szénhidrátokat szintetizál. A folyamatot Melvin Calvin amerikai biokémikus derítette fel, Nobel-díjat kapott érte.

A Krebs-ciklusban szerves vegyületek „égtek el” szén-dioxiddá, s közben energia szabadult fel. Ha fordítva, szén-dioxidból akarunk szerves vegyületet szintetizálni, ener-

gia szükséges hozzá, kémiai energia. A növény energiaszükségletét fényenergiából szerzi be, először ezt kell kémiai energiává alakítani: ezt szintén vízbontással végzi, az oxigén a levegőbe távozik, a hidrogén pedig a hidrogénátvivő vegyületekhez (NAD) kötődik (NADH_2). Emellett még másik energiátárolásra alkalmas vegyület (ATP) is keletkezik. A fotoszintézisnek ezt a részét fényreakciónak nevezik, mert természetesen csak fény jelenlétében megy végbe.

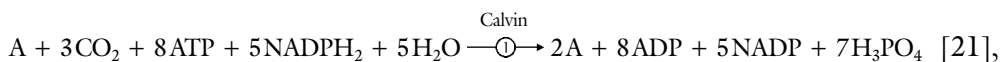
A fotoszintézis folyamatainak második szakaszában az itt keletkezett energiadús vegyületek (NADH_2 , ATP) felhasználása révén a Calvin-ciklus a szén-dioxidból szénhidrátokat,



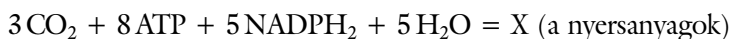
21. ábra. A Calvin-ciklus olyan hálózattal (gráffal) is ábrázolható, amelyben, ha minden elemi lépés egyszer végbemegy, a rendszer reprodukálódik. Az ábrán az A_1 – A_{13} a ciklus belső anyagainak számító cukorfoszfátokat jelenti, X_1 – X_3 a „tápanyagokat”, Y_1 – Y_3 a reakciótermékeket.

pontosabban cukorfoszfátokat szintetizál, nem is kell hozzá más nyersanyag, mint széndioxid és víz. Pedig maga a rendszer igen bonyolult, huszonnyolc kémiai reakcióból szerveződött reakcióhálózat segítségével megy végbe. A könnyebb érthetőség kedvéért először nézzük egy egyszerűsített ábrázolásmódját. Az ábráról látható, hogy valóban körfolyamatról van szó, de nem egyszerű, hanem elágazó körfolyamatról. A nyílak mellé írt számok azt mutatják, hogy az egyes reakciólépések hány-szoros mennyiségben kell, hogy végbemennek ahhoz, hogy a folyamat működni tudjon. Ennek az ábrázolásmódnak a mi céljaink szempontjából éppen ez a hibája, a valós körfolyamatban minden lépésnek egyforma anyagmennyiséggel kell végbemennie, hiszen a körfolyamat bármilyen lépése csak azokat az anyagokat használhatja fel, amelyek a körfolyamat előző lépésében keletkeztek.

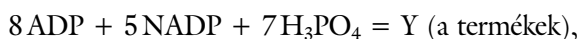
A Calvin-ciklus is kifejezhető olyan hálózatba, amelyben minden reakciólépésnek egy-egyformán egyforma mennyiségben kell végbemennie ahhoz, hogy a kiindulási anyagmennyiség megduplázódjon, hogy működését egyetlen, [20] típusú egyenlettel összegezni lehessen. A Calvin-ciklusnak így módon megszerkesztett hálózata látható a 21. ábrán. A hálózatban az A_1 – A_{13} betűk az egyes cukorfoszfátokat jelentik, az X_1 – X_3 betűk a nyersanyagokat, az Y_1 – Y_3 betűk a termékeket. A hálózat úgy van megszerkesztve, hogy ha minden reakciólépésben egymólnyi anyag vesz részt, akkor az egy mól kiindulási 3-foszfoglicerinsavból (A_1) két mól lesz, vagyis ez a rendszer is egy „körfordulás” alatt megduplázza önmagát. A teljes folyamatot, kiírva a nyersanyagokat és termékeket az alábbi egyenlettel összegezzük:



vagy mivel a jelen esetben:



és



így felírható, hogy



ami teljesen azonos a [20]-sal.

Általánosságban az önreprodukáló körfolyamatok működését a [20] és [22] analógiájára a



egyenlet írja le, ami nem jelent mást, mint hogy az összes nyersanyag (X) jelenlétében az önreprodukáló körfolyamatrendszer (A) a körfolyamat egy ciklusában melléktermékek (Y) keletkezése közben megduplázódik, azaz reprodukálja önmagát.

A szén tehát szerves szénvegyületek önreprodukáló körfolyamata révén épül be az élővilág anyagaiba a foszfor szerves foszfátvegyületek autokatalitikus körfolyamata révén, és úgy tűnik, hogy a nitrogén is szerves nitrogénvegyületek önreprodukáló körfolyamat-rendszere segítségével válik az élő szervezetek saját anyagává. *Az önreprodukáló (autokatalitikus) körfolyamatrendszerek képezik tehát a valóságos élővilág növekedésének az alapját.*

Ezek után valóban itt az ideje, hogy a protoplazma által végzett funkciókat összehasonlítsuk azokkal a funkciókkal, amelyekkel az önreprodukáló reakcióhálózatok rendelkeznek. Azt mondtuk, hogy a sejt plazma a kémiai motor, amely a tápanyagok energiáját hasznos munkává alakítja át. Az elmondottak szerint ezt teszi minden kémiai körfolyamat, köztük az önreprodukáló körfolyamatok is. Azt mondtuk, hogy benne a folyamatok szabályozottan mennek végbe. Így mennek végbe minden kémiai körfolyamatban, hiszen a körfolyamat definíciószerűen visszacsatolt folyamat, rendelkezik a szabályozás alapvető követelményével. (Erre a kérdésre később külön fejezetben visszatérünk.)

Azt is kifejtettük, hogy a protoplazma a sejt homeosztatisztikus alrendszere, ez hordozza az inherens stabilitást, és felelős az érzékenyséért. Az egyszerű kémiai körfolyamatról már bebizonyítottuk, hogy belső lényegéből fakadóan, azaz körfolyamat mivoltánál fogva stabil, hiszen mindaddig, amíg létezik, tehát amíg körfolyamat, benne csak olyan változások mehetnek végbe, amelyek újra és újra ugyanazokat az állapotokat hozzák léte. De ezt az inherens stabilitást nem azonosítottuk a citoplazma stabilitásával, mondván, hogy a citoplazma növekedés közben is stabil, az egyszerű kémiai körfolyamatok pedig nem növekvő rendszerek.

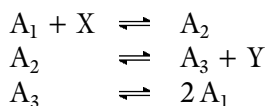
Az önreprodukációs folyamat nem zavarja meg a stabilitási tulajdonságot. Könnyen beláthatjuk ezt az almasavciklus példáján. Vegyünk kiindulásként egyetlen almasav-molekulát, s indítsuk el a folyamatot. Először átalakul oxálcetsavvá, majd citromsavvá, majd izocitromsavvá stb., végül visszaalakul almasavvá. Hogy közben egy másik almasav-molekula is keletkezett, ez nem befolyásolja őt abban, hogy ismét végighaladjon a ciklus „kényszerpályáin”, ha van elegendő reakciópartner, és elég híg az oldat. S hogy ez mennyire így van, mindjárt bemutatjuk, milyen egyszerű lehetősége van itt a növekedés szabályozásának: ha a keletkezett glioxilsavat nem acetilkoenzim-A-val reagáltatjuk, hanem valami mással, az önreprodukáló jelleg megszűnik anélkül, hogy a „kémiai motor” járása megszűnnék, vagyis a növekedés szabályozása e rendszerben nem hat vissza a kémiai motor működésére!

Ugyanakkor a „kémiai motor” érzékeli a külső változásokat: a környezet minden termodinamikai jellegű paraméterének (hőmérséklet, nyomás, koncentrációk, pH stb.) megváltozása befolyásolja az egyes kémiai reakciók sebességét, és így az egész rendszer működése a hatás függvényében gyorsul vagy lassul, intenzívebben vagy kevésbé intenzíven végzi a „kémiai munkát” anélkül, hogy közben a rendszer mint rendszer megváltozna. Úgy tűnik tehát, hogy az önreprodukáló körfolyamatok a homeosztatisztikus feltételnek is elegendőek.

Végül azt mondtuk a citoplazmáról, hogy ez szolgáltatja a nyersanyagokat saját maga és másik két alrendszer reprodukciójához. Hogy saját reprodukciójához a szükséges anyagokat előállítják az önreprodukáló körfolyamatok is, ez már természetes. Azt pedig,

hogyan e feladatot a többi alrendszer számára is elvégezhetik, kiderül a következő fejezetekből.

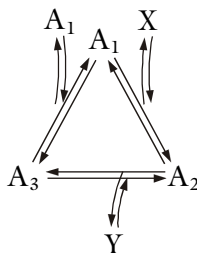
Ha pedig ilyen sok közös vonás van a citoplazma és az önreprodukáló kémiai körfolyamatok funkciója, működési sajátosságai között, akkor az élet alapegységeként konstruálható absztrakt minimálrendszerünk egyik alrendszereként válasszuk az önreprodukáló körfolyamatokat. Minthogy pedig önreprodukáló körfolyamat sokféle lehet, ezek közül is az elvileg legegyszerűbbet kell választanunk, amelyik a legtisztábban hordozza a számunkra fontos tulajdonságokat, s ez a három reakciólépésből álló körfolyamat, ahol az első lépés a „tápanyaggal” történő reakció, a második a melléktermék keletkezése, a harmadik pedig az önreprodukáló lépés:



egyszerűsítve



vagy grafikusan



Ez a protoplazmának megfelelő lágy minimálrendszer absztrakt elemi modellje, az elméleti biológia alapegységének egyik alrendszere.

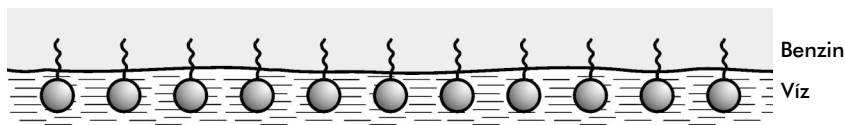
OSZTÓDÁSSAL SZAPORODÓ KÉMIAI RENDSZEREK

Ha gyors eredményt akar elérni, egynyári növényt vet a gazda, s néhány hónap múlva megvan a termés. A következő évben viszont előről kell kezdenie mindent. ha fát ültet, évekig csak munka van termés nélkül. De amikor termőre fordul a fa, évtizedeken keresztül alig-munka árán jön a termés.

Valahogy így voltunk mi is: hét fejezeten keresztül csak befektettük a munkát, ideje hogy jöjjön az eredmény. Meg is jön, az első még ebben a fejezetben, s azután már alig lesz más dolgunk, mint fejezetenként újabb és újabb termést takarítani be, minimális ráfordítással. Ez a minimális ráfordítás persze minden fejezetben szükséges. Ebben a fejezetben is keresnünk kell egy alrendszert, hogy legyen mit összekapcsolnunk az előző fejezetben megtalált alrendszerrel, s kezdhessük szüretelni munkánk gyümölcsét. A könnyebbség kedvéért egy olyan rendszert keressünk, amely a sejthártya funkcióját tudja betölteni.

A könnyebbséget az jelenti, hogy nem is nagyon kell keresni, a természet készen kínálja nekünk. A sejteket elektronmikroszkópos vastagságú hártya veszi körül, és ilyen hárttyák találhatók a sejtalkotó részek körül, sőt magában a plazmában, a mitokondriumokon és kloroplasztokon belül is. A problémát az jelentette, hogy e hárttyák szerkezetét nem ismertük, nem volt olyan modell, amelyik segítségével e membránok tulajdonságait kielégítően lehetett volna értelmezni. 1971-ben azután Singer és Nicholson felállították az úgynevezett kétdimenziós folyadékmembrán-modelljüket, s így nekünk már nem marad más dolgunk, mint ezt a modellt átvenni, általánosítani és egyenletet írni fel rá.

Vannak olyan vegyületek, amelyek vízben jól oldódnak, de alkoholban, benzinben, éterben nem, például a sók, cukrok, és vannak olyanok, amelyek ez utóbbiakban, az úgynevezett zsíroló szerekben oldódnak kitűnően, de vízben oldhatatlanok. Ilyen vegyü-

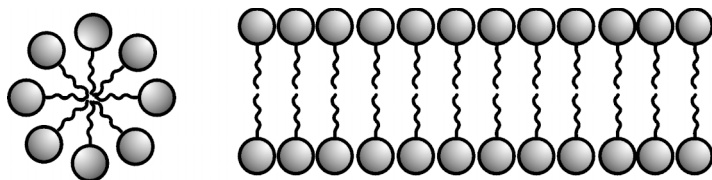


22. ábra. Az olyan hosszúságú molekulák, amelyek egyik végükön vízkedvelő, másikon vízutasító csoportot tartalmaznak, a benzin-víz határfelületen úgy helyezkednek el, hogy a vízkedvelő részük a vízes fázisban, vízutasító részük pedig a benzinben van.

letek például a zsírok. Az oldhatóság a molekulák tulajdonságaira vezethető vissza: ha a molekula vízkedvelő csoportokat tartalmaz, vízdoldhatóvá válik, ha víztaszító csoportokat, akkor szerves oldószerekben, zsíroldó szerekben oldódik szívesen.

Vajon mi történik olyankor, amikor egy hosszabb, pálcikaszerű molekula egyik végén vízkedvelő, a másikon víztaszító csoport van? Vízben vagy benzinben fog-e oldódni? Az ilyen molekulák a víz és benzin határfelületén helyezkednek el úgy, hogy víztaszító részük a benzinbe, vízkedvelő részük viszont a vizes fázisba „lóg” bele, így módon a határfelületen egymás mellé rendeződnek, molekuláris vastagságú hártát alkotva. Innen a molekulát csak energiabefektetéssel lehet eltávolítani, akár a vizes, akár a szerves oldószeres fázisba akarjuk kényszeríteni, ezt csak energiabefektetés árán tehetjük. Fordítva viszont, akár a vizes, akár a szerves fázisból a molekulák spontán, energiefelszabadulás mellett rendeződnek el a két fázis határán, épülnek bele a két fázis határán kialakuló monomolekuláris rétegbe.

Ha az ilyen kettős természetű molekulákat vízbe erőltetjük bele, a molekulák víztaszító részekkel egymás felé fordulva csoportosulnak, így teremtve meg víztaszító részek számára a vízmentes közeget. Ez történhet csomók vagy kettős molekularétegű hárták formájában. Ilyen körülmények között a molekulák vízkedvelő része a csomók vagy hárták felszínén a vízzel érintkezve helyezkednek el, víztaszító részek viszont befelé fordulva ugyanolyan körülmények között vannak, mintha szerves oldószerben lennének.

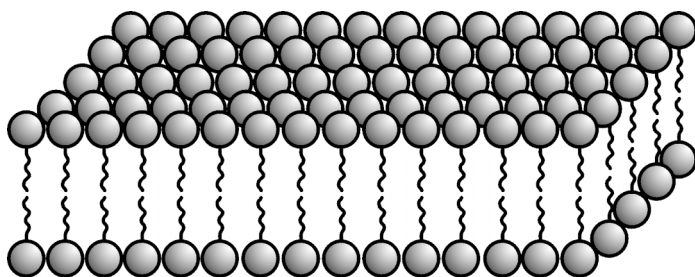


23. ábra. Ha ezeket molekulákat vízbe erőltetjük, úgy csoportosulnak, hogy a vízzel csak vízkedvelő részeik érintkezzenek. Ez az elrendeződés történhet molekuláris csomócskák vagy két molekularétegből álló hárták (membránok) formájában.

Ezek a hárták érdekes tulajdonságúak. Egy-egy molekulát a hártából kiemelni csak energiabefektetés árán lehet, e tekintetben tehát a hárt a szilárd testekhez hasonló. A hárt a síkjában viszont semmi sem köti a molekulákat, e sík bármely irányában könnyen elmozdulhatnak, helyet cserélhetnek, vagyis a sík irányában a membrán folyadékként viselkedik. Ezért is nevezte el Singer és Nicholson e membránokat kétdimenziós folyadékoknak.

Az élő rendszerek mindig kettős molekularéteg alapú hártákkal vannak körülvéve, még akkor is, ha ezenkívül még sejtfal, esetleg kova- vagy kitingpáncél is burkolja őket. Kettősmolekula-membránok a sejt belsejében található membránok is. A természetes kétdimenziós folyadékmembránoknak foszfolipidek az alapanyagaik de mesterségesen is létre lehet őket hozni számos olyan vegyület segítségével, amelyek molekuláinak egyik végén vízkedvelő, másikon víztaszító réteg van.

Az ábrán láthatjuk, hogy a membrán szélein levő víztaszító csoportok még érintkeznek vízzel, a hártya széle instabilis rendszer. Ezért a hártyák szélei szívesen záródnak össze, zárt gömbfelületet képezve. Ha vizes oldatban indítunk hártyaképződést, olyan mikroszkopikus gömböcskék tömegét kapjuk eredményül, amelyeket kettős molekularétegű membrán határol.



24. ábra. A kettős molekularéteg membránból molekulát kiemelni csak energiabefektetés árán lehet, ebben az irányban a membrán szilárd testként viselkedik. A membrán síkján belül viszont szabadon mozoghatnak a molekulák: a sík két irányában a membrán folyadékként viselkedik. Ezért nevezte el Singer és Nicholson az ilyen membránokat kétdimenziós folyadékoknak.

Ezek a membránok szintén növekedésre képes rendszerek. Ez a növekedés azonban inkább a kristályok növekedéséhez hasonlítható, hiszen mint mondtuk, a már meglevő hártyába az oldatból spontán beépülnek a hártyaképző molekulák, kémiai folyamat nélkül, pusztán fizikai hatásokra. Ez egyébként összhangban van azzal a megállapításunkkal is, hogy a folyadék felé a membrán szilárd testként viselkedik. A membránoknak ez a növekedése történhet akár csupán a membrán egyik oldalán is, mert a membrán egyik rétegéből a másikba át tudnak ugrani a molekulák.

Feladatunk most az, hogy mennyiségileg, egyenleg segítségével írjuk le ezt a membránnövekedési folyamatot. Ezt roppant egyszerűen megtehetjük: jelöljük a membránképző molekulákat T -vel és n darab T molekulából felépülő membránt $[T_n]$ -nel. Ha egy T molekula beépül a membránba, akkor:

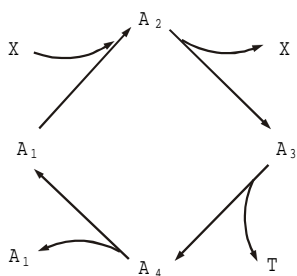


lesz. És ha n darab T molekula épül be a $[T_n]$ membránba, akkor:



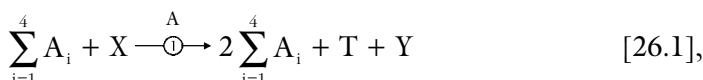
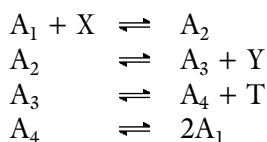
lesz, mivel azonban a membrán minden egyes újabb molekula beépülésével tágul, ez annyit jelent, hogy miközben a membránt alkotó molekulák száma megkétszereződött, a membránfelület is duplájára nőtt: A $[T_{2n}]$ tehát kétszer akkora felületet is jelent, mint a $[T_n]$.

Elérkeztünk a termés betakarításához: *konstruáljuk meg a térben osztódó kémiai rendszert*. Kapcsoljuk össze az autokatalitikus körfolyamat működését a membránszintézissel. A kapcsolatteremtés legegyszerűbb módja egy „kereskedelmi” kapcsolat létesítése, vagyis az autokatalitikus körfolyamat termelje a membránképző molekulákat: így a memb-



25. ábra. A térben osztódó kémiai rendszer önreproduktív minimál körfolyamata. A rendszer saját magán (A_1) és a salakanyag (Y) kívül a membránképző molekulát (T) is termeli.

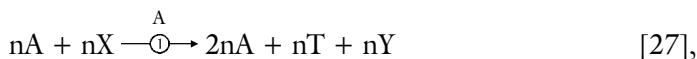
rán csak akkor növekedhet, ha az autokatalitikus körfolyamat működik. Ehhez azonban autokatalitikus minimálrendszerünknek négy reakciólépésből kell állnia: a korábban ismertetett lépések mellett egy olyan reakciólépést is kell tartalmaznia, amelyik a membrán alapanyagát, a T -t termeli. A körfolyamat elemi lépései tehát:



vagy általánosan:



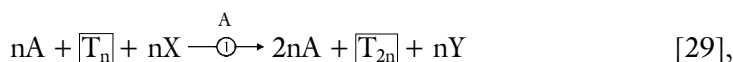
Vegyünk egy n darab T molekulából álló membrángömböt. Helyezzük bele önreproduktív körfolyamataink anyagait, és tételizzük fel, hogy ezek nem tudnak a membránon keresztül a külső térbe jutni, de az X tápanyagok és az Y salakanyagok számára a membrán átjárható. A körfolyamat belső komponenseiből összesen n darab legyen a gömb belsejében. A kívülről bejövő X tápanyagok hatására az önreproduktív körfolyamat működésbe kezd, egy ciklus alatt megduplázza mennyiségét, és termel n darab T molekulát is:



de az n darab T molekula beépül a $[T_n]$ membránba, ezáltal megduplázva a membrán felületét is:



Összeadva a [27] és [28] egyenletet:



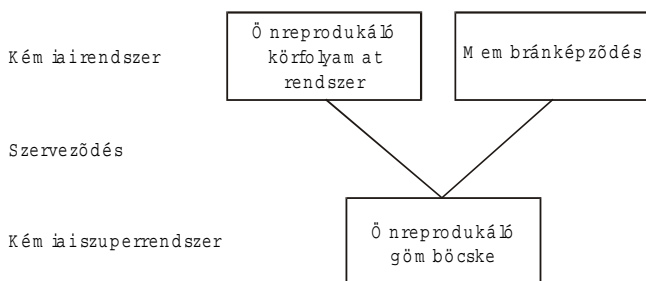
vagyis a két rendszer valóban összekapcsoltan működik, egyetlen szuperrendszerré válik, s míg az egyik alrendszere megduplázódik, megduplázódik a másik alrendszere is.

A formális egyenleteken túlmenően most nézzük meg szemléletesen, hogy mi is történik. Adva van egy gömböcske, olyasmi, mint a szappanbuborék, csak mikroszkopikus méretű. De nem levegő tölti ki, hanem vizes oldat, s maga is vizes „tápoldat”-ban úszik. A gömböcskén belül a körfolyamat anyagai vannak oldva, ezek nem tudnak átmenni a gömböt határoló membránon, a „tápoldat” anyagai viszont behatolhatnak a gömböcske belső terébe. Így a bejutó tápanyagok révén belül megindul a körfolyamat működése, elhasználja a bejutott tápanyagot. Ezek helyére azonban újabb tápanyag érkezik, s így folyamatosan tápanyag áramlik a gömbbe, amelyet a bent működő körfolyamatrendszer folyamatosan felhasznál.

De mire használja fel? Részben a körfolyamat belső anyagai képződnek belőle, s mivel ezek nem tudnak kijutni, így bent mennyiségük egyre növekszik, részben pedig a membrán alapanyagai szintetizálódnak, de ezek sem tudnak kijutni, hanem spontán beépülnek a membránba, vagyis a membrán felülete is növekedik. Növekszik tehát a belső tartalom és növekszik az őt bezáró membrán felülete is. Még hozzá egyformán növekszik, mire az egyik megduplázódik, megduplázódik a másik is: azaz, mire a gömb térfogata kétszeresére nő, kétszeresére nő a felülete is!

De hiszen itt ellentmondás van! A gömb kétszeres térfogatához nem kétszeres felület tartozik, hanem jóval kisebb, hiszen a gömb térfogata a sugár harmadik hatványával, a felülete viszont csak a második hatványával arányos! A kémiai „kényszerpályák”, a reakciók pedig kérelhetetlenül annyi belső anyagot termelnek, mint membránképző molekulát. Három megoldás is kínálkozik: az egyik, hogy a hiányzó térfogat pótlására víz áramlik a külső térből a gömb belsejébe. Ennek nincs akadálya. Csakhogy ezzel a belső tartalom hígul, ozmotikus nyomáskülönbség keletkezik a külső és belső tér között, amely viszont vizet igyekszik eltávolítani a belső térből. Ez tehát nem segít.

A másik megoldás, hogy a gömböcske torzul, egyre jobban eltér a gömb alaktól, egyre nagyobb relatív felületet képezve. Ennek ellene dolgozik a felületi feszültség és a töltésviszonyok. Marad tehát a harmadik megoldás: mire a beltartalom és a felület is megduplázódik a gömböcske két egyforma gömböcskévé válik széjjel. Megteheti, hiszen a határoló membrán rugalmas kétdimenziós folyadék. És ebben az esetben valóban kétszer akkora térfogathoz kétszer akkora felület is tartozik.



26. ábra. Két eltérő, de megfelelő tulajdonságú kémiai rendszer, az önreprodukáló körfolyamatrendszer és a membránképződés működésének összekapcsolódásából olyan kémiai szuperrendszer, az önreprodukáló gömböcske képződik, amelynek alrendszereihez képest minőségileg új tulajdonságai többek között az anyagcsere és a térbeli osztódással történő szaporodás képessége.

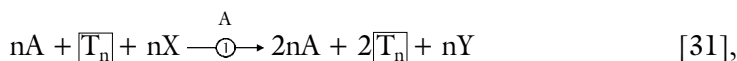
Íme, hová jutottunk! Két pusztán kémiai jellegű rendszert egyesítettünk egy „szuper-rendszerre” (vagy a másik irányból nézve két alrendszer egy rendszerre) és megdöbbentően új, biológiai jellegű tulajdonságokkal rendelkező rendszert kaptunk. *Mert mit is tud most már ez a rendszer? Elkülöníti magát a külvilágtól, belső összetétele eltér a külvilág összetételétől. Folyamatosan fogyasztja a külvilág számára hasznosítható anyagait, ezeket szabályozott módon, kémiai utakon saját testanyagaivá alakítja át, ezáltal növekedik, a növekedés eredményeképpen egymással és az eredetivel egyforma nagyságú gömbökre osztódik, majd ezt mindegyik tovább folytatva ismét és ismét osztódik. Vagyis az egy gömböcskéből egy idő múlva kettő lesz, kétszer annyi idő múlva négy, háromszor annyi idő után nyolc, majd tizenhat, harminckettő, hatvannégy, százhuszonnyolc és így tovább, pontosan úgy, mint az osztódással szaporodó egysejtű élőlények!*

Ha valaki egy ilyen gömböcskét meglátna mikroszkóp alatt, s azt észlelné, hogy az a tápanyagot fogyasztva osztódással szaporodik, vajon elhinné-e, hogy ez nem élő rendszer? Be lehetne-e bizonyítani neki, hogy ez nem élő, amikor bizonyíthatóan táplálkozik, anyagcserét folytat, ingerlékeny, növekedik, szaporodik, s minthogy mindig ugyanolyan utódokat hoz létre, úgy tűnik, hogy az öröklődés képességével is rendelkezik? Pedig ez mégsem élő rendszer. Nem élő, mert hiányzik egy alapvető tulajdonsága, amely a klasszikus életkritériumok között ugyan nem szerepel, de amelyet a molekuláris biológia tapasztalatai alapján kritériumként, abszolút életkritériumként választottunk: hiányzik az információtároló alrendszer. Egyetlen dolgot kell tehát tennünk: megkonstruálni az információs alrendszert, s annak működését összekapcsolva a most nyert rendszerünkkel, valóban élő rendszerhez jutunk.

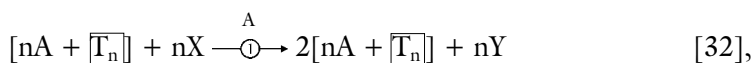
Mielőtt azonban ezt megtennénk, eddigi eredményeinket valahogyan formális módon, egyenletek segítségével is rögzítenünk kell. Ez persze egyáltalán nem nehéz dolog, hiszen mindössze arról van szó, hogy jelölnünk kell azt a folyamatot, ahogy a duplájára növekedett membránfelület, a $[T_{2n}]$ szétválék két darab $[T_n]$ -né:



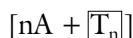
és így a [29] egyenletet a tápanyagokra és salakanyagokra is általánosítva a következőképpen kell írni:



ami még mindig nem egészen helyes, hiszen a $2nA$ is szétvált térben két részre, mindegyik T_n -hez tartozik nA , így ezek egyetlen rendszert alkotnak. Ezt szögletes zárójellel jelölve a [31] így módosul:



ami most már teljesen kifejezi, hogy a



maga a szuperrendszer, amely két részből tevődik össze, amely működése közben az nX tápanyagot felhasználva önmagát nemcsak mennyiségileg, de strukturálisan is reprodukálja, azaz szaporodik.

A CHEMOTON

Azt mondtunk, hogy az önreprodukáló gömböcskékből már csak az információs alrendszer hiányzik ahhoz, hogy élő minimálrendszerre váljanak. Ez egyébként összevág azzal is, amit a sejtről mondtunk: az önreprodukáló gömböcske két alrendszere megfelel a sejt három alrendszere közül kettőnek, mármint a protoplazmának és a sejtmembránnak. Ha a harmadik alrendszert, az információs rendszert is sikerül megkonstruálnunk, s működésében összekapcsolnunk a másik két alrendszerrel, minden reményünk megvan rá, hogy az élet minimálrendszeréhez jussunk.

Ismét azzal kell kezdenünk, hogy általánosan használt, jól ismert, de nagyon sokféleképpen értelmezett fogalomról kezdjük el magyarázni, hogy mit is fogunk érteni rajta. Ez a szó a jelen esetben az információ, ami alatt korántsem érthetünk mindent, ami az információ fogalomba befér. Különösen nem, ha információhordozó rendszerekről beszélünk.

Információt ugyanis minden létező tárgy hordoz. Az út szélén heverő kő hordozza az anyagára, kémiai és ásványos összetételére, keletkezésének körülményeire stb. vonatkozó információkat, s ezt jószerivel minden tárgyról elmondhatjuk. Az emberi kultúra azonban kitalált olyan rendszereket, amelyek azonkívül, hogy hordozzák a saját magukra vonatkozó információkat, olyan információkat is hordozhatnak, amelyekhez tulajdonképpen semmi közük. Ez a könyv például, amelyet ön, kedves olvasóm most a kezében tart, egyrészt hordozza a saját magára vonatkozó információkat, hogy papírból van, lapokból áll stb., másrészt hordoz (legalábbis a szerző reméli, hogy valóban hordoz) információkat például az élő rendszerek alapelveire vonatkozóan, amihez a könyvnek mint tárgynak semmi köze.

Nemcsak a könyvek hordoznak ilyen többletinformációkat, nemcsak az írott szövegek, de a hanglemezek, mágnesszalagok, lyukkártyák, elektronikus adattárolók stb. ugyancsak képesek olyan információk tárolására, amelyekhez saját maguknak mint tárgyaknak valójában semmi közük sincsen. A továbbiakban, amikor információtárolásról beszélünk, ezt a „többletinformációt” fogjuk rajta érteni, és információtároló rendszernek is csak azt nevezzük majd, ami ilyen többletinformáció tárolására képes.

Az ilyen értelmű információtároló rendszereknek közös sajátossága, hogy az információ tárolása jelekkel történik. Jel lehet bármi: pont, vonás, betű, rovátka, mágnesezettség, lyuk, csomó stb., szinte bármi, amiből egyrészt elegendő áll rendelkezésre, másrészt amit térben és időben úgy lehet rögzíteni, hogy eltér környezetétől, azaz megfelelő rendszer felismerni, s a benne rejlő információkat leolvasni képes. Mert az információ akkor válik ténylegesen információvá, ha azt egy másik rendszer leolvasni és hasznosítani képes.

Bármilyen jellel lehet információt tárolni, mégpedig a jel mennyiségével, minőségével és különböző jelek sorrendjével. A római számrendszer első három számjegye esetében a jelek mennyiségével fejezzük ki a szám értékét, azaz a közölni kívánt információt, az arab számrendszer első tíz számjegyében pedig a jelek minőségével. A magasabb számok értékére vonatkozó információ mindkét számsornál a különböző minőségű jelek sorrendjébe van zárva.

I II III

MDCXXXII

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

19528295

27. ábra. A római számrendszer első három számjegyénél csak a jelek mennyiségével fejezzük ki a közölni kívánt információt (a szám értékét), az arab számrendszer első tíz számjegyénél csak a jelek minőségével. A nagyobb számértékekre vonatkozó információk mindkét esetben különböző minőségű számjegyek sorrendjébe vannak zárva.

Könnyen érthető, hogy kémiai információtárolás is történhet jelek minőségével és mennyiségével. A soksejtű szervezetek hormonális szabályozása, a rovarvilág illatanyagainak, úgynevezett feromonjainak információközlő szerepe elsősorban a jelek minőségében rejlik, ám a nőstény lepke hímet csalogató illatanyaga már nemcsak a minőség alapján informálja a hím lepkét, hanem a mennyiséggel is: a hím mindig a koncentráltabbban jelen levő szag irányába igyekszik, s így módon talál rá több kilométer távolságból is a nőstény lepkére.

A kémiai információtárolásnak e módjai azonban csak a szabályozásban szükséges irányító jellegű utasítás átvitelére, azaz rövid idejű információtárolásra alkalmasak. Amellett ez a mód nem is megfelelő bonyolultabb információk tárolására, hiszen a jelek, az egyes molekulák állandóan változtatják a helyüket, szabadon mozogva a térben, és így a valóban nagy információtároló kapacitást lehetővé tevő jelsorrend nem alakulhat ki segítségükkel. Ha tehát bonyolult információkat hosszú időre akarunk kémiai úton tárolni, akkor ezeket a jelként szolgáló molekulákat valamilyen módon térbelileg egymáshoz kell rögzíteni oly módon, hogy azért a bennük tárolt információk a lágy (kémiai) leolvasó rendszerek számára hozzáférhetőek legyenek.

A jelek rögzítésére a molekulák (mint jelek) kémiai kötésekkel történő egymáshoz kötése, a polimerizáció alkalmas. Ha a jelként szereplő molekulát V-vel jelöljük, akkor a jelek mennyiségével történő kémiai információrögzítést az alábbi, polimerizációt jelentő egyenlettel fejezhetjük ki:



ahol az n az információ tárolására felhasznált molekulák számát (azaz a kémia nyelvén a polimerizációs fokot) jelenti, a pV_n pedig az n darab V molekulából polimerizálódott polimermolekulát.

A polimer lehet térhálós és fonalpolimer is; a térhálós nyilván nem alkalmas a kémiai információtárolásra, mert a rögzített információ kémiai leolvasása lehetetlen, a jelmole-

kulák térbeli zsúfoltsága miatt a jelek a kémiai leolvasó mechanizmusok számára hozzáférhetetlenek. A fonalpolimerek viszont ideálisak erre a célra, hiszen a gyöngysorszerűen egymáshoz kapcsolódó jelmolekulák a száltengely irányát kivéve mindenhol hozzáférhetők.

Ha a [33] egyenlettel jellemzett polimerizációs folyamat lineáris polimerizáció, azaz fonalmolekulát eredményez, ilyen módon még nem alkalmas információátárolásra. Ez ugyanis a legegyszerűbb módon, azaz a jelek mennyiségével tárolná az információt. Egy ilyen polimerizációs folyamatnál azonban nincs semmi, ami pontosan megszabhatná a fonalpolimerek hosszát, azaz az egyes polimer-makromolekulába beépülő jelek mennyiségét. Egy ilyen polimerizációs reakcióegyben a képződő polimerek nem egyformák, nagyon rövidek és nagyon hosszúak egyaránt találhatók bennük. Információátárolásra azonban csak olyan fonalpolimerek alkalmasak, amelyekben a jelmolekulák száma pontosan meghatározott, hiszen ebben a legegyszerűbb esetben éppen a jelmolekulák száma tartalmazza az információt a makromolekulán belül.

Van a polimerizációs reakciónak egy olyan fajtája – az úgynevezett templát polimerizáció –, ahol nem akármilyen nagyságú makromolekulák keletkeznek. A templát szó mintát, mintafelületet jelent. Ennél a polimerizációs folyamatnál a molekulák összekapcsolódása csak akkor következik be, ha jelen van egy mintamolekula, egy mintaként szolgáló polimerszál, amelynek a felületéhez kapcsolódnak s ezután egymással kémiai kötést képeznek a jelmolekulák. Itt a minta szabja meg, hogy milyen az újonnan felépült makromolekula. Ám az újonnan képződött is mintaként szolgálhat, vagyis a minták száma megkétszereződött, a továbbiakban kétszer annyi minta áll rendelkezésre, tehát ugyanannyi idő alatt most kétszeres mennyiségű, még újabb polimer szintetizálódhat. Mivel ez is mintaként szolgál, már négyszeres, majd nyolcszoros, tizenhatszoros stb. mennyiségű polimer lesz jelen a reakcióegyben.

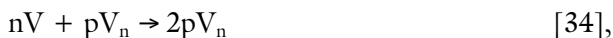
Ismét egy autokatalitikus folyamat: a templátmolekula autokatalizátor! Ez eleve sugallja, hogy a templátpolimerizációs folyamat könnyen összeépíthető lesz a másik két, előzőekben tárgyalt s ugyancsak autokatalitikus kémiai rendszerrel.

A templátmechanizmus nemcsak abban segített, hogy ezen a módon a makromolekulákban valóban lehet tárolni az információkat, de mindjárt a leolvasási mechanizmus is adott, hiszen az új makromolekula szintézisének a mintában levő információ leolvasódik és felhasználásra kerül az új makromolekula szintézisének. Sőt nemcsak a leolvasási mechanizmus adott, hanem váratlan eredményként az információk sokszorosítása is, hiszen az újonnan képződött molekulák ugyanazt az információt tartalmazza, mint a minta, amelynek alapján készült. Úgy tűnik tehát, hogy a templátpolimerizációs rendszer valóban alkalmas lesz az élet minimálrendszerének harmadik alrendszeréül.

Talán nem árt emlékeztetnem a kedves olvasót arra, hogy mindig a lehető legegyszerűbb, minden feleslegestől megtisztított elvi rendszert keressük, függetlenül attól, hogy ez a valóságban ténylegesen megvalósítható-e vagy sem. De mint ahogy az előző két alrendszerrel tettük, itt is bemutatjuk, hogy ez a rendszer sem légből kapott fantáziaszülemény, templátpolimerizációs rendszerek a valóságban is léteznek. Mindenekelőtt ilyen a híres-nevezetes DNS-szintézis, amely eléggé közismert. Ilyen az RNS-szintézis, amelyről

már ugyancsak volt szó. Ezek a templátpolimerizációs folyamatok az élő szervezetekben enzimek segítségével mennek végbe, de kísérleti adatok szerint a templáthatás nem enzimikus nukleinsav-szintéziseknél is érvényesülhet. Sőt éppen magyar kutatók, Cser Ferenc és munkatársai a Műanyagipari Kutató Intézetben mutatták ki, hogy ilyen mechanizmusú polimerizációs reakció nem biológiai jellegű vegyületeknél is előfordul, ők az acenaftilén polimerizációját találták ilyennek.

Figyelembe véve a minta (a templát) szerepét is, a [33] egyenlettel jelzett reakció most már az információtárolást is belekombinálva így néz ki:



ami egyben tükrözi az autokatalitikus jeleget is.

Ezzel minden készen áll az elvileg legegyszerűbb élő rendszer, a chemoton modelljének megkonstruálására. Sőt kész receptünk is van hozzá, ugyanazt kell tennünk, mint az önreprodukáló gömböcske esetében: „kereskedelmi” kapcsolatot létesíteni a különböző kémiai rendszerek között, vagyis úgy választani ki az önreprodukáló körfolyamatot, hogy saját anyagain kívül a membránrendszer és az információs rendszer működéséhez szükséges alapanyagot is termelje.

Elvileg legegyszerűbb megoldásként álljon az önreprodukáló körfolyamatunk olyan kémiai reakciók sorozatából, amelyek mindegyike egy-egy feladatot tud ellátni. Így az első lépés hasznosítsa a tápanyagot:



A második lépésben keletkezzen a salakanyag (anyagcseretermék):



A harmadik lépésben keletkezzék a jelhordozó molekula:



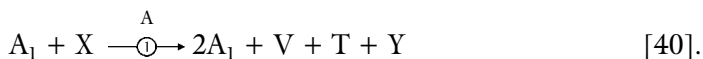
A negyedik lépésben a membránképző molekula:



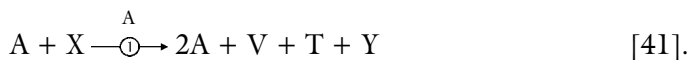
Végül az ötödik legyen az önreprodukáló lépés:

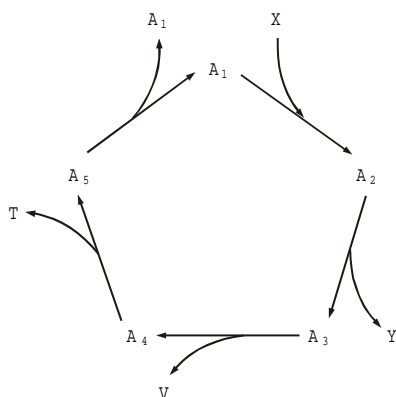


Most tehát öt reakciólépésből álló önreprodukáló körfolyamathoz jutottunk, amely egyben termeli a másik két alrendszer alapanyagait is, amint azt az ábra mutatja. A körfolyamat működésének egyenletét a [35]–[39] egyenletek összeadásával kapjuk:



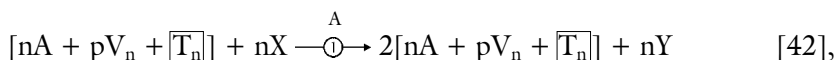
Vagy általánosan:



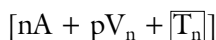


28. ábra. A chemoton önreprodukáló minimál kör-folyamata. A saját anyagon (A_1) és salakanyagon (Y) kívül az információs alrendszer nyersanyagát (V) és a membránképző molekulát (T) vagy ezek előanyagait is termeli.

Ha ez a rendszer egy olyan membrángömb belsejében működik, amelyben jelen van az információhordozó makromolekula, akkor a keletkezett V jelmolekulák a jelen levő minta alapján polimerizálódnak, a T membránképző molekulák pedig a membránba épülnek be. Így a membrángömb működését és szaporodását leíró [32] egyenletet az információs kémiai rendszer működését leíró [34] egyenlettel összekapcsolva (az egyenleteket összeadva) a chemoton egyenletét kapjuk:



ahol a szögletes zárójelben levő



maga a chemoton, amely az n darab T molekulából felépülő membrángömb belsejében tartalmazza a protoplazmának megfelelő minimálrendszert, az nA önreprodukáló körfolyamatrendszert, továbbá a genetikai állománynak megfelelő pV_n -t, az információhordozó polimert.

A [42] egyenlet világosan mutatja, hogy a három kémiai rendszer összehangoltan működik, egyformán növekedik, egyszerre reprodukálódik, s mint az önreprodukáló kémiai gömböcske esetében, megfelelő növekedés után térben osztódik, egyforma, működő, osztódóképes rendszerekké, vagyis szaporodik. *A három kémiai rendszer egyetlen szuperrendszerré vált, amelyben az eredeti kémiai rendszerek működése a szuperrendszer egész működésének van alávetve.*

Megkaptuk tehát azt a minimálrendszert, amely megfelel a sejt felépítésének, tartalmazza a protoplazmának, a genetikai állománynak és a sejthártyának megfelelő funkciójú alrendszereket, működő-, növekvő- és szaporodóképes. Ha ezt kémiai oldalról tekintjük, akkor szuperrendszerként kell felfognunk, hiszen különböző kémiai rendszerekből építettük fel. *Biológiai oldalról viszont minimálrendszer, mert ez az elvileg legegyszerűbb olyan rendszer, amelyik már mutatja az összes életjelenséget, amelyik az élet alapegységének tekinthető.* Hogy ez valóban így van, hogy a chemoton valóban élő, azt külön be kell bizonyítanunk.

A CHEMOTON ÉLŐ VOLTÁNAK BIZONYÍTÁSA

A chemoton élő voltának bizonyítása most már egyáltalán nem nehéz feladat, hiszen részletesen kidolgoztuk azokat a kritériumokat, amelyeket egy rendszernek ki kell elégítenie ahhoz, hogy élőnek tekintsük. Sorban meg kell tehát nézni, hogy a chemoton eleget tesz-e ezen feltételeknek. Ha a reális életkritériumokat kielégíti, élőnek kell tekintenünk, függetlenül attól, hogy a potenciális kritériumoknak eleget tesz-e vagy sem. Az igazi azonban az lenne, ha a potenciális életkritériumokat is kielégítené, mert akkor valóban reményünk lenne arra, hogy az egzakt elméleti biológia alapegysége lehet, amelyből az egész élővilágra vonatkozó absztrakt elméleti modellrendszer levezethető.

Nézzük először a reális életkritériumokat. Az első életkritérium szerint a rendszernek inherensen, azaz belső lényegéből fakadóan egységnek kell lennie, amely nem tehető össze addíció segítségével részeinek tulajdonságaiból, vagy nem osztható úgy részekre, hogy a részek hordozzák az egészre vonatkozó tulajdonságokat. Ezt a kritériumot aligha kell külön bizonyítanunk, hiszen a chemoton levezetésénél azt az elvet követtük, hogy részeket (alrendszereket) kapcsoltunk össze, miközben az összekapcsolás következtében mindig új minőségi tulajdonságok jelentek meg, olyanok, amelyekkel az egyes alrendszerek nem rendelkeztek. Hasonlóképpen a chemotont sem tudjuk úgy két részre különíteni, hogy mindkét rész az egésznek a tulajdonságait mutassa, hiszen összesen három alrendszerből áll, és speciális tulajdonságai (amelyet a továbbiakban még részletezünk) éppen speciális organizációs módjából, azaz belső lényegéből erednek. *A chemoton az első reális életkritériumot teljesíti.*

A második kritérium szerint az élő rendszernek anyagcserét kell folytatnia. Anyagcserén azt értettük, hogy a külső környezetből aktív vagy passzív módon anyag (és energia) jut a rendszerbe, ott ezeket a rendszer kémiai úton saját belső anyagaivá alakítja át melléktermékek keletkezése közben, a kémiai reakciók a belső anyagok szabályozott és vezérelt növekedését, valamint a rendszer energiaellátását eredményezik, végül a hulladékanyagok aktív vagy passzív úton elhagyják a rendszert.

A chemoton mindezeket teljesíti. A külső közegből a nagy energiatartalmú tápanyag, X jut a rendszerbe, ott ebből kémiai reakciók segítségével A, T és V keletkezik. Ez utóbbiak membránná, illetve genetikai anyaggá alakulnak szabályozott (és látni fogjuk, hogy vezérelt) módon. Keletkezik az Y salakanyag, amely számára a membrán átjárható, s így elhagyhatja a rendszert. Ráadásul az X tápanyag kémiai átalakításakor felszabaduló energia hajtja a rendszer „kémiai motor”-ját, és biztosítja a rendszer működését. *A chemoton tehát a második reális életkritériumot is teljesíti.*

A harmadik kritérium szerint az élő rendszernek inherensen stabilnak kell lennie. Ezt az inherens stabilitást a kémiai motorrész belső organizációs módja, azaz a körfolyamat-jelleg biztosítja, mint arról már korábban részletesen megemlékeztünk. Ez a tulajdonság tehát olyan tulajdonság, amely már az egyik alrendszerben kész tulajdonságként jelenik meg. *A chemoton a harmadik reális életkritériumot is teljesíti.* Az inherens stabilitáson túlmenően a chemotonok messzemenő alkalmazkodóképességgel rendelkeznek a környezeti változásokkal szemben, s nagymértékben képesek kompenzálni azokat, mint azt a számítógépes szimulációs vizsgálatokkal kapcsolatban a következő fejezetben bemutatjuk.

A negyedik reális életkritérium szerint az élő rendszernek olyan alrendszerrel kell rendelkeznie, amely a teljes rendszer számára hordoz információkat. Azt már tudjuk, hogy a chemoton rendelkezik olyan alrendszerrel, amely információhordozásra képes, de hogy ezek az információk a chemoton teljes rendszerére vonatkoznak, ennek bizonyításával még adósak vagyunk.

A pV_n információtároló szerepe a chemoton bonyolultabb változatainál, a mutatív chemotonoknál, amelyekről a genetikai alaptörvények levezetésénél egyik következő fejezetben lesz szó, igen nyilvánvalóan kitűnik, de ennél a legegyszerűbb formánál is megtalálható, mint azt a számítógépes szimulációval kapcsolatban látni fogjuk. Az alapelvet azonban már most megpróbáljuk érzékeltetni.

Ha az önreprodukáló körfolyamat egyes kémiai reakciói, mint azt a korábbiakban feltűntettük, reverzibilisek, vagyis a körülményektől függően előre- vagy hátrafelé is lejátszódhatnak, akkor maga a körfolyamat is mindkét irányban „foroghat”, vagyis sok tápanyag esetén „előre”-menve önreprodukáló, tápanyag hiányában, sok salakanyag és a többi termékek jelenlétében önfogyasztó is lehet, visszafelé foroghat. Hogy a körfolyamat milyen irányban és milyen sebességgel működik vagy éppenséggel áll-e, az elsősorban a tápanyagok és termékek koncentrációinak a függvénye.

Az élő rendszerekben azonban a „kémiai motor”, vagyis a teljes anyagfolyamat visszafelé nem foroghat, a sejt növekedése megfordíthatatlan, s ha mégis – extrém körülmények között – a sejt lebomlására kerül sor, az nem ugyanazon az úton történik, mint a felépítése. A chemoton teljes rendszerében is biztosítani kell ezt az egyirányúságot, s ezt egyirányú folyamat vagy folyamatok beépítésével lehet elérni. Már az önreprodukáló gömböcske tartalmaz ilyen irányú folyamatot, a membránképződést, mert a membránképző molekulák spontán beépülnek a membránba, de nem képesek onnan spontán kilépni. Ezért az önreprodukáló gömböcskében a körfolyamatrendszer már csak egy irányban, az állandó önreprodukció irányában működhet, hiszen egyik terméke, a T membránképző molekula soha nem halmozódhat fel, mindig spontán és azonnal beépül a membránba. Az önreprodukáló gömböcske csak a növekedés és szaporodás irányában működhet.

A templátpolimerizáció is egyirányú folyamat, ez is alkalmas a rendszer egyirányú működésének a biztosítására. Míg azonban a membránképző T molekulák gyakorlatilag azonnal beépülnek a membránba, a V jelmolekulák – itt nem részletezhető okoknál fogva – csak akkor kezdik meg az összekapcsolódást a templát felületén, ha meglehetősen

nagy mennyiségben halmozódtak már fel. A felhalmozódott V molekulák lelassítják, szélsőséges esetben le is állíthatják a körfolyamatrendszer működését. (Visszafordítani nem tudják, mert ehhez T molekulák is kellenének, de azok azonnal beépülve a membránba nem állnak rendelkezésre.)

Amikor a V jelmolekulák mennyisége eléri a templátpolimerizáció beindulásához szükséges kritikus koncentrációt, az új polimer, az új pV_n képződése a V-k nagy részét felhasználja, ezzel a V koncentrációja csökken, és a körfolyamatrendszer működése felgyorsul. Hogy a V koncentrációja milyen mértékben csökken le, azt szabja meg a templátpolimer hossza, a pV_n -ben lévő jelmolekulák száma, az n . Hosszabb templátmolekula (nagyobb n) több V-t használ fel reprodukciójához, jobban csökkenti a V-koncentrációt, intenzívebb működést engedve ezáltal a körfolyamatrendszernek, és fordítva, rövidebb templátmolekula lassúbb és kevesebb működést tesz lehetővé a körfolyamatrendszer számára. Ez pedig, mint az a számítógépes szimulációs vizsgálatokból is ki fog tűnni, nagymértékben befolyásolja a chemoton tulajdonságait. Mivel pedig a chemoton reprodukciójánál a pV_n is reprodukálódik, méghozzá azonos hosszúságban, ezek a tulajdonságok örökletesek. Kimondhatjuk tehát, hogy a pV_n templátmolekula valóban a teljes rendszer tulajdonságaira vonatkozóan is hordoz információt, s ezáltal *a chemoton a negyedik reális életkritériumot is teljesíti.*

Az ötödik életkritérium szerint az élő rendszerben a folyamatoknak szabályozottaknak és vezérelteknek kell lenniük. A chemotonelmélet egyik következménye a lágy (kémiái) automaták működési alapelveinek levezetése, ezzel külön fejezetben részletesebben foglalkozunk majd az eredmények között. De annyit már a negyedik életkritériummal, valamint az anyagcserével kapcsolatban elmondottakból is látni lehet, hogy a rendszer különböző anyagai meghatározott összefüggések szerint, szabályozottan termelődnek, s hogy az egész működése szempontjából akár a membránnak (már az önreprodukáló gömböcskénél) akár az pV_n -nek vezérlő szerepe van. *A chemoton tehát az ötödik reális életkritériumot is teljesíti.*

Mivel pedig az a rendszer, amelyik az öt reális (abszolút) életkritériumot teljesíti, élő rendszer, így a chemont is élő rendszernek kell tekinteni, függetlenül attól, hogy a potenciális életkritériumokat teljesíti-e. De azért érdemes azt is megvizsgálni, vajon nem elégíti-e ki a potenciális életkritériumokat is.

A hatodik életkritériumot (az első potenciális életkritériumot) a növekedés-szaporodást nem kell külön bizonyítanunk, hiszen korábban részletesen elemeztük, hogy ezzel a képességgel már az önreprodukáló gömböcske is rendelkezik. *A chemoton tehát kielégíti az első potenciális életkritériumot is.*

A hetedik életkritérium (a második potenciális kritérium) az öröklődő változás képessége volt. Hogy a chemotonok ezzel rendelkeznek, az különösen világos lesz majd az öröklődés alaptörvényeinek levezetéséről szóló fejezetben a mutatív chemotonoknál, de alapjai már itt is megjelennek. Az előzőekben rámutattunk, hogy az egyszerű chemoton öröklődő tulajdonságait a pV_n makromolekula hossza szabja meg. A templátpolimerizáció esetén bekövetkehetnek hibák: rövidebb másolat képződhet, vagy két pV_n összekapcsolódva kétszeres hosszúságú makromolekulát alkot, s természetesen a továbbiakban

már ezen megváltozott hosszúságú molekulák szerepelnek mintaként, megváltozott tulajdonságú utódokat hozva létre, ahol a megváltozott tulajdonság generációról generációra öröklődik. *A chemotonok a második potenciális életkritériumot is kielégítik.*

A nyolcadik életkritérium (harmadik potenciális kritérium) az evolúcióképesség volt. A chemoton valóban evolúcióképes, ezt a számítógépes szimulációs vizsgálatok is igazolták. *A chemoton a harmadik potenciális életkritériumot is kielégíti.*

Végül utolsó kritériumként a halandóság szerepelt: nem a programozott halál, hiszen a hasadással szaporodó egysejtűek potenciálisan halhatatlanok: hanem az, hogy léteznek olyan természetes körülmények, amelyek között a sejt struktúrája tönkremegy és a sejt elpusztul. A chemotonok éppen ilyen típusú halandósággal rendelkeznek, elsősorban a membránrendszerük az, amelyik igen érzékeny, s a membránfelület tönkremenetele a chemoton pusztulását is jelenti. *A chemotonok az utolsó életkritériumot is kielégítik.*

Mindezek alapján azt kell megállapítanunk, hogy *a chemoton valóban olyan absztrakt minimálrendszer, amelyik hordozza az élő rendszerek összes alapvető és jellegzetes általános minőségi tulajdonságát, és így élőnek kell tekinteniünk. De ezen túlmenően, éppen mert a potenciális életkritériumokat is kielégíti, fel kell tételeznünk, hogy a chemoton az életnek olyan absztrakt alapegysége, amelyből a teljes élővilágra vonatkozó absztrakt modellrendszer, vagyis maga az egzakt biológia matematikai pontossággal levezethető.* Ezt a reményünket a következő fejezetek remélhetőleg meg fogják erősíteni.

A CHEMOTON MŰKÖDÉSÉNEK SZÁMÍTÓGÉPES SZIMULÁCIÓJA

Lehetséges, hogy azok az olvasók, akik egy kicsit is járatosak a mozgások, változások vizsgálatában, akik kinetikával, annak akár mechanikai, elektromos, kémiai részével vagy kibernetikával foglalkoznak, most fel vannak háborodva. Az eddigi egyenletek ugyanis úgynevezett anyagmérlegek voltak, vagyis azt mondták meg, hogy milyen anyagok milyen mennyiségben találhatók a vizsgált oldatban az események előtt, és mi található ott utána, ha az események végbementek. Semmiféle felvilágosítást nem nyújtanak viszont arra vonatkozóan, hogy ténylegesen végbemennek-e, és milyen időlefutással, másodpercek vagy évmilliók alatt, vagy arra, hogy hogyan viselkednek e rendszerek külső hatásokra. És mégis vettük magunknak a bátorságot, hogy csupa kinetikai jellegű következtetést vonjunk le belőlük, olyanokat, mint anyagszere, szabályozás, vezérlés, növekedés, szaporodás stb. Jogos volt-e ez, ha igen, mi tette jogossá, ha nem, mivel lehet ezen állításokat egzakt módon bizonyítani.

Valóban, a kinetikus események – így a dinamikus rendszerek viselkedésének – matematikai leírásához is differenciálegyenletek szükségesek, azok adják meg a történések lefutását az idő függvényében. A kémiai kinetika, más néven reakciókinetika már vagy egy évszázada kidolgozta a kémiai reakciók előrehaladásának – az úgynevezett reakciósebességnek a leírásához szükséges differenciálegyenleteket. Nem okoz tehát különösebb nehézséget, hogy a chemoton egyes reakciólépéseire a megfelelő differenciálegyenleteket felírjuk. Csakhogy ezzel kapcsolatban két probléma is felmerül. Az egyik, hogy önmagában a differenciálegyenlet nem ad felvilágosítást a rendszer viselkedésére vonatkozóan, csak annak matematikai megoldása, azt integrálás műveletének elvégzése. A chemoton egyes elemi reakciói közül viszont éppen az önreprodukáló lépések úgynevezett másodrendű, nem lineáris differenciálegyenletekkel írhatók le, amelyek általános matematikai megoldása nem ismeretes, így a chemotonra vonatkozó teljes egyenletrendszer is megoldhatatlanná válik, s nem ad közvetlen felvilágosítást a rendszer működésére.

Megoldható persze az egyenletrendszer közelítő matematikai módszerekkel, amely a rendkívül sok számítás miatt csak számítógép segítségével végezhető el. Ezért *dr. Békés Ferenc* vegyészmérnök és *Nagy Ákos* elektromérnök kollégáim segítségével számos számítógépes vizsgálatot végeztünk, „szimuláltuk” a chemotonok működését számítógépben. Igen érdekes eredményekre jutottunk, amelyeket röviden mindjárt ismertetünk is. Mielőtt azonban ebbe belefognánk, meg kell ismerkednünk a másik problémával.

A számítógépes közelítő integrálást csak megadott számértékek mellett lehet elvégezni, ami esetünkben azt jelenti, hogy nem a chemoton működését, viselkedését általában

kapjuk meg, hanem csak azt, hogy az adott belső felépítésű, összetételű chemoton adott külső körülmények között hogyan viselkedik. Mivel végtelen sokféle belső felépítés és végtelen sokféle külső körülmény képzelhető el, a chemotonok viselkedésének megismeréséhez végtelen sok számítógépes szimulációt kellene folytatni.

Természetesen nem szükséges minden esetet kiszámítani, a körülmények ésszerű megválasztásával a feltétlenül szükséges vizsgálatok számát nagymértékben lehet csökkenteni, ám még ezek is olyan számítógép-kapacitást igényelnének, ami valójában semmi esetre sem hozzáférhető.

Mit lehet hát tenni? Azt, hogy a chemotonok működőképességének, alkalmazkodóképességének, növekedő- és szaporodóképességének, evolúcióképességének stb. vizsgálatára ésszerűen kiválasztott körülmények között néhány számítógépes vizsgálatot végzünk, az általános következtetésekből pedig annyit, amennyit csak lehet a már ismertett anyagmérleg egyenletekből vonunk le. Megtehetjük ezt azért, mert az ismertett egyenletek nem pusztán anyagmérlegek, egy csalafintaság révén bizonyos kinetikai következtetések levonására is alkalmasak.

Ez a csalafintaság a körfolyamatjel. A „tisztességes” anyagmérlegeknél az egyenlet két oldala között egyenlőségjel van, a kémiai egyenletekben ehelyett gyakran nyilat találunk. Az anyagmérleg-egyenletek azt írják le, hogy miből mi keletkezik (a mennyiségi összefüggéseket is beleértve), ha a folyamat teljesen végbement. Az általunk bevezetett körfolyamatjelek is erre utalnak, csak hogy azt is jelzik, hogy teljesen végbement ugyan egy periódus, de ez a periódus megismétlődhet, és akkor ugyanilyen változások következnek be.

Körfolyamatjeles egyenleteink tehát valóban nem adnak felvilágosítást az egy perióduson belüli eseményekre, annak csak a végeredményét mutatják, ám ha a periódus idejét időegységnek választjuk, megmutatják, hogy mi történik sok ilyen időegység alatt. A chemotonra vonatkoztatva: nem adnak felvilágosítást, hogy az egyes chemotonok hogyan viselkednek, csak arra, hogy milyen utódokat hoznak létre, de leírják, hogy mi történik a chemotonokkal a generációk sorozatán keresztül. És ezt, ha ismerjük a periódusok időtartamát (a generációs időt), a normál fizikai idő függvényében is megadják. A körfolyamatjellel ellátott anyagmérleg-egyenletek tehát olyan kinetikai egyenletek, amelyek „felbontóképességének” elvi alsó határa az egy periódus.

Tisztában kell lennünk azonban azzal is, hogy az anyagmérleg-egyenletek mindig azt mutatják, hogy mi az eredmény, ha a reakció teljesen végbemegy, tehát valójában csak az egyirányú, megfordíthatatlan, irreverzibilis reakciókra érvényesek. A kémiában azonban a reakciók többsége (elvileg mindegyike) megfordítható, egyensúlyi állapotra vezető reverzibilis reakció, amely soha nem megy teljesen végbe. Tudják ezt a kémikusok is, mégis felírnak anyagmérleg-egyenleteket az egyensúlyra vezető reakciókra is, mert a gyakorlatban ezekkel nagyon gyümölcsözően lehet számolni, s az eltérést az egyensúlyi állapot ismeretében könnyen lehet korrigálni.

A chemoton esetében csak akkor érvényesek szigorúan a felírt mérlegegyenletek, ha minden reakció irreverzibilis, megfordíthatatlan. De éppen azt kötöttük ki, hogy itt majdnem minden reakció megfordítható, reverzibilis, egyensúlyi állapotra vezető reakció.

Sajnos egy ilyen bonyolult rendszer esetében már nem olyan könnyű korrigálni az eltérést, mint az egyszerű reakciónál, ezért a chemoton tényleges összetétele a körülmények függvénye, és csak számítógépes szimulációval határozható meg.

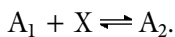
Mégis ebből az ellentmondásból nagyon hasznos dolgokat tudtunk meg. Még a számítógépes vizsgálataink elején, az első, kezdetleges szimulációknál – kellően át nem gondolva a bonyolult kémiai rendszer működését – azt vártuk, hogy a számítógép a chemoton összetételére ugyanazokat az eredményeket adja majd, amit az anyagmérleg-egyenletek alapján vártunk. Nem így történt. Egészen más, látszólag érthetetlen eredményeket nyertünk. Amint az ilyenkor lenni szokott, kerestük a hibát, s minthogy sehol nem találtuk, matematikus kollégánkat gyanúsítottuk meg rossz programozással, amit ő természetesen felháborodva utasított vissza. Hosszas nyomozás után kiderült, hogy a matematikus valóban vétlen, a program hibátlan, csak hogy a chemoton többet tud, mint mi magunk is hinni mertük volna (és még hányszor fordult ez elő!).

Arról van szó ugyanis, hogy a chemotonban (miként az élővilágban is) az örökletes tulajdonságok nem mereven, hanem a környezeti hatásoknak megfelelően módosulva jelentkeznek: ugyanazon örökletes tulajdonságok mellett az egyed lehet kövér vagy sovány, izmos vagy gyenge stb., aszerint, hogy mennyi és milyen táplálék áll rendelkezésére, illetve milyen hatások érik őt a környezet részéről. Most értettük meg igazán, az öröklődés csak azt írja elő, hogy azonos feltételek mellett az egymást követő generációk tulajdonságai (akár az élővilágban, akár a chemotonban), de az öröklődés szabta még igen tág lehetőségek között eltérő környezet egészen eltérő egyedeket hozhat létre.

A chemotonban az alkalmazkodóképesség éppen a reakciók reverzibilis, egyensúlyra vezető voltából ered. Ha csak irreverzibilis lépésekből állna a chemoton, az öröklődés alkalmazkodóképesség nélkül, szigorúan érvényesülne, s az eredményeket az anyagmérlegekből is pontosan leolvashatnánk. S hogy ez a reverzibilitásból eredő alkalmazkodóképesség milyen mértékű, azt rövidesen megtudjuk a szimulációs eredményekből.

Előadásaim során több esetben lekicsinylő véleményt mondtak a hozzászólók a szimulációról, azt állítván, hogy „a számítógépből az jön ki, amit beletáplálunk”. Ez persze bizonyos értelemben igaz is. Csakhogy mi a számítógépbe semmit sem tápláltunk a chemotonra vonatkozóan! Hogyan jött ki akkor mégis az eredmény?

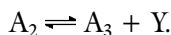
Éppen ez volt a nagyon szép a számítógépes vizsgálatokban. Említettük már, hogy idestova egy évszázada le tudják írni egy-egy kémiai reakció sebességét differenciálegyenlet segítségével. Vegyük példának a chemoton körfolyamatának első kémiai reakcióját:



Ha a számítógépbe olyan programot táplálunk be, amely a fenti reakcióhoz tartozó differenciálegyenletet integrálja, megkapjuk a reakció lefutását, azaz hogy melyik időpillanatban mennyi reakciótermék, mennyi A_2 van a rendszerben. Ez az érték természetesen függ többek között a reakció külső körülményeitől (például hőmérséklet) és a komponensek (például az X) koncentrációjától. Mármost a számítógép valóban olyan eredményt ad nekünk, amilyent akarunk, olyan értelemben, hogy ha például sok X -et táplálunk be, sok A_2 keletkezik és gyorsan, ha kevés X -et, akkor kevés A_2 keletkezik, és lassan stb.

Csak hogy pontosan ugyanez történik a lombikban is, ha a valóságos kémiai reakcióhoz sok X komponenst adagolunk, vagy éppenséggel keveset. A számítógép tehát megmondja, hogyan menne végbe a kémiai reakció a feltételezett körülmények között, magában a lombikban.

Természetesen ugyanezt megtehetjük a ciklus második reakciójával is:



Az egyenlet adta lehetőségeken belül itt is tetszőlegesen változtatható a reakció lefutása.

Ha azonban a két reakciónak megfelelő differenciálegyenleteket egyszerre adagoljuk a számítógépbe úgy, hogy az egyik reakció terméke egyben a másik nyersanyaga:



akkor a második reakció már nem futhat akárhogyan, hanem csak aszerint, hogy az első reakció mennyi alapanyagot gyártott neki. De az első reakció lefutása is korlátozott, hiszen befolyásolja az, hogy a második mennyit használt fel a termékből. Természetesen ez nemcsak a számítógépben van így, hanem a valóságban is: két összekapcsolt reakció másként „fut le”, mint azok külön-külön, hiszen egymás működését befolyásolják, ellenőrzik, mindegyik függ a másiktól.

A chemoton számítógépes szimulációjánál csak *az egyes elemi kémiai reakciókra vonatkozó differenciálegyenleteket adtuk be a számítógépnek, és nem adtunk utasítást a chemoton egészének a működésére vonatkozóan.* Azt tettük a számítógépben, mintha összeállítottunk volna lombikban egy olyan oldatot, amelyben egyszerre sokféle kémiai reakció játszódhat le, olyan kémiai reakciók, amelyek egymással össze vannak kapcsolva, és megnéztük, hogyan e reakciók hogyan befolyásolják egymás működését.

Mindenekelőtt – amint azt vártuk is – bebizonyosodott, hogy a rendszer működőképes, vagyis valóban képes anyagcserét folytatni, azaz a tápanyagokat felhasználni, azok energiája rovására a rendszer egészét működtetni, a rendszer saját anyagaivá szabályozott és vezérelt módon átalakítani úgy, hogy ez a rendszer állandó növekedéséhez vezet.

Azután bebizonyosodott, hogy a rendszer ingerlékeny, érzékeny, vagyis a külső változásokra (például hőmérséklet-változás, tápanyagkoncentráció-változás) érzékenyen reagál, ami a rendszer belső összetételének megváltozásában, a rendszer belső komponensei egymáshoz viszonyított arányainak eltolódásában jelentkezik. De érzékenyen reagál a belső változásokra is, s összetétele egyedi élete során, vagyis osztódástól osztódásig meghatározott módon változik azonos külső feltételek mellett is, és minden egyes utódban ugyanilyen változások mennek végbe annak egyedi élete során.

Azután bebizonyosodott, hogy az információtároló rendszernek (a pV_n -nek) valóban vezérlő és örökítő szerepe van a chemoton működésében, mert az, hogy a chemoton egyedi élete során a belső változások hogyan zajlanak le, függ a pV_n hosszától, vagyis az n értékétől. S mivel a pV_n hossza az utódban ugyanolyan, azonos körülmények között minden utódban azonos változások mennek végbe annak egyedi élete során.

Meglepetéssel vettük tudomásul a szimulációs vizsgálatok során, hogy a pV_n -nek mintegy ritmusadó (pacemaker) jellegű szerepe is van a chemotonon belül. A pV_n

duplikációja minden két osztódás között egyszer előforduló esemény, egy chemoton egyedi életében egy alkalommal történik pV_n -szintézis. Ez csak akkor következik be, amikor a chemoton az adott külső körülményeknek megfelelően fel van készülve az osztódásra: ekkor viszont a pV_n -szintézis egy hirtelen ozmotikus nyomáscsökkentéssel fizikai jelet ad a chemotonnak a térbeli kettéosztódás megkezdésére. Ezáltal a pV_n -nek nemcsak az anyagcsere sebessége felé van vezérlő szerepe, de már ebben a legegyszerűbb modellben, ebben a minimálrendszerben is képes vezérelni a térbeli osztódás kezdetét.

A legnagyobb meglepetések azonban akkor érték minket, amikor a chemotonok stabilitási és evolúcióképességével kapcsolatos szimulációs vizsgálatokat végeztük. Akárhogyan nézzük is, a chemoton alapvetően kémiai rendszer, hiszen a térbeli osztódást kivéve benne minden folyamat kémiai reakció. A kémiai reakciók sebessége pedig függ a nyersanyagok koncentrációjától, durva közelítéssel azt mondhatjuk, hogy arányos a nyersanyagok koncentrációval. Csináltunk olyan szimulációs kísérleteket, amikor a chemotonok rendelkezésére álló tápanyagok koncentrációját hirtelen tizedrészére csökkentettük. A kémiai tapasztalatoknak megfelelően azt vártuk, hogy a chemoton anyagcsere-folyamatai tízszeresen lassabbak lesznek, vagyis tízszeresére nő a generációs idő. Azt vártuk, hogy ha például az eredeti körülmények között egy óra alatt lett egy chemotonból kettő, akkor tizedrésztápanyag mellett ehhez tíz óra lesz szükséges. Legnagyobb meglepetésünkre azonban alig egytizedével nőtt a generációs idő, vagyis mintegy százszor kevésbé befolyásolta a chemoton működését, mint azt a kémiai szemlélet alapján várni lehetett volna. A részletesebb vizsgálatok megmutatták, hogy a chemoton belső összetétele e durva környezeti változásra erőteljesen átrendeződik, a tápanyaggal közvetlenül reagáló belső komponens (A_1) mennyisége a többi komponens rovására mintegy megtízszereződik, ezáltal kompenzálja a külső tápanyag csökkenését, és így a reakciósebesség lényegében változatlan marad.

A chemotonok tehát rendkívül nagy kompenzálóképességgel rendelkeznek a külső változások irányában, nagymértékben képesek függetleníteni belső működésüket a külső körülményektől.

A számítógépes szimulációs vizsgálatok tehát igazolták mindazokat a következtetéseket, amelyeket az anyagmérleg-egyenletre támaszkodva a chemotonokra vonatkozólag levontunk, *igazolták, hogy a chemotonok individuális, működő, anyagcserét folytató, inherens stabilitással rendelkező, homeosztatikus, ingerlékeny, szabályozottan és vezérelten működő, örökletes információkkal rendelkező, növekedő, szaporodó, örökletes változásra képes rendszerek.*

Abbeli hitünkben, hogy a chemoton olyan absztrakt élő egység, amely alkalmas egy valóban egzakt elméleti biológia alapjául, megerősödtünk. Érdemes talán ismét idézni Pavlovot:

„Az egész élet, a legegyszerűbb organizmusoktól a legbonyolultabbakig, beleértve természetesen az embert is, a külső környezettel való egyensúlyozások fokozatosan rendkívül bonyolulttá váló hosszú sora. Eljön az idő – ha távoli is még –, amikor a matematikai analízis, a természettudományi analízisre támaszkodva, egyenletek fenséges formulaiba foglalja ezeket az egyensúlyozásokat, egyenletbe foglalva végül önmagát is.”

Az eddigiek alapján talán nem túlzás azt állítani, elérkezett az idő e feladat végrehajtásához. Kezdjük hozzá.

A CHEMOTONELMÉLETBŐL KÖVETKEZIK: A LÁGY AUTOMATÁK ALAPELVEI

Descartes valamikor gépeknek tekintette az állati szervezeteket. Mechanisztikus elképzeléseit évszázadokon keresztül igen sok bíráló érte, tegyük hozzá, jogosan. Pedig elképzeléseiben valós megfigyelésekből indult ki, rájött, hogy vannak alapvető, közös sajátosságok a gépek és az állati szervezetek között. Ma már látható, hogy abban az időben ezeket a közös sajátosságokat nem is lehetett világosan kifejtetni, nemcsak azért, mert az állati szervezet működését nem ismerték, de a gépek működésének általános sajátosságait sem derítették fel. Éppen ezért, amikor most megkeressük a gépek és élő rendszerek közötti közös vonásokat (és az alapvető különbségeket is), ezt már nem Descartes gondolatmenete alapján, hanem természettudományunk mai ismereteinek szintjén tesszük.

Mindenekelőtt közös a gépekben (és a modern technika egyéb készülékeiben, azaz összefoglalóan az automatákban), valamint az élőlényekben, hogy rendszerek, organizált rendszerek, amelyek jellemző minőségi tulajdonságai belső organizációs módjukból erednek. Mind a technikai automaták, mind az élő rendszerek dinamikus rendszerek, jellemző sajátosságaik működésük közben jelentkeznek. Ehhez mindkettőnek energiaforrásra van szüksége, s a külső energiát mindegyik irányított, hasznos munkává tudja átalakítani. A bennük zajló átalakulások nem akárhogyan, hanem szabályozott és vezérelt módon mennek végbe.

Nem véletlen, hogy Descartes az élőlényeket a gépekkel elvi rokonságban levőnek találta, ugyanis a szabad természetben ilyen tulajdonságokkal rendelkező rendszereket csak az élővilágban találunk. Az élő rendszerek azok, amelyekben e tulajdonságok együttesen megtalálhatók. S ehhez jön az állatvilágban az aktív „önerőből” történő mozgás, s ez különösen nagy rokonságot mutatott a gépekkel.

E hasonlóságoknál azonban alapvetőbbek az élőlények és a gépek közötti különbségek. Mindenekelőtt az élőlények lágy rendszerek, szemben a technika alkotta kemény dinamikus rendszerekkel. Azután a gépeket, automatákat mind meg kell konstruálni, utána le kell gyártani, szemben az élőlényekkel, amelyeket sem megkonstruálni, sem elkészíteni nem kell: saját maguk konstruálják és készítik saját magukat. Az élőlények növekvő rendszerek, szemben a technikai berendezésekkel, amelyek legyártásuk után nemhogy növekednének, de éppenséggel kopnak, egyre inkább mennek tönkre. Az élőlények szaporodó rendszerek, és erre automatáink (legalábbis az ez ideig kifejlesztettek) ugyancsak nem képesek. Végül az élőlények evolúciója, a generációk számtalan sokaságán keresztül történő tökéletesedése magától bekövetkező, spontán folyamat, szemben a gépekével, amelyek ugyan szintén átmennek az idők folyamán evolúciós jellegű

fejlődési sorozaton, ez azonban az ember közreműködését igénylő, az ember által megvalósított folyamat.

Ezek nem kis különbségek. Láthatjuk, hogy az élőlények és a technikai automaták között alapvetőbbek az eltérések, mint a hasonlatosságok: a gépek és az állatok között többszörös, igen alapvető minőségi különbség van. Mindez azonban nem jelenti azt, hogy a hasonlóságok ne közös elvi alapokon nyugodnának: az azonos jelenségek hátterében a gépeknél és az élő rendszerekben azonos törvényszerűségek, a kibernetika és automataelmélet alapelvei húzódnak meg. Ha ez igaz, akkor a kibernetika alapelemeit és alaptörvényeit nemcsak az idegrendszerre, a neuronhálózatokra, az idegi szabályozásra stb. lehet alkalmazni (amelyek a maguk szintjén kemény rendszereknek tekinthetők, hiszen térben fix kapcsolatokkal organizáltak), hanem a lágy kémiai rendszerekre, az oldatban végbemenő folyamatokra is. A chemotonelmélet akaratlanul is ezt teszi, s így amikor a lágy (kémiai) automaták működésének alapelveit akarjuk feltárni, tulajdonképpen nem kell mást tennünk, mint az eddig tárgyaltakat a szabályozás- és vezérlélmélet, az automatika irányából megvilágítani.

Ez persze korántsem olyan egyszerű dolog. Az automaták, gépek jól ismert dinamikus elemekből vannak összeszerelve: ilyenek például az érzékelők, kapcsolók, vezetékek, kerekek, relék, időrelék, szelepek, különbségképzők, jelformálók, beavatkozók stb. Ezek mindegyikének számos gyakorlati megoldása lehetséges, hogy csak néhány példát említsünk: az érzékelők közé tartozik a behúzó-mágnes, feszültségváltó, tahométer dinamó, centrifugális inga, kontrolltranszformátor, huzalpotenciométer, úszó, ellenállás-hőmérő, termoelem, ikerfém, kontakthőmérő, bourdoncső, úszó manométer, dugattyús manométer, Pitot-cső, bolométer, Venturi-cső stb., vagy például a különbségképzőkhöz tartozik az amplidin, a mágneses erősítő, a közlekedőedény, a differenciálmű, a kontrolltranszformátor, a Wheatstone-híd stb.

Könnyű elképzelni, hogy ha megfelelően kiválasztott ilyen elemeket megfelelő módokon szerkesztünk egybe, gépeket, készülékeket, automatákat kaphatunk. De hogyan képzelhető mindez oldatban? Hogyan létezhet egy lombik vízben akár kapcsoló, akár erősítő, vezetékek stb. Azután hol vannak ezek a szervek? Hiszen az érzékelő szervtől a hatást el kellene vezetni a beavatkozó szervig, de hogyan lehetséges ez, ha az érzékelő is, a beavatkozó is és a vezetékek is fel van oldva egy lombiknyi vízben?

Lehetséges. Természetesen nem vállalkozhatunk rá, hogy e helyen a lágy (kémiai) automaták működési elveit részletesen kidolgozzuk, de megtehetjük, hogy rögzítjük azokat az alapelveket, amelyek alapján ilyen automaták működése megvalósulhat, amelyeken – úgy tűnik, az élővilág „automatáinak”, az élő rendszereknek a működése is nyugszik. Menjünk tehát sorjában.

Mindenekelőtt szükségünk van érzékelőre. Érzékelő bármi lehet, aminek a tulajdonságai az érzékelni kívánt környezeti változásra módosulnak, ha ez a tulajdonváltozás a gép vagy automata működését befolyásolja. Nyilvánvaló, hogy egy elektromos készülékben az érzékelő elektromos tulajdonságainak kell megváltozniuk, egy mechanikai készülék érzékelőjének valamilyen mechanikai jellegű tulajdonságváltozáson kell keresztülmennie.

A kémiai automata érzékelője kémiai tulajdonságaiban kell, hogy megváltozzon, még-hozzá egyrészt az érzékelendő külső hatás nagyságával összefüggésben, másrészt reverzibilisen, azaz a külső hatás csökkenésével vagy megszűnésével a kémiai tulajdonság-változás is visszaváltozzon, illetve teljesen visszaálljon a kiindulási helyzetet. A kémiában ennek ideálisan tesznek eleget az egyensúlyra vezető (más néven reverzibilis) kémiai reakciók. Az



kétirányú reakcióban az egyensúly beállta után az A és B molekulák egymáshoz viszonyított számaránya adott körülmények között állandó, és a reakcióra jellemző szám (ez a K egyensúlyi állandó). Most ebből a meghatározásból az adott körülményt kell kiemelni. Mert ha a körülmények megváltoznak, megváltozik az A/B számarány is, és ha a körülmények visszaváltoznak, visszaáll az eredeti számarány. A körülmény szó pedig nagyon sok mindent rejt magában, hőmérsékletet, nyomást, koncentrációt, pH-t és még sok mindent, mindazt, amit a termodinamika a vizes oldatok vonatkozásában állapothatározóként tart számon.

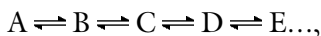
Ez tehát valóban kitűnő érzékelő, több szempontból is. Elsősorban nemcsak egyféle, hanem sokféle állapothatározó mérésére alkalmas. Súrlódásmentesen, reverzibilisen működik, így nem romlik el. Nem is hibázhat, hiszen a végeredmény az egyes molekulák átalakulásából statisztikusan összegződik, de a molekulák száma olyan horribilis (általában 10^{20} – 10^{22} darab/liter), hogy a tévedés lehetősége teljesen kizárt. Ezek olyan előnyök a kemény automaták elemeivel szemben, amelyek technikai alkalmazás esetén beláthatatlan távlatokat nyitnának meg. Az élővilág ezt a lehetőséget kihasználta. Az élő rendszerek lágy automatái teljesen hiba nélkül működnek, a biológiában előforduló működési hibákért mindig az élőlényekben található „kemény” automatizmusok felelősek.

De egy kissé előreszaladtunk. Eddig egyetlen „alkatrész”, a kémiai érzékelő különlegesen előnyös tulajdonságait mutattuk meg, s máris a lágy automaták előnyeiről beszélünk. Be kell bizonyítanunk, hogy ez a többi „alkatrészekre” és a lágy automaták egészére is igaz.

A reverzibilis reakció tehát érzékeli a környezeti változásokat, azok hatására megváltozik az egyensúlyi helyzete. Vagy az A, vagy a B komponens mennyisége (koncentrációja) nő meg a másik rovására. Hasonlóan, mint amikor a mérleg nyelve vagy a mérőműszer mutatója kitér eredeti helyzetéből. Az új egyensúlyi helyzet a megváltozott körülményeket tükrözi. De hogyan szerez erről tudomást a rendszer egésze?

A technikai automatákban ez a hatás vezetékek, alkatrészek sorozatán keresztül jut el a beavatkozó szervhez: ezt nevezik *hatáslánc*nak. Hatáslánc a kémiai rendszerekben is lehetséges: a már ismertetett reakcióláncok, amikor az egyik reakció terméke egyben a másik nyersanyaga, ennek terméke nyersanyaga a harmadiknak stb. tulajdonképpen hatáslánc, a kémiai rendszerek hatáslánca, amely az érzékelő kémiai reakciótól a hatást elemi reakciólépések sorozatán keresztül a kívánt kémiai átalakuláshoz továbbítja.

Ha van például egy ilyen reakcióláncunk:



ahol az egyik reakció terméke a másik nyersanyaga, akkor a láncon bárhol létrehozott zavar – ha úgy tetszik jel – az egész láncon végigvonul. A hatásnak, zavarnak vagy jelnek ez a vezetése ráadásul nem a tér egyik meghatározott pontjáról egy másik meghatározott pontjára történik, mint a „kemény” rendszerekben, hanem a reakcióelegy teljes térfogatában a reakcióhálózat (network) azon kémiai értelemben vett pontjaira, amelyekkel a reakciólánc kémiai kapcsolatban áll. A hatáslánc is hibátlanul működik, hiszen a hatás továbbításában ugyancsak 10^{20} – 10^{22} db molekula vesz részt.

A szabályozástechnika legfontosabb eleme a *zárt hatáslánc*, közismertebb nevén *visszacsatolás*. Ezzel már egy egész fejezetnyit foglalkoztunk: a kémiai körfolyamat nem más, mint zárt hatáslánc, kémiai visszacsatolás.

Az automatikában a jel rendszerint igen gyenge, közvetlenül nem használható fel a gépek, készülékek működésének megváltoztatására, ezt előzőleg rendszerint fel kell erősíteni. Az *erősítésnek* is vannak kémiai megfelelői: a már külön fejezetben részletesen tárgyalt autokatalitikus folyamatok, valamint az úgynevezett láncreakciók (amelyek nem tévesztendőek össze az egyszerű reakcióláncokkal). A láncreakciók ugyanis – az autokatalitikus reakciókhoz hasonlóan vagy azok egyik fajtájaként – ugyancsak gyorsuló reakciók; a robbanások, valamint a polimerizációs reakciók egy részének a mechanizmusa láncreakció.

Az eddig felsorolt automatikaelemek felhasználásával már igen érdekes, bonyolult és bonyolultan működő kémiai automatákat lehet létrehozni. Így például lehet olyan rendszert konstruálni, amelyik *időstandard* produkálására képes, vagyis meghatározott időperiódusonként jelet szolgáltat. Végso fokon ez óraszerkezet, amelynek nincs látható, szilárd alkatrésze, oldat az egész, amelyet tetszés szerint lehet kevergetni, öntögetni anélkül, hogy működésébe bármiféle hiba csúsznék. Hibátlanul működik, mert minden alkatrészről 10^{20} – 10^{22} darab van jelen, s így a meghibásodás eleve kizárt. Tetszés szerint beállítható, hogy hány másodpercenként, percenként, óránként esetleg hány naponként bocsássa ki a kívánt jelet (például változtassa meg a színét).

Tudatosan még senki sem konstruált kémiai automatákat – ehhez hiányoztak a kémiai automaták elméleti alapjai –, de véletlenül számos ilyen, óra jellegű kémiai reakciórendszer fedeztek már fel. Felfedezésük után mesterségesen is reprodukálták őket. Oszcilláló reakcióknak nevezik ezeket a kémiai rendszereket. Kiterjedt irodalmuk van, kémiai bemutatók kedvelt és látványos produktumai. Az élő rendszerekben is számos ilyen oszcilláló kémiai rendszer működik, ezek képezik a biológiai óra alapmechanizmusait.

Az igazán szép automaták azonban a programvezérelt automaták. Ehhez azonban program kell, információátvitel, leolvasás. Ennek is szenteltünk már egy fejezetet, ha nem is az automataelmélet szempontjából. Mindenesetre kimutatták, hogy létezik molekuláris, kémiai *jel*, létezik kémiai úton történő *információátvitel*, az információnak a *leolvasása*, az információ szerinti utasítások *végrehajtása*. Kimutattuk, hogy a molekuláris információátvitel által tárolt információk *programként* szerepelhetnek bonyolultabb kémiai rendszerekben, sőt hogy lehetőség van a programnak nemcsak a leolvasására, de a *másolására* is.

Ha az előbb ismertetett szabályozástechnikai elemeknek megfelelő kémiai rendszereket az utóbb felsorolt vezérléstechnikai elemeknek megfelelő kémiai rendszerekkel is összekombináljuk, egészen különleges tulajdonságú kémiai automaták konstruálására nyílik lehetőség, például olyanokra, mint az önreprodukáló gömböcske vagy a chemoton. Ha azonban az itt ismertetett alapelvekből a kémiai automaták részletes elmélete is kidolgozásra kerül, úgy vélem, ez mindennapunk automatikájában a gyakorlati élet olyan újabb forradalmát idézheti majd elő, mint amit az elektronikus automaták okoztak a mechanikai automaták után. De ez már a jövő.

Az eddig bemutatott kémiai automatakonstrukciók (a hibátlan működés mellett) tudnak valami olyasmit, amiről a technikai automatika még csak álmodozik: ez az önreprodukció. Mert az önreprodukáló gömböcske tulajdonképpen már egy *önreprodukáló kémiai automata*, a chemoton pedig – miként azt a számítógépes szimulációs vizsgálatok megmutatták – olyan önreprodukáló kémiai automata, amely *képes saját magánál bonyolultabb, tökéletesebb önreprodukáló automata létrehozására*. Erről is részletesen volt már szó, csak ezt akkor a biológia nyelvén úgy fejeztük ki, hogy a chemoton evolúcióképes.

Úgy tűnik, közeledik az idő Neumann János álmának, az önreprodukáló automatának a megvalósításához. Csak Neumann János nem gondolhatott arra, hogy ezek az önreprodukáló automaták nem elektronikus vagy mechanikai, hanem kémiai automaták, „lágy robotok” lesznek.

A CHEMOTONELMÉLETBŐL KÖVETKEZIK: A GENETIKA ALAPTÖRVÉNYEINEK LEVEZETÉSE

Amikor az e fejezetben összefoglalt gondolatokat egy tudományos folyóiratban: „A genetikai anyag funkciójának és szerkezetének elméleti levezetése” címmel 1974-ben lekötöltem, jó néhányan azt mondták: Könnyű *most* megmondani, hogy milyen a genetikai anyag szerkezete, amikor ezt Watson és Crick *már 1953-ban* (tehát jó két évtizeddel azelőtt) felderítették. Valóban. A *dezoxiribonukleinsav* szerkezete ismert. És ismertek már a genetika törvényei is, anélkül hogy chemotonelmélet kellett volna hozzá.

Célszerű tehát megnézni, hogy mi az, amit a genetika tudott, és mi az, ami a chemotonelméletből következik. Mivel ad többet vagy mást a chemotonelmélet a genetika alapjaival kapcsolatban, mint a klasszikus örökléstan és a molekuláris genetika?

Az öröklés szigorú értelemben véve azt jelenti, hogy az utód tulajdonságai azonosak a szülő tulajdonságaival, illetve a szülők tulajdonságaiból tevődnek össze. Volt már szó arról, hogy a szaporodás, az önreprodukció fogalma e szigorú értelmezésében magában foglalja az öröklődést is (de természetesen nem foglalja magában az öröklődő változékonyságot). Az élővilágban az öröklődésért a DNS (egyes vírusok esetében RNS) felelős. Ez mai biológiánkban úgyszólván kizárólagosan elfogadott álláspont. Neumann János, amikor felvázolta az önreprodukáló automaták elvi felépítését, azt három alrendszerből vélte szükségesnek összeállítani, s ezek egyike éppen a technológiai leírást tartalmazó alrendszer volt.

Pedig az eddigiek alapján már világosan látszik, hogy magához az önreprodukcióhoz nem szükséges technológiai leírás vagy genetikai állomány. Az önreprodukció – és ezzel a szigorú értelemben vett öröklődés – információhordozó alrendszer nélkül is megvalósulhat. Egy autokatalitikus körfolyamat bármely molekulája önreprodukáló molekuláris automataként felfogható, amely végighaladva a körfolyamat által előírt kémiai állapotok sorozatán végül is reprodukálja önmagát anélkül, hogy erre az önreprodukcióra vagy az új molekula tulajdonságaira nézve bárhol is lenne akármilyen technológiai leírás vagy genetikai előírat.

De aki úgy érzi, hogy e molekulák szaporodása nem igazi szaporodás, az gondoljon az önreprodukáló gömböcskékre, amelyekről már korábban megállapítottuk, hogy anyagcserét folytató, ingerlékeny, homeosztatisz rendszerek, amelyek működésük közben növekednek, majd térben két egyforma gömbbé válva osztódnak, tehát szaporodnak. Az utódok tulajdonságai itt is azonosak az előd tulajdonságaival, itt is van öröklődés, anélkül hogy bármiféle genetikai anyagot vagy genetikai információt tartalmaznának.

A mai élővilágban az öröklődés természetesen genetikai állományhoz kötött. De elvileg az öröklődésnek, az azonos tulajdonságokkal rendelkező utód létrehozásának nem előfeltétele a genetikai állomány jelenléte. És nem előfeltétele az önreprodukáló automatáknak a technológiai előírat. A genetikai információk nélküli rendszerek azonban nem rendelkeznek az öröklődő változás képességével, ami biológiai vonatkozásban az evolúcióképesség hiányát jelenti, automataelméleti vonatkozásban pedig azt, hogy létezhetnek ugyan technológiai előírat nélküli önreprodukáló automaták, de ezek nem képesek maguknál bonyolultabb, tökéletesebb utódok létrehozására.

A chemotonelmélet ebben az esetben tehát általánosabb törvényszerűségeket tár fel, amelyek az élőlények és a Neumann-automaták azon speciális esetei, amelyek az öröklődés mellett az öröklődő változékonyság képességével is rendelkeznek.

De a chemotonelméletből az is következik, hogy az öröklődő tulajdonságok a mai élővilágban sincsenek kizárólag a genetikai állományhoz kötve, sőt minden élőlénynek van *néhány* olyan legalapvetőbb öröklődő tulajdonsága, amely nem nukleinsavakhoz, nem is makromolekulákhoz, hanem kis molekulasúlyú vegyületekhez kötött. Ennek megértése érdekében egy kissé vissza kell térnünk az enzimek szerepéhez az élő rendszerekben.

Az élőlények anyagcseréjének egyes elemi kémiai lépéseit enzimek katalizálják. Lényegében az élőlényekben csak olyan kémiai reakció mehet végbe, amelynek a gyorsításához szükséges enzim működőképes állapotban jelen van. A genetikai információ a mai élővilágban éppen ezen enzimek szerkezetére és szintézisére vonatkozik, az öröklődő tulajdonságok jelenléte éppen a megfelelő enzimek jelenlétére vezethető vissza.

A megfelelő enzim jelenléte azonban csak az egyik (bár a mai élővilágban nélkülözhetetlen) feltétele a megfelelő kémiai reakciónak. A másik abszolút feltétel a megfelelő szubsztrát jelenléte.

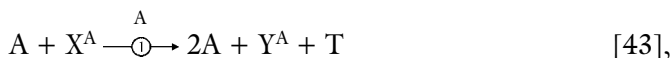
A szubsztrát jelenlétét a mai biológiai szemléletben természetesnek veszik, hiszen az vagy közvetlenül a táplálékból származik, vagy az anyagcsere során keletkezik. Ez általában igaz is. Azonban éppen a legfontosabb jelentőségű folyamatok, az autokatalitikus, önreprodukáló körfolyamatok és reakcióhálózatok esetére ez nem érvényes, mert ott a szubsztrátot is maga az autokatalitikus rendszer készíti. Egy önreprodukáló körfolyamatrendszer működéséhez nem elegendő az összes szükséges enzim jelenléte, a folyamat mindaddig nem indulhat be, amíg az önreprodukáló rendszer belső kémiai komponenseinek valamelyikéből (bármelyikéből) legalább egyetlen molekula nincsen jelen. Ekkor viszont nemcsak beindul, de egyre intenzívebben működik, hiszen önreprodukáló jellegénél fogva a szubsztrát mennyisége exponenciálisan növekedik.

Egy olyan sejt, amelybe az osztódás során valamelyik önreprodukáló körfolyamat rendszerének egyetlen komponenséből sem jutott molekula, a körfolyamatrendszer által meghatározott tulajdonsággal akkor sem rendelkezik, ha egyébként a genetikai állománynak erre vonatkozó részei teljesen épek (kivéve természetesen, ha a szükséges komponensek valamelyike az anyagcsere más útjain is keletkezhet). És ez a tulajdonság a sejtszubsztrátjaiból örökletesen hiányozni fog.

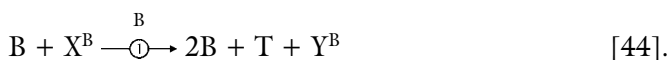
Ez a megállapítás nincs ellentétben, hanem nagyon is összhangban áll az általános biológiai tapasztalattal, mindössze a genetika, de különösen a molekuláris biológia az

utóbbi évtizedekben egyoldalúan emelte ki a genetikai állomány örökítő szerepét. Az elmondottak ugyanis nem tesznek mást, mint annak a tapasztalatnak magyarázzák meg a mechanizmusát, miszerint csak genetikai állományból, csak kromoszómákból vagy csak sejtmagból soha nem lehet élőlényt kifejleszteni: a petében, magban, spórában stb. a citoplazma, illetve a citoplazma anyagai is helyet kell, hogy kapjanak. Ez az átörökítő tényező azonban már környezetfüggő. Vizsgáljuk meg ezt egy egyszerű modellen, az önreprodukáló gömböcske egy kissé összetettebb változatán.

A korábban levezetett egy körfolyamat helyett párhuzamosan, egymás mellett az alábbi két körfolyamat működjön ugyanazon gömböcskén belül:

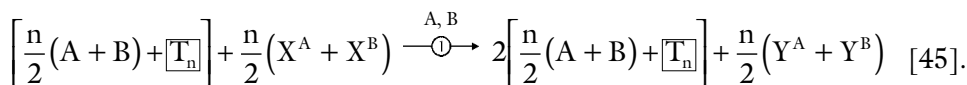


és



A [43] egyenlet azonos a [26] egyenlettel, a tápanyagnál és salakanyagnál az ^A felső index csak arra utal, hogy a kétféle körfolyamat tápanyagai és salakanyagai nem szükség-szerűen azonosak. A [44] egyenlet is egy a [43]-mal, illetve [26]-tal analóg körfolyamat működését írja le, itt azonban az önreprodukáló körfolyamat más belső komponenseken keresztül megy végbe. Mindkét körfolyamat termelje a membránképző komponenst, a T-t.

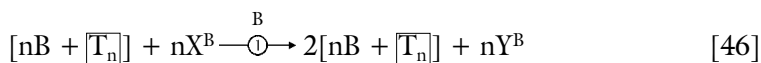
E kétféle körfolyamatot tartalmazó gömböcske működését az alábbi egyenlet írja le:



A gömböcskén belül az A és B komponensek egymáshoz viszonyított mennyisége változhat, például függvénye az X^A , illetve X^B -koncentrációnak is, össz mennyiségük viszont a már tárgyalt szabályok szerint kötött.

Ismeretes, hogy a kémiai reakciók sebessége hőmérsékletfüggő: nagyobb hőmérsékleten gyorsabban, alacsonyabb hőmérsékleten lassabban mennek végbe. A különböző reakciók hőmérsékletfüggése nem egyforma, így igen nagy a valószínűsége, hogy az A és B körfolyamat nem egyformán reagál a hőmérséklet-csökkenésre. Tételezzük fel azt, hogy alacsonyabb hőmérsékleten az A körfolyamat az, amelynek a működése jobban lelassul, mint a B-é. Mi történik akkor, ha egy ilyen kétféle körfolyamatot tartalmazó önreprodukáló gömböcskét tartósan hideg körülmények közé helyezünk? Nyilvánvalóan a B körfolyamat komponenseinek mennyisége az A-hoz viszonyítva relatív megnövekedik. De ezzel egyszersmind az önreprodukáló gömböcske aktívabbá válik, jobban működik, mint eredeti összetételében, tehát alkalmazkodik a környezetéhez. Megfelelő környezeti feltételek mellett előfordulhat, hogy hosszas adaptálás során az A körfolyamat komponenseinek mennyisége annyira lecsökken, hogy osztódásnál az egyik utódba az A körfolyamat komponenseiből már egyetlen molekula sem jut.

Ennek a gömböcskének a működését az

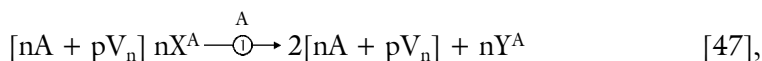


egyenlet írja le, benne és utódaiban az A körfolyamat többé akkor sem jelenhet meg, ha visszahelyezzük meleg körülmények közé és sorozatosan meleg körülmények között tenyésztjük tovább. Ez az önreprodukáló gömböcske tehát örökletesen hidegtűrővé vált pusztán azért, hogy rendszeresen hideg körülmények között tenyésztettük. Ugyanakkor ennek az öröklődő változásnak semmi köze sincs a genetikai állományhoz, hiszen ez a rendszer genetikai előíratot egyáltalán nem is tartalmaz.

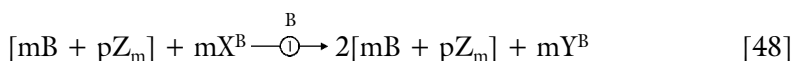
Ha szigorúan vesszük, korábbi állításainkkal ellentétbe jutottunk, hiszen egyrészt azt állítottuk, hogy az önreprodukáló gömböcske nem képes öröklődő változásra, másrészt hogy az öröklődő változáshoz és evolúcióképességhez genetikai előírat szükséges. Valójában az ilyen, nem makromolekulához kötött öröklődő változások csak rendkívül speciális esetek, nagyon korlátozott lehetőségűek, nem mutációs jellegűek, nem az összetettebb keletkezése irányába hatnak, és inkább csak kivételként fordulnak elő. Információtárolásra, ezen keresztül mutációs jellegű öröklődő változásokra, s az ebből adódó rendkívül nagy variációs lehetőségek következtében evolúcióra csak makromolekulákkal, genetikai állománnyal rendelkező rendszerek képesek. De a chemotonelmélet segítségével ebben az esetben is a genetika és molekuláris biológia megállapításain túlmutató, általánosabb érvényű törvényszerűségekhez jutottunk.

A mutációs jellegű öröklődő változások vizsgálatakor ugyancsak általánosabb érvényű törvényszerűségekhez juthatunk. A genetika és a molekuláris biológia ugyanis részleteiben feltárta, hogyan történnek a mutációs jellegű öröklődő változások az enzimikus mechanizmusokon keresztül. Kimutatható azonban – és a következő fejezetben erről lesz részletesen szó –, hogy az enzimek megjelenése az élő szervezetekben történelmileg csak egy hosszú evolúciós folyamat eredménye lehet. Az enzimek megjelenését az enzim nélküli rendszerek bonyolult és hosszadalmas evolúciójának kellett megelőznie. Ez viszont lehetetlen lenne, ha az öröklődő változások és az evolúcióképesség kizárólagosan az enzimek változásán keresztül valósulhatnának meg. A következőkben bemutatjuk, hogy a mutációs jellegű változások a kémiai információs alrendszereket tartalmazó rendszereknek általános tulajdonságai, s ennek csak részesete az enzimek változására alapozott mechanizmusa, amely azonban a mai élővilágban általánosan, és úgy tűnik, kizárólagosan van elterjedve.

Az egyszerűség kedvéért tekintsünk el a membrán alrendszer működésétől, és figyel-műnket összpontosítsuk a másik két alrendszer működésére és kapcsolatára. Vegyünk két különböző chemontot, amelyek működését írja le a



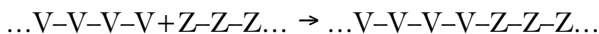
és a



egyenlet.

Ez utóbbi analóg az előzővel, de A komponensek helyett B komponensekből felépülő önreprodukáló körfolyamatot tartalmaz, amely körfolyamat valami V-hez hasonló, de azzal nem azonos Z vegyületet is szintetizál. A Z vegyület ugyancsak legyen polimerizációra alkalmas egy megfelelő poli-Z (pZ_m) templátmolekula felületén. A templát hossza (m) tetszőleges lehet, s akár egyenlő is lehet a [47] egyenletben szereplő pV_n hosszával, ebben az esetben $n = m$.

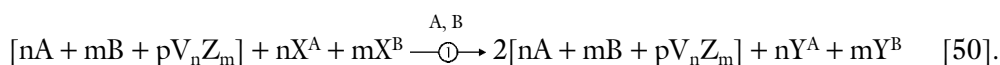
Egyesítsük e kétféle chemoton úgy, hogy a kétféle templátpolimert kapcsoljuk a végeiken össze:



vagy egyenlettel:

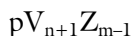


Az egyesített chemoton most úgy működik, mint a két eredeti összege, a templátpolimer duplázódásához a V-t az A körfolyamat, a Z-t a B körfolyamat termeli:

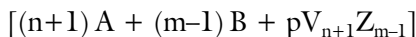


Ez az egyenlet hasonlít az örökletes adaptációra képes rendszer működését leíró [45] egyenlethez, de ellentétben azzal az A és B aránya itt nem lehet tetszőleges, hanem azt a $pV_n Z_m$ templátpolimerben a V és Z aránya örökletesen meghatározza.

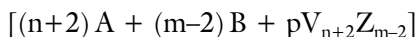
A templátpolimerizáció azonban nem tökéletesen végbemenő folyamat, előfordulhat, hogy a másolódásba hiba csúszik és a V helyére is Z kerül. Ekkor a polimerben a V-k száma eggyel nagyobb, a Z-ké kisebb lesz:



Ám a már korábban tárgyalt mechanizmus szerint a templátpolimer örökletesen megszabja a körfolyamatok működését, így ezen hiba folytán a következő utódok is megváltoznak, összetételük örökletesen



lesz. Ha a következő generációkban a hiba megismétlődik, a megváltozott generáció összetétele:



lesz. Könnyen belátható, hogy ha a generációk hosszú során keresztül a hiba m -szer ismétlődik, a polimerből a Z teljesen eltűnik és vele együtt a B körfolyamat is örökletesen eltűnik a rendszerből, vagyis a tiszta [47] típusú chemotonhoz jutunk vissza. Ha a hibák az ellenkező irányban következnek be, vagyis V-k cserélődnek Z-re, akkor az A körfolyamat kezd eltűnni a rendszerből, s kellő számú ilyen átírási hiba esetén tiszta [48] típusú chemotonhoz jutunk.

Ebben az úgynevezett mutatív chemotonmodellben tehát olyan öröklődő változások alapmechanizmusait mutattuk be, amelyek nem fokozatos adaptáció útján, hanem véletlen-

szerű hibák következtében lépnek fel. Az öröklődő változás alapja itt azonos a biológiai mutáció alapjával: mindkét esetben az öröklődő anyagot felépítő monomerekben történik csere, a molekuláris biológia szakkifejezésével élve báziscsere. Amíg azonban a mai élővilágban előforduló mutációknál a báziscseréből adódó információváltozás kerülőúton, az enzimek szintéziséen keresztül manifesztálódik, addig itt, a chemotonelmélet alapján láthatjuk, hogy erre elvileg közvetlen kémiai úton is van lehetőség. Az élővilág még az enzimikus mechanizmusok megjelenése előtt végigmehetett a mutációk sorozatán, s az ebből adódó evolúciós fejlődésen, amely végül is az enzimikus szabályozás kifejlesztését is lehetővé tette.

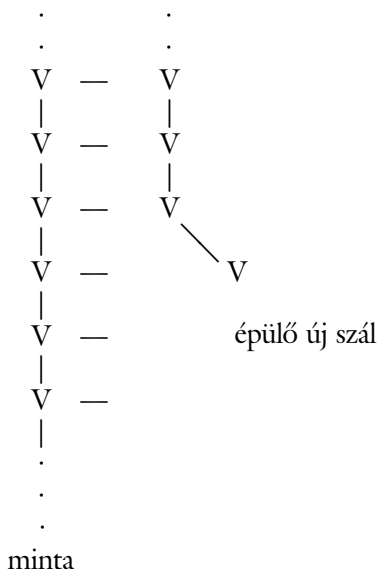
Már az eddigiekből is levonhatunk két alapvető következtetést. Az egyik, hogy a chemotonelmélet az öröklődés törvényszerűségeit általánosabb alapokon, elvi síkon tárgyalja és képes olyan mechanizmusok feltárására is, amelyek kívül esnek a mai földi élővilág tanulmányozásán alapuló genetika és molekuláris biológia hatósugarán. Ugyanakkor az a tény, hogy a chemotonelméletből levezethető ezen általánosabb törvényszerűségeken belül megvan a helye a genetika és molekuláris biológia által felfedezett törvényszerűségeknek is, alátámasztja a chemotonelmélet helyességét és biológiai realitását.

A másik levonható fontos következtetéshez vissza kell emlékezni, hogy az eddigi levezetések során sehol nem alapoztunk a biológia vagy genetika tényleges megfigyeléseire; kémiai, fizikai, rendszerelméleti megfontolások alapján vezettünk le mindent, s legfeljebb összehasonlítottuk a kapott eredményt vagy konstrukciót a mai földi élővilágból vett tapasztalattal: íme, eredményeink nem irreálisak. Ez viszont annyit jelent, hogy a kapott eredmények függetlenek a földi élővilág realitásaitól, kiindulásunk nem rejti eleve magában a végeredményt, levezetéseink nem állevezetések. És eredményeink nemcsak a mai földi élővilágra igazak, hanem a valamikori élővilágra éppúgy – mint ha vannak – akkor a nem földi, nem földi típusú sőt esetleg nem nukleinsav- és fehérjealapú élőlényekre is. S hogy ez mennyire így van, nézzünk egy további példát: a genetikai anyag általános molekulaszervezetének elméleti levezetését, természetesen csak vázlatosan.

Eddig a genetikai anyag, a pV_n (vagy a mutatív modellben a pV_nZ_m) szerkezetére és tulajdonságaira nézve igazán kevés előfeltételt kötöttünk ki: mindössze annyit mondtunk, hogy láncpolimernek kell lennie és templát tulajdonsággal rendelkeznie, vagyis mintaként szolgálnia saját felépítéséhez. Most vizsgáljuk meg pusztán elvi alapokon, tehát a nukleinsavak tényleges szerkezetétől függetlenül, hogy milyen molekulaszervezeti sajátosságok mellett tehet eleget a pV_n ezen feltételeknek.

Ahhoz, hogy a genetikai üzenet kellően stabil legyen, a jeleknek, tehát a V molekuláknak erős kémiai kötással kell kapcsolódniuk egymással. A szál menti kémiai kötéseknek tehát erős kovalens kötéseknek kell lenniük. Ahhoz viszont, hogy a szálpolimer mintaként szolgálhasson az újonnan felépülő polimer számára a szabadon úszó monomereknek, a V -knek kapcsolatba kell lépniük a mintamolekulában levő V -kkel, s ez ugyancsak kémiai kötés kell legyen. Ez utóbbi kémiai kötésnek azonban *sokkal gyengébbnek* kell lennie a szál menti kötésnél, hiszen feltételezzük, hogy a polimerizáció befejezése után az újonnan szintetizálódott szál le tud válni a mintáról, vagyis az új és régi szál közötti kötések fel tudnak szakadni anélkül, hogy a szál menti kötések felszakadnának. Ehhez a kétféle kötés erőssége között legalább egy nagyságrendnyi különbségnek kell lennie.

Az új és régi szál között, minthogy a minta monomer egységeként határozza meg az új szál felépítését, egységeként kell a gyenge kötéseknek is kialakulniuk:



Minél nagyobbra nő az új polimer, annál több gyenge kötés kapcsolja össze a régi szállal, tehát annál erősebben kötődik az újonnan szintetizált szál a mintához. Legerősebb a kötődése akkor, ha ugyanolyan hosszúra szintetizálódott, mint a mintaszál. Ezért a *lehetséges állapotok között a kettősszál-szerkezet a stabilis*. Ha viszont ez igaz, akkor a mintamolekula sem lehet egyszál-szerkezetű, hiszen az újonnan szintetizálódott szál nem válhatna le a mintafelületről, olyan erősen kötődik hozzá. *A genetikai anyag molekulaszervezetének tehát kettősszál-szerkezetűnek kell lennie.*

Amikor a DNS molekulaszervezetét levezették, az egyes monomerek, a nukleotidok molekulájának geometriai szerkezetéből indultak ki. Watson és Crick azt vizsgálták, hogy adott molekuláris szerkezetű nukleotidokból milyen makromolekuláris építmények építhetők fel, s úgy találták, hogy ezekből az egyik – a már közismert DNS-modell – megfelel a természetben található DNS szerkezetének, funkciójának és fizikai tulajdonságainak. Így eredményüket egy meghatározott molekula szerkezetére, a DNS-molekulára kapták. Később derült ki, hogy az RNS is tud hasonló szerkezetet képezni.

Figyeljük meg viszont, hogy a mi levezetésünkénél a monomer (V) szerkezetére semmiféle kikötést nem tettünk, pusztán a legáltalánosabb funkcionális sajátosságból, a templátpolimerizációs képességből kiindulva logikailag vezettük le a kettősszál-szerkezetet, s így az nemcsak a DNS-re, hanem bármiféle önreprodukáló lágy rendszer kémiai információtároló anyagára nézve igaz kell, hogy legyen. Mi tehát ugyanazon, de fordítottan megfogalmazott törvényhez jutottunk: nem azt állítjuk, hogy azért kettősszál-szerkezetű a genetikai anyag molekulaszervezete, mert a monomerek térszerkezete véletlenül ezt teszi lehetővé, hanem azt mondjuk, hogy a genetikai anyagnak eleve kettősszál-

szerkezetűnek kell lennie, s így csak olyan monomerekből épülhet fel, amelyek ilyen szerkezet kialakulását lehetővé teszik.

Még egy megjegyzés kívánczik ide. A kettősszál-szerkezet itt vázolt levezetése csak akkor szükségszerű, ha a genetikai anyag önmagában fordul elő (a mai élővilág jelentős részében a DNS fehérjével összekapcsolódva, nukleoproteidok formájában van jelen), és ha a szintézis nem enzimikus mechanizmusokkal, hanem pusztán kémiai úton történik. Ellenkező esetben ugyanis a stabilitás sem követeli meg szükségszerűen a kettősszál-szerkezetet, a mintához való kötődés is történhetne erős kötésekkel, és az újonnan szintetizálódott szál leválása is megoldódhatna enzimek segítségével. Hogy a tényleges mai élővilágban mégis kettősszál-szerkezetű és gyenge kötésekkel kapcsolódó az örökítő anyag molekulája, az is arra utal, hogy a genetikai anyag kialakulása és evolúciójuknak első szakasza megelőzte az enzimek megjelenését az élővilág evolúciója során.

A kettősszál-szerkezet levezetéséhez hasonló gondolatmenetekkel, amelyet itt nem részletezhetünk, ugyancsak levezethető, hogy elhanyagolhatóan kicsi a valószínűsége annak, hogy a kialakuló kettősszál-szerkezet ne csigavonalas szerkezetű, hanem egyenes, létraszerű legyen. Levezethető, hogy annak is igen kicsiny a valószínűsége, hogy a monomerek saját maguknak (tehát V a V-nek Z a Z-nek) szolgálhasson mintaként, hanem sokkal, sokkal valószínűbb, hogy pozitív-negatív típusú párok legyenek egymásnak mintái, tehát egy V monomernek legyen egy megfelelő W negatívja, s így a

V a W-vel és a
W a V-vel

tudjon párt képezni, valami ilyen módon:

V	—	W
V	—	W
W	—	V
V	—	W
W	—	V
W	—	V
V	—	W
.		.
.		.
.		.

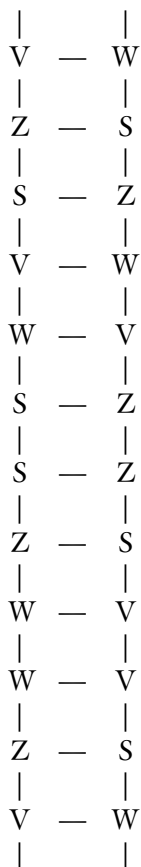
Ebben az esetben viszont már nem a V, hanem a

V-W

monomerpár képez egyetlen jelet a genetikai anyag kettősspirálisában. Így ahhoz, hogy egy mutatív képességekkel rendelkező chemotonszerű lágy rendszer létrejöjjön, legalább kétféle jel, kétféle páros kell, a V-W pár mellett egy

Z-S

párosra is szükség van. A mutációra képes genetikai anyagnak tehát minimálisan négyféle építőközből, négyféle monomerből kell felépülnie, valahogy így:



A monomerek tényleges szerkezetétől függetlenül tehát oda jutottunk, hogy ha a nem enzimés szabályozással működő, mutációra és evolúcióra képes lágy rendszerek törvényszerűségeit vesszük kiindulási alapul, akkor levezethető, hogy a genetikai anyag szerkezetének kettősspirális-szerkezetűnek kell lennie, kiegészítő párképzéssel, legalább négyféle építőkövel. Pontosan ilyen a DNS szerkezete Watson és Crick szerint. De megfelel en-

nek a Watson–Crick-moddal kapcsolatos, időközben felmerült problémák kiküszöbölésére az utóbbi években született Erlander-féle DNS-modell is, amely egyébként ezeket a követelményeket kivéve úgyszólván mindenben ellentétes a Watson–Crick-féle DNS-moddal.

A genetikai anyag szerkezetére és funkciójára levezetett törvényszerűségeink nem kötődnek a DNS-hez. Azt is mondhatnánk, hogy ha valahol a világmindenségben élnek például szilíciumemberkék, azok sejtjeiben is így tárolódik a genetikai információ, ez az alapja mutációjuknak és evolúciójuknak, és sejtjeik genetikai állománya akkor is kettősspirál-szerkezetű, kiegészítő párképzésű és négyféle építőközből épül fel, ha az nem DNS, hanem történetesen valami szilíciumpolimer. A chemotonelméletből levezethető genetikai törvényszerűségek valóban túllépik a mai földi élővilággal kapcsolatos törvényszerűségek érvényességi körét.

A CHEMOTONELMÉLETBŐL KÖVETKEZIK: AZ ÉLET KELETKEZÉSÉNEK MAGYARÁZATA

Az irodalomban fellelhető biológiai kérdések közül a legrégebbi múltra kétségtelenül az élet keletkezésének kérdése tekinthet vissza. Az ősi vallási iratok és népi mítoszok szinte mindegyikében találunk valamilyen elképzelést vagy legalábbis utalást a világ, a Föld és az élet keletkezésére, s ez jelzi, hogy a keletkezés hogyanja ősidőktől fogva izgatja az emberiség fantáziáját. De a vallási és irodalmi elképzeléseken túl a legkorábbi tudományos írásokban is rendre felmerül az élet keletkezésének problémája. Epikurosz, Arisztotelész, Lucretius foglalkoznak a biogenezissel, sőt nemcsak a földi élet eredetét vizsgálták, meggyőződéssel vallották, hogy az élet nem a Föld privilégiuma.

A XVIII–XIX. században az életkeletkezés kérdése a Földre szűkült, s miután megindultak a kísérleti tudományok, igen sok „kísérlet”-et végeztek az élet spontán keletkezésével kapcsolatban. Jól ismertek e kísérletek primitív elképzelései és körülményei, amelyek végül is arra készítették a Francia Akadémiát, hogy pályázatot írjon ki a spontán életkeletkezés lehetőségének kísérletes bizonyítására vagy megdöntésére. A pályázatot Louis Pasteur nyerte el híressé vált kísérleteivel, amelyek alapján egyértelműen kimondták: ősnemzés nincsen. Minden élő élőttől, minden sejt sejttől származik, s ma már azt is hozzátehetjük, hogy minden gén gentől.

Pasteur kísérletei tudományos szempontból kifogástalanok és bizonyító erejűek voltak, így az ősnemzés kérdése egy időre lekerült a napirendről. Szinte ezzel egy időben viszont feltámadt az Arisztotelésztől ránk maradt pánspermia-tan, és új formákban mint litopánspermia és radiopánspermia került nemcsak a tudomány, de a közvélemény érdeklődési körébe is. A litopánspermia tana szerint meteoritokba zárva, a radiopánspermia szerint viszont a sugárnyomástól hajtva, szabadon vándorolnának életképes spórák a világűrben, s véletlen találkozás révén egy-egy arra alkalmas égitest felszínére jutva azt étellel beoltanák. Mai tudásunk szerint sem a litopánspermia, sem pedig a radiopánspermia lehetősége nem zárható ki abszolút bizonyossággal. Ám ha létezik is, ez csak elodázza, de nem magyarázza az élő rendszerek kialakulását.

Századunk húszas éveiben az orosz Oparin és az angol Haldane vetették fel ismétleten és igen intenzíven az élet spontán keletkezésének lehetőségét, rámutatva, hogy az élet keletkezése nem olyan viszonyok között történt, mint ami a mai földi élővilág számára kedvező: az ős-Föld felszíni viszonyai alapvetően eltértek a mai felszínviszonyoktól és Pasteur egyébként egzakt kísérleti eredményei nem zárják ki az ős-Föld körülményei között történő spontán életkeletkezés lehetőségét. Oparin és Haldane érdeme, hogy a probléma többé nem jutott nyugvópontra, és századunk közepétől kezdve a kísérletes

munkák olyan átfogó sorozata indult meg, amelyek fő vonalaiban tudományos egzakt-sággal derítették fel az életkeletkezés bonyolult folyamatának első részét, az élet alap-anyagainak kialakulását, az úgynevezett kémiai evolúciót.

Világnézetileg, filozófiailag az életkeletkezés kérdésének felvetése természetesen indokolt volt, természettudományosan azonban megválaszolhatatlan: hiszen azt sem tudták, minek a keletkezését kell megmagyarázni. Ahhoz ugyanis, hogy megmagyarázhas-suk, hogyan alakult ki az élettelenből az élő, mindenekelőtt azt kell tudni, hogy mi az élettelen és az élő közötti különbség. E különbség ismerete nélkül hogyan lehetne választ adni a kérdésre?

Természetesen sokféle különbség van az élő és élettelen között, itt az alapvető, az elvi különbség a lényeges. Mert például a szabad természetben az élő és élettelen rendszerek döntő többségükben anyagi összetételüket tekintve is különböznek: az élettelen rendsze-
rek általában szervesetlen vegyületekből, az élő rendszerek szerves vegyületekből épülnek fel. E különbség alapján jogosan lehet feltenni a kérdést: hogyan keletkeztek a szerves vegyületek? Ez a kérdés természettudományosan is értelmes kérdés, hiszen ismerjük az elvi, alapvető különbséget szerves és szervesetlen vegyületek között, így a különbség eredete után egzakt természettudományos módszerekkel kutathatunk. Valóban, a természet-tudomány erre a kérdésre az elmúlt két évtizedben jól megalapozott választ tudott adni.

A szerves és szervesetlen közötti különbség azonban nem azonos az élő és élettelen közötti különbséggel. Ahhoz tehát, hogy az élet keletkezését természettudományos mód-szerekkel egyáltalán vizsgálni lehessen, e különbséget kell ismerni: nem filozófiai, hanem egzakt természettudományos választ kell adni arra a kérdésre, hogy mi az élet, milyen anyagi, szerveződési vagy egyéb sajátosságok hozzák létre azt az új minőségi tulajdonsá-got, ami az élő rendszerekben többletként található az élettelen rendszerekhez képest. Mindaddig tehát, amíg az élet lényegére, alapelveire, princípiumára vonatkozóan nem tudunk egzakt magyarázatot adni, addig az ősnemzés, az élő rendszerek élettelen rend-szerekből történő spontán keletkezése is megválaszolhatatlan marad. Ha viszont az élet lényegét ismerjük, feltehető, hogy közvetlen út kínálkozik az élővé válás folyamatának magyarázatára is.

A szerző természetesen hisz abban, hogy a chemotonelmélet helyesen tárja fel az élet alapjainak mibenlétét, ha nem hinne, nem írta volna meg e könyvet, amely, mint a címe is utal rá, éppen ezt kívánja megvilágítani. Ha viszont a chemotonelmélet valóban helyes választ ad az élet mibenlétére, meg kell vizsgálni, levezethető-e belőle az élő rendszerek spontán keletkezése az élettelen anyagból. Ahhoz azonban, hogy ezt megtehessük, rövi-den meg kell ismerkednünk az élő rendszerek kialakulásához, spontán keletkezéséhez szükséges külső feltételekkel.

Említettük már, hogy Oparin és Haldane szerint az ősföld felszíni viszonyai eltértek a maiaktól. A lényeges különbség nem a hőmérsékletben vagy a vulkánosság mértéké-ben, hanem a légkör összetételében volt: teljesen hiányzott belőle a mai egyik fő összetevője, a molekuláris oxigén, ugyanakkor nagyon sok hidrogéndús vegyületet tartalma-zott, beleértve magát a kétatomos hidrogénmolekulát (hidrogéngázt) is. Az őslégkör fő összetevői hidrogén, nitrogén, ammónia, metán és vízgőz voltak, kisebb mennyiségben

ciánhidrogén, kénhidrogén, formaldehid, etán voltak benne a nemesgázként viselkedő héliumon és argonon kívül.

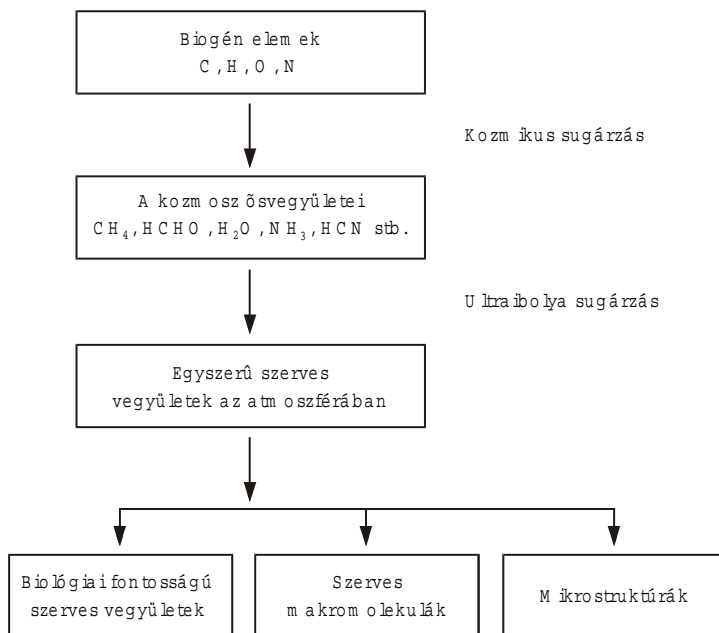
Stanley Miller 1953-ban laboratóriumi kísérlettel bizonyította, hogy ilyen redukáló összetételű gázatmoszférából folyékony vizes fázis jelenlétében elektromos kisülések hatására biológiai fontosságú szerves savak keletkeznek, közöttük többféle aminosav is. E kísérletek feltűnő eredménye, egyszerűsége és bizonyító ereje számos laboratórium kutatóit ösztönözte további kutatásokra, s ezek eredményeképpen lényegében kialakult a biológiai fontosságú szerves vegyületek spontán keletkezésének, az úgynevezett *kémiai evolúciónak* a természettudományosan sok oldalról bizonyított egzakt képe. E helyen ennek részleteire nem térünk ki, csak összefoglalón vázoljuk fel a kémiai evolúció főbb eseményeit.

A héliumot és argont mint vegyületképzésre alkalmatlan kémiai elemeket leszámítva a világegyetem legnagyobb gyakoriságú kémiai elemei a hidrogén, szén, nitrogén és oxigén, vagyis éppen az úgynevezett biogén elemek, azok, amelyekből az élővilág anyagai is fő tömegükben felépülnek. Ezen elemek a világűrben atomjaik, ionjaik (gyökeik), molekuláik vagy olyan egyszerű vegyületeik formájában találhatók, mint a víz, metán, szén-monoxid, ammónia, cián, formaldehid.

A világegyetem azon pontjaiban, ahol e 2–5 atomból álló vegyületek gázalakban koncentrálnak, mint például az égitestek gázburkában vagy a kozmikus por felületén adszorbeálódva, a világegyetemet átszelő kozmikus és egyéb sugárzások hatására egymással reakcióba lépnek, és bonyolultabb, 5–15 atomot tartalmazó vagy még ennél is nagyobb molekulák jönnek létre, olyanok, mint hangyasav, metilalkohol, etilalkohol, ciano-acetilén, acetaldehid, etán, propán, propilaldehid stb., valamint néhány igen egyszerű gyűrűs alapvegyület, benzol, toluol, pirrol stb. Ezen egyszerű vegyületek közül mintegy negyvennek a jelenlétét sikerült kimutatni rádiócsillagászati úton a csillagközi por- és gázfelhőkben, valamint kémiai analízis segítségével a Földre esett meteoritokban, és a Földre hozott holdpor- és holdkőzetmintákban. E vegyületek között makromolekulák, polimerek is találhatók, hidrogént, nitrogént és szenet tartalmazó, telítetlen ciánpolimerek.

A világegyetem azon pontjaiban, ahol a hőmérsékleti és nyomásviszonyok olyanok, hogy a víz folyékony alakban stabilis, az említett vegyületek tovább reagálnak részben a vízzel, részben egymással, és igen sokféle szerves vegyület keletkezik. E vegyületek zöme olyan, amiből a mai élővilág is felépül: az összes biológiai fontosságú aminosav, igen sok szerves sav és aldehid, cukrok és cukorszarmazékok, nukleinsav-szarmazékok, porfirin-szarmazékok stb. Az említett ciánpolimerekből pedig víz hatására fehérjejellegű vegyületek, úgynevezett proteinoidek keletkeznek. A keletkezett proteinoidek spontán képesek összeállni mikroszkopikus struktúrákká: membránokká, gömböcskékké, szálakká.

Összefoglalva megállapíthatjuk, hogy a világegyetem azon helyein – miként az ősföldön is –, ahol folyékony víz található, a biológiai fontosságú vegyületek nagy választéka és mennyisége halmozódik fel a kémiai evolúció során, kis molekulásúlyú szerves vegyületek, makromolekulák, mikroszkopikus struktúrák. Ez a megállapítás már nem hipotézis, a részleteket kísérletek ezrei bizonyították. Hanem ezek az ősvizek bármilyen dússzerves tápanyagot jelentenek is az élő rendszerek számára, e mindenféle vegyület



29. ábra. A kémiai evolúció egyes lépcsői. Az első három lépcső a világegyetemben mindenütt végbement, a negyedik csak olyan égitestek felületén, ahol folyékony halmazállapotú víz található.

halmaza még nem élő rendszer. Az élő rendszerek nyersanyagait képező ősi táptalaj és a legegyszerűbb élő sejtek között is óriási minőségi különbség van. Azt a folyamatot, amely ezt az úrt áthidalja, vagyis amely a kémiai evolúció és az összejtől az emberig vezető folyamat, a biológiai evolúció között van, *prebiológiai evolúciónak* nevezzük. A prebiológiai evolúció a tulajdonképpen *élővé válás* folyamata. És ez az, ahol megáll a tudomány: az élővé válásra sem konkrét kísérletek, sem egzakt elméletek nem ismertek. Ehhez ugyanis azt kell tudni, hogy mi az élő rendszer.

Ha abból indulunk ki, hogy az élő rendszer működése meghatározott aminosav-sorrendű enzimek által katalizált folyamathoz kötött, zsákutcába jutunk. Hiszen annak a valószínűsége, hogy egy meghatározott aminosav-sorrendű enzim véletlenül, pusztán valószínűségi alapon keletkezzék, rendkívül kicsiny. Eigen számításai szerint például egy száz aminosavból felépülő fehérjében a húszféle aminosav sorrendjét 10^{130} -féleképpen lehet cserélgetni. Hogy ez mekkora szám, azt mutatja az is, hogy Eigen szerint a ma ismert világegyetem térfogatába szoros illeszkedéssel csak 10^{103} darab ilyen molekula férne bele, vagyis 10^{27} világegyetem térfogata lenne szükséges egy olyan múzeum létesítéséhez, amelyben a száz aminosavból álló fehérjevariációk mindegyikéből egyetlen molekulát akarnánk elhelyezni.

Teljesen elképzelhetetlen tehát, hogy a meghatározott aminosav-sorrendű fehérjék pusztán valószínűségi alapon keletkeztek volna, erre sem elég idő, sem elég anyag nem állt rendelkezésre. Keletkezésükhöz irányítás kellett, méghozzá olyan irányítás, amely

egyrészt a szubsztrát tulajdonságai, másrészt a genetikai anyag sajátosságai szerint szabta meg a felépülő fehérje aminosavsorrendjét. Ehhez viszont már szubsztrátot és genetikai anyagot egyaránt tartalmazó, térben körülhatárolt rendszerek létét kell feltételezni.

A chemotonelmélet viszont éppen arra mutat rá, hogy magára az életre, az élő rendszerekre jellemző alapvető tulajdonságok nincsenek az enzimek jelenlétéhez, az enzimes szabályozáshoz kötve. Éppen olyan kémiai, lágy rendszerek szerveződési és működési törvényszerűségeit tárja fel, amelyek szabályozottan és vezérelten működnek, genetikai információkkal rendelkeznek, és evolúciós fejlődésre képesek anélkül, hogy ehhez enzimek jelenléte szükséges lenne. A chemotonelmélet tehát feloldja ezt az ellentmondást, és bebizonyítja, hogy elvileg lehetséges olyan élő rendszerek keletkezése és működése, amelyben nincs szerepe a fehérjék aminosavsorrendjének.

Természetesen az elvi lehetőség még nem jelenti, hogy ténylegesen, a valóságban is létezhetek ilyen rendszerek. A természetben szinte minden biokémiai reakció enzimes katalízissal megy végbe. Bizonyítani kell tehát, hogy a biológiai fontosságú reakciók vagy azoknak megfelelő ősi spontán kémiai folyamatok enzimek nélkül is végbemehetnek. Elvileg persze minden reakció végbemegy enzim nélkül is, hiszen az enzimek csak gyorsítják az egyébként is lehetséges reakciókat, ám ez a gyorsítás 10^6 – 10^8 -szoros, így a biokémiai folyamatok enzimek nélkül rendkívül lassan mennek végbe.

A kémiai evolúcióval kapcsolatos kísérletek azonban rációfolnak erre a következtetésre. Kiderül, hogy redukáló körülmények között, az ősi viszonyoknak megfelelő feltételek mellett a biológiai fontosságú anyagok keletkezése korántsem olyan lassú. Az összes kísérlet, amit a kémiai evolúcióval kapcsolatosan végeztek, órák, napok, legfeljebb hetek alatt jól mérhető, sőt egyes esetekben kiugró mennyiségű biológiai fontosságú vegyületet szolgáltatott. Így például Miller említett kísérletében két hét alatt a bevitt metánnak 15%-a alakult át egyéb szerves vegyületekké, Ponnampuruma cukorkeletkezési kísérleteiben 6 óra alatt a bevitt formaldehid 80%-a cukorrá alakult, Matthews és Moser kísérleteiben pedig 500 g ciánhidrogénből két hét alatt 200 gramm olyan ciánpolimer keletkezett, amely vízzel gyakorlatilag spontán és azonnal proteinoidokká, fehérjejellegű vegyületekké alakult.

Különösen René Buvet francia professzor és munkatársai foglalkoznak az utóbbi időben sokat és eredményesen a nem enzimatis anyagcsere lehetőségeivel rámutatván, hogy szinte mindenféle típusú biológiai fontosságú vegyület keletkezésére és reakció végbemenetelére reális sebességű lehetőség van, ha nem a mai földi, hanem az ősi viszonyoknak megfelelő körülményeket teremtünk. Amellett az enzimek távollétében is van lehetősége a katalitikus reakciógyorsításnak, számos természetes ásvány, de különösen az agyagok alkotórészei sok reakcióra nézve katalizátor tulajdonságúak, és Fox professzor, valamint munkatársai a spontán keletkező fehérjejellegű vegyületekről, a proteinoidokról mutatták ki biológiai jellegű reakciók vonatkozásában katalikus hatásukat.

Elfogadhatjuk tehát, hogy a chemotonelmélet kémiai előfeltételének, a biológiai fontosságú reakciók nem enzimes végbemenetelének az életkeletkezés vonatkozásában reális alapja van. Ebben az esetben az élővé válás magyarázatához nem kell mást tennünk, mint megvizsgálni, hogy a chemoton alrendszerének megfelelő kémiai rendszerek létrejöhet-

tek-e maguktól az ősi körülmények között, s ha igen, volt-e reális lehetőség ezek egyetlen szuperrendszerbe, chemotonba való szerveződésének.

Már maga az a tény, hogy a kémiai evolúcióval kapcsolatos kísérletekben a néhány egyszerű alapvegyületből a legkülönbélebb szerves vegyületek sokasága jön létre, mutatja, hogy az ősi körülmények között nagyon sokféle reakció játszódhat le. Ugyancsak kísérletek sokasága bizonyítja, hogy e vegyületek nem egyetlen kémiai lépésben, hanem egymáshoz kapcsolódó kémiai reakciók sokaságán, reakcióláncokon keresztül mennek végbe. Kísérletek mutatják azt is, hogy sokféle egymással rokonságban levő vegyület keletkezik, amelyek alternatív, vagylagos utak, tehát a reakcióláncokon levő elágazások eredményei. Kifejezetten a reakcióhálózatok felderítésére vonatkozó kísérletek a szerző tudomása szerint nem történtek, de az összes elvégzett kísérlet azt sugallja, hogy igen bonyolult reakcióhálózatok jönnek létre az ősi viszonyokat reprodukáló kísérletek során a reakcióelegyekben.

Magának a chemotonelméletnek vagy a chemotonelmélet alapján az élővé válás folyamatának igazolására ez ideig nem történtek célzott kísérletek. Így a körfolyamatok kimutatására sem törekedtek a kémiai evolúció eseményeit vizsgáló kísérletezők, talán Ponnampertuma professzort kivéve, aki szóbeli közlése szerint a Szent-Györgyi–Krebs-ciklus folyamatait észlelte kémiai evolúciós kísérleteiben. Viszont elméletileg könnyen belátható, hogy az ősi viszonyok mellett a kémiai körfolyamatoknak igen nagy szerepük volt. Az Ős-Föld felszínét ugyanis a mainál mintegy tízszer erősebb ultraibolya sugárzás érte, amely a különböző szerves vegyületekben elnyelődött, energiadús, aktivált vegyületeket hozva létre. E vegyületek a bennük levő „fölös” energiától kémiai reakciók sorozatán keresztül szabadultak meg, visszatérve alapállapotukba, egyúttal egy körfolyamati periódust is befejezve. Ma a napfény energiájának hasznosítása a fotoszintézisben ugyancsak ilyen körfolyamatok révén történik, s ez természetes, hiszen korábban utaltunk rá, hogy folyamatos energiahasznosítás csak körfolyamatokban lehetséges.

Autokatalitikus körfolyamat viszont a kémiai evolúciós kísérletekből is ismert. Buvet professzor nagy jelentőséget tulajdonít az ósóceánban működött autokatalitikus folyamatoknak. Igen szép és sokat vizsgált (sőt ipari hasznosítás céljából napjainkban is kutatott) autokatalitikus folyamata a kémiai evolúciónak a cukrok keletkezése formaldehidből, amelyek során a legkülönbözőbb három, négy, öt és hat szénatomos cukrok jönnek létre.

El kell fogadnunk tehát, hogy a chemoton egyik alrendszere, az autokatalitikus körfolyamatrendszer spontán létrejött és működése reális lehetőség, sőt szükségszerűség volt az élet megjelenése előtti földi ősvizekben.

A chemotonok másik alrendszerének megfelelő rendszerek, a kétdimenziós folyadék-membránok keletkezésének lehetsége abiogén úton szintén kísérletesen bizonyított. Ezek a kísérletek sem a chemotonelmélet szempontjai szerint születtek, hiszen közel egy évtizeddel előzték meg a chemotonelmélet nyilvánosságra hozatalát. Sidney Fox amerikai professzor kísérleteiről van szó, aki fehérjejellegű vegyületeket, proteinoidokat állított elő aminosavakból a kémiai evolúció körülményei között. Megfelelően vezetve a kísérletet e proteinoidok spontán kétrétegű, elektronmikroszkópos vastagságú, kétdimenziós

folyadék tulajdonságú membránokat képeznek. Sőt e membránok mindjárt gömbbé zárodnak össze (mint azt a térben osztódó rendszereknél feltételeztük), s a kísérleti elegyben milliárdnyi azonos nagyságú gömböcskét alkotnak. A gömböcskén belüli és kívüli oldat összetétele eltér egymástól. Azonos nagyságuk azt mutatja, hogy azonos környezeti feltételek mellett létezik egy optimális gömbnagyság, amelyet minden gömböcske igyekszik felvenni. Ha a külső és belső körülmények viszonya megváltozik, a gömböcskék maguktól, pusztán fizikai-kémiai erők hatására osztódáson mennek keresztül.

Membrán alrendszer, beleértve a gömbképződést és az osztódási mechanizmust is, tehát nem pusztán elmélet: kísérletileg megvalósítható, méghozzá éppen azon körülmények között, amelyek az élet keletkezése idején a Földön is uralkodtak.

A harmadik alrendszer, az információátadó és reprodukáló alrendszer spontán, nem enzimikus keletkezésének és működésének kísérletes bizonyítása látszik a legnehezebb feladatnak. Ez a kérdés természetesen izgatta a kutatókat, hiszen a nukleinsavak mint makromolekulák abiogén keletkezését a kémiai evolúció körülményei között nem sikerült kísérletesen igazolni. Ez azonban még nem jelent semmit, a nukleinsavak szintézise az élővilágban is minta alapján, templátmechanizmussal történik. Azt kell megvizsgálni, hogy templátmechanizmussal, de enzimek közreműködése nélkül keletkezhetnek-e nukleinsavak az ősi körülmények között.

Az irodalomban öt-hat ilyen irányban végzett kísérletről lehet beszámolót találni. E kísérletek mérsékelt eredményekről tudósítanak: egyértelműen kimutatják, hogy a mintamolekulák jelenléte a nukleinsavvá polimerizálódás folyamatát lényegesen meggyorsítja, vagyis a templátmechanizmus enzimikus katalízis nélkül is működik az ősi körülmények között, de egyetlen esetben sem sikerült sok nukleotidból álló polimerekhez, nukleinsavmakromolekulákhoz jutni, hanem legfeljebb öt-hat nukleotidból álló láncokhoz, úgynevezett oligomerekhez.

És ez ismét egy szépsége a chemotonelméletnek, mert levezethető belőle, hogy ennek így kell lennie. Ha az említett kísérletek teljes sikerre vezettek volna, vagyis ha e kísérletekben a templátmechanizmus révén nagy polimerizációs fokú, sok nukleotidból álló nukleinsavak keletkeztek volna, baj lenne a chemotonelmélettel. Az előzőkben ugyanis éppen azt vezettük le, hogy a pV_n -nek, az információhordozó molekulának kettősszál-szerkezetűnek kell lennie, mert oldatban az a stabilis. Mintaként viszont csak egy-egy szál szolgálhat, a kettős szálú szerkezetben a két szál kölcsönösen lefedi egymás mintafelületeit.

Ha az említett kísérletekben megindult a nukleinsav-képződés, és az új szál túlhaladta a négy-öt nukleotidnyi hosszúságot, többé már nem tudott lejönni a mintafelületről, ezáltal blokkolva a mintafelületet s megakadályozva a nukleinsav polimerek további szintézisét. Más irányú kísérleti vizsgálatok már korábban megmutatták, hogy négy-öt nukleotidból álló oligonukleotidok azok, amelyek szobahőmérsékleten még le tudnak jönni a mintafelületről, így e kísérletekben csak ezeknek volt szabad megjelenniük!

Hogyan tud akkor a chemotonban a kettősszál-szerkezetű információhordozó molekula, a pV_n mégis templátként szerepelni, és új pV_n -molekulák szintézisét lehetővé tenni? Az élő szervezetekben az információhordozó anyag, a DNS szintén kettősszál-szer-

kezetű. A sejtben az új DNS szintézisének, az úgynevezett replikációnál e kettős szál szétválik és az egyes szálak szerepelnek mintaként. Itt a kettős szál szétválását részleteiben még nem teljesen ismert enzimes mechanizmusok biztosítják. A chemotonban viszont működése során olyan belső feltételek teremthetnek meg, amelyek enzimek nélkül is a kettős szál szétválásához vezetnek, pusztán fizikai-kémiai hatások révén. E feltételek minden chemotonegyed életében egyszer jönnek létre, ezek indítják be a pV_n szintézisét, a pV_n szintézise pedig, mint arra már utaltunk, a térbeli osztódást. Éppen e feltételek létrejötte a titka a pV_n már emlegetett ritmusadó, pacemaker szerepének! És ha ez nem lenne, ha a chemotonban a pV_n folyamatosan szintetizálódna, a chemoton belső időrendje is felborulna. Azok a kísérletek tehát, amelyek az abiogén nukleinsav-szintézisben a templáthatás jelenlétét és a nagy polimerizációs fokú termékek hiányát bizonyították, mindkét eredményükkel a chemotonelméletet támasztották alá. Úgy tekinthetjük tehát, hogy a kísérletek megerősítették azt a feltételezést, hogy a chemotonok harmadik alrendszere, az információs alrendszer keletkezhetett és működhetett az ősi, nem enzimes körülmények között.

Íme tehát mindhárom alrendszer, az autokatalitikus reakcióháló, a kétdimenziós folyadékmembránok és a kémiai információs rendszerek abiogén keletkezését és működését kísérletes bizonyítékok támasztják alá annak ellenére, hogy tudatosan e kémiai rendszerek működését senki nem kereste. Pedig ezek a kísérleti eredmények már valójában a prebiológiai evolúciónak, azaz magának az élővé válás folyamatának, az élő rendszerek önszerveződésének lépcsőfokai. Ezek létezésétől és működésétől az élő rendszerek megjelenése egyetlen lépés: ha ezek működése összekapcsolódik, élő és evolúcióképes önreprodukáló rendszer, a chemoton jön létre.

Erre az utolsó lépésre kísérleti bizonyíték nincsen. Nincsen, mert ez irányban senki nem végzett kísérletet. Egy ilyen kísérlet sikere ugyanis nem kevesebbet jelentene, mint élő mesterséges előállítását, élő rendszer szintézisét, élet teremtését élettelenből. Ennek lehetőségeivel a következő fejezet foglalkozik.

A CHEMOTONELMÉLETBŐL KÖVETKEZIK: ÉLŐ RENDSZEREK SZINTÉZISÉNEK STRATÉGIÁJA

Ni, hogy ragyog! – Most már remélni merjük,
hogy ha száz anyagból keverjük
– a keverés fontos, semmi más –
az embergyurmát gonddal, türelemmel
mit zárt edényben, tűz felett kell
felfőzniünk, párolnunk ezerszer,
titkon elkészül a nagy alkotás.
Meglesz! Íme, tisztul a gyurma!

GOETHE: *Faust*
(JÉKELY–KÁLNOKY–SÁRKÖZI fordítás)

Talán megbocsátja a kedves Olvasó, ha ennél a pontnál egy kissé elragadja a szerzőt a lelkesedés, és egy tudományos probléma tárgyalását szépirodalommal kezdi. De az előző fejezetben odáig jutottunk, hogy ha nem is közvetlenül, de közvetve kísérletileg is minden bizonyított vagy legalábbis alátámasztott, s csak egyetlen lépés hiányzik, hogy élő rendszerek laboratóriumban is létrejöjjenek. Egyetlen lépés!

„Tudós:

Csak egy lépés az, ami hátra van.

Ádám:

De ezt az egy lépést, ki nem tevé:
Az nem tett semmit, nem tud semmit is,
A többi mind künn volt az udvaron,
A legszentebbe ép' ez egy vezetne. –
Oh, lesz-e, aki egykor megteszi?”

(MADÁCH: *Az ember tragédiája*)

Lesz-e, lesz-e, aki egykor megteszi? A Faustban megszületik a Homunculus, s ez Goethe szerint is az emberi tudás csúcsa:

„Kívánhatunk többet mi, s a világ?
Feltörve a titok pecsétje.”

Van hát recept rá? Lehet élőlényt, élő rendszert laboratóriumban, mesterségesen előállítani élettelen anyagból?

Receptek bőven születtek az idők folyamán. Oparin könyve nyomán két olyant idézünk ezek közül, amelyet neves természettudósok közöltek. Az első Paracelsustól származik a XVI. századból. Szerinte emberi spermiumot egy tökbe kell helyezni és meghatározott ideig különböző bonyolult műveleteket kell vele végezni. Ekkor egy igen apró emberke képződik, akinek – éppúgy, mint az anya szülte gyermeknek – megvan minden testrésze, csak ezek igen kis méretűek.

Paracelsus e receptje nagyon is tökéletes. A tök élőlény, s a spermium is élőtlől származik. Ez a recept – ha megvalósítható lenne is – nem oldaná meg az élőnek élettelenből történő szintézisét.

Valamivel jobb Van Helmont brüsszeli orvos mintegy évszázaddal későbből származó receptje. Erről Oparin így ír: „Mivel nemzési tényezőül az ő (Van Helmont) véleménye szerint emberi kigőzölgések szolgálhatnak, szennyes inget kell behelyezni valamilyen búzmagokat tartalmazó edénybe. 21 nap múlva a »fermentáció« megszűnik, és az ing kigőzölgései a búzaszemek kigőzölgéseivel keveredve élő egereket hoznak létre.”

Itt tehát az élet mesterséges létrehozásához már nincs közvetlen szükség más élő rendszerre, de még mindig szükség van azok „kigőzölgéseire”.

Egyetlen tévedéstől eltekintve természettudományosan is kifogástalan és biztosan eredményre vezető receptet adott az élő rendszereknek élettelenből való előállítására századunk közepén a híres angol biológus J. B. S. Haldane. Receptje így hangzik: „Végy egy bolygót némi szénnel és oxigénnel, sugározd be napsugárral és kozmikus sugárzással, és hagyd magára néhány száz millió évre.”

Az előző fejezet elolvasása után minden olvasó számára világos, hogy az oxigén jelenlététől eltekintve (amit hidrogénre és nitrogénre kell kicserélni) ez a recept tökéletes, természettudományos szempontból kifogástalan, és biztosan elvezet az élő rendszerek élettelenből történő keletkezéséhez. Csakhogy – enyhén szólva – kissé nehéz lenne laboratóriumban kivitelezni. Márpedig a tudománytörténet során ennél komolyabb recept nem született az élő rendszerek mesterséges előállítására.

De itt ismét azt kell mondanunk, amit az életkeletkezés tárgyalásánál hangoztattunk, hogy nem is születhetett. Élő rendszerek mesterséges előállításához legalább azt kell tudni, hogy mi az élet, mi annak lényege. Beszélő készülékekről évezredek óta álmodozik az emberiség – ilyen volt a bibliai frigyszekrény, az Iliászban Héphaisztosz aranyból készült szolgálói is beszélni tudtak –, de vajon készíthetett volna-e rádióvevő készüléket Leonardo da Vinci, aki igazán mindennel próbálkozott, ha egyszer ismeretlen volt a rádió lényege, a rádiózás elve?

Az élő rendszerek összehasonlíthatatlanul bonyolultabbak a rádiónál. *Mégis azt kell feltételeznünk, hogy az élő rendszerek előállítása, mesterséges szintézise egyszerűbb problémakör, mint a rádió kifejlesztése volt.* Tudom, ez megdöbbenő állítás. De gondoljuk meg, hogy magától, pusztán a külső körülmények hatására soha, semmilyen körülmények között nem keletkezett és nem keletkezhet rádió a természetben található anyagokból. Élő rendszerek viszont – mint arra Haldane idézett receptje is utal – a megfelelő körülmények között maguktól, spontán keletkeznek. *A megfelelő körülmények között az anyag törvényszerűen, magától szerveződik élő rendszerekké.* Élő rendszerek szintézise esetén tehát nem

kell különleges, bonyolult szerkezeteket összerakni; a körülményeket kell megteremteni s az élő rendszer magától összeáll. Megérezte ezt már Goethe is, ezért írhatta, hogy „a keverés a fontos, semmi más”. De ha ez így van, mi szükség a chemotonelméletre, és miért nem szintetizált eddig senki élő rendszereket?

Az egyetlen alapvető probléma a megfelelő szemlélet hiánya. A szerző szilárd meggyőződése, hogy az élő rendszerek mesterséges előállításához a tudomány mai fokán minden lényeges feltétel adott, az élő rendszerek mesterséges előállítása bármelyik jól felszerelt biokémiai laboratóriumban megvalósítható, s a szükséges részletek és vizsgálati módszerek kidolgozásához sem lenne néhány évnél többre szükség.

Ez korántsem a biológusok általános álláspontja, a szerző mindössze egyetlen kutatóról tud, aki a kézirat megírásának időpontjában ilyen irányú kísérleteket végez, munkájára még visszatérünk. E kutatón kívül még senki nem kísérelte meg élő rendszerek előállítását a modern tudomány módszereivel, s ennek egyszerű oka van: senkinek nincs elképzelése arról, hogyan kezdjen hozzá. Nincs elméleti háttér, amely megalapozná a hitet az ilyen irányú kísérletek sikerében vagy egyáltalán a realitásában.

E fejezet célja éppen az, hogy rámutasson: a chemotonelmélet reális elméleti hátteret ad az élő rendszerek mesterséges szintézisének megvalósításához, s hogy a chemotonelmélet alapján reális stratégiát lehet felvázolni nemcsak az élő rendszerek mesterséges előállítására, de a kísérletek sikere esetén a kapott rendszerek élő voltának ellenőrzésére is.

A szemléleti probléma azzal kezdődik, hogy milyen élő rendszert állítsunk elő. Több millió növény- és állatfaj ismeretes, melyiket válasszuk közülük? A szépirodalom persze, érthető okoknál fogva valami beszélő, gondolkodó, emberszerű lény, a homunculus előállításáról álmodozik, az ősnemzés körüli vitákban egerek, kígyók, békák, patkányok, férgek, legyek „születtek” az ilyen irányú kísérletek során. Spallanzaninak, majd Pasteurnak már csak a baktériumok és penészgombák spontán keletkezésének lehetetlenségét kellett kimutatnia. Nyilvánvaló, hogy az élő rendszerek szintézisét nem lehet a fejlett, bonyolult élőlények, egerek vagy különösen ember előállításával kezdeni. De nemcsak kezdeni nem lehet, folytatni sem, aligha fog valaha is sor kerülni ilyen soksejtű organizmusok vegyületekből történő laboratóriumi előállítására. Azért nem, mert ez az igény fel sem fog merülni.

Az élő mesterséges előállítása, élő rendszerek laboratóriumban történő szintézise ugyanis nem azt jelenti, ami ennek hallatára akár a nagyközönség, akár a szakemberek képzeletében megjelenik. Lehet, hogy lombikban fognak felnevelni megtermékenyített petesejtet, lehet, hogy megtermékenyítetlen petesejtből embert nevelnek majd, lehet, hogy eljön az idő, amikor nem petesejtből, hanem testi sejtekből teljesen azonos állatok vagy emberek százait, ezreit nevelik ki, lehet, hogy megoldják az állattenyésztés helyett a sertéscomb vagy marhafartő ipari reaktorokban történő tenyésztését, mindezek azonban nem élő rendszerek mesterséges szintézisét, hanem csak a már meglevő élő rendszerekkel történő biológiai manipulációt jelentik majd – amennyiben megvalósításukra a társadalmi igény felmerül. A ma természetben található élőlények élettelenből történő előállítása értelmetlen és céltalan lenne.

Közelebb kerülünk talán a kérdés megoldásához, ha megnézzük, hogy egyáltalán mi célja lehet élő rendszerek mesterséges szintézisének?

Gondolati levezetésünket célszerű egy, a kémiából kölcsönvett fogalomnak, a totálszintézis fogalmának ismertetésével kezdeni. Totálszintézis az, amikor egy vegyületet nem más vegyületekből, hanem közvetlenül az elemekből állítanak elő, például ha egy olyan nemi hormont, amelyiknek molekulája 60–80 atomot tartalmaz, közvetlenül szénből, hidrogénből és oxigénből szintetizálnak. Ez természetesen roppant bonyolult feladat a vegyész számára, százszorosan, ézerszeresen bonyolultabb és drágább, mint ha vegyületekből, könnyen elérhető, hasonló szerkezetű anyagokból kiindulva végeznék a szintézist. Szigorú értelemben vett totálszintézissel soha nem állítanak elő ipari méretekben bonyolultabb vegyületeket.

Mi értelme, célja van akkor mégis a totálszintézisnek?

A kémia egzaktságának előfeltétele a különböző vegyületek molekulaszerkezetének ismerete. A szerves kémia mintegy hárommillió ismert vegyülete elemi összetételében alig tér el egymástól, alkotó atomjaik szerveződési módja az, ami megkülönbözteti őket. Érthető, hogy a szerves kémia nem létezhetne a szerves molekulák szerkezetének ismerete nélkül. A szerkezet felderítésére sokféle módszert, illetve azok kombinációit alkalmazzák. Ezek segítségével a még elektronmikroszkóposan sem láthatóan kicsiny molekulák pontos szerkezeti modellje felállítható. A modell felállítása után azonban valahogyan kísérletileg igazolni kell, hogy a felállított modell helyes, ténylegesen megfelel a kutatott vegyület molekulaszerkezetének.

A totálszintézis ennek az igazolásnak a legbiztosabb módja. A kémia törvényszerűségeinek ismeretében ugyanis meghatározható, hogy hogyan kell az elemi alkotórészekből kiinduló szintézis egyes elemi lépéseit végrehajtani ahhoz, hogy a modellnek megfelelő vegyületet nyerjenek. Ha a modell alapján szintetizált vegyület az eredetileg kutatottal azonosnak bizonyul, akkor a felállított molekulaszerkezeti modell helyes.

A totálszintézisnek tehát nélkülözhetetlen fontosságú szerepe volt a szerves kémia tudományának kifejlesztésében. A gyakorlati kémiában azonban értelmetlen lenne a rovarirtó szert vagy mosószer ilyen értelmű totálszintézissel előállítani, amikor erre sokkal egyszerűbb, könnyebb és olcsóbb módszerek sokasága áll rendelkezésre.

Az élő rendszerek totálszintézisének – azaz élettelen anyagból történő előállításának – sem lehet más célja, mint az élő rendszerek feltételezett organizációs módjának igazolása, egyszerűen azért, mert egyéb célokra ennél egyszerűbb, könnyebb és olcsóbb természetes módszerek állnak rendelkezésre, olyanok, amelyeket a természet évmilliárdok alatt tökéletesített. A totálszintézishez azonban modell kell, amelynek alapján a totálszintézist végre lehet hajtani. A kémiai totálszintézishez az előállítandó vegyület molekulaszerkezeti modellje, az élő rendszerek totálszintéziséhez az élő rendszerek organizációs modellje. Itt kapcsolódik szorosan a chemotonelmélet az élő rendszerek mesterséges előállításához mint az eddigi egyetlen, élő rendszerekre felállított részletes organizációs modell. A totálszintézis stratégiáját csak megfelelő modell birtokában lehet kidolgozni, hiszen tudni kell, hogy mit akarunk szintetizálni, s annak milyen organizációs tulajdonságokkal kell rendelkeznie.

És itt talán érdemes rátérni annak a kutatónak a munkáira, akiről az előbbiekben említettük, hogy élő rendszereket akar szintetizálni. Az illető nem más, mint Sidney Fox amerikai professzor, aki először állított elő proteinoidokat aminosavak hevítésével, majd a körülmények változtatásával az említett mikrogömböket. E kísérletek úttörő jelentőségűek a kémiai evolúció és az életkeletkezés kutatása szempontjából.

A proteinoid mikrogömbök igen sok érdekes tulajdonsággal rendelkeznek. E tulajdonságok két csoportra oszthatók. Az első csoportba tartozó tulajdonságaik: kétdimenziós folyadékmembrán határolja őket, adott környezeti feltételek mellett létezik optimális gömbnagyság, amelyet mindegyik gömböcske igyekszik felvenni, a körülmények változásával osztódásra lehet őket kényszeríteni, membránképző proteinoidoldatban ezek a szülő gömböcske nagyságára nőnek, besugárzás hatására sarjak keletkeznek rajtuk, amelyek adott proteinoid jelenlétében megnövekednek, szelektíven engedik át membránjukon az anyagokat, belső anyagösszetételük eltér a külső tér összetételétől stb. Ezen tulajdonságok teljes mértékben megfelelnek a chemoton membránrendszer elméletileg levezetett tulajdonságainak.

A tulajdonságok másik csoportjába a primitív enzimaktivitás, a nukleinsavakkal való asszociáló képesség pedig egyértelműen a membrán anyagát alkotó bázisos proteinoidok makromolekuláris sajátosságaira vezethető vissza.

Fox professzor e mikrogömböket az utóbbi években az említett biológia jellegű tulajdonságok miatt élő rendszereknek tekinti, de nem ad meg olyan kritériumrendszert, aminek az alapján az élő és élettelen rendszerek egymástól elválaszthatók lennének. Az általunk felállított kritériumrendszert a Fox-féle mikrogömbök nem elégítik ki, mert nem folytatnak anyagcserét (növekedésük kész proteinoidok beépítésének eredménye, anyagait a rendszer nem maga állítja elő kémiai úton), nincs információs alrendszerük és (ennek következtében) nincs meg folyamataik belső vezéreltsége, az eseményeket a külső körülmények vezérlik stb. Viszont e Fox-féle proteinoid mikrogömbök strukturális és funkcionális tulajdonságaikban egyaránt megfelelnek a chemoton egyik alrendszerének, a membránrendszernek, és ezért *úgy is tekinthetők, mint a membránalrendszer mesterséges előállíthatóságának és az ősi körülmények közötti spontán keletkezésének kísérleti bizonyítékai.*

Tulajdonképpen Fox sem élő rendszereket akart szintetizálni, eredetileg azt kutatta, hogy abiogén úton keletkezhetnek-e fehérjejellegű vegyületek. E kísérletei közben véletlenül jutott el a proteinoid mikrogömbökhöz – ez is bizonyítja, hogy nagy valószínűsége van ilyen rendszerek spontán keletkezésének –, s csak közel egy évtizedes tanulmányozásuk után jutott arra a véleményre, hogy ezeket már élő rendszereknek lehet tekinteni. Ezt a véleményét azonban nem az élő rendszerek organizációs törvényeinek ismeretére, hanem csak a proteinoid mikrogömbök néhány biológiai jellegű tulajdonságára alapozza.

Most pedig térjünk rá az élő rendszerek totálszintézise stratégiájának körvonalazására a chemotonelmélet alapján. E szerint az élő rendszernek legalább három különböző alrendszert: az önreprodukáló körfolyamatrendszert, az információs alrendszert és a membránalrendszert kell tartalmaznia, ezek működésének megfelelő összekapcsolása automatikusan élő rendszert eredményez. Azt is mondtuk, hogy külön-külön az egyes alrendszerek spontán keletkezésének lehetősége, illetve előállíthatósága kísérletesen bi-

zonyított, s egyetlen lépés van hátra, ezek összekapcsolása egyetlen funkcionális szuper-rendszerre.

Ez az egyetlen lépés, „amit, ki nem tevé: az nem tett semmit, nem tud semmit is”. Valójában ez csak szerveződésileg egyetlen lépés, és természetesen szó sincs arról, hogy csak be kellene menni a laboratóriumba, a három alrendszert tartalmazó három lombik anyagát összeönteni, s máris kész az élet!

Mert a kísérletek csak azt bizonyították, hogy a szóban forgó típusú alrendszerek létrejöhetnek, de azt nem, hogy egymásnak megfelelő, egymással összekapcsolható alrendszerek jöhetnek létre! S hogy ez mennyire így van, emlékezzünk vissza: az önreprodukáló körfolyamatrendszerek abiogén szintézisére a *cukrok* autokatalitikus keletkezése volt a példa formaldehidből, a membránalrendszer e kísérletekben *proteinoidokból* épül fel, az információs rendszernek pedig *nukleotidokra* volt szüksége működéséhez és önreprodukciójához! Márpedig a három alrendszer működése csak akkor kapcsolható össze, ha az önreprodukáló körfolyamatrendszer termeli a másik kettő nyersanyagát!

Az élő rendszerek szintézise azon múlik, hogy sikerül-e három *megfelelő* alrendszert találni és működtetni. Ha igen, akkor még a közöttük levő kapcsolatok rendszerét is meg kell találni, hiszen egyrészt nem biztos, hogy az autokatalitikus körfolyamat a másik két rendszer nyersanyagát készre szintetizálja, lehet, hogy ehhez csak a kiindulási vegyületet hozza létre, másrészt pedig nem biztos, hogy a másik két alrendszer összes nyersanyagát maga az autokatalitikus körfolyamat termeli. A chemotonban e kapcsolatok csak azért voltak közvetlenek és egy-egy vegyülethez kötöttek, mert a chemoton az elvileg leegyszerűbb rendszer absztrakt modellje és egyáltalán nem szükséges, hogy a valóságban ezen elvileg leegyszerűbb formájában meg lehessen valósítani.

Feladatunk most tehát az, hogy rámutassunk, nem elképzelhetetlen három megfelelő, azaz összekapcsolható alrendszert találni. Célszerű a már kísérletileg működtetett rendszerekből kiindulni, mert van közöttük kettő, ami távoli rokonságban áll egymással. Ezek a formaldehidből kiinduló autokatalitikus cukorszintézis és a nukleinsavak templát-polimerizációja. A formaldehidből ugyanis 3–7 szénatomszámú cukrok keveréke keletkezik, közöttük az a ribóz is mint ötszénatomos cukor, amelyik a nukleinsavak templát-polimerizációjánál nyersanyagként szereplő nukleotidmolekulák egyik alkotórésze. E nukleotidok ugyanis a következő felépítésűek:

bázis–ribóz–foszfát.

A ribóz és a foszfát mindegyik ribonukleotidban ugyanaz, a bázis lehet adenin, guanin, citocin és uracil.

A ribózon keresztül tehát kapcsolat teremthető a két rendszer között: az autokatalitikus ciklus, amelyiknek nyersanyaga a formaldehid, termeli a ribózt, ebből pedig közvetítő lépcsőn keresztül keletkezik a templát-polimerizáció nyersanyaga, a nukleotid.

Viszont ha a nukleotidszintézis egyik lépcsőjében amúgy is foszfáttal reagál a cukor, az autokatalitikus ciklus kialakulhatna cukorfoszfátból is. Ennek van reális alapja, talán emlékeznek rá kedves olvasóim, hogy a Calvin-ciklus éppen ilyen cukorfoszfátok átalakulásain keresztül működik. Sőt belső komponenseinek egyike, a ribóz-5-foszfát éppen

az, amiből a mai élővilág rendszereiben is kiindul a nukleotidszintézis, így valóban természetes kapcsolatot teremtve a templátpolimerizáció és az autokatalitikus ciklus között.

Egy cukorfoszfátciklussal már a harmadik alrendszer is kapcsolatot találhat, ha a membrán nem proteinoidokból, hanem foszfolipidekből képződik: az élővilágban a foszfolipidek szintézise éppen a cukorfoszfát átalakulásoknál keletkező, úgynevezett acetilkoenzim-A-ból történik. És az élővilág membránjainak alapját a foszfolipidekből álló kettős rétegű, kétdimenziós folyadék tulajdonságú mátrix képezi.*

Lehet tehát találni három olyan alrendszert, amelyik elvileg összekapcsolható egyetlen rendszerré. Sőt a növényvilág épp e három alrendszer egybekapcsolásával működik: a növényi sejt a Calvin-ciklus révén építi be rendszerébe a tápanyagokat, a szén-dioxidot és a vizet, a Calvin-ciklusban keletkezett ribóz-foszfátból szintetizálja a nukleotidokat és a ciklusban keletkezett cukorfoszfátok egy részének lebontásával állítja elő a foszfolipideket. Íme a növényi sejt chemotonja!

Nem szabad azonban elfeledkezni arról, hogy mindez a növényi sejtben nagyon sokféle enzim közreműködésével, bonyolult enzimes szabályozás közben történik. Nincsenek kísérleti adatok arra vonatkozóan, hogy a Calvin-ciklus nem enzimesen, abiogén körülmények között működne. De ilyen irányú sikertelen kísérletekről sincsenek adatok. E területet alig vizsgálták, feltehetően azért, mert egy ilyen összetett rendszer cukorfoszfátjainak egymás melletti meghatározása a biokémia legnehezebb feladatainak egyike. Arra viszont, hogy cukorfoszfátok abiogén úton is képződhetnek, és hogy más cukorfoszfátokká is átalakulhatnak, már ismeretes az irodalomból.

De az élő rendszerek szintézisét mégsem a Calvin-ciklus abiogén megvalósításával kellene kezdeni. A fotoszintézis az élővilágnak késői találmánya, így egyáltalán nem biztos, hogy maga a Calvin-ciklus nem enzimes körülmények között megfelelően működethető. Amellett a legősibb sejteknek nem is volt szükségük fotoszintézisre: az ősi vizek bővelkedtek a kémiai evolúció során keletkezett nyersanyagokban, így az első élő rendszerek ezek lebontására alapozhatták működésüket.

A cukrok *lebontására* alapozva is lehet találni három összekapcsolható működésű alrendszert: ebben az esetben az autokatalitikus ciklus szerepét az adenzin említett autokatalitikus foszforilálása töltheti be, amelyik a cukorbontáshoz kapcsolódva (ennek abiogén lehetőségére utaló kísérletek ismeretesei) adenzin-trifoszfátot, azaz ATP-t termel. Az ATP az élő szervezetek általános foszforizáló szere. Minthogy szervesen kötött foszfátra mind a nukleinsav-templátpolimerizációnak, mind pedig a membránképző foszfolipidek képződésének szüksége van, ez esetben a „kereskedelmi” kapcsolatban a szervesen kötött foszfát lehet az „áru”, az autokatalitikus ATP-képződés pedig az „eladó”, a szállító. Ez az összekapcsolási forma is általánosan elterjedt az élővilágban.

Íme tehát, többféle elvi lehetőség körvonalait is fel tudtuk vázolni, amelyeken végigmenve talán élő rendszerek szintéziséhez el lehet jutni. Nem biztos, sőt nem is valószínű,

* A kézirat lezárása óta több tudományos közlemény számolt be formaldehidet és ammóniumcianátot tartalmazó oldatokban spontán membrán- és mikrogömbképződésről.

hogy pontosan ezek a rendszerek lesznek összekapcsolva az első mesterségesen előállított élő rendszerben, mégis a szerző úgy véli, hogy a legnagyobb valószínűsége annak van, hogy az autokatalitikus körfolyamatrendszer cukorfoszfátokból, a templátpolimerizáció nukleinsavakból, a membrán pedig foszfolipidekből épül majd fel.

Ezzel e fejezet célját elértük: rámutattunk az élő rendszerek mesterséges szintézisének, ha úgy tetszik „totálszintézisének” lehetőségeire. Ennyi az egész? Ilyen egyszerű? És ez élő rendszer? Gondolom, olvasóim most csalódottságot éreznek. Végül is ahhoz voltunk szokva, hogy az élő rendszerek előállításától homunculust várjunk.

Hogy is történt az atomenergia mesterséges felszabadítása? Miután az elvi lehetőségek tisztázódtak, Joliot-Curie-ék húsz nap (!) alatt végrehajtották a sikeres kísérleteket: megvalósították az atomok mesterséges átalakítását laboratóriumukban. Ám ezt nem kísérte látványos robbanás, iszonyatos hőmennyiség vagy valami egyéb látványos tünet. Mindössze arról volt szó, hogy a legfinomabb módszerekkel iszonyatosan kis mennyiségű foszforatom jelenlétét sikerült kimutatni a preparátumaikban. Mégis a tudósok ebből már tudták, hogy a technikai és tudományos lehetőségek hallatlan távlatai nyíltak meg. És alig egy évtized múlva működésbe helyezték az első atommáglyát, és felrobbantották az első atombombát...

A CHEMOTONELMÉLETBŐL KÖVETKEZIK: AZ EGZAKT ELMÉLETI BIOLÓGIA LEHETŐSÉGE

Valamilyen formában az előző fejezetek mindegyikében az étellel foglalkoztunk, mégis azt kell mondani, hogy valójában ez nem biológia, még csak nem is elméleti biológia volt. Mindaz, ami idáig szerepelt, beleértve az ételkeletkezést, és az élő rendszerek mesterséges előállítását is, csak alapozás ahhoz, hogy egy egzakt elméleti biológia kifejlődhessék. Mert mi is a biológia? Az élőlényekkel, az élővilággal foglalkozó tudomány. Levezetéseinkben viszont legfeljebb példaképpen emlegettünk olyan rendszereket, amelyek élővilágunkban ténylegesen megtalálhatók. De reméljük, hogy az eddigiek valóban alapot szolgáltatnak olyan, matematikailag abszolút pontossággal leírható további modellek kifejlesztéséhez, amelyek az élővilág bonyolultabb rendszereit tudják tükrözni, és amelyek segítségével a valós biológiai jelenségek a szükséges pontossággal tárgyalhatók. Ez a fejezet éppen ennek a lehetőségére kívánna rámutatni.

De csak a lehetőségére. Az elméleti biológia mint tudomány ugyanis még nem fejlődött ki, s kifejlesztése – természetesen – nem lehet egyetlen ember feladata. Már az eddigiek is nagyon sokféle irányú ismereteket követeltek, fizikát, kémiát, termodinamikát, kibernetikát stb., így természetesen ezek ismerete is meghaladja egyetlen ember kapacitását. S bár az eddigi levezetések – a kooperációban végzett számítógépes szimulációs munkák kivételével – a szerző saját kutatási eredményeiről szóltak, mégis, minden fejezet mögött többé-kevésbé egzakt levezetések húzódnak meg. Természetesen ez csak azért lehetséges, mert a szerző mindenütt megelégedett az alapok lerakásával, az alapelvek lefektetésével, és nem kívánta az egyes problémaköröket a maguk teljességében kidolgozni, például nem kívánta a lágy automaták elméletét kibernetikai alapokon vagy az akkumulációs rendszerek stabilitáselméletét irreverzibilis termodinamikai alapokon részleteiben is kifejleszteni. Ez már nem lehet a szerző feladata, ha érdemes vagy szükséges lesz, ezt kibernetikai vagy termodinamikai alapképzettségű szakemberek az idők folyamán úgyis elvégzik majd.

Ebben a fejezetben viszont csupa olyan téma vetődik majd fel, amelyek a kézirat megírásának időpontjában nincsenek kidolgozva. Egyesek közülük vázlatosan ki vannak már fejtve, mint például a gondolkodó és tanuló lágy rendszerek (agy) működési alapelvei, másoknál, mint például az eukarióta sejtmodell levezetésénél csak az utakat látja részletesebben a szerző, amelyeken majd a levezetés során végig kell haladni, ismét mások csak remények, ahol a megoldás reális lehetőségeire mindössze biztató jelek mutatkoznak.

Mínthogy azonban a végcél az egzakt elméleti biológia kifejlesztése, talán megbo csátja az olvasó, ha e fejezetben röviden tömörítve ezek ismertetésére is sor kerül, annál

is inkább, mert ez talán egyeseket arra fog ösztönözni, hogy ezen utak egyikén-másikán önállóan próbáljanak végighaladni, újabb részeket emelve ezáltal az elméleti biológia most növvő épületén.

Kétségtelen, hogy a mai élővilág leírásához az enzimes szabályozás is hozzátartozik. A chemotonelméletben eddig ennek semmi szerepe nem volt, ezért is nem neveztük a chemotonokat sejteknek, még őssejteknek, elősejteknek vagy protosejteknek sem. De a chemoton + enzimes szabályozás bizony már a legteljesebb mértékben azonos a sejt modelljével. Hogyan lehet a chemoton modelljébe az enzimes szabályozást beépíteni?

Az információhordozó alrendszer tárgyalásánál említettük, hogy információt lehet a jelek mennyiségével, két vagy többféle jel egymáshoz viszonyított mennyiségi arányával és jelek sorrendjével tárolni. Az egyszerű chemotonban a jelek mennyisége tárolta az információkat, a mutatív chemotonban kétféle (vagy négyféle) jel egymáshoz viszonyított aránya.

Bár a jelek sorrendjének a mutatív chemotonban nem volt szerepe, a templátpolimerizáció mechanizmusa miatt a jelek sorrendje az utódmolekulában megegyezik a mintamolekuláéval. Egy mutatív chemoton utódai tehát mindig egyforma jelsorrendet, s ha ez a jelsorrend információt takar – azonos információkat tartalmaznak. *A mutatív chemoton tehát rendelkezik egy kihasználatlan képességgel: a jelsorrenddel történő végtelen kapacitású információtárolás képességével.*

Nem kell túl nagy fantázia ahhoz, hogy rájöjjenek, ez az a pont, ahol az enzimes szabályozás becsatlakoztatható. A mutatív chemoton tehát maga kínálja: íme itt egy kihasználatlan képesség, amit be kell tölteni. A természet ezt betöltötte, az enzimes szabályozás éppen a genetikai anyag, a DNS jelsorrendje alapján jön létre, a jelsorrend segítségével működik. Ennek a résznek az egzakt modelljét kell kidolgozni, és a chemoton modellbe illeszteni, és készen van az élő sejt teljes egzakt modellje.* De ezen az úton még senki nem ment végig.

Az enzimes szabályozás modelljének kidolgozása nem előfeltétele a bonyolultabb biológiai rendszerek modelljei kidolgozásának. Ismét ki kell hangsúlyozni: az enzimek csak szabályoznak, s a tulajdonságok végső soron attól függnek, hogy az egyes folyamatok, az egyes kémiai reakciók végbemehetnek-e a szervezetben vagy sem. Így a rendszer tulajdonságainak vizsgálatánál (ha nem éppen az enzimes szabályozással közvetlenül kapcsolatos tulajdonságokra vagyunk kíváncsiak) elég a reakcióhálózatok tulajdonságainak vizsgálata, elég a reakcióhálózatok tulajdonságait figyelembe venni.

A bonyolultabb biológiai rendszerek felé való továbblépéshez célszerű egy kissé ismét visszakanyarodni a totálszintézis fogalmához, annál is inkább, mert most már értelmezni tudjuk majd azt a korábban kategorikusnak és megalapozatlannak tűnő állításunkat, miszerint nem fog felmerülni az igény a bonyolultabb élőlények élettelenből történő mesterséges előállítására.

A totálszintézis fogalmát kémiaiilag úgy értelmeztük, hogy valamely vegyületet közvetlenül elemeiből szintetizálunk. Eredetileg valóban ezt értették totálszintézisen, az idők

* Az enzimes szabályozás beépítése a prokarióta sejtek mérlegegyenleteibe a kézirat lezárása után megvalósult.

folyamán azonban e kifejezés értelme kissé módosult. A totálszintézisek esetében ma már nem szükséges a szintézist minden esetben valóban a vegyületet alkotó elemekből végrehajtani, elegendő, ha olyan egyszerű vegyületekből indul a szintézis, amelyek totálszintézisét mások már végrehajtották. Így például ha valaki a cellulózt akarja szintetizálni szerkezetbizonyítási céllal, nem szükséges azt közvetlenül szénből, hidrogénből és oxigénből előállítani, elegendő, ha szőlőcukorból végzi a szintézist, hiszen a cellulóz szőlőcukor-molekulákból épül fel, s a szőlőcukor totálszintézisét már elvégezték mások. Olyan ez, mint egy geometriai tétel bizonyítása: az állítást ott sem szükséges az axiómákra, elég valamely másik, már ismert és bizonyított tételre visszavezetni.

A bonyolultabb biológiai rendszerek egyszerűbb biológiai rendszerekből mint elemekből szerveződnek az organizációs hierarchia magasabb fokain álló rendszerekké: az eukarióta sejt néhányféle prokarióta sejtéből, a soksejtű organizmus sok milliárd darab, de ugyancsak néhányféle eukarióta sejtéből, az állatközösségek, rovarállamok néhány száz vagy néhány ezer, de ugyancsak néhányféle soksejtű állatból szerveződnek rendre magasabb hierarchiájú, de egységes rendszerekké.

Éppen ezért ha valaki egyszer majd eukarióta szintű rendszer „totálszintézisét” akarja megoldani, nem szükséges az élettelen anyagból végeznie, elég prokariótákból tennie, amennyiben a prokarióta rendszerek élettelenből történő előállítását egyébként már elvégezték. Amíg a prokarióta szintű rendszerek szintézise nem megoldott, addig eukariótát sem lehet „totálszintézissel” előállítani, ha pedig megoldott, akkor felesleges, hiszen a prokariótaszintézis úgyszólván közbenső fázisa lenne az eukarióták szintézisének. És hasonló módon, ha valaki soksejtű organizmust akar előállítani, azt nem kémiai vegyületekből, hanem eukarióta sejtekből kell végeznie. Ezt pedig lényegében már meg is tették a biológusok, amikor egyetlen testi (úgynevezett szomatikus) sejtéből teljes növényt és állatot neveltek fel.

Most már talán érthető, miért lehetett olyan kategorikusan kijelenteni, hogy soha nem fog felmerülni az igény soksejtű organizmusok, állatok vagy emberek élettelenből történő előállítására. Egyszerűen arról van szó, hogy *élettelenből csak prokarióta szintű rendszereket lehet előállítani, mert az eukarióták előállítása már csak prokariótákból, tehát már élő rendszerekből történhet, és ugyanígy a soksejtűek előállítása eukarióta sejtekből, amelyek nemcsak, hogy élnek, de maguk is már élő rendszerekből épülnek fel.* Ezek a „szintézisek” tehát már nem élettelenből történő előállítások, hanem biológiai műveletek, hiszen már a prokarióták is minden kétséget kizáróan tisztán és teljesen a biológia területéhez tartoznak.

A chemotonelméletnek a bonyolultabb biológiai rendszerek felé való kiterjesztéséhez célszerű ugyanezen gondolatmenet alapján elindulni. Maga a chemoton egy teljesen általános modell, az enzim szabályozást leszámítva mindenféle prokarióta sejt működésének alapját magában hordozza. De éppen általánossága teszi lehetővé, hogy belőle sokféle konkrét chemotonmodell legyen leszármaztatható: hogy most már a földi élővilág példáinál maradjunk, olyan, amelyiknek az önreprodukáló körfolyamatrendszere kész szerves anyagok fermentatív lebontásán alapszik, olyan, amelyiknek az önreprodukáló körfolyamatrendszere CO_2 beépítését tudja végezni fényenergia segítségével, vagy épenséggel a szerves anyag átalakítását CO_2 -dá levegő oxigénje segítségével, vagy olyan

konkrét chemotonmodell, amelyik a tápanyag energiáját nem *csak* kémiai munkavégzésre, hanem mechanikai mozgásra is fel tudja használni, mert ebben az irányban is történt már némi előrelépés.

Nem nehéz észrevenni, hogy ezek a chemotonmodellek már nem mások, mint a különböző anyagcsere-típusú, vagyis fermentatív, oxidatív, fotoszintetikus és mozgásra képes prokarióta sejtek konkrét modelljei. Márpedig az eukarióta sejt éppen úgy született, hogy különböző típusú ilyen prokarióta sejtek léptek „kereskedelmi” kapcsolatba egymással. Az eukarióta sejt egzakt modelljének felállításánál tehát nem kell mást tenni, mint a különböző típusú prokarióta modelleket egyesíteni, egyetlen rendszerbe szervezni, hasonlóképpen, mint ahogyan a három alrendszert szerveztük egyetlen „szuperrendszerre”, a chemotonná.

Az eukariótáktól a soksejtű organizmusokig vezető utat a modellképzés szempontjából célszerű két lépcsőre bontani és először a szervek modelljét kidolgozni, majd ezeket egyesíteni a soksejtű organizmus modelljévé. Első lépésként itt is a legegyszerűbb szerv modelljét célszerű kidolgozni. Legyen az a szerv az agy.

Nem, a szerző nem „ugratni” akarja a kedves olvasót. Jól tudja, hogy az agyat mindenki a biológia legbonyolultabban organizált, legmagasabb fejlettségű szervének tekinti, nyilván azért, mert olyant képes produkálni, a gondolkodást, amely gondolkodásnak a mechanizmusát a tudomány jelenleg nem tudja magyarázni.

Biológiai oldalról vizsgálva azonban másképp áll a helyzet. Tessék összehasonlítani az agy feladatait például a bőr vagy a vese feladataival. Hányféle behatás éri a bőrt? Reagálnia kell a hidegre, melegre, nyomásra, sugárzásra, nedvességtartalomra, levegő-összetételre, kiválasztania kell, védekeznie fertőzések ellen, regenerálnia, és még ki tudja, hányféle funkciót ellátnia. A vesének ezerféle vegyület kiválasztását külön-külön szabályoznia, az egyes ionokra külön-külön koncentrációsabályozást végeznie, fertőzések ellen védekeznie stb.

Ezzel szemben az agy? Külön pánccal van körülvéve, a külvilág káros hatásaitól elzárva, semmire nem kell reagálnia, nem kell védekeznie, sőt kifejlődése után neuron-sejtjeinek még szaporodniuk sem kell. Strukturális organizációja akár az izomszövet rendezettségéhez képest is a tökéletes káosz képét mutatja, s hogy ez nem valami „agyondeterminált” szuperstrukturát takar, arra az utal, hogy – némi túlzással – akár turkálni lehet benne, különösebben tragikus következmények nélkül.

Egyetlen feladata van: az idegpályákon futó elektromos jelekkel történő manipuláció, azok fogadása, feldolgozása, kibocsátása. Persze ez az „egyetlen” feladat azért korántsem mondható egyszerűnek. Nem is feladat ez, hanem feladatkör, amelyen belül *az agynak végtelen sok és mindig újabb és újabb feladatot kell megoldania*. Olyan sok, hogy mindre külön-külön anyag vagy külön-külön mechanizmus nem képzelhető el. És éppen ez segít a megoldáshoz: *az agyműködés alapelvét nem valamely információtároló anyagban, hanem a jelek variálhatóságában kell keresni*.

Ez az elvi alapja annak, hogy az agyműködést a chemotonelméletből le lehessen vezetni. A segítség pedig az, hogy az agysejteknek nem kell ezerféle külső változásra reagálniuk, elég, ha egyre, a beérkező elektromos jelre képesek reagálni. Így viszonylag könnyen

felállítható olyan specializált chemotonmodell, amelynek most már nem az a speciális tulajdonsága, hogy fermentatív vagy oxidatív anyagcserét végez vagy mechanikus mozgásra képes, hanem az, hogy a neuronok funkcióját képes ellátni. És hasonló módon kifejleszthető egy másik chemotonvariáció, amelyiknek az a specialitása, hogy a másik agysejtípus, az úgynevezett gliasejtek funkcióját tudják ellátni.

Aztán már nem kell mást tenni, mint a jól bevált recept szerint „kereskedelmi” kapcsolatot létesíteni a neuron-chemotonok halmaza és a glia-chemotonok halmaza között. És ahogy annak idején a chemoton vezetésénél a három alrendszer egyesítése automatikusan olyan rendszert eredményezett, amelynek meglepő új minőségi tulajdonságait úgy foglalhattuk össze egyetlen szóban, hogy él, itt, a neuron- és glia-chemotonok halmazainak egyesítésénél olyan új rendszer jön létre, amelynek meglepő új minőségi tulajdonságait úgy foglalhatjuk össze, hogy tanul és gondolkodik.

Mindenekelőtt tanul, tanul és tanul. Tanulás közben alakul, változik. Azután egyes tanult dolgok kezdenek háttérbe szorulni: kezd felejteni. Teljesen soha nem felejt el semmit. Valamit megtanulni sokszoros ismétléssel képes, de ha egyetlen nagy, erős behatás éri, azt soha nem felejt el. Képes álmodni. Képes meghülyülni, sőt megoldhatatlan helyzetekkel meg lehet őrizteni. Kialakulhatnak rögeszméi. „Elmezavarait” elektrosokk-kezeléssel bizonyos esetekben gyógyítani lehet. „Gondolkodása” korával egyre merevebbé válik, fellép nála a „szenilitás”. Ebben az állapotban egyre inkább „fiatalkori” tapasztalatai kerülnek felszínre, de összefüggéstelenül. Katasztrófa helyzetekben egyetlen pillanat alatt mindenre egyszerre képes emlékezni, amit „életében” tapasztalt stb.

Mindezek a tulajdonságok spontán következnek a modellből. Az olvasó talán megbocsátja a szerzőnek, hogy itt nem részletezi a modellt. E sorok írásakor ugyanis a modell már „kézben van”, a részletek kidolgozása és bizonyítása folyik. Nem biztos még, de valószínű, hogy az agy is ilyen alapon működik. De ha nem, ez akkor is a tanuló és gondolkodó lágy automaták részletes modellje. A szerző szeretné remélni, hogy mire e könyv az olvasóhoz kerül, e modell részletes szakmai publikációja is megtörténik, s az olvasó más forrásokból a részletekről is tudomást szerezhet.*

A szervek modelljeiből a soksejtű organizmus modelljéhez még az első gondolati lépések sem történtek meg. De szabad az út, hiszen a recept adott: a szervek modelljei között kell a „kereskedelmi” kapcsolatot megtalálni.

Ezzel utunk végéhez értünk. A molekuláktól a soksejtű organizmusokig jutottunk, felvázolva egy egzakt elméleti biológia lehetőségét. Tovább is lehet és kell is majd menni az életközösségek és az élővilág egésze felé, de ez már a jövő feladata. Ebben a könyvben a szerzőnek egyetlen feladata van már csak hátra: eddig logikájának biztosított egyeduralmat, most át kell adnia a szót lelkiismeretének. Övé a következő, egyben utolsó fejezet.

* A modell alapszintű kidolgozása megtörtént, és a *Chemoton elmélet* című monográfia I. kötetében mint Cogitator modellt publikálta a szerző 1984-ben.

A BIOLÓGUS FELELŐSSÉGE

A tudomány és technika történetén végigpillantva úgy tűnhet, hogy az emberiség haladása, a tudományok fejlődése nem megy tragédiák nélkül. Emléktáblákon, könyvekben örökítették meg a sarkkutatások, a magas hegyek, barlangok, tenger alatti mélységek kutatásának áldozatait. A radioaktív és röntgensugárzás tudós áldozatainak neveit – több mint kétszáz nevet – a hamburgi Szent György Kórház kertjében felállított emlékoszlop őrzi. A kémia fejlődésének áldozatait, a robbanások, mérgezések, sav-lúg marások, megégések áldozatainak neveit aligha lehetne ma már összegyűjteni. Külön könyvet lehetne írni a repülés fejlődésének áldozatairól, s ki tartja ma már számon az elektromosság kutatásának és használatbavételének sok-sok áldozatát?

Ebben a könyvben fantasztikusnak tűnő új lehetőségek nyíltak meg, olyanok, amelyek még a tudományos-fantasztikus írók szokásos témajegyzékében is alig szerepelnek, mint az élő rendszerek szintézise, a lágy automaták készítése vagy a tanuló és gondolkodó lágy rendszerek kifejlesztése. Ráadásul e könyvben nemcsak mint gondolati lehetőségek jelentkeztek, de megvalósításuk útjai is fel lettek vázolva. Hová vezet mindez, hol fog visszaütni, milyen katasztrófális lehetőségek bújnak meg mögötte? Szabad-e ezen az úton végigmenni, vagy kell talán? Mindezek a gondolatok nemcsak az olvasóban, a szerzőben is felmerültek.

A biológiai manipuláció a chemotonelmélettől függetlenül elkezdődött. Amikor az ember háziasított egyes állatokat, megtanulta és alkalmazta a növénynemesítés fortélyait vagy az első gyógyszert kezdte használni, akkor már a biológiai manipuláció útjára lépett. Nem tudatosan, hiszen az „ártalmak” egyes emberekre terjedtek csak ki, s a kár eltörpült a haszon nagysága mellett. Sőt a kárt legtöbbször észre sem vették, legalábbis okát nem gyanították. De napjainkra a biológiai manipuláció a születésszabályozástól a környezeti egyensúly felborulásáig, a biológia úgyszólván minden szintjén óriási méreteket öltött. Ezekre itt még röviden sem térhetünk ki, aki netán keveset hallott volna róluk, olvassa el Taylor: *Biológiai pokolgép*, Sárkány: *Biológiai iparok*, Csaba-Vörös: *Ma és Holnap* vagy Kovács: *A jövő kritikus elágazási pontjai* című könyvét, vagy más, e tárgyban magyarul is megjelent könyveket.

A biológiai manipulációkkal kapcsolatosan eddig jelentkezett vagy potenciálisan felismert veszélyek azonban mintha valahogyan *minőségileg* mások, *veszélyesebbek*, *fenyegetőbbek* lennének az emberi civilizáció és technika által létrehozott veszélyforrásoknál. Elméletileg utána lehet gondolni: ez valóban így is van. A minőségi különbséget két tényező okozza: az irreverzibilitási tényező és az időtényező. Mit értsünk ezeken?

A chemotonelmélet alapgondolatai 1952-ben születtek abból a felismerésből, hogy minden élő rendszerben két alapvető és egymásnak ellentmondó tulajdonság érvényesül. Az egyik, hogy az élőlénynek örökké egyensúlyoznia kell a környezet változásaival szemben, örökké kompenzálnia kell azokat, a másik pedig hogy minden élőlényben megtalálható az események egy, ugyanabban az egyedben soha meg nem ismétlődő és vissza soha nem fordítható folyamata, ami például az egyed fejlődésében, a szaporodásban stb. nyilvánul meg. Mivel az egyik megfordítható (reverzibilis, de nem feltétlenül a termodinamikai fogalomhasználat értelmében), a másik pedig meg nem fordítható (irreverzibilis, ismét nem termodinamikai értelemben) eseményekhez kell, hogy kötődjön, így egymást kizárják, a két tulajdonságért két, eltérő mechanizmussal működő részrendszer kell, hogy felelős legyen. Az egyik az egyensúlyi rendszer nevet kapta, később ez lett a homeosztatisz alrendszer, az önreprodukáló körfolyamatrendszer, a másik pedig annak idején főként néven szerepelt (az 1966-ban megjelent *Forradalom az élet kutatásában* című könyvemben még így vannak jelölve), s ez realizálódott az információs alrendszerben.

Azok a természetes vagy mesterséges hatások, amelyek az élő rendszerek homeosztatisz alrendszerre hatnak – ha a kompenzálhatóság határain belül marad nagyságuk – nem okoznak maradandó változást az élő rendszerben. Azok a hatások viszont, amelyek akár közvetve, akár közvetlenül az információs rendszerre hatnak, éppen működésének irreverzibilis, vissza nem fordítható volta miatt maradandó, az élővilág szempontjából vissza nem csinálható változásokhoz vehetnek.

Igen, a genetika ismeri a back-mutáció fogalmát, amikor valamely mutációs változás „visszamutálódik”. Csakhogy ez éppen kicsiny valószínűsége miatt a természetben csak a sokadik generáció egy-egy egyedében jelentkezik, s ez nem tudja meg nem történné tenni azt a tényt, hogy közben a mutáns egyedek esetleg megszámlálhatatlan sokasága szaporodott el és került kölcsönhatásba az élővilág többi tagjaival.

Az a tény, hogy az élővilág alapegységei egyirányú, megfordíthatatlan eseménysorozatot hordoznak magukban, már szükségszerűvé teszi, hogy a belőlük felépülő hierarchia magasabb fokán álló rendszerek is hordozzanak ilyen egyirányú programokat: az eukarióta sejtben a mitózis, a soksejtű organizmusban az egyedfejlődés, azaz a növekedés és differenciálódás, az élővilág szintjén az evolúció mutatja ezt legszembetűnőbben.

És itt egy óriási és alapvető elvi különbség van az élő- és élettelen világ között. Az élettelen rendszerek állapotát a külső körülmények teljesen egyértelműen megszabják, a termodinamika nagy felismerése ez, a felismerés nyomán született meg az állapotathározók fogalma. Az állapotathározók (nyomás, hőmérséklet, térfogat stb.) értékének ismeretében – kevés kivételtől eltekintve – egy élettelen rendszer állapota egyértelműen meghatározható.

Az élővilágra ez így nem érvényes. Természetesen az állapotathározók itt is befolyásolják az eseményeket, behatárolják a lehetőségeket, de ezeken kívül behatároló tényezőként jelentkezik minden olyan esemény is, amely egyrészt saját és elődei végtelen sorozatának információs alrendszerében változást okozott, másrészt, amely a saját elődeinek nem tekinthető, de vele vagy elődeivel kölcsönhatásba kerülő többi élő rendszer információs alrendszerében okozott változást. Egy mondatban megfogalmazva *az élővilág*

állapotát a külső körülmények és saját előtörténete együttesen határozzák meg. Ha valami kozmikus méretű kísérletben például Földünk fejlődését teljes pontossággal reprodukálni lehetne, az élővilág e kísérletben nem pontosan a tényleges földi evolúciót követné, mert az információs alrendszerek változásaiban a véletlenszerű események lényeges szerepet játszanak, s minden egyes ilyen esemény kitörölhetetlenül jelentkezik a leszármazottak végtelen sokaságában.

Tulajdonságainkat nem csak az szabja meg, hogy milyen volt apánk, vagy hogyan választott párt magának nagyapánk, de az is, hogy mi történt az ősamőbákkal vagy az ősi kékalgákkal hárommilliárd évvel ezelőtt. És nemcsak azon keresztül, ami a genetikai állományunkba van írva, hanem azon keresztül is, ami a többi élőlény genetikai állományába íródott. Nem közömbös a rénszarvas számára, hogy mit tartalmaz a zuzmók genetikai állománya, de az sem, hogy mit a farkasé.

Ezt nevezem irreverzibilitási tényezőnek. Ez az élettelen világban nincs meg, vagy csak lényegtelen kivételként található, az élővilágban viszont alapvetően meghatározó faktor. Ez az a tényező, ami a biológiai manipulációt minőségileg mássá, összehasonlíthatatlanul veszélyesebbé teszi minden élettelen rendszeren végzett manipulációnál. Ez utóbbiaknál létre lehet hozni katasztrofális eseményeket, de itt minden rossznak vége szakad egyszer. Az élővilágban semminek nem szakad vége, sem a jónak, sem a rossznak, minden, az irreverzibilis folyamatokra ható esemény továbbgyűrűzik mindaddig, amíg élővilág egyáltalán létezik. Ezeknek az eseményeknek nem szakad vége, hatásuk gyakorlatilag vég nélküli.

A másik tényező kevésbé alapvető, de nem kevésbé veszélyes. Az élettelen világban a hatásra a visszahatás általában azonnal vagy rövid időn belül bekövetkezik: ha étergőzben gyufát gyújtunk, az azonnal felrobban, ha a hidat túlterheljük, azonnal leszakad. Lehet, hogy az *egyes* katasztrófákat talán épp ezért nem lehet elkerülni, de az ismétlődéseket igen, mert a visszahatásról tudomást szerzünk.

A biológiában már a közvetlen hatás is késleltetve jelentkezik: a közönséges fertőzésnek vagy mérgezésnek is van néhány órási vagy néhány napos (esetleg hónapos vagy éves) lappangási ideje. A genetikai állományt, az információs alrendszert ért károsodás közvetlen hatása viszont leghamarabb a következő generációban, esetleg csak sokkal később jelentkezik. Az ember esetében ez évtizedeket jelent.

A közvetett hatások már evolúciós jellegűek, ezek csak évszázadok, évezredek múltán vagy még később jelentkeznek csak. Így ezekről a hatásokról nem szerethetünk tudomást! Fel kell ismerni, hogy ma már szinte minden tevékenységünkkel olyan hatásokat hozunk létre, amelyek évmilliókon keresztül kísérik örökségként – és sajnos nagy valószínűséggel átkos örökségként – az élővilág további fejlődését.

Az ember fajának történelme során hozzászokott ahhoz, hogy csak a jelen létezik számára, a múlt már csak a kultúra kialakulásával került úgy-ahogy előtérbe. A jövő viszont századunkig legfeljebb néhány évtizedet jelentett, s amiatt is úgyszólván csak az uralkodóknak kellett fájjon a feje.

Most viszont minőségileg más korszakba értünk. Tevékenységünkkel brutálisan és vakon szólunk bele a jövőbe, s ez a jövő többé nem egy-két évtizedet jelent, hanem a

teljes jövőt, nemcsak az ember, de az élővilág teljes jövőjét. *Az ember ma tevékenységével jobban befolyásolja jövőjét, mint a jelenét.* Többé nem élettelen környezetünket módosítjuk, nem egy-egy szarvast ejtünk el, hogy jóllakjunk: az egész élővilág visszafordíthatatlan, irreverzibilis folyamatait befolyásoljuk, akarva és akaratlanul, de mindenképpen tudatlanul. Ezt a beavatkozást már nem lehet meggátolni: a társadalmi fejlődés éppúgy irreverzibilis, megfordíthatatlan, előrehaladó folyamat, mint az élővilág fejlődése, és ez sem véletlen. Ahogy az információs alrendszer irreverzibilitása megköveteli a chemoton irreverzibilitását, ez a prokarióta sejtét, a prokarióta az eukariótáét, az eukarióta sejt irreverzibilitása a soksejtű organizmusét és ez az egész élővilág irreverzibilitását, amit evolúciónak nevezünk, úgy az ember irreverzibilitása magában hordozza a társadalom irreverzibilitását, fejlődését.

Nincs hát visszaút? Nincs. *Az embernek és az emberi társadalomnak haladnia kell. Nem lehet nem „manipulálni”.* Ám a manipulációkból nem szükségszerűen következnek a katasztrófák. S bár a tudománytörténet tapasztalataiból úgy tűnik, mintha az emberi tudás fejlődése csak kudarcokon, baleseteken és katasztrófákon keresztül valósulhatna meg, ez nincs így. Valóságos példánk van rá, hogy a katasztrófákat el lehet kerülni.

Ez a példa az atomenergia felszabadítása. Aligha kell bizonygatni, hogy az atomenergia hasznosítása potenciálisan mennyivel nagyobb katasztrófák lehetőségét hordja magában, mint a korábbi katasztrófa-lehetőségek, mondjuk, mint a nitroglicerin előállítás. *De az atomtechnika kifejlesztése során egyetlen katasztrófális tévedés sem történt!* Azért, mert – a tudománytörténet során talán először – *előbb született meg az egzakt elmélet, amely minőségileg és mennyiségileg pontosan, előre képes volt meghatározni a következő eseményeket és a szükséges feltételeket, s csak utána került sor gyakorlati alkalmazására.* A gyakorlati alkalmazás idejére az atomfizika két oldalról – a kvantummechanika és a statisztikus mechanika oldaláról is – jól kidolgozott, alaposan ellenőrzött, a gyakorlati felhasználásra is alkalmas elmélet volt.

A biológia ma még elsősorban kísérletes és leíró tudomány. Nincs olyan elméletrendszer, amelynek segítségével mennyiségileg és minőségileg le tudná írni a biológiai folyamatokat, a sejtek, a soksejtű organizmusok, az életközösségek vagy az élővilág egészének válaszait az őket ért külső vagy belső hatásokra. A biológia egyes területein ugyan születnek már részfolyamatokra vonatkozó, gyümölcsözőnek bizonyult elméleti modellek, mint az öröklődés Watson–Crick-modellje, vagy a sejten belüli szabályozás különböző részleteire vonatkozó modellek. Ezek egyrészt nem képesek mennyiségi leírást, előrejelzést adni, másrészt csak a részfolyamatokra vonatkoznak. Az élővilág azonban nem részélőlényekből áll. Az élőlények, életközösségek egészének a válaszát kell ismerni ahhoz, hogy tudjuk, milyen beavatkozásnak mi lesz a következménye.

Aligha lehet tehát fontosabb feladatunk ma a biológusoknak, mint az egzakt elméleti biológia megteremtése. Nem valamiféle szószátyárkodó, filozofálgató, elméletieskedő biológiára, hanem olyan *egzakt biológiai modellrendszerre van szükség, amelynek tulajdonságai abszolút pontossággal leírhatók, s amelynek segítségével a valós biológiai jelenségek a szükséges pontossággal közelíthetők.*

Nem véletlen, hogy az atomenergia felszabadításánál a gyakorlati végrehajtást megelőzte az egzakt elméletek kidolgozása: a tudománytörténet során először történt meg

ugyanis, hogy a kutatások nemzeti jövedelem nagyságrendű összegeket igényeltek, s a hatalmas összegeket próbálkozásokra nem lehetett előteremteni, „biztosra kellett menni”. Nem a katasztrófáktól való félelem, nem a jövőért való aggodás volt tehát az, ami az elméletet a gyakorlat elé helyezte.

Sajnos a biológiánál fordított a helyzet. Itt nem a biológiai manipulációk végrehajtása, de sok esetben, mint például a környezetszennyezésnél éppen azok elkerülése igényli a hallatlan nagyságrendű összegeket. Így az elméleti biológia kidolgozását nem közvetlen anyagi érdekek hajtják, a hajtóerőnek az emberi felelősségtudatnak kell lennie.

Az egzakt elméleti biológia megszületése az előfeltétele annak, hogy a biológiai folyamatok tervezhetők legyenek. Ez pedig a jövő fejlődése és a tragédiák elkerülése végett egészségügyi, környezetvédelmi, népesedéspolitikai, élelmezési és tudományos szempontból egyaránt fontos.

A lehetőségek az egzakt elméleti biológia megteremtéséhez megvannak. A biológusok felelősek azért, hogy e tudományág a szükséges gyorsasággal fejlődjön ki. De nem csak a biológusok. A tudományszervezők és politikusok is osztoznak a felelősségben.

AZ ÉLET ÉS A HALÁL SZINTJEI

BEVEZETÉS

A biológusok döntő többsége úgy gondolja, vagy legalábbis úgy érzi, hogy az a kérdés, „mi az élet?” elvont filozófiai kérdés csupán, amelyik nem tartozik a mai biológia kutatási témái közé. Ez az álláspont nemcsak téves, de kifejezetten káros is a biológia haladása szempontjából. Természetesen az élet mibenlétének kérdése filozófiai kérdés is. De ezen túlmenően természettudományos alapkérdés, amely az egzakt biológia kialakításának nélkülözhetetlen előfeltétele. Emellett ma igen fontos társadalmi kérdés is, mert számos társadalmi problémára nem adható egzakt válasz az élet mibenlétének, lényegének ismerete nélkül.

Az egzakt természettudományok kiindulási alapja rendszerint valamilyen minimálrendszer, olyan rendszer, amely az anyag fejlődésének evolúciója során a komplexitás növekedésével először képes az adott természettudományi ágra jellemző, annak lényegi és az előző szerveződési szintekhez képest új tulajdonságait mutatni. Így válnak az elemi részek az atomfizika alapjává, az elemi töltések az elektromosságtan, a molekulák a kémia alapelemeivé, az elemi cellák a kristálytan, a gének a genetika minimálrendszereivé stb. A biológiának nem volt minimálrendszere. Pedig nyilvánvaló, hogy az anyag szerveződésének egy bizonyos pontján az anyagi rendszereknek el kellett érniük ahhoz a szinthez, ahhoz a komplexitáshoz, amelynél egyszerűbb rendszerek nem, de amelyek már mutatják a legfontosabb és általános életjelenségeket. Ilyen minimálrendszert először Gánti publikált 1971-ben chemotonmodell néven. Ha a modell jó és valóban a biológia minimálrendszerének a szerepét tölti be, akkor a modell organizációs módja kivétel nélkül minden élő rendszerben megtalálható kell, hogy legyen, másrészt viszont egyetlen nem élő rendszer sem szabad, hogy e szerint az organizációs mód szerint épüljön fel. Egy ilyen minimálrendszer birtokában az a kérdés, hogy mi az élet, többé már nem elvont filozófiai kérdés, hanem természettudományi alapkérdés, amelyre egzakt, matematikai módszerekkel leírható, kísérletekkel ellenőrizhető választ lehet adni. Ez, és csakis ez vezethet olyan kérdések konkrét természettudományos megválaszolására, mint pl. hogy hogyan keletkezett az élet, hiszen ilyen minimálrendszer ismerete hiányában nem is lehet tudni, hogy mit is keresünk tulajdonképpen akkor, amikor az élet keletkezésének a kérdését kutatjuk. De hasonlóképpen nem válaszolható meg számos más kérdés, például az esetleges földön kívüli élet kérdése sem.

A fentiekén túlmenően magában az emberi társadalomban is számos olyan kérdés vetődik fel, amelyre nem lehet egyértelmű választ adni az élet mibenlétének ismerete

nélkül. Ezek a kérdések napjainkban igen sürgető társadalmi kérdésekké váltak. Jogi szempontból ilyen például a halál időpontjának a kérdése, az ún. túlélő szervek jogi kérdésének megítélése, az abortusz végrehajthatóságának kérdése stb. Morális kérdésként jelentkezik például a mesterséges életbentartás kérdése, a szervátültetés különböző mozzanatainak (szervkivétel, szervbeültetés) kérdése, a születésszabályozás körüli kérdések. Egészségügyi problémaként vetődik fel a klinikai halál, vallási kérdésként a feltámadás kérdése stb. E kérdéskör körül ma igen nagy a bizonytalanság, amely számos megoldhatatlan jogi, morális, egészségügyi és vallási konfliktus és vita forrása. Mindezek a kérdések megoldhatók lennének az élet mibenlétének, természetének, jellegzetességeinek egyértelmű tisztázása segítségével.

NÉHÁNY FOGALOM TISZTÁZÁSA

Mi az élet jellemző vonása? Mikor mondjuk az anyag egy darabkájáról, hogy él? – teszi fel a kérdést Ervin Schrödinger híressé vált, „Wat’s Life” című könyvecskéjében. „Ha csinál valamit, mozog, anyagcsere-kapcsolatban áll környezetével, s ha mindezt hosszabb időn át teszi, mint ahogyan az élettelen anyagoktól hasonló körülmények között elvárnánk” – adja meg a választ. A megállapítás valóban az élő rendszerek egyik legalapvetőbb tulajdonságát rögzíti. Valóban minden, ami él és amíg él csinál valamit, működik. Ami nem működik, ami nem csinál semmit, az nem él. Lehet élettelen (eleve élettelen), amelyik nem élt, nem él és nem is fog élni. De lehet holt is, azaz olyan rendszer, amelyik korábban élt, de ezt a képességét elvesztette. Lehet életképes is, amelyikben a folyamatok jelen pillanatban nem zajlanak (mint például a fagyasztott baktériumokban vagy a beszáradt magokban), de megfelelő körülmények között a folyamatok újra indulnak és az életre jellemző jelenségeket újra mutatják. Schrödinger jellemzése kétségtől az élő rendszerek egyik legalapvetőbb tulajdonságát fogalmazta meg.

Azonban nemcsak az élő rendszerek csinálnak valamit és nemcsak azok csinálnak hosszú időn át valamit. A szél például folyamatosan és esetenként hosszú időn át folyamatos munkát végez, a folyó évezredekken keresztül végzi a maga erodáló munkáját a felszín alakítása közben. A technikában a különböző gépek, készülékek, automaták hasonlóképpen folyamatosan, hosszú időn keresztül tudnak működni. Ezen működések közös alapja az, hogy a működő rendszerek valamilyen energiatípus magasabb és alacsonyabb potenciálú rétegei között helyezkednek el, s miközben az energia rajtuk áthalad, annak egy része munkává alakul. Mégis alapvető különbség van e munkává alakításban a szél és a folyó, illetve az ember által tervezett gépek (és az élő rendszerek) munkavégzése között. Az előbbiek munkavégzése egy irányítatlan, ad hoc, az adott körülmények által megszabott munkavégzés, amely a környezet véletlenszerű megváltoztatására irányul. Az utóbbiak munkavégzése irányított munkavégzés, célszerű, hasznos, valaminek az elvégzésére szolgáló, tervezett vagy legalábbis programozott munkavégzés. Az ember által alkotott gépek és készülékek az ember által kitűzött célok érdekében végzik irányított, hasznos munkájukat, az élő rendszerek saját fennmaradásuk és önreprodukciójuk érdekében. A cél és érdek szót ez utóbbi esetben természetesen nem az emberi agy által meghatározott cél, illetve érdek értelmében kell felfogni.

Ahhoz, hogy egy rendszer ne véletlenszerű, spontán, random munkát végezzen, az energia útját különböző kényszerpályák rendszerének segítségével manipulálni kell. A mechanikai gépek, automaták esetében ez a manipulálás mechanikai alkatrészek (kere-

kek, tengelyek, rugók, ingák stb.) segítségével történik, az elektromos-elektronikus berendezéseknél drótok, tekercsek, egyenirányítók, kondenzátorok stb. segítségével. Ez akkor is így van, amikor a mechanikai vagy elektromos automaták működését alapvetően kémiai energia biztosítja, mint a belső égésű motorok vagy a gőzgépek esetében a tüzelőanyag, hiszen azok első lépcsőben átalakulnak mechanikai energiává, melynek manipulációja a továbbiakban mechanikai úton történik. Hasonlóképpen, ha az elektromos-elektronikus berendezést egy elem vagy akkumulátor kémiai energiája hajtja, a működés első lépcsőjében ez a kémiai energia elektromos energiává alakul át, amelynek manipulációja a továbbiakban elektromos-elektronikus alkatrészekon keresztül történik.

Az élő rendszerek kémiai energiát használnak a működésükhöz. Ez a növények esetében is így van, mert a beérkező fényenergia első lépcsőben kémiai energiává alakul át. Az élőlényekben azonban a kémiai energia manipulációja kémiai úton történik csatolt reakciók hálózatán keresztül. Az emberi technika által alkotott gépek, készülékek és az élő rendszerek működése között ez a legfontosabb és a legalapvetőbb különbség. Erre vezethető vissza az élőlények számos különleges tulajdonsága, mint például a spontán keletkezés, a növekedés képessége, az önreprodukció képessége, a regenerálódás képessége. Ellentétben az ember alkotta technikával, amelyben mechanikai és elektromos automaták működnek, az élő szervezetek alpműködésüket tekintve kémiai automaták. Az evolúció előrehaladtával a kémiai automaták mechanizmusai elektromos és mechanikai mechanizmusokkal is kiegészültek az élővilágban, de az alpműködést kivétel nélkül minden élőlényben a kémiai energia kémiai úton történő manipulációja biztosítja.

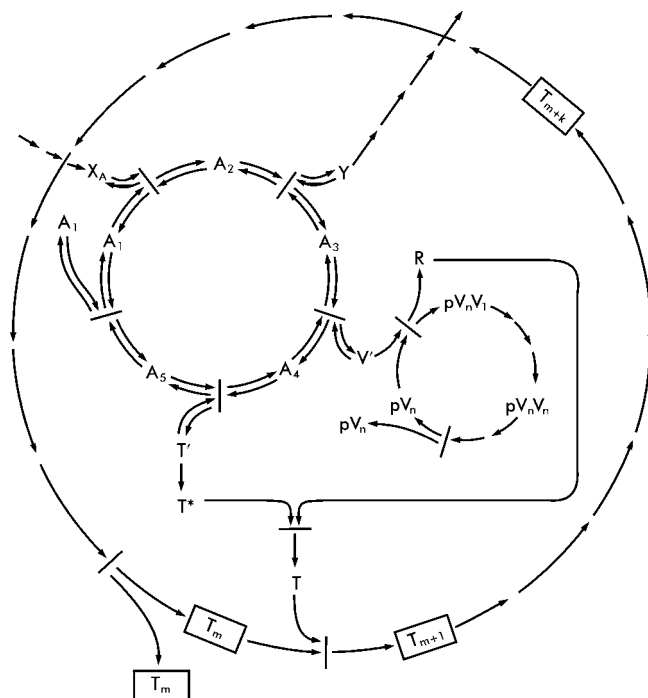
Miután a kémiai reakciók megfelelő sebességgel csak fluid fázisban (oldat, gáz) mehetnek végbe, ezért a kémiai automaták működéséhez az oldószer, vagyis a folyadékfázis jelenléte nélkülözhetetlen. Ezért a kémiai automatákat fluid automatáknak is nevezzük. Míg a mechanikai automaták működése az alkatrészek elhelyezkedésének szigorú geometriai rendjéhez kötött, és az elektromos automaták működése is – legalábbis az alkatrészek sorrendisége tekintetében – meghatározott geometriai rendet igényel, addig a fluid automaták organizációja a geometriai elrendezéstől független. Zavartalanul működnek akkor is, ha az oldat keveredik, áramlik, ha az oldatot megfelezzük stb. Ez az élő rendszerek számára rendkívül előnyös tulajdonságokat biztosít a mechanikai és elektromos automatákkal szemben. Ilyen előny például az önreprodukció képessége: az autokatalitikus rendszerek a kémiában közismert rendszerek. A továbbiakban tehát az élő rendszereket fluid (kémiai) automatákként fogjuk kezelni. Az evolúció magasabb fokán létrejött élő rendszerek, amelyekben mechanikai és elektromos manipuláció is folyik, szilárd alkatrészeket is alkalmaznak a mechanikai, ill. elektromos folyamatok manipulációjára. Miután ezeknek a rendszereknek is kémiai úton történik az alpműködése, de szilárd vagy legalábbis félszilárd alkatrészeket is tartalmaznak, az ilyen rendszereket lágymatematikaként emlegetjük.

AZ ÉLET ALAPEGYSÉGE (MINIMÁLRENDSZERE): A CHEMOTON

Néhány példa ismert a kémiában a fluid automaták létezésére és hasznosítására, noha ezeket nem fluid automatákként, hanem kémiai reakciórendszerekként kezelik. Ilyenek például az oszcilláló reakciók, vagy ilyenek azok a reakciórendszerek, amelyekkel a biokémiai ipar a cukorfoszfátokat előállítja. A biológia alapegységének, minimálrendszerének azonban különleges tulajdonságú kémiai automatának kell lennie. Mindenekelőtt programvezérelten kell működnie, azután teljes mivoltában önreprodukálónak kell lennie, valamint gondoskodnia kell arról, hogy mind önmaga, mind pedig az utódai elkülönüljenek a környezetüktől. Ilyen konstrukciót először Gánti publikált 1971-ben, majd a rendszert számos egyéb publikációban továbbfejlesztette. Az ilyen típusú rendszereket chemotonoknak nevezte el.

A chemotonok három, sztöchiometriailag kényszerkapcsolt, egyenként autokatalitikus (tehát önreprodukáló) kémiai automatából állnak. Az egyik a metabolikus alrendszer, kis molekulájú vegyületek tetszőleges bonyolultságú reakcióhálózatából áll, amely a saját autokatalíziséhez szükséges anyagok termelésén kívül képes a másik két alrendszer önreprodukációjához szükséges nyersanyagok termelésére is. A másik, egy kétdimenziós folyadék természetű membránrendszer, amelyik az előző alrendszertől kapott nyersanyagok spontán felhasználásával autokatalitikus növekedésre képes. A harmadik egy templát-polimerizációs makromolekula-képzésre alkalmas reakciórendszer, amely a nyersanyagokat az első alrendszertől kapja. Ugyanakkor, miután szükséges anyagokat produkál a második alrendszer reprodukációjához is, így már önmagában, pusztán sztöchiometria úton is képes a másik két alrendszer működésének kontrollálására. A három alrendszer tehát sztöchiometria kényszerkapcsolásai miatt egyetlen működő rendszerré áll össze, azaz önmagában egyik sem működőképes, viszont a hármuk kooperációjából kialakuló kémiai szuperrendszer nemcsak működő, de a szó geometriai értelmében véve is szaporodóképes.

A chemotonok kémiai konstrukcióját az ún. chemotonmodell mutatja (30. ábra). A chemotonmodell a chemotonok végsőkéig leegyszerűsített formája, amely ugyan ebben a végsőkéig leegyszerűsített formában valószínűleg nem valósítható meg, de tartalmazza a nélkülözhetetlen sztöchiometria kényszerkapcsolásokat. A benne lévő kémiai reakciólépések kinetikai elemzése révén a chemotonok működése egzakt módon számítható és számítógéppel vizsgálható. Ezek a vizsgálatok azt mutatták, hogy a chemotonok valóban úgy viselkednek, mint az élő rendszerek, azaz teljesítik azokat a kritériumokat, amelyek mint az összes élőben mindenkoron feltalálható tulajdonságok az élő rendszereket életkritériumokként általánosan jellemzik.



30. ábra. A chemoton kapcsolási rajza. Három önreprodukáló alrendszert kapcsol össze sztöchiometriai kapcsolással: az $A \rightarrow 2A$ önreprodukáló körfolyamatot, a $pV_n \rightarrow 2pV_n$ templátpolikondenzációs rendszert és a $[T_m] \rightarrow [2T_m]$ membránképződést. A kapcsolási mód szaporodó, programvezérelt fluid automatát, úgynevezett chemontot eredményez.

A chemotonmodell egy absztrakt modell, amelyik azt mutatja meg, hogy hogyan lehet különböző autokatalitikus kémiai rendszerekből egyetlen, önreprodukáló tulajdonságú, programvezérelten működő kémiai szuperrendszert szervezni. Az, hogy absztrakt azt jelenti, hogy a benne szereplő vegyületek nem konkrét kémiai vegyületekhez vannak kötve, hanem sztöchiometriai képességekhez, vagyis ahhoz, hogy milyen, a rendszer szempontjából fontos tulajdonságú további vegyületekké tudnak átalakulni. A modellben a végsőig leegyszerűsített alrendszerei helyébe tetszőleges bonyolultságú valódi kémiai vegyületekből álló rendszerek helyettesíthetők, ha azok a modellben rögzített sztöchiometriai kapcsolásokat képesek megvalósítani. Csoportunk egy ilyen, valós vegyületeket tartalmazó, több mint száz vegyületből álló ún. prebiológiai chemoton lehetséges variációját elkészítette, amely feltételezhető prebiológiai körülmények között rendelkezésre álló nyersanyagokból képes önreprodukáló, programvezérelten működő kémiai szuperrendszerként működni. A reakcióhálózat elkészítését döntő mértékben Hidvégi Máté, a teljes rendszer teljes sztöchiometriai összegezését pedig a körfolyamati sztöchiometria segítségével Szathmáry Eörs végezte el. Természetesen a fenti, általunk készített prebiológiai variáción kívül még számos egyéb prebiológiai és más biológiai variációk is elképzelhetők, sőt miután a modell semmiféle kikötést nem tartalmaz a vegyületek fel-

építésére vonatkozóan, amennyiben pl. az adott sztöchiometriai feltételeknek szilikát-kémiai reakciók vagy egyéb reakciók eleget tudnak tenni, úgy azokból a chemotonok ugyancsak felépíthetők. Ily módon a chemotonmodell nyitott mindenféle, nem földi típusú élő rendszer irányába is.

Miután a chemoton konstruálása alulról, azaz a kémiai reakciórendszerek irányából történt, és a három kémiai alrendszer összekapcsolásával jutott el a programvezérelt ön-reprodukáló kémiai szuperrendszer konstrukciójáig, továbbá a vele kapcsolatos vizsgálatok azt mutatták, hogy ez a konstrukció már képes mutatni azokat a tulajdonságokat, amelyeket az élet legáltalánosabb kritériumaiként elfogadhatunk, igen erősen valószínűsíthető, hogy ez a legegyszerűbb olyan kémiai szuperrendszer, amely az élet tulajdonságait mutatja. Ily módon a chemotonmodell, mint a legegyszerűbb olyan rendszer, amely képes az életjelenségek produkálására, feltételezhetően alkalmas a biológiai minimálrendszer szerepének a betöltésére.

Még egy dolog érdemel figyelmet a chemotonmodellel kapcsolatban. A modellben csak sztöchiometriai kapcsolatok szerepelnek, azaz a modell csak azt határozza meg, hogy milyen tulajdonságú komponensből milyen tulajdonságú komponensnek kell képződnie és milyen mennyiségben. Arra azonban nem tartalmaz semmiféle megkötést, hogy a folyamatoknak milyen sebességgel kell végbemenniük. Ennek következtében a modell érvényes akkor is, ha a reakciósebességeket kizárólag a komponensek koncentrációviszonyai szabják meg, de nem vesztí érvényességét akkor sem, ha a folyamatokat katalizátorok, vagy mint az élő rendszerek esetében, enzimek gyorsítják. Így a modell érvényessége független attól, hogy enzimek jelenlétében vagy anélkül mennek végbe a folyamatok. Ez különös előnyt jelenthet a biogenezis vizsgálatánál, ahol a speciális enzimek megjelenése és az azok keletkezéséhez szükséges információk kialakulása egy külön, súlyos, nagyon nehezen megoldható problémát jelent.

ÉLET A PROKARIÓTÁK SZINTJÉN

Ha az élet titkát keressük, azaz meg akarjuk állapítani, hogy mi a legalapvetőbb különbség az élő és az élettelen között, az élővilág legegyszerűbb, legprimitívebb szintjén kell vizsgálódnunk. Mai ismereteink szerint az élővilág legegyszerűbb szintjét a prokarióták képviselik. Ám a prokarióták világa is rendkívül változatos, változatosságuk évmilliárdok alatt fejlődött a mai szintre. Mégis mutatnak közös alapvető sajátosságokat, amelyek feltehetően az élő mivoltukra jellemzőek.

A jelenleg ismert és megismert legegyszerűbb prokarióták, a micoplazmák és thermoplazmák teljesen fluid szervezetek, amelyeket kétdimenziós folyadékmembrán határol. E burkolaton belül lévő rendszer minden esetben két alrendszerre bontható, egy citoplazmának nevezett részre, amelyben a metabolikus alrendszer kis molekulásúlyú vegyületeiből álló kémiai reakcióhálózat foglal helyet, amelyre jellemző, hogy működése közben termeli a saját anyagainak a reprodukciójához szükséges anyagokat, a membrán reprodukciójához szükséges anyagokat, valamint a harmadik alrendszer, az információs alrendszer anyagaihoz szükséges nyersanyagot is. Ebből egyébként következik az is, hogy a mico- és thermoplazmákban is létezik egy információs alrendszer – a genetikai állomány –, amely a programkontrolláló szerepet tölti be az egész szuperrendszer számára. A mico- és thermoplazmák összetétele, struktúrája tehát teljesen megfelel a chemotonmodell összetételének, alrendszerei adekvátak a chemotonmodell alrendszereivel. E szervezetekben szilárd alkatrészek nincsenek, minden fluid, oldott állapotban van, a rendszert határoló membrán kétdimenziós folyadék természetű, így ez is teljesen megfelel a chemotonmodell előírásainak.

A prokarióták világa rendkívüli változatosságokat mutat. A kénbaktériumoktól a metánbaktériumokig, az anaeroboktól az aerobokig, a fermentatívoktól a lebontókig nagyon sokféle anyagcseretípus található bennük. De ezen túlmenően alakilag is rendkívül változatosak, az alaktalantól a gömbszerűig, a pálcika alakútól a spirál vagy fonal alakúig, a mozdulatlantól a csillók segítségével rohanóig nagyon sokféle típusuk ismert. Vannak köztük csak membránnal határoltak, sejtfallal burkoltak vagy akár a sejtfalon kívüli nyálkaburokkal körülvettek is. Az előbb említett hármas felépítés mégis mindegyikben megtalálható, csak ezekhez az idők folyamán az evolúciós fejlődés során egyéb járulékos részek vagy alrendszerek csatlakoztak anélkül, hogy a prokarióták eme három alrendszerből álló alapját megbontották vagy megzavarták volna.

A chemotonmodell tehát adekvát absztrakt modellje a prokarióta élő rendszereknek. Prokarióta szinten elmondható, hogy az él és csak az él, ami a chemotonmodellben rögz-

zített sztöchiometriai organizáció lényegi tulajdonságait birtokolja. Mert igaz ugyan, hogy a külső körülmények függvényében nagyon sokféle anyagcsere-változatuk ismeretes, amelyek a legellentmondásosabb körülmények között lehetővé teszik működésüket, de mindegyikükre jellemző, hogy az anyagcsere-hálózatuk autokatalitikus, azaz önreprodukáló tulajdonságú, ezen túlmenően szolgáltatja a nyersanyagokat mind a membránképződéshez, mind az információs alrendszerükhöz (genetikai állományukhoz). Ugyancsak igaz, hogy mind a rendszert burkoló membrán, mind pedig az információs alrendszerük (genetikai állományuk) ugyancsak autokatalitikus, önreprodukáló tulajdonságú. És végül igaz az is, hogy összehangolt működésük révén alkotnak egy kémiai szuperrendszert, amelyben az összehangolt működést elsődlegesen és alapvetően e három különböző alrendszer közötti kémiai, sztöchiometriai kapcsolatok biztosítják. E sztöchiometriai kapcsolatokra épül rá minden egyéb, pl. a kémiai kinetikai kapcsolat is.

Az élet jelenlétéhez (prokarióta szinten) e három alrendszer együttes jelenléte és együttműködése nélkülözhetetlen. Bármelyik hiányzik is, vagy bármelyiket eltávolítjuk, a rendszer megszűnik élőnek lenni. A vírusok esetében például jelen van az információs alrendszer; egyes komplikáltabb vírusok esetében esetleg még burkolómembrán is lehet jelen, de hiányzik belőlük a metabolikus alrendszer, ezért működésre képtelenek, nem növekednek és nem szaporodnak, csak a sejtbe bejutva az élő sejtet kényszerítik arra, hogy őket gyártsa. Hasonlóképpen élő lehet állítani a prokariótákból ún. lizátumokat, vagyis olyan masszát, amelyben a sejteket határoló membránok tönkrementek. Ezeket a lizátumokat fel lehet használni különböző biokémiai szintézisek elvégzésére, hiszen bennük még a metabolikus reakcióhálózat időlegesen működőképes lehet, de ezek már nem élő rendszerek, nincs meg bennük a hármas egység, nem képesek növekedésre és szaporodásra, nem programvezérelten, hanem csak a pusztá kémiai törvényeknek megfelelően működnek.

A chemotonmodell alapján tehát prokarióta szinten egyértelműen elkülöníthetőek az élő és élettelen rendszerek egymástól, azt mondhatjuk, hogy élő az a kémiai szuperrendszer, amelyik legalább három autokatalitikus alrendszerből áll oly módon, hogy azok működése kémiaiilag összekapcsolt és ily módon egyetlen szuperrendszerként működnek. E három alrendszer a tápanyagellátást biztosító és feldolgozó metabolikus alrendszer, a térbeli összetartást biztosító – prokarióta szinten – membránrendszer és a programvezérelt működést biztosító információs alrendszer. E három rendszer nélkülözhetetlen, de ehhez tetszőleges egyéb rendszerek csatlakoztathatók, amelyek azonban már nem magához az élethez, csak az adott körülmények között lévő élethez nélkülözhetetlenek.

ÉLET A SOKSEJTŰ ÁLLATOK SZINTJÉN

Legalább kétféle, egymástól különböző élet létezik. Szeretném megismételni és kihangsúlyozni, hogy legalább kétféle egymástól különböző élet létezik. Ezt azért kell ilyen erőteljesen hangsúlyozni, mert ez az állítás nem hipotézis, hanem a biológia és orvostudomány mindennapi tapasztalata. Ugyanakkor a szerző tudomása szerint rajta kívül senki nem hangsúlyozta ezt ki, és ezért a kétféle élet fogalma kaotikus zavarban keveredik mind a tudományos, mind a mindennapi élet alkalmazásában. A mindennapi tapasztalat pedig az, hogy az állat halála után szervei, szövetei, sejtjei tovább élnek. Ezért lehet túlélő szervekről beszélni, ezért lehet a halott egyed szerveit élő egyedekbe átültetni, ezért lehet szövettenyészeteket és sejtenyészeteket készíteni. Ám miután a halál nem más, mint az élet irreverzibilis megszűnése, ebből logikusan következik, hogy az állat élete és sejtjeinek, szöveteinek az élete nem ugyanaz az élet.

A kétféle élet, azaz a sejtek élete és az állat élete konstrukcionálisan is különbözik egymástól. A prokarióta szintű élet olyan rendszerek tulajdonsága, amelyek kémiai reakciókból szerveződtek egységes egésszé. Az állati élet olyan élet, amelyben prokarióta élőlények szerveződnek funkcionálisan olyan egységekké, amely egység maga, a szervezettségnek eme magasabb szintjén szintén rendelkezik mint egység azzal a tulajdonsággal, hogy ő él. Ám ebben a magasabb szintű szerveződésben már nemcsak a kémiai folyamatok szerepelnek közvetlen alkotóelemekként, ez a rendszer már nem tisztán kémiai úton manipulálja a kémiai energiát, itt az energia manipulációja a kémiai manipuláción túlmenően mechanikai manipulációval és elektromos manipulációval egyaránt történik.

Meg kell állapítani, hogy mind a prokarióta, mind az állati szinten az élet maga mindig egy egységrendszer tulajdonsága, azaz sem a prokariótát mint élő, sem az állatot mint élő nem lehet két olyan részre vágni, amelyben mindkét fél élő marad. A látszólagos kivételek (pl. gyűrűsférgek) értelmezhetők.

Talán első szintű vagy első fajú (primer) életnek nevezhetjük a prokarióta szintű életet, amelynek az organizációját a chemotonmodellel jellemeztük és másodszintű vagy másodfajú (szekunder) életnek nevezhetjük az állatvilág egyedeinek a sajátos életét, amely első szintű élő egyedek kooperációjának az eredményeként jött létre. Érdekes, hogy erre a szekunder életre is jellemző az a hármas felépítés, amelyet a chemotonmodell definiál: azaz minden élő állati egyedben megtalálható a geometriai struktúrát biztosító alrendszer (hámszövetek, támrendszer), a működést és anyagellátást biztosító alrendszer (emésztőrendszer, kiválasztó szervek, vérkeringés), valamint a folyamatok összehangolt működését biztosító információs és kontrolláló rendszer, amely az állatok esetén az idegrendszer-

rel azonos. Természetesen, miként a prokariótáknál is, e hármas alrendszer mellé számos járulékos szerv, alrendszer csatlakozhat a különböző feladatok ellátására. Úgy tűnik tehát, hogy az élet mint jelenség az állati szinten is ehhez a hármas felépítéshez kötött és hogy a chemotonmodellben rögzített hármas felépítés, amely ott az életnek nevezett jelenséget produkálja, a szerveződésnek ezen a magasabb szintjén, a soksejtű állatok szintjén ha funkcionálisan megjelenik, a szerveződésnek ezen a magasabb szintjén is olyan tulajdonságot hoz létre, amelyet a legkülönbözőbb emberi nyelvek az évezredek során minden nyelven az „élet” szóval jellemeztek.

Minden élő állati egyed életének minden pillanatában kétféle életet mutat. Sejtjeinek a primer életét és saját szervezetének a szekunder életét. A szekunder élet az állat élete. A petesejt bár tartalmazza az állat szervezetére vonatkozó genetikai információkat, a szekunder élet jelenségeit nem mutatja, ezért az állat élete nem a petesejttel, még csak nem is a megtermékenyítéssel keletkezik, hanem az embrió fejlődésének azon fokán jelenik meg, amikor a kontrolláló rendszer – azaz az idegrendszer – elkezdi irányítani a másik két alrendszer működését. Hasonlóképpen az állat élete akkor szűnik meg, amikor a kontrolláló alrendszer működése irreverzibilisen megszűnik irányítani a másik két alrendszer működését. Ezek alapján tehát jogos az az orvosi gyakorlat, amely a halál beálltát az idegrendszer (agy) működésének az irreverzibilis leállásához köti. De nem fogadható el az a szemlélet, amely a megtermékenyített petesejtet élő embernek tekinti. Az emberi élet is akkor kezdődik, amikor az emberi embrió fejlődése elér arra a szintre, hogy az embrió sejtjeinek a működését az embrió idegrendszere kezdi irányítani. A mesterséges megtermékenyítést végző laboratóriumoknak az a gyakorlata, hogy a beültetésre nem került, tárolt, megtermékenyített petesejteket időnként kiselejtezik, nem jelent tömeggyilkosságot.

KÖZTE ÉS TÚL

A prokarióták és a soksejtű állatok csak egy részét alkotják az élővilágnak. A kettő között helyezkedik el az élővilág tekintélyes része: az eukarióta sejtek rendkívül változatos világa, a gombák sokfélesége és a teljes növényvilág. Az élővilágnak ez a része az élet mibenléte szempontjából a mai napig nem lett szisztematikusan végigvizsgálva. Ám bizonyos általános következtetések az eddigi ismeretek alapján így is levonhatók.

Az eukarióta sejtek organizációja teljes összhangban van a chemotonmodellel. Nem jelent problémát az sem, hogy az információs alrendszere, azaz a genetikai állománya külön burokkal körbevett, geometriailag elkülönülő egységben sűrűsödik, mert a chemotonmodell nem tartalmaz előírásokat a geometriai struktúrálódásra vonatkozóan, csak a sztöchiometriai organizációt írja elő. Ez pedig az eukarióta sejtek esetében ugyanúgy érvényes, mint a prokariótáknál. Némi problémát jelenthet a különböző, saját információs alrendszerrel is rendelkező sejtstruktúrák jelenléte (mitokondriumok, kloroplasztok). Ezek azonban az endoszinbionta teória alkalmazásával jól értelmezhetők. Úgy tűnik, hogy az eukarióta sejtek esetében nem jelenik meg valamiféle, a primer élettől elkülönült szekunder élet, amely megszüntethető lenne úgy, hogy a primer élet továbbra is sértetlen marad.

Érdekes a helyzet a soksejtűeknél a gombák és a növények esetében. Ezeknél két alrendszer található. Az egyik a térbeli struktúrát biztosító alrendszer, a másik a metabolikus alrendszer, a kettő közötti kapcsolat sztöchiometriai vonatkozásokban megfelel a chemotonmodell előírásainak. Minthogy ezeknél az élő rendszereknél a rendszer elemei már nem közvetlenül a kémiai reakciók, hanem éppúgy, mint a soksejtű állatoknál saját élettől rendelkező sejtek, várható lenne egy szekunder, másodlagos élet megjelenése ugyanúgy, mint az állatok esetében. Ezzel szemben a tapasztalat azt mondja, hogy ilyen élet nem létezik, a növényt nem lehet olyan értelemben megölni, mint az állatot. Míg az állatok nem vághatók két vagy több részre úgy, hogy mindegyik rész élő maradjon, a növényeknél ez elterjedt jelenség és ezt az ún. vegetatív szaporodást (szaporítást) a mezőgazdaság időtlen idők óta tudatosan alkalmazza is. Mindez annak a következménye, hogy sem a gombák, sem a növények soksejtű rendszerében nem alakult ki egy olyan információs alrendszer, amely a genetikai állomány fölötti szerveződési szinten információs feladatokat tudna megoldani és vezérelné a rendszer működését sejt fölötti szinten. A gombákra és növényekre vonatkozó információk mind a sejteik DNS-ében tárolódnak és a fölöttük lévő szerveződési szinten nem alakult ki egy újabb információs alrendszer. Ezért a növényi élet és a gombák élete tulajdonképpen nem más, mint sejteik primer

életének a szabályozott kollaborációja. Az ősi emberi tapasztalat megfelel ennek a ténynek: míg a különböző nyelvek egyértelműen beszélnek az állatok megöléséről, addig a nyelvek nem beszélnek arról, hogy valaki egy növényt vagy egy gombát megölne. Hasonlóképpen egyes keleti vallások igen vigyáznak az állatok életére, de semmiféle tiltást vagy előírást nem tartalmaznak a növények életének a védelmében.

Es mi van az állati élet szerveződésén túli szinten? Végző soron, ahogy az eukarióta sejtek mint élő egyedek elemei lehetnek egy magasabb szintű szerveződésnek, a soksejtű szervezetnek, éppen úgy a soksejtű szervezetek élő egyedei között is kialakulhat kooperáció, funkcionális szerveződés. Ilyen módon az evolúciós szerveződés egy új, még magasabb szintjén ismét önálló rendszerek jöhetnek létre. Ezeknek a rendszereknek az elemei a soksejtű egyedek.

Az evolúció elindult ezen az úton. Első kísérletként talán a családot hozta létre, majd megszülettek a különböző állatok csoportosulásai, a csordák, csapatok, hordák. Legmagasabb szintre a szerveződés talán a rovartársadalmakban jutott. Egy hangyaboly vagy egy termeszwár a szerveződésnek olyan magas szintjét mutatja, hogy benne megjelenik a szerveződési szint saját anyagcseréje, az egyedek táplálékot hordanak a bolyba, ott esetleg gombákat tenyésztenek vagy levéltetveket, a hulladékszemet kihordják a bolyból stb. Mindez a szerveződésnek ezen a szintjén is anyagcserének felel meg. Hasonlóképpen megvan a térbeli lehatárolódás is, a hangyaállamok, termeszek jól meghatározott territóriummal rendelkeznek. Azt kell tehát mondani, hogy a chemoton organizációjára jellemző három alrendszer közül kettő ezekben a rendszerekben megtalálható. Hogy van-e bennük külön információtároló és kontrolláló alrendszer, az kérdéses. A nyelv mindenesetre beszél a hangyaboly vagy a termeszwár életéről. Ez persze nem bizonyíték arra, hogy itt valamiféle terciér életforma jelenne meg a szekunder életforma fölött.

Az ember megjelenésével azonban kialakultak olyan rendszerek, amelyekben a hármas alrendszerű felépítés egyértelműen megtalálható. Ezek a történelem során létrejött államok. Metabolizmusukat az ipar, mezőgazdaság, szállítás, kereskedelem alkotja, jól meghatározott határokkal rendelkeznek, amelyet ugyancsak érzékenyen véd minden állam. És itt az sem vitatható, hogy az információtároló és kontrolláló alrendszer is megjelent, hiszen a törvénykezés és a hozzá kapcsolódó végrehajtó rendszerek egyértelműen ezt a célt szolgálják. Lehetséges, hogy az emberi államok létrejötte nem más, mint az evolúció recens kísérlete egy soksejtűekből mint elemekből álló, hármas szinten élő, azaz primer, szekunder és terciér étellel egyszerre rendelkező élő rendszer létrehozására? Ki tudja?

AJÁNLOTT IRODALOM

- Békés E.: *Simulation of Kinetics of Proliferating Chemical Systems*. Bio Systems, 7. 189. (1975).
- Crick, F. H. C.: *Az élet mikéntje*. Gondolat (1987).
- Csendes T.: *A Simulation Study on the Chemoton*. Kybernetes, 13. 79. (1984).
- Gánti T.: *Az élet princípiuma*. Gondolat (1971, 1978); Kritérion (1979); OMIKK (1983);
Wiedza Powszechna (1986, lengyelül); OMIKK (1987, angolul).
- Gánti T.: *Chemoton elmélet. I. A fluid automaták elméleti alapjai*. OMIKK (1984).
- Gánti T.: *Chemoton elmélet. II. Az élő rendszerek elmélete*. OMIKK. (1989).
- Gánti T.: *Biogenesis Itself*. J. Theor. Biol. 187, 583–593 (1989).
- Maynard Smith, J., Szathmáry E.: *A földi élet regénye*. Vince Kiadó (2000).
- Rizotti, M. (ed.): *Defining Life* (The central problem in theoretical biology). University of Padova (1996).
- Schrödinger, E.: *What's Life?* McMillan (1944). Magyar kiadás: *Válogatott tanulmányok*. Gondolat (1970, 1985).

TARTALOM

Előszó	7
Bevezetés	13

AZ ÉLET MIVOLTA

Nem ártana tudni, mit keresünk	21
Cseppfolyós szerkentyűk	26
Rend a semmiben	30
És ki a konstruktőr?	36
Chemotonok	41
Az ősz-Föld chemotonjai	48
Az összövegek születése	54
Célba értünk	65

AZ ÉLET PRINCÍPIUMA

Bevezető gondolatok	71
Az élet egységei	75
Halmazok és rendszerek	80
Működés és stabilitás	85
Az élet kritériumai	92
Az élő sejt alrendszerei	99
A kémiai motor	104
Növekvő rendszerek	114
Osztódással szaporodó kémiai rendszerek	122
A chemoton	128
A chemoton élő voltának bizonyítása	133
A chemoton működésének számítógépes szimulációja	137
A chemotonelméletből következik: a lágy automaták alapelvei	142

A chemotonelméletből következik: a genetika alaptörvényeinek levezetése	147
A chemotonelméletből következik: az élet keletkezésének magyarázata	157
A chemotonelméletből következik: élő rendszerek szintézisének stratégiája	165
A chemotonelméletből következik: az egzakt elméleti biológia lehetősége	173
A biológus felelőssége	178

AZ ÉLET ÉS A HALÁL SZINTJEI

Bevezetés	185
Néhány fogalom tisztázása	187
Az élet alapegysége (minimálrendszere): a chemoton	189
Élet a prokarióták szintjén	192
Élet a soksejtű állatok szintjén	194
Közte és túl	196
Ajánlott irodalom	199

Kiadja a Műszaki Kiadó Kft.
Felelős kiadó: Bérczi Sándor ügyvezető igazgató
Felelős szerkesztő: Demeter László
Borítóterv és tipográfia: Bíró Mária

Műszaki vezető: Abonyi Ferenc
Műszaki szerkesztő: Raja Gabriella
Tördelőszerkesztő: Buris László
Terjedelem: 18,23 (A/5) ív
Azonosító szám: MK-3020103

Nyomta az Oláh Nyomdaipari Kft.
Felelős vezető: Oláh Miklós