



AZ
ÖTÖDİK
CSODA

AZ ÉLET EREDETÉNEK NYOMÁBAN

PAUL DAVIES

Paul Davies
AZ ÖTÖDIK CSODA

Az élet eredetének nyomában*
([Tartalom](#))

Keith Runcorn emlékére

ELŐSZÓ

1996 augusztusában felröppent a hír, miszerint egy ősi meteorit a marsbéli életre vonatkozó bizonyítékot tartalmazhat. Maga Clinton elnök tájékoztatta a nyilvánosságot és a döbbsent tudományos világot, és az ilyenkor elvárható felsőfokokban tálalták a felfedezés – már amennyiben igaz – mélyreható következményeit. Ez az emlékezetes esemény azon csekély számú alkalmak egyike volt, amikor egy tudományos eredmény közvetlen hatást gyakorolt a közvéleményre. Ám az örömmámor és a viták elfedték a valódi jelentőségét.

A tudósok immár hosszú évek óta kénytelenek alapvetően újragondolni elméleteiket az élet keletkezéséről. A tankönyvek szerint az élet évmilliárdokkal ezelőtt, valami langyos pocsolyában született a Föld felszínén. A bizonyítékok azonban egyre inkább egy merőben eltérő történetre utalnak. Manapság inkább úgy tűnik, hogy az első földi szervezetek mélyen a föld alatt, geotermikusan

fűtött kövekbe zártan, afféle „kuktafazék” körülmények között éltek, és csak a későbbiek során vándoroltak a felszínre. Bármilyen meglepő is, ezeknek az ősmikrobáknak a leszármazottai mindmáig fennmaradtak eredeti élőhelyükön, kilométerekkel a talpuk alatt.

Néhány évvel ezelőttig senki sem gyanította, hogy létezhet élet ilyen barátságtalan környezetben. Miután azonban bebizonyosodott, hogy a Föld felszíne alatt igenis virulhatnak organizmusok, kínálkozott egy még egzotikusabb lehetőség. Lehet, hogy a Mars felszíne alatt is lapulnak mikrobák? A vélhetőleg baktériumkövületeket tartalmazó marsi kő felfedezése jelentős lendületet adott ennek az elméletnek. És ez még nem minden! A tudósok gyorsan felfigyeltek a gondolatmenet egyik lenyűgöző következményére: elképzelhető, hogy az élet valójában a Marson született és egy meteorit belsejében utazott a Földre.

A marsi meteoritot övező lázas izgalom átmenetileg elrejtette a szakemberek körében uralkodó mély megosztottságot a lelet értelmezéséről. Ha igazolódik az eredeti feltételezés, az azt is jelentheti, hogy az élet kétszer jött létre a Naprendszerben, illetve hogy az egyik bolygóról terjedt át a másikra. Igencsak izgalmas volna felfedezni, hogy élő szervezetek bolygóról bolyóra szökdecselhetnek – és amennyiben az utóbbi magyarázat bizonyul helytállónak, az élet végső forrása még mindig megoldatlan talány marad.

Egészen pontosan hogyan keletkezett az élet? Milyen fizikai és kémiai folyamatok alakították át az élettelen

anyagot élő szervezetekké? Ez a fogas kérdés változatlanul korunk egyik legnagyobb tudományos kihívása. Jelenleg is vegyészek, biológusok, csillagászok, fizikusok és matematikusok hada foglalkozik vele. Kutatásaik alapján sokan jutottak arra a következtetésre, hogy a természet törvényei, mondjuk ki kereken, az élet kedvéért olyanok, amilyenek. Szerintük az élet mindenhol kialakul, ahol lehetővé teszik a körülmények – nemcsak a Marson, hanem mindenütt az univerzumban; vagy akár egy kémcsőben is. Ha igazuk volna, az azt jelentené, hogy az élet a dolgok természetes rendjének elválaszthatatlan része, és hogy nem vagyunk egyedül.

Az életet a természet törvényeibe rögzítve látó szemlélet halványan a letűnt vallásos korok nézőpontjára emlékeztet, az eleven teremtmények otthonául teremtett mindenségről. Sok tudós megmosolyogja az efféle elképzeléseket és ragaszkodik ahhoz a nézethez, hogy az élet a bolygó vegykonyhájának szeszélyes véletlenjének köszönheti megszületését, egyedülállóan földi jelenség, és hogy a komplex szervezetek, köztük a tudattal rendelkező lények rákövetkező megjelenése ugyanígy a kozmikus lottójáték merőben véletlenszerű végeredménye. Mindezen viták végső soron arról folynak, mi az emberiség helye a világegyetemben: hogy kik vagyunk, hol és hogyan illünk ebbe a káprázatos rendszerbe.

A csillagászok úgy vélik, hogy az univerzum léte tízhúszmilliárd évvel ezelőtt egy ősrobbanással, a Nagy Bummal (Big Bang) vette kezdetét. Ezt a kirobbanó erejű születést heves hőjelenség kísérte. Az első

töredékmásodpercben megjelentek a fizikai alaperők és az alapvető anyagi részecskék. Az első másodperc végére már létrejöttek a kozmosz alapanyagai. A tér mindenütt megtelt a tízmilliárd fokos hőmérsékletben fürdő szubatomi részecskék – protonok, neutronok és elektronok – levesével.

Az univerzum jelenlegi mércéjével mérve az akkori világegyetem meghökkentően jellegtelen volt. A kozmikus anyag szinte tökéletes egyöntetűséggel terjedt szét a térben. Mindenütt azonos hőmérséklet uralkodott. A végletesen egyszerű állapotú anyagot alkotóelemeire bontotta a heves hő. Egy feltételezett megfigyelő nem is sejtette ebből a kevéssé ígéretes állapotból, micsoda hihetetlen lehetőségeket rejt az univerzum. Ekkor még semmiféle jel nem utalt arra, hogy több milliárd év elteltével lángoló csillagok trilliói szerveződnek spirálgalaxisok milliárdjaiba, hogy bolygók és kristályok, felhők és óceánok, hegyek és gleccserek jönnek létre, hogy e bolygók egyikét fák, baktériumok, elefántok és halak fogják lakni, és hogy ez a világ emberi kacagástól lesz hangos. Mindebből semmit sem lehetett előre látni.

Ahogy az univerzum kitágult az őseredeti egyformaság állapotából, hűlni kezdett. Az alacsonyabb hőmérséklettel pedig megsokasodtak a lehetőségek. Az anyagnak ekkor már sikerült összeállnia hatalmas, amorf struktúrákba – a mai galaxisok magjaivá. Kezdték kialakulni az atomok, és ez a mozzanat követte ki az utat a kémiai folyamatok és a szilárd fizikai objektumok kialakulásához.

Sok bámulatra méltó dolog jelent meg azóta a

világmindenségben: milliárdnyi nap tömegű, irtózatossá fekete lyukak, melyek csillagokat falnak fel és gázsugarakat lövellnek ki; másodpercenként akár ezret is forduló neutroncsillagok, melyek anyaga köbcéntiméterenkénti milliárd tonnásra roskadt össze; olyan megfoghatatlan szubatomi részecskék, melyek az egy fényév vastagságú tömör ólmon is áthatolnának; kísérteties gravitációs hullámok, melyek tovasuhanó áthaladása egyáltalán nem hagy észlelhető nyomot. Ám bármilyen meglepőek legyenek is mindezek, együttvéve sem olyan elképesztőek, mint az élet jelensége, noha az nem okozott semmiféle hirtelen vagy végletes változást a kozmikus szintéren. Amennyire a földi életből következtetni lehet, csak sok-sok apró, fokozatos lépésben történtek meg a változások. De miután létrejött az élet, az univerzum soha többé nem lehetett ugyanaz. Lassan, de biztosan átalakította a Föld bolygót, és azáltal, hogy kitűzte a tudathoz, az intelligenciához és a technikához vezető utat, arra is vitathatatlanul képesnek kell lennie, hogy megváltoztassa a világegyetemet.

Ez a könyv az élet eredetéről, a biogenezisről szól. Előre kell bocsátanom, hogy – lévén elméleti fizikus – ez a téma nem a szakterületem. De mindig is vonzott a biogenezis problémája, és az az ezzel szorosan összefüggő kérdés, hogy egyedül vagyunk-e a világmindenségben. Már egyetemista koromban jelentkezett az ez irányú érdeklődésem, amikor az 1960-as években a University College London hallgatójaként fizikát tanultam. Sok barátomhoz hasonlóan én is olvastam Fred Hoyle híres

tudományos fantasztikus regényét, *The Black Cloudot* (A fekete felhő), melyben hatalmas fekete gázfelhő érkezik a Naprendszerbe a csillagközi térből.^[1] Az efféle felhőket jól ismerik a csillagászok, de Hoyle izgalmas elképzelése szerint ez a felhő élt. Nos, éppen ez jelentette a bökkenőt. Hogyan élhet egy felhő? Hosszasan törtem rajta a fejem. Hát a gázfelhők nem a fizika törvényeinek engedelmeskednek? Hogyan mutathatnak önálló viselkedést, hogyan lehetnek gondolataik, hogyan dönthetnek? És akkor eszembe ötlött, hogy feltehetően valamennyi élő szervezet engedelmeskedik a fizika törvényeinek. Hoyle nagyszerűsége éppen abban rejlett, hogy a fekete felhő példájával oly világosan vázolta fel ezt a paradoxont.

A *The Black Cloud* zavarba ejtett. Eltűnődtem, *pontosan* mi is az élet. És hogyan jöhetett létre? Valami egészen különleges zajlik az élő szervezetek belsejében? Ez idő tájt a PhD témavezetőm (amolyan lazításképpen) egy különös értekezést ajánlott a figyelmembe, amit a nagy tekintélynek örvendő fizikus, Wigner Jenő írt. A tanulmány annak bizonyítására tett kísérletet, hogy egy fizikai rendszer a kvantumfizika törvényeinek megszegése nélkül nem teheti meg az átmenetet az élettelenből az élő állapotba.^[2] Vagy úgy! Szóval legalább Wigner úgy tartja, hogy az élet megjelenésekor valami igazán különösnek kellett végbemennie.

Nem sokkal később a témavezetőm egy másik, ugyancsak biológiával kapcsolatos tanulmányt nyomott a kezembe, ezúttal Brandon Carter asztrofizikus munkáját. Ez a mű az

életet illető fontos és izgalmas kérdést tárgyalt, de gondosan kerülte, hogy belemenjen annak taglalásába, mi is valójában az élet és miként kezdődött. Carter feltette a kérdést, milyen tulajdonságokkal kell rendelkeznie a fizikai univerzumnak, hogy egyáltalán bármiféle élet létrejöhessen benne. Tegyük fel, hogy valamiféle varázserő jóvoltából megváltoztathatjuk a fizika törvényeit, vagy az ősrobbanás kezdeti körülményeit. Mennyire módosíthatnánk az alapvető törvényszerűségeket, illetve az univerzum szerkezetét, hogy még mindig lehetővé váljék benne az élet? Egy egyszerű példával élve: tudomásunk szerint az élethez szükség van bizonyos elemekre, főleg szénre. A Nagy Bumm során azonban kevés szénatom keletkezett; a többségük a csillagok belsejében készült. Fred Hoyle már szóvá tette, hogy a szén sikeres előállítása a csillagokban meglehetősen kétes kimenetelű ügylet, ami nagymértékben függ a nukleáris erők tulajdonságaitól. Barkácsoljunk csak bele az atomfizika alaptörvényeibe, és – ha egyáltalán – alig lesz szénünk, valószínűleg tehát élet sem. Carter elképzelései az „antropikus elv”-ként váltak közismertté, és merészen oda lyukadt ki, hogy az élet létezése a vakvéletlen műve, néhány roppant szerencsés egybeesés következménye az univerzum alapjául szolgáló matematikai struktúrában.

Bármilyen gondolatébresztőnek bizonyult is Carter tanulmánya, nem adott magyarázatot az élet titkára. Nem sokkal a mű elolvasása után a cambridge-i Institute of Theoretical Astronomy (Elméleti Csillagászati Intézet) tudományos munkatársa lettem, melynek Fred Hoyle volt az

igazgatója és kutatóként ott dolgozott Brandon Carter. Ekkoriban került a kezembe Erwin Schrödinger fizikus kis könyve, ami mintha pontosan az én problémámat fogalmazta volna meg. A *What is Life?* (Mi az élet?) című munka annak kifejtésére vállalkozik, miért tűnnek a fizika szemszögéből olyan rejtélyesnek a biológiai szervezetek.^[3] Később a tudomásomra jutott, milyen felmérhetetlen hatást gyakorolt ez a könyv húsz évvel korábban, a molekuláris biológia kezdeti szakaszában.

Schrödinger könyve sajnos több kérdést vetett fel számomra, mint amennyit megválaszolt, és nehéz sóhajjal félretettem a biogenezis problémáját. Carter azonban odaadta az antropikus elvről szóló tanulmányának átdolgozott példányát (amit soha nem publikált),^[4] és Bill Saslaw-val, az intézet egy másik kutatójával együtt elrágódtam Carter elképzelésein. Az az idő tájt Cambridge-ben, a Medical Research Council Laboratóriumában dolgozó Francis Crickkel is megpróbáltunk összehozni egy találkozót, Cricket azonban túlságosan lekötötte a munkája, Carter pedig láthatóan belefáradt az antropikus elv témájába, így aztán az én biológiai kérdések iránti fogékonyságom is kezdett elpárologni.

Hosszú lappangás után, az 1980-as években lobbant fel ismét. Martin Rees (jelenleg Sir Martin Rees, a Királyi Csillagász) segített megszervezni egy „Az anyagtól az életig” címet viselő konferenciát Cambridge-ben. Rees, csillagász munkatársával, Bernard Carr-rel, az 1979-ben a *Nature*-ben közzétett híres tanulmányban^[5] új életet öntött az antropikus elv elméletébe. A konferencia fizikusokat és

csillagászokat hozott össze; megjelent Brandon Carter, Freeman Dyson és Tommy Gold, továbbá Lewis Wolpert és Sidney Brenner biológus, John Conway matematikus, a biogenezis legkiválóbb szakértői közül pedig Manfred Eigen és Graham Cairns-Smith. Az élet keletkezésének kérdéséről folyt a szó, és bár nem jutottunk semmiféle határozott következtetésre, a találkozó jól szolgálta a tudományos és konceptuális kulcsproblémák feltárását. Ismét töprengeni kezdtem az élet rejtélyéről. A következő évtized során ismét Hoyle, továbbá Dyson és Gold elképzeléseinek hatása alá kerültem. Hoyle, a munkatársával, Chandra Wickramasinghével, merészen felvetette, hogy az élet talán nem is a Földön keletkezett, hanem üstökösök révén került ide. Dyson is elmélkedett az élet eredetéről, és szabadjára eresztette a képzeletét a technikai civilizáció jövőjéről és végső sorsáról. Gold elmélete szerint a Föld mélye nagy mennyiségű szénhidrogént rejt, és a hipotézise ellenőrzésére folytatott kutatások során új, föld alatti életformákat fedeztek fel. Mindezek a fejlemények hozzájárultak a tárgyról való gondolkodásom alakításához.

Számottevően hatott a biogenezis iránti érdeklődésemre a néhai Keith Runcorn geofizikus, akinek az érdeklődési köre jóval túlterjedt a Földön, a Naprendszer egészét felölelte. Bár a geofizika távol esik a szakterületemtől, gyakran beültem Keith szemináriumaira és konferenciáira. A Meteoritical Society 1987-ben, Newcastle-ban tartott ötvenedik találkozója különösen emlékezetesnek bizonyult, mivel ott hallottam először a Marsról származó

meteoritokról.

Az 1990-es évek elején bukkantam a kirakó utolsó darabjára, amikor Ausztráliába költöztem, hogy az University of Adelaide-on folytassam a munkámat. Ott kezdtem érdeklődni Duncan Steelnek, a kisbolygó- és üstökösbecsapódások szakértőjének munkássága iránt. Steel ismertette meg azzal a ténnyel, hogy kozmikus ütközések során anyag vetődhet ki a bolygókról, és ez az elképzelés vetette meg a Mars és a Föld között utazó mikroorganizmusokról szóló elméletem alapjait.

Amikor elhatároztam, hogy megírom ezt a könyvet, meggyőződéssel hittem, hogy a tudomány közel áll az élet keletkezésének a megfejtéséhez. Úgy tűnt, hogy a mélyen a föld alatt élő mikrobák felfedezésével megkerült a biokémiai leves prebiotikus világa és az első primitív sejtek közötti „hiányzó láncszem”. És kétségkívül ennek a szakterületnek számos tudósa vélekedik úgy, hogy a biogenezis problémái nagyrészt megoldottnak tekinthetők. Az utóbbi évek számos könyvéből olvasható ki a meggyőző üzenet, miszerint az élet eredete egyáltalán nem is olyan rejtélyes.^[6] Szerintem azonban tévednek. Most, hogy eltöltöttem egy-két évet a téma kutatásával, azon a véleményen vagyok, hogy az ismereteinkben még mindig jókora űr tátong. Nevezetesen, akad ugyan egészen jó elképzelésünk arra vonatkozóan, hogy hol és mikor kezdődött az élet, de nagyon messze járunk attól, hogy megértsük a hogyanját.

Ismereteinknek ez a hiányossága nem pusztán bizonyos gyakorlati részletek homályban maradását jelenti, hanem

jelentős fogalmi hiányosságot. Ezzel nem arra akarok célozni, hogy az élet eredete természetfölötti esemény lett volna, csak arra, hogy valami roppant alapvető nincs a kezünkben. Amennyiben – mint oly sok szakértő és kommentátor állítja – az élet keletkezése a megfelelő körülményeken múlik, akkor igazán meghökkentő módon mennek a dolgok az univerzumban, aminek mélyreható filozófiai következményei is vannak. Személyes véleményem szerint az élet eredetének teljesen kielégítő elmélete radikálisan új elképzeléseket követel.

Sok szakember húzódozik nyilvánosan kijelenteni, hogy az élet eredete bizony mindmáig rejtély, még ha csukott ajtók mögött készséggel elismerik, hogy zavarban vannak. Feszengésük alapvetően két okra vezethető vissza. Először is attól tartanak, hogy kitárnák a kaput a vallási fundamentalisták „istent a hiányokba!” jellegű pszeudomagyarázatainak.^[7] Másodsor, hogy a tudatlanságuk nyílt beismerése aláaknázná a kutatásaik, különösen az űrben életet kereső kutatások anyagi támogatását. Ez utóbbi nézet érvelése szerint a kormányzatok könnyebb szível hajlandók pénzt költeni a Földön kívüli élet kutatására, ha a tudósok már biztosra veszik, hogy van mit keresni.

Úgy vélem, ez a hozzáállás tökéletesen hibás. A tudósoknak a legkevésbé sem válik javukra, ha túlzó kijelentéseket tesznek, pusztán nyilvános fogyasztásra. Ennél lényegesebb, hogy valaminek a nem tudása sokkal jobb ösztönzést jelent a kísérletezéshez, mint a bizonyosság. Pontosan azért fontos más világokban nyomozni az élet után, és pontosan azért fontos a

laboratóriumi szintetizálásával próbálkozni, mert annyi kínzó bizonytalanság merül fel a keletkezése kérdésében. Ha igazam van abban a tekintetben, hogy a biogenezis valami mélyrehatóan újra és meghökkentőre utal, akkor más világok kutatása teszi lehetővé számunkra, hogy működés közben érjük tetten ezt a lényegbevágó átmenetet. Egyes csillagászok előszeretettel tekintik gigantikus prebiotikus laboratóriumoknak a külső bolygókat – mint a Szaturnusz vagy a Jupiter – és a holdjaikat, ahol a Földön az élethez vezető lépések megdermedtek az időben, félúton a komplex vegyi és az igazi biológiai folyamatok birodalma között.

A Mars esetében valószínűsíthető, hogy sor került az élettelen és az élő közötti vonal átlépésére, és a múlt egyik-másik szakaszában virult az élet a vörös bolygón. Az e könyvben később kifejtendő okok miatt szerintem bizonyosra vehető, hogy volt élet a Marson. Véleményem szerint továbbá jó esélyünk van arra, hogy korunkban is találjunk ott életet, amennyiben tudjuk, hol kell keresnünk.

A biogenezis rejtélyének megoldása nem csupán egy újabb probléma a „feltétlenül meg kell csinálni” típusú tudományos programok hosszú listáján. Miként az univerzum keletkezése és a tudat eredete, összességében mélyrehatóbbat képvisel, mert éppen a tudományunk és a világlátásunk alapjait teszi próbára. Az a felfedezés, ami feltehetőleg megváltoztatja a fizikai világ megismerésének és megértésének alapelveit, minden kétséget kizáróan kiemelt figyelmet érdemel. Az élet eredetének rejtélye két és fél évezrede foglalkoztatja a filozófusokat, teológusokat

és tudósokat. A következő évtized során páratlan lehetőségünk kínálkozik, hogy jelentős előrehaladást érjünk el ezen a téren. Az, hogy a tudósok jelenleg elakadtak, csak még izgalmasabbá és érdekfeszítőbbé teszi ezt a lehetőséget.

Nézetem szerint az élet természetének alapos megértése nélkül a biogenezis problémája sem oldható meg. Egészen pontosan mi is az élet? Sajátosságait tekintve az élet annyira rendkívüli, hogy az már kimeríti az anyag egy eltérő állapotának leírását. Ezt a könyvet az élet meghatározásának a keresésével, ezzel a hírhedetten nehéz problémával nyitom. A legtöbb tankönyv az élet kémiáját helyezi előtérbe: sorra veszik, milyen molekulák mit csinálnak a sejten belül. Az élet nyilvánvalóan kémiai jelenség, de a különbség nem is a kémiájában, mint olyanban rejlik. Az élet titka az informatikai tulajdonságaiból ered: az élő szervezet – komplex információ-feldolgozó rendszer.

A komplexitás és az információ a termodinamika tárgyköréhez tartozik, a tudomány azon ágához, amely összekapcsolja a fizikát, a kémiát és a számítástechnikát. Évtizedeken át fennállt a gyanú, hogy az élet, a maga meglepő jelenségeivel, valamiképp megkerüli a termodinamika törvényeit, nevezetesen a termodinamika második főtételét, a leglényegesebbet a természet valamennyi törvénye közül, mely leírja a rendszerek általános tendenciáját a „szétesésre” és a degenerációra. Az életet figyelve könnyen támadhat az a benyomásunk, hogy valóban áthágja ezt a törvényt. A 2. fejezetet a

termodinamika második főtételének szenteltem, mert közeget kínál annak, amit a biogenezis végső problémájának tekintek, nevezetesen, hogy honnan ered a biológiai információ. Bármilyen jelentős vegyi folyamatok játszódtak is le az ősi Földön vagy valamely másik bolygón, az életet nem pusztán valamilyen molekuláris forgatag lobbantotta fel, hanem az *információ megszervezése*. Ezt a témát fejtegetem tovább a 3., 4. és az 5. fejezetben, ahol leírom az őssevekről és az események más forgatókönyveiről szóló elméleteket, melyek során életté lettek a kémiai folyamatok, valamint az élet laboratóriumi előállításának néhány kísérletét. Röviden áttekintem továbbá a legkorábbi életformákkal kapcsolatba hozható fosszilis bizonyítékokat. A darwinizmusról és az alapvető molekuláris biológiáról szóló részek némelyike ismerősen csenghet az olvasó számára, és ez esetben természetesen átugorhatja; mindenesetre megpróbáltam újszerű nézőpontból bemutatni az ortodox elképzeléseket.

Amennyiben nem tévedek abban, hogy a biogenezis kulcsa nem a kémiai folyamatokban, hanem egy bizonyos logikai és információs struktúra kialakulásában rejlik, akkor egy szoftveres vezérlést alkalmazó információ-feldolgozó rendszer létrejötte jelenti a döntő lépést. A negyedik fejezetben kifejtem, hogy ez a lépés együtt járt a genetikai kód megjelenésével. Részben a számítástechnika szóhasználatával és fogalmaival igyekszem fényt vetni a komplexitás azon teljességgel újszerű formájára, amely az élő szervezetek génjeiben található. A biológiai komplexitás az a tulajdonság, ami a genomot, az adott

genetikai információk összességét, olyan képtelen jelenséggé teszi, hogy szinte nem is hiszünk a szemünknek – valahogy azonban mégiscsak ki kellett alakulnia. Arra a következtetésre jutottam, hogy inkohereNS vegyületekből és elemekből a természet egyetlen ismerős törvénye sem hozhat létre ilyen struktúrát azzal a végzetserű elkerülhetetlenséggel, ahogy azt egynémely tudós állítja. Ha az élet olyan könnyen kialakulna, és általános lenne a mindenségben, akkor új fizikai elveknek kellene működniük. Erre a témára térek ki az utolsó fejezetben, ahol megpróbálom végigkövetni a filozófiai folyamányait annak az eshetőségnek, hogy az univerzum, mint oly sokan vélik, nyüzsög az élettől. Bár nem kétlem, hogy az élet keletkezése nem csoda a szó szoros értelmében, azt igenis hiszem, hogy elképesztően leleményes, a biológiai szerveződés számára kedvező, hogy úgy mondjam, életre ítéltetett univerzumban élünk.

A könyv második felének legnagyobb részében az élet eredetének egy alapvetően új elméletét tárgyalom. Darwin kora óta csak két átfogó elmélet született a biogenezisről. Az első, hogy az élet amolyan kémiai kotyvasztással kezdődött valamilyen nedves közegben, a Föld felszínén – maga Darwin „meleg kis tórol” ír. A másik szerint az élet az űrből érkezett a Földre, életképes mikrobák formájában – ez az úgynevezett pánspermia-hipotézis. Az utóbbinak egyébként az a legfőbb hátulütője, hogy továbbra is homályban hagyja az élet végső eredetét. Számomra a bizonyítékok egyre inkább egy harmadik lehetőségre utalnak, nevezetesen, hogy az élet a Föld belsejében

született. Természetesen nem a legbelső magjában, de kilométerekre a szilárd kéregtől, valószínűleg a tengermeder alatt, ahol a geotermikus aktivitás katlanszerű körülményeket hozott létre. A magas hő és a felszín alatti zóna vegyi potenciája, különösen a vulkáni kürtők közelében, egy szempillantás alatt megölné az ismert organizmusok többségét. Csakhogy éppen az ilyen környezet az eszményi a biogenezis számára, és a tudósok már fel is fedeztek olyan különös mikrobákat, melyek jóval a víz forráspontja fölötti hőmérsékleten, ezeken a fortyogó helyszíneken élnek. Ezeknek a „csudabogaraknak” (*superbugs*), – nézetem szerint az élet hajnala óta fennmaradt élő kövületeknek – szentelem a 7. fejezetet.

A 8. fejezetben kifejtésre kerülő okokból úgy vélem, hogy nagyon hasonló „csudabogarak” éltek egykor mélyen a Mars felszíne alatt, ahol akár még manapság is létezhetnek. Meggyőződésem továbbá, hogy mikroorganizmusok utaztak a Föld és a Mars között óriási meteoritok becsapódása nyomán az űrbe kivetett kövek belsejében. A 8. fejezet nagy részében a sok vitát kiváltó marsi eredetű meteoritok kérdését taglalom, különösen a nevezetes ALH84001-ét, ami a NASA tudósai szerint marsbéli mikrobák kövületeit tartalmazza. Az életnek a bolygók közötti, szinte bizonyosra vehető cseréje, melyen mintha átnézne az „élet a Marson” vitákban részt vevő tudósok és kommentátorok többsége, tovább bonyolítja az élet keletkezésének kérdését. A Földön kezdődött, a Marson, vagy egymástól függetlenül mindkettőn? Netán

valahol egészen másutt? A 6. fejezetben tárgyalom a csillagászat jelentőségét a biogenezis tekintetében, a 9. fejezetben pedig a felújított pánspermia-elmélet bizonyítékaira keríték sort.

A könyv megírására tett előkészületeim során sok hasznát vettem a kiváló kollégáimmal folytatott vitáknak és eszmecseréknek. Néhányukat már említettem; külön köszönetemet kell kifejeznem Susan Barnsnek, Robert Hannafordnak, John Parkesnak, Steven Rose-nak, Mike Russellnek, Duncan Steelnek és Malcolm Walternek, akik voltak olyan kedvesek, hogy elolvasták és kommentálták a kézirat első vázlatait. Értékes segítséget nyújtott az írás szakaszában: Diane Addie, David Blair, Julian Brown, Roger Buick, Julian Chela-Flores, George Coyne, Helena Cronin, Robert Crotty, Susan Davies, Reza Ghadiri, Monica Grady, Gerry Joyce, Stuart Kauffman, Bernd-Olaf Küppers, Clifford Matthews, Chris McKay, Jay Melosh, Curt Mileikowsky, Martin Redfern, Martin Rees, Everett Shock, Lee Smolin, Roger Summons, Ruediger Vaas, Frances Westall és Ian Wright. Ugyancsak lekötelezett vagyok Fran O'Connornak az index előkészítéséért.

Végül szeretnék néhány szót szólni a kötet címéről. A bibliai Teremtés könyvéből merítettem, amelyik lépésről lépésre leírja, hogyan teremtette Isten a világot. A 1:11. vers szerint: „Hajtson a föld gyenge fűvet.” Ez az élet első említése – az ötödik csoda. A megelőző négy csoda a világegyetem teremtése, a fény megteremtése, az égbolt megteremtése és a szárazföld megteremtése. Bibliatudósok felhívták ugyan a figyelmemet arra, hogy

ebben a formájában tévesen értelmezem a felsorolást, mivel az első mondat – „Kezdetben teremtette Isten az eget és a földet” – valójában nem az egyik teremtő aktus leírása, hanem az egész folyamat összefoglalása, amit aztán a következő versek taglálnak részleteiben. Mindazonáltal megmaradtam az ötödik csodánál. Ezzel a címmel nem arra utalok, hogy az élet keletkezése valóságos csoda volna. Azok az olvasók, akiket a téma teológiai vonatkozásai érdekelnek, forduljanak korábbi, *The Mind of God*^[8] (Isten gondolatai) és *Are We Alone?*^[9] (Egyedül vagyunk?) című könyveimhez.

Paul Davies
Adelaide, South Australia

1. AZ ÉLET MINT OLYAN

Képzeljük el, hogy beszállunk egy időgépbe és visszarepülünk négymilliárd évet. Mi vár ránk, amikor kiszállunk? Nincsenek zöldellő hegyek és homokos partok, sem fehér sziklák és sűrű erdők. Az ifjú bolygó meglehetősen kevésbé emlékeztet ma ismert megjelenésére. Ami azt illeti, maga a „Föld” elnevezés is elhibázottnak látszik, sokkal megfelelőbb volna az „Óceán” nevet alkalmazni, mivel szinte az egész világot mély és forró víz borítja. A fortyogó tengereket nem választják el egymástól kontinensek, csak imitt-amott emelkedik egy-egy hatalmas vulkán a vízfelület fölé mérgező gázfelhőt

okádva. Az atmoszféra mérhetetlenül sűrű és teljességgel belélegezhetetlen. Az égen, már amikor éppen nem borítják felhők, a halálos nukleáris reaktorként ragyogó Nap árasztja el ibolyántúli sugarakkal a bolygót. Éjjelente fénylő meteorok villannak át az égbolton. Időnként egy-egy nagy meteorit hatol át a légkörön, becsapódik az óceánba; a nyomában gigantikus, több kilométer magas szökőárak vágatnak körbe a bolygón.

Ennek a globális óceánnak a medre sem emlékeztet a korunkból ismerős sziklás-köves mederre. Közvetlenül alatta dübörög az őseredeti hőtől izzó hádészi kemence. A vékony kéreg repedései gyakorta tágulnak hatalmas hasadékokká, melyekből olvadt láva tör elő és rohamozza meg az óceán mélységeit. A tengervíz, amelyet a ránehezedő rétegek hatalmas nyomása megakadályoz abban, hogy felforrjon, bezúdul a labirintusszerű nyílásokba, és a kéreg mélyébe hatolva vegyi boszorkánykonyhát hoz létre. Valahol ezekben a forró mélységekben, a meder sötét bemélyedéseiben valami rendkívüli történik, valami, ami arra rendeltetett, hogy átformálja a bolygót, és végül talán az univerzumot is. Születőben van az élet.

A fenti leírás kétségkívül pusztá feltételezésekre épül. Csak az események sokféle lehetséges menetének egyike, melyből a tudósok az életet eredeztetik, bár pillanatnyilag ez látszik a leghihetőbbnek. Húsz évvel ezelőtt eretnekség lett volna arra utalni, hogy a földi élet a forró vulkáni mélységekben, levegőtől és napfénytől elzárva keletkezett. A bizonyítékok azonban egyre inkább arra utalnak, hogy legrégebbi őseink nem valami nyálkából kúsztak elő,

hanem a kéngőzös alvilágból emelkedtek fel. Még az sem elképzelhetetlen, hogy mi, a felszín lakói, valamiféle rendellenességet jelentünk, a Föld különleges körülményei folytán létrejött szokatlan alkalmazkodást. Ha a világegyetemben másutt is van élet, könnyen lehet, hogy túlnyomórészt a kéregben tanyázik, és csak ritkán nyilvánul meg valamely bolygó felszínén.

Noha egyelőre meglehetősen nagy egyetértés uralkodik abban a tekintetben, hogy a mélyben élő mikrobák voltak a Föld legelső biológiai formái, a vélemények továbbra is megoszlanak arról, hogy valóban a Föld kérgének mélyén keletkezett-e az élet, vagy csak korán odaköltözött. A molekuláris biológiában és biokémiában az utóbbi egy-két évtized során elért látványos előrehaladás ellenére a tudósok még mindig nem tudják bizonyosan, hogyan is jött létre az élet. Bár felsejlenek valamilyen elmélet körvonalai, messze járunk attól, hogy minden részletre kiterjedő beszámolóval rendelkezünk az anyag életre kelésének folyamatáról. Még az élet bölcsőjének helye is homályba burkolódik. Meglehet, nem is a Földön keletkezett; érkezhettek az űrből is.

Az élet eredetének magyarázatával küszködő tudósokra az a feladat vár, hogy lépésről lépésre összerakják az évmilliárdokkal ezelőtt lezajlott, és csekély vagy éppen semmiféle nyomot nem hagyó események pontos menetét. Félelmetes kihívás. Szerencsére az utóbbi néhány évben jelentős felfedezéseket tettek a Föld legrövidebb szervezeteinek valószínűsíthető természetéről. A laboratóriumi eljárások is hatalmasat fejlődtek, és egyre

többet tudunk az ősi Naprendszer állapotáról. A marsbéli élet lehetőségére irányuló érdeklődés újjáéledése ugyancsak tágította az élethez szükséges feltételekkel kapcsolatos gondolkodásunk kereteit. Mindezek a fejlemények együttesen a tudomány spekulatív állóvizéből a kutatás sodrába terelték a témakört.

A probléma, hogy az élet hogyan és hol keletkezett, a tudomány egyik legnagyobb rejtélye. De jóval több is annál. Az élet keletkezésének története filozófiai, sőt vallási jelentőséggel is bír. Az olyan mélyreható kérdésekre adandó válaszok, hogy az egyedüli érző lények vagyunk-e az univerzumban, hogy az élet véletlen vagy törvényszerű események eredménye-e, vagy éppen hogy lehet-e valamiféle végső értelme a létezésünknek, azokon az eredményeken fordulnak meg, amit a tudomány az élet kialakulásáról feltárhat.

Az ilyen jelentőségteljes és érzelmi felhangoktól sem mentes kérdéskörben egyáltalán nem meglepő a nézetazonosság hiánya. Egyes tudósok a kémia különös szeszélyének, a vegyi folyamatok soha és sehol meg nem ismétlődő firtorának tekintik az életet, míg mások ragaszkodnak hozzá, hogy – a megfelelő körülmények között – a természeti törvények elkerülhetetlen következménye. Ha az élet nagyszerű építménye a végzet véletlenszerű és pusztán mellékes cikornyája, ahogy Jacques Monod francia biológus tartja, akkor kénytelenek vagyunk osztani azt a szikár ateizmust, amelyet oly elegánsan fejez ki: „Az ősi szövetség romokban hever: az ember végre tudja, hogy egyedül van a világegyetem

érzéketlen végtelenségében, melyből csupán a véletlen emelte ki. Sem sorsát, sem kötelességeit nem szabták meg előre”.^[10]

De ha úgy adódik, hogy az élet többé-kevésbé a kozmosz mély törvényszerűségeiből fakadóan keletkezett, ha alapvető és előre megírt szerepet játszik a felséges kozmikus színhátékban, az azt jelenti, hogy egy céllal rendelkező univerzummal van dolgunk. Az élet eredete tehát egyúttal a lét értelmének a kulcsa.

A következő fejezetekben sorra veszem az új keletű tudományos bizonyítékokat abban a kísérletemben, hogy megütköztessem ezeket az egymással versengő filozófiai nézeteket. Mennyire elfogult az élettől a világegyetem? A Földbolygóra korlátozódik-e az élet? Hogyan lehet egyenes fizikai folyamatok eredménye egy olyan komplex jelenség, mint amilyent akár a legegyszerűbb élő szervezetek is képviselnek?

Az élet rejtélyes eredete

Az élet létrejötte valóságos csodának tűnik, oly sok feltételnek kell teljesülnie, hogy elindulhasson.

FRANCIS CRICK^[11]

A kimberleyi ausztrál őslakók szerint Lalai teremtésidejében Wallanganda, a Galaktika ura és a Föld teremtője édesvízzel öntözte az űrből Wunggudot, az óriás Földkigyót. Wunggud, akinek a teste az őseredeti anyagból készült, zselészerű labdaccsá, *ngallalla yawunná*

gömbölyödött, és megmozdult, miután befogadta az éltető vizet. Bemélyedéseket, *garagik*at alakított ki a földben a víz összegyűjtésére. Aztán megteremtette az esőt és elindította az élet rendszeresen ismétlődő folyamatait: az évszakokat, a szaporodási ciklusokat, a menstruációt. Teremtőerejével formálta meg a tájat és hívta életre az összes teremtményt, melyek fölött uralkodik.^[12]

Minden kultúrának megvan a maga egyszerűbb vagy színesebb teremtésmítosza. A nyugati civilizáció évszázadokon át olyan forrásnak tekintette a Bibliát, ahonnan felvilágosítást nyerhet a kezdetekről. A bibliai szöveg csalódást keltően szerénynek tűnik az ausztrál történet mellett: Isten, az ötödik csodájaként, többé-kevésbé a mai formájában teremtette meg az életet.

Kimberleytől nem messze, a Nagy-homoksivatag Pilbarahegységében található a Föld legrégebb ismert kőületei. Ezek a rendkívüli maradványok a teremtés tudományos történetéről szóló jelentés részét képezik. A tudomány kiindulópontja az az előfeltételezés, hogy nem valamiféle isten vagy természetfölötti lény teremtette az életet, hanem minden külső segítség nélkül, spontán módon, természetes folyamatként jött létre.

Az elmúlt két évszázad során a tudósok szorgalmasan igyekeztek összerakosgatni az élet történetét. A kőületekből egyértelműen kiderül, hogy az ősi élet jelentős mértékben különbözött a maitól. Általánosságban elmondható, hogy minél távolabbra pillantunk vissza az időben, annál egyszerűbb életformákat találunk a Földön. Csupán az utóbbi egymilliárd évben burjánzottak el a

komplex életformák. A legrégebbi hiteles, valódi állati kövületek is Ausztráliában kerültek napvilágra (Adelaide-tól északra, a Flinders-hegységben), és mintegy 560 millió évesek lehetnek: az „ediacara-fauna” medúzára emlékeztető lényeknek maradványai. Röviddel e korszak után, úgy 545 millió évvel ezelőtt robbanásszerűen növekedni kezdett a fajok száma, majd nagy természetű növények és állatok hódították meg a szárazföldet. Egymilliárd évvel ezelőtt azonban egysejtű szervezetekre korlátozódott az élet. A komplexizálódás és a változatossá válás ilyen jeleire átfogó magyarázatot nyújt Darwin evolúciós elmélete, melynek értelmében a folyamatos elágazások és újraelágazások újabb és újabb leszármazási ágakat hoznak létre. A múlt felé haladva viszont ezek az elágazások egymás felé tartanak. A bizonyítékok nagymértékben valószínűsítik, hogy a Földön valamennyi élet ezen elágazási folyamat révén származott le egy közös őstől. Azaz minden személy, minden állat és növény, minden láthatatlan baktérium ugyanarra az évmilliárdokkal ezelőtt élt parányi mikrobára, a legelső élőnek tekinthető dologra vezethető vissza.^[13] Ám az életről szóló tudományos beszámoló elsődleges megoldatlan rejtélyeként még mindig magyarázatra vár, hogy miként jött létre az a bizonyos első mikroba. Ha bekukkantunk az élet legbelső működésébe, akkor csak tovább mélyül a rejtély. Az élő sejt az ilyen méretben ismert legösszetettebb rendszer. Olyan specializált molekuláknak ad otthont, amelyek az élő anyagon kívül sehol másutt nem találhatók meg, és önmagukban is

mérhetetlenül bonyolultak. A tökéletes megbízhatóság táncát lejtik, lélegzetelállítóan pontos zenei kísérettel. Az életnek ebben, a legművesebben koreografált balettnál is mérhetetlenül bonyolultabb táncában számtalan csiszoltan együttműködő molekuláris művész vesz részt. Ebben a táncban azonban nyoma sincs semmiféle koreográfusnak. Nincs intelligens rendező, nincs misztikus erő, nincs tudatos vezérlőerő, ami a megfelelő időben a megfelelő helyre küldené a molekulákat, kiválasztaná az alkalmas szereplőket, rögzítené a kötéseket, megválasztaná az alkalmas partnereket és tovább mozgatná őket. Az élet tánca spontán, önfenntartó és önteremtő.

Hogy jöhet valami – ami ennyire bonyolult, ennyire kifinomult, ennyire intelligens – saját magától létre? Hogy lehetnek képesek az értelem nélküli molekulák pusztán a közvetlen szomszédjuk taszigálásával úgy együttműködni, hogy létrehozzanak és fenntartsanak egy ilyen ügyes jelenséget, mint az élő szervezet?

Ennek a rejtélynek a megfejtése több tudományágot is érint; mindenekeelőtt a biológiát, de részt vesz benne a vegyészet, a geológia, a csillagászat, a matematika, az informatika és a fizika is. Kevés tudós véli úgy, hogy az élet egyetlen monumentális szökkenéssel született, ugyanis nincs olyan fizikai folyamat, amely varázsütésre életet lehelne az érzéketlen anyagba. Hosszú és bonyolult átmeneti szakasznak kellett elválasztania az élettelenről az első igazi élőlényt, az események egy olyan átfogó menetének, amely valószínűleg nemigen lehetett előre elrendezve megannyi számtalan részletében. Kizárólag a

természeti törvények nem magyarázzák meg az élet keletkezését, mert nincs olyan ismert törvény, ami pontosan, tévedhetetlenül és megkerülhetetlenül előírná a megfelelő kötősorozatot az atomok légióinak. Vagyis az élethez vezető útvonalat, bár a természet törvényei szabta korlátok között, de nagyrészt a véletlennek és a körülményeknek – vagy ahogy a filozófusok mondják: a kontingenciának – kellett kitévniük. Ezért, továbbá a távoli múltban uralkodó állapotokat illető tájékozatlanságunk miatt soha nem fogjuk pontosan tudni, milyen meghatározott eseménysor hozta létre az első életformát.

A részleteket illető tájékozatlanságnál azonban sokkal mélyebbre vezet a biogenezis rejtélye. Szembe kell néznünk az élet természetére vonatkozó átfogó fogalmi problémával is. Az íróasztalomon a hatvanas években oly népszerű lámpák egyike áll, amely két, egymással nem keveredő színes folyadékot tartalmaz. Az egyik folyadék cseppjei lassan felemelkednek és átlibegnek a másikon; a cseppek viselkedését gyakran „életszerűnek” minősítik. És a lámpa korántsem áll egyedül ezzel. Sok élettelen rendszer mutat életszerű tulajdonságokat: villódzó lángok, hópelyhek, felhőalakzatok, folyóban forgó örvények. Mi különbözteti meg a valódi élő szervezeteket a csupán életszerű rendszerektől? Nem egyszerűen mérték- vagy méretbeli különbségről van szó; minőségi különbség mutatkozik az élő és az egyszerűen csak életszerű jelenségek természete között. Egy csirke tojásából nagy valószínűséggel ugyancsak csirke fog kikelni. De próbáljuk csak megjósolni a következő hópehely pontos alakját! A

döntő különbség, hogy a csirke meghatározott genetikai utasításoknak megfelelően készül, míg a lámpa cseppjei, a hópelyhek és az örvények esetlegesen formálódnak. Nincsenek hópelyhet meghatározó gének. A biológiai komplexitás *vezérelt* komplexitás, vagy modern kifejezéssel, információ alapú komplexitás. A következő fejezetekben kifejtem, hogy nem elég megtudni, miként keletkezik az élet mérhetetlen strukturális komplexitása, hanem a biológiai információ eredetére is magyarázatot kell adnunk. Mint látni fogjuk, a tudósok még mindig nagyon messze járnak ennek az alapvető konceptuális talánynak a megoldásától. Némelyek örömet lelik tudásunknak ebben a hiányosságában, azt képzelvén, hogy így tág tere marad a csodálatos teremtésnek. Ám a tudománynak az a feladata, hogy isteni beavatkozásra hivatkozás nélkül találjon megoldást a rejtélyekre. Az, hogy a tudósok egyelőre bizonytalanok az élet kezdetének hogyanját illetően, nem jelenti azt, hogy nem is lehet természetes eredete.

Hogyan lássunk neki, hogy tudományos magyarázatot adjunk az élet keletkezésére? Első pillantásra reménytelennek látszik a feladat. A megkövesedett maradványok keresgélésének hagyományos módszere kevés nyomot kínál. Az életet előidéző finom molekulák nagy többsége réges-rég megsemmisült. A legjobb esetben is csak azon ősi szervezetek valamiféle lebomlott kémiai maradványainak előkerülésében bizakodhatunk, amelyekből az ismerős sejtélet fejlődött ki.

Ha kizárólag a megkövesedett maradványokra

támaszkodnánk, valóban kétségbeejtő feladatnak bizonyulna megérteni az élet keletkezését és korai fejlődését. Szerencsére más eljárással is élhetünk. Az is a ködbe vesző múltba vezet, ugyanakkor azonban létezik itt és most is, a jelenlegi életformák belsejében. A biológusok meggyőződése szerint az ősi szervezetek emlékei ott élnek leszármazottaik, köztük az ember felépítésében és biokémiai folyamataiban. A modern sejtek működésének tanulmányozásával bepillantunk az ősi élet működésének emlékeibe – egy különös molekula itt, egy furcsa kémiai reakció amott –, ugyanúgy, ahogy a nem az adott helyre illő érmék, rozsdás eszközök és gyanús földhalmok felkeltik a régészek gyanúját. A mai szervezetek belsejében lejátszódó bonyolult folyamatok közepette tovább élnek az őseredeti élet nyomai, mintegy hidat verve távoli múltunk felé. Ezeknek a homályos nyomoknak az elemzésével látnak hozzá a tudósok, hogy rekonstruálják az első élő sejtet létrehozó fizikai és kémiai útvonalakat.

A rekonstrukció feladata még az ilyen biokémiai nyomokkal is nagyrészt feltevéseken és találgatásokon alapulna, ha nem fedeztek volna fel újabban bizonyos „élő kövületeket”, hátborzongatóan szélsőséges körülmények között élő mikrobákat. Ezek a nagy szakmai érdeklődést kiváltó „csudabogarak” (*superbugs*) várhatóan forradalmasítják a mikrobiológiát. Könnyen lehet, hogy ezekben a merőben szokatlan mikrobákban olyasmit fedezünk fel, ami árulkodik a minden földi élet őisének tekinthető primitív szervezetekről. További nyomokra bukkanhatunk az élet keresése során a Marson és más

bolygókon, továbbá az üstökösök és a meteoritok tanulmányozásából. Mindezen kutatási irányok összefogásával talán le is nyomozhatjuk az útvonalat – legalább hozzávetőlegesen –, amelyet követve először jelent meg az élet a mindenségben.

Mi az élet?

Mielőtt belevágnánk, hogy részleteiben taglaljuk az élet eredetének problémáját, szükségszerűen tisztáznunk kell, hogy mi is az élet. Ötven évvel ezelőtt sok tudós meggyőződéssel vallotta, hogy küszöbön áll az élet rejtélyének megoldása. A biológusok rájöttek, hogy a titok nyitja a sejten belüli molekuláris alkotóelemek körében található. A fizikusok addigra lenyűgöző lépéseket tettek az anyag atomi szintű szerkezetének tisztázásában, és olybá tűnt, hamarosan az élet problémája is megadja magát. A követendő menetrendet Erwin Schrödinger könyve, a *What is Life?* (Mi az élet?) 1944-es megjelenése állította fel. Akkoriban úgy vélték, az élő szervezetek nem többek mikroszkopikus részekből összeálló, roppant bonyolult gépezetknél, amely részek a kísérleti fizika módszereivel tanulmányozhatók. Az alapos vizsgálat tovább erősítette ezt a szemléletet. Az élő sejten valóban nyüzsögnek a miniatűr gépezetek. Vagyis csak össze kellene állítani a megfelelő használati utasítást, egy afféle „gépkezelési könyvet”, és a probléma már meg is oldódik. Manapság azonban igencsak naivnak tűnik a sejten pusztán nagyon bonyolult gépezetnek tekintő álláspont. A molekuláris

biológia tagadhatatlanul fényes sikerei ellenére a tudósok változatlanul nem tudják határozottan megmondani, *pontosan* mi választja el az élő szervezetet a más természetű fizikai objektumoktól. A szervezetek gépekként való kezelése kétségkívül igen gyümölcsözőnek bizonyult, de nem szabad a túlságos leegyszerűsítés amúgy vonzó csapdájába esnünk. A mechanisztikus magyarázat az élet megértésének fontos része, de távolról sem kerekedik ki belőle a történet egésze.

Nézzünk egy meglepő példát arra, lényegében hol is rejlik a probléma! Képzeljük el, hogy feldobunk a levegőbe egy döglött és egy élő madarat. A döglött madár megjósolhatóan néhány méterrel arrébb lepuffan a földre. Az élő madár a város túlvégén egy tévéantennán, vagy egy faágon, egy háztetőn, egy sövényen vagy egy fészekben fejezheti be röptét; nehéz volna előre kiszámítani, hol.

Fizikusként úgy szoktam gondolkodni az anyagról, mint ami passzív, közömbös és csak külső erő hatására reagál – mint amikor a döglött madár a gravitációs vonzás következtében a földre esik. Az élőlényeknek azonban *önálló* életük van. Mintha valamilyen belső szikrát tartalmaznának, ami autonómiát ad nekik, úgyhogy (bizonyos határok között) kedvükre cselekedhetnek. A maguk korlátozott módján még a baktériumok is a saját akaratukat követik. Mit jelent ez a belső szabadság, ez a spontaneitás? Hogy a szervezetek dacolnak a fizika törvényeivel, vagy csak hasznosítják a céljaik érdekében? Ha igen, hogyan? És honnan erednek ezek a „célok” egy olyan világban, amelyet látszólag vak és céltalan erők

kormányoznak?

Mintha ez az autonómia vagy önrendelkezés jelentené az élőt az élettelenről való megkülönböztetés legtalányosabb oldalát: még azt sem tudni, miből fakad. Miféle tulajdonságai ruházzák fel autonómiával az élő szervezetet? Nehéz megmondani.

Az *autonómia* az élet egyik legfontosabb sajátossága. De sok más is akad, nevezetesen:

Reprodukció. Az élő szervezetnek képesnek kell lennie a szaporodásra. Csakhogy egyes nem élő dolgok, például a kristályok és a bozóttüzek is reprodukálódhatnak, ugyanakkor a vírusok, amelyeket sokan élőnek tekintenek, képtelenek önerőből szaporodni. Az öszvérek egészen biztosan élnek, ám sterilek lévén, nem szaporodnak. Egy sikeres utód több az eredeti pusztá másolatánál, mivel a *replikációs apparátus másolatát* is tartalmazza. Ahhoz, hogy a következő nemzedéken túl is továbbadják a génjeiket, a szervezeteknek a génekhez hasonlóan a replikáció eszközeit is másolniuk kell.

Anyagcsere. A szervezetet akkor tekintjük elevennek, ha *csinál* is valamit. Minden szervezet reakciók bonyolult sorozatán át feldolgoz különféle anyagokat, aminek eredményeként energiát nyer, hogy képes legyen olyan feladatok végrehajtására, mint amilyen a mozgás és a szaporodás. Ezt a kémiai folyamatot és energia-felszabadítást nevezik anyagcserének. Csakhogy az anyagcserét nem azonosíthatjuk az élettal. Egyes mikroorganizmusok hosszú időn át szunnyadhatnak tökéletesen felfüggesztett életfolyamatokkal, de mégsem

mondhatjuk őket halottaknak, amíg lehetséges az újjáéledésük.

Táplálkozás. Szorosan összefügg az anyagcserével. Zárjunk be egy élő organizmust egy dobozba elég hosszú időre, és eljön a pillanat, amikor megszűnik működni, vagyis elpusztul. Az élet szempontjából döntő jelentőségű a folyamatos anyag- és energia-felvétel. Az állatok például esznek, a növények fotoszintetizálnak. De kizárólag az anyag és az energia áramlásával nem ragadhatjuk meg az élet lényegét. A Jupiter Nagy Vörös Foltja olyan felhőörvény, amelyet az anyag és az energia áramlása tart fenn, mégsem nyilvánítja senki élőnek. Ráadásul az életnek nem bármilyen energiára, hanem hasznosítható vagy szabad energiára van szüksége. Erről bővebben később.

Komplexitás. Az élet minden ismert formája meghökkentően összetett, komplex. Még az egysejtű szervezetek is, például a baktériumok valósággal nyüzsögnek a milliányi alkotóelem részvételével zajló aktivitástól. Részben éppen ez a komplexitás szavatolja az organizmusok kiszámíthatatlanságát. Másfelől viszont egy hurrikán vagy egy galaxis is roppant bonyolult. A hurrikánok közismerten kiszámíthatatlanok. Sok olyan nem élő fizikai rendszert ismerünk, amelyet a tudósok kaotikusnak neveznek – viselkedésük túlságosan bonyolult ahhoz, hogy megjósolható legyen, akár véletlenszerű is lehet.

Szerveződés. Talán nem is önmagában a komplexitásnak van jelentősége, hanem a *szervezett* komplexitásnak. Az élő szervezet alkotórészeinek együtt kell működniük egymással, máskülönben a szervezet

megszűnik koherens egységként működni. Nem sokra jutnánk például az artériák és a vénák hálózatával, ha a szív nem pumpálná át rajtuk a vért. Csekély előrehajtó erőttel jelentene a két lábunk, ha mindegyik a maga önálló módján mozogna és semmiféle kapcsolatban nem állnának egymással. Még az egyes sejteken belül is elképesztő mértékű együttműködés tapasztalható. A molekulák nem ötletszerűen mászkálnak, hanem a gyári szerelőszalag minden ismervét mutatják, magas fokú specializációval, munkamegosztással és hierarchikus vezérléssel.

Növekedés és fejlődés. Az egyedi szervezetek növekednek és az ökoszisztémák (megfelelő körülmények között) hajlamosak a terjeszkedésre. Ám sok nem élő dolog is növekszik (kristályok, rozsda, felhők). Kevésbé szembeszökő, de összességében az élet lényegesebb tulajdonsága a fejlődés. A földi élet a fokozatos evolúciós alkalmazkodás története, a változások és újdonságok eredményeként. A változás jelenti a kulcsot. A változással kapcsolatos replikáció vezet a darwini evolúcióhoz. Meg is fordíthatjuk a kérdést és kijelenthetjük: ha valami a Darwin által leírt módon fejlődik, akkor él.

Információtartalom. Az utóbbi években a tudósok előszeretettel hangsúlyozzák az élő szervezetek és a számítógépek hasonlóságát. Az organizmus replikálásához szükséges információ döntően a génekben kerül a szülőtől az utódhoz. Vagyis az élet: információtechnológia kicsiben. Ám önmagában az információ sem elegendő. Bőségesen található információ az erdőben a hulló falevelek helyzetében, csak hogy annak nincs *jelentése*. Hogy az élet

jellemzésére alkalmazhassuk, az információnak jelentést kell hordoznia a fogadó rendszer számára: „kontextusának” kell lennie. Más szóval, az információnak *specifikáltnak* kell lennie. De honnan ered ez a kontextus és hogyan jön létre a természetben spontán módon egy jelentéssel bíró specifikáció?

Hardver-szoftver keveredés. Mint látni fogjuk, a Földön található valamennyi életforma két nagyon elütő molekulaosztály, a nukleinsavak és a fehérjék között kötötten megegyezésben gyökerezik. Kémiai tulajdonságaik alapján ezek a csoportok kiegészítik egymást, a szerződés azonban sokkal mélyebbre nyúlik, az élet leglényegébe. A nukleinsavak tárolják az élet szoftverét, míg a fehérjék, az igazi dolgozók alkotják a hardvert. A két kémiai tartomány csak azért támogathatja egymást, mert különleges és kifinomult kommunikáció folyik közöttük egy kód, az úgynevezett genetikai kód közvetítésével. Ez a kód és a kommunikációs csatorna – mindkettő az evolúció magas szintű terméke – zavarba ejtő, már-már paradox módon egyesíti az élet hardver- és szoftveroldalát.

Állandóság és változás. Az élet további paradoxonja az állandóság és a változás különös kapcsolata. Erre a régi rejtélyre utalnak olykor a filozófusok, mint a „lét valamiként vagy válni valamivé” problémájára. A gének feladata replikálni, azaz megőrizni a genetikai üzenetet. Változás nélkül azonban lehetetlennek bizonyulna alkalmazkodni, és a gének végső soron kivesznének. Alkalmazkodni vagy elpusztulni, ez a darwini kényszer. De hogyan őrződhet

meg és változhat egyidejűleg ugyanaz a rendszer? Ez az ellentmondás a biológiai folyamatok lényegére tapint. Az élet az egymásnak ellentmondó követelmények közötti teremtő feszültség jóvoltából virul a Földön, de még mindig nem értjük teljesen, milyen szabályok irányítják ezt a játékot.

Nyilvánvaló, hogy nem könnyű választ adni Schrödinger kérdésére: Mi az élet? Nincs olyan egyszerű, meghatározó tulajdonság, amely megkülönbözteti az élőt az élettelenről. Talán ennek is csak az az oka, hogy a tudomány egységként kezeli a természetes világot; részben afölötti aggodalmában, hogy bármi, ami éket verne az élő és a nem élő közé, azon hiedelem felé téríthet bennünket, mely szerint az élet inkább mágikus vagy misztikus jelenség, mintsem valami teljes egészében természetes. Hiba volna éles választóvonalat keresni az élő és az élettelen rendszerek között. Nem távolíthatjuk el a sallangokat, hogy aztán azonosítsuk az élet valamiféle tovább már nem egyszerűsíthető lényegét, mondjuk egy bizonyos molekulát. Nem beszélhetünk élő molekuláról, csak molekuláris folyamatok rendszeréről, ami egészében tekinthető életnek.

A tulajdonságok listáját összegezve kijelenthetem, hogy általánosságban szólva az élet két döntő tényezőt tartalmaz: anyagcserét és szaporodást. Ezt a saját életünkben is láthatjuk. Az emberek legalapvetőbb tevékenységei a lélegzés, az evés, az ivás, az anyagcsere és a szex. Az első négy tevékenység tulajdonképpen az anyagcseréhez tartozik, míg az utolsó a szaporodáshoz. Kétséges, hogy olyan entitások, amelyeknek van

anyagcseréjük, de nem szaporodnak, vagy szaporodnak, de nincs anyagcseréjük, élőknek lennének-e tekinthetők a szó teljes értelmében.

Az „életerő” és más, lejáratott fogalmak

Tekintettel az élet megfoghatatlan jellegére, nem meglepő, hogy sokan folyamodtak misztikus magyarázatokhoz. Talán a szervezetet valamiféle esszencia vagy lélek szállja meg, amitől életre kel? Azt a felfogást, hogy a szokásos fizikai törvényeknek engedelmeskedő közönséges anyagon kívül az élet valamilyen extra alkotórészt igényel, vitalizmusnak nevezik. Tiszteletre méltóan hosszú múltra visszatekintő téves nézet. Arisztotelész görög filozófus úgy vélte, az életerőnek vagy pszichének nevezett különleges tulajdonság ruhazza fel az élő szervezeteket a lényeges tulajdonságaikkal, nevezetesen az autonómiával és az önmozgással. Arisztotelész pszichéje nem volt azonos az önálló lélek későbbi keresztény elképzelésével. Arisztotelész rendszerében a világegyetemben minden rendelkezik a viselkedését meghatározó belső tulajdonságokkal. Lényegében az egész kozmoszt egyetlen élő szervezetnek tekintette.

Az évszázadok során az életerő fogalma számos álruhában tűnt fel újra és újra. Időről időre megkísérelték összekapcsolni bizonyos anyagokkal, például a levegővel. Ez végső soron nem is teljesen ésszerűtlen; végtére is halál esetén leáll a lélegzés, a mesterséges lélegeztetés pedig

esetenként visszaállíthatja az életműködéseket. Később a vért nevezték ki az életadó anyagnak. Ilyen régi legendák élnek tovább az olyan kifejezésekben, mint az „életet lehelni” valamibe.

A tudományos ismeretek bővülésével az életerőt egyre bonyolultabb fogalmakkal társították. Kijelentették például, hogy az a flogisztonnal vagy az éterrel jár együtt, olyan képzeletbeli anyagokkal, amelyek idővel maguk is tévedésnek bizonyultak. Egy másik, a tizenyolcadik században népszerű elképzelés az elektromossággal azonosította az életerőt. Abban a korban az elektromosság jelenségét épp elég rejtélyesnek találták ahhoz, hogy ezt a célt szolgálhassa, Volta híres kísérletei pedig, amelyekben az elektromosság összehúzóásra készítette a békaizmot, látszólag kellő bizonyítékot szolgáltatottak. Azt a hiedelmet, hogy az elektromosság életre kelti a holt anyagot, mesterien használta fel Mary Shelley híres regényében, a *Frankensteinben*, ahol a halottak testrészeiből összerakott szörnyeteg életre kel egy égiháború hatalmas elektromos kisülésétől. A tizenkilencedik század vége felé a radioaktivitás lépett az elektromosság helyére, mint az akkor legújabbnak számító rejtelmes jelenség; meggyőződéssel állították, hogy életet lehet lehelni a rádiumkristályokból származó sugárzásnak kitett zselatinoldatba.

Ezek az életerő megragadására tett korai kísérletek manapság közönséges ostobaságoknak tűnnek. Mindamellet a huszadik században is fennmaradt a feltételezés, hogy a szokásos fizikai erőkön kívül még más

is szükséges az élethez. A szervezetek által termelt anyagokat hosszú időn át lényegüket tekintve megkülönböztették a többi anyagtól. A kémia tudománya mostanság is „szerves” és „szervetlen” kémiára oszlik. A következtetés az volt, hogy szerves anyagok, mint az alkohol, formaldehid és karbamid valamiképp őrzik az élet mágikus essenciáját, még olyankor is, amikor elkülönülnek az élő szervezettől. Ezzel szemben a szervetlen anyagok, mondjuk a konyhasó, kifejezetten és igazán holtak.

Annál nagyobb megrázkódtatásként hatott a vitalistákra, amikor 1828-ban Friedrich Wohlernek sikerült karbamidot szintetizálnia ammónium-cianátból, azaz szervetlen anyagból. A szervetlen és szerves világok közötti láthatatlan fal áttörésével, és annak bizonyításával, hogy magára az életre sincs feltétlenül szükség szerves anyagok készítéséhez, Wohler kihúzta a talajt a szerves vegyi anyagokat a többitől eltérőnek tekintő elképzelés alól. Im már nem volt szükségszerű két eltérő anyagtypust feltételezni, tehát ugyanazok az elvek vezérelték az élő és az élettelen világ kémiáját. Most már tudjuk, hogy az atomok folyamatosan keringenek a bioszférán át. A testünk minden szénatomja pontosan ugyanolyan, mint a levegőben vagy egy darab mészkőben lévő szénatom. Nincs semmiféle bűvös mozzanat, ami „élővé” varázsolja a szénatomjainkat, míg a körülöttünk lévők továbbra is holtak, nincs életszerű tulajdonságuk, amelyre akkor tennének szert, amikor megesszük, és amitől megválnának, amikor kilélegezzük őket.

A vitalizmus a szerves és a szervetlen kémia közötti különbség elmosódása ellenére is tovább élt, és néhány közismert filozófus is népszerűsítette, például a francia Henri Bergson. Tudományosabb szakaszba lépett az 1890-es években a német embriológus, Hans Driesch munkásságával. Driesch lenyűgözte, hogy az embrió megcsonkítható a fejlődése korai szakaszában mégis sikerül felépülnie és ép szervezetet létrehoznia. Ez a megfigyelés, valamint a szervezet fejlődésének más tulajdonságai indították Driescht arra a felvetésre, hogy a szervezet az általa entelechiának nevezett vezérlő életerő irányításával nyeri el a megfelelő alakját teljes komplexitásában. Driesch felismerte, hogy az entelechia szervező sajátosságai összeütközésbe kerülnének az ismert fizikai erőkkel és az energia-megmaradás törvényével. Elképzelése szerint az entelechia úgy működne, hogy a molekuláris kölcsönhatások időzítésének befolyásolásával azok együttműködő, holisztikus mintát kövessenek.

Bár az emberi fejlődést továbbra sem értjük teljes egészében, az, amit róla és általában a biológiai mintaformálásról tudunk, elég ahhoz, hogy meggyőzze a biológusokat, hogy az entelechia vagy bármilyen másfajta életerő fogalma csak a dolgok fölösleges bonyolítását jelenti. Ez persze nem akadályozza meg a tudományon kívül állókat, hogy továbbra is ragaszkodjanak a vitalista elképzelésekhez. A hiedelmek az áltudománytól (mint a Kirlian-fotó, ahol fényképen egyfajta koronafény figyelhető meg például egy erős elektromágneses térbe helyezett kéz

körül), a jin és a jang energiákcak a beavatott médiumok számára látható áramlásának, a karmának és az aurának nyíltan misztikus elképzeléséig terjednek. A misztikusok balszerencsére egyetlen megfelelően levezetett tudományos kísérlet sem igazolt működő életerőt, és a biológiai szervezeten belül lejátszódó folyamatok magyarázatához nincs is szükség ilyen erőre.

Az élet vitalista magyarázatainak elvetését ezen magyarázatok teljesen ad hoc jellege is indokolja. Amennyiben az életerő csak az élőlényekben nyilvánul meg, akkor – ha egyáltalán van – csekély a magyarázati értéke. Ennek megvilágítására vegyük a gőzmozdony példáját, amely esetben a következőképp hangzik a kérdés: Mi a gőzmozdony és hogyan működik? Egy mérnök nagyon részletes választ tudna adni erre a kérdésre. Hosszan beszélne a dugattyúkról és a szelepszabályozókról, a gőznyomásról és az égés termodinamikájáról. Elmesélné, melyik alkatrész mozgása hozza forgásba a kerekeket. Esetleg költői szavakkal ecsetelné a réz csillogását és a füst gomolygását.

Ellene vethetnénk a mérnök magyarázatának, legyen akármilyen kimerítő is, hogy kihagyja a mozdony alapvető „vonatságát”, vagyis azt, ami a csupán összeszerelt nagy halom fém alkatrészt felruhazza a mozgás izgalmassal, a fenségességgel, a kecsességgel, mindazzal a benyomással és megjelenéssel, amit a gőzmozdonyhoz társítunk. Ezzel azt a feltételezést juttatjuk kifejezésre, hogy a fém alkatrészek összességén túlmenően a gőzmozdonyt szükségszerűen át kell hogy hassa valamiféle „vonatság”

is, ahhoz, hogy az legyen, ami.
Ez természetesen nevetséges. Hol másutt számíthatnánk vonatságra, mint egy vonatban? A gőzmozdony egyszerűen az azt alkotó, és az éppen az adott módon összerakott elemek és alkatrészek összessége. Ennyi az egész. Tervezőinek és gyártóinak nem kell semmiféle többlettel, semmiféle sajátos vonatsággal ellátniuk ahhoz, hogy a szándékozott működéséhez „életre keltsék a gépezetet”. Ugyanígy, az élet eredetének megértése érdekében, a tudósok ismert molekuláris folyamatokat keresnek annak magyarázatára, hogy mi történt, nem pedig külső életerőt, aminek, úgymond, életre kellene keltenie a holt anyagot. Ami az életet olyan figyelemreméltóvá teszi, ami megkülönbözteti az élőt az élettelenről, az nem abban rejlik, ami a szervezetet alkotja, hanem hogy mindez miként áll össze és hogyan működik egységes egészként.

A vitalizmus téves mivolta ellenére az elképzelés magja helytálló. *Létezik* egy nem anyagi természetű „valami” az élő szervezetben, valami egyedülálló és szó szerint életbevágó a működéséhez, de nem bizonyos esszencia vagy erő, vagy valamiféle megbabonázott atom. Ez a többlet egy bizonyos fajta információ, vagy modern szóhasználattal élve, szoftver.

Az ősi molekula meséje

Valamennyiünkben ott rejlik egy üzenet. Az üzenet ősi kódban íródott, kezdetei az idő kódéba vesznek. Arra vonatkozó utasításokat tartalmaz, hogy hogyan kell embert

készíteni. Ezt az üzenetet senki nem írta meg, ahogy a kódot sem találta ki senki. Mindez spontán módon jött létre. Maga az anyatermészet a tervezője, kizárólag változatlan törvényeinek keretein belül és a véletlen szeszélyeinek kiaknázásával. Az üzenetet nem tintával vagy írógéppel rögzítették, hanem bonyolult szerveződésű sorozatokba kötött atomokkal, amelyek a DNS-t, a dezoxiribonukleinsavat alkotják. Túlzás nélkül állítható, hogy ez a Föld legkáprázatosabb molekulája.

Az emberi DNS sok milliárd atomja két egymás köré csavarodó spirálba rendeződik. Ez a híres kettős spirál erősen összetekert formában kapcsolódik össze. Ha testünk egyetlen sejtjének DNS-ét kinyújtánánk, két méter hosszú szálat képezne; igazán nagy molekulákról van tehát szó.

Bár a DNS anyagi, ám fontos jelentést hordozó szerkezet. Az atomok elrendezése a DNS-ünk spiráljaiban meghatározza a külalakunkat, de bizonyos mértékben még az érzéseinket és a viselkedésünket is. A DNS afféle tervrajz, pontosabban algoritmus, avagy gyártási útmutató egy élő, lélegző, gondolkodó emberi lény készítéséhez.

Szinte minden földi életformában jelen van ez a mágikus molekula. A gombától a légyig, a baktériumtól a medvéig saját DNS-utasításaik formálják meg a szervezeteket. Az egyes egyedek DNS-ei különböznek a fajtársaikétól (az egytetűjű ikrek kivételével) és még jobban különböznek más fajok egyedeiétől. Ám az alapvető szerkezet – a kémiai összetétel, a kettős spirál – egyetemes.

A DNS felfoghatatlanul ősi. Szinte bizonyosra vehető, hogy

már három és fél milliárd évvel ezelőtt is létezett. Ez a tény értelmetlenné teszi a „vén, mint a hegyek” hasonlatot: a DNS már sokkal régebben hozzátartozott a világhoz, mint a Föld bármelyik mai hegye. Nem tudni hol és hogyan alakult ki az első DNS-molekula. Egyes tudósok szerint lehet idegen betolakodó, talán a Marsról, vagy egy kósza üstökösről. De bárhogyan jött is létre az első DNS, nagyon valószínű, hogy a mi DNS-ünk is annak a közvetlen leszármazottja. A DNS legfontosabb tulajdonsága, amely alapvetően megkülönbözteti más nagyméretű szerves molekuláktól, az önmaga replikálásának képessége. A DNS további DNS-ek készítésével foglalkozik, nemzedékről nemzedékre, gyártási útmutatóról gyártási útmutatóra, földtörténeti korszakról földtörténeti korszakra a mikrobáktól az emberig a replikálás megszakítatlan láncolatában.

Persze, önmagában a másolás csak még többet hoz létre ugyanabból. A DNS tökéletes másolása egy olyan bolygóhoz vezetne, ahol térdig lehetne járni a tökéletesen egyforma egysejtű szervezetekben, már ha volna valakinek egyáltalán térde. Csakhogy egyetlen másolási folyamat sem abszolút megbízható. A fénymásolás során homályos foltok keletkezhetnek, a zajos telefonvonal eltorzíthatja a faxot és a számítógépes zavar elronthatja a merevlemezről floppyra vitt adatokat. Ha hiba történik a DNS-másolásban, az nyilvánvalóan a szervezet mutációjaként, mely mutáció átörökli a hibát. A mutáció az esetek döntő többségében káros, ahogy egy véletlen szóváltozás egy Shakespeare-sonettben nagy valószínűséggel tönkreteszi

a vers szépségét. Olykor azonban, teljesen véletlenül, bekövetkezhet kedvező hiba is, ami valamilyen előnnyel ruházza fel a mutációt. Ha ez az előny képessé teszi a szervezetet, hogy hatékonyabban reprodukálja önmagát, akkor a hibásan másolt DNS túlszaporodja a vetélytársait, és uralkodóvá válik. Ha viszont a másolási hiba kevésbé jól alkalmazkodó szervezetet eredményez, akkor a mutáns vonás nagy valószínűséggel néhány nemzedék múlva kihal, amivel ki is küszöbölődik ez a bizonyos DNS-változat.

A replikáció, variáció és elimináció egyszerű sorozata: a darwini evolúció folyamata. A természetes kiválasztódás – a mutánsok alkalmasságuk szerinti folyamatos változása – afféle szelepként működik, áttereszti és benntartja az előnyös hibákat, a rosszakat pedig kizárja. Valamilyen primitív ősmikroba DNS-éből kiindulva lépésről lépésre, hibáról hibára kezdtek felépülni a komplexebb szervezetek készítéséhez szükséges egyre hosszabb utasítások.

Némelyek berzenkednek attól a gondolattól, hogy egy „használati utasítás” egyszerűen a véletlen hibák felhalmozásával írja magát, úgyhogy egy némiképp eltérő metafora igénybevételével haladjunk végig még egyszer a magyarázaton. Képzeljük el az emberi DNS-ben rejlő információt egy szimfónia hangjegyeiként. A szimfónia hatásos zenekari darab, zenészek százai adják elő, ki-ki a saját kottájából. Ebben a hasonlatban az ősmikroba csak egy egyszerű dallamocska. Hogyan változik a dallam szimfóniává?

Tegyük fel, hogy felkérünk egy írnokot, másolja le az eredeti dallamot. A másolási folyamat javarészt híven követi az

eredetét, ám egyszer csak egy nyolcadból negyed lesz, egy C-ből D. A megcsúszó toll apró változást okoz a tempóban vagy a hangmagasságban. Alkalmanként egy-egy jelentősebb hiba észrevehetően csorbítja a darabot, mondjuk kimarad egy egész ütem vagy éppen megismétlődik. Ezek a hibák többnyire megbontják az egyensúlyt vagy a harmóniát, úgyhogy a kotta használhatatlanná válik. Ennek a zenének az előadására senki nem volna kíváncsi. Nagy néha azonban a másoló tollának botlása teljesen véletlenül érzelemgazdag új hangot, kellemes vonást, sikeres betoldást vagy módosítást okoz. Az ilyen ritka esetekben javára változik a dallam, amiért is szentesítik a jövőbeni használatra. Most pedig képzeljük el, hogy a másolási eljárások trillióin át folytatódik a javításnak és alakításnak ez a folyamata. Lassan, de biztosan új vonásokra tesz szert a dallam, gazdagodik a szerkezete, szonátává, versenyművé vagy akár szimfóniává fejlődik.

Ennek a hasonlatnak a döntő része – és ezt nem lehet eléggé hangsúlyozni – az, hogy miközben létrejön a szimfónia, az írnoknak a leghalványabb fogalma sincs a zenéről, még csak nem is érdekli. Az írnok lehet születésétől fogva süket, és semmit nem jelent számára a dallamok világa. Ennek azonban a legcsekélyebb jelentősége sincs, mert az írnoknak úgysem a zene megkomponálása a feladata, pusztán a lemásolása. A hasonlatunk csak a kiválasztódási folyamatok tekintetében sántít, tudniillik nincs semmiféle kozmikus zenész, aki felülvizsgálná az élet kottáját és döntene a minőségéről.

Nincs más, csak a megvesztegethetetlen természet, mely egyszerű és könyörtelen szabályt alkalmaz: ami működik, azt megtartja, ami nem, azt megöli. A „működés”-t pedig egyetlenegy követelmény határozza meg, nevezetesen a replikációs hatékonysága. Ha a hiba több másolatban is jelentkezik, akkor, a dolog természetéből fakadóan, minden további megfontolás nélkül, működőképes. Ha A akár a legcsekélyebb mértékben is túlszaporodja B -t, akkor a nemzedékek során sokkal több A keletkezik, mint B . Ha A -nak és B -nek versengenie kell a helyért és az erőforrásokért, nem nehéz kitalálni, hogy A hamarosan teljesen kiküszöböli B -t. A életben marad, B elpusztul.

Biológiai tudásunk a darwinizmus alapelveire épül, mely ökonómiai magyarázatot kínál arra, hogyan formálódik földtörténeti korszakokon át egy viszonylag egyszerű genetikai üzenet, hogy emberi lény születéséhez elég komplex DNS-molekulákat hozzon létre. Ha már létrejött az előd DNS, fokozatosan továbbfejlődhetett a véletlen hibák és a kiválasztódás révén. A jó géneket megtartotta, a rosszakat kiiktatta. Később ki fogom fejteni ennek a szikár magyarázatnak a helytállóságát, ezúttal azonban jobban érdekel a kiindulópont. A darwini evolúció nyilvánvalóan csak akkor működhet, ha már létezik valamiféle élet (pontosabban szólva, nem az életre van szüksége a maga teljes pompájában, csak a replikációra, variációra és szelekcióra). A darwinizmus nem nyújt fogódzót a legfontosabb, első lépéshez: az élet keletkezéséhez. De ha az élet döntő működési elve nem kínál magyarázatot az élet eredetére, akkor ugyanott maradtunk a problémával. Milyen

más alapelv vagy alapelvek magyarázhatják meg a kezdeteket?

Valamilyen kulcsot kell találnunk a probléma megoldásához. Hol keressünk az élet eredetére utaló nyomokat? Első lépésként érdemes lenne megtudni, hol is kezdődött maga az élet. Ha rábukkanunk erre a helyre, akkor számba vehetjük és kiértékelhetjük a genezist kísérő fizikai viszonyokat és hozzáláthatunk az ilyen viszonyok között lejátszódó kémiai folyamatok tanulmányozásának, hogy aztán apránként kiteljesedjék ismeretünk a közvetlenül a tényleges életet megelőző, a prebiotikus szakasról.

Mikrobák és az édenkert keresése

Gyerekkoromban időnként a vasárnapi iskola látogatására kényszerültem, amely megpróbáltatást ki nem állhattam. Egyetlen pozitív emléket hordozok róla: a lapozgatást az Édenkertet leíró képeskönyvben. A könyv rajzolója szerint az Éden jól ápolt, ligetes táj, amely fölött örökké ragyog a Nap, a fák között pedig egzotikus állatok kószálnak minden félelem nélkül, nyilván mert mindannyian vegetáriánusok. Mindenesetre hatásos ellentétet mutatott a sivár londoni külváros életével. Sajnálatos módon igen hamar értesültem róla, hogy a bibliai Édenkert nem valóságos, csupán legenda. Azt viszont elfogadhatjuk, hogy lennie kellett egy olyan helynek, ahol a Föld legelső teremtményei éltek, egyfajta természettudományos Édenkertnek. De hol helyezkedett el?

A könyvnek ezt a részét egy esős tavaszi napon írom az adelaide-i hegyekben. A téli esők zöldbe borították a vidéket, és amerre csak nézek, sűrű lombkoronákat látok a bőségesen tenyésző kisebb bokrok, cserjék és fűvek fölé tornyosulni. Madarak csapnak le az égből és villannak színpompásan az ágak közé. A levélzet között kígyók, gyíkok, pókok és rovarok rejtőzködnek. Felbukkanhatnak még ott nyulak, oposzumok, egerek, hangyászsünök, esetenként egy-egy koala vagy kenguru. Még ezen a száraz vidéken is szembeszökő és buján viruló az élet.

Az élőlények hihetetlen változatossága évezredek óta gyönyörködteti az embereket. De csak viszonylag nemrégiben, a mikroszkóp feltalálásával döbrentünk rá a földi élet valódi sokszínűségére. A természetbúvárok nem győznek rácsodálkozni egy-egy esőerdő vagy korallzátony biológiai gazdagságára, ám még dúskálóbb bőségszaru vesz körül minket láthatatlanul. Ez a láthatatlan bioszféra a mikroorganizmusok, az élet egysejtű parányainak a birodalma, melyek ott lakoznak a bolygó szinte minden hozzáférhető zugában és hasadékában. Hosszú időn át mellőzték ugyan a mikrobákat, mint „közönséges bacilusokat”, mára viszont kiderült, hogy az élet faján túlsúlyban vannak. „Kimehetünk a hátsó kertünkbe – mondja John Holt, a Michigan State University munkatársa^[14] –, és ha nekiduráljuk magunkat, rövid idő leforgása alatt akár ezer új fajra is bukkanhatunk.” Holt megjegyzése túlzásnak tűnhet, de gondoljunk csak bele, hogy egyetlen evőkanálnyi jó minőségű termőföld tízmillió külön fajt képviselő *tízbillió* baktériumot tartalmazhat!

Összességében a földi mikroorganizmusok tömege úgy százbillió tonnát tehet ki – többet, mint az összes szabad szemmel látható életforma együttvéve.

Pedig a mikroorganizmusok által okozott fizikai hatások gyakran nagyon is láthatóak, hogy mást ne is említsünk, mint a fertőző betegségeket, az alkohol erjedését és az étel lebontását. Az emberek azonban következetesen alábecsülik a mikrobákat, talán mert olyan mérhetetlenül apróbbak nálunk. Stephen Jay Gould azt javasolja, hogy ideje lenne felülvizsgálnunk ezt a fajta antroposovinizmust, és nevezzük el korunkat a Baktériumok korának, annak elismeréseként, hogy ezek a parányok számukban is, sokféleségükben is minden más teremtményt felülmúlnak.^[15] Ezzel szemben az úgynevezett magasabb rendű szervezetek, például az emberek, a kutyák és a kankalinok az élet fájának csak alig egynéhány ágacsckáját foglalják el.

Nem a méret az egyetlen ok, amiért hajlamosak vagyunk elfelejteni a mikrobákat. Nem könnyű őket laboratóriumban tenyészteni, a szabadban pedig rengeteg inaktív közülük. Továbbá, megjelenésüket tekintve a baktériumok sok különböző faja azonosnak látszik, és az utóbbi időkig a mikrobiológusok hajlamosak voltak ezeket egy kalap alá venni az osztályozási rendszerekben. Mostanság, a molekuláris szekventálás hatékony eljárásai révén feltárulnak az igazi genetikai különbségek. A mikroszkóp alatt egyformának tűnő baktériumokról kiderülhet, hogy kevesebb közös génjük van egymással, mint mondjuk az emberrel.

Gould kimutatja, hogy a Baktériumok kora azóta tart, amióta élet van a Földön. És kétségtelen, hogy fennállásának java részében az élet nem is állt másból, csak baktériumokból. Ez a kijózanító tény azonban egyúttal felvillant egy lehetőséget is. Mivel az élet a baktériumokkal kezdődött, joggal számíthatunk arra, hogy az élő példák tanulmányozásával az élet keletkezésének fontos nyomaira bukkanunk. Egészen pontosan abban bízhatunk, hogy szokatlan struktúrák formájában némelyikük még őrzi távoli múltjuk emlékeit. Ősi biokémiai folyamatok maradványai fennmaradhattak redundáns sajátosságokként, az emberi vakbél mikrobaszintű megfelelőjeként. Az sem elképzelhetetlen, hogy élő mikrobák egy prebiotikus világ maradványait hordozzák magukban.

Az élő mikrobákból nyert információ-töredékek összerakosgatásával esélyünk nyílna jó közelítéssel megbecsülni, milyen lehetett, hol és hogyan élt az ősi organizmus. Sajnos, pusztán ránézéssel nem állapítható meg a mikroorganizmusok evolúciós története. Kevés az osztályozási támpontot nyújtó anatómiai sajátosságuk. Nincsen összehasonlítási alapként kínálkozó karjuk és lábuk, kopolyájuk és tüdejük, szemük és fülük. Mint később kifejtem, a mikrobákat a rég letűnt elődeikkel összekötő bizonyítékok nagyrészt a biokémiájukban rejlenek – a genetikai felépítésükben és az anyagcseréjükben. Szerencsére a modern molekuláris biológia technikai lehetővé teszi az ilyen jellegű bizonyítékok előbányászását. Mint egy ősi pergamentekercs darabkái, melyeken egy félig elfelejtett nyelven írt szöveg áll, ennek a

fajta molekuláris bizonyítéknak az idő pusztítása által részben kiradírozott nyoma csábító bepillantást nyújthat a csaknem négymilliárd évre visszanyúló evolúciós múltba.

Tekintettel a mikrobafajok sokaságára, merre keressük a molekuláris nyomokat? Manapság ugyan az oxigénigényes és a fotoszintetizáló baktériumok iránt tanúsítanak megkülönböztetett figyelmet, ám több mint kétmilliárd éven át egyáltalán nem, vagy kevés volt a Földön a szabad oxigén. A mikrobák azonban akkoriban is élőhelyek sokaságán virultak, alkoholt erjesztettek, metánt hoztak létre, szulfátot redukáltak. Egyes mikrobák ma is őrzik ősi életmódjukat, és a legnagyobb valószínűséggel ezek kínálják az élet legkorábbi formáihoz vezető nyomokat. Ez roppant érdekes lehetőséget vet fel: lehet, hogy ezeknek az elődöknek az idők hajnala óta alig módosult leszármazottai ma is élnek valamiféle sötét zugban, ahol a körülmények emlékeztetnek az ősi Föld kisbolygóktól bombázott, gázzal borított, fortyogó alvilágára? Létezhet-e egyáltalán ilyen hely?

Létezhet, és létezik is. A helyszín pedig legalább olyan meglepő, mint amilyen sötét. Mélyen a tenger alatt, a sötét óceánmederben akadnak régiók, ahol meg-meghasadozik a Föld feszülő kérgé. A bolygó mélyének hatalmas termikus erői hatására folyamatosan elmozdulnak és deformálódnak a tengermeder sziklás rétegei. Az óceáni hátságok mentén helyenként megnyílik a kéreg és az olvadt kőzet találkozik a fölötte hullámzó jeges óceánnal. A szivárgó láva lehűlés közben összehúzódik és megrepedezik, hasadékok és alagutak hálózatát hozza

létre, melyen át a hőközlés révén cirkulál a víz, miközben útja során feloldja az ásványokat. A kürtökön át vegyi anyagokat bőségesen tartalmazó izzó folyadékot okád a Föld mélye. Valóságos vegyi- és hőpokol szabadul el a szuperforró folyadék és a hideg tengervíz brutális találkozásakor.

Lehetetlennek tűnik, hogy az élet bármilyen formája lakozhat ilyen kegyetlen környezetben, ami inkább idézi a poklot, mint az Édenkertet. Mégis vannak ilyen életformák. A vulkanikus óceáni kürtök elképesztően sokféle mikrobának nyújtanak otthont, némelyikük kétségkívül egy ősi élővilág maradványa. Ezeket a sötét vulkáni mélységeket lakják a Föld első élőlényeihez legközelebb álló, általunk ismert organizmusok. A soron következő fejezetekben beszámolok róla, milyen meglepő tenger és föld alatti felfedezések módosítják gyökeresen a gondolkodásunkat az élet keletkezéséről, valamint az élet marsbéli és más előfordulási lehetőségeiről.

De mindenekelőtt ki kell térnünk a biokémia egynémely alapelvére. Ezek közül is a termodinamika törvényei a legfontosabbak.

2. SZEMBEN AZ ÁRRAL

És elindulván lábnyomok pettyezik mögöttünk az idő homokját.

H. W LONGFELLOW^[16]

Legélénkebb gyermekkori emlékeim közé tartoznak a tengerpartra tett kirándulásaim. Emlékszem, a hínár és a medúza, az apály és a dagály mellett mennyire meghökkenített a különös kis lyukak látványa, amelyek az apálykor visszahúzódó tenger után maradtak a sima homokban. Ezeket a lyukakat csinos kis homokhalmok díszítették, melyek vékony hurkába redőződtek, mintha fogkrémet nyomtak volna ki a tubusából. Eltűnődtem, hogyan keletkezhetek ezek a különös alakzatok. Egyet sem sikerült megfigyelnem létrejötte pillanatában, és a lábnyomaimmal együtt mindig újra elmosta őket az emelkedő dagály.

Most már tudom, hogy a homokhalmok apró rákocskák művei, melyek beássák magukat a felszín alá és kitúrják a törmeléket, bár továbbra is rejtély számomra, hogyan hozzák létre ezeket a hurkaformákat. A lényeg azonban az, hogy már ilyen zsenge koromban sem volt számomra kétséges, valamiféle élőlény tevékenységének a nyomait látom. Természetesen sok olyan minta is felfedezhető a természetben, amit nem biológiai aktivitás hoz létre. Ami azt illeti, ugyanazon a partszakaszon, ahol a dombocskákat láttam, a homokot nyaldosó hullámok következtében létrejött gerincek sorai húzódtak. Ám a fogkrém jellegű halmokat összességében túlságosan mesterségesnek, túlságosan komplikáltnak találtam ahhoz, hogy vak, lélektelen erők műve legyen. A dagály árja elmosta a kis halmocskákat; de egyetlen pillanatig sem fordult meg a fejemben, hogy az is hozta őket létre.

Az egyik alapvető mód, ahogy az élet megkülönbözteti magát a természet többi részétől, az a lényeges képessége, hogy „árral szemben” is tud haladni (mint azt a fenti példa a szó szoros értelmében mutatja) és rendet teremteni a káoszból. Ugyanakkor az élettelen erők rendetlenséget hoztak létre. Ez a jelenség a természet egyik legalapvetőbb törvényét érinti, nevezetesen a termodinamika második főtételét. Az élet kialakulásának nyomozása során először azt kell megértenünk, hogyan birkózik meg az élet ennek a törvénynek a kérlelhetetlen követelményeivel.

A degeneráció elve

Az előző fejezetben megjegyeztem, hogy az élő sejtek bizonyos tekintetben apró gépekre emlékeztetnek. Minden gépnek üzemanyagra van szüksége az üzemeléséhez. Az állatok élelmet esznek üzemanyagként, míg a növényeket napenergia működteti. Az üzemanyagfogyasztás elkerülhetetlen mellékterméke a hő. Ezt nagyon jól tudjuk a saját testünk példájából: az embert melegen tartja az élelem „elégetése” során keletkező hő. A hő is egyfajta energia, amely fizikai és kémiai változásokat okozhat. A tizenkilencedik században a tudósok és a mérnökök lelkesen igyekeztek minél alaposabban megérteni a hő, a munka és a kémiai reakciók kölcsönös kapcsolatát, hogy hatékonyabb gőzgépeket és más eszközöket készíthessenek a segítségével. Ezeknek a kutatásoknak az egyik eredménye a termodinamika törvényeinek

felfedezése. Közülük az élet szempontjából a második a legfontosabb.

A termodinamika második főtétele lényegében megtiltja a tökéletes gép, a *perpetuum mobile* készítését. Felismeri, hogy minden nagy léptékű fizikai folyamat hatásfoka kisebb száz százaléknál; mindig fennáll egy elkerülhetetlen veszteség. A gőzgépek például nem hasznosítják az elégetett szén által felszabadított teljes energiát; a kazánból a hő nagy része haszontalanul kisugárzódik a környezetbe, és a kinetikus energia egy része is elvész a mozgó részek súrlódása miatt. Jól jellemezhető ez a veszteség a rend és a rendezetlenség, vagy hasznos és haszontalan energia kifejezéseivel. A gőzmozdony haladása a vágányon a rendezett vagy hasznos energiát képviseli, míg a hulladék hő a rendezetlen vagy haszontalan energiát. A hő rendezetlen energia, mivel a molekulák kaotikus mozgását jelenti. Haszontalan, mert véletlenszerűen oszlik el. A második főtétel a megkerülhetetlen és visszafordíthatatlan irányultságot írja le az energia rendezett formájából a rendezetlenbe. Folyamatos üzemanyag-ellátás, vagyis hasznos energia nélkül a gőzmozdony megáll.

A termodinamika második főtétele nem korlátozódik a gépészetre. Ez a természet alapvető törvényszerűsége; nincs előle menekvés. Sir Arthur Eddington brit csillagász a legfőbb helyre tette a természet törvényei közül. Mint írta^[17]: „Ha az elméletről egyszer csak kiderül, hogy ellene szól a termodinamika második főtételének, akkor hagyj fel minden reménnyel, és nincs más választásod, mint alázattal visszavonulót fújni.” Nem nehéz mindennapi

példákat találni a második főtétel működésére, olyan eseteket, amikor a renden felülkerekedik a káosz. A homokhalmok és a lábnyomok már említett megsemmisülése. Vagy gondoljunk csak az elolvadó hóemberre, vagy az összetörő tojásra. Mindezek a folyamatok az anyag rendezetlen állapotát hozzák létre a viszonylag rendezett állapotokból. Ezek a változások visszafordíthatatlanok. Soha nem lehetünk tanúi annak, hogy a dagály létrehozza a lábnyomokat, vagy a napsütés hóembert épít. De még a király lovainak és embereinek sem sikerült ismét összerakniuk Humpty Dumptyt, a tojásemberkét, mint azt a közismert angol gyermekdalocska is kénytelen elismerni.

A fizikusok az entrópiának nevezett mennyiséggel mérik a hasznos energia veszteségét, ami nagyjából megfelel a rendszerben jelen lévő káosz mértékének. Fizikai folyamat lejátszódásakor, amilyen például a dugattyú és a henger ciklusa a gőzgépben, kiszámolható, mennyi entrópia keletkezik. Az entrópiának ezzel a fogalmával felfegyverkezve a következőképp fogalmazhatjuk meg a második főtételt: zárt rendszerben a teljes entrópia nem csökkenhet, de nem is emelkedhet korlátlanul. Lesz a legnagyobb entrópiának vagy legnagyobb rendezetlenségnek egy olyan állapota, amelyre termodinamikai egyensúlyként hivatkoznak: ha a rendszer elérte ezt az állapotot, meg is marad benne.

Nézzünk egy egyszerű, a hőáramlás irányára vonatkozó példát ezeknek az alapelveknek a megvilágítására. Ha egy forró test érintkezésbe kerül egy hideg testtel, a meleg

testtől hő adódik át a hidegnek. Végső soron a két test eléri a termodinamikai egyensúlyt, vagyis a hőmérsékletük azonos lesz. A hőáramlás ekkor abbamarad. Honnan ez az átlépés a rendezettből a rendezetlenbe? A hő egyenlőtlen eloszlása a folyamat kezdetén relatívan rendezettebb, ilyenformán alacsonyabb entrópiájú állapotnak tekinthető a végső állapotnál, mivel a végső állapotban a hőenergia kaotikusan oszlik el a legnagyobb számú molekula között. Ebben a példában a második főtétel azt követeli meg, hogy a hő a melegtől a hideg felé áramoljék, és soha nem fordítva.

Amikor az élő szervezetekre alkalmazzuk a termodinamika törvényeit, problémába ütközünk. Az élet egyik alapvető tulajdonsága éppen a magas fokú rendezettség, ha tehát egy szervezet fejlődik vagy reprodukálódik, növekszik a rendezettség, ami viszont ellentétes a második főtétel parancsával. Az embrió fejlődése, a DNS-molekula kialakulása, az új fajok megjelenése és a bioszféra egészében növekvő bonyolultsága kivétel nélkül a rendezettség növekedésének és az entrópia csökkenésének a példái.

Ez az ellentmondás nem egy kiváló tudóst mélységesen zavarba ejtett. A termodinamika tudományának egyik megalapítója, Hermann von Helmholtz német fizikus az elsők közé tartozott, akik úgy vélekedtek, hogy az élet valamiként megkerüli a második főtételt.^[18] Eddington hasonlóképp összeütközést vélt felfedezni a darwini evolúció és a termodinamika között, és arra a következtetésre jutott, hogy vagy az előbbit kell elvetni, vagy

egy „anti-evolúciós” alapelveket kellene hozzárendelni.^[19] Ebben a kérdésben még Schrödinger is kétségekkel küszködött. Könyvében, a *What is Life?*-ban megvizsgálta a rend és a rendezetlenség közötti kapcsolatot a konvencionális termodinamikában, majd szembeállította az életet meghatározó átöröklésnek a rendből még nagyobb rendet teremtő elvével. Miután megfigyelte, hogy az élő szervezetek „elkerülik a bomlást és fenntartják a rendezettséget”, úgy vélekedett, hogy az élő anyagra nem alkalmazható a termodinamika második főtétele. „Fel kell készülnünk egy új típusú fizikai törvény felfedezésére, amely érvényes az élet esetében.”^[20]

Végül is fennáll-e tényleges probléma az élő szervezetek kapcsán a termodinamika második főtételével? Szó sincs róla. Semmiféle ellentmondás nincs az élet és a termodinamika törvényei között. Hogy megértsük, miért nem, gondolkozzunk először az egyszerű hűtőszekrény esetén, amelyik pontosan arra a „főtételelles” folyamatra készült, hogy hő áramoljék a hidegtől (a hűtőszekrényen belülről) a melegbe (a konyhába). Korábban kijelentettem, hogy a hő szükségszerűen mindig a melegtől a hideg felé áramlik, ennek azonban van egy lényeges feltétele. A második főtétel ebben a formájában csak a zárt rendszerekre alkalmazható. A hűtőszekrény nem zárt rendszer. Ahhoz, hogy a hő a „rossz irányba” kényszerüljön haladni, a hűtőszekrénynek munkát kell végeznie. Ehhez motor, a motorhoz pedig valamiféle üzemanyag szükséges. A motor visszafordíthatatlanul energiát használ fel, és ez növeli a konyha entrópiáját. Ha számvetést csinálunk, akkor

egészen biztosan úgy találjuk, hogy a hűtőszekrény belsejében csökken ugyan az entrópia, a konyha entrópiája viszont nagyobb mértékben növekszik. (Működés közben a hűtőszekrény motorja felmelegszik.) Többet nyerünk a réven, mint amennyit veszünk a vámon. Mindent egybevéve, ha hűtőszekrényt működtetünk a konyhánkban, azzal egy csöppet fokozzuk az univerzum entrópiáját. Ugyanez érvényes minden olyan folyamatra, köztük az életre is, amely látszólag rendet hoz létre a káoszból. Kétségkívül rendet hozhatnak létre az egyik helyen, fizetségképpen azonban óhatatlanul rendezetlenséget okoznak valahol másutt.

Könnyű rábukkanni, hol jelenik meg a biológiai rendszerekben a rendezetlenség. A szervezetnek energiára vagy üzemanyagra van szüksége a fejlődéséhez. Az élelem tartalmaz hasznos energiát, amelynek egy része a légzés során távozó hőként veszendőbe megy. Ez a hő tart melegen minket, ebből a szempontból végső soron hasznos, ám egy része elkerülhetetlenül kiáramlik a levegőbe és elpocsékolódik. Vagyis az ételmiszer elégetése a testünkben entrópiát hoz létre – több mint elegendő fizetségként az új sejtek létrehozásával megjelentett további rendezettségért. A növények esetében is hasonló a helyzet. A növények a napenergiát hasznosítják, ám a fény átvitele a meleg Naptól a hideg Földre magában foglalja az entrópia növekedését is, ami többszörösen ellensúlyozza a rendezettségnek az új sejtek létrehozásából fakadó növekedését.

A második főtétel a biológiai evolúcióra is alkalmazható.

Az új fajok megjelenése a rendezettség növekedésével jár ugyan, de Darwin elmélete tartalmazza az árat is, amit ennek eléréséért fizetni kell. Egy új faj kifejlődése rengeteg mutációt igényel, melyek elsöprő többsége káros, és kiküszöbölődik a természetes kiválasztódás rostáján. Minden egyes sikeres mutánsra sikertelen halottak ezrei jutnak. A természetes kiválasztódás tömegmészárlása az entrópia mérhetetlen növekedésével egyenértékű, ez viszont bőségesen ellensúlyozza a sikeres mutánsok által képviselt nyereséget.^[21]

Végeredményben tehát a biológiai szervezetek teljes mértékben összhangban állnak a termodinamika második főtételeivel. Ameddig a környezet elegendő használható energiát nyújt, addig a biológiai rendszerek boldogan csökkentik lokálisan az entrópiát és növelik a rendezettséget, ugyanakkor pedig hozzájárulnak az egész univerzum entrópiájának kénytelen növekedéséhez. Az élet termodinamikai problémájának ezt a nyilvánvaló megoldását már régen azonosította a termodinamika elméletének egy másik megalapozója, Ludwig Boltzmann német fizikus^[22]: „Ilyenformán az általános küzdelem a létért nem az alapanyagokért... vagy az energiáért folytatott harc... hanem a forró Naptól a hideg Földre történő átmenet révén elérhetővé váló entrópiáért.”

Vigyázzunk azonban, hogy ne essünk az itt rejlő csapdába! Az, hogy az élet összhangban áll a termodinamika második főtételeivel, nem jelenti azt, hogy a második főtétel *megmagyarázza* az életet. Szó sincs róla. Sajnos, sok tudós, akinek pedig igazán illene jobban tudnia, áldozatul

esett ennek a hamis érvelésnek. Még mindig bemutatásra vár, *hogyan* idézi elő a biológiai szervezetek által képviselt nagyon különleges rendet ez a környezettel folytatott entrópiacsere. Önmagában a hasznos energia forrásának a meghatározása nem nyújt magyarázatot arra, hogyan megy végbe a rendező folyamat. Ehhez azonosítanunk kellene a pontos mechanizmusokat is, amelyek összepárosítják a hozzáférhető energiakészletet a biológiai szempontból lényeges folyamatokkal. Szem előtt téveszteni a történetnek ezen részét olyan, mintha kijelentenénk, hogy amint rábukkanunk egy hálózati konnektorra, tüstént magyarázatot kapunk a hűtőszekrény működésére.

A legnagyobb entrópia állapota, mivel megegyezik az egyensúllyal, stabil. És viszont, a termodinamikai egyensúly hiányával jellemezhető állapot instabil; a természeti folyamatok a legnagyobb érték felé hajtják az entrópiát. A gyakorlatban azonban felmerülhetnek olyan akadályok, amelyek meggátolják, hogy a második főtétel érvényesüljön. A benzingőz és a levegő keveréke például nincs a legnagyobb entrópia állapotában. A két gáz szeretne reakcióba lépni, hogy stabilabb anyagokat alkosson és hőt szabadítson fel, ilyenformán növelve az entrópiát. Szokványos körülmények között mégsem kerül sor erre a reakcióra: egy kémiai gát megakadályozza, hogy spontán módon bekövetkezzen. A reakció elindításához szikrára van szükség. Az ilyen jellegű, törékeny stabilitású állapotokat nevezik metastabilnak. A benzingőz és a levegő keveréke példa a metastabil állapotra. Egy másik a tompa végén álló ceruza esete.

Nagyon csekély lökés kell ahhoz, hogy feldőljön – ellentétben a hegyére állított ceruzával, ami teljesen instabil. A metastabilitás fogalma döntő szerepet játszik az élet sikerében. Az élő szervezetek kémiai reakciókból nyerik a hasznos energiájukat, ezt azonban nem tudnák megtenni, ha a szerves reakciók rövidre zárnák a folyamatot és rögtön eltékoznának az energiát. Az élet tehát mindig lesben áll a hasznos energia metastabil forrásainál. Az állatok szerves anyagok elégetéséből nyerik az energiájukat, és ugyanabból az alapvető metastabilitásból húznak hasznot, mint a benzin-levegő keverék. Mint látni fogjuk, egyes mikrobák olyan vegyi útvonalak felderítéséből nyernek energiát, amelyenekre a kémikusok még csak nem is gondolnának.

A metastabil források megcsapolásához a szervezeteknek le kell gyűrniük az aktiválódási gátakat, amelyek megghiúsítják az energia szerves felszabadítását. Ezt okos stratégiákkal hajtják végre, például enzimek használatával katalizálnak olyan reakciókat, melyek máskülönben csak rendkívül lassan mennének végbe. Egy másik fortélyuk – a benzingőzt belobbantó szikra megfelelőjeként – a gerjesztett molekulák bevetése. Mivel a vegyi reakciók különböző körülmények között rendkívül eltérő ütemben zajlanak le, a szervezeteknek szabályozniuk kell az energia felszabadulását, hogy csak ott és akkor szabaduljon fel, amennyi és amikor szükséges. Ez a tény avatja a vegyi folyamatokat a biológia eszményi alapjává, mindamellett az élet lényegében bármilyen metastabil forrás igénybevételével működhetne. A tudományos-

fantasztikus irodalom jeles képviselői kitaláltak már ionizált plazmán vagy nukleáris folyamatokon alapuló életformákat. Bár ez elméletileg lehetséges, a kémiai reakciók hihetetlen változatossága és rugalmassága hasonlíthatatlanul a legjobb választássá minősíti a vegyi alapú életet.

Honnan származik a biológiai információ?

A modern hadviselés jelentős mértékben támaszkodik a megbízható kommunikációra. A telefonvonalak és rádiókapcsolatok régóta meghatározó szerepet játszanak a hadvezetésben. Mindezek a kommunikációs csatornák ki vannak téve a jelinterferencia kedvezőtlen hatásának, mint azzal mindenki tisztában lehet, aki megpróbált utasításokat továbbítani egy relék hatósugarán kívül eső mobiltelefonon. A második világháború során az Egyesült Államok hadserege a kommunikáció elveinek tanulmányozásával bízta meg Claude Shannont, a Bell Telephone Laboratories kutatóját. Elemzésének eredménye 1949-ben látott napvilágot *The Mathematical Theory of Communication* (A kommunikáció matematikai elmélete) címmel, és hamarosan klasszikussá vált.^[23]

Shannon elmélete az információ és az entrópia közötti közvetlen kapcsolaton alapul. Képzeljük el, hogy zajos telefonvonalon beszélgetünk a barátunkkal. Mondani sem kell, hogy a háttérzaj semmi érdemlegeset nem tesz hozzá a beszélgetéshez, annál inkább megakadályozhatja, hogy épségben megkapjunk valamilyen fontos információt. Shannon remek felismerése az volt, hogy a zajban

felismerte a rendezetlenség, vagyis az entrópia megnyilvánulását, amivel szemben a jel képviseli a rendet: vessük csak össze a morzekód gondosan elrendezett pontjait és vonalait a rádió statikus zajának sercegésével. Shannon elmélete az entrópia ellentétéként kezeli az információt. Ezen okból olykor negatív entrópiaként hivatkozik az információra. Ha az információ elvész egy zajos kommunikációs csatornában, akkor növekszik az entrópia. Azaz a termodinamika mindenütt jelen lévő második főtételének újabb példájával állunk szemben. A jel romlása tehát két egyenértékű módon szemléltethető: mint a csatornát elárasztó zaj vagy mint elszivárgó információ. Az entrópiának ez az újfajta beállítása meglehetősen általánosan alkalmazható a fizikai rendszerekre. A második főtétel felfogható akár az entrópiában bekövetkezett növekedésként, akár a rendszer információtartalmának csökkenéseként.

Shannon elképzelései közvetlenül alkalmazhatók biológiai szervezetekre, mivel azok egyik meghatározó tulajdonsága az információ. A DNS a szervezet felépítéséhez és működéséhez szükséges információt tárolja. A biológiai rend rejtélyének egyik oldalát ilyenformán a következő kérdéssel fejezhetjük ki: honnan származik a biológiai információ? A kommunikációelmélet – vagy ahogy ma ismerik, az információelmélet – szerint a zaj megsemmisíti az információt, és hogy csodaszámba menne az ellentétes folyamat, vagyis információ létrehozása zajjal. Ha egy üzenet önmagától bukkanna elő a statikus zajból, az ugyanolyan meglepő volna, mintha a dagály lábnyomokkal

pettyezné a tengerpart homokját. Ezzel visszajutottunk a régi problémához: a termodinamika második főtétele értelmében információ nem jöhet létre spontán módon, ahogy hő sem áramolhat a hidegtől a melegbe.

A probléma megoldását megint csak abban a tényben találhatjuk meg, hogy az élő szervezet nem zárt rendszer. Az élő sejt információtartalma növekedhet, ha a környezetben csökken az információ. Úgy is kifejezhetjük, hogy információ áramlik a környezetből a szervezetbe. Lényegében erre gondolt Schrödinger is, amikor azt mondta, hogy a szervezet „rendezettséget szív magába” és úgy tartja fenn az életet. Az élet azzal kerüli el a bomlást, a termodinamika második főtételének figyelembevételével, hogy információt, vagyis negatív entrópiát importál a környezetéből. A biológiai információ forrása tehát a szervezet környezete.

Mind az anyagcserét, mind a szaporodást a környezetből a biorendszerbe áramló információ működteti. Az élelem információban gazdag, rendezett vagy hasznos energiát tartalmaz; ebben az esetben a bonyolult szerves molekulák olyanok, mint a morze-kód alapelemei. A testhő elvesztegetett energia, információban szegény, miként a pusztán csak sercegő telefonvonal. Ilyenformán a második főtétel beszedi a vámját, a szervezet mindazonáltal fejlődik, mivel információt halmoz fel önmagában, miközben kívülre exportálja az entrópiát. A reprodukció esetében a DNS információtartalma sokkal lassabban változik – sok-sok nemzedék alatt – a véletlen mutációk eredményeként. A mutációk a telefonvonal zajának biológiai megfelelői. A „jel”

az újsütetű DNS. Azok a sikeres mutációk, amelyek jobban alkalmazkodnak a környezetükhöz. Tehát a DNS-be jutó információt végül is a környezet nyújtja, pontosabban választja ki. Így a környezet táplálja az információt a genetikai üzenetbe a természetes kiválasztódás révén.^[24]

Ha az információ árapálya alapján szemléljük a létért folytatott küzdelmet, felvetődik egy különös kérdés. Rossz vagy jó hírt jelentenek-e a mutációk? Ha a genom másolása tökéletesen hűséges volna, az élet soha sem alkalmazkodhatna a változó körülményekhez, és elkerülhetetlenül bekövetkezne a kihalás. Másfelől viszont a túl sok másolási hiba esetén felhígul és végső soron elvész a genetikai üzenet. Ahhoz, hogy sikerrel járjon, az adott fajnak meg kell találnia az egyensúlyt a túl sok és a túl kevés mutáció között.

Ezt a kompromisszumot a saját életünkben is megfigyelhetjük. Amikor hétéves voltam, egy idősebb nagynéném meghalt tuberkulózisban. Ekkor hallottam először az egykor olyannyira rettegett tüdővészről, vagy tbc-ről, és jó ideig ez volt az utolsó alkalom is. NagyBritanniában már az 1950-es évek elején is jóval ritkábban szedte áldozatait ez az ősrégi betegség, a következő évtizedben pedig előfordulása elhanyagolható mértékűre csökkent. A sztreptomycin antibiotikum 1943-as felfedezése, majd a BCG oltóanyag széles körű használata hatékonyan kiküszöbölte a tbc-t. Mostanáig. A tuberkulózis egyszer csak ismét felbukkant a hírekben, mint a gyógyszernek ellenálló legújabb gyilkos kór. A szalmonella, a gonorrhoea és a tüdőgyulladás új változataival együtt a

tuberkulózis is azzal fenyeget, hogy megint jelentős egészségügyi veszélyforrássá válik. Hát mi folyik itt?

A választ részben megadja az a tény, hogy a baktériumok roppant gyorsan mutálódhatnak. Ez, rendkívül gyors szaporodásukkal együtt szinte garantálja, hogy sikerül túljárniuk bármiféle hatóanyag eszén, amit az orvostudomány bevet ellenük. Amint a kutatók előállnak egy-egy új antibiotikummal, az örökké változó kórokozók egy lépéssel előbbre ugranak.

Az orvosok és a baktériumok közötti viaskodás jól példázza a darwini evolúció működését. Bár a fertőző betegségekkel számos különféle orvosi tényező bonyolítja a helyzetet, a mögöttes replikációs folyamatban felismerhető egy egyszerű elv. Mint azt kifejtettem, az információátvitel során bekövetkező hibák olyanok, mint a zaj vagy az entrópia a kommunikációs csatornában. A zaj következtében az információ elszivárog – ebben az esetben a genetikai információ. A genetikai üzenetnek ezt a romlását ellensúlyozza az információ forrásaként szolgáló természetes kiválasztódás. Ha a környezet a természetes kiválogatás révén nem tud visszahelyezni a genomba annyi információt, mint amennyi elfolyik, a hibák végül egészen addig halmozódnak, amíg végképp összezavarják a replikációs folyamatot, és megszűnik a replikáció. Az ilyen katasztrofális állapotot – ugyancsak a második termodinamikai főtétel működésének példája – nevezte „hibakatasztrófának” Manfred Eigen német biokémikus.

A hibakatasztrófának mennyiségi mutatót is adhatunk, azzal a kérdéssel, hogy hány bit információ van a

szervezetben, és abból mennyi folyik el, mielőtt elbukik az adott leszármazási ág. Eigen kimutatta, hogy minél nagyobb a szervezet által birtokolt gének száma, arányaiban annál alacsonyabb a hibakatasztrófa elkerüléséhez szükséges hibaérték. Vagyis a hanyag másolás megöli a bonyolult szervezeteket. Egy magasabb szintű szervezetnek hozzávetőleg 100.000 génje van, amelyek mintegy százmillió bit információt tárolnak, és melyek mindegyikével történhet másolási hiba. Hozzávetőleges becslésként, ha a hibaarány kisebb, mint másolatonként százmillióból egy, akkor sikerül elkerülni a hibakatasztrófát. Ezzel szemben a baktériumok, amelyeknek sokkal kevesebb a génjük, ennél sokkal magasabb hibaarányal is jól elboldogulnak. A természet mintha ismerné Eigen szabályát. A sejteknek, mint amilyenek a mieink is, sikerül visszaszorítaniuk a hibaarányukat nagyjából egymilliárdban egyre, ami a baktériumok esetében sokkal magasabb, úgy egymillióban egy. Ebből fakad a nehézség a gyógyszernek ellenálló mutációkkal. A még kevesebb génnel rendelkező vírusok esetében még magasabb lehet a mutációs arány. A faj számára az optimális hibaarány szokásos esetben éppen a hibakatasztrófa alatt lesz, minthogy ez jelenti a stabilitás és a rugalmasság közötti kompromisszumot.

A hibakatasztrófa döntő jelentőségű a biogenezis problémája szempontjából. A modern szervezetek bonyolult ellenőrző- és hibajavító mechanizmusokat alkalmaznak a hibaarány alacsonyan tartására. A sejtek évmilliárdok alatt kifejlődött enzimsorozatokhoz folyamodhatnak, hogy

pontosítsák a másolási folyamatot. Az első szervezeteknek ilyen enzimek nem állnak a rendelkezésükre, ezért a replikációjuk során gyakran következett be hiba. Eigen szabálya értelmében ez annyit jelent, hogy az első szervezetek (vagy prebiotikus replikátorok) genomjainak nagyon rövideknek kellett lenniük a hibakatasztrófa elkerüléséhez. Itt azonban ellentmondásba ütközünk. Ha egy genom túl rövid, akkor nem tárolhat elegendő információt a másolóberendezés előállításához. Eigen szerint még a legegyszerűbb replikációs berendezésnek is sokkal több információra van szüksége, mint amennyi egy primitív nukleinsavsorozatban elér.^[25] Ha a genom arra törekszik, hogy elérje a szükséges másoló enzimek kódolásához igényelt hosszúságot, akkor éppen azt kockáztatja, hogy áldozatul esik a hibakatasztrófának, amivel megpróbálja felvenni a harcot. Egyszerűen fogalmazva: a komplex genomok megbízható másolást követelnek meg, a megbízható másolás pedig komplex genomokat követel meg. Melyik volt előbb? Amint azt az 5. fejezetben látni fogjuk, az ilyen tyúk és tojás paradoxonok jellemzik a biogenezis problémáit.

Ez idáig valamelyest fesztelenül alkalmaztam az információ kifejezést. A számítógéptudósok megkülönböztetik a szintaxist és a szemantikát. A szintaktikus információ egyszerűen a nyers, esetleg a nyelvtani szabályok szerint elrendezett adatsor, míg a szemantikai információnak van bizonyos kontextusa vagy jelentése. Önmagában az információ nem feltétlenül jelent valamit. A hópelyhek tartalmaznak szintaktikus információt hexagonális alakjuk

sajátos elrendezésében, ezeknek a mintáknak azonban nincs szemantikai tartalmuk, sem magán a szerkezeten túlmutató jelentésük. Ezzel szemben a biológiai információ megkülönböztető sajátossága, hogy bővelkedik a jelentéstartalomban. A DNS tárolja a működő szervezet felépítéséhez szükséges utasításokat; ez egy specifikus, előre meghatározott termék tervrajza vagy algoritmus. A hópelyhek semmihez nem jelentenek kódot, nem is jelképeznek semmit, a gének viszont pontosan ezt teszik. Az élet teljesen kielégítő magyarázatához nem elegendő egyszerűen azonosítani a szabad energia avagy negatív entrópia forrását, mint ami a biológiai információt nyújtja. Azt is meg kell értenünk, hogyan jön létre a *szemantikai* információ. Itt nem az információ pusztá léte, hanem a minősége jelenti az igazi rejtélyt. A termodinamika második főtételével való vélt ütközés ebben az egész kérdéskörben csak a figyelemelterelő „csizma az asztalon”. A szemantikus információ forrása csakis a szervezet környezete lehet, de ez még mindig nem válaszolja meg a kérdést, hogy hogyan kerül az információ a környezetbe. Egészen biztosan nem várakozik arra egy előre elkészített tervrajz töredékeként, hogy a természet összerakja. A környezet nem intelligens tervező. Mit tudunk tehát magának a környezetnek az információtartalmáról? Voltaképpen mit értünk egyáltalán „környezet” alatt? A szervezet élőhelyét? A bioszférát? A Naprendszer? Ha így nézzük, a környezet végül is az egész világmindenség. Az oksági láncot követve kozmológiai kérdésekhez jutunk. Akkor pedig óhatatlanul szembekerülünk a végső

kérdéssel: Honnan származik a világmindenség információtartalma?

Entrópiarés: a gravitáció mint a rend kútfője

Darwin annak idején azzal vágott vissza mindazoknak, akik az élet eredetéről elmélkedtek, hogy ezzel az erővel akár az anyag eredetéről is elmélkedhetnének. Manapság a fizikusok és a kozmológusok úgy vélik, tudják, hogyan jött létre az anyag, és nagyon is indokolt ennek a folyamatnak az összevetése a biogenezissel. A megfigyelhető univerzum hozzávetőleg 10^{50} tonna anyagot tartalmaz: sok éven át sújtotta a kozmológiát az a kérdés, honnan ered ez az iszonyatos mennyiség. Az ősrobbanás elméletének első kritikusai joggal kifogásolták a feltételezésben, hogy mindez az anyag csak úgy, minden különösebb ok nélkül kipattant a létbe az idők kezdetén. Az az elképzelés, hogy az univerzum a már eleve meglévő szükséges anyaggal együtt keletkezett, sokakat megbotránkoztatott, mint teljesen tudománytalan nézet.

Kézenfekvő volt azonban a kivezető út. A fizikusok már rég felfedezték, hogy elegendő energia koncentrálódása esetén létrejöhetnek anyagi részecskék, és ez a folyamat nagy teljesítményű gyorsító-berendezéssel laboratóriumi körülmények között is bemutatható. Sajnos, ez sem oldotta meg egészen a kozmológiai problémát, ugyanis egyszerűen megkerülte a kérdést, hogy akkor honnan származik a kozmológiai anyag létrejöttéhez szükséges energia. Az az elképzelés, miszerint az univerzum

energiája egyszerűen „adott” volt, azaz jelen volt a kezdet kezdetén, aligha jelentett fejlődést az anyag eredendő jelenlétére épülő feltételezéshez képest. Ebben az ősrobbanás-elméletben tehát változatlanul megmaradt a semmiből keletkezés csodás eleme.

Az 1980-as években megoldódott a kozmikus energia forrásának rejtélye. Felfedezték, hogy az univerzum összenergiája valójában nulla lehet, tehát a „semmiből semmi” esete forog fenn. A zéró energiával rendelkező univerzum pedig azért tartalmazhat mégis 10^{50} tonna anyagot, mert a gravitációs mezője negatív energiával rendelkezik – a két adalék összege eredményez ugyanis nullát. Meggyőző mechanizmust találtak annak magyarázatára, hogyan terelődött a pozitív energia az anyagba, azonos mennyiségű negatív energia pedig a gravitációs mezőbe. Így végeredményben ingyen keletkezett az összes kozmikus anyag! Miután a kozmológusok erre rájöttek, hihetővé vált a feltételezés, hogy a mindenség az üres térrel kezdődött; minden anyag később (de azért meglehetősen hamar) jelent meg benne természetes fizikai folyamatok eredményeként. Az új elméletet felsőbbrendűnek és tudományosabbnak tekintették, mert szakított azzal a kényszerrel, hogy eleve alapul tekintse az anyag mintegy természetfeletti bevitelét a rendszerbe az idők kezdetén.

Ha most visszatérünk a biogenezis problémájához, a fentiekkel ellentétes nehézségbe ütközünk, tudniillik nem az anyag, hanem az információ eredetére kell magyarázatot találnunk. Míg abban senki nem talál kivétlnivalót, hogy

fizikai folyamatot rendeljünk az anyag létrejöttéhez, a lehető legtudománytalanabbnak tartják egy olyan folyamat tényleges elfogadását, amely információt hoz létre. Az információról nem feltételezik, hogy ingyen keletkezik (mint a kozmikus anyag). Az információért meg kell dolgozni. Erre az esetre kétségkívül érvényes a termodinamika második főtétele, mert az információ spontán megjelenése a világegyetemben egyenértékű lenne az univerzum entrópiájának csökkenésével – ami a második főtétele megsértése, vagyis csoda. Vitathatatlan, hogy az univerzum tartalmaz információt (hiszen nincs termodinamikai egyensúlyban). Ha az információ nem készülhetett, akkor már az első pillanatban, vagyis a kiindulási helyzetben jelen kellett lennie. Arra a következtetésre jutunk tehát, hogy az univerzum kezdettől fogva tele van információval, vagyis negatív entrópiával.

Mit mondanak a csillagászati megfigyelések az ősi univerzum tartalmáról? Itt egy igen különös felfedezés vár ránk. Az ősrobbanás elméletének egyik legmeggyőzőbb bizonyítéka a hőszugárzás egyetemes háttérének jelenléte, a mindenség pokoli születésének egyfajta utóizzása. Ez a sugárzás rövidebb idővel az ősrobbanás bekövetkezése óta többé-kevésbé zavartalanul szeli át az űrt. Ilyenformán pillanatfelvételt nyújt arról, milyen lehetett az univerzum nem sokkal a kezdet után. Műholdas mérések meghatározták, hogy a kozmikus háttérsugárzás spektruma pontosan megfelel a termodinamikai egyensúly állapotának. A termodinamikai egyensúly azonban a legnagyobb entrópia állapota, ami, Shannon elmélete alapján, a *legkevesebb*

információt foglalja magában. Voltaképpen bőségesen elegendő egyetlen bitnyi információ (a hőmérséklet) a termodinamikai egyensúly állapotának tökéletes leírásához, így, ha a kozmikus háttérsugárzásból erre következtetni lehet, a világegyetem szinte teljesen információmentesül jött létre.

Zavarba ejtő ellentmondással kerültünk szembe. A második főtétele megtiltja, hogy a világegyetem információmentesül emelkedjék a fejlődése közben, mégis azt deríthetjük ki az ősi univerzumból, hogy alig tartalmazott információt. Akkor hát honnan ered az univerzumban ma jelen lévő információ? Az entrópia alapján is kifejezhetjük ugyanezt a problémát. Ha az univerzum termodinamikai egyensúly közele, vagyis a legnagyobb entrópia állapotából indult ki, akkor hogyan érte el a jelenlegi, egyensúly nélküli állapotot, tekintettel arra, hogy a második főtétele értelmében az entrópia nem csökkenhet?

Immár ismerjük a választ erre a kozmikus talányra, mégpedig a gravitáció gondos tanulmányozásából. Hogy megértsük, milyen viszonyban áll a gravitáció a termodinamikával, képzeljünk el egy palackra való, egyenletes hőmérsékletű gázt. Ha semmi nem zavarja meg, a gáz nem fog semmit sem csinálni, azaz egyensúlyban marad. Tegyük fel azonban, hogy a gáz tömege olyan nagy (mondjuk akkora, mint egy csillagközi felhő), hogy jelentőssé válik a gravitáció. Ebben a pillanatban nem igaz, hogy nem történik semmi. A rendszer most már instabil. A gáz elkezd összehúzódni, itt és amott sűrűbb anyagcsomók gyűlnek össze benne. A csomók

középpontjában az összehúzódás felhevíti a gázt. A hőmérséklet emelkedése következtében áramlani kezd a hő. A valódi csillagközi felhőben csillagok alakulnak ki. A hősugárzás áramlása egy ilyen csillagból – a Napból a szabad energia, vagy negatív entrópia forrása, a fotoszintézis révén ez táplál minden felszíni életet a Földön. Gravitáció hatására tehát a gáz, amiről feltételeztük, hogy egyenletes hőmérsékleten termodinamikai egyensúlyban van és maximális az entrópiája, további változásokon megy át, melyek eredményeként hőáramlás indul el és növekszik az entrópia. Ilyenformán a gravitációsan előidézett instabilitás az információ forrása.

A gravitációs változások nyilvánvalóan mélyrehatóan módosítják az események menetét. Az a rendszer, amelyikben számottevő a gravitáció, nem tekinthető valódi termodinamikai egyensúlyban lévőnek vagy maximális entrópiájúnak, csak azért, mert egyenletes a hőmérséklete és a sűrűsége. A látszat csal. Az egyenletes állapotú gázfelhőnek még mindig rengeteg a szabad energiája, amit a gravitációs folyamatok révén átadhat. A gáznak még egyenletes hőmérsékleten is *alacsony* entrópiájú az állapota. A kozmológia esetében a gravitáció az elsődleges erő, így a termodinamikai hatásait sem hagyhatjuk figyelmen kívül. A kozmikus háttérsugárzás egységes jelenlétéből tehát nem következtethetünk arra, hogy a korai univerzum valóban a termodinamikai egyensúly állapotában volt.

Ugyanúgy, ahogy az élet látszólag termodinamikusan „rossz irányban” működik, a gravitációval is hasonlóképp

áll a helyzet.^[26] Az egyenletes állapotú gáz valami csomóssá és bonyolulttá fejlődik. Rend jelenik meg spontán módon. Mi történik informatikai szempontból? Egy egységes gáz nagyon kevés információval leírható a maga végtelen egyszerűségében, míg egy csillaghalmaz vagy egy galaxis leírása rengeteg információt igényel; valamilyen ismeretlen módon kétségkívül mérhetetlen mennyiségű információ rejlik a jellegtelen, egységes gáz egyenletes gravitációs mezőjében. Ahogy a rendszer fejlődik, a gáz kibillen az egyensúlyból, és információ áramlik a gravitációs mezőből az anyagba. Ennek az információnak egy része kerül biológiai információként a szervezetek genomjába.

Egészében tekintve a világegyetemet, az ősrobbanáskor a térbe kerülő gáz kezdetben egyenletes eloszlása lassan melegebb és hidegebb gázfoltokká alakult, végül fénylő protogalaxisokba szerveződött, melyeket üres tér vett körül. A protogalaxisok aztán izzó csillagokká alakultak. Az univerzum tágulása elősegítette a hőkontraszt fokozódását, mivel a tágulással csökkent az univerzum háttérhője, és a forró csillagok erőteljesebben sugároztak hőt a hideg űrbe. Ezeknek a gravitációs folyamatoknak a következményeként nyílt meg az univerzumban az entrópiarés, az aktuális entrópia és a lehetséges legnagyobb entrópia közötti különbség. A csillagfény áramlása azon folyamatok egyike, amelyek megkísérik bezárni a rést, de voltaképpen a szabad energia valamennyi forrása, köztük a Föld belsejének kémiai és hőenergiája is ennek a résnek tulajdonítható. Ilyenformán

minden életforma a gravitáció által létrehozott entrópiarésből táplálkozik. A gravitáció a biológiai információ és a rend végső forrása.

Bár sikerült visszakövetnünk az információforrást a gravitációig és az univerzumnak az ősrobbanást közvetlenül követő egyenletes állapotáig, még mindig megmarad a szemantika problémája. Hogyan jelent meg az univerzumban a *jelentéstartalommal bíró* információ? Ez a rejtély szorosan kötődik az élet egy másik meghatározó tényezőjének, a komplexitásnak a keletkezéséhez. A tudósok véleménye megoszlik arról, hogy a komplexitás úgy működik-e, mint az anyag vagy információ, azaz ugyanaz marad-e, vagy nem marad ugyanaz az univerzum összkomplexitása. Egyes kutatók meggyőződése szerint a komplexitásnak megvannak a maga törvényszerűségei. Ha léteznék ilyen törvények, akkor azokkal leírhatónak kell lennie, hogyan fejlődhet az egyszerű állapot természetes úton komplexebbé, esetleg minden szemantikai információ nélkül. Ezt a folyamatot gyakran nevezik önkomplexizálásnak, vagy önszerveződésnek, és a következő fejezetekben több szót is ejtek róla. Más tudósok amellett kardoskodnak, hogy a komplexitást nem lehet csak úgy elővarázsolni a puszta légből; egy komplex rendszert csakis egy legalább ugyanolyan komplex másik rendszer hozhat létre. A gravitációs komplexitás azonban határt szab ennek a gondolatmenetnek, mivel minden kétséget kizáróan természetes úton jelenik meg egy egyszerű kezdeti állapotból.

Lévén ennyire gyenge erő, nem könnyű felfogni, hogyan játszhat a gravitáció közvetlen szerepet a biokémiai folyamatokban. Akadnak azonban erre vonatkozó elgondolások. Roger Penrose oxfordi matematikus és a gravitációs elmélet világszerte ismert szakértője azon elmélkedik, hatással lehet-e a gravitáció a biomolekulákra a kvantumfolyamatok révén.^[27] Lee Smolin matematikai fizikus ugyancsak az élet és a gravitáció témáját kötötte össze új könyvében, a *The Life of the Cosmosban* (A kozmosz élete), melyben párhuzamot von az ökoszisztémák és a spirálgalaxisok viselkedése között. Az önszerveződés számítógépes modelljeiből kiindulva Smolin nagyfokú hasonlóságot vél felfedezni a visszacsatolás és a mintaalkotás folyamataiban a csillaghalmazok és a biológiai jelenségek esetében. Úgy találja, hogy az élet „az önszerveződő rendszerek beágyazott hierarchiája, amely a mi helyi ökológiánkkal kezdődik, és fölfelé, legalább a Galaktikáig terjed”^[28]

Ha Penrose és Smolin vázolt elképzelései helytállóak – és be kell vallani, hogy egyelőre inkább merőben spekulatívak –, feltárhatják azon, a termodinamikai értelemben „rossz irányú” tulajdonságok közötti kapcsolatot, amelyek egyaránt jellemzik a gravitációs és a biológiai rendszereket. Ez esetben könnyen lehet, hogy az élet keletkezésének magyarázata szorosan összefügg magának az univerzumnak a létrejöttével.

Ugyanebben a spekulatív hangnemben szeretném megosztani a saját elképzeléseimet. Az információ fogalma nem kizárólag biológiai vagy termodinamikai

összefüggésben merül fel, hanem egyebek mellett a számítástechnikában és a fizika más ágaiban is. A kvantummechanikában például az anyag hullámszerű megnyilvánulásait egy hullámfüggvényként ismert matematikai objektum írja le, amely képviseli mindazt, ami a leírandó rendszerről ismert, tehát az adott állapot *információtartalmát* reprezentálja; erről a témáról a 10. fejezetben bővebben szólok. Itt csak annyit kívánok megjegyezni, hogy a hullámfüggvény jellegzetessége a lokalitás-nélkülisége: szétszlik a térben és rejtélyes kötéseket ír le a széles körben szétszóródott részecskék között; ezeket a kötéseket nevezte Einstein „kísérteties távolba hatás”-nak. Másként fogalmazva a hullámfüggvény és annak információtartalma globális entitás, nem helyi mennyiség, mint az impulzus, az energia vagy az elektromos töltés.^[29]

A relativitáselméletben megint csak felbukkan az információ, de nagyon eltérő és nem kevésbé különös összefüggésben. Gyakran mondják, hogy a relativitáselmélet megtiltja, hogy bármi is gyorsabban haladjon a féynél. Csakhogy ez nem igaz. Igenis engedélyezi, hogy bizonyos részecskék gyorsabban haladjanak a féynél (ezeket a hipotetikus részecskéket nevezik tachionnak). Az elmélet az *információ* féynél sebesebb átvitelét tiltja. Itt ugyanis az a probléma merülne fel, hogy ha *A* féynél nagyobb sebességgel adhat jelt *B*-nek, akkor könnyű lenne megtervezni egy olyan berendezést, amely jeleket küldhet a múltba, és ilyenformán előállna a klasszikus oksági paradoxon.^[30] Ezek a

paradoxonok nem a fénynél gyorsabb terjedési sebesség lehetőségéből, mint olyanból következnek; a fénynél gyorsabb zaj nem fenyegeti az oksági összefüggést, mert mentes az információtól. A fénynél gyorsabb jelzés (azaz információ) azonban mélységesen paradox jellegű. Képzeljük el például, hogy a rádió-távírányító berendezés, amellyel a garázsajtómat nyitom, továbbítani tudná a jelét, mondjuk egy nappal a múltba. Beállítanám egy rádió-aktíválású bombára, amit beprogramoznék, hogy akkor robbanjon, ha jelzést kap a jövőből. Mi történne, ha másnap megnyomnám a gombot? A bomba ma robbanna fel, amivel megakadályozna abban, hogy másnap aktiváljam. De ha másnap nem aktiválom, akkor a bomba nem fog felrobbanni. Az efféle paradoxonokat a tudományos fantasztikus irodalom minden rajongója jól ismeri. A bomba kioldásának elvben nem kell bonyolult rádiójelnek lennie; mindössze egyetlen kvantumrészecskére van szükség az adótól, ameddig a rendszer megfelelően van beállítva, hogy válaszolhasson rá. Másként fogalmazva, ha a rendszert úgy szerkesztették meg, hogy az adott részecske a bombát felrobbantó jel, akkor paradoxonba ütközünk. A részecske azonban önmagában megkülönböztethetetlen – a részecske az részecske. Akkor válik a bomba és a paradoxon elindítójává, ha *információt* közvetít az adótól a vevőhöz. Azaz a *kontextus* vagy szövegösszefüggés az, amelyben a részecske visszafelé halad az időben, és ami a problémát okozza. És a kontextus globális fogalom. Önmagában a részecske nem árulja el, hogy közvetít-e információt vagy sem; nincs olyan minőség, ami lokálisan

csatlakozik hozzá (mint például az elektromos töltés esetében), ami azt mondaná: „Információval rendelkezem.” Így tehát a kvantummechanika és a relativitáselmélet értelmében az információ nem lokális, hanem globális fizikai tulajdonság. Nincs rá mód, hogy egyszerűen csak megvizsgáljunk az űrben egy helyszínt és észleljük az információt. Amit felfedezünk – például egy részecskét –, csak a megfelelő globális összefüggésben válik információvá. Ám hogy képvisel-e a részecske információt, vagy sem, az nem jelentéktelen vagy tisztán szemantikai kérdés. Drámai *fizikai következményei* lehetnek, ahogy a bomba példája szemléletesen mutatja.

Hogyan függ mindez össze az élet eredetével? Azt sugallja, hogy nem leszünk képesek követni a biológiai információ eredetét a *helyi fizikai erők és törvények* működéséig. Nevezetesen, az a sűrűn ismételt állítás, miszerint az életet a fizika törvényeibe vésték, nem lehet igaz, ha ezek a törvények a mindennapi, lokalizált érvényességű működést és közvetlen erőket leíró fajtákra korlátozódnának. A biológiai információ eredetét globális összefüggésben kell keresnünk. Kiderülhet, hogy ez egyszerűen a környezet, amelyben a biogenezis lejátszódik. Másfelől tartalmazhat bizonyos, mindeddig fel nem fedezett, nem lokális jellegű törvényeket, amelyek az információ dinamikáját egyesítik az anyag dinamikájával.

3. KI AZ INGOVÁNYBÓL

Őn pontosan fejezte ki a nézeteimet, amikor arról beszélt, hogy szándékosan nem tértem ki az élet eredetének kérdésére, mivel ez, tudásunk jelen állapotában, nem áll hatalmunkban.

CHARLES DARWIN^[31]

A burmai Mountbatten Earlje, II. Erzsébet királynő néhai unokatestvére szeretett azzal büszkélkedni, hogy királyi vérvonalát az 1066-os normann hódítást megelőző időkhöz tudja visszavezetni. Igazán nagyot mondott ezzel. Az ilyen származás rögtön a helyére teszi a közembert. De vajon tényleg olyan biztos ez?

Ezer év történelme körülbelül negyven generációt ölel fel. Minden embernek két szülője van, négy nagyszülője és nyolc dédszüloje. Minden egyes nemzedékkel megduplázódik az ősök száma. Ezen szabály szerint úgy tűnik, hogy negyven generációval ezelőtt mindenkinek 2^{40} , azaz körülbelül egybillió őse volt, ami viszont sokkal több, mint ahány ember valaha is élt a Földön – ezek szerint hiba csúszott a számításba.

A hiba pedig abban a feltételezésben áll, hogy az ember vérvonala a végtelenségig visszavezethető a múltba. A valóságban viszont, amint távolabbra vezetjük vissza a családfát, a vérvonalak egyre-másra keresztezni kezdik egymást. A gének és a királyi származás az egész bolygót behálózza: vagyis mindannyian egymás unokatestvérei vagyunk – ha nem is éppen közeliek. Nekem is folyik királyi vér az ereimben, de Lord Mountbattentől eltérően nekem

nem áll rendelkezésemre a megfelelő dokumentáció, hogy ezt bizonyítani is tudjam.

Ha pedig tovább töprengünk a családfákról, még különösebb következtetésekre juthatunk. Nemcsak hogy nem vezethetők vissza a végtelenségig a múltba, de az is szükségszerű, hogy bizonyos pontnál az ágak egymás felé kezdenek tartani. Százezer évvel ezelőtt alig egy maroknyi *Homo sapiens* élt a bolygónkon; mégis kivétel nélkül tőlük származik a ma élő összes ember. Ezt kivételve, az összetartó vérvonalak egyetlen hominida őst fognak meghatározni. (A női ágon ezt az őst „az afrikai Éva” néven emlegetik, mivel valószínűsíthetően Afrikában élt.) Ami viszont beválik az ember esetében, az más fajokra is alkalmazható. Csaknem valamennyi emberi gén megegyezik például a csimpánzokéival. Néhány millió évvel azelőtt, hogy az afrikai Éva a szavannát járta, az emberek és emberszabású majmok közös őse Afrika őserdeiben élt. És így tovább, vissza az időben. Minél messzebbre jutunk a múltban, annál szorosabbak a kapcsolatok a manapság már tisztán elkülönülő fajok között. Félmilliárd évvel ezelőtti ősöm egy hal volt. A kétmilliárd évvel ezelőtti pedig egy mikroba.

Ugyanez érvényes minden élő szervezetre: a dolgozószobámhoz közel burjánzó bozóra, az ablakpárkányon csipegető madárra és a gyepen növekvő gombákra is. Ha elég messzire tudnánk követni családfáikat a múltba, végül összefonódnának és összenőnének a különálló ágaik. Képzeljük el a ma élő összes élőlény családfáját; az élet fáját. Szükségszerű,

hogy ennek az ágai is összetartsanak, és nem is csak bizonyos mértékig, hanem teljes mértékben: közös kiindulási pontjuk az élet fájának törzse. Ez az ősi fatörzs egyetlen, egyszerű élőlényt jelöl, minden földi élet őseit, egy mikroba-Ádámot, aki azért jött létre, hogy leszármazottai sokaságával benépesítse a bolygónkat. De hogyan jött létre ez az aprócska élőlény, annyi milliárdnyi faj elődje? Hol élt és mikor? És mi lehetett előtte?

Az élet fája

1837 tavaszán-nyarán, az Őfelsége *Beagle* nevű hajóján tett utazásáról hazatért Charles Darwin nekilátott, hogy létrehozza kutatásai nagyszabású szintézisét, amely később az evolúció nevezetes elmélete lett. Július közepén még mindig nem rendeződtek össze a gondolatai, lelkiállapotát a zavarodott keresgélés jellemezte. Jegyzetfüzetében, a bizonytalan vázlatok és sebtében papírra vetett gondolatok között készült egy egyszerű rajz, mellyel sikerült megragadnia az agyában körvonalazódó elmélet gondolatmenetét. Maga a rajz egy szeszélyesen elágazó fát ábrázolt, amely a növények és állatok genealógiáját igyekezett szemléltetni: az élet fáját.^[32] Csodálatosan eltalált metaforája annak az alapvető gondolati magnak, hogy az élet a távoli, homályba vesző múltban jött létre egyetlen rendkívüli, spontán esemény által. És ebből a közös ősből – a fa törzse – hajt is ki és indul különböző irányokba az egymást követő elágazásokon át, ahogyan új fajok válnak el a már meglévőktől. Ha egy

ágnak vége szakad, az a faj kihalását jelenti, mint a dinoszauruszok és a dodómadár esetében.

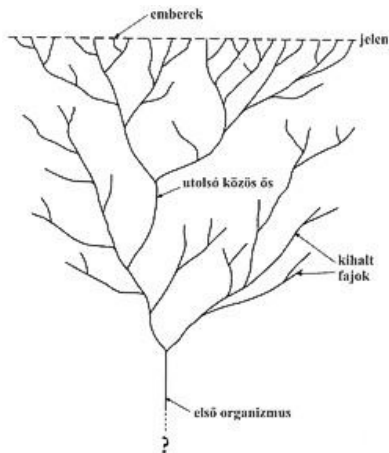
Pusztá találgatás volt egyetlen családfát feltételezni. Darwin nem rajongott az egyre-másra felbukkanó életformák által alkotott összefonódó családfák „elképesztően bonyolult” gondolatáért, ezért is részesítette előnyben az egyetlen családfát. Manapság a biológusok úgy vélik, hogy sejtése helyesnek bizonyult: a földi élet egyetlen, közös őstől eredeztethető.

De miért olyan biztosak ebben? Nos, több nyomós oka is van. Először is: minden ismert szervezetben ugyanaz a fiziko-kémiai rendszer érhető tetten. A sejtek anyagcsere-folyamatai, a növekedésük; hogy mikor, mely molekulák milyen feladatokat látnak el, hogyan tárolódik és szabadul fel az energia, hol állítja elő a fehérjéket, és mi ezek feladata – nagyjából megegyeznek minden élő szervezetben. Közös vonás az is, ahogy a sejt elraktározza és reprodukálja a genetikai információkat. A közös eredet legmeggyőzőbb bizonyítéka viszont talán az, hogy a genetikai utasításokat egy egyetemes kódrendszer segítségével hajtják végre (lásd 4. fejezet). Nemigen tűnik valószínűnek, hogy ezek az összetett és roppant sajátos vonások újra és újra kifejlődtek volna, egymástól teljesen függetlenül. Sokkal logikusabb azt feltételezni, hogy ezek a vonások egyetlen egyetemes őssejt tulajdonságaira vezethetők vissza, mely tulajdonságokat a leszármazottaira hagyományozta.

A közös őst feltételezését más bizonyítékok is alátámasztják: ilyen például a molekulák jellegzetes jobbos

vagy balos csavarodása, vagy ahogy a szaknyelv nevezi, a *kiralitása*. A legtöbb szerves molekula ugyanis nem szimmetrikus, azaz tükörképeik eltérnek egymástól ugyanúgy, ahogy a bal kéz különbözik a jobbtól („ellenkező kiralitású”). A DNS spirálja például jobb felől csavarodik fel, a tükörképe ellenben egy bal felől felcsavarodó spirál. A molekulákat összetartó erők viszont nem tesznek különbséget jobb és bal között. Nincs olyan természeti törvény, amely megtiltaná egy „balos” DNS-molekula létét, mindamellett máig senki nem bukkant ilyenre. Sok szerves molekulához hasonlóan minden élő szervezetre jellemző ugyanez a jobbos vagy balos kiralitás. Ez pedig arra utal, hogy a földi élet minden formája egyetlen őssejtre vezethető vissza, amelynek molekuláit a ma is létező kiralitás jellemezte.

Fontos, hogy ne tévesszük össze az utolsó közös őst az első élőlényel. Ezt tisztázza a [3.1. ábra](#), melyen (erősen sematikus) az élet fája látható, a mai tudásunk szerint. Bármelyik ágról induljunk is el, vissza lehet jutni a központi törzshöz. Észrevehető, hogy az ősi életformákat jelképező alsó ágak közül sok véget ért. Valójában a valaha élt fajok kilencvenkilenc százaléka kihalt. Ha a mai állapotnak megfelelően, a felső ágaktól indulva követjük végig az utat a legutolsó közös ősig, látható, hogy egyáltalán nem a központi törzs legalján helyezkedik el, hanem valamivel a néhány alsó ág felett. Ezek az alsó ágak olyan kihalt fajokat jelölnek, amelyek *valamennyi* leszármazottja is kihalt már. Ezek tehát az élet fájának a szó szoros értelmében vett „zsákutcái”.



3.1. ábra.

Az élet – jelentősen egyszerűsített – fája. A fa törzse az első élőlényt jelöli. Korunk a fa legfelső ágainak felel meg, itt találhatjuk az embert is. A jelenlegi élet közös őse az összes felső ággal kapcsolatban álló utolsó elágazásnál helyezkedik el. Az ezen elágazás alatti ágak azokat a szervezeteket jelenítik meg, amelyeknek mára nem maradt leszármazottjuk. Az itt látható ábra nagymértékben eltúlozza a jelenleg élő fajok számát a kihaltakkal szemben.

A legtöbb zsákutca azonban minden kétséget kizáróan olyan élőlényeket jelöl, amelyek alapvető biokémiájuk

tekintetében hasonlítanak a túlélő fajokhoz. Ugyanakkor az is feltűnhet, hogy ezek közül némelyik olyan sejt volt, melynek bizonyos különleges folyamataihoz hasonlókat egyetlen ma élő faj sem alkalmaz. Léteztek például olyan mikrobák, amelyek a maitól eltérő genetikai kódot használtak. Ezek az „egzotikumok” azután versenyre keltek a „mi” életformánk képviselőivel, és végül kihaltak, mivel nem tudtak elég hatékonyan alkalmazkodni. Az is elképzelhető viszont, hogy nem veszték ki teljesen. Egy napon talán olyan, különleges mikrobákra bukkannak majd a biológusok a Föld vagy a Mars valamelyik eldugott zugában, amelyekről kiderül, hogy az élet fája alsó ágainak leszármazási vonalán maradtak fenn. Ez az „Elveszett mikrobavilág” rendkívüli alkalmat jelentene a tudósoknak másutt már nem létező anyagcsere- vagy genetikai folyamatok tanulmányozására.

Különös, de még a mi anyagcserénk is tartalmaz ártatlan maradványokat abból az alternatív anyagcsererendszerből, amelyet őseink réges-régen elvetettek, és amelyet – vesztükre – megtartottak a mára már kihalt organizmusok. Ebben az esetben pedig önnön testünkben hordozzuk egy évmilliárdokkal ezelőtt kihalt alternatív létforma halvány emlékét. És ez a gondolat korántsem csupán elméleti síkon mozog, ahogy az első pillantásra tűnhet. Sok sejt – köztük a mieink is – apró alegységeket, mitokondriumokat tartalmaz. Ezekről úgy tartják, hogy olyan, egykor önálló mikrobák maradványai, amelyek behatoltak, majd tartósan beépültek a gazdasejtbe. Ezt a folyamatot szimbiózisnak nevezzük.

Ahhoz, hogy megértsük, miként jön létre a mikrobák szimbiózisa, képzeljünk el egy jellegzetes csatát két baktérium között. A mikrobák ugyanolyan kíméletlenül küzdenek egymással, mint az oroszlánok vagy a cápák. A baktériumok szintjén viszont nagyjából megegyezik a bekebelezés, illetve a fertőzés folyamata: az A sejt végeredményben B -n belülré kerül. Ha B győz, A elpusztul (ezt nevezzük bekebelezésnek), ha viszont A győz, és B pusztul el, fertőzésről beszélünk. De megtörténhet az is, hogy A és B patthelyzetbe kerül, és mindkettő túléli a csatát: ilyenkor jön létre a szimbiotikus együttélés. A természetben számos példa akad a szimbiózisra, közülük egy a hasznos parazitaké. Elég csak a saját emésztőcsatornákat szemügyre venni, amelyben hemzsegek a táplálék megemésztésében segédkező baktériumok, amelyek végső soron így teremtik meg maguknak a megfelelő életkörülményeket. Nem nélkülözhetjük ezeket a baktériumokat, ahogy a mitokondriumokat sem, hiszen ezek sejtjeink döntő jelentőségű energiaforrásai.

Hozzávetőleg százéves az az elmélet, amely szerint a mitokondriumok valaha önálló szervezetek voltak; a legmeggyőzőbben Lynn Margulis hirdette az 1960-as évek végén. Eszerint a mitokondriumok kezdetben önálló anyagcsere-folyamattal és reprodukív mechanizmussal rendelkeztek, amelyet a gazdasejtjeikkel folytatott békés együttélés során fejlesztettek ki. Az idő folyamán azonban az evolúció megfosztotta őket eredeti testfelépítésük legnagyobb részétől, és életfolyamataik a gazdasejt

működésének rendelődtek alá. Hajdani független életmódjuk halvány emlékeként viszont megőriztek valamennyit eredeti genetikai anyagukból.

Mióta Margulis nyilvánosságra hozta elméletét, egyre gyarapszik az elképzelése mellett szóló bizonyítékok száma. Manapság a tudomány úgy tartja, hogy nem csupán a mitokondrium, hanem más sejten belüli alkotóelemek is egykori, támadó baktériumok maradványai, például a mikroszkopikus méretű csövecskék, az ostorok, valamint a peroxiszómák, ezek a cseppecskék a membránban, melyek oxigénmérgezés ellen védik a sejtet. A növényekben a fotoszintézis létfontosságú feladatát végrehajtó kloroplasztisz valószínűsíthetően cianobaktériumok leszármazottja. Vagyis: az élet fájának egyes ágai nem feltétlenül érnek zsákutcaként véget, hanem összenőhetnek más ágakkal.

Az élet három tartománya

Amikor még iskolába jártam, úgy tanították, hogy az élőlények két nagy országra oszthatók: az állatokéra és a növényekére. Néhány egysejtűt, például egyes amőbákat, kezdetleges állatoknak minősítettek, míg az algákat primitív növényeknek. A baktériumokat érintő kérdések elől inkább kitértek. Röviden: sajnálatos módon félrevezettek minket. 1937-ben jobb osztályozási rendszert vezettek be, amely az élőlényeket két egészen más csoportra, eukariótákra és prokariótákra osztotta. A prokarióták olyan apró, egysejtű organizmusok, amelyeknek nincs sejtmagjuk, sem más,

hasonlóan bonyolult alkotóelemük. Ide tartoznak a baktériumok is. A többi élőlény eukarióta. Ide sorolhatók tehát a nagyobb, bonyolultabb egysejtű élőlények, például az amőbák, valamint a soksejtű életformák, amelyeket eukarióta sejtek kolóniájaként foghatunk fel. És bár csupán mintegy 600 millió évvel ezelőtt kezdődött el a soksejtűek elburjánzása, az eukarióták már sokkal korábban megtették az ehhez szükséges előkészületeket.

A [3.1. ábrán](#) látható fa merőben sematikus. Szerencsére azonban találóbb változatot is kidolgozhatunk, ahol szemléltethető az egyes ágak közötti genetikai különbségek mértéke is. Mivel egy sejt reprodukciója során másolási hibák történhetnek, kezdetben azonos sejtek genetikailag igen távol kerülhetnek egymástól, ahogy az idők során a mutációk hatása összeadódik. Elegendő mutáció esetén új faj jön létre. Általánosságban, minél több különbség mutatkozik két génkészlet között, az élet fáján annál messzebb található egymástól a két adott faj. Az olvasó génjei például nagyon hasonlítanak az enyéimhez, de kevésbé emlékeztetnek egy emberszabású majoméira – még kevésbé egy teknőszere vagy egy borsószemére. A génállomány eltérései igen pontosan mérhetők gén- vagy fehérjeszekvencia-vizsgálattal, és így meghatározható az egyes fajok egymáshoz viszonyított elhelyezkedése az élet fáján.

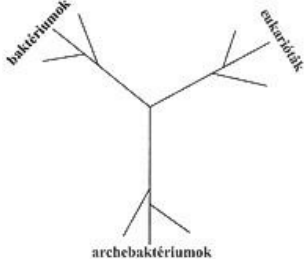
Az eljárást a nyelvek történeti fejlődésének vizsgálatához lehetne hasonlítani. Amikor a vikingek letelepedtek Izlandon, ugyanazt a nyelvet beszélték, mint a skandinávok közös ősei. Idővel azonban, mivel nem volt kapcsolat a

sziget és a kontinens között, az izlandi nyelv fokozatosan eltávolodott a közös anyanyelvtől, egészen addig a pontig, ahonnan már önálló nyelvnek tekinthetjük. Ötszáz évet visszautazva az időben az eltérések közel sem lennének ilyen nagyok. A két nyelv eltérésének mértéke tehát segíthet annak meghatározásában, mióta jár külön utakon a két nemzet története.

Körülbelül harminc évvel ezelőtt született egy tanulmány a citokróm c nevű fehérjéről, melyet sok más mellett, az emberi szervezet is használ. Mint rövidesen részletesen is kifejtem, minden fehérje aminosavaknak nevezett molekuláris egységekből épül fel. A citokróm c ezek közül körülbelül százat tartalmaz, húszféle változatban. Ha megvizsgálunk különböző fajoktól vett citokróm c aminosav-szekvenciákat, megbecsülhetjük, mennyire távolodtak el egymástól az adott fajok az evolúció során. Hogy, egy konkrét példát említsünk: az emberi citokróm c mindössze egyetlen aminosavban tér el a rhesusmajométól, a búzáétól viszont negyvenöt helyen. Az persze nem meglepetés, hogy az ember közelebbi kapcsolatban áll a majmokkal, mint a búzával, ezzel a módszerrel azonban meghatározható az eltérés mértéke is. Legalább ennyire fontos azonban, hogy még az olyan, egymástól igen eltérő fajokban, mint az ember és a búza is található annyi azonosság a citokróm c molekulában, hogy joggal feltételezhetjük: egykor ősük közös volt. Általánosságban megállapítható, hogy minél messzebb áll egymástól genetikailag két faj, annál régebben váltak el egymástól az élet fáján. Sajnos azonban nem könnyű

meghatározott időtartamra váltani az evolúciós távolságot, mivel a mutációk ütemét nem lehet egységesíteni. Az elágazások pontos idejét tehát roppant nehéz meghatározni.

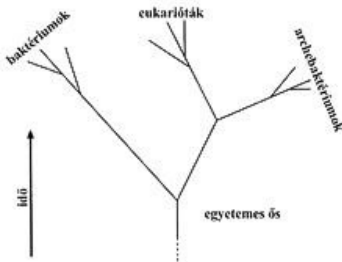
Az 1970-es évek végére rendszeres szekvencia-vizsgálatokat hajtottak végre nemcsak mikrobák, hanem fejlettebb élőlények fehérjéin és nukleinsavain is. Carl Woese, a University of Illinois kutatója számított a téma egyik úttörőjének; eredményei kisebbfajta szenzációt keltettek. A Woese előtti biológusok úgy gondolkodtak, hogy a prokarióták néhány milliárd évvel megelőzték az eukariótákat. Vagyis a prokarióták azzal büszkélkedhettek volna, hogy az élet fájának törzsén helyezkednek el, míg az eukarióták csupán ebből ágaztak el, mondjuk egymilliárd évvel ezelőtt. Woese azonban megcáfolta ezt a feltevést, mivel bebizonyította, hogy az élőlényeknek prokariótákra, illetve eukariótákra történő felosztása alapjaiban elhibázott. Kimutatta, hogy nem kettő, hanem *három* alapvető életforma létezik. Rájött, hogy a „prokarióta” elnevezés valójában két, egymástól genetikailag nagymértékben eltérő sejtosztályt foglal magába, amelyeket eredetileg eubaktériumok, illetve archebaktériumok (archaeobacteria) néven ismertek. Korábban az archebaktériumokat – tévesen – a baktériumok különleges alfajaként tartották számon. Woese kimutatta, hogy bár az archebaktériumok baktériumnak *látszhatnak*, biokémiai felépítésüket tekintve annyira különböznek tőlük, mint az ember az *E. colitól*.



3.2. ábra.

A molekuláris szekventálás eljárásai azt mutatják, hogy a földi élet három különböző tartományba sorolható. Valamennyi többsejtű szervezet az eukarióták közé tartozik.

Woese kutatásaiból az következik, hogy a három alapvető életforma – archebaktériumok, baktériumok és eukarióták – körülbelül hárommilliárd évvel ezelőtt vált el egymástól: azaz igen régen, valószínűleg nem sokkal az élet kialakulását követően sor került az élet fajának korai, hármass elágazására (lásd [3.2. ábra](#)). Ez azonban rögtön felveti azt a lényeges, és mindeddig megválaszolatlan kérdést, hogyan helyezkedik el ez a három létforma az élet fáján. Melyik ágazott el elsőként és melyikből? A legfrissebb szekvenciakutatások eredményei – különös tekintettel Karl Stetter (Regensburgi Egyetem), valamint Norman Pace és Susan Barns (University of Indiana)^[33] munkásságára – arra utalnak, hogy a [3.3. ábrán](#) bemutatott séma a legvalószínűbb.



3.3. ábra.

A mikrobiológia egyik legjelentősebb feladata az életfa gyökerének elhelyezése a [3.2. ábrán](#) felvázolt hármás elágazáshoz képest. Itt egy valószínűsíthető alakzatot látunk egy valahol a baktériumok és az archeobaktériumok között elhelyezkedő egyetemes őssel.

A biológusoknak nincs kétségük afelől, hogy a három különböző létforma egyetlen közös őstől származik. A közöttük jelenleg fennálló különbségek ellenére megegyeznek alapvető genetikájukban, illetve anyagcsere-folyamataikban, valamint néhány speciális jellemzőjük is közös. Nyilvánvaló tehát, hogy már a közös ős is roppant komplex élőlény volt, nem pedig egy éppen csak létrejött kezdetleges organizmus. Az előző részben kimutattam, hogy az utolsó közös ős nem azonos a legelső élőlényvel. Ha pedig az az ős, amelytől a három alapvető létforma származik, már maga is komplex élőlény volt, akkor helyét nem az élet fájának gyökereinél, hanem sokkal

magasabban kell keresnünk.

A molekuláris szekvenciavizsgálatok forradalmasították a mikrobiológiát, és új megvilágításba helyezik az élet kezdetét övező rejtélyt. A vizsgálatok tárgyát az élő sejtekben található molekuláris maradványok képezik. Az eredmények a három életforma igen hosszú történetét feltételezik, melynek során több mint hárommilliárd évvel ezelőtt következtek be a legkorábbi elágazások. De hogyan egyeztethetőek össze ezek az eredmények a kövületek sokkal hagyományosabb vizsgálatával?

A legkorábbi kövületek

A nyugat-ausztráliai Pilbara-vidék a világ legforróbb, legkietlenebb és legkevesbé benépesült vidékei közé tartozik. A Marble Bar nevű kisvárostól körülbelül negyven kilométerre nyugatra található az elképesztő módon North Pole-nak (Északi-sark) nevezett geológiai képződmény. Ezen elhagyatott helyhez közeli, dombos vidéken fedezte fel 1980-ban John Dunlop geológushallgató a világ ma ismert legrégebbi kövületeit. Az avatatlan szemlélő számára ezek nem is igazán tűnnek kövületnek. Hiszen semmi nyoma ammonieszeknek vagy háromkaréjú rákoknak: csupán úgynevezett sztromatolitok néhány különös lenyomata. Olyankor keletkeznek ilyen lenyomatok, amikor cianobaktériumok rakódnak le rétegről rétegre ásványi szemcsék közé, ahol párnaszerű kiemelkedéseket képeznek. Manapság is találhatóak a kialakulás folyamatában lévő sztromatolitok, körülbelül ötszáz

kilométerre a North Pole-tól, a nyugatausztráliai partvidék Shark Bay nevű öblében.^[34] A megkövesedett sztromatolitok egy vulkáni eredetű lagúna üledékében jöttek létre, korukat 3,5 milliárd évesre becsülik. Nem sokkal azután, hogy Dunlop felfedezte a pilbarai sztromatolitokat, a William Schopf vezette kaliforniai paleontológusok egy csoportja megkövesedett mikrobák nyomaira bukkant a közeli warrawoonai dombok hasonló korú kőzeteiben.^[35] A kőzetbe ágyazódott, felszeletelt szálacskának tűntek, és egy ősi, a Nap által hevített tóban élő cianobaktériumok jelenlétére utaltak.

A Pilbara-vidéktől észak felé indulva az első város Darwin, amelyet magáról a nagy tudósról neveztek el. Darwint módfelett zavarba hozta a prekambriumból, azaz a körülbelül hatszázmillió évnél korábbról származó kőületek nyilvánvaló hiánya. És bár a kőületek igenis ott voltak, a prekambrium teremtményei túlságosan aprók voltak ahhoz, hogy alkalmi lenyomatkeresők rájuk bukkanhassanak. Még a legmodernebb technikával felszerelt, tapasztalt paleobiológusoknak is csak alig néhány, 2,5 milliárd évnél régebbi, mikroszkopikus méretű kőzetlenyomatokat tartalmazó lelőhelyet sikerült felfedezniük, és ezen felfedezések közül is soknak vitatott a hitelessége.

Ha a warrawoonai mikrolenyomatok valóban cianobaktériumoktól származnak, akkor az azt jelenti, hogy a természet már 3,5 milliárd évvel ezelőtt ismerte a fotoszintézist. És mivel a fotoszintézis bonyolult és kifinomult kémiai folyamat, valószínűsíthető, hogy a warrawoonai mikroorganizmusok már igen fejlett lények

voltak, tehát jóval ezt a korszakot megelőzően léteztek primitívebb előfutáraik. De hagytak-e bármilyen nyomot is maguk után ezek a korábbi mikrobák?

Igen csekély az esélye annak, hogy a nyugat- ausztráliaiaknál régebbi mikrolenyomatokat találjunk. Szerencsére azonban ismerünk más, sokkal kifinomultabb módszereket is, amelyekkel egyes élőlények nyomot hagyhatnak a kőzetekben: úgy, hogy megváltoztatják azok kémiai összetételét. Egy sekély tenger ökoszisztémája például szerves anyagokat tartalmazó üledéket hoz létre, szénben gazdag ásványokat, valóságos mikrobatemetőt. Valószínűleg valami ehhez hasonló történt a grönlandi Isua különlegesen régi, palás vaslerakódásai esetén. Az ezen kőzetek széntartalmát vizsgáló, Manfred Schidlowski (Max Planck Kémiai Intézet, Németország) által vezetett kutatás arra utal, hogy háromszázmillió évvel a pilbarai kőzetlennyomatokat megelőzően is létezett élet.

Az isuai élet bizonyítéka a szén izotóparányainak gondos vizsgálatán alapul. Egy tipikus szénatomban hat proton és hat neutron található, a jele tehát C^{12} . Léteznek azonban olyan szénatomok is, amelyek a hat helyett hét neutront tartalmaznak; jelük C^{13} . Kémiai tulajdonságaik megegyeznek; az ilyen változatokat nevezzük izotópoknak. A C^{12} -es jobban kedvez az életnek, mivel valamivel könnyebb, és könnyebben lép reakcióba. Ennek következményeként az élő szervezetek inkább a könnyebb izotópot kötik meg, és végül gazdagítják vele azt az üledéket, amelyben lerakódnak. A C^{12} aránya a pilbarai kőzetekben hozzávetőleg három százalékkal haladja meg a

szokásosnak tekintett értéket, míg Isua esetében körülbelül egy százalékkal.

A közelmúltban a kaliforniai Scripps Institute of Oceanography (Scripps Óceánkutató Intézet) Gustaf Arrhenius vezette csoportja a legújabb eljárások segítségével vizsgálta meg az isuai kőzetek szénizotóp arányait. Az ionmikroszkop tömegspektrométer nevű berendezés alkalmazásával a kutatóknak lehetőségük nyílt roppant kis szénmennyiségek mérésére 10 mikrométeres, egy billiomod gramm súlyú szemcsékben, és egyértelműen az élet nyomaira bukkantak. A legalább 3,85 milliárd évesre becsült kőzetmintákat az Isuához közeli Akilia szigetén gyűjtötték.^[36] Ehhez hozzátartozik, hogy radioaktivitáson alapuló mérések szerint a Föld életkora 4,55 milliárd év. Ha 3,85 milliárd évvel ezelőtt ténylegesen létezett élet a bolygónkon, akkor a Földet fennállása legalább 85 százalékában lakták.

A kőzetlenyomatok vizsgálata a biogenezis felülről lefelé irányuló kutatásának tekinthető. Abból kiindulva, amit ma tudunk az életről, megpróbáljuk visszafelé követni az evolúciós utat a múltba, az egyre kisebb méretű létformák felé a legegyszerűbb organizmusok legkorábbi nyomaiig, mindaddig, amíg egyértelműek a bizonyítékok. Valamivel több mint 3,5 milliárd évvel ezelőtt, sőt akár 3,8 milliárd évnél régebben, már élt az első földi organizmus valahol a bolygónkon. De vajon hol? És miféle élőlény lehetett? A 6. fejezetben, amikor visszatérek a felülről lefelé irányuló vizsgálathoz, megpróbálok majd választ adni ezekre a kérdésekre. Most viszont egy „lentől felfelé” haladó

közelítést mutatok be, azaz előbb azt vesszük szemügyre, mit is tudunk az ősi Földről, és ezután megkíséreljük rekonstruálni azokat a fizikai és kémiai folyamatokat, amelyek akkoriban elindíthatták az élet kialakulását.

Spontán kialakulás

A tudomány nem hisz az igazi csodákban. Noha maga a biogenezis is sokak számára csodának tűnik, minden tudományos vizsgálatnak az a feltevés a kiindulópontja, hogy az élet természetes módon, hétköznapi fizikai folyamatok révén alakult ki. Bár igen valószínűtlen, hogy valaha is rájövünk egészen pontosan hogyan is történt, arra igenis van lehetőségünk, hogy kikövetkeztessünk egy olyan elfogadható vegyi folyamatot, amely egyszerű vegyületektől elvezet az élethez. Természetesen többféle út vezethetett az általunk ismert élethez, mint ahogy sokféle alternatív életforma is létezhet. Még az sem lehetetlen, hogy a tudósoknak egy napon sikerül életet létrehozniuk laboratóriumban, a legcáfolhatatlanabban bizonyítva, hogy nincs szükség csoda feltételezésére. Ismereteink jelenlegi hiányosságai mellett azonban csupán abban reménykedhetünk, hogy találunk valamiféle fogódzót az érintett vegyi folyamatok alapvető lépéseihez. Némelyek ellene vethetik, hogy egyáltalán nincs szükség ezekre a fogódzókra, illetve hogy az egész téma annyira spekulatív, hogy fölösleges foglalkozni vele, ez az álláspont azonban mérhetetlen szűklátókörűségre vall. Hiszen az élet létrejöttének kutatása akkor is eredményezhet értékes

információkat, ha nem tudjuk meg pontosan, hogyan kezdődött. Leginkább arra a kérdésre találhatunk választ, hogy ténylegesen mekkora az élet spontán kialakulásának az esélye. Amennyiben ez az esély nagy, akkor feltételezhetjük, hogy az univerzum más vidékein is kialakulhatott az élet. Ha viszont kicsi a valószínűsége, akkor minden bizonnyal egyedül vagyunk a világegyetemben.

Bárhogyan is zajlott le konkrétan a kérdéses kémiai folyamat, az élet kialakulása vélhetőleg egyes molekulák spontán összekapcsolódásával kezdődött. Rejtélyesnek vagy egyenesen misztikusnak tűnhet ugyan a „spontán összekapcsolódás” kifejezés, ez azonban mindennapos jelenség a tudományban. Galaxisok és kristályok is keletkezhetnek például ilyen módon, vagyis önmagukat hozzák létre egy rendezetlen és alakatlan kiinduló állapotból, mindenféle külső segítség nélkül. Nem valamiféle „életerő” rendezi végső formába az alkotóelemeiket, hanem köznapi fizikai folyamatok. Egyes biológusok feltételezése szerint, bár még a legprimitívebb életforma is igen bonyolult, ugyanez érvényes az élet kialakulására is.

Az élet spontán kialakulásába vetett hit hosszú múltra tekinthet vissza, már Platónnál is megjelenik. A tizenhetedik században elterjedt hiedelem volt, hogy megfelelő körülmények között keletkezhetnek bizonyos élőlények. A kifejlett egerekről például úgy vélték, hogy kialakulhatnak egy halom átizzadt alsóneműből és búzából.^[37] Egy másik népszerű recept szerint: régi zoknik

és rothadó hús tetveket, legyeket és férgeket eredményez. És bár manapság nevetségesnek tűnnek ezek a történetek, a kérdés rendezéséhez egy olyan nagyságrendű tudósra volt szükség, mint Louis Pasteur. 1862-ben, egy nyilvános pályázat ösztönző hatására Pasteur egy sor gondos kísérlettel igazolta, hogy élőlények kizárólag más élő szervezetek révén jöhetnek létre. Kijelentette, hogy a ténylegesen steril közeg mindörökké steril is marad. „A spontán születés tétele – közölte diadalmasan – nem fogja túlélni azt a súlyos csapást, amelyet ez az egyszerű kísérlet mért rá!”^[38]

Bármilyen nagy horderejű volt is azonban ez a kísérlet, Pasteur elképzelése szöges ellentétben állt a darwini felfogással. Darwin híres műve, az *On the Origin of Species* (A fajok eredete), amely három évvel Pasteur kísérlete előtt jelent meg, azáltal igyekezett megcáfolni Isten fajokat teremtő létének szükségszerűségét, hogy bemutatta, hogyan alakulnak ki egymásból a különböző fajok. Magyarázata azonban nem válaszolta meg azt a kérdést, hogy miként jött létre az *első* élőlény. Hacsak nem létezett mindig is élet, legalább egy faj – a legelső –, nem alakulhatott ki egy másikból, csakis élettelen anyagból. Maga Darwin írta erről néhány évvel később^[39]: „Nem találtam megbízható bizonyítékot az élet úgynevezett »spontán kialakulásának« igazolására.” Ennek ellenére, ha eltekintünk a csodáktól, az élet *csakis* spontán úton jöhetett létre. Darwin evolúciós elmélete, valamint Pasteur tétele arról, hogy csak élet hozhat létre életet, nem lehet egyidejűleg maradéktalanul igaz.

Maga Darwin is óvatosan nyúlt az élet keletkezésének kérdéséhez (lásd az idézetet jelen fejezet elején), egyik híres, 1871-es levelében viszont felbukkan egy ötlet csírája.^[40] Itt olyan „meleg vizű tavacskáról” beszél, amelyben „ammónia és foszforsók” találhatóak, a környezetét pedig „fény, meleg, elektromosság... stb.” jellemzi. Úgy vélte, ebből a primitív elegyből, kémiai folyamatok révén, nagyon hosszú idő alatt, kialakulhatott valamilyen életforma. Ez az alkalmi ötlet aztán kijelölte a téma kutatásának irányát a következő évszázadra.

Abban az időben a teológusok és egyes tudósok is éles kritikával fogadták már magát az elgondolást is, hogy az élet létrejöhetett volna magától, valamilyen kémiai elegyből. Lord Kelvin, a híres angol fizikus azzal utasította el ezt az elképzelést, hogy nem több mint „egy réges-régen túlhaladott spekuláció” és hogy „a tudomány óriási mennyiségű közvetett bizonyítékot tud felhozni a cáfolatára”.^[41] Kereken kijelentette, hogy „élettelen anyag nem válhat élővé anélkül, hogy kapcsolatba kerülne már élő anyaggal”. Következésképp vagy mindig is létezett élet, vagy mégiscsak csoda kellett a létrejöttéhez.

Az 1920-as évekig, az orosz Alekszander Oparin és az angol J. B. S. Haldane színre lépéséig nem történt igazi előrehaladás e téren. Mindkét tudós osztotta azt a nézetet, hogy indokolatlan hiszékenység elfogadni, hogy az élet hirtelen, egyetlen döbbenetes reakció révén jött volna létre. Darwin gondolatára alapozva feltételezték, hogy létezett egy hosszú fejlődési szakasz, kémiai folyamatok olyan sorozata, amely fokról fokra vezetett el az első mikrobához.

Ebben a prebiotikus szakaszban olyan, egyelőre meghatározatlan reakciók egymásutánja zajlott volna le, amely egyre összetettebb és összetettebb anyaggá alakította át a molekulák elegyét, mindaddig, míg végül ki nem alakult valami olyasmi, ami rendelkezett az élő szervezet alapvető jellemzőivel.

Haldane, Darwin „tavacsájától” eltérően a Föld óceánjainak összességét tette meg az események színterének. A kietlen tájat áztató eső különféle vegyi anyagokat moshatott az óceánba, amelyek ott koncentráálódtak mindaddig, amíg a folyadék – Haldane metaforikus kifejezésével élve – „el nem érte a forró, híg leves állagát”. Mivel a kifejezés megragadt a tudományos szóhasználatban, ezt az anyagot azóta is „őslevesnek” hívják.

Az évek során sok változat született arról, miből is állhatott pontosan ez az ősseves, és hogy hol lehetett: tényleg egy egész óceán volt-e, vagy csupán egy tavacska, ahogyan Darwin elképzelte? Kiszáradófélben lévő lagúna lehetett, barlangi tó, esetleg föld alatti ér? Netán inkább forró gejzíről, esetleg egy tenger alatti vulkanikus kürtőből kellene kiindulnunk? A levegőben lebegő vízcseppecskékből? Az is elképzelhető, hogy az „ősleves” nem is a Földön, hanem egy üstökös, vagy egy kisbolygó belsejében helyezkedett el. Ezen elgondolások mindegyikét komolyan megvizsgálták, de mindegyik megmaradt merő feltételezésnek. És bár e javaslatok igen eltérőek, felfedezhető bennük közös vonás. Mindegyikhez szükség van folyékony vízre, benne oldott megfelelő

anyagokra és valamilyen, a kellő kémiai reakciókat fenntartó energiaforrásra.

Haldane és Oparin nézete erősen különbözött a részletek tekintetében, és ez végül a mai napig is érzékelhető szakadást eredményezett a témát kutatók körében. A kérdéses különbség a sejtek kialakulására vonatkozik. Minden mikroorganizmust membrán vagy sejtfal különít el a környezetétől – tényleg nehéz elképzelni egy élőlényt valamiféle kiterjedésbeli határok nélkül. Az viszont közel sem egyértelmű, hogy mikor alakult ki ez a sejt szerkezet: az élethez vezető alapvető kémiai lépések előtt, közben vagy után?

Míg Haldane az „ősleves” vegyi összetételére fordította a figyelmét, Oparin a sejt elsődlegességét hirdette. Abból indult ki, hogy az olajos anyagok nem elegyednek a vízzel, és bizonyos esetekben úgynevezett koacervátumokat alkotnak: az olaj apró cseppekké áll össze. Ezek az olajbuborékok nagy vonalakban a sejtekre emlékeztették Oparint. Elmélete szerint elsőként a fizikai sejt szerkezet alakult ki, olyan természetes tárolóedényt biztosítva, ahol lejátszódhattak a fent említett különös molekuláris folyamatok. Az elgondolás vonzereje abban rejlik, hogy számos olyan fizikai jelenséget ismerünk (az olaj és a víz esetén kívül is), ahol valamilyen hólyagocskák alakulnak ki. Idővel ezek a hólyagocskák, a folyékony sejtekhez hasonlóan, instabillá válhatnak és kettéhasadhatnak, mely jelenség egyfajta reprodukciónak tekinthető. Ha egy bizonyos kémiai összetételű hólyag felduzzad, majd kettéhasad, „utódai” örökölni fogják a „szülő” összetételét.

Ez pedig elegendő lehetett ahhoz, hogy működésbe lépjen egyfajta kezdetleges természetes kiválasztódás. A membránnak azonban speciális tulajdonságokra van szüksége. A létfenntartó molekulákat például a sejten belül kell tartania, a szükséges nyersanyagokat viszont be kell eresztenie a környezetből.

Oparin elgondolása, amely a sejtek kialakulásához köti az élet kezdetét, jól tükrözi korának ismereteit. Abban az időben a tudósok még a sejtek anyagcsere-folyamatainak és a fehérjéknek a sejtben betöltött funkciójának pontos leírásával küszködtek, a gének természetéről még alig-alig volt határozott elképzelésük. Nem létezett még sem molekuláris biológia, sem DNS-vizsgálat. Végső soron a lehető legtermészetesebb, hogy Oparin nem tekintette döntő fontosságúnak az élet kérdésének genetikai vonatkozásait, és ismertebb fizikai megnyilvánulásaira – a sejtképződésre, és ennek belső szerkezetére összpontosította a figyelmét. Ez még nem teszi egyértelműen hibássá az „első a sejt” típusú elképzeléseket, de mindenképpen arra int, hogyha pillanatnyi ismereteinktől tesszük függővé, mit állítunk valamely elmélet középpontjába, fennáll annak a veszélye, hogy a kocsit fogjuk a ló elé.

Az 1920-as években még túlságosan spekulatívnak látszott elméleteket gyártani az élet keletkezéséről, következésképpen kevesen figyeltek fel Oparin és Haldane elméleteire. Legalább egy ember azonban igen: Harold Urey, az az amerikai vegyész, aki a deutérium felfedezéséért egy nap majd elnyeri a Nobel-díjat. Urey

rájött, hogy az „ősleves” elméletét laboratóriumi próbának is alá lehet vetni. Évekkel később, 1953-ban neki is látott a kísérlet elvégzésének.

Az ősseves rekonstrukciója

Urey híres kísérlete, koncepcióját tekintve, elbűvölően egyszerű volt. Megpróbálta laboratóriumában rekonstruálni az ősi Földet vélhetően jellemző viszonyokat, hogy megfigyelhesse, mi történik. Mindenekelőtt ki kellett következtetnie, milyen lehetett bolygónk évmilliárdokkal ezelőtt. Folyékony víz jelenléte magától értetődőnek látszott, az atmoszféra összetételét azonban nem ismerték. Annak eldöntésében, hogy milyen gázokat használjon a kísérletben, Urey-t nagyban segítette az a tény, hogy a Föld jelenlegi légkörének az egykoritól való eltérését főként az élet jelenléte okozta. Különösen érvényes ez a fotoszintézisnek köszönhetően megnövekedett oxigénmennyiségre. Urey tehát kizárta az oxigént az alkotóelemek sorából. Igaza volt. Bár ha oxigénről van szó, általában az életre gondolunk, de ez a veszedelmesen korrodáló elem gyors pusztulással fenyegeti a legtöbb szerves molekulát – ahogy azzal minden gyűjtőgató tisztában van. Ha tehát a prebiotikus állapot egy kicsit is emlékeztetett Oparin vagy Haldane elképzeléseire, akkor az atmoszféra bizonyosan nem tartalmazott szabad oxigént. Urey végül metán, hidrogén és ammónia elegye mellett döntött.

Urey a University of Chicago egyik fiatal, tehetséges

hallgatója, Stanley Miller közreműködésével végezte el a kísérleteket. Miller a választott gázokkal és egy kis vízzel megtöltött, lezárt üvegedényt néhány napon át elektromos kisüléseknek tette ki, hogy a villámlás hatását szimulálja. A következő héten pedig izgatottan figyelte, ahogyan a rendszerben keringő folyadék lassacskán vörösesbarnára színeződik. Millert magával ragadta az eredmény: úgy tűnt, ennek az egyszerű kísérletnek sikerült létrehoznia valami „ősleves”-hez hasonlót. Buzgón elemezni kezdte az elegyet, és arra az eredményre jutott, hogy tartalmaz bizonyos szerves anyagokat, nevezetesen aminosavakat. Aminosavakból épülnek fel a fehérjék, ezek tehát minden földi életforma alapvető alkotóelemei.

Miller figyelemre méltó eredményeit az első lépésként üdvözlötték azon az úton, amely az élet „kémcsőben történő” előállításához vezet. A lelkesedést az táplálta, hogy ha egyetlen hét alatt sikerült aminosavakat előállítani, csak bele kell gondolni, mi lenne az eredmény, ha sokkal hosszabb ideig végeznék a kísérletet. Lehetséges, hogy pusztán idő kérdése, mikor mászik ki valamiféle élőlény a vörösesbarna folyadékból. A tudósok tehát arra a következtetésre jutottak, hogy az élet létrejöttéhez csupán néhány egyszerű vegyület és némi energia szükséges.

Sajnos azonban a Miller-Urey-féle kísérlet nyomán magasra csapó diadalmámor több okból is elhamarkodottnak bizonyult. Először: a geológusok manapság már nem hiszik, hogy a Föld egykori atmoszférája hasonlított volna Miller gázelegyére. Az első egymilliárd év alatt a Földnek valószínűleg több, különféle

légköre is volt; az azonban igen valószínűtlen, hogy nagy mennyiségben lett volna jelen benne metán és ammónia. És még ha egy ideig tartalmazott is jelentős mennyiségű hidrogént, valószínűsíthető, hogy ez az állapot nem tartott sokáig: lévén a legkönnyebb elem, rövid idő alatt kiszökött volna a légkörből az űrbe. Urey választása pedig éppen azért esett ezekre a gázokra, mert mindegyik tartalmaz hidrogént. A kémikusok „redukáló”-nak hívják az ilyen gázokat. A redukció az oxidáció ellentéte, és mivel a szerves vegyületekben sok a hidrogén, mindenféleképpen redukáló típusú légkör szükséges a létrejöttükhöz. A legáltalánosabban elfogadott mai vélekedés szerint viszont a Föld korai légköre nem volt sem redukáló, sem oxidáló jellegű: valószínűleg szén-dioxid és nitrogén semleges elegyből állt. Ezekből a gázokból pedig nem alakulnak ki aminosavak.

Tovább csökkenti a Miller-Urey-kísérlet jelentőségét, hogy nem olyan nehéz aminosavakat előállítani. Az eredeti chicagói kísérletnek több olyan sikeres változatát hajtották már végre, amelyekben az elektromos szikrát hőforrással, ibolyántúli fénnel, lökéshullámokkal vagy éppen gerjesztett kémiai eleggyel helyettesítették. Kiderült, hogy az aminosavak előállítása egyáltalán nem ördögösség. Manapság már tudjuk, hogy természetes előfordulási helyeik közé tartoznak a meteoritok, sőt a világűr is.

Akad egy másik, az alapvető koncepciót érintő oka is annak, hogy a Miller-Urey-kísérletnek ma már közel sem akkora a jelentősége, mint annak idején. Súlyos hiba ugyanis feltételezni, hogy az élet kialakulása egy jól

meghatározható utat jár be, elindul egy bizonyos kémiai elegyből, ami az idő múlásával elkerülhetetlenül életté alakul. Igaz, hogy az aminosavak a fehérjék építőkövei, ám óriási a különbség az alkotóelemek és a kész szerkezet között. Ahogy egy halom téglá nem jelenti azt, hogy a sarkon túl ott áll a felépült ház, önmagukban az aminosavak igen távol állnak az élethez szükséges hatalmas, speciális molekuláktól, amilyen a fehérje.

Két fő akadály tornyosul elénk, ha az élet „őslevesből” való kialakulásának a lehetőségeit akarjuk vizsgálni. Az egyik az, hogy a legtöbb változatban az elegy túlságosan híg ahhoz, hogy bármiféle eredményt is várhatnánk tőle. Haldane „leveses fazeka”, az óceán, olyan mérhetetlenül hatalmas, hogy nemigen halmozódhattak fel benne egyazon időben és helyen a szükséges alkotóelemek. Olyan mechanizmus hiányában, amely a megfelelő mértékben koncentrálná ezeket az anyagokat, csaknem a nullával egyenlő az aminosavaknál összetettebb molekulák kialakulásának a valószínűsége. Több fantáziadús elmélet is született arra, hogyan sűrűsödhetett össze kellő mértékben az őselegy. Darwin Nap melegítette tavacskájának vize például elpárologhatott, így maradhatott a nyomában élet létrehozására képes üledék. De az is lehetséges, hogy bizonyos ásványi rétegek, például az agyag, kiszűrték és összesűrítették a vízből felszívódó vegyi anyagokat. Távolról sem világos, hogy ezen feltételezések melyike valósulhatott meg az ifjonti Földön, ráadásul nincsenek őselegyhez hasonló nyomok a kőzetekben, amelyek eligazítást nyújthatnának.

A másik akadály viszont a termodinamika második főtételén alapul, ilyenformán leküzdhetetlennek tűnik. Idézzük csak fel, hogyan írja le ez a törvény azt a természetes tendenciát, amelyik a rendtől és a komplexitástól a degradáció és szétesés felé vezet. Komplex biomolekulák keletkezése tehát – termodinamikai értelemben „természetellenes”. Első pillantásra ellentmondásba ütközünk, hiszen aminosavak könnyedén létrejöhetnek, akár többféle különböző környezetben is. Valójában azonban szó sincs ellentmondásról. Hiszen, mint azt a 2. fejezetben láthattuk, megjelenhet egy adott helyen a rend is, feltéve, hogy nagyobb mennyiségű rendezetlenség vagy entrópia kerül a környezetbe. Olyankor is ez játszódik le, amikor kristály jön létre egy oldatból. A szilárd kristályszerkezet ugyanis az atomok sokkal rendezettebb összeállítása, mint a folyadék, így az entrópiája is kisebb. Keletkezésekor viszont hő termelődik, amely leadódik a környezetnek, növelve annak entrópiáját. Vagyis a második tényezőnek erősebb a hatása, mint az elsőé. Ugyanez érvényes az aminosavak keletkezésére is, ami, a kristálykialakuláshoz hasonlóan, termodinamikailag kedvező folyamat. Ennek oka a szabad energia szerepében rejlik. Amennyiben egy folyamat csökkenti a rendszer energiáját, azaz „lefelé irányul”, élvezheti a második főtétel áldásait. Ezzel ellentétben, egy „felfelé irányuló” folyamat összeütközésbe kerül ezzel a tétellel. A víz pedig lefelé fut a hegyről, és nem felfelé a hegyre. *Lehetséges* felfelé futtatni, de kizárólag energia-befektetés árán. A spontán folyamatok kivétel nélkül „lefelé” irányulnak. Az aminosavak

kialakulása is „lefelé irányuló” folyamat, ezért olyan könnyű előállítani őket.

Itt azonban megfeneklik a gondolatmenet. Az élet, vagy legalábbis a fehérjék kialakulásához vezető úton ugyanis a második lépés az, hogy az aminosavak peptidmolekulákká kapcsolódnak össze. A fehérje voltaképpen hosszú peptidlánc, azaz polipeptid. És bár aminosavak spontán kialakulása egy szerves kémiai elegyből „lefelé irányuló” folyamat, peptidekké történő összekapcsolódásuk „felfelé irányul”, vagyis termodinamikai értelemben rossz irányba mutat. Minden egyes peptidkötés létrejöttéhez egy vízmolekulát kell kiiktatni a láncból. Ez pedig a vélt őselegy nedvességtartalmú közegében termodinamikailag kedvezőtlen folyamat. Következésképp nem fog spontán végbemenni; csakis energia-befektetés árán kényszeríthető vissza az újonnan kiemelt vízmolekula a víztől amúgy is átítatott közegbe. Persze, senki nem állítja, hogy lehetetlen peptideket létrehozni – elvégre az élőlények szervezetében is lejajlanak ilyen folyamatok. De ilyenkor speciálisan erre a célra szolgáló, gerjesztett molekulák segítségével történik a felfelé irányuló reakció. Egy egyszerű kémiai elegyben pedig nincsenek ilyen, a reakcióhoz szükséges energiát biztosító speciális molekulák. A magas víztartalmú elegy tehát a molekulák szétválásának, nem pedig az összekapcsolódásuknak kedvez.^[42]

A félreértések elkerülése végett: nem arról van szó, hogy az egykori Földön nem állt volna rendelkezésre elegendő energiaforrás a peptidkötések létrehozásához, hanem

arról, hogy nem jelent megoldást egyszerűen energiát sugározni az elegybe. Hiszen ugyanazok az energiaforrások, amelyek részt vesznek a szerves molekulák létrehozásában, a megsemmisítésükben is szerepet játszanak. A megfelelő eredmény eléréséhez éppen a kívánt reakcióba kell adagolni az energiát. Az irányítatlan energia-bevitel, például az egyszerű hevítés, nagyon nagy valószínűséggel nem építő, hanem pusztító hatású lesz. A helyzet ahhoz hasonló, mint amikor egy munkás fáradhatatlanul dolgozik azon, hogy egymásra rakott téglákból egy oszlopot emeljen. Minél magasabb lesz az oszlop, annál valószínűbb, hogy meginog és összeomlik. Ugyanígy, az egymáshoz kapcsolódó aminosavakból kialakuló hosszú láncok is igen törékenyek. Általában, ha egyetlenül hevítünk szerves anyagokat, hosszúláncú molekulák helyett csak kátrányos valamit kapunk, ahogy azt a nyílt lángon rendszeresen húst sütők is igazolhatják.

Az is igaz viszont, hogy a termodinamika második főtétele csupán statisztikai jellegű törvény; nem zárja ki tehát annak a lehetőségét sem, hogy egyes fizikai rendszerek „rossz irányba” haladjanak (vagyis „felfelé”). Ennek az esélye azonban igen kicsi. Lehetséges, de nem valószínű például, hogy egy téglaoszlop építéséhez elég egyszerűen kiborítani egy halom téglát egy csilléből. Ha két téglát pontosan egymás tetejére kerül, az még ugyan nem meglepő, három viszont már elég ritka, tíz pedig valószínű csodának minősülne. Minden kétséget kizáróan igen hosszú ideig kellene várni arra, hogy teljesen spontán módon létrejöjjön

egy tíz tégla magasságú oszlop. Közönséges, a termodinamikai egyensúly közelében lejátszódó kémiai reakciók esetében a molekulák véletlenszerű mozgást végeznek, tehát ilyen esetekben is módfelett hosszú ideig kellene várni egy törékeny molekulalánc véletlenszerű kialakulására. És minél hosszabb a lánc, annál tovább kell várni a megjelenésére. Becslések szerint ahhoz, hogy egy magára hagyott, koncentrált aminosavoldat a termodinamikai törvényekkel dacolva, spontán módon létrehozzon egyetlen kis polipeptidet, akkora folyadékmennyiségre lenne szükség, mint a ma megfigyelhető univerzum. Nyilvánvaló, hogy csekély a hozadéka a véletlenszerű molekuláris kavargásnak, ha rossz irányba mutat a folyamat.

A második főtétel által felállított korlátok megkerülésének egyik lehetősége, hogy eltérünk a termodinamikai egyensúly állapotától. Sidney Fox amerikai biokémikus azt vizsgálta, mi történik, ha erősen hevítünk egy aminosav-elegyet. Ha a vizet gőzként elvezetjük, sokkal valószínűbb lesz az aminosavak peptidláncokká történő összekapcsolódása. A hőenergia áramlása szolgáltatja a második főtétel értelmében szükséges entrópiát. Fox ezzel a módszerrel létrehozott néhány igen hosszú polipeptidláncot, amelyeket „proteinoid”-oknak nevezett el. Sajnálatos módon azonban csak felületes a hasonlóság Fox proteinoidjai, valamint a valódi proteinek között. A valódi fehérjékben például kizárólag balos csavarodású aminosavak találhatóak, míg a proteinoidokban egyenlő arányban fordulnak elő balos és jobbos csavarodásúak.

Akad azonban alapvetőbb oka is annak, amiért nem tekinthetjük kiindulási pontnak az aminosavak spontán összekapcsolódását fehérjévé. Ez az ok nem magukkal a kémiai kötésekkel áll kapcsolatban, hanem az egyes aminosavak összekapcsolódásának sorrendjével. A fehérjék nem bármilyen meglévő peptidláncokból, hanem meghatározott, az élethez szükséges, különleges kémiai tulajdonságokkal rendelkező aminosav-sorozatokból állnak. Egy aminosav-elegyben előforduló lehetséges permutációk száma azonban csillagászati nagyságú, hiszen egy tipikus kis fehérje is általában húszféle változatban tartalmaz száz aminosavat. Vagyis egy ekkora molekulában az aminosavaknak 10^{130} -féle (vagyis egy 1-es és utána százharminc nulla) elrendezése lehet.^[43] Egyszerűen elképzelhetetlen véletlenszerűen ráhibázni a megfelelőre.^[44]

Használható aminosav-szerkezethez jutni a használhatatlan kombinációjú aminosavkonfigurációk tömkelegéből ugyanolyan sziszifuszi információszerzési problémának tekinthető, mint például kereső nélkül egy bizonyos információt keresni az Interneten. Hogy termodinamikailag fejezzük ki a problémát, idézzük fel az információnak és az entrópiának a 2. fejezetben kifejtett kapcsolatát! A fehérjének a megfelelő aminosav-sorozatok által megjelenített, igen speciális információtartalma arra utal, hogy a molekula kialakulásakor jelentősen csökken az entrópia. Természetesen most sem szabad elfeledkeznünk arról, hogy a kívánt eredmény eléréséhez nem elegendő véletlenszerűen bedobni az energiát. A téglarakási

hasonlattal élve: energia pusztá hozzáadásával fehérjét előállítani olyan, mintha dinamitot robbantanánk egy téglahalom alatt, és azt várnánk, hogy így felépül a ház. Elképzelhető, hogy elegendő energia szabadul fel ahhoz, hogy egymás hegyére-hátára kerüljenek a téglák, de ha az energiát nem ellenőrzött és rendezett módon irányítjuk a téglákra, nemigen bizakodhatunk, hogy kaotikus összevisszaságon kívül bármit is létrehozunk. Termodinamikailag tehát kivitelezhetetlennek tűnik aminosavak véletlenszerű összerázásával fehérjét előállítani. Hiszen nem elég, hogy a molekulákat „felfelé” kell összerázni, hanem olyan megfelelő konfigurációkba is kell rendezni őket, amelyek az összes lehetséges kombinációnak csupán töredékét jelentik.

Eddig csupán fehérjék előállításáról esett szó, aminosavak peptidláncokká történő alakításával. A fehérjék azonban csupán kis részt alkotnak az élet bonyolult szövetében. Szükségesek még lipidek, nukleinsavak, riboszómák és így tovább. És ekkor újabb akadályba ütközünk. Elképzelhető, hogy a tudósok bonyolult és kifinomult laboratóriumi eszközök segítségével mesterségesen, lépésről lépésre elő tudják állítani az élet alapvető alkotóelemeit. Az viszont már sokkal valószínűtlenebb, hogy a kívánt folyamatok egyszerre eredményezik a megfelelő alkotóelemeket. A probléma tehát nem csupán az, hogy hogyan állnak össze spontán módon nagy, bonyolult és speciális szerkezetű molekulák az egymástól független elemek halmazából, hanem az is, hogy hogyan jöhet létre ez a sokféle molekula egyidejűleg.

Álljunk itt meg egy kicsit. Hangsúlyoztuk, hogy önmagukban az élő szervezeteket felépítő komplex molekulák nem tekinthetők élőnek. Egy molekula nem több és nem is kevesebb egy molekulánál: nem élő, nem is élettelen. Végtére is az élet jelensége speciális, meglepő és újfajta módokon együttműködő molekulák millióihoz kötődik. Egyetlen molekula sem hordozza magában az élet szikráját, egyetlen atomlánc sem építhet fel önmagában egy élő szervezetet. Még a DNS, a biológiai szupermolekula sem él. Hiszen vegyük csak ki a DNS-t az élő sejtéből, és működésképtelenné válik, nem tudja ellátni a feladatát. Bármely molekula csakis egy különleges molekuláris környezetben képes eljátszani a létfenntartásban reá rótt szerepet. Ahhoz, hogy a DNS megfelelően működjék, egy nagyobb csapat részének kell lennie, ahol minden egyes molekula a többiekkel együttműködve végzi a maga feladatát.

Nehezen megválaszolható filozófiai rejtélyhez vezet az élő szervezetet alkotó molekulák egymástól való függésének az elismerése. Hiszen ha mindegyiküknek szüksége van az összes többire, hogyan jöhetett létre első alkalommal ez a komplexum? És ha az élethez szükséges nagyméretű molekulák többsége csakis élő szervezetekben keletkezhet, és nem található meg sejten kívül, hogyan alakulhattak ki tudós beavatkozása nélkül? Feltételezhetjük-e teljes komolysággal, hogy egy Miller-Urey-féle elegy, a maga véletlenszerűségével, egyszerre képes valamennyit létrehozni?

Abból, amit ez idáig írtam, talán úgy tűnhet, hogy nem

csupán az élet kialakulásának lehetősége szinte teljesen valószínűtlen, hanem maga az élet is. Ha a törékeny biomolekulák állandó támadásoknak és bomlasztó erőknek vannak kitéve, nem tűnik-e valószínűnek, hogy az emberi test rövid idő leforgása alatt szerves vegyületek pusztá halmazává esik szét, vagyis egészen rövid életű lesz? Szerencsénkre azonban sejtjeinkben működnek olyan bonyolult kémiai jellegű javító és építő mechanizmusok, amelyek a kémiai energia kéznél lévő forrásaiként „felfelé” is működtetik a folyamatokat; valamint olyan enzimek, amelyek különleges tulajdonságaik révén képesek a darabokat molekulákká összerakni. A fehérjék ráadásul védőburkokat is építenek, amivel megakadályozzák, hogy a víz megtámadja törékeny kémiai kötéseiket. És a második főtétel bár gyorsan igyekszik „lefelé” vezetni ezt a folyamatot, ezen különleges molekulák együttműködő seregének tevékenysége ellenkező irányba fordítja a reakciót. Amíg az élő szervezet nyitott rendszer marad, a környezettel fennálló energia- és entropikus kapcsolatok révén el lehet kerülni a második főtétel degeneráló hatásait. Az ős-elegyből azonban hiányoztak az együttműködő anyagoknak ezek a seregei. Nem álltak készenlétben javító molekulacsoportok a második főtétel hatásának ellensúlyozására. Az elegynek egyedül kellett megvívnia ezt a csatát, a győzelemre viszont nem egyszerűen csekély, hanem egyenesen szédítően kevés volt az esélye.

Mi tehát a válasz? Csoda-e az élet? A 4. fejezetben sorra veszem majd a legújabb kísérleteket annak magyarázatára,

hogy hogyan csökkentheti egy kémiai elegy a komplex molekulák spontán összeállásának mérhetetlen valószínűtlenségét. Itt csak egy általános érvényű kijelentésre vállalkozom. Az első élőlények vitathatatlanul sokkal primitívebbek voltak a ma élő mikrobáknál. Ne is számítsunk rá, hogy egy kifinomult, speciális anyagcseréjű mai baktérium alkotórészei valamiféle őslévesben jöttek létre és álltak össze a ma ismert formájukban. Korunk mikrobái fokozatosan, hosszú evolúciós folyamat során alakultak ki elnagyolt, akadozva működő, mondhatni „hevenyészett” elődeikből. Az ősi életformák tehát biokémiai szempontból sokkal kezdetlegesebbek voltak napjaink élő szervezeteinél.

Ez pedig egy fontos és általános elvre utal: a durvább szerkezetű mechanizmusok sokkal tűrőképesebbek, mint a kifinomultak. Minél bonyolultabb egy gépezet, annál sérülékenyebbek lesznek az alkatrészei. Hiszen próbáljunk csak egyszerű dízelüzemanyagot tankolni egy finoman beállított versenyautóba – kopogni és zörögni fog a motorja, végül tönkremegy; míg egy traktor vígan elpöfög ezzel az üzemanyaggal. Ugyanígy, az őselegyebe helyezett DNS-molekula cselekvésképtelenné válik. Nem elképzelhetetlen viszont, hogy a DNS kevésbé kifinomult előfutára életképesebbnek bizonyul, és sikeresen másolja magát. Úgy tűnik, az élet keletkezése primitív folyamatként indult el, és idővel egyre kifinomultabbá, valamint célirányosabbá vált. Talán mégsem olyan elenyésző az esélye annak, hogy spontán kialakuljon egy traktor mikrobamegfelelője?

A véletlen és az élet keletkezése

Tegyük fel a következő egyszerű kérdést: a Föld négy milliárd évvel ezelőtti viszonyai között mennyire volt valószínű, hogy kialakul az élet?

A következő válasz semmiképp sem megfelelő: „Elkerülhetetlen volt az élet kialakulása, hiszen itt vagyunk mi, emberek.” Természetesen az élet kialakult – ennyit tényleg bizonyít a létünk. De *szükségszerűen* történt így? Azaz elkerülhetetlenül jött létre évmilliárdokkal ezelőtt az élet valamilyen ősi elegyből?

Kínzó kérdés, és nincs rá válasz. Lehetséges, hogy az élet létrejött egyszerűen a szerencsés véletlen műve, egy olyannyira kevéssé valószínű kémiai véletlené, melyről szinte elképzelhetetlen, hogy kétszer is megtörténjék a világegyetemben. Vagy inkább olyan szokványos, előre meghatározott folyamat játszódott le, mint mondjuk egy sókristály kialakulásakor? Honnan tudhatnánk, melyik a helyes válasz?

Vegyük közelebbről szemügyre a szerencsés véletlen elméletét! Mint azt már láttuk ebben a fejezetben, a földi élet bonyolult és mives szerkezetű molekulákra épül. Még az egyszerű szervezetek DNS-e is atomok millióiból áll. Továbbá roppant lényeges az atomok pontos sorrendje. Nem lehet véletlenszerű, hiszen a DNS gyakorlatilag az élő szervezet előállításának útmutatója. Néhány atom megváltoztatása veszélybe sodorja az organizmus felépítését. Ha pedig túl sok a változtatás, a szervezet létre

sem jön.

A helyzet hasonlít egy regény szavainak sorrendjéhez. Hiszen változtassunk meg csupán egy-két szót itt, néhány másikat amott, és tönkremegy az egész szöveg. Keverjük össze az összes szót, és valószínűleg nyomokban sem emlékeztet majd a regényre. Létezhetnek a hasonló szavakat más összeállításban használó regények is, de a regényeket felépítő szószorozatok még mindig csak töredékei maradnak az összes lehetséges kombinációnak. Az előző részben roppant kis esélyt adtam annak, hogy aminosavak véletlenszerű összerendeződése egy fehérjemolekulához szükséges sorrendet eredményezzen. És még csak egyetlen fehérjéről esett szó! Mai ismereteink szerint egy élőlénynek fehérjék százazreire van szüksége, hogy a nukleinsavakról ne is beszéljünk. Hogy teljesen véletlenszerűen éppen a megfelelő fehérjék alakuljanak ki, annak az esélye egy a $10^{40.000}$ -hez – vagyis egy egyes, és utána 40.000 nulla, ami, ha ki akarnám írni, egy egész fejezetet foglalna el ebből a könyvből. Valószínűségét hasonlíthatnánk akár ahhoz az esetéhez is, amikor egy kártyapakli összekeverése után egy színből teljes sorozat jön ki, ezerszer egymás után. Fred Hoyle brit csillagász egyik híres mondása szerint az élet spontán kialakulásának lehetősége akkora, mintha azt várnánk, hogy egy roncsstelepen végigsöprő forgószél egy működőképes Boeing 747-est hagyjon maga után.^[45]

Gyakran tartok nyilvános előadásokat a Földön kívüli élet valószínűségéről. Ilyenkor mindig megjegyzi valaki a közönség soraiból, hogy *kell* lennie életnek más bolygókon

is, hiszen olyan sok a potenciális lakóhelyként szolgáló bolygó. Általánosan elterjedt ez az érvelés. Nemrégiben Európában jártam, egy a Földön kívüli életről tartott kongresszuson. Ahogy a repülőn ülve végiglapoztam a gépen rendelkezésre álló szórakozási lehetőségek katalógusát, láttam, hogy a program egyik része éppen a Földön kívüli élettel foglalkozik. A brosúrában a következő szöveg állt^[46]: „Félbillió csillag kering Galaktikánk mérhetetlen spiráljában – nem ésszerűtlen-e feltételezni, hogy közülük csupán egyen található meg az intelligens élőlényeknek megfelelő körülmények?” Ebben az esetben nem túl szerencsés az „ésszerűtlen” szó használata, hiszen a dolog logikája kristálytisza. Valóban rengeteg a csillag a megfigyelhető univerzumban – legalább tízmilliárd-milliárd. De legyen bármilyen óriási ez a szám, mégis *elenyészően* kicsi, ha akár egyetlen fehérjemolekula spontán kialakulásának esélyéhez viszonyítjuk. Lehet, hogy óriási a világegyetem, de annak esélye, hogy egy molekuláris „roncstelepen” kétszer egymás után, véletlen folyamatban éppen a megfelelő módon rendeződjenek össze ugyanazok az alkotóelemek, roppant kicsi.

Sokan úgy érzik, hogy valami, ami annyira alapvető, mint maga a létezésünk, nem tulajdonítható pusztán hanyagul odavetett kémiai játéknak, és hogy a „véletlen” címkével ellátni és a szőnyeg alá söpörni a problémát annyi, mint egyszerűen hátat fordítani neki. Az átlagosság elvét is szokás idézni: helyünk a világegyetemben egyáltalán nem különleges vagy kivételes. A Föld egy átlagos galaxis átlagos csillaga körül keringő átlagos bolygó. Miért ne

lehetne hát a földi élet is átlagos?

Sajnos, ez az érv nem állja meg a helyét. Hiszen maga a létezésünk jelentheti a kivételt az alól, hogy amit látunk, az átlagos, nincs alóla kivétel. Ha a mindenségben csak egyetlen bolygón van élet, akkor annak értelemszerűen a Földön kell lennie! A dolog természetéből fakadóan nem találhatjuk élettelen bolygón magunkat. A Föld tehát nem egy véletlenszerűen kiválasztott bolygó a kozmikus kínálatból: mi választottuk ki azáltal, hogy itt élünk.

E tagadhatatlan tény ellenére a tudósoknak igenis meg kell próbálniuk természeti törvények és elvek igénybevételével magyarázatot lelteni a világ jelenségeire, amikor csak lehetőségük nyílik rá. Nem megoldás például kijelenteni, hogy a Szaturnusz gyűrűit önálló mozgást végző részecskék véletlenszerű együttállása hozta létre. Szerencsés véletlenekhez visszavonulni csak a végső menedék lehet. Ez azonban nem azt jelenti, hogy nem létezhetnek ilyenek, vagy azt, hogy esetleg nem lényegesek.^[47] Lehetséges, hogy a földi élet is a szerencsés véletlenek egyike. De legalább meg kell próbálnunk hétköznapi, fizikai jelenségként megmagyarázni a biogenezist. A következő fejezetekben néhány olyan gondolatmenetet fogok megvizsgálni, amelyek növelni próbálják az élet spontán kialakulásának csekély esélyét.

4. ÜZENET A GÉPBE

1997 júliusában a Cornell University tudósai egy emberi vérsejtnél nem nagyobb, százatomnyi vékonyságú húrokkal felszerelt gitárról készült fényképeket tettek közzé. A liliputi hangszer kristályos szilíciumból készült, elektronnyalábot alkalmazó maratási eljárással. A bravúron kívül a tárgy persze nem szolgál különösebb célt, ám lélegzetelállítónan megjelenít egy fontos műszaki fejleményt: manapság már szabad szemmel észrevehetetlenül apró gépezetek is készíthetők. A tudósok készítettek láthatatlan fogaskerekeket, tűfej nagyságú motorokat és molekula méretű elektromos kapcsolókat. Az IBM mérnökeinek sikerült a cég kezdőbetűit atomról atomra egy kristályfelületre vésnük. A nanotechnika – azaz a méter egymilliárdod részével összemérhető berendezések és eszközök építése – zsendülő területe azzal kecsegtet, hogy forradalmasítani fogja az életünket.

Felmérhetetlen jelentőségűek a mikrogépészetnek ezek a teljesítményei, de ne feledjük, hogy a természet előbb jutott el idáig. A világ réges-rég tele van nanogépekkel: ezeket élő sejteknek hívják. Minden egyes sejt apró szerkezetek sokaságát tartalmazza, melyek akár egy mérnöki tervezőasztalon is megszülethettek volna. Csak úgy nyüzsögnek a parányi csipeszek, ollók, pumpák, motorok, emeltyűk, szelepek, csővezetékek, láncok, mi több, még kerekek is. A sejt azonban természetesen jóval több egy rakás kis szerkentyűnél. A különböző alkotóelemek összességükben, mint valami rendkívül bonyolult gyári szerelőszalag, olajozottan működő egészet állítanak össze.

Az élet csodája nem az, hogy miniatűr eszközökből készült, hanem hogy ezek a különféle parányi részek magasrendűen szervezett módon alkotnak egységes egészet.

Mi a titka ennek az elképesztő szerveződésnek? Hogyan képesek ilyesmire ostoba atomok? Egy-egy atom semmi egyébire nem képes, mint a szomszédjait lökdösni, és ha megfelelőek a körülmények, hozzájuk kötődni. Együttesen azonban az építés és a vezérlés valóságos csodáját viszik végbe, olyan végtelenül finoman beállítva és olyan komplexitással, amihez mindeddig nem ért fel emberi mérnöki lelemény. A természet valamiképp felfedezte ezt a gyártási folyamatot. Rájött, hogyan kell megépíteni azt a bonyolult gépezetet, amelyet élő sejtnak hívunk, kizárólag a kéznél lévő nyersanyagok felhasználásával. És naponta megismétli ezt a bámulatos tettet a testünkben, valahányszor elkészül egy-egy új sejt. Egészen lenyűgöző teljesítmény. Az pedig még figyelemreméltóbb, hogy a természetnek gyakorlatilag a semmiből kellett megépítenie az első sejtet. Hogyan csinálta?

Amikor naiv fizikusként molekuláris szinten elmélkedem az életről, minduntalan a következő kérdést kell feltennem magamnak: honnan tudják mindezek az értelem nélküli atomok, mi a teendőjük? Mérhetetlenül bonyolult az élő sejt, egy örökös csúcsforgalomban élő városra emlékeztet. Minden egyes molekulának megvan a maga sajátos feladata és a kijelölt helye az egész rendszerben, hogy a megfelelő objektumokat készítsék el, és megint csak, mint egy városban, állandó a szervezett mozgás. A

molekuláknak át kell utazniuk a sejten, a megfelelő helyen és a megfelelő időben találkozniuk más molekulákkal, hogy rendben eleget tehessenek a feladatuknak. Mindez pedig olyan főnök nélkül történik, aki utasítaná és a megfelelő helyszínekre irányítaná a molekulákat. Semmiféle munkavezető nem felügyeli a tevékenységüket. A molekulák egyszerűen csak teszik, amit a molekuláknak tenniük kell: vakon lökdösődnek, egymásnak ütköznek, visszapattannak, összekapaszkodnak. Az egyedi atomok szintjén az élet maga az anarchia, hebehurgia, céltalan káosz. Együttesen azonban ezek a nem gondolkodó atomok valamiképp mégis összeállítják és tökéletes pontossággal végrehajtják az élet táncát.

Eljön-e az a pillanat, mikor a tudomány meg tudja magyarázni ezt a bámulatos, önmagát hangszerelő és koreografáló folyamatot? Egyesek a leghatározottabb nemmel válaszolnak.^[48] Úgy vélik, az élő sejt egyszerűen túlságosan bonyolult, túlságosan rafinált ahhoz, hogy kizárólag vak fizikai folyamatok terméke legyen. A tudomány alkalmas egyik vagy másik egyedi sajátosság elemzésére és leírására, de soha nem adhat magyarázatot az egész szerveződésre, vagy hogy hogyan állt össze a legeslegelső sejt.

Én másként látom. Meggyőződésem, hogy a tudomány végül meggyőző magyarázatot talál az élet keletkezésére, de csak akkor, ha két szinten ragadja meg a problémát. Az első a molekuláris szint, ez ennek a fejezetnek a tárgya. Itt lehetünk a leglenyűgözőbb előrelépés tanúi. Az elmúlt néhány évtizedben gigantikus lépéseket tett a molekuláris

biológia annak meghatározásában, melyik molekula melyikkel, mit csinál. Minden esetben úgy találták, hogy a természet nanogépei az általános és jól ismert fizikai erőkkel és törvényekkel összhangban működnek. Nem derült fény semmiféle természetfölötti hatóerőre vagy viselkedésre. Mindamellett tévedés lenne feltételezni, hogy a molekulák magát az életet jelentik. A molekuláris tevékenység elemzésével még nem magyarázzuk meg az életet, ahogy a neuronműködés legaprólékosabb leírása sem világít rá Mozart vagy Einstein zsenialitásának gyökerére. Az egész ezúttal is több, mint a részek együttese. Éppen az „organizmus” szó hordozza magában azt a globális szintű együttműködést, amelyet kizárólag az összetevők tanulmányozásával nem lehet megragadni. A kollektív tevékenység megértése nélkül csak részben végezzük el az élet megmagyarázásának feladatát.

Sokasodj, sokasodj!

Az 1. fejezetben az élet sajátosságait számba vevő listán a legfontosabbak közé soroltam a szaporodást. Szaporodás nélkül – és halhatatlanság hiányában – előbb-utóbb minden élet megszűnne. A tudósoknak hosszú időn át alig volt elképzelésük a replikáció mikéntjéről. Az egyik nemzedéktől a másiknak biológiai üzeneteket közvetítő láthatatlan gének homályos fogalma nem sokat mondott arról, ténylegesen hogyan oldja meg a sejt ezt a feladatot. Aztán a molekuláris biológia megjelenésével és a DNS felfedezésével végül megoldódott a rejtély. A reprodukció

títka lényegében a molekuláris replikációban rejlik. Csodálatosnak tűnhet elképzelni, ahogy egy molekula másolatot készít magáról, valójában azonban egészen kézenfekvő. A folyamat háttérében húzódó elv voltaképpen elemi geometriai feladat. A kiindulási tényező magától értetődő lehet, mindazonáltal döntő jelentőségű: a molekuláknak meghatározott alakjuk van. A szerves molekulák egyáltalán nem afféle labdaszerű hólyagok; hanem mindenféle toldalékokkal büszkélkedhetnek, például karokkal, csuklókkal, mélyedésekkel, kiszögellésekkel, üregekkel, gyűrűkkel. Bár az atomok között érvényesülő erők diktálják, mi mit köt meg (vagy éppen taszít el), nagyrészt a szerves molekulák teljes háromdimenziós szerkezete határozza meg, a LEGO játékhoz hasonlóan, a biológiai adottságaikat. Nagy gyönyörűségére szolgálna ez a püthagoreus filozófusoknak, akik abban hittek, hogy a geometria az univerzum kulcsa.

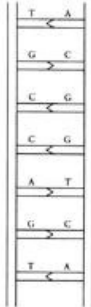
A DNS a genetikai adatbank, és ennek a makromolekulának a replikációja jelenti a biológiai reprodukció lényegét. Nézzük, hogyan fog a DNS önmaga másolásához az egyszerű geometria használatával! A DNS szerkezete az a híres kettős spirál, amit az 1950-es évek elején fedezett fel Crick és Watson. Ezt látjuk sematikus formában a [4.1 ábrán](#). Figyeljük meg, hogy a két spirális szálát keresztkötések kapcsolják össze. Maga a spirális alak nem játszik szerepet a magyarázatomban, úgyhogy az egyszerűség kedvéért képzeljük el, hogy kiegyenesítjük és kiterítjük az egymásra csavaródó szálakat, hogy végül egyszerű létrát alkossanak (lásd [4.2. ábra](#)). A létra két

függőleges ága a két kiegyenesített spirálszál, és a létrafokok felelnek meg a keresztkötéseknek. A függőleges ágak csupán a molekulákat összetartó támasztó szerepét játsszák. A DNS lényege a létrafokokban rejlik.



4.1. ábra.

A kettős spirál: a DNS-molekula sematikus szerkezete. Figyeljük meg, hogy a két spirális szálát keresztkötések kapcsolják össze, amelyek döntő szerepet játszanak a biológiai információ tárolásában.

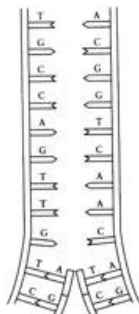


4.2. ábra.

A kiterített DNS leginkább létrára emlékeztet. A létrafokok az alakjuk révén pedánsan összeillő, egymást kiegészítő molekulapárok.

A fokok nem egyformák: nukleotidbázisoknak vagy egyszerűen bázisoknak nevezett molekulák négyféle típusából készülnek, kémiai nevükön ezek a következők: adenin, guanin, citozin és timin, vagy rövidítve A, G, C és T. Az egyes létrafokokat két összekapcsolódott bázis alkotja. Itt kerül előtérbe a geometria. Térbeli szerkezete folytán A összeillik T-vel, C pedig G-vel. Az ezeket a bázispárokat összekötő erők valójában meglehetősen gyengék. Képzeld el, hogy széthúzzuk a létra ágait, amivel eltörjük a bázispárokat, mintha középen kettéfűrészelték volna a létrát (lásd [4.3. ábra](#)). Mindkét ágon egy-egy sor kiálló pálcika sorakozna: a pár nélkül maradt bázisok. Tegyük fel, hogy az egyik ilyen ágon a TGCCAGTT... sorrendben következnek a bázisok, mely esetben az ellenkező ágon a

kiegészítő ACGGTCAA... szekvenciát találnánk. A megfelelő bázispárok egymás utáni összeillesztésével és a komplementer végek összekapcsolásával ismét összerakhatnánk a létrát. Ezen a módon kapcsolódnak össze a DNS-molekula mentén sorjázó bázisok, vagyis az egyes ágak egyúttal afféle sablonok is a másik ág számára. Akkor sincs ok az aggodalomra, ha csak egy ág áll a rendelkezésünkre, mivel a bázispárosítás szabályainak alkalmazásával ki tudjuk számolni a másik ág felépítését: A T-hez, C G-hez.



4.3. ábra.

Replikáció: az élet alapvető tulajdonsága. Ha szétválnak a DNS-molekula keresztkötései, a kiálló csonkok magukhoz vonzzák a környéken kószáló megfelelő bázisokat, amelyekből új kiegészítő ágot építenek. Amikor az eredeti DNS mindkét fele végez ezzel a művelettel, a molekula replikálta önmagát.

Ez az egymást kiegészítő jelleg vagy komplementaritás a replikációs folyamat alapja. Képzeljük csak el, hogy a fentebb leírtaknak megfelelően részben kinyílik a kettős spirál, aminek eredményeként mindkét szálból egy-egy sorozat szabad végű bázis áll ki. Amennyiben a környéken található szabad A, G, C és T bázismolekulák, akkor azok igyekeznek hozzákötődni a csonkokhoz, A T-hez, C G-hez, T A-hoz, G pedig C-hez, és ezáltal automatikusan létrejön egy-egy új kiegészítő ág. Amíg zavartalanul érvényesülnek a bázispárosítási szabályok, addig az új ág garantáltan azonos lesz az eredetivel. Ha tehát egy DNS-molekula szétválik, mindkét szabadon maradt ága új kiegészítő ágot épít magára, így egy helyébe két DNS-molekula készül. Figyeljük meg, hogy ez a fajta sablonreplikáció, ahol az ágak kiegészítik egymást, nem annyira a fénymásolásra emlékeztet, inkább a negatívot használó fényképezési sokszorosításra.

A DNS szerkezeti reprodukciója tehát világos. Még mindig nyitott azonban a gének és az átöröklés kérdése. Hogyan tárolja és továbbítja a DNS a genetikai információt? Gondoljunk a négy különböző bázisra, mint egy négy betűből, A-ból, G-ből, C-ből és T-ből álló négybetűs ábécére. A betűk pontos sorrendje használható ezután egy-egy üzenet „megfogalmazására”. A gének egyszerűen bázispárok, vagyis betűk hosszú sorozata, ami ennek az üzenetnek egy részét közvetíti. Amikor a DNS replikálódik, a másolatba is ugyanaz a sorozat épül be. A folyamat kettős szárú, komplementer természetűe folytán a DNS-

molekula az üzenet két másolatát tartalmazza, egy pozitívát és egy negatívát, vagyis egy teljes DNS-molekula létrehozásához szükséges valamennyi információ megtalálható mindkét száron.

A replikációs folyamat roppant hatékonyan működik bizonyos specializált enzimek segítségével, amelyek megkönnyítik a szétválási és a csatlakozási műveletet. Hogy mennyire hatékonyan, azt az a tény is szemléletesen bizonyítja, hogy alapstruktúráját tekintve a DNS túlélte több mint hárommilliárd évet! Ám nincs tökéletes másolási folyamat, és elkerülhetetlen, hogy időről időre hibák csúszzanak be. Ezek a hibák módosítják a bázissorrendet, azaz összekeverik az A, G, C és T betűket. Mivel a DNS valamely szervezet elkészítésére szolgáló recept, ha az üzenet kicsit eltorzul a replikáció során, megváltozik, mutálódik a folyamat eredményeként kapott szervezet. A másolási hibák az egyes nemzedékek között bekövetkező módosulások forrásai, ezt aknázza ki, illetve ebből fakad a természetes kiválasztódás. A genetikai üzenet lenyűgözően hosszú. Egyetlen baktérium, mint az *E. coli* több millió szimbólumot hordoz a genomjában (a teljes génkészletében); ennyivel 1000 könyvdalt lehetne megtölteni. Az emberi DNS egy egész könyvtárat igényelne. Mint azt az 1. fejezetben kifejtettem, a DNS tartalmazza a szervezet felépítéséhez és működéséhez szükséges valamennyi információt. A fenti hasonlattal élve, az élet négybetűs szavak sorozata.

Élőt alkotni

Mindeddig úgy tettem, mintha az élet teljes egészében a DNS-ről, génekről és replikációról szólna. Az igaz, hogy szűken vett biológiai értelemben az élet egyszerűen a replikálódó gének kérdése. Önmagára hagyva azonban a DNS tehetetlen. Ahhoz, hogy valóban lejátszódjék a replikációs folyamat, fel kell építenie egy sejtet, annak minden különleges anyagával és kellékével. Az úgynevezett magasabb rendű életformák esetében egy egész szervezetet kell felépítenie. A genom szempontjából a szervezet a DNS másolásának kerülőútja.

Miért van szükségük a géneknek a szervezetek közreműködésére? Miért nem tudnak önmagukban replikálódni? Nos, azért, mert a szervezetek *cselekvőképesek*, például elmenekülhetnek a veszélyhelyzetből és megkereshetik a nyersanyagokat, amivel hozzásegítik a DNS-t a hatékonyabb replikáláshoz. Csakhogy élőtömeg építése és a különféle cselekvések sokasága rengeteg mást is megkövetel; a DNS ugyanis teljességgel alkalmatlan ilyen célokra. Ez a „rengeteg más” főként fehérjék formájában jelentkezik, ami a specializált szerves molekulák másik legfontosabb osztálya. Mint azt már megemlítettem, a ma ismert élet a DNS és a fehérjék között kötött, kölcsönösen üdvös alku eredménye.

A fehérjék isteni áldást jelentenek a DNS számára, minthogy felhasználhatók építőanyagként, például olyan alkatrészekhez, mint a sejtmembránok, továbbá enzimeként, a kémiai reakciók vezérlésére és gyorsítására. Az enzimek kémiai katalizátorok, amelyek „megalajozzák” a biológiai

gépezet fogaskerekeit. Nélkülük döcögve leállna az anyagcsere, és megszűnne az élet működtetéséhez szükséges energia felszabadítása. Cseppet sem meglepő tehát, hogy a DNS-adatbank nagy részét a fehérjék készítésére vonatkozó utasítások foglalják el.

Nézzük, miként hajtódnak végre ezek az utasítások. Idézzük csak fel, hogy a fehérjék polipeptiddé összefűzött, rengeteg aminosavból készült hosszú láncmolekulák. A különböző aminosav-szekvenciák más és más fehérjét eredményeznek. A DNS-nek van egy kívánságlistája, ahol valamennyi, a szervezethez szükséges fehérje megtalálható. Ez az információ tárolódik el a megfelelő aminosav-szekvenciába rögzítve, a listán szereplő minden egyes fehérje esetében, a DNS négybetűs ábécéjének a felhasználásával; az A, G, C és T betűk pontos sorrendje fehérjéről fehérjére világosan leírja az aminosavreceptet, egyenként jellemzően néhány száz bázispárt.

Hogy az aminosavaknak ebből a száraz listájából kész, működő fehérjék legyenek, a DNS az RNS (ribonukleinsav) nevű, vele közeli rokonságban álló molekula segítségét veszi igénybe. Az RNS ugyancsak négy bázisból épül fel, ezek: A, G, C és U, ahol az U a T-hez hasonló, és betűrendileg ugyanazt a célt szolgáló uracilt jelenti. Az RNS számos változata közül minket itt a hírvívő vagy messenger RNS, rövidítve mRNS érdekel. Az mRNS feladata kiolvasni a DNS-ből a fehérjék receptjét és közvetíteni a fehérjéket gyártó parányi gyárakba a sejtben. Ezek a minigyárak, a riboszómák, RNS-ből és különféle fehérjékből épült bonyolult gépezetek. A riboszómákon található egyfajta rés,

amibe az mRNS, a régimódi számítógépeknél alkalmazott lyukszalag módjára betöltődik. Az mRNS „szalag” átdöcög a riboszómán, amely aztán az utasításokat követve egymás után meghatározott sorrendben összekapcsolja az aminosavakat, amíg össze nem áll az egész fehérje. A földi élet 20 különböző aminosavból készíti fehérjét,^[49] és az mRNS közli, hogy melyik után melyik következik, így a riboszóma mindig tudja, hogy mi a helyes sorrend.

Egészen lenyűgöző az a folyamat, ahogy a riboszómák összerakják az aminosavakat, különös tekintettel arra, hogy természetes körülmények között az aminosavak nem szívesen állnak össze – az adott szempont szerinti – helyes sorrendben. Hogyan biztosítja akkor a riboszóma, hogy az mRNS minden egyes lépésnél megkapja a meghatározott aminosavát? A választ az RNS molekulák egy másik csoportjában, a szállító vagy transzfer RNS-ekben, azaz röviden tRNS-ekben találjuk. Minden egyes adott tRNS molekula a végére kapcsolva magával visz egy és csakis egyfajta aminosavat a riboszómába, a „gyárba”, hogy átadja a szerelőszalagnak.

A fehérje összerakásának minden egyes lépésénél ügyelni kell arra, hogy a *megfelelő* tRNS jusson el a gyárba a hozzákapcsolt megfelelő aminosavval, hogy terhe a növekvő fehérjelánc végéhez csatolódjék, miközben ki kell zárni a fennmaradó 19 lehetőség mindegyikét. Ez pedig a következőképp történik. Az mRNS (emlékezzünk, ez viszi az utasításokat) felfed egy információt (azaz a „betűk” egy csoportját), ami azt mondja: „Adj most hozzá ilyen és ilyen aminosavat”. Az utasításokat korrektül végrehajtják, mert

csak a megcélzott tRNS molekula hordozza a kijelölt aminosavat, és csakis az fogja felismerni az mRNS feltárt darabját az alakjából és a kémiai tulajdonságaiból, és csakis az fog hozzákötődni. A többi tRNS molekula – amely „rossz” aminosavakat hordoz – nem illik a kötődési pontra. Miután így sikerült gondoskodni róla, hogy a megfelelő tRNS molekula kössön ki a szerelőszalagon, a következő lépésben a riboszómának rá kell vennie az újonnan érkezett aminosav-rakományt, hogy kötődjön a fehérjelánc végére. A lánc a riboszómában várakozik az előzőleg kiválasztott tRNS molekula végén. Ekkor ez utóbbi molekula távozik, elhagyja a riboszómát és az egész láncot átadja az újonnan érkezett tRNS-nek, ahol az a magával hozott aminosavval hozzákapcsolódik. Így növekszik a lánc aminosavak egymás utáni hozzáadásával, ebben az értelemben inkább a lánc fejéhez, mint a végéhez. Ne aggódjon az olvasó, ha első olvasásra nem tudta mindezt követni, nem is alapvető jelentőségű a továbbiak megértéséhez. Csupán úgy éreztem, annyira lenyűgöző a folyamat, hogy érdemes megemlékeznünk róla.

Amikor befejeződik a fehérjeszintézis, a riboszóma egy „állj” jelet kap egy mRNS „szalag”-tól és a lánc elszabadul. A fehérje immár összeállt, de nem marad elnyúlva, mint valami kígyó. Afféle dudoros gombóccá esik össze, mint amikor egy megfeszített gumiszalag a feszítőerő megszűnésekor hirtelen visszaugrik. Ez az összehajtogatódási folyamat igénybe vehet néhány másodpercet, és még mindig rejtély, hogyan ölti fel a fehérje az éppen kívánatos végső alakot. A megfelelő

működéshez a fehérje háromdimenziós alakjának kifogástalannak kell lennie, minden egyes dudornak és bemélyedésnek kivétel nélkül a maga helyén kell lennie, és a megfelelő atomoknak kell a felszínére kerülniük. Végző soron a lánc adott aminosavsorrendje határozza meg a fehérje végző háromdimenziós szerkezetét, ennélfogva a fizikai és kémiai tulajdonságait.

Az eseményeknek ez az egész figyelemre méltó sorrendje szerte a sejtben riboszómák ezreiben ismétlődik, miközben különféle fehérjék tízezrei jönnek létre. Nem lehet elég sokszor hangsúlyozni, hogy a látszólagos céltudatosság ellenére a molekulákat nem működteti semmiféle értelem. Együttesen módszeres együttműködést mutatnak, mintha valamilyen tervet követnének, egyedileg azonban csak összevissza sodródhatnak. A sejten belüli molekuláris forgalom alapján véve kaotikus, amit a kémiai vonzás és taszítás és a hőenergiával történő folyamatos gerjesztés tart fenn. Ám ebből a vak káoszról spontán módon rend kerekedik!

A fenti beszámoló, legyen bármilyen izgalmas is, azt a benyomást keltheti, hogy a replikáción kívül csak a fehérjék gyártásához van szükség az élethez. És a molekuláris biológia tankönyveiből csakugyan könnyen juthatunk erre a következtetésre. Csakhogy a „Csinálj fehérjét!” meglehetősen kevésbé fogja át a DNS feladatkörét. Bizonyos, hogy több kell ennél az élethez? Hol maradnak a párosodási rituálék, a fészeképítés, a társadalmi felépítés? A káprázatos magatartásformák, mint a madarak vándorlása vagy a pókok hálósövése?

Ahhoz, hogy a maga nagyszerű komplexitásában foghassuk fel az életet, túl kell lépnünk a pusztá molekulákon, és eltűnődnünk a szervezeten mint egészen, a szintek hierarchiájával és a magas fokú szervezethez. Különbséget kell tennünk továbbá a struktúra és a működés között. A molekuláris biológia nagyrészt bizonyos molekulák – például a bázisok és a fehérjék – alakjának és kémiai affinitásának értelmezésével vívott ki közmegebecsülést. Az élet azonban nem redukálható öletszerűen összehajgált statikus formák együttesére. Az élőlények koherenciája együttműködő *folyamatokat* igényel, amelyek sok molekulát ölelnek fel és egységes egészebe foglalják a viselkedésüket. Ez idáig tehát kimaradt a magyarázatból valami nagyon lényeges, valami döntő jelentőségű. Mi lehet az?

A válasz a fehérjetermelés vázolt leírásában rejlik. A molekulák geometrikus formájának, a DNS szerkezetének és a bázispárok sorrendjének ismertetésével kezdtem, aztán észrevétlenül az üzenetek, az információ és a specifikáció leírásával folytattam. Röviden, a hardver nyelvezetéről áttértem a szoftverére. A gén kétségkívül a háromdimenziós térbe rendezett anyag, ugyanakkor azonban utasítás is valaminek az elvégzésére. Az élet titka a biológiai alkotóelemeknek ebben a kettős funkciójában rejlik. És semmi nem jeleníti meg érzékletesebben ezt a kettősséget, mint a genetikai kód.

A genetikai kód

Az életet a nukleinsavak és a fehérjék közötti alku eredményeként írtam le. Csakhogy ezek a molekulák nagyon elütő kémiai tartományokat laknak: voltaképpen alig-alig állnak beszélő viszonyban egymással. Ez a legvilágosabban az információátvitel aritmetikájában tükröződik. A fehérjék összeállításához szükséges információ a DNS-ben tárolódik, a négybetűs – A, G, C, T – ábécé felhasználásával. Másfelől a fehérjék 20 különböző aminosavból készülnek. Nyilvánvaló, hogy húsz nem egyezik a négygel. Akkor viszont hogyan kommunikálnak a nukleinsavak és a fehérjék?

A földi élet elegáns megoldást talált erre a numerikus illesztési hibára azzal, hogy a bázisokat hármascsoportokba, ún. tripletokba csomagolja. Négy bázis elrendezhető a három 64 különböző permutációja szerint, és akkor a 20 igenis összeillik a 64-gyel, némi megmaradt hellyel a redundancia és az írásjelek számára. A DNS létrafokai tehát hármásával határozzák meg az aminosavak pontos sorrendjét a fehérjékben, melyek létrejöttét vezérlik. A 64 triplet lefordítása a 20 aminosavvá azt jelenti, hogy minden egyes hármashoz (szaknyelven: kodonhoz) ki kell jelölni egy megfelelő aminosavat. Ezt a hozzárendelést nevezzük genetikai kódnak. Azt az elképzelést, hogy az élet rejtjelzést használ, először George Gamow vetette fel az 1950-es évek elején, ugyanaz a fizikus, aki előállt az univerzum modern ősrobbanás-elméletével. Mint minden fordításban, kell lennie egy kétnyelvű valaminek vagy valakinek, hogy az ebben az esetben a nukleinsavak nyelvén írt kódolt utasításokat lefordítsa az aminosavak

nyelvére. Az eddig elmondottakból kiviláglik, hogy ez a döntő fordítási lépés minden élő szervezetben lejátszódik, amikor a fehérje-összeállítás folyamata előtt a megfelelő aminosavak csatlakoznak az tRNS megfelelő molekuláihoz. (Elnézést, de lehet, hogy érdemes visszalapozni a szóban forgó részhez.) Ezt a csatlakozást okos enzimek hajtják végre, amelyek felismerik az RNS-szekvenciát és a különböző aminosavakat, és a rendeltetésük szerint összepárosítják őket.

A genetikai kód néhány, a közelmúltban felfedezett kisebb variációval, valamennyi ismert életforma esetében közös. Rendkívüli jelentőségű a kód univerzális mivolta, mert arra utal, hogy ezt használta minden élet közös őse, és elég erőteljes ahhoz, hogy fennmaradjon az evolúció évmilliárdjai során. Nélküle reménytelenül vaktában folyhatna csak a fehérjetermelés.

Számtalan kérdés merül itt fel. Hogy jöhetett létre kezdetben egy ilyen bonyolult és specifikus rendszer, mint a genetikai kód? Miért választotta ki a természet a tripletéken alapuló 10^{70} lehetséges kódból az univerzálisan alkalmazott egyetlenegyét? Lehet, hogy egy másmilyen kód is ugyanígy beválna? Ha van élet a Marson, az is ugyanazzal a genetikai kóddal rendelkezik, mint a földi élet? El tudnánk képzelni kódolatlan életet, melyben a kölcsönösen egymástól függő molekulák közvetlenül jutnak megállapodásra, kizárólag a kémiai affinitásuk alapján? Vagy magának a genetikai kódnak (vagy legalábbis egy genetikai kódnak) az eredete jelenti a kulcsot az élet eredetéhez? John Maynard Smith brit biológus az

evolúciós biológia legmeghökkenőbb problémájaként jellemezte ennek a kódnak a kialakulását. Társ-szerzője, Szathmáry Eörs⁽¹⁾ közreműködésével így ír^[50]: „A létező fordítási mechanizmus egyidejűleg annyira komplex, annyira univerzális és annyira alapvető, hogy nehéz megérteni, miként jöhetett létre, vagy hogy miként létezhetne nélküle élet.”

Hogy legyen valami elképzelésünk, miért olyan talányos a kód, gondolkozzunk el, van-e valami különleges a benne foglaltatott számokban. Miért használ az élet 20 aminosavat és négy nukleotidbázist? Sokkal egyszerűbb volna mondjuk 16 aminosavat alkalmazni és nem hármásával, hanem kettesével becsomagolni a bázisokat. Még könnyebb volna mindössze két bázist kezelni és bináris kódot alkalmazni, mint a számítógép. Ha történetesen kifejlődött az egyszerűbb rendszer, nem könnyű megérteni, hogyan léphetett a helyébe a bonyolultabb tripletek kódja. A válasz az „akkoriban jó ötlet volt” tipikus esete lehetne. Ha a kód az élet nagyon korai szakaszában fejlődött ki, mondjuk még a prebiotikus szakaszban, akkor kémiai szempontból talán a 4-es és a 20-as számot lehetett a legjobban alkalmazni. Az élet egyszerűen összeforrott ezekkel a számokkal, később pedig elveszett az eredeti értelmük. Vagy adott körülmények között talán a 4 és a 20 bizonyult az eszményi választásnak. Az élet számára előnyös a sokféle aminosav alkalmazása, mert ezek többféle összefűződési lehetőséget kínálnak, amivel gyarapítják a fehérjék választékát. De ennek is ára van: az aminosavak növekvő

számával növekszik a fordítási hibák szaporodásának a veszélye. Túl sok aminosav esetén nagyobb lenne a valószínűsége, hogy nem a megfelelő kapcsolódik a fehérjelánchoz. Így talán a 20 vált be használható kompromisszumként.

Még súlyosabb a probléma a kódolási kijelölések tekintetében, hogy vajon mely tripletok mely aminosavak számára kódolnak. Hogyan jöttek létre ezek a kijelölések? Mivel a nukleinsavbázisok és az aminosavak nem ismerik fel egymást közvetlenül, és kénytelenek kémiai közvetítők útján tárgyalni, nincs semmiféle kézenfekvő indoka, hogy bizonyos tripletok miért éppen az adott aminosavaknak feleljenek meg. Elképzelhetőek más fordítások is. Az utasítások kódolása jó ötlet, de az igénybe vett kód meglehetősen önkényesnek látszik. Talán egyszerűen csak egy véglegessé vált véletlen, egy „ahogy esik úgy puffan” választás, ami aztán minden mélyebb jelentőség nélkül rögzült. Másfelől, lehetséges valamilyen kevéssé szembeötlő oka annak, miért éppen ez a bizonyos rejtjelzés vált be a legjobban. Ha az egyik kód előnyösebb volt a másiknál, akkor az evolúció előnyben részesítette, és az egymásra következő csiszolódás folyamatai révén elérte az optimális eljárást. Ez ésszerűen hangzik. Ám ennek az elméletnek is megvan a maga buktatója. A darwini evolúciót a változások működtetik, a sok nemzedéken át kiválasztott és összegyűjtött apró előnyök révén. A kód esetében azonban ez nem járható út. Akár egyetlen kijelölés megváltoztatása is halálosnak bizonyulhat, mert nem pusztán azt az egy módosítást

eredményezi, hanem fehérjék egész csoportját változtatja meg. Ide tartoznak azok a fehérjék is, amelyek aktiválják és elősegítik magának a fordításnak a folyamatát. Így a kód megváltoztatása azzal fenyeget, hogy visszatáplálódik a fordítási eljárásba, ami a végrehajtás során katasztrofális eredménnyel járó hiba-visszacsatoláshoz vezet, romba döntve a folyamat egészét. Hogy szabatos fordításhoz jusson, ahhoz először a sejtnek kell szabatosan fordítania. Ez a következtetés paradoxonnak tűnik. Áthidaló megoldást javasolt Carl Woese.^[51] Szerinte együtt fejlődött a kód kiosztási és fordítási mechanizmusa. Kezdetben csak egy hevenyészett kóddal folyt a nagyon felületes fordítás. Ebben a korai szakaszban, amikor a jelenlegi 20 aminosavnál nagy valószínűséggel kevesebb vett részt a folyamatban, a szervezeteknek kevésbé hatékony enzimekkel kellett beérniük: még nem fejlődtek ki azok a nagymértékben specifikált és kifinomult enzimek, amelyeket manapság használ az élet. A későbbiek során egyes kódkiosztások nyilván jobbnak bizonyultak másoknál, és azok az organizmusok lettek a győztesek, amelyek a hibára legkevésbé hajlamos kódkiosztást alkalmazták a legfontosabb enzimjeik számára; értelemszerűen pontosabban replikálódtak, miáltal a kódolási módszerük túlsúlyba került a leánysejtjeik körében. Ebben az összefüggésben a „jobb” kódkiosztás az erőteljesebbet jelenti, úgyhogy esetleges fordítási hiba esetén is elkészült ugyanaz az aminosav, tehát a hibának volt elegendő kétértelmősége, hogy ne okozzon különbséget. Vagy, amennyiben a hiba eltérő aminosav

létrejöttét eredményezte, az még mindig elég közeli rokona volt az elvárt aminosavnak, és a létrejövő fehérje majdnem ugyanolyan jól ellátta a feladatát. A folyamat sok-sok egymásra következő finomítása vezetett a ma ismert univerzális kódhoz – valahogy úgy, ahogy egy kép fokozatosan a szemünk fókuszába kerül.

Nem kizárt, hogy összességében mélyebb magyarázatot is találhatunk a kódra. Ha felrajzolunk egy kódkiosztási táblázatot, matematikailag elemezhetjük, van-e valamilyen rejtett mintázata. Peter Jarvis és munkatársai az University of Tasmanián azt állítják, hogy az univerzális kód absztrakt sorozatokat rejt, az atommagok energiaszintjeihez hasonlókat, s ebben a szubatomi részecskék szuperszimmetriának nevezett tulajdonsága is szerepet játszhat.^[52]

Ezek a matematikai egyezések lehetnek véletlenszerűek, de mutathatnak valamilyen mélyebben fekvő kapcsolatra is az érintett molekulák fizikája és a kód megszervezése között.

Nem kíméltem az olvasót a genetikai kód technikai részleteitől, csak hogy szert tehessünk egy általános fogalmi kiindulópontonra, ahonnan egyenesen az élet titkának kellős közepébe hatolhatunk. Minden kódolt bemeneti adat pusztán használhatatlan adatok kusza halmaza, hacsak nincs kéznél tolmács vagy jelkulcs. A kódolt üzenet csak annyira lehet jó, amennyire az adott kontextusban használható, azaz *jelentenie* kell valamit. A 2. fejezetben vázoltam a különbséget a szintaktikai és a szemantikai információ között. Önmagában a genetikai adat pusztá

szintaxis. A kódolt genetikai adat megdöbbentő hasznossága abból a tényből fakad, hogy az aminosavak „megértik”. A DNS-szál mentén eloszló információ *biológiailag lényeges*. Számítógépes nyelven szólva a genetikai adat: *szemantikai* adat.

Itt álljunk meg egy pillanatra, és idézzük fel, ahogy a négy bázis, az A, C, G és T elrendeződik a DNS-ben. Mint arról szó esett, ezek a sorozatok olyanok, mint egy ábécé betűi, és a betűk kódoltan meghatározhatják a fehérjék készítésére vonatkozó utasításokat. A betűk másféle sorozata biológiai értelemben szinte egészen bizonyosan haszontalan lenne. A lehetséges sorozatoknak csak egy nagyon csekély töredéke hordoz biológiailag értelmes üzenetet, ugyanúgy, ahogy csak bizonyos betű- és szószorozatok alkotnak értelmes könyvet.^[53] Úgy is kifejezhetjük, hogy a géneknek és a fehérjéknek rendkívül nagyfokú fajlagosságra, specifikációra van szükségük a struktúrájukban. Ahogy azt az 1. fejezetben a tulajdonságok listáját taglalva megállapítottam, az élő szervezetek nem önmagában a komplexitásuk miatt rejtélyesek, hanem a kiemelkedő mértékben specifikált komplexitásuk miatt. Hogy teljes egészében tisztában legyünk vele, hogyan fakad élet az élettelenből, nemcsak azt kell tudnunk, hogyan koncentrálódott a biológiai információ, hanem azt is, hogyan lett *specifikálva* a biológiailag hasznos információ, tekintettel arra, hogy a legelső szervezet környezete feltételezhetően csak molekuláris építőelemek véletlenszerű keveréke volt. Röviden, hogyan jelent meg spontán módon értelmes információ az inkoherens

limlomból?

Ezt a részt a biomolekulák kettős természetének hangoztatásával kezdtem, vagyis hogy egyaránt funkcionálnak hardverként – mint meghatározott háromdimenziós formák – és szoftverként. A genetikai kódból kiderül, milyen lényeges a biomolekulák információs oldala. Az élet keletkezésének magyarázata szükségképpen többet foglal magában, mint hogy valószínűleg látszó kémiai utat találjunk az őslevesből. Azt kell tudnunk, hogyan hozhat létre szoftvert a pusztá hardver.

Miből lesz az üzenet?

Egy kiérdemesült Macintosh Classic számítógépen írom a könyvemet. A gépnek kicsi a képernyője, ám túláradó a hajlama arra, hogy maga döntsön a tabulátorbeállításairól. A legtöbb számítógéphez hasonlóan az én Macem is főként műanyagból készült, de a döntő belső részek fémből és félvezetőkből állnak. A vezetékekkel, az áramköri kártyákkal és a képernyőkkel ezek alkotják a számítógép hardverét. A gép azonban hasznavehetetlen a szoftver nélkül, ami ellátja a teendőkre vonatkozó utasításokkal. A szoftver gyakran floppylemezekon töltődik be. A lemezek, mint tárgyak, természetesen szintén a hardverhez tartoznak, de a felszínükre kódolt információ számít, ezt olvassa le a gép. Ha a megfelelő szoftver találkozik a megfelelő hardverrel, akkor, hogy úgy mondjam, egymás tenyerébe csapnak, és futhat a program.

Hasonló a helyzet az élet esetében. Az élő sejt főként fehérjéből készül. Ez a hardver. A sejtet körülvevő membrán megfelel a számítógépem műanyag házának, vagy pontosabban szólva, a mikrochip alsó rétegének, amelyre az áramkört maratták. Sehová nem vezet azonban, ha csak úgy behajigálunk egy halom fehérjét egy tartályba, aztán várjuk, hogy majd csak létrejön az élet. Hiába állnak rendelkezésre a szükséges nyersanyagok, egy sejt szoftver nélkül semmi okosat nem tudna kezdeni. Ezt szokásos esetben a DNS szolgáltatja. Ahogy a floppylemez, maga a DNS is hardver, döntő jellemzője azonban nem az anyag, amiből a DNS felépül, hanem a bázispárjaiba írt *üzenet*. Helyezzük ezt az üzenetet a megfelelő molekuláris környezetbe – a megfelelő *szemantikai kontextusba* –, és lám, máris világra jön az élet!

Az élet így tehát a hardver és a szoftver szerencsés keveréke. Több pusztán komplexitásnál: informált vagy instruált komplexitás. Hadd illusztráljam ezt az aprónak látszó, ám abszolút döntő jelentőségű részletet néhány analógiával. A tizenkilencedik századot tekintjük a gépek nagy korszakának. Számos okos berendezést találtak fel akkoriban. Vegyük például a gőzgép nyomásszabályozóját, egy emeltyűhöz csatlakoztatott forgó golyópárt, melynek forgási sebességét a gőznyomás határozza meg. Ha túl magasra szökik a nyomás, a golyók olyan gyorsan pörögnek, hogy a centrifugális erő révén az emeltyűvel kinyitnak egy szelepet, csökkentve így a nyomást. Manapság a „visszacsatolás” elnevezéssel illetnék a

mechanizmust működtető elvet, de mi már nem bajlódnánk golyókkal; egy érzékelő elektromosan adatokat táplálna a nyomásról egy kis számítógépbe vagy mikroprocesszorba. Ez az elektronikus rendszer azután feldolgozná az információt és motor segítségével vezérelné a szelep nyitását vagy zárását. A feleségem Holden Berina gépkocsijának egyik ilyen mikroprocesszora maximalizálja az üzemanyag fűtőértékét. Eldönti, milyen gyorsan járjon a motor üresjáratban. A „tolom-húzom” típusú mechanikus nyomásszabályozó és az elektronikus mikroprocesszor között az a különbség, hogy az előbbi a probléma hardveres megoldása, míg az utóbbi információfeldolgozásra és szoftverre épül.

A szoftver erőssége, hogy érintkezési felületként szerepelhet különböző fajta hardverek között, melyek máskülönben nem tudnának hatékonyan kapcsolatba kerülni egymással. Vessük össze egy papírsárkány irányításának nehézségét egy távirányítású repülőgépmo­dell röptetésének kényelmével; a különbség a hardver-szoftver ellentétből fakad. A sárkány zsinogjeinek rángatása közvetlen, de roppant nehézkes módja a sárkány hardvere és az irányító hardver (a talajon álló ember) párosításának. A rádiós rendszer, ami először kódolja az utasításokat, majd továbbítja a túloldalon interpretálendő adatokat, sokkal hatékonyabban működik. Természetesen hardveres szóhasználattal is leírható az információáramlás a földről a repülőgéphez: rádióhullámok terjednek az adótól a vevőig, elektromos áramot keltenek, ami működteti a kapcsolókat, mozgatja a

szárnyszelvényeket stb. Csakhogy ez a hardveres leírás a rádió-távírányítású repülőgép működése szempontjából mellékes. A rádióhullámok ugyanis információs csatornaként szolgálnak, nem tolják és húzzák ide-oda a repülő. A kódolt információ fogja munkára a többi, fizikailag jelentősebb erőt, hogy elvégezzék ezt a feladatot. A nehézkes sárkány (szó szerint) huzalozott mechanizmus, míg a hatékonyabb rádiótávírányítású repülőgép információvezérlésű mechanizmus. Az élő szervezet a hihetetlenül hatékony szoftver vagy információfeldolgozás példája. A sejtek nem huzalozottak, mint a papírsárkány; az információáram párosítja össze a nukleinsavak „szezonját” a fehérjék „fazonjával” a genetikus kód alkalmazásával. Ekkor felszabadul az elraktározott energia és segítségével sor kerül a beprogramozott utasítások végrehajtására, mint az a távírányítású repülőgép esetében történik.

Így szemlélve, az élet keletkezésének problémája annak az egynek a megértésére redukálódik, hogy miként jelent meg spontán módon a hardverből a kódolt szoftver. Hogyan történt? Nem a kifinomulás és alkalmazkodás egyszerű eseteiről van itt szó, nem is csak a komplexitás növekedéséről, még csak nem is az információ felhasználásáról, hanem a *koncepció döntő és alapvető megváltozásáról*. Olyan ez, mintha megpróbálnánk megmagyarázni, hogy fejlődhetne a papírsárkány távvezérelt repülőgéppé. Indokolják-e az ilyen átalakulást a természet általunk ismert törvényei? Nem hiszem. Hogy megértsük, miért nem, valamelyest mélyebbre kell hatolnunk az élet információs oldalába.

Kód a kódban?

Kifejtettem, hogy az élet alapjában véve ugyanazt a logikai felépítést mutatja, mint a számítógép. Ez a tény lehetőséget nyújt arra, hogy a számítástechnika elméletének alkalmazásával némileg pontosítsuk a komplexitás és a biológiai információ meglehetősen ködös fogalmát. (Ne essen kétségbe a kedves olvasó; ígérem, nem fogok felsőbb matematikához folyamodni.) Az élet fogalmával kapcsolatos zavar nagyrészt az olyan kifejezésekhez fűződő tanácstalanságot tükrözi, mint a rend, szerveződés, entrópia, véletlen, véletlenszerűség, információ és komplexitás. Ezeket a szavakat gyakran alkalmazzák felületesen vagy homályosan, minden határozott tartalom nélkül. Főként a rendet és a szervezethez köthetőket szokták gyakran össze.

Mindenekelőtt nézzük a véletlenszerűséget. Vegyünk egy egyszerű példát, egy sorozat egyesét és nullát. Egy ilyen sorozat látható a [4.4. ábrán](#). Nyilvánvalóan nem véletlenszerű, hanem szakaszosan ismétlődő. Ezt a mintát kezelhetően lehet kifejezni informatikai alapon. (A 0 és az 1 bináris rendszere természetesen használható információ kódolására; a legáltalánosabban ezt a módszert alkalmazzák a számítógépek.) A [4.4. ábra](#) egész információtartalmát egy egyszerű kijelentésre rövidíthetjük: „Írj 10-et huszonötöszer.” Akkor sem lenne hosszabb a rövidített forma, ha úgy határoznék, hogy az egész oldalt megtöltöm ennek a bináris sorozatnak a folytatásával.

véletlenszerű sorozat legrövidebb leírása maga a sorozat.⁽²⁾

A véletlenszerűségnek ezt az „algoritmikus” vagy számítógépes definícióját alkalmazva nyilvánvaló, hogy a véletlenszerű sorozat egyúttal információban gazdag sorozat, mert az információtartalmat nem lehet egy egyszerű kifejezésbe tömöríteni. Ezzel szemben egy nem véletlenszerű minta, mint a [4.4. ábrán](#) látható szakaszosan ismétlődő sorozat, nagyon kevés információt tartalmaz, mivel egy egyszerű leírásba („Írj 10-et huszonötször”) tömöríthetjük. Ha az adott sorozat célja az információ kódolása, mint a genom esetében, akkor a minták megjelenése rossz hír. Tehát a véletlenszerűség felé kell továbblépni.

A [4.5. ábra](#) egyesek és nullák teljesen véletlenszerűnek *látszó* sorozatát mutatja. De biztosak lehetünk-e a véletlenszerűségében? Honnan tudhatjuk, hogy nem rejtőzik-e benne valamilyen kifinomult mintázat? Mint ahogy van is. A sorozat ugyanis a pi szám első 50 számjegye, binárisan kifejezve. Létrehozhatja egy egyszerű képleten alapuló pár soros számítógépprogram. Ám ha mit sem tudunk erről, akkor nem fedezzük fel a mintát: a sorozat kiállja a véletlenszerűség vizsgálatára alkalmazott valamennyi szokásos statisztikai próbát. Csakhogy, az algoritmikus definíció értelmében, a pi attól még nem véletlenszerű.

111100110110011010011001110111001100010110001000010...

4.5. ábra.

Véletlenszerűség? Ez a bináris sorozat véletlenszerűnek látszik, nincs felismerhető mintázata, mégis rendet rejt. Valójában az egyszerű algoritmussal létrehozható pi érték számjegyeit látjuk, következésképpen egyáltalán nem véletlenszerű, és ebben az értelemben kevés információt hordoz.

Ez idáig a matematikára korlátoztam a fejtegetést. És mi a helyzet a természettel? Az algoritmos véletlenszerűség fogalmát alkalmazhatjuk a törvény fogalmának egyértelmű kifejezésére. A természet valamely törvénye lényegében csak bonyolult viselkedések leírásának (vagy megjóslásának) egyszerű módja. Hogy egy közismert példát vegyünk, gondoljunk a napfogyatkozásokra. Ha leírnánk minden egyes egymást követő napfogyatkozás időpontját és kettes számrendszerben fejeznénk ki, akkor egyesek és nullák tökéletesen véletlenszerűnek látszó sorozatához jutnánk. Ez a látszat azonban csalóka volna, hiszen Newton törvényeihez folyamodva kiszámíthatjuk a napfogyatkozások és a bolygók mozgásából fakadó más jelenségek időpontját. Newton törvényei egyszerű matematikai képletek, amelyeket feljegyezhetünk akár egy kis levelezőlapra is, vagyis a fogyatkozásokkal és a Föld és a Hold napi helyzetével kapcsolatos minden információ benne foglaltatik egy meglehetősen rövid algoritmusban. A Föld-Nap-Hold-rendszer ilyenformán viszonylag információszegény, sok erőteljes mintával és szabályossággal.^[55]

Ez a mintaalkotás vagy rend, amit a bolygók mozgása mutat, és az egyszerű newtoni algoritmus jelenít meg, példa a fizika törvényeire. Nagy általánosságban, ha arról beszélünk, hogy egy törvény működik, akkor azt értjük alatta, hogy a rendszer viselkedését leíró adatok nem véletlenszerűek, és viszonylag egyszerű kifejezésekkel pontosan megjósolható a rendszer jövője.

...01000111011101001001110011010110101101011101110101000010...

4.6. ábra.

Véletlenszerű genom? Ez az MS2 vírus genomjának egy részlete. Véletlenszerűnek kell lennie (mondjuk, szinte véletlenszerűnek), hiszen rengeteg genetikai információt tartalmaz. A fehérjékben az aminosavak véletlenszerű sorrendben kapcsolódnak össze.

És most nézzük a biológiai rejtély valódi természetét. A [4.6. ábrán](#) ismét egy bináris sorozat látható. Ezúttal az MS2 vírus genomjának egy része, az A=00, U=11, G=01, C=10 kódkiosztással kifejezve.^[56] Tegyük fel a kérdést, hogy véletlenszerű-e a [4.6. ábrán](#) látható sorozat,^[57] vagy létezik olyan egyszerű képlet vagy algoritmus, ami egy számítási folyamat végeredményeként létrehozhatná? Vagyis, létezik-e kód az „élő szervezet” jelentésű genetikai kódban? Gondolom, a legtöbben nemmel válaszolnának. Ösztönösen úgy éreznék, hogy a sorozatnak véletlenszerűnek kell lennie. Miért? Nos, tegyük fel, hogy az MS2 helyett az ember genomját jelenítettem volna meg. Elrettentő arra gondolni, hogy a lényegi felépítésünk,

beleértve a személyiségünk legjavát, egyetlen sivár képletre redukálható. Egész biztosan valamilyen többletnek kell lennie az emberben (vagy akár egy vírusban), mint amit teljes egészében le lehet képezni holmi kalkulátornyomogató számolással. Képzeljük el, hogy testestüllelkeztül alig volnánk többek, mint valami jellegtelen szám négyzetgyöke, amit végül egy molekuláris masina eszközéből össze egy négybetűs ábécé használatával!

De akad ennél kevésbé emocionális oka is annak, hogy nagyrészt véletlenszerűnek feltételezzük a genomot. A genom feladata végtére is a genetikai információ tárolása. Tekintettel az élőlények komplexitására és már-már határtalan változatosságára, a genomnak szükségszerűen tömérdek specifikus információt kell tartalmaznia. De ha a genomok információgazdagok, ahogy azt a biológiai működésük megkívánja, akkor véletlenszerűeknek kell lenniük (vagy majdnem véletlenszerűeknek).^[58] Például egy szakaszosan ismétlődő genetikai üzenettel rendelkező genom olyan hasznavehetetlen lenne, mint egy elakadt lemez. Nincsen kód a kódban.

Most arra gondolhatna az olvasó, hogy ha a biológiai szervezet véletlenszerű, akkor könnyűnek kell lennie a genezisének. Elvégre nem nagy ügy véletlenszerű mintákat létrehozni, vegyünk például egy bögrére való babkávét és borítsuk ki a padlóra. Miért ne fordulnának elő a természetben esetleges és kaotikus folyamatok, amelyek létrehozhatnak a genomhoz hasonló véletlenszerű makromolekulát?

Találó a kérdés, és itt mutatkozik meg a

legszenbeszökőbben az élet igazán szövevényes és rejtélyes természete. Vegyük sorra a tényeket. Először: egy nukleinsav-molekulában a lehetséges szekvenciák elsőprő többsége véletlenszerű sorozat. Másodsor: nem minden véletlenszerű sorozat potenciális genom. Távolról sem. Minden lehetséges véletlenszerű szekvenciának valójában csak egy végtelenül apró töredéke lesz biológiailag valamennyire működőképes. A működő genom véletlenszerű szekvencia, de nem *bármely* véletlenszerű szekvencia. Csak a véletlenszerű szekvenciák egy nagyon speciális részalmazához tartozhat, nevezetesen azokhoz, amelyek biológiailag lényeges információt kódolnak. Minden azonos hosszúságú véletlenszerű sorozat nagyjából ugyanazt a *mennyiségű* információt kódolja, csak hogy döntő ennek az információnak a *minősége*: az esetek elsőprő többségében, biológiai értelemben, abszolút halandzsa.

Egyértelmű és mélyreható következtetésre jutottunk. A működő genom egyszerre véletlenszerű és nagymértékben specifikus – azaz már-már egymásnak ellentmondó tulajdonságokkal jellemezhető. Véletlenszerűnek kell lennie, hogy tekintélyes mennyiségű információt tartalmazzon, és specifikusnak, hogy biológiailag értelmezhető legyen ez az információ. Ekkor viszont azzal a talánnyal kerülünk szembe, hogy miként jöhet létre egy ilyen struktúra. Tudjuk, hogy a lehetőség létrehozhat véletlenszerűséget, és azt is tudjuk, hogy a törvényszerűség specifikus, megjósolható végeredményt hozhat. De hogyan egyesíthető mindkét tulajdonság egyazon folyamatba? Hogyan működhet együtt

a véletlenszerűség és a törvényszerűség keveréke, hogy *specifikus* véletlen struktúrát hozzon létre?

Hogy fogalmunk legyen a helyzet jellegéről, ez olyan, mintha egy *y bizonyos* mintát kellene létrehozni a bögréből a padlóra öntött kávészemekből. Nem csupán egy akármilyen véletlenszerű mintát, hanem egy konkrét, specifikus, előre meghatározott véletlenszerű mintát. Félelmetes feladat. Teljesítheti-e önmagában valamiféle törvény, hihetetlen szerencse (azaz véletlen) nélkül? Lehet-e *specifikus véletlenszerűség* egy determinisztikus, mechanikus, törvényszerű folyamat szavatolt eredménye – például a fizika és a kémia törvényszerűségeinek irgalmára hagyott őselevesben? Szó sincs róla. Nincs a természetnek olyan ismert törvénye, ami képes lenne végrehajtani ezt a mutatványt; és ez a legmélyrehatóbb jelentőségű tény, amint azt az utolsó fejezetben látni fogjuk.

Ha az olvasó meggyőzőnek találta az előző érvelést, meg fogja bocsátani azt a következtetést, hogy a genom igazán csodálatos objektum. Csakhogy a fentiekben vázolt problémák többsége a genom evolúciójára is ugyanúgy alkalmazható. Ebben az esetben viszont van egy kész megoldásunk a rejtvényre: a darwinizmus. A véletlenszerű mutációk a természetes kiválasztódással karöltve jelentik a biológiai információ létrehozásának holtbiztos módszerét, hogy egy rövid, véletlenszerű genom hosszú idő alatt hosszú, véletlenszerű genomná változzon. A mutációk áruhájában a véletlen, a kiválasztódás áruhájában pedig a törvény együttesen hozza létre „a képtelen objektumot”. A szükséges információ, mint láttuk, a környezetből

származik.

A darwini evolúció hosszú és vesződéses folyamat. Keményen meg kellett dolgoznia az életnek azért, hogy ezzel a módszerrel kialakítsa a génállományát. És mi a helyzet az első genommal? Az is ugyanilyen keserves evolúciós folyamat eredményeként született meg, vagy komplexitása teljes fegyverzetében szökkent elő? A számítógéptudósok tudják, hogy bizonyos számítási problémák *tovább nem egyszerűsíthetően* komplexek; azaz nem redukálhatóak egyszerű, szellemes eljárásokra. Híres példa rá az úgynevezett utazó ügynök problémája, melynek az a lényege, hogy dolgozzuk ki a legrövidebb útvonalat, melyet követve az ügynök bejárhat egy sor várost úgy, hogy minden városban csak egyetlenegyszer forduljon meg. Az ehhez hasonló problémák számításilag megoldhatatlanok, nem azért, mert nincs megoldásuk, hanem mert a szükséges számítások mennyisége a méretükkel együtt növekszik (az idézett példában a városok számával).

Úgy tűnik, a genom létrehozásához szükséges információfeldolgozás számítástechnikailag ugyancsak kezelhetetlen. Egy bizonyos véletlenszerű sorozat kiválasztása valamennyi lehetséges sorozatból hajszállra olyan elcsüggesztő feladatnak látszik, mint amilyenel az utazó ügynök szembesül, ha egymillió várost kell végiglátogatnia. Eszerint a biogenezis központi paradoxonja a következőképp fogalmazható meg. Tekintettel arra, milyen hosszú és vesződéses számítást igényel (vagyis az információfeldolgozó lépések sorozatát)

egy genom kifejlesztése a mikrobától az emberig, létrejöhett-e a mikroba (már figyelemre méltó) genomja egy hasonlóképp hosszú és veszélyes folyamat nélkül? Hogyan tudott a darwini evolúció elindulása előtti szakaszban kibontakozni az élettelen környezetből egy *nagyon speciális* információ és megnyilvánulni a genomban?

A számításelmélet fényében szemlélve a biogenezis problémája ugyanolyan zavarba ejtőnek látszik, mint amilyen zavarba ejtő fizikai vagy kémiai szempontból. És nem tisztán technikai jellegű nehézségekről van szó. Bonyolult filozófiai kérdések is felmerülnek. Az olyan fogalmak, mint az információ és a szoftver, nem a természettudományból származnak, hanem a kommunikációelméletből (lásd 2. fejezet), és olyan minősítőket tartalmaznak, mint kontextus és leírasmód, vagyis a világ fizikusi leírásától teljesen idegen fogalmakat. A legtöbb tudós azonban elfogadja, hogy okkal és joggal alkalmazhatóak az informatikai fogalmak a biológiai rendszerekre, és szívesen kezelik úgy a szemantikai információt, mintha az az energiához hasonló természetes jelenség lenne. Sajnos, a „jelentés” szó veszedelmesen közeli rokonságban áll a „cél”-l, a biológia tabu témájával. Így továbbra is ott maradtunk az ellentmondással, hogy célzatos emberi tevékenységekből eredő fogalmakat (kommunikáció, jelentés, kontextus, szemantika) vagyunk kénytelenek alkalmazni célzatosnak tűnő, valójában azonban egyáltalán nem célzatos (vagy legalábbis feltehetőleg nem célzatos) biológiai folyamatokra.

Nyilvánvalóan veszélyes a tudományban az emberi dolgok világából származó kategóriákat és fogalmakat kivetíteni a természetre, mintha ezek is a természethez tartoznának. Ám végtére az ember is a természet terméke, és ha az embereknek vannak céljaik, akkor a céltudatosságnak valamilyen szinten a természetből kell fakadnia, ilyenformán tehát eredendőnek kell lennie a természetben. Olyan tulajdonság-e a céltudatosság, ami csak a *Homo sapiens* viszonylag magas szintjén jelenik meg, vagy létezik más állatokban is? Amikor a kutya megkeres és előkapar egy elásott csontot, van-e olyan „célja”, hogy hozzájusson? Amikor egy amőba megközelít és elnyel valamilyen élelmet, érez-e valamiféle „szándékot” a bekebelezésére? Lehet-e a cél a természet valódi tulajdonsága egészen a sejtig, vagy akár a sejt alatti szintig? Ezekre a kérdésekre nincsenek általánosan elfogadott válaszok,^[59] de a megfogalmazásuk nélkül nem képzelhető el magyarázat az élet keletkezésére.

5. A TYÚK ÉS A TOJÁS PARADOXONJA

Néhány évvel ezelőtt a BBC televízió lebilincselő, bár némiképp lehangoló tudományos-fantasztikus sorozatot sugárzott *A túlélők* címmel, az emberiséget szinte teljesen kiirtó járványról. A maroknyi túlélő a civilizáció romjai között tallózva igyekszik biztosítani a létfenntartását. A zárt közösség hamarosan feléli az erőforrásait és felsejlik

előttük a végső pusztulás réme. Az elhatalmasodó kétségbeesés rohamában a két főszereplő veszekedni kezd. „Mi történik, amikor elfogynak a legalapvetőbb szükségleti cikkek is?” – kérdezi a nő. Társa elszántan közli, hogy majd megcsinálják maguknak, amire szükségük van. Csak kapjon egy fűrész, jelenti ki magabiztosan, és nem kétséges, hogy sikerül elkészítenie egy asztalt. „De mi történik, ha eltörik az utolsó fűrész is? – vágja rá a nő. – Nincsenek szerszámaid, hogy szerszámokat csinálj!”

A túlélők szorult helyzete pontosan érzékelteti, mennyire függünk egymástól modern technikai társadalmunkban. Mindenkinek szüksége van mindenki másra, hogy tovább guruljon az egész. Mint ilyen, találó hasonlat az életre is. A sejt a molekulák bonyolult, önfenntartó közössége, ahol mindegyikük a többitől függ. Vegyük a DNS-t. Tiszteletre méltóan magas kora ellenére nem sokra jutna a maga erejéből, mivel kémiaiag tehetetlen. Nagyralátók a tervei, a végrehajtásukhoz azonban nem nélkülözheti a fehérjék segítségét. Amint azt kifejtettem, a fehérjéket a riboszómáknak nevezett bonyolult gépek készítik a DNS-től az mRNS közvetítésével kapott utasítások alapján. A probléma az, hogyan készülhetnének fehérjék a kódolást végző DNS nélkül, az utasításokat lefordító mRNS nélkül, és a fehérjéket összerakó riboszómák nélkül? Csakhogy már meglévő fehérjék nélkül hogyan jöhetne létre a DNS, hogyan készülhetnének el a riboszómák és az összes többi kellék? Ez a 22-es csapdája.

A körülöttünk nyüzsgő valamennyi életforma a DNS és a fehérjék, a szoftver és a hardver közötti együttműködés

eredménye. Minden résztvevőnek szüksége van a másokra. Akkor hát melyik volt előbb? Ezzel a „tyúk és tojás” típusú paradoxonnal már szembekerültünk a 2. fejezetben leírt úgynevezett hibakatasztrófa kapcsán, amely korlátot szab a replikáció során bekövetkező másolási hibák számának, a probléma azonban jóval általánosabb. Mintha az életet egyfajta talányos körforgás jellemezné, olyan egyszerűsíthetetlen komplexitás, amit némelyek végképp rejtélyesnek tekintenek.^[60]

Ebben a fejezetben ismertetni fogok néhány kísérletet ennek az ördögi körnek az áttörésére, de előbb hadd vessek fel egy általános kérdést. A BBC-sorozat arra emlékeztet minket, hogy komplex rendszerek visszafordíthatatlanul eljuthatnak a kölcsönös és mindent átszövő függőség korszakába. Senki nem állítja, hogy a technikai társadalom nem alakulhatott ki fokozatos fejlődéssel, csak azért, mert manapság mindannyiunknak szükségünk van egymásra. Vegyünk egy egyszerű esetet. Egy kovács vasszerszámokkal formálja a vasat: vasszerszámokra van tehát szüksége a vasszerszámok készítéséhez. Akkor viszont honnan valók az első vasszerszámok? Készen kapott mennyei adomány? Hát persze hogy nem. Az első kovácsok használhattak például kőbunkókat vagy másfajta fémből készült eszközöket az első vaskalapács elkészítéséhez.

A nehézkes kezdetektől számos út vezet a bonyolult technológiai ciklusokig, de ha már kialakult a ciklus, akkor gyorsan tovább finomodik. Miután ez bekövetkezik, az alacsony műszaki szintű kezdeteknek nem sok nyoma

marad. A mai szervezetek tele vannak csúcstechnikai kémiai ciklusokkal, amelyeknek valahogy elő kellett bukkanniuk a rég sutba vágott molekuláris próbálkozások közül. Elénk tárul egy általános alapelv, amely segít megmagyarázni a történetek mikéntjét. Ha A -nak szüksége van B -re, és B -nek szüksége van A -ra, akkor oksági visszacsatolás jön létre. Egy kis változás A -ban hatással van B -re, amely viszont hatással van A -ra, és így tovább, körbe-körbe. A kauzális visszacsatolás egyre erősebb hatásokat eredményezhet. Ha mondjuk véletlen javulás következik be, azzal A fejleszti B -t, B viszont fejleszti A -t, a fejlődés gyorsan elmélyül.

Senki nem képzei, hogy a nukleinsavak és a fehérjék készen, kölcsönösen előnyös tulajdonságaikkal felvértezve jöttek volna létre. Először az anyagok kezdetlegesebb társulásának kellett kialakulnia és az egymásra következő visszacsatolási hurkok révén finomulnia a jelenlegi formájába, a darwini kiválasztódás útján. Valamikor menet közben megtörtént az elkülönülés hardverbe és szoftverbe, tyúkba és tojásba. E tekintetben nemigen mutatkozik nézeteltérés. Annál inkább az események alapvető sorrendjében. A vita arról folyik, mi indította el az egészet.

Először az RNS

Ha megnézzük a modern sejt utasítási láncát, akkor vitathatatlanul a DNS a főnök, hiszen ez a molekula vezényli kódolt utasításaival az egész parádét, beállítja az RNS-t a szállítási és futármunkákra és megmondja a

riboszómáknak, milyen fehérje készítése következik. A fehérjéknek teljes mértékben alárendelt szerep jut, ám ők az igazi munkások.

Mint már említettem, a DNS kémiaailag tehetetlen, annál tehetségesebb azonban közeli rokona, az RNS. Az RNS rendkívül sokoldalú, számos olyan fontos feladatot végez el a sejtben, amelyek valószínűleg a legkorábbi életformáig nyúlnak vissza. Sokféle teendője között az RNS fordítja le és közvetíti a DNS utasításait, ilyenformán genetikailag döntő, ám alárendelt szerepet játszik. Mindazonáltal az RNS (majdnem) ugyanabból a négybetűs ábécéből készül, mint a DNS, és genomként is tudna működni. Ami azt illeti, olykor valóban genomként működik: egyes vírusok RNS-t használnak DNS helyett. Az RNS tehát egészen bizonyosan el tudja látni a genetikai tárolás feladatát. Törékenyebb a DNS-nél, de semmi esetre sem alkalmatlan a feladatra.

Az 1960-as években a La Jolla-i (California) Salk Institute munkatársa, Leslie Orgel felvetette, hogy talán az RNS jelent meg először, nem csak a DNS, hanem még a fehérjék előtt is. Önként adódik a kérdés, hogy a fehérjék hiányában mi játszhatta az enzimek szerepét. A valószínűsíthető válasz 1983-ban hangzott el. Thomas Cech és munkatársai a University of Coloradón, valamint Sidney Altman és csapata a Yale-en felfedezte, hogy az RNS kémiaailag elég aktív ahhoz, hogy önmaga is gyenge katalizátorként működjék.^[61] Bár távolról sem ér fel a fehérjék katalitikus hatékonyságával, az RNS utánozhat bizonyos enzimeket, melyek elősegítik más RNS-szálak

hasadását és összekapcsolódását. A biokémikusok gyorsan felismerték, hogy ha az RNS-nek valahogy sikerült katalizálnia a saját replikációját, akkor az élet kezdődhetett a genetikai raktárként és – a megfelelő háromdimenziós formára hajtogatódás után – katalizátorként *egyaránt* működő RNS-molekulákból álló levestel. Így a hardver és a szoftver is jelen volna ugyanabban a molekulacsoportban.^[62] Ez az elmélet „RNS-világ” néven vált ismertté.

Az RNS-világ elméletének hívei feltételezik, hogy ez az RNS-molekulákat tartalmazó leves darwini típusú folyamat révén fejlődhet. A darwinizmust szokásosan olyasfajta szervezetekkel társítják, mint a sejtek, ám lényegében semmi másra nincs szükség hozzá, csak replikációra, variációra és szelekcióra: hogy a részt vevő entitások szaporodjanak, közben változzanak, és a változatok közül kiválasztódjanak az alkalmasabbak. Erre akár molekuláris szinten is sor kerülhet, és a biokémikusok a molekuláris evolúció vagy molekuláris darwinizmus kifejezést használják a leírására. Vitatható, hogy meghatározhatunk-e élőnek valamit pusztán a darwini úton történő fejlődése alapján; de ha igen, akkor az RNS-molekulák (megfelelő kémiai környezetben) talán már élőlényeknek tekinthetők.

Az 1960-as évek végén végrehajtottak egy híres kísérletet, melynek során megpróbálták bemutatni, hogyan működhet a darwinizmus molekuláris szinten^[63] A kísérlet egy Q_β-nak nevezett kis RNS-víruson alapult. A vírus egyszerűen egy fehérjeburokkal körülvett DNS- vagy RNS-lánc. Bár a vírusok tárolnak genetikai információt, önerőből nem

tudnak replikálódni. Ehhez befurakodnak sejtekbe és kisajátítják a reprodukív apparátusukat, hogy annak felhasználásával újabb vírusokat készítsenek. Az a tény, hogy egyes vírusok RNS-t használnak a genomjuk számára, arra utal, hogy talán egy RNS-világ túlélői.

A Q_{β} vírusnak nincs szüksége sejthez hasonló bonyolult létesítményre a szaporodásához: a megfelelő vegyi anyagokkal teli kémcső is megteszi. A Sol Spiegelman, a University of Illinois munkatársa által elvégzett kísérlet a vírus-RNS beviteléből állt az RNS saját replikációs enzimjét, valamint nyersanyagokat és némi só-t tartalmazó közegbe, majd a keverék érleléséből. Ezek után a rendszer előzékenyen replikálta a csupasz RNS-láncokat. Spiegelman ekkor kivont valamennyit a frissen szintetizált RNS-ből, külön tápoldatba helyezte, és hagyta sokasodni. Aztán átöntött valamennyit *abból* az RNS-ből egy további oldatba, és tovább ismételte ezeket a lépéseket.

A korlátlan szaporodási lehetőség körülményei között az az RNS győzött, amelyik a leggyorsabban sokszorozódott és sorozatosan átjutott a „következő nemzedék”-be. Ilyenformán az áttöltési művelet egy jelentős mértékben felgyorsított darwini evolúció versengési folyamatát helyettesítette, úgy, hogy ez a folyamat közvetlenül az RNS-en működött. Ebben a tekintetben kétségkívül az RNS-világot idézte.

Spiegelman látványos eredményeket ért el. Mint azt előre sejteni lehetett, a replikáció során másolási hibák következtek be. Megszabadulván a létért folytatott küzdelem felelősségétől, valamint attól a szükséglettől,

hogy fehérjeburkot gyártsanak, a „kanállal etetett” RNS-láncok zsugorodni kezdtek, sorra elhullatták a genom azon részeit, amelyekre már nem volt szükségük és csupán koloncnak bizonyultak. Hamarosan túlsúlyba kerültek a leggyorsabb replikálódásra képes RNS-molekulák, azon egyszerű okból, hogy sokaságukkal megnyerték a versenyt. Hetvennégy nemzedék után, a 4500 nukleinbázissal rendelkező RNS-láncból kiinduló folyamat egy törpe, mindössze 220 bázisos genommal végződött. Ez a pusztta, minden ráaggatott sallang nélküli replikátor nagyon gyorsan tudott replikálódni, és a „Spiegelman szörnye” elnevezést kapta.

Bármilyen hihetetlenek voltak is Spiegelman eredményei, még nem ért véget a meglepetések sora. 1974-ben Manfred Eigen és munkatársai fogtak kísérletbe^[64] egy, a Q_{β} replikációs enzimjét, sókat és az RNS építőelemeiként a négy bázis gerjesztett változatát tartalmazó kémiai tápoldattal, és változtatgatták a kezdetben a keverékhez adott vírus-RNS mennyiségét. Ahogy a bevitt RNS mennyisége fokozatosan csökkent, a kísérletezők azt tapasztalták, hogy exponenciálisan fokozódik a szaporodás. Már a tápoldathoz adott egyetlen RNS-molekula is elegendőnek bizonyult a népszerűgrobbanás kiváltásához. És aztán valami igazán elképesztőt fedeztek fel. Akkor is létrejöttek replikálódó RNS-láncok, ha *egyetlen molekula* vírus-RNS-t sem adtak hozzá! Hogy ismét az építészeti hasonlatomhoz folyamodjak, ez olyan volt, mintha egy halom téglát bedobálnánk egy óriási keverőbe, és ebből, ha nem is egy ház, de mondjuk egy

garázs jönne létre. Eigen eleinte kételkedett az eredményben, és ellenőrizte, nem történt-e véletlen szennyeződés. A kísérletezők hamarosan meggyőződtek róla, hogy kétséggkívül az RNS-láncok spontán, az alapvető építőköveiből történő szintézisének lehettek a tanúi. Az elemzés kiderítette, hogy bizonyos kísérleti körülmények között a létrejött RNS Spiegelman szörnyetegére hasonlított.

Egyes megfigyelők Eigen kísérleteit már az élet laboratóriumi megteremtésének tekintették. Idézzük fel, hogy Spiegelman RNS-t vont ki egy vírusból, ami egyes értelmezések szerint élőlénynek tekinthető. Lépések hosszú sorozatát követően azután létrehozott egy kémcsőmutánst, ami jóval kisebb, de még mindig replikációképes volt. Eigen, aki az ellenkező irányból kezdte, eljutott egy molekuláris önösszeállításig egyszerű építőelemekből, majd útközben találkozott Spiegelmannal akkor, amikor létrehozott egy replikálódó, Spiegelman jószágához hasonló RNS-molekulát. Ezen az úton sehol nem láthatunk olyan választóvonalat, ami elkülöníti az élő és az élettelen tartományt. Felfedeztek egy lépéssorozatot, ami megszakítás nélkül vezet egy egyszerű kémiai keveréktől egy életképes vírusig.

Azokat a lépéseket ismételték-e meg Eigen kísérletei, amelyeket a természet tett meg, amikor megalkotta az életet az élettelen anyagból? Nyilvánvaló, hogy erről szó sincs. Bármilyen izgalmasak legyenek is a kísérletek, mesterséges előkészületeiket egy világ választja el az ifjú Földön uralkodó természetes körülményektől.

Nevezetesen, az RNS-szintézis eléréséhez Eigennek nagyon gondosan előkészített kémiai oldatot kellett alkalmaznia, mely – egyik döntő fontosságú tényezőjeként – élő szervezetből kivont replikációs enzimet tartalmazott. Ez a nagymértékben specializálódott enzim nem az a fajta molekula, ami az élet megjelenése előtt létezhetett volna a Földön. Eigen távolról sem bizonyította, hogy a nukleinsavbázisok spontán módon állnának össze és replikálnának egy ösleveszerű inkoherens elegyben. Ezt a tényt sok biokémikus felismerte, és kérdezi, hogy tényleg az RNS volt-e az első replikáló molekula a sorban. Sablonreplikációra végtére is rengeteg másféle, köztük egyszerűbb és könnyebben szintetizálható szerkezetű molekula is alkalmas. Ha a sablonreplikáció már elindult a maga útján, akkor sikeresen finomodhatott a molekuláris evolúció révén. Ettől kezdve már a replikációs folyamat hatékonyságát növelő minden mutáció gyorsan elterjedhetett a kémiai levesben. Bizonyos szakaszban a folyamatos tökéletesedési folyamat létrehozhatott RNS-t, mint a legjobbnak bizonyult replikátort. Az első RNS-molekulák a ma használatos négy bázison kívül vélhetőleg további bázisokat is tartalmaztak. Ám a „kettő a kettőhöz” kényelmes komplementaritása a négy fennmaradt nukleotid kiválasztását biztosította, a többit pedig elvetették a replikációs játszmában. A tétova prebiotikus tapogatózásnak ebben az időszakában a mai mércével mérve rendkívül alacsony hatásfokú lehetett a replikáció, mert az oldatból hiányoztak a folyamat felpörgetéséhez szükséges döntő fontosságú enzimek.

Egyelőre fogadjuk el ezt a forgatókönyvet. Ebben az esetben fel kell tenni a következő kérdést: hogyan fejlődhetett a korlátozott RNS-világ a genetikai kóddal összekapcsolt nukleinsavak és fehérjék jelenlegi kettős rendszerévé? A kutatók feltételezése szerint a primitív gén a modern szállító (transfer) RNS-ek előfutára lehetett. Két ok indokolja, miért éppen erre a molekulára összpontosítanak. Először, a tRNS nagyon keveset változott az idők során; az ember és a béka egyes tRNS-molekulái teljesen azonosak. Ez arra utal, hogy hosszú múltra tekint vissza. Másodszor, pontosan a tRNS feladata az összekapcsolódás a megfelelő aminosavakkal, a fehérjék alapanyagával. Így felsejlik egy társulás képe. Aminosavakban kétségkívül bővelkedett az ősrés. Annak az RNS-molekulának, amelyik kölcsönhatásba tudott lépni az aminosavakkal, megvolt rá a lehetősége, hogy összefűzze őket fehérjékké. Így az RNS-világban a primitív RNS-láncok következő lépése lehetett, hogy elkezdtek véletlenszerűen fehérjéket készíteni. Nem tudni, hogyan következett be ez a sarkalatos esemény; elméletek bőségesen akadnak, tény azonban alig. Kezdődhetett akár olyan kiábrándítóan hétköznapien is, hogy két RNS-molekula összeütközött, és az egyik átadta a rakományát a másiknak, aminek eredményeként egy kétagú aminosavlánc lógott az egyik RNS végén. Aztán hozzáadódhatott egy harmadik aminosav és így tovább. Ezen kezdetleges polipeptidek némelyike nyilván előnyös hatást gyakorolt az RNS replikációjára, kialakult tehát egy önerősítő ciklus: az RNS fehérjéket készített, melyek viszont

elősegítették még több RNS és még több fehérje létrejöttét és így tovább. Azok a fehérjék, amelyek a leghatékonyabban segítettek az RNS-replikációt, értelemszerűen több másolatot készíthettek magukról. Ezen a módon, egy emelkedő spirál mentén, lépésről lépésre meghonosodhatott a nukleinsavak és a fehérjék meghitt társas viszonya. Legalábbis így szól az elmélet.

Az egyik ravasz probléma, amelyre megoldást kínálhatna ez az elmélet, hogy hogyan lehet elkerülni a hibakatasztrófa csapdáját. Idézzük fel, hogy a hosszú RNS-láncok érzékenyebbek a másolási hibákra, míg a rövidek nem tárolnak elegendő információt a jó másolási mechanizmus készítéséhez. Csakhogy számos rövid RNS-molekula gyülekezete együttműködhet és megoszthatja egymás közt a genetikai rakományt. Képzeljük el kémiai reakciók olyan zárt rendszerét, melyben számos RNS katalizálja egymás replikációját: *A* például *B*-t készít, *B* *C*-t, *C* *D*-t, *D* pedig *A*-t. A rendszer ilyenformán egy hiperciklusnak nevezett önmegerősítő reakcióhurkot képez. Ha egy ilyen kémiai ciklus bezáródik egy membránba – mint egy primitív sejt –, akkor az így keletkezett egység számára megnyílik a mutációk lehetősége a replikációs folyamatok hatékonyságának javítására. Ha aztán a sejtet egy egyszerű mechanikus hasadás kettéosztja, a vegyi anyagoknak ezt a sikeres keverékét megörökölhetik a leánysejtek. Ezen a módon lehetővé válik egy kezdetleges típusú evolúció, amelynek során a hatékonyabb hiperciklusokat tartalmazó sejtek túlszaporodják a többieket.^[65]

Bármilyen ígéretes is legyen azonban a RNS-világ itt felvázolt pályája, számos becsmérője akad, akik rámutatnak, hogy akármilyen jó is az elmélet, gyakran gyászos kudarcot vallanak a laboratóriumi kísérletek. Gondosan megtervezett eljárások és speciális katalizátorok nélkül konokul nem akarnak végbemenni a kulcsfolyamatok. A nukleinsavláncok hírhedetten sérülékenyek és hajlamosak összeroppanni jóval azelőtt, hogy összeállna az enzimekenti működéshez szükséges 50 körüli bázispár. A víz megtámadja és szétzúzza a nukleinsavpolimereket, akárcsak a peptideket, megkérdőjelezve az RNS-világ leveses változatát. Még az építőelemként szükséges négy bázis szintézise sem nélkülözi a súlyos problémákat. A biokémikusok úgy látják, majdnem a nulláról indulva hosszú és buktatókkal teli az út a hatékony RNS-replikátorok létrehozásáig. Nem kétséges, előbb-utóbb sikerül megtalálni a módját, hogyan lehet különösebb zökkenők nélkül kivitelezni laboratóriumban a kémiai folyamatsor egyes lépéseit, de csak végletesen mesterséges körülmények között, speciálisan előkészített, megtisztított és pontosan megfelelő arányú vegyületek és anyagok használatával. Az a baj, hogy nagyon sok ilyen lépésre van szükség, és ezen lépések mindegyikének sorra meg kellene történnie a „vadonban”, ahol a kémiai levesnek vagy iszapnak azzal kell beérnie, ami éppen a rendelkezésére áll.

A következtetés tehát az, hogy kéznél lévő, a folyamatot felügyelő és szabályozó, jól képzett szerves kémikus nélkül a természetnek igencsak kellene küszködnie, amíg RNS-t

állít elő egy hig levesből, valamilyen valószerűnek tűnő prebiotikus körülmények között. Vagyis, míg az RNS-világ meggyőzően működik és fejlődik az élet felé, amennyiben készen találják (ez esetben nyilván levesestálban), addig egészen más ügy egy kezdetleges kémiai keverékből eljutni az RNS-világhoz.

Ezekhez a különféle nehézségekhez adódik még a kiralitás problémája – a balos a jobbos ellenében –, amiről a 3. fejezetben ejtettem szót. Az a tény, hogy a Földön minden élet egyféle csavarodású molekulákra épül, nem pusztán érdekesség: az RNS-replikációt veszély fenyegetné olyan környezetben, ahol egyenlő mértékben vannak jelen az alapmolekulák balra illetve jobbra csavarodó változatai. Veszélybe sodródna az alapvető fontosságú sablonelrendezés, amelynek révén a bázisok összeállnak az alakjuk szerinti komplementer bázisukkal, ha „rossz” csavarodású molekulák rögzülnének az adott nyílásba. A bal kéz elrontaná, amit a jobb kéz megcsinált. Ha nem talált volna megoldást a természet arra, hogyan hozzon létre kizárólag egyazon irányba csavarodó molekulákból álló levest, reménytelen ügy lenne a spontán RNS-szintézis.

Az RNS-világ forgatókönyvének védelmezőit nemcsak vegyészek, hanem biológusok is pergőtűz alá vették. Ha az élet az RNS replikációjával kezdődött, akkor számítani lehet arra, hogy a szükséges replikációs mechanizmus nagyon ősi, következésképp minden létező életforma esetében közösnek kell lennie. Csakhogy a genetikai elemzés azt derítette ki, hogy az RNS-replikációt kódoló gének határozottan különböznek az élet három

tartományában, ami arra utal, hogy az RNS-replikáció valamivel a közös ős létezése *után* finomodott ki.

Elméleti alapon is van mivel kötözködni. Az RNS-világ elmélete kizárólag a replikációra összpontosít az anyagcsere rovására. Mint már hangsúlyoztam, az élet több a puszta replikációnál: az élőlények csinálnak bizonyos dolgokat, és nincs is más választásuk, ha azon vannak, hogy fennmaradjanak és sokasodjanak. Minden tevékenység energiába kerül. Kell lennie valamilyen kész energiaforrásnak, hogy a szervezetek anyagcserét folytathassanak. A kémcsökísérletekben az RNS-molekulákat gyengéd babusgatással ellátják specializált energiatartalmú vegyületekkel a tevékenységük táplálására, a természetben azonban az RNS-nek azzal kell beérnie, amit talál. Egyetlen Miller-Urey-típusú kísérlet sem képes a létező életet energiával ellátó anyagok gyártására: ezek kivétel nélkül a sejtben készülnek. A „kanállal etetett” RNS lehet ügyes replikátor, de működő energiafelszabadító anyagcsere nélkül hamar molekuláris hulladékká válnának ezek a termékeny genetikai láncok.

Kézenfekvő kiút lehetne, ha keresnénk az RNS-nél sokkal egyszerűbb önreplikáló molekulát, és onnan indítjuk az egész játszmat. Ebben az esetben csak sokkal később kerülne sor az RNS-világra. Elképzelhető, hogy találhatnánk viszonylag kicsi, elég hűségesen replikálódó molekulát. Az út ekkor megnyílik a molekuláris evolúció előtt, és apránként, az információ lépésről lépésre történő felhalmozódásával eljutnánk a komplexitás azon szintjéig, ami már a rövid RNS-láncokéhoz mérhető. A rendszert

akkor „átvenné” az RNS.^[66]

Valóban így történt volna a biogenezis? Talán. Csakhogy ennek az elméletnek is sok a buktatója, egyebek között az a jogos kétely, hogy elég megbízható replikátorok lehetnek-e a kis molekulák a hibakatasztrófa elkerüléséhez. A jelenlegi életformák alapján elmondható, hogy a nagy hűségű replikáció a nagy, komplex rendszerekhez járul. A szerkesztő és hibajavító eljárásokkal rendelkező nagyobb genomok a legjobb másolók. Ha tehát a nukleinsav-replikátorok körében végigkövetjük a fejlődési útvonalat az egyre kisebb és kisebb méretekig, akkor csak igen szegényes replikációs pontosságot várhatunk az egyszerű molekuláktól. Továbbá, minél kisebb a molekula, annál súlyosabb lesz minden mutációs változásnak a viszonylagos hatása, és annál nagyobb az esély, hogy a mutáció nem örökíti tovább replikátori mivoltát.

Az utóbbi években próbálkoztak kicsi és egyszerű replikátormolekulák laboratóriumi létrehozásával, és megvizsgálták, hogy jobb replikátorokká fejlődnek-e különféle környezeti erők hatására.^[67] Szerény sikerekről érkeztek ugyan jelentések, ám ezek a kísérletek nem jelentik meg a természetben lezajló molekuláris evolúciót. Még igazolni kellene, hogy az efféle gondosan megtervezett és laboratóriumban előállított kis replikátorok kialakulhatnak-e spontán módon, valószínűsíthető prebiotikus körülmények között, és ha igen, akkor elég jól fognak-e replikálódni ahhoz, hogy elkerüljék a hibakatasztrófát. Összességében, nem tudható, egyáltalán létrejöhetnek-e természetes úton mini-replikátorok, arról

nem is beszélve, hogy a rendelkezésünkre áll-e mindaz a kellék és feltétel, amit a sikeres fejlődés megkövetel.

Utóbb az RNS

Teljesen másféle közelítés a tyúk és a tojás paradoxonjának megoldására, ha megfordítjuk az események sorrendjét, és feltételezzük, hogy a fehérjék voltak először és a nukleinsavak jöttek létre utóbb. Ekkor arra a kérdésre kell feleletet találni, hogyan replikálódhattak a fehérjék a szükséges utasításokat közvetítő nukleinsav nélkül. Replikálódhatnak-e minden segítség nélkül a fehérjék? Nemrégiben a San Diegó-i Scripps Institute munkatársa, Reza Ghadiri felfedezte, hogy egyes kis peptidláncok valóban reprodukálhatják magukat, ráadásul minden jel szerint ki is tudják javítani a replikációs hibákat, mintha „önálló akaratuk lenne”.^[68] További kulcsot szolgáltat a brit szarvasmarha-állományt megtizedelő, hírhedt „kergemarha-kór” vagy BSE. A BSE-t, akárcsak a súrlókórt és a kurut, nem baktérium vagy vírus okozza, hanem egy replikálódásra és terjedésre képes fehérjetöredék. Lehetnek-e az ilyen töredékek egy kizárólag a fehérjéken alapuló primitív életforma fennmaradt maradványai?

Az „először a fehérjék” elmélet egyik legkiválóbb szószólója Freeman Dyson, a princetoni Institute for Advanced Study mostanában nyugalomba vonult fizikusa. Dyson szerint az életnek valójában két eredete van: az egyik a hardveré, a másik a szoftveré.^[69] Ennek megfelelően az őseredeti

élőlény két változatával számol: az egyik képes fehérjeanyagcserére, de képtelen pontosan replikálódni, a másik replikálódik, de nincs anyagcseréje. Ezek egyesüléséből vagy szimbiózisából keletkezett az általunk ismert élet. Dyson Oparintól és követőitől meríti az alapmotívumot, akik úgy tartják, hogy valamiféle sejtek vagy hólyagocskák kialakulása jelentette a legelső lépést az élet felé. Ezekről a protosejtekről elképzelhetjük, hogy természetes úton előfordulnak a koncentrált ösleves vegykonyhájában.

A darwini evolúció nem igazi lehetőség Dyson sejtjei számára, mivel nincs genomjuk, fejlődhetnek viszont kémiai úton. Hogy ez miként menne végbe, annak vizsgálatára Dyson létrehozott egy matematikai modellt. A modell egy kémiai keverék – mint az aminosavak leveise – viselkedését követi nyomon, amely idővel változik, ahogy a vegyületek bonyolult reakciókba lépnek egymással. Dyson modelljében különösen fontos az a feltételezés, hogy a molekulák katalizálhatják más molekulák termelését és mutációit. Ennek a matematikai eljárásnak a végeredménye a rendezetlenségből a rendbe történő spontán átmenet megjövendölése lett. Itt a rendezetlenség a molekulák kaotikus összeállását jelenti, a rend pedig bizonyos előnyben részesített kémiai, anyagcserére emlékeztető ciklusokat. Dyson kémiai hólyagocskái nem replikátorok; a rendjük nem genetikai specifikáció útján, hanem spontán keletkezik. Ilyenformán a sejteken belül nagyon pontatlan a molekulák termelése.

Bár a darwini evolúció valamilyen típusú öröklődő

replikációt, valamint természetes kiválasztódást igényel, elképzelhetőek a kiválasztódás más, kevésbé hatékony formái, melyek révén létrejöhetett bizonyos kezdetleges evolúcióféle, és akkor már folytatódhat is az előadás. Ha már létezik különféle sejtek növekvő populációja, még ha azok csak bizonyos vegyi anyagokat magukba foglaló cseppecskék is, melyek növekednek és osztódnak, akkor elkerülhetlenné válik egyfajta versengés. Egyes sejtek gyorsabban fognak növekedni és osztódni a többieknél a „jobb” belső kémiajuk következtében, és számbelileg felülmúlják a vetélytársaikat. Ha a sejtek át tudják adni kémiai tulajdonságaik legalább egy részét az utódaiknak és korlátozottak az erőforrások, akkor a (kémiai szempontból) „legsikeresebb” sejtek kerülnek túlsúlyba. Így viszont az vár magyarázatra, hogyan alakult át ez a leginkább vak kiválogatás a konvencionális darwinizmus precízebb, génapalú, természetes kiválasztódásává.

Az egyik lehetséges megoldás a parazitáság. Dyson szerint a gén nélküli sejtekbe primitív nukleinsav-replikátorok hatoltak be, és a két rendszer egybeolvadt. A nukleinsav-paraziták úgy találták, hogy a fehérjehólyagocskák elősegítik a replikációs folyamataikat. Nyilvánvalóan előnyösnek bizonyult a replikátorok számára, ha menet közben, a saját replikációjuk fokozására, replikálták a segítőképző fehérjéket is. Tekintettel a sejtstruktúrára, ennél a lépésnél kapcsolódhatott be a természetes kiválasztódás, és a sejt sejt elleni küzdelem növelte a fejlődés ütemét. A szelekció erősen kedvezhetett azoknak a replikátoroknak, amelyek részben vagy

egészen a fehérjesejtek szükséges alkotóelemeiből készültek, és gyorsan megjelent az a teljes szimbiózis, amely az élet ma ismert formájához vezetett.

Hol következhetett be mindez? Oparin tavacskákba vagy a tengerbe helyezte a koacervátumcseppjeit, de ha az élet a tengerfenéken vagy alatta kezdődött, mint arra az utóbbi években előkerült bizonyítékok utalnak, akkor nem jelentenek választ az olajos hólyagocskák. A tengerfenék porózus bazaltsziclája apró alagutak és üregek természetes hálózatát kínálja, amely befogadhatta a nagy szerves molekulákat. Az ásványi felszínek működhetnek katalizátorokként is, és alkalmasak lehetnek a szerves anyag koncentrálására. Sajnos, a kőzetüregek nem sokasodnak osztódással. Euan Nisbet, a University of London munkatársa szerint esetleg membránok alakulhattak ki az üregek belsejében, mint parányi, barlangba zárt élőlények, hogy aztán felszabadítsa őket valamilyen geológiai rengés.^[70]

Egy másik, a primitív sejtre vonatkozó fantáziadús elképzelést Mike Russell vetett fel (University of Glasgow).^[71] Elmélete a tengerfenéknek a vulkáni kürtöktől viszonylag távoli régióra vonatkozik, ahol a víz több kilométer mélységig fokozatosan beszivárog a kőzetbe, majd a hóáramlás révén, oldott ásványokkal dúsítva, visszakerül a felszínre. Az ismét felszínre bukkanó víz lúgos kémhatású és nagyon forró – a nagynyomású körülmények között talán a 200 °C-ot is eléri. Ezzel szemben a fölötte elterülő óceán savas lehetett a feloldott széndioxid miatt, és sokkal hidegebb. Russell úgy találta, hogy a kétféle

folyadék egyesülése a vas-szulfidból készült kolloid membrán kialakulását váltja ki. Mint látni fogjuk, a vas és a kén két olyan anyag, ami jelentős szerepet játszott az ősi életformák esetében. Továbbá, a membrán féligáteresztő: bizonyos vegyületeket átereszt, másokat viszont nem, éppúgy, ahogy az élő sejt. Russellnek sikerült laboratóriumában nagy, sejtyszerű hólyagokat létrehozni, és ír közetekben hasonló struktúrák lenyomataira bukkant. Úgy véli, az ozmotikus és hidraulikus nyomás megduzzasztotta és kettéosztotta a hólyagokat. Ennek az elméletnek az a többlete, hogy az egymás mellé rendelt sav, membrán és folyadék elektromos elemként működik, azaz kezdeti energiaforrással szolgálhatott a korai anyagcsere üzemeltetéséhez. A modern sejtekben ugyancsak észlelhető a membránon némi feszültség. Ennek értelmében végül is az elektromosság lehetett az eredeti életerő!

Egészen eltérő elmélettel állt elő az élet keletkezésére Graham Cairns-Smith brit biokémikus, ugyancsak a University of Glasgow munkatársa, aki abból a feltevésből indul ki, hogy a nukleinsavak csak később léptek színre.^[72] Ami a tyúk és a tojás (vagy nukleinsav és fehérje) vitát illeti, úgy vélekedik, hogy az élet nem ezekkel az anyagokkal kezdődött. Cairns-Smith emlékeztet minket arra, hogy a nukleinsavak elsődlegesen szoftverként működnek: a genetikai információ letéteményesei. Ebből a szempontból a kémiai megjelenésük lényegtelen. Ugyanúgy, ahogy mi is tárolhatjuk ugyanazokat a digitális adatokat mágnesszalagon vagy floppylemezen, a genetikai

információt is tartalmazhatja az RNS-től vagy a DNS-től eltérő fizikai szerkezet. Az élet talán másfajta módon kódolt információval vette a kezdetét, és csak egy viszonylag késői szakaszban bízták a nukleinsavakra a genetikai funkciót.

Miféle struktúrák szolgálhattak az eredeti genetikai adatbázis tárolására? Cairns-Smith szerint az agyagásvány kristályai vonzó lehetőséget kínálnak. Kevésbé sérülékenyek a nukleinsavaknál, és úgy ahogy a kristályok is, replikálhatók. Az egyetlen az agyagrészecskék közé szivárgó fémionok mintáiba elvben kódolható az információ, és reprodukálódhat is, ahogy a kristály rétegről rétegre növekszik. A szennyezett kristályokat talán nem tartja túl életszerűnek az olvasó, ám az evolúcióhoz szükséges alapvető tulajdonságok – replikáció, variáció és szelekció – kivétel nélkül megjelenhetnek az agyagkristályban.

Ha a kristály evolúciója már járni kezdte a maga útját, a szín készen fogadja a következő szereplőket: a szerves molekulákat. Ezeket kezdetben talán az agyagkristályok készítették a saját céljukra, például a replikáció gyorsítására, a kristályfelületek összeragasztására vagy tetszőleges másodlagos feladatokra. Bármire használták is, nyilván valamilyen szelektív előnnyel járt az alkalmazkodásuk az evolúció szempontjából. Végül azok a kristályok lettek a győztesek, amelyek felfedezték az önreplikáló nukleinsavak készítését, minthogy ez esetben mindenkor hozzáfértek ezekhez a feltehetően hasznos anyagokhoz. Ezt a vonalat átlépve azonban a kristályélet

elhintette önnön kimúlásának magvait. Miután a nukleinsavak elkezdtek túlreplikálni kristályteremtőiket, gyorsan átvették a hatalmat és uralkodó életformává váltak. A szegény, nehézkes kristályok pedig végképp kimentek a divatból.

Meg kell mondani, roppant kevés kísérleti bizonyíték támasztja alá Cairns-Smith agyagelméletét. Ám akármilyen kevés hitelt adunk is az agyagásványnak, mint legelső életformának, a genetikai hatalomátvétel elve helytálló. Nincs vita abban a tekintetben, hogy a nukleinsavak és fehérjék létező rendszere túlságosan komplex ahhoz, hogy egy csapásra, kész rendszerként bukkanjon elő a semmiből. Csak azért, mert minden létező életforma nukleinsavakon és fehérjéken alapul, nem szükségszerűen indult el rögtön ezen az úton az élet. Ha létezik egyszerűbb útvonal az élettelenről az élőig, akkor a jelenlegi biokémiai szervezetek a „kőbaltás” technikát alkalmazó előd csúcstechnikát képviselő leszármazottjai.

Cairns-Smith a boltív analógiájával illusztrálja az átmenetet a „kőbaltá”-tól a „csúcstechniká”-ig. A boltív zavarba ejtőnek tűnik az első pillantásra. A kész szerkezet öntartó, a boltív fele azonban nyilvánvalóan összeomlana. Akkor hogyan jött létre a boltív? A felelet az, hogy állványzatot használtak az építéséhez. Azt a molekuláris állványzatot kellene tehát megkeresnünk, amit a nukleinsav építéséhez használhattak. Lehet, hogy az agyagkristályok alkotják a válasz egy részét, de lehet, hogy egy egészen másféle rendszer, amire még nem gondoltunk. Bármilyen volt is, amint az RNS-élet „öntartóvá” lett, kihajították az állványzatot, és

réges-rég feledésbe merült.

Nos, mire következtethetünk ezekből az élet eredetére vonatkozó különféle spekulációkból? Valamennyiben felbukkan ugyanaz a feltételezés. Ha már valamiféle élet megvetette a lábát, a többi már megy magától, mivel a darwini evolúció átveszi az irányítást. Természetes tehát, hogy a tudósok igyekeznek az élet történetének legelső pillanatához is segítségül hívni a darwinizmust, amelynek a véletlennel és a kiválasztódással hajtott működése drámai fejlődéshez vezet. Ám ahhoz, hogy elindulhasson a darwini evolúció motorja, a komplexitás bizonyos alapvető szintje szükségeltetik. De hogyan jött létre ez a kezdeti komplexitás? Ha nagyon megszorogatják, a legtöbb tudós széttárja a karját, és az orra alatt motyogja a varázsszót: „Véletlen.” Nos, létrehozhatta-e kizárólag a véletlen az első önreplikáló molekulát? Vagy több is kellett hozzá?

Önszerveződés: valamit semmiért?

Az élet csupán az egyik példája a természetben található komplexitásnak. Sok más példát is felfedezhetünk rá a világban. Komplexitást látunk az ablakon csillogó jégvirág mintáiban, a bonyolult csipkészetű partvonalban, a Jupiter korongját díszítő örvényekben és a vágató folyó örvényei között. Az élet azonban nem véletlenszerű, hanem szervezett komplexitás. A szervezetlen komplexitás mindenfelé megtalálható, a földet érő esőcseppek szétfröccsenésétől a csésze alján leülepedő tealevelekig. De a szervezett komplexitás, bár ritkább, semmi esetre

sem korlátozódik a biológiára. Egy spirálgalaxis, a szivárvány és egy lézersugár fényelhajlási mintája egyaránt komplex és szervezett. Ezek azonban mindenféle gének nélkül jönnek létre, amelyek specifikálnák, illetve darwini evolúció nélkül, amely létrehozná őket. Ha élettelen rendszerek spontán módon, mindössze a fizika törvényeire hagyatkozva létrehozhatnak szervezett komplexitást, miért ne tehetné meg az élet is, legalábbis kezdetben?

Egyesek szerint pontosan ez történt. Ilya Prigogine belga kémikus kémiai keverékeket sorol, amelyek életszerű viselkedést mutatnak, bonyolult spirálokat alkotnak vagy ritmikusan pulzálnak.^[73] Ezeket a reakciókat az jellemzi, hogy a termodinamikai egyensúlytól távol játszódnak le, és – akárcsak az élet – folyamatos anyag- és energiacsereét követelnek meg. A spontán rendeződés nem ütközik a termodinamika második főtételébe, mivel ezek a rendszerek nyitottak; az entrópiát tehát a környezetbe exportálják, cserébe a rend növeléséért a rendszeren belül. Az ilyen önszerveződő rendszerek jellegzetessége, hogy hajlamosak elérni a kritikus „elágazási” vagy határozatlansági pontokat, ahonnan a viselkedésük kiszámíthatatlanná válik. Egyszerre a nagyobb komplexitás új szintjére ugorhatnak és stabilizálódhatnak, vagy éppen ellenkezőleg, káoszba merülhetnek. Prigogine és számos követője egy sor önszerveződő átmenettel számol, ahol az anyag, valamilyen energiaáramtól hajtva addig szökken a szervezett komplexitás egyre magasabb szintjére, igazán élővé válik.

Egyszerű és tanulságos példa az önszerveződésre a

konvekciós cellák kialakulása. Ha tűzhelyen melegítünk egy fazék vizet, az edény alja közelében melegebb lesz a folyadék, mint a tetejénél. Fokozatos melegítés esetén a víz jellegtelen marad: a hő egyenletesen áramlik felfelé a hővezetés révén. Most képzeljük el, mi történik, ha feljebb csavarjuk a gázt. A víz alsó, forró rétege fel akar emelkedni (lévén kevésbé sűrű), ebben azonban megakadályozza a felső, hidegebb réteg súlya. Végül a forró víz egyetlen felemelkedő gomolyban kitör, és konvektív mozgás kezdődik. Ha óvatosan végezzük a hevítést, a konvekciós minta hatszögletű méhsejt-formába rendeződik. Ebben a stabil konfigurációban számtalan vízmolekula vesz részt, együttműködésük egy nagyobb léptékű rendet hoz létre. A hirtelen átmenet a konvektív áramlásba akkor történik meg, amikor a rendszer messze kényszerül a termodinamikai egyensúly állapotától és a lábosból a környezetbe kiáramló entrópiával fizet a létrejövő rendért. A szabad energia forrását nyújtó gáz nélkül (hogyan fennmaradjon a termodinamikai egyensúly hiánya a folyadék alja és teteje között) a konvekciós cellák elenyésznének, a víz állapota pedig hamar visszasüllyedne a jellegtelen egyensúlyba.

Stuart Kauffman, a Santa Fe Institute for Study of Complexity biofizikusa az autokatalízis néven ismert kémiai jelenség köré rendezve igyekezett kiegészíteni az életig vezető önszerveződési útvonal részleteit.^[74] Idézzük fel, hogy a katalizátor olyan molekulatípus, amelyik valamilyen reakció bekövetkezését segíti elő más molekulák között anélkül, hogy maga módosulna. Képzeljünk el egy őslévest, amelyben egyidejűleg sok különböző reakció megy végbe.

Komplex szerves molekulák keletkeznek és semmisülnek meg, egyesülnek más molekulákkal és hasadnak darabokra. A reakciók mérhetetlen és bonyodalmas hálózata ez, ha úgy tetszik, egyfajta kémiai ökoszisztéma. Most képzeljük el, hogy ebben a fortyogó zűrzavarban egyes molekulák abban a helyzetben találják magukat, hogy kettős szerepet játszanak: egyfelől belépnek bizonyos kémiai reakciókba mint résztvevők, vagy a reakció eredményeként létrejött vegyület, másfelől katalizátorként is működnek más reakciók számára. Ekkor megtörténhet, hogy egy bizonyos M molekula jelenléte éppen arra a reakciósorozatra gyakorol katalizáló hatást, ami magának az M molekulának a létrejöttéhez vezet. Így az M jelenléte több M létrejöttét gyorsítja; innen az *auto*-, vagy önkatalízis megjelölés. Ha egy ilyen folyamat következik be, visszacsatolási ciklus jön létre, és végső soron a reakciók önmegerősítő hálózatát teremti meg.

Mi történik ezután? Ha elég nagy a molekulák változatossága a hálózatban, akkor a rendszer átlép egy bizonyos kritikus küszöböt. Kauffman hirtelen ugrást jósol egy gigantikus autokatalitikus ciklusba, az önszerveződés olyan folyamatába, amely hasonló a jellegtelen folyadéktól a konvekciós celláig vezető hirtelen átmenethez. Ez a magasabb szintű és sokkal komplexebb ciklus lesz az anyagcsere kezdetleges formája, olyan típusú szervezett kémiai folyamatok összessége, amelyeneket Oparin és Dyson képzelt vegyi hólyagocskáik tartalmaznának. Semmiféle RNS-hez hasonlóan speciális molekula nem vesz részt benne, és nincs szükség semmiféle genetikai

apparátusra. Minderre csak később kerül sor.

Noha az autokatalitikus ciklusok komplikáltnak és mesterkéltnek tűnhetnek, valójában széles körben elterjedt jelenséget képviselnek. A számítógépes modellek azt mutatják, hogy bármely, elegendő alkotóelemmel és kölcsönhatással rendelkező hálózat hajlamos spontán módon a szervezett komplexitás állapotába lendülni. A fizikusok ezt a jelenséget tapasztalják a mágneses anyagok, a közgazdászok a tőkepiacok világában. Ha Kauffman jó irányban tapogatózik, meglehet, hogy az élet nem valamilyen különleges szerveskémiai folyamatoknak a fejleménye, hanem azon egyetemes matematikai szabályoké, amelyek a komplex rendszerek viselkedését vezérik, tekintet nélkül arra, hogy miből vannak.

Bármilyen vonzónak tűnik is azonban az önszerveződés, az élet eredetével kapcsolatban két áthághatatlan akadállyal kell szembenéznie. Mindeddig a „kísérletek” döntő többségének csekély közük volt a valósághoz, elsősorban számítógépes szimulációkra szorítkoztak, és ennek köszönhetően a komplexitás-elmélet meglehetősen rossz hírnévre tett szert a biológiában. Kauffman mostanában oly felkapott elképzeléseinek szellemében jellemezte egyszer John Maynard-Smith némiképp végletesen^[75] „ténymentes tudomány”-ként.

Felmerül azonban egy elvi természetű mélyebb probléma, nevezetesen a következő. Az élet voltaképpen *nem* az önszerveződés példája. Az élet valójában *meghatározott*, azaz genetikailag irányított szerveződés. Az élőlényeket a DNS-ükbe (vagy RNS-ükbe) kódolt genetikai szoftver

vezérli. A konvekciós cellák spontán módon alakulnak ki az önszerveződés révén, nincs olyan gén, amely megszabná a létrejöttüket. Ennek a rendnek nincs szoftverbe kódolt forrása, hanem a folyadékban érvényesülő határfeltételekre vezethető vissza. A hőáramlás és az entrópia a határfelületen elindítja az önszerveződést, és a határfelületek alakja, mérete és természete szabja meg a konvekciós cellák mintaalkotási részleteit. Másként fogalmazva, a konvekciós cellák rendje *kívülről*, a rendszer környezetéből ered. Ezzel szemben az élő sejt rendje *belső* vezérlésből fakad, a génjeiből, melyek a rendszer mélyén meghúzódó mikroszkopikus molekulán helyezkednek el, és amely kémiai sugározza kifelé az utasításait. Meg kell hagyni, az élő sejt membránját burkoló környezet bizonyos mértékig befolyásolja, mi zajlik odabent, ám a szervezet alapvető sajátosságait a génjei határozzák meg.

Az önszerveződés elmélete mindmáig nem adja meg a kulcsát annak, hogy, hogyan megy végbe az átmenet a spontán avagy önindukált szerveződés – amely még a legművesebb nem biológiai példák esetében is viszonylag egyszerű struktúrákat eredményez – és az élőlények rendkívül komplex, információalapú, genetikai szerveződése között. Az erre a genetikai hatalomátvételre adandó magyarázatnak nem elég kitérnie csak a nukleinsavak – illetve a későbbi szakaszban a fehérjékkel való hatékony együttműködésük – eredetére. Nem elég azt tudni, hogyan keletkeztek vagy kezdtek kölcsönhatásba lépni ezek az óriásmolekulák. Azt is tudnunk kell, hogyan jött létre a rendszer szoftvere. Voltaképpen azt kellene

megfejtünk, hogyan fedezte fel a természet a szoftvervezérlés fogalmát. Hogy a 4. fejezetben alkalmazott hasonlatokkal éljek: hogyan változhat a sárkány távirányítású repülőgéppé, illetve hogyan fejlődhet a gőzgép mechanikus nyomásszabályozója adatfeldolgozó elektronikus szabályozóvá. Fontos hangsúlyozni, hogy ez esetben nem csupán újabb réteggel fokozzuk a komplexitást; a rendszer természetében következik be alapvető átalakulás.

Az utóbbi megjegyzés kapcsán szükséges különbséget tenni a rend és a szervezettség között. A korábbiakban felcserélhetően használtam ezeket a fogalmakat, gyakran azonban éppen ellentétes az értelmük. A rend voltaképpen egyszerű mintázatokra vonatkozik. Rendezett például az egyesek és nullák szakaszosan ismétlődő sorozata, amilyen a [4.4. ábrán](#) látható. Egy kristály is hasonlóképpen rendezett. Mindkettőről elmondható, hogy a legkevésbé sem véletlenszerű, és így, mint azt az előző fejezetben kifejtettem, nem birtokolhatják a genom komplex szervezettségét és információkészletét. Azok a próbálkozások, melyek az önszerveződésen át próbálnak az élethez vezető útvonalat találni, gyakran abba a csapdába esnek, hogy összetévesztik a szervezettséget a renddel. Az önszerveződésre idézett példák sokszor egyáltalán nem effélék, hanem csak spontán rendeződések. A ritmikus ciklusokat mutató kémiai reakciókat gyakran önszerveződéssel magyarázzák, [\[76\]](#) a periodikus viselkedés azonban nyilvánvalóan a *nem* véletlen rend esete. Hasonlóképp az említett hexagonális

konvekciós cellák jobban idézik a kristályok rendezettségét, mint a biológiai szervezetek szervezett komplexitását. Az önszerveződés valamilyen újfajta elvének hiányában, amely lehetővé tenné az algoritmos komplexitás kialakulását, a biogenezis történetében jókora úr tátong.⁽³⁾

Ennyit a feje tetejére állított megközelítésről az élet eredetéhez. Kétségkívül hozott néhány hasznos ötletet, de még több kérdést megválaszolatlanul hagyott. Csakhogy nem ez az egyetlen alkalmazható megközelítés. Talpára állíthatjuk a logikai sort. Ebben az esetben a jelenleg létező életből indulunk ki, és visszafelé követjük az időben, abban a reményben, hogy megsejthetjük, hol és hogyan éltek a legkorábbi szervezetek, majd az így nyert ismeretekkel felvértezve többet lehet mondani ezeknek az organizmusoknak a létrejöttéről is. Mint kiderül, ha rá akarunk bukanni az első földi élőlények nyomára, előbb a világúrt kell szemügyre vennünk.

6. A KOZMIKUS KAPCSOLAT

Úgy 200 kilométerre nyugatra a dél-ausztráliai Port Augusta városától, a kietlen pusztaságban, nagy kiszáradt tó található a Nullarbor-síkság szélén. A hozzávetőleg kör alakú Acraman-tó 30 kilométer átmérőjű. Bár hasonló Ausztrália ezen részének sok más sós medencéjéhez, az Acraman nem közönséges tómeder. Úgy hatszázmillió

évelel ezelőtt óriási meteor zuhan le az égből és hatalmas lyukat ütött a manapság Eyre-félszigetnek nevezett területbe; az eredeti legalább 90 kilométer átmérőjű volt és több kilométer mély. Mára csak az Acraman-tó maradt meg a Föld félelmetes sebhelyéből – egy lenyűgöző arányú ősi kataklizma néma tanúja.

Minden képzeletet felülmúló fizikai pusztítást okozott a kozmikus becsapódás. A több kilométer átmérőjű test százmilliárd tonna tömegű lehetett, másodpercenkénti 20-30 kilométeres sebességgel bekövetkezett becsapódásának energiája legalább 100 millió megatonna TNT robbanóerejének felel meg, ami jóval meghaladja a világ teljes nukleáris fegyverkészletének a robbanóerejét. Amikor egy ekkora test belép a légkörbe, roppant levegőoszlopot szorít ki; az ennek nyomán keletkező lökeshullám körbeszáguld a földgolyón. A földbe csapódáskor a meteor és a helyszín anyagának nagy része azonnal elgőzölög. Mérhetetlen mennyiségű kő fröccsen ki a talajból az ég felé, esetleg még az űrbe is, a nyomában pedig gigantikus kráter marad. A kivetett kő jókora felizzott darabjai a helyszíntől száz vagy akár ezer kilométerrel arrébb záporoznak vissza, ahol lángba borítják a növényzetet. Az elsődleges becsapódás kiváltotta rázkódás a legvadabb földrengések hevességét is meghaladja, további károkat okozva. Ha a meteor a tengerbe zuhan, több kilométer magas tsunamik (szökőárak) zúdulnak az óceán partjaira, és beláthatatlan földterületeket árasztanak el. A becsapódás által felvert por elborítja a bolygót, hónapokra eltakarja a Napot és savas

esővel mérgezi a szárazföldet és a tengereket. Mindez sok élőlény számára végzetesnek bizonyul, egész fajok hálnak ki.

Az Acraman-tavat létrehozó becsapódás semmi esetre sem számít egyedülálló eseménynek. Néhány millió évente egy-egy üstökös vagy kisbolygó ütközik a Földnek akkora erővel, hogy globális pusztítást okoz. A múltban gyakoribbak lehettek az ilyen ütközések. Egyre nyilvánvalóbb, hogy a kozmikus becsapódások, a nyomukban járó tömeges kihalásokkal, jelentősen befolyásolták az élet evolúciójának alakulását. De nem csak az evolúció útját módosították; az élet keletkezésében ugyancsak döntő szerepet játszottak. A tudósok a legutóbbi időkig főként a kémiához és a geológiához folyamodtak, amikor kísérletileg kívántak magyarázatot találni a biogenezisre. Elszigetelt rendszerként kezelték a Földet. Ám az utóbbi évtized során felmerült az élet csillagászati dimenziójának döntő jelentősége. Úgy tűnik, hogy az élet keletkezését firtató kérdésekre a csillagokban kell keresnünk a választ.

Csillagpor a szemedben

Nos, ha valóban olyan nagyszámú atom van, amelynek számbavevéséhez minden lény léte kevés lesz, és ha a természet törvénye örök, mely a dolgok magvait összetereelni akárhova képes, ahogy már így ide összeterelte, be kell ismerni megint csak: vannak más Földek még, más részében az űrnek, hol más emberi faj,

más nembeli állatok élnek.

Ezekkel a felkavaró szavakkal Lucretius^[77] római költő-filozófus igyekezett meggyőzni minket, hogy nem vagyunk egyedül a világmindenségben. Lucretius azzal érvelt, hogy ha a mindenség azonos atomokból áll, melyeket a természet egyetemes törvényei kormányoznak, akkor ugyanazoknak a folyamatoknak, amelyek a Földön az élethez vezettek, más világokban is életet kell eredményezniük. Lenyűgöző ez az Epikurosig, a görög atomistáig visszanyúló érvelés. De vajon helyálló is egyben?

A csillagászok szinképi megfigyelései megerősítették, hogy az atomok valóban az egész kozmoszban egyformák. Egy szénatom, mondjuk az Androméda-galaxisban, hajszálra ugyanolyan, mint földi testvére. A földi biológiában öt kémiai elem játszik főszerepet: a szén, az oxigén, a hidrogén, a nitrogén és a foszfor. Ezekben az elemekben bővelkedik a leginkább az univerzum.

A szén vitathatatlanul létfontosságú elem. Páratlan kémiai tulajdonsággal dicsekedhet: a szénatomok ugyanis végtelen változatosságban és komplexitásban képesek összekapcsolódni hosszan elnyúló molekulákká, polimerekké. A fehérje és a DNS is ezen hosszú láncmolekulák közé tartozik. Ha nem lenne szén, soha nem jött volna létre az élet általunk ismert formája. Valószínűleg semmiféle élet nem lenne lehetséges.

Amikor az ősrobbanással megszületett az univerzum, még teljes mértékben hiányzott belőle a szén. A kozmikus

születés heves hője eleve kizárt minden összetett atommagot: a kozmikus anyag elemi részecskék, protonok és neutronok leveséből állt. A protonok nagy többsége független maradt és a hidrogénatomok magját alkotta. Ám az első néhány perc során az univerzum tágulásával és ezzel párhuzamos hűlésével a nukleáris reakciók a hidrogén egy részét átalakították héliummá, egy csipetnyit pedig széné.

A világmindenségben található szén többsége azonban nem az ősrobbanásból származik, hanem a csillagokból. A csillagok fúziós atomreaktorok, amelyek szokásosan hidrogént égetnek héliummá. A nagy csillagokban a következő lépcső a hélium átalakítása széné. Ezután készül el a többi ismerős elem, az oxigén, a nitrogén és így tovább. Ezeknek a nehezebb anyagoknak a nagy része megmarad a csillagok belsejében, de alkalmanként, amikor felrobban egy csillag, mindezek elszabadulnak. A Napból is folyamatosan áramlanak anyagok a napszélben, és más csillagrendszerekben is hasonló folyamat játszódik le. Az így szétszórt anyagok összekeverednek a csillagközi térben bolyongó, főként hidrogéngázból álló felhőkkel. Amikor eljön az ideje, hogy ezek a gázfelhők összehúzódva új csillagokat és bolygórendszereket alkossanak, a szén és a halott csillagokból származó többi elem is részt vesz a folyamatban.

Képzeld el a mi Naprendszerünk négy és fél milliárd évvel ezelőtti hasonló kialakulását! Fokozatosan összehúzódik egy nehéz elemekkel vegyített, nagy tömegű hidrogéngáz felhő. Itt-ott a gravitáció sűrű, forgó csomókká húzza össze

a gázt. Ezek az anyagalmazok az új csillagok csírái. Az egyik ilyen csomó a mi Napunk. Körülötte bonyolult mintákba rendeződő gáz és por örvénylik korong alakú ködöt képezve. A könnyű anyag a köd szélére sodródik, ahol végül óriás gázbolygókká sűrűsödik, mint amilyen például a Szaturnusz. A nehezebb elemek a korong belső övezetében gyűlnek össze, és a Földdé és szomszédaivá tömörödnek. Ilyenformán tehát bolygónkat nem az őseredeti anyag alkotja, hanem a Naprendszer létezése előtt tündöklő és elpusztuló csillagok nukleáris hamuja.

Kialakult a Föld, de az anyaga azután sem maradt nyugalomban. Geológiai és biológiai folyamatok révén folyamatosan kering a légkörön és a bolygókérgen át a szén, a hidrogén, a nitrogén és az oxigén. Amikor egy organizmus elpusztul és elbomlik, atomjai visszajutnak a környezetbe. Ezek némelyike végül más élő szervezetek részévé válik. Egyszerű statisztikából kiderül, hogy testünk tartalmaz egy-egy szénatomot minden, több mint ezer éve halott szerves anyag mindegyik milligrammjából. Ez az egyszerű tény meghökkentő következményekkel jár. Ön például, kedves olvasóm, úgy egymilliárd olyan atomnak nyújt szállást a testében, melyek egykor Jézus Krisztus, Julius Caesar vagy Buddha atomjai voltak, vagy éppen azé a fáé, melynek tövében egykor Buddha üldögélt.^[78]

Pillantson a saját testére, tűnődjön el atomjai hosszú és eseménydús történetén, és emlékezzen arra, hogy a hús, amit látunk, és a szem, amivel nézzük, szó szerint a csillagok porából készült.

Kozmikus vegykönyha

Abban a hitben nőttem fel, hogy a kémia olyasmi, ami a kémcsövekben történik. Ezek után igazi meglepetésként ért, amikor 1969-ben értesültem róla, hogy ammónia- és vízmolekulákat fedeztek fel a világűrben. Hogy kerülhettek oda? – tűnődtem. A csillagászok persze régóta tudják, hogy a világűr nem teljesen üres. A csillagok közötti terek ritka gáz- és porfelhőket tartalmaznak. De még egy sűrű csillagközi felhő sem dicsekedhet többel, mint köbcentiméterenként egymillió atom, amit laboratóriumban már teljesen légüres térnek tekintenek. Ennyire diffúz közegben és az ott uralkodó félelmetesen alacsony hőmérséklet mellett csekély esélye mutatkozik a kémiai reakciók végbemenetelésének. Csakhogy nem egészen így áll a helyzet.

Az 1920-as évek első feléből ered az első sejtés, hogy az űrben is lehetnek molekulák, amikor egy H. L. Heger nevű csillagász különös jellemzőket észlelt a csillagok színeképeiben, amit „diffúz csillagközi sávoknak” nevezett. Ezeket végső soron az űrben a fény útjába eső ismeretlen molekulák abszorpciójának a számlájára írták, de ez az elképzelés nem aratott nagy sikert. Évtizedekkel később, a csillagközi ammónia és víz váratlan felfedezését követően sebesen gyarapodni kezdett az űrben talált ismert molekulák listája. Manapság, főként rádió- és infravörös távcső használatával több mint száz kémiai anyagot azonosítottak.

A csillagközi térben kószáló molekulák között sok a

szerves anyag. A legelterjedtebb a szén-monoxid, de acetilén, formaldehid és alkohol is bőségesen előfordul. Komplexebb szerves vegyületeket, például aminosavakat és PAH-okat (*polycyclic aromatic hydrocarbons*: policiklusos aromás szénhidrogének – ezekről később) is észleltek. Most már világos, hogy nemcsak az élet számára kedvező elemek fordulnak elő jelentős mennyiségben a világmindenségben, hanem olyan szerves molekulák is, amelyek közül sokat ténylegesen is felhasznál az élet. Minthogy a kozmikus kémiának évmilliárdok álltak a rendelkezésére létrehozni ezeket az anyagokat, rengeteg időt szánhattak felépülésükre az óriási molekuláris felhőkben, amelyekből a csillagok és a bolygórendszerek kialakulnak.

A csillagközi gázfelhők kémiáját tanulmányozó csillagászok meggyőződése szerint fontos szerepet játszanak a porszemcsék. Vegyületek tapadhatnak meg szilárd felszínükön, ahol aztán bonyolult reakciókba lépnek. A világűrben nem nehéz porra bukkanni. Vessünk egy pillantást az égre a Dél Keresztje mellett, és nagy fekete foltokat fogunk felfedezni a Tejútban. Ezeket a sötét övezeteket a csillagfényt eltakaró nagy porfelhők okozzák. A tettesek nagyon apró szemcsék – általában ezredmilliméternyi az átmérőjük, de akár molekuláris méretűek is lehetnek. Összetételük sok fizikai és kémiai hatás – ibolyántúli-sugárzás, csillagszél, lökéshullámok, kozmikus sugárzás eredménye. Tartalmazznak szilikátokat, jeget és széntartalmú anyagot, amilyen a grafit, valamint sok szerves vegyületet is. A csillagközi felhők sok fényévnyi

átmérőjűek lehetnek, így a bennük lévő por teljes tömege óriási. Akármilyen parányiak is, a csillagközi szemcsék lehetnek az életet akaratlanul világra segítő, öntudatlan kémikusok. A csillagközi por sajátos módon még a mi saját kozmikus kis hátsó udvarunkban is érezteti a hatását. A belső Naprendszer, amint azt az űrszondák kiderítették, elképesztően poros hely. A híres állatövi fény, amely napnyugta után látható a trópusi földrajzi szélességeken, az űrben kavargó apró részecskéken szétszóródó napfény következménye. Ennek az anyagnak a nagy része afféle helyi törmelék, egy része azonban a csillagközi térből áramlott ide. A sebességükből lehet megállapítani, hogy mely részecskék származnak a csillagokból. Duncan Steel (korábban a University of Adelaide-on dolgozott) és munkatársai földi radarrendszert alkalmaztak Új-Zélandon a Földre csapódó csillagközi porszemek tanulmányozására. A mikrometeoroknak a légkörbe lépésekor keletkező ionizációs sávjából a kutatók kiszámították, hogy némelyikük eléri a másodpercenkénti 70 kilométeres sebességet is, ami túlságosan nagy ahhoz, hogy a Naprendszer foglyai legyenek.^[79]

Genezis az űrből

A Pioneer 10 űrszondát 1972. március 2-án indították el a Cape Canaveralról. 1997. április 1-jén szakadt meg vele a rádió-összeköttetés, amikor ember által készített legtávolabbi tárgyként 10 milliárd kilométerre járt a Naptól. Képzeljük el, hogy stopposként felszálltunk a Pioneer 10-re

és elkísérjük a Naprendszer átívelő és azon túl vezető útján. Az indulás után hat hónap múlva keresztezzük a Mars pályáját, majd sikeresen átevíckélünk a kisbolygóövezeten. 1973 végére elhaladunk a Jupiter mellett. Tíz évvel később a Neptunusz pályáját keresztezzük, majd mindörökre elhagyjuk a bolygóközi teret és a csillagok felé száguldunk. A Nap már csak harmincad akkorának látszik, mint a Földről, és folyamatosan zsugorodik. Előttünk a sötéten és hidegen tátongó űr várakozik. A legközelebbi csillag 4,3 fényévnnyire, negyvenbillió kilométerre pislákol. Ha valóban elszánnánk magunkat az útra, az ezzel a sebességgel 10 000 évet venne igénybe. És az út nagy részében nem sok látnivalónk akadna.

Miután számos évezreden át szeltük az űrt, és a Nap egy nagyon fényes csillaggá zsugorodott, hirtelen mozgolódást észlelünk a közelünkben. Valami van a csillagközi tér feketeségében. Feltűnik és tovasuhan egy sötét anyagdarab. Hozzávetőleg gömb alakú és úgy tíz kilométeres átmérőjű. Közelebbi vizsgálódásra kiderül, hogy a tárgy kő, jég és kátrány keveréke: üstökös.

Ahogy folytatjuk az utazást, egyre több üstökös tűnik fel, és suhan el némán mellettünk. Átkelünk ezeknek a nehezen elérhető testeknek a felhőjén, a Naprendszer körülvevő trilliónyi piszkos hógolyó övezetén. Itt, teljes egy fényévnnyire a központtól, a kisebb égitesteknek ez a hatalmas csoportosulása jelzi a Naprendszer igazi külső határát. Bármilyen messze vannak is, az üstökösöket még mindig magához köti a Nap gyenge gravitációs tere.

A Naprendszerünket körülvevő üstökösfelhőt valójában

senki nem látta, a létezését azonban azóta elfogadják a csillagászok, amióta Jan Oort 1950-ben először megjósolta. Az Oort-felhőben bukdácsoló anyagdarabok nem emlékeztetnek a köztudatban élő ragyogóan fénylő, maguk után csóvát húzó üstökösökre. Ám az Oort-felhő az üstökösök igazi otthona és szinte kimeríthetetlen raktára.

Az üstökösök az évszázadok óta tartó megfigyelések ellenére továbbra is némiképp rejtélyesek. A csillagászok többsége a legutóbbi időkig nem szentelt több figyelmet nekik, mint amennyi a mennyei dráma látványos, ám jelentéktelen szereplőinek dukál, és ezen az a rettegés és szorongás sem változtatott, amit valaha a felbukkanásuk keltett. Ez a nézet azonban határozottan kezd megváltozni: az üstökösök napjaink érzékeny témájának számítanak. Az érdeklődés egyik oka a koruk. Az üstökösök a Naprendszer születésének tanúi, igazi „kövületek”, a szoláris gázköd anyagából származó csaknem eredeti minták, amelyek talán még régebbi csillagközi anyagot is tartalmaznak. A Halley-üstökös által kibocsátott porról például úgy vélik, hogy ez a legkezdetlegesebb anyag, amit a tudósok valaha is megvizsgálhattak. Az űr mélységeiben mélyhűtve négy és fél milliárd éven át nagyrészt változatlanul maradt fenn ez az őseredeti üstökösanyag.

Még élénkebb figyelmet kelt az üstökösök azon szerepe, amit vélhetően az élet eredetében és fejlődésében játszottak. A jelentőségük megértéséhez vissza kell kanyarodni a Naprendszer kezdetéhez. A bolygók meglehetősen bonyolult módon jöttek létre a szoláris gázköd forgatagából. A folyamat az apró porszemek

összeállásával kezdődött. Ezek a részecskék aztán össze-
összeütköztek, és lassan egyre nagyobb szilárd
anyagdarabokká egyesültek. A belső Naprendszerben
főként hőnek ellenálló szilikátok alkották a porszemeket.
Távolabb az illékonyabb anyagok, köztük szerves
vegyületek sűrűsödtek össze.

Ahogy a szilánkok mérete és tömege növekedett,
gravitációs vonzást kezdtek kifejteni a szomszédaikra.
Ahogy a testeket egymás felé hajtó erő nőtt, úgy váltak
egyre erőteljesebbé az ütközések. Úgy tízezer évnyi
kavargás után ezek az objektumok néhány száz
kilométeres kisbolygókká duzzadtak; egymillió év elteltével
Mars-méretű bolygókként keringtek a Nap körül.
Elkerülhetlenné váltak az immár félelmetes
nagyságrendet öltött összeütközések. Egyszer csak a
kezdeti Földre is ferdén belecsapódott egy ilyen objektum,
ami mélyreható következményekkel járt. A hatalmas test
bolygónk közepébe vágódott és létrehozta annak
vasmagját. A könnyebb köpeny egy része a becsapódás
erejétől kifröccsent az űrbe, ahol ebből a Föld körül keringő
törmelékgyűrűből hamarosan összeállt a Hold. A
kataklizma során felszabaduló mérhetetlen energia minden
illékony anyagot leégetett a Földről.

A Naprendszer külső részén kevésbé megrázó módon
folytak az események, mivel ott a könnyebb anyagok
gyűltek össze. A hidegebb viszonyok lehetővé tették, hogy
megszilárduljanak az olyan anyagok, mint a víz és a kén.
Esetünkben döntő jelentőségű mozzanat, hogy ebben az
övezetben az eredeti gázfelhőből származó sérülékeny

szénhidrogének túléltek a proto-Nap hőjét. A jégkristályok lerakódásával vattaszerű hóvá duzzadtak a parányi porszemek. Ezek a hópelyhek időről időre egymásnak ütköztek és összeragadtak. Minthogy ezek a fagyott részecskék széles körzetben szóródtak szét, nem álltak össze bolygókká, hanem seregnyi kisebb testté álltak össze: a néhány kilométer átmérőjű üstökösöktől a százszor nagyobb jeges planetezimálokig (bolygókezdeményekig). Úgy tízmillió év alatt elegendő fagyott test keletkezett ahhoz, hogy létrehozza a Jupiter óriásbolygó embrióját. Miután elérte a hozzávetőleg tíz Föld-tömegnek megfelelő kritikus méretet, a Jupiter egyre gyorsabban kezdett növekedni. Hatalmas gravitációs tere a gázfelhő széles sávjából beszipantotta, illetve szétszórta a törmeléket, és annyi anyagot rabolt saját bolygólétéhez a kisbolygóövezetből, hogy azzal örökös törpeségre ítélte a Marsot. A növekedésnek ugyanez a folyamata játszódott le a Szaturnusz, az Uránusz és a Neptunusz esetében, ám a távolabbi gázfelhő kisebb sűrűsége miatt kisebb léptékben. A Neptunusz pályáján túl túlságosan ritka eloszlású planetezimálokból nem jöhetett létre önálló bolygó. (A Plútó ugyanis nem igazi bolygó.) Mindmáig rengeteg fagyott, alig észrevehetően halvány kisbolygó járja a Naprendszer peremét, a Nap körül az úgynevezett Kuiper-övben.

Az óriás külső bolygók gravitációs tere mérhetetlenül hosszú időn át sok kis fagyott testet vetett a csillagközi tér mélyébe. Ezek többsége végérvényesen kirepült a Naprendszerből, mások csak annyira távolodtak el, hogy

végül összeálljanak az Oort-felhőbe. Ez a gravitációs szétszóródás teljesen véletlenszerűen történt, és milliónyi darab rohant a belső Naprendszer felé is, ahol némelyikük a bolygókba csapódott. A Földet többször is érte ilyen csapás, először a Mars és a Jupiter közötti régióból származó kisbolygóktól, aztán a Jupiter zónájának üstököseitől. Hosszabb távon a Szaturnusz, az Uránusz és a Neptunusz által útnak indított jeges testek ütköztek a belső bolygóknak. Ezek a külső Naprendszerből származó testek egy réteg könnyű kőzetanyagot adtak a Föld kérgéhez. Még fontosabb, hogy nagy mennyiségű vizet is hoztak magukkal, elegendőt ahhoz, hogy hosszú idő leforgása alatt a mai óceánok többszörösét hozzák létre. És a vízzel együtt sok más, a kialakulófélben lévő Földről mindaddig hiányzó illékony anyag is érkezett, különösen az élet számára oly lényeges szerves vegyületek. Addigra a hidrogént, a héliumot és az eredeti szoláris gázfelhő többi gázát elfújta a heves napszél; egy részük a Jupiter atmoszférájában gyűlt fel, a többségük pedig elveszett a csillagközi térben. Feltehetőleg a Földön egyáltalán nem maradt meg az elsődleges atmoszféra. Ám az üstökösanyag beáramlásával ismét sűrű és az olvadt belsőből származó vulkáni gőzöktől gyarapított gáztakaró fedte a bolygót.

Százmillió év elteltével többé-kevésbé befejeződött a Föld kialakulása, de további félmilliárd éven át csekély hasonlóságot mutatott a ma ismert, higgadt kék bolygóval. A felszín forró volt, az óceánok sokkal mélyebbek, az atmoszféra pedig félelmetes nyomású. Élénk vulkáni

tevékenységtől rázkódott az új világ, a közelebb lévő Hold pedig iszonyú méretű árapályokat gerjesztett. A bolygó sokkal gyorsabban forgott, mint manapság; alig néhány óra alatt következett a napra az éj. A legnagyobb különbséget azonban az úrból érkező folyamatos fenyegetés jelentette. Azok a kisbolygók és üstökösök, amelyek hozzájárultak az ifjú bolygó felszíni viszonyainak a kialakításához, nem szüntették be egy csapásra a tevékenységüket. Továbbra is jöttek, korszakról korszakra, jég- és szervesvegyület-rakományukkal. Ami azt illeti, ma is érkeznek. Éppen csak elkezdődött részvételük az élet történetében.

Becsapódás

Üstökösök adták és üstökösök vették is el.

CARL SAGAN^[80]

A Biblia többek között azért olyan lebilincselő olvasmány, mert tele van drámával és nagyszabású jelenetekkel: tűz és kénkő, égi jelek, vízözön, kettéváló vizek, csapások és járványok. Ha a világ hatezer évvel ezelőtt teremtett volna, ahogy valaha sok keresztény hitte (és egyesek nyilván ma is hiszik), akkor Istennek igencsak sok elfoglaltsága lehetett, hogy kialakítsa a bolygónk jelenlegi formáját, hegyeket és óceánokat építsen, völgyeket vájjon, gleccsereket tologasson.

Amikor a tizennyolcadik század geológusai megpróbálták fizikai folyamatok, nem pedig isteni közreműködés alapján megmagyarázni a hegyeket, a folyóvölgyeket, a sós

óceánokat és a gleccserképződést, a kőzetrétegeket és a kövületeket, rájöttek, hogy hatezer évnél sokkal több időnek kellett eltelnie, hogy mindezek a sajátosságok létrejöhessenek. 1785-ben a skót James Hutton, a modern geológia megalapítója kijelentette a Föld geológiai történetéről, hogy „nem leljük nyomát a kezdeteknek – nincs kilátás a végre”.^[81] Hutton úgy vélte, a Föld felszíni sajátosságai fokozatosan alakultak ki, mérhetetlen hosszú idő alatt bekövetkezett változások felhalmozódása révén. Rájött, hogy évmilliókat igényelt az üledékes kőzetek felgyülemelése, a hegyek felemelkedése és erodálódása. Hutton elképzelései manapság aktualizmus néven ismertek, ellentétben a biblikusabb elméjű tudósok katasztrófizmusával, akik Noé vízözönében, vulkáni pusztításban és a mennyből érkező meteoritokban igyekeztek magyarázatot találni a Föld arculatára. Hutton tanítását készségesen felkarolta Charles Lyell, aki egy 1830-ban megjelent könyvben, *Principles of Geology* (A geológia alapelvei) címmel tette közzé az aktualizmus üzenetét. Addigra nyilvánvalóvá vált a tudósok számára, hogy a geológiai változások végbemenetele valószínűleg nem évmilliókat, hanem évmilliárdokat vesz igénybe. Ez a következtetés kiválóan megfelelt Charles Darwinnak, aki a biológiai evolúció esetében hasonlóképpen hosszú idő alatt felgyűlő lassú alkalmazkodások hosszú sorozatával számolt.

Utólagos bölcsességgel megállapíthatjuk, hogy az aktualizmust ideológiai hajtóerő fűtötte, a válasz kényszere a természet vallási alapú magyarázatára. Ennek

következtében figyelemreméltóan konok tantételnek bizonyult. A hirtelen geológiai és biológiai változásokra már régóta nyilvánvaló bizonyítékok álltak rendelkezésre, ám jórészt nem vettek tudomást róluk. Azokat, akik felhívták rájuk a figyelmet, rendszerint hóbortosnak bélyegezték. Amikor a nagy tekintélynek örvendő csillagász, Edmond Halley 1694-ben feltételezte, hogy egy-egy üstökös alkalmanként bolygónak ütközhet, egy legyintéssel intézték el. 1873-ban H. A. Proctor brit csillagász merészen felvetette, hogy a holdkráterek meteoritok becsapódásának lehetnek a következményei, de gyorsan visszakozott, felidézve a tényt, hogy hasonló kráterek viszont nem láthatóak a Földön. Még az 1960-as években is biztosra vették egyes csillagászok, hogy a Hold kráterei főként vulkáni eredetűek. Végül az Apollo-holdraszállások bizonyították be, hogy a Hold krátereit az űrből érkező bombázás hozta létre.

Úrfelvételeken jól látható, hogy más bolygókat és holdakat is sűrűn borítanak kráterek: jó példa rá a Merkúr és a Mars. Ezek az égitestek megőrizték a becsapódások nyomait, mert nincs, illetve vékony a légkörük és csekély a geológiai aktivitásuk. Ezzel szemben a Föld becsapódási krátereit nagy többségükben eltörölte az erózió. De nem mindegyiket. Csak Ausztráliában legalább huszonöt becsapódási helyszínt azonosítottak. Az Egyesült Államokban, az arizonai Winslow városa mellett található az egyik legnevezetesebb kráter. A Meteor- vagy Barringer-kráter 1,2 kilométer átmérőjű, 100 méter mély és 30 000 éves. Sokkal régebbi és nagyobb becsapódási

kráterek is ismertek, például a korábban már említett Acraman-tó.

A Föld kozmikus bombázásának történeti vizsgálatára a Hold tanulmányozása mutatkozik a legalkalmasabb útnak, csillagászati értelemben ugyanis olyan közeli, hogy biztosak lehetünk abban, hogy a Földnek is ugyanazokkal a fenyegetésekkel kellett szembenéznie, mint ifjabb szomszédunknak. És bizony súlyos volt ez a fenyegetés. A nagyobb holdkrátereket egyszerű távcsővel is fel lehet fedezni. A legrégebbiek négy milliárd évvel ezelőtti események hírmondói: a kisebbek között sok az újabb keletű. A későbbi becsapódások krátereit gyakran régebbiek fölött találhatók. Mivel nagy becsapódások esetében előfordul, hogy eltörlik a korábbiak nyomát, az első ötszázmillió év részleteiről legfeljebb találgatásokba bocsátkozhatunk. A matematikai modellek és a fennmaradt holdbéli nyomok arra utalnak, hogy a belső Naprendszer valamennyi égitestére helyi törmelékek sokasága záporozott, valamint a külső Naprendszerből érkező kisbolygók és óriás üstökösök. Néhány százmillió év alatt fokozatosan mérséklődött ez a bombázás, hogy aztán újult erővel folytatódjék úgy 4-3,8 milliárd évvel ezelőtt. Ennek a későbbi szakasznak a hevessége hozta létre a holdbéli tengereket – a sötét, lapos medencéket, amelyeket láva töltött fel és viszonylag simák maradtak a rákövetkező nyugalmas időszakban. A kései heves bombázás okát és nagyságrendjét illetően megoszlanak a vélemények. Egyes csillagászok szerint a Föld közvetlen szomszédságára korlátozódott, mások úgy vélik, hogy az egész

Naprendszer érintette. Okozhatta egy hold vagy egy hatalmas üstökös szétszóródása.

Az élet szempontjából a szerves vegyületek házhoz szállításában rejlik ennek a zárótűznek a jelentősége. Amikor a Giotto űrszonda 1986-ban elrepült a Halley-üstökös közelében, felfedezett egy szurokfekete, szenet, hidrogént, nitrogént és ként tartalmazó magot. A fejből áramló porszemcsék elemzése kiderítette, hogy nem kevesebb, mint egyharmada szerves anyag. Észleltek közönséges anyagokat, például benzolt, metanolt és etánsavat, valamint a nukleinsavak egynémely építőelemét.⁽⁴⁾ Amennyiben a Halley-ből általánosítani lehet, akkor az üstökösök könnyedén elláthatták a Földet az egész bioszféra létrehozásához elegendő szénnel. Hasonló kép bontakozik ki a Naprendszer határán tanyázó, sokkal nagyobb jeges testek esetében is. A csillagászok nemrégiben számos különös, Kentauroknak nevezett objektumot fedeztek fel, amelyek befelé vándorolnak a Kuiper-övezetből. Ezek a planetezimálok sötétvörösek, és szénhidrogénekben gazdag elsődleges réteg borítja őket. Nagy a kísértés a következtetés levonására, hogy a becsapódó üstökösök és kisbolygók látták el a kezdetben meddő Földet szerves anyaggal és vízzel, és így létrehozták azt az őslévest, amelyből végül előbukkant az élet. Csakhogy akad némi bonyodalom ezzel az elmélettel. Egy üstökösbecsapódás rendkívül hevesen lejátszódó esemény, ami nagy valószínűséggel megsemmisíti a szállított szerves anyagot. Az atmoszférába nagy sebességgel belépő kisebb testek többnyire teljesen

elégnek, míg a nagy testek olyan erővel csapódnak a talajba, hogy nagyrészt elpárolognak a robbanástól. Hihetetlenül szerencsésnek kell lennie a földet érő testnek, hogy megmaradjanak a szerves anyagai. Mint azt a 9. fejezetben látni fogjuk, a megfelelő belépési szögben és tömeggel épségben elérheti a felszínt a Földön kívüli szerves anyag, de kicsi rá az esély. Egyes kutatók úgy vélik, a porszemcsék valószínűleg biztonságosabb fuvart biztosítanak, mint a nagy kövek, és a Föld szerves anyagainak többsége, afféle mennyei mannaként, ezekben a kis részecskékben lebeghetett alá az égből. Mások szerint a becsapódó üstökösök lökéshullámai hozták létre azokat a szerves molekulákat, amelyekből ismét kisarjadt, amit a kataklizma elpusztított.

Szélsőséges esetben egy nagyon nagy test akkora erővel ütközhet a Földbe, hogy több anyagot távolít el, mint amennyit lerak. Szépítve ezt nevezik becsapódási erózióknak. A kozmikus bombázás korszakában a nagyobb ütközések során elég nagy energia szabadult el ahhoz, hogy eltávolítsa a légkör és az óceánok nagy részét. Az üstökösbombázás ilyenformán kétélű fegyver, a víz és a szerves anyagok vonatkozásában. Nagymértékben függ a körülményektől, hogy egy bolygó a végelszámoláskor nyer vagy veszít. Úgy tűnik, hogy a kisebb testek, mint a Mars, a Merkúr vagy a Hold veszítettek a becsapódási erózióknak, míg a Föld és a Vénusz mindent összevéve anyagot nyertek.

A kétélű fegyver azonban változatlanul Damoklész kardjaként függ a bolygónk fölött. Üstökösök, kisbolygók és meteorok továbbra is veszélyeztetik a Földet. Ennek oka a

Naprendszeren túli hatásokra vezethető vissza. Bár az ember úgy látja a csillagokat, mintha az égboltra lennének rögzítve, valójában a mi Napunkkal együtt járják Galaxisunkat, mintegy kétszázötvenmillió éves keringési idővel. Ennek a lassú vándorlásnak a következményeként időről időre megtörténik, hogy másik csillag vagy nagy tömegű gázfelhő közelíti meg a Naprendszert. Ilyenkor a gravitációs tér felkavarja az Oort-felhőt. Egyes üstökösök kilöködnek a Naprendszerből, mások befelé, a bolygók felé térülnek.

Amikor új üstököst fedeznek fel, nagy az esélye, hogy egyszeri látogatónk akadt, amely az Oort-felhő széléről ugrik be hozzánk sok millió éves utazása közben. Ha egy üstökös átszáguld a belső Naprendszeren, a pályáját megzavarja a Jupiter vagy egy másik bolygó, úgyhogy periodikusan visszatér. Sok periodikus üstököst ismerünk, a leghíresebb a Halley. Amikor ezek megközelítik a Napot, illékony anyagaik kezdenek elpárologni, az üstökösök gáz- és porfelhőt bocsátanak ki, amit a napszél hajt a jellegzetes csóvába. Ezeknek a testeknek a sorsa vagy az lesz, hogy belezuhannak a Napba, vagy becsapódnak egy bolygóba, vagy ismét eltávoznak a belső Naprendszerből. Esetleg az üstökös „meghalhat”, azaz elveszítheti valamennyi illékony anyagát, megszűnik sugározni és szétesik, még mielőtt a fent leírt események bármelyike bekövetkezett volna.

A számítások azt jelzik, hogy az Oort-felhőt érő háborgatások néhány százmillió év alatt elmozdítják a legtöbb üstökösét. Mivel üstökösök mégis rendszeresen felbukkannak, valamilyen utántöltési folyamatnak is kell

működni. A csillagászok gyanítják, hogy ezért egy, a Neptunuson túli régióból induló belső felhő vagy tápláló övezet a felelős, amely – fokozatosan ritkulva – hozzávetőleg két Földnek megfelelő anyag tömeget tartalmaz. Csak az elmúlt néhány évben számos nagy, jéggel borított testet fedeztek fel a Naprendszer planetáris szélének közelében, illetve azon túl, a Kuiper-övezetben. Sok rövid periódusú üstökös valószínűleg inkább innen, mint a távolabbi Oort-felhőből származik.

Akár manapság is megtörténhet, hogy egy üstökös vagy egy kisbolygó akkora erővel csapódik a Földbe, hogy az élet nagy részét megsemmisíti. Valószínűsíthető, hogy súlyos ütközések nemegyszer széles körű pusztulást okoztak a földtörténeti korszakokban. A leghíresebb tömeges kihalás hatvanötmillió évvel ezelőtt következett be (földtörténeti mércével csak nemrégiben), amikor, számos más fajjal együtt, hirtelen kipusztultak a dinoszauruszok. A hatalmas kozmikus becsapódást az amúgy ritka irídium világszerte megtalálható rétege bizonyítja, amely épp a mondott időszakban rakódott le az agyagrétegekbe. Az irídiumot szinte bizonyosan egy becsapódó égitest hozta magával. Ezt az elméletet hatásosan igazolta a mészkő alá temetett, megfelelő korú gigantikus kráter 1990-es mexikói felfedezése, a legalább 180 kilométer átmérőjű krátert valószínűleg egy mintegy 20 kilométer átmérőjű test ütötte. A kozmikus becsapódások a biológusok által váratlannak nevezett események példái. Ezekkel nem számolhatott a földi biológia. Egyszer csak bekövetkeznek, amolyan derült égből villámcsapás módjára úgy, hogy semmiféle oksági

kapcsolatban nem állnak a földi élet evolúciójával. Egyszerre teremtők és pusztítók, jók és rosszak. A Földön – és talán más bolygókon is – az élet keletkezése nagymértékben összefügghet illóanyagokban gazdag anyagokkal, míg a dinoszauruszok pusztulása nyitotta meg az utat az emlősök, és végső soron az emberiség felemelkedése előtt. Úgy tűnik, magát a létet köszönhetjük egy véletlen csillagászati katasztrófának. Hogy nem jut-e egy nap az emberiség is a dinoszauruszok sorsára, majd kiderül.

A Sziszüphosz-effektus

További talányt vet fel annak felfedezése, hogy a Föld és a Hold egy 3,8 milliárd évvel ezelőttig tartó súlyos kozmikus zárótüzet szenvedett el. Ha hinni lehet a kövületeknek, 3,5 milliárd évvel ezelőtt már egészen bizonyosan virult az élet, sőt igen valószínű, hogy már 3,85 milliárd évvel ezelőtt is. Tekintettel a nagy becsapódás rettenetes következményeire, átvészelhette-e az élet a kései nehézbombázást? Ebben a kérdésben sajnos nem áll forró nyom a rendelkezésünkre. Bár a geológusok találtak 4,2 milliárd éves cirkonkristályokat, amiből feltételezik, hogy akkoriban már kellett léteznie valamiféle szilárd kéregnek, a valaha talált legrégebbi ép kövek 4,03 milliárd éves múltra tekinthetnek vissza. A geológiai folyamatok szinte minden bizonyítékát eltörölték annak, hogy milyen lehetett bolygónk úgy 3,8 milliárd évnél korábban.

Noha a Föld nem szívesen szolgáltatja ki ifjúsága ezen titkait, találhatunk közvetett bizonyítékokat a 3,8 milliárd évvel ezelőtti kort megelőző időszakra, közvetlenül az orrunk előtt (még hogy előtte... benne!). Testünk DNS-e a múltat is megörökítette, minthogy génjeinket a környezeti viszonyok mintázták meg. Bár a genetikai feljegyzést, akárcsak a geológiai feljegyzést, megviseli az idő pusztítása, azért nem törlődik el teljesen. A génekből kicsikart információk alapján a mikrobiológusok rengeteget mesélhetnek az úgy négy milliárd évvel ezelőtt élhetett univerzális ősről, és ezzel az információval felfegyverkezve többre is következtethetünk az akkoriban uralkodó körülményekről. És egészen meglepő üzenetre bukkanunk...

Képzeld el, milyen lehetett a kozmikus nehézbombázás korszaka! Minden nagy becsapódás globális felfordulást okozott. A pusztítás mértéke a dinoszauruszokat eltüntető robbanását messze felülmúlta. A Holdat alig 3,8 milliárd évvel ezelőtt eltalálta egy 90 kilométer átmérőjű test, és a Brit-szigetekének megfelelő méretű, kolosszális becsapódási medencét hozott létre. Számos hasonló kataklizma nyomát őrzik a gyűrűhegységek. A Földnek, lévén sokkal nagyobb, ekkora és még nagyobb ütközések tucatjait kellett elszenvednie. Nem nehéz megtalálni ezeknek a mega-becsapódásoknak a tetteseit, hiszen manapság is sok nagy test bolyong a Naprendszerben. Egy nemrégiben felfedezett kisbolygó, a Szaturnusz közelében instabil pályán mozgó Chiron 180 kilométer átmérőjű. Ha a Földnek ütközne, a következmények olyan

szörnyűek lennének, hogy inkább ne is gondoljunk bele. És a Chiron távrolról sem a legnagyobb ismert kisbolygó. Négy milliárd évvel ezelőtt pedig sokkal gyakoribbak lehettek az ilyen objektumok, mint manapság.

Az erőteljes ütközés hatásait Norman Sleep elemezte munkatársaival a Stanford University.^[82] Egy 500 kilométer átmérőjű test becsapódása 1500 kilométer átmérőjű és legalább 50 kilométer mély lyukat ütne. Hatalmas mennyiségű kőzet párologna el egy gigantikus tűzgolyóban, amely gyorsan körbevágtatná a bolygót, kiszorítaná a légkört és globális kemencét hozna létre. A felszíni hőmérséklet több mint 3000 °C-ra szökkenne, aminek eredményeként elillanna a világóceánok vize és majdnem egy kilométer mélységig megolvadnának a kőzetek. Mikor néhány hónap alatt lassan lehűl a kőzetgözből és szuperforró gőzből álló, halálosan sűrű atmoszféra, elkezdnek hullani az olvadt kőzet cseppjei. Egy teljes évezred telne el, mire normális esőzés kezdődne, majd egy kétezer éven át tartó felhőszakadás újra feltöltené az óceánokat és a bolygó lassan visszatérne a rendes kerékvágásba.

Bár csak néhány katasztrófa lehetett a fent leírtakhoz hasonló mértékű, Sleep több százra becsüli azoknak a számát, amelyek összevethetők a Hold egyes alakzatait, például a Mare Continentalét létrehozó kataklizmákkal. Egy-egy ilyen becsapódás nyomán az ürbe fröccsent olvadt kőzet átmeneti kőzetgőz takarót vonna a Föld atmoszférája fölé. Az égből sugárzó hő hatására elforrna az óceán felső 40 métere, majd évtizedeken át forró eső zuhogna.

A nagy becsapódások tehát kétségkívül képesek teljes mértékben sterilizálni a Föld felszínét. A kőzetgözk perzselő hőhulláma rövid úton megsemmisítene minden élő szervezetet. Ha a Földet akkora becsapódások érték, ahogy azt a csillagászok vélik, és ha a felszíni szervezetek már valóban jól berendezkedtek és elterjedtek abban a 3,8 milliárd évvel ezelőtti korban, akkor az életnek csaknem azonnal ismét ki kellett bontakoznia, amint elültek az utolsó sterilizáló becsapódás hatásai. Ez arra utal, hogy az élet vagy az űrből jött, vagy hogy rögtön megjelent, amint legalább félig-meddig tűrhető viszonyokat talált. (Egyetlen mintából persze nehéz meggyőző következtetésre jutni.) Akárhogy történt is, mindenképpen számolni kell azzal a lehetőséggel, hogy az élet többször is előről kezdte az útját. A kései nehézbombázást viszonylag nyugalmas időszak előzhette meg. A zárótűz minden bizonnyal fokozatosan csitult el, ahogy felélte munícióját, így különböző időtartamú tűzszünetek választották el az egymást követő sterilizáló becsapódásokat; minden ilyen alkalommal lehetőség nyílhatott az élet újbóli megjelenésére.

Néhány évvel ezelőtt Kevin Maher és David Stevenson (Caltech) a kozmikus nehézbombázás elméletének fényében próbálta meg újradefiniálni az élet keletkezését.^[83] Az élet csak akkor kezdődhet el, jelentik ki, ha az önreplikáló szervezetek megjelenéséhez szükséges idő rövidebb a sterilizáló becsapódások közötti időtartamnál. Ha, mondjuk, tízmillió év alatt jön létre az őslévesből az élet, akkor a bombázásnak legalább tízmillió

éves tűzszüneteket kell tartania, hogy egyáltalán elkezdődhessen az élet. Maher és Stevenson ezután feltette a kérdést, hogy milyen messzire hatolhatunk vissza a bombázás korába, úgy, hogy még számíthatunk ezekre a szünetekre; végül 200 millió évet adtak meg válaszként. Vagyis az élet bármikor megjelenhetett a négy milliárd évvel ezelőtti kor előtt, virágzott a nyugalmasabb periódusokban, majd ismét elsöpörte a következő sterilizáló becsapódás. Miként a mitikus Szisüphosz, aki arra ítéltetett, hogy görgesse fel a követ a hegyre, ami aztán mindig visszagurul a csúcs közeléből, az életnek is újra el kellett küszködnie addig, amíg megveti a lábát, csak hogy újra és újra eltörölje az űrből érkező csapás.

Amennyiben viszont az élet több alkalommal is megújult, akkor az emberek nem lehetnek az első élőlény leszármazottai, hanem azoké az életformáké, amelyeknek sikerült túlélniük az utolsó nagy becsapódást ebben a régóta tartó „húzd meg, ereszd meg” sorozatban. Ez egy érdekes kérdést vet fel a 3,85 milliárd éves isuai kövekkel kapcsolatban. Bekövetkezhetett-e sterilizáló becsapódás *az után*, hogy az élet bennük hagyta a nyomát? Ha igen, akkor azok a szervezetek, amelyek ott hagyták a lenyomatukat, egyáltalán nem lehetnek a mi életformánk ősei. Csakis korábbi, alternatív élővilághoz tartozhattak, amelyet teljesen eltörölt a kozmikus bombázás. A grönlandi kőzetek tehát egy ilyen értelemben idegen életforma nyomát őrizhetik.

Abból, amit a Naprendszer korai történelméről tudunk, megállapítható, hogy a Föld felszíne legalább több

százmillió éven át veszélyes helynek számított az élő szervezetek számára. Még az óceán feneké is csekély védelmet nyújthatott a nagyobb kozmikus becsapódások pusztítása ellen. Az ezen kataklizmák kiváltotta hőhullámok a Föld kérgében is halálosak lehetnek, akár több száz méter mélységig is. Nem az a kimondott Édenkert. Akkor viszont hol tanyázhattak a legkorábbi életformák? Miféle menedék létezett, ami megóvhatta az első törekeny ökoszisztémát a teljes megsemmisüléstől, amivel az elpárolgó kőzetek fenyegették? Önként adódik a válasz: valahol mélyen. Valahol, a föld alatt. De mi az ördög élhet ott?!

7. CSUDABOGARAK

Az 1920-as évek végén az egyiptomi fővárosban, Kairóban összeomlott egy sor főcsatorna. A vizsgálatok kiderítették, hogy a csatorna betonburkolata egyszerűen szétesett, alig két évvel azután, hogy a föld alá került; a mérnökök kísérleteket végeztek, de hasztalan igyekeztek kideríteni a rongálódás okát. Azután másutt is kezdett megjelenni a rejtélyes csatornaporladás. Kaliforniában súlyosan korrodálódott a 26 mérföldes főcsatorna kifolyója, és a mállás megállításához klórozni kellett, míg a Los Angeles-i 55 mérföldes északi kifolyót csak a fokozott szellőztetés mentette meg a teljes összeomlástól. A dél-afrikai Cape Townban a mérnököket teljesen zavarba

ejtette a beton csatornacsövekszédületes íramú korróziója, némelyik évenkénti negyedhüvelykes sebességgel pusztult. Nyilvánvaló volt, hogy valami különös zajlik a föld alatt.

Amikor több ausztráliai városban is kezdtek beomlani a csatornák, a Melbourne and Metropolitan Board of Works (Közmunkaügyi Minisztérium) hivatalához fordultak. Felállítottak egy kutatócsoportot dr. C. D. Parker vezetésével, amely az egész országból, számos érintett csatornacsövből kapott mintákat. Addigra a mérnökök már gyanították, hogy a probléma a hidrogénszulfiddal – a záptojás szagára emlékeztető bűzös gázzal – áll kapcsolatban, zavarba ejtő volt azonban a korrózió sebessége és ereje.

Parker nem sokkal később felfedezte, mi történt.^[84] A korábbi elméletek a beton valamiféle kémiai átalakulását igyekeztek tetten érni, Parker azonban rájött, hogy a korrózió valójában biológiai támadásnak tulajdonítható. Hamar elkülönítette a tettest: egy pálcika alakú, két mikron hosszú baktériumot. Ez a különös mikroorganizmus beeszi magát a tömör betonba, alig néhány hét leforgása alatt gittszerű, morzsalékos anyaggá változtatja. A szokásos, szerves anyagokat fogyasztó szervezetektől eltérően Parker mikrobái jól fejlődtek azon a kénmenűn, amit a csatornában terjengő kénhidrogéngázból vontak ki. Parkernek sikerült tenyésztene a baktériumot, és a *Thiobacillus concretivorus*, azaz „betonevő kénpálcika” nevet adományozta neki.

A laboratóriumi vizsgálatokból kiderült, hogy a *Thiobacillus concretivorus* kénsavat termel, és az pusztította a

betoncsatornákat. Sőt az izolált baktériumok nem is növekedtek, hacsak kénsavba nem merítették őket. A sav koncentrációja egészen meghökkentően, bármely más élőlény elpusztításához elegendően magasnak bizonyult, még ahhoz is elég erős volt, hogy fémdarabokat oldjon fel! Aztán arra is fény derült, hogy Parker savkedvelő jószága nem ismeretlen a tudomány számára; sok évvel korábban felfedezték, és a *Thiobacillus thio-oxidans* nevet kapta. Az acidofil – savkedvelő – nével jelölt mikroorganizmusok csoportjába tartoznak, amelyek savas közeget igényelnek és a szén- és vasérchányókhoz hasonló helyeken szeretnek tanyázni. Némelyikük a 2-es pH-értékű folyadékot is elviseli, amely pedig kifejezetten fájdalmasnak bizonyulna, ha valamelyikünk netán belemártaná a kezét.

A *Thiobacillus thio-oxidans*nál nem kevésbé figyelemre méltó egy szívós kis mikroba, a *Halobacterium halobium*, amely olyan helyszínről került elő, amelyről nem is feltételezték, hogy életnek adhat otthont, nevezetesen a Holt-tengerből. Ez a tó annyira sós, hogy a fürdőzőket fenntartja a víz színén, valósággal rá lehet ülni (egy ízben magam is kipróbáltam). A magas sótartalom annak köszönhető, hogy a „tengert” partok veszik körül, nincs lefolyása. A víz beömlik a Jordán-folyóból, majd elpárolog, a só pedig ott marad. A Holt-tenger körüli terület száraz és kopár, holdbéli tájhoz hasonlatos. Félelmetes környezete és hatásos neve ellenére a Holt-tenger nem teljesen halott, ahogy azt a *Halobacterium halobium* felfedezése is igazolta. Nem kizárólag itt találhatunk halofilek összefoglaló

néven ismert sós mikroorganizmusokat. Az Utah államban található Nagy-sóstó és a kenyai Magadi-tó is otthont nyújt a saját mikrobalakóinak. Sóbányákban és ősi kristályokba zártan is fedeztek már fel életképes halofileket.

Mikrobák más szélsőségeket is eltűrnek, például a nagy hideget. Az Antarktisz jégtakarója alá zártan vidáman viruló baktériumokat is találtak. Egyesek elviselik, ha a folyékony nitrogén hőmérsékletére, vagy akár alacsonyabb hőfokra hűtik le őket. Más mikroorganizmusok a legnagyobb fokú lúgosságban érzik remekül magukat. A *Plectonema* például olyan lúgos oldatban is fejlődni fog, amely az emberi bőrt súlyosan károsítaná. Olyan baktériumok is akadnak, mint a *Micrococcus radiophilus*, amelyek elviselik a más szervezetek számára gyors halált jelentő radioaktív sugárzást. Egészséges mikrobák előfordulnak az atomerőművek hulladéktartályaiban, ahol urániumot, plutóniumot és más radioaktív elemeket fogyasztanak. A nyomás sem jelent áthághatatlan akadályt. Közönséges baktériumokat, mondjuk az *E. colit* több száz atmoszférás nyomásnak lehet alávetni anélkül, hogy különösebb bajuk esne. A másik véglet, amikor a *Streptococcus mitis* baktérium életképes példányait hozták vissza a Hold felszínéről, ahol két éven át sikerült átvészelnük a teljes vákuumot a Surveyor III űrszonda kameráján.

A kifejező *superbug* (kb. „csudabogár”) és *extremofil* („szélsőségeket kedvelő”) szavakkal jelölik ezeket a szívós mikroorganizmusokat. Az első csudabogarak pusztán tudományos kuriózumnak számítottak, és leginkább a lehetséges ipari kiaknázásuk miatt tanulmányozták őket.

Ujabban azonban, ahogy bővültek róluk a mikrobiológusok ismeretei, mélyreható jelentőségre tettek szert ezek a mikroorganizmusok. Egyes csudabogarak rendkívül ősieknak és primitíveknek látszanak, és a tudósok körében egyre erősödik az a benyomás, hogy valószínűleg afféle élő kövületek, az egyetemes őshöz legközelebb álló, mindmáig fennmaradt lények. Amennyiben így áll a helyzet, a számukra oly kedves és előnyös zord körülmények, legyenek bármilyen szélsőségesek is számunkra, azt jelezhetik, hogy milyen lehetett a Föld 3,8 milliárd évvel ezelőtt.

Van, aki forrón szereti

A szerves élet a végtelen hullámok alatt az óceán gyöngyfényű barlangjaiban született és nevelkedett.

ERASMUS DARWIN^[85]

Nyár vége felé Adelaide-ban, ahol élek, olykor a 43 °C-t is eléri a hőmérséklet. Az emberek többsége ilyenkor otthon marad. A szabadban a testhőmérséklet alacsonyan tartása jelenti a legnagyobb gondot. Még a macskánk is úgy liheg, mint egy kutya. Egyes sivatagi állatok valamelyest magasabb hőmérsékletet is elviselnek, de úgy 50 °C tűnik a határértéknek. Ha ennél nagyobb a hőség, az állatok és a növények a szó szoros értelmében kezdenek megfőni. A hő hatására felbomlanak a fehérjék, így értelemszerűen nem is tudnak megfelelően működni. Ennek a jelenségnek a klasszikus példája a tojás, melynek

anyaga mérsékelten forró vízbe merítéskor kifehéredik és megszilárdul. Ha egy élő állattal történik ilyesmi, az hamarosan elpusztul.

Évtizedekkel ezelőtt a biológusok őszintén megdöbbenek, amikor felfedezték, hogy bizonyos baktériumok 70 °C-os hőmérsékletig is kényelmesen éldegélnek. Ezeket a különös mikrobákat komposztdombokban, gabonasilókban, mi több, házi melegvíz-rendszerekben találták. Kézenfekvő volt ezeket a termofil (hőkedvelő) gyűjtőnével illetni. Az alaposabb vizsgálat során kiderült, hogy a termofilek különleges stabilizáló fehérjéket használnak, és nem szokásosan zsírból, hanem egyfajta hőellenálló viaszból készült sejtmembránnal veszik körül magukat. Egy ideig feltételezték, hogy a 70 °C jelzi a termofil környezet hőmérsékletének felső határát, ahol még nem kezd felbomlani a DNS-ük. Következésképpen még nagyobb meglepetést keltett, amikor 1969-ben a University of Indiana munkatársa, Thomas Brock újabb csudabogárra bukkant, amelynek a *Thermus aquaticus* nevet adta, mivel a Yellowstone Nemzeti Park meleg forrásaiban él, 80 °C hőmérsékleten.

Mint kiderült, mindez csak a kezdetet jelentette. Az 1970-es évek második felében a Woods Hole Oceanographic Institute *Alvin* tengeralattjárójával igyekeztek felderíteni a medret a csendes-óceáni Galápagos-hasadék mentén. Ez a kb. 2,5 kilométerre a felszín alatt található képződmény felkeltette a tudósok érdeklődését, mint a tenger alatti vulkáni kürtők vagy fekete füstölgők kitűnő példája. Ez az elnevezés az ásványokkal borított sziklakürtők

megjelenéséből ered, ahonnan sötét folyadékok gomolyognak elő a környező óceánba. Egy fekete füstölgő közelében a tengervíz elérheti a 350 °C-ot, ami jóval magasabb a szokványos körülmények közötti forráspontnál; ezt a mélységben uralkodó hatalmas nyomás teszi lehetővé. Az *Alvin* programban részt vevő tudósok elképedésére a galápagosi fekete füstölgőket övező területről, valamint számos más mélytengeri helyszínről kiderült, hogy hemzseg az élettől. A mélység egzotikusabb lakói között akadtak rákok és óriás csőférgek. A fekete füstölgők szélén már ismerős termofil baktériumok ütöttek tanyát. A legérdekesebbnek azonban azok a mindaddig ismeretlen mikrobák bizonyultak, melyek a perzselő, 110 °C-os kiömlés közvetlen közelében éltek. Soha, egyetlen tudós sem gondolta komolyan, hogy bármilyen életforma képes lenne elviselni ilyen rendkívüli hőséget.

A 80 °C-nál magasabb hőmérsékleten élő szervezeteket döbbenetes hőtűrő képességük elismeréseként hipertermofileknek nevezzük. A felfedezésüket követően hamarosan arra is fény derült, hogy ezek a csudabogarak nem a természet egyszeri szeszélyei. Ez idáig úgy hús nemzetségüket írták le. Fontos megjegyezni, hogy sok hipertermofil archebaktérium. A hivatalos hőmérsékletrekordot jelenleg a *Pyrodictium occultum* nevű organizmus tartja, amely ismételten épen és egészségesen bukkant elő, miután egy-egy órán át nagy nyomáson főzték 121 °C-on. Ám John Parkes (Bristol University) azt állítja, hogy bizonyítéka van a tenger medre alatt, 169 °C-on élő mikrobák létére.^[86]

Ezen mélytengeri szervezetek kapcsán az a legalapvetőbb kérdés, hogy miként jutnak a mindennapi betevőhöz. A biológusok hosszú időn át feltételezték, hogy valamennyi földi életforma végső soron a Naptól nyeri az energiáját. A növények nem nőnének fény nélkül, az állatoknak pedig növényeket kell enniük (vagy egymást), hogy életben maradjanak. Csakhogy a tenger mélyén szuroksötétség uralkodik.^[87] Odáig nem hatol le a napfény. Ez nem hozza zavarba a rákokat és a férgeket, mivel kisebb lények közül szedik össze a táplálékukat a mederben. Valaminek azonban el kell helyezkednie a tápláléklánc alján is. Nos, kiderült, hogy a mikrobák az elsődleges termelők, mivel az élethez szükséges energiájukat közvetlenül a kémiai táptalajnak a vulkáni mélységből áradó hőjéből nyerik. Azokat a szervezeteket, amelyek nem fogyasztanak szerves anyagot, hanem közvetlenül állítják elő a biomasszájukat, autotróf („öntápláló”) szervezetek néven foglaljuk össze. A növények a legközismertebb autotrófok; a napfény energiáját használják a szerves anyagok, például a szén-dioxid és a víz átalakítására szerves anyaggá. Azok az autotrófok, amelyek a fény helyett kémiai energiát alkalmaznak a biomasszájuk felépítéséhez, a kemoautotrófok, röviden kemotrófok. A valódi kemotrófok felfedezése fordulópontot jelentett a biológia történetében. Előkerült egy önálló életlánc alapja, a szervezeteknek az ismerős felszíni élettel párhuzamos hierarchiája, amelyik azonban az elsődleges energiaforrása tekintetében nem függ a napfénytől.^[88] Az első alkalommal vált lehetővé, hogy felfogjunk egy a fotoszintézis bonyodalmaiktól mentes

ökoszisztémát. Egy új, évmilliárdokon át rejtett biológiai tartomány sejtett fel a tudósok előtt.

Élet az alvilágban

Mindenhol, ahol életben maradhatnak mikrobák, létezik is mikrobaélet.

THOMAS GOLD^[89]

Az *Utazás a Föld középpontjába* című könyvében Jules Verne, a híres fantasztikus szerző, a Föld belsejébe tett expedíció történetét meséli el. A bátor felfedezők egy egészen új világot derítenek fel a mélyben, ahol egzotikus életformák élnek a föld alatti üregekben. Sajnálatos módon Verne meséje ellentmond korunk geológiai ismereteinek. A bányászok tudják a legjobban, hogy a mélység meletet jelent: a hőmérséklet minden lefelé megtett kilométerrel 20 °C-ot is emelkedhet, ami néhány kilométeres mélységen túl a legtöbb szervezet számára végső soron elviselhetlenné teszi az életet. A hőmérséklet tovább emelkedik, ahogy áthatolunk a kőgömbön, az olvadt köpenyen, egészen a magig, ahol több mint 3000 °C-os hőmérséklet uralkodik. Az utazás a Föld belsejébe egyenértékű a biztos elhamvadással. Verne álma, hogy létezhet élet a Föld felszíne alatt, nevetségesnek tűnt. A biológusok ugyan régóta a tudatában voltak annak, hogy a talajtakaró tartalmaz baktériumokat, és hogy a mészkőbarlangokat is lakhatják különlegesen alkalmazkodott szervezetek, ezektől a kivételektől eltekintve azonban a talajtól lefelé halottnak

nyilvánították a bolygót. És az óceán mélységeit illetően is ugyanez a nézet uralkodott. Semmi nem maradhat életben – vélték – a „fotikus zóna”, vagyis az óceán azon rétegei alatt, amelyeket még megvilágít a napfény. A fekete füstölgőkhöz kötődő ökoszisztémák felfedezése aztán mindent megváltoztatott. Ha viszont élhetnek csudabogarak kilométerekkel a tenger színe alatt, miért ne élhetnének kilométerekkel a föld alatt is?

Minden bizonnyal Edson Bastin chicagói geológus volt az első tudós, aki nyilvánosan hangot adott annak a nézetnek, hogy élet virulhat mélyen a Föld felszíne alatt. Az 1920-as években Bastin azon gondolkozott, miért tartalmaz az olajtelepekről származó víz hidrogén-szulfidot. Véleménye szerint a gázt az olajmedencék mélyén élő szulfát-redukáló baktériumok termelik. Ám kevés bizonyítékot tudott felsorakoztatni állítása mögé, ezért nemigen lett támogatásra.

Valójában a biológiai aktivitás nagy mélységekben mutatott jelei mindenfelé megtalálhatók, már amennyiben tudták volna a geológusok, hogy mit keressenek. Az 1960-as években föld alatti ásványlelőhelyeket fedeztek fel, melyeket mintha mikrobák ülepítettek volna le. Vas, kén, mangán, cink és baktériumok által közismerten alkalmazott más anyagok gyanús módon koncentráálódtak. Időközben Lloyd Hamilton ausztrál továbbképzős egyetemi hallgató (London University) megkövesedett mikrobák eltéveszthetetlen alakját fedezte fel ásványi jáspiskő erezetében. Arra a következtetésre jutott, hogy ezek a kőzet pórusaiban megtelepedett, vasat kiválasztó

mikrobák maradványai.^[91]

A föld alatti élet egyre sokasodó bizonyítékai ellenére az 1970-es évek végéig sem rendült meg alapvetően az uralkodó nézet, miszerint a Föld kérge steril. Akkoriban kezdték támogatni a kormányzatok a nukleáris hulladék elhelyezésével kapcsolatban felmerülő problémák kutatását. A radioaktív anyagokat mély rétegekbe ásták, abban a hitben, hogy ott semmi nem háborgathatja a nyugalmukat. Csakhogy a talajvízvizsgálatok már jelezték, hogy baktériumok lakhatnak a föld alatti tárolóközetekben, míg a fúrési vizsgálatok közetmintái bakteriális folyamatok ékesszóló jeleiről árulkodtak. Lassan felderengett a tudósokban, hogy ha a mikrobák elhatolhatnak a mély víztárolókba, ugyanígy a föld alatti nukleáris hulladéklerakókig is eljuthatnak és korrodálhatják a konténereket, vagyis végső soron elszabadulhat a sugárzó hulladék. Hasonló aggodalmak kezdtek felmerülni a kőolajiparban, amikor világhosszá vált, hogy baktériumok behatolhatnak az olajtelepekbe és savazhatják az olajat. De a legtöbb tudós még az 1980-as évek végén is mereven ellenállt annak az elképzelésnek, hogy az élet virágozhat mélyen a Föld felszíne alatt. Amikor Tommy Gold, a Cornell University asztrofizikusa bejelentette,^[92] hogy bizonyítékot talált csaknem hét kilométeres mélységben svéd gránitban mutatkozó biológiai aktivitásra, eleinte élénk gúnyolódással fogadták az állítását.

A kételkedők meggyőzéséhez élő mikroorganizmusokat kellett találni. A US Department of Energy (Energiaügyi Minisztérium) kísérleti fúrást végeztetett a dél-carolinai

Savannah folyó körzetében, és a kutatók által fél kilométeres mélységből felhozott kőzetekben lakozó életképes baktériumokat már semmiféle érveléssel nem lehetett megcáfolni.^[93] A kutatásban részt vevő mérnökök az elképzelhető legnagyobb körültekintéssel igyekeztek elkerülni a minta felszíni organizmusokkal történő szennyeződését, így kevés kétség férhetett hozzá, hogy igenis élnek a mélyben mikrobák. Az Egyesült Államok más vidékein és más országokban végzett hasonló fúrási programok megerősítették ezeket az eredményeket.

Egyes esetekben sokkal mélyebben fekvő helyszíneken is találtak mikroorganizmusokat. A virginiai Taylorsville-ben három kilométeres lyukat fúrtak triász korszaki üledékbe, ahonnan egyedülálló, pálcika alakú hipertermofilek kerültek elő, köztük a fantáziadús elnevezésű *Bacillus infernus*. A sekélyebb mélységekben lakó mikrobák többnyire mezofilek, azaz olyan szervezetek, amelyek a meleg, de nem perzselő viszonyok között fejlődnek. Két kilométeres mélység alatt a termofilek vették át a hatalmat. A kutatásban részt vevő tudósok úgy becsülték, hogy a taylorsville-i helyszínt legalább 140 millió éve lakják mikrobák. Egyes helyeken, például a svédországi Stripa bányában, ahol a kőzet kemény, csak egy maroknyi faj vert tanyát, míg a dél-karolinai morzsalékos, parti üledékes kőzetek különféle fajok százainak nyújtanak otthont. Jelenleg ezrekre rúg a mélyben élő mikrobák fajainak teljes listája. Egyes magminták grammonként tízmillió baktériumot tartalmaztak. Meg kellett barátkozni a gondolattal, hogy a kövek a talpuk alatt csak úgy

pezsegek a parányi életformáktól.

Miután kézzelfoghatóvá lett a föld alatti csudabogarak létezése, a tudósok sebtében nekiláttak átírni a tankönyveket. Ettől kezdve mindennemű geológiai furcsaságot a szokatlan baktériumok tevékenységének tulajdonítottak. Savkiválasztó baktériumok, például, kimarhatják a kvarchoz hasonló tömör kőzetet, ami így likacsossá válik és kikezdi az erózió. Talán ez a folyamat zajlik a föld mélyén is? Talán ezeknek a szorgos kis organizmusoknak köszönhetik létrejöttüket azok a pórushálózatok is, amelyek lehetővé teszik, hogy az üledékes kőzetekből kivonják az olajat? Ha igen, akkor az olajkivonás meggyorsításával nagy haszonnal kecsegtet a csudabogarak munkára fogása.^[94]

A talajvíz mozgása a baktériumvadászok másik célpontja. A columbiai (Észak-Carolina) US Geological Survey munkatársa, Francis Chappelle tanulmányozta a mély vízvezető rétegekben működő baktériumokat, és úgy találta, hogy a vasbontó baktériumok által létrehozott pórusok fokozhatják a vízáramlást, míg a kéntermelő baktériumok újra kicsaphatják az oldott vasat és bezárhatják a pórusokat. Parányi zsilipőrökhöz hasonlítja a mikrobákat, amint az igényeiknek megfelelően elindítják és elzárják az áramlást.^[95]

A tengeri kutatások során is hasonló kép kezdett kibontakozni. Nemcsak hogy élnek mikrobák a tengerfenéken, illetve benne, hanem az üledékes rétegeket is lakják az óceánfenék alatt. A nemzetközi Ocean Drilling Program (Óceáni Fúrási Program) olyan kőzeteket hozott

fel, amelyek a tengerfenék alatt közel egy kilométeres mélységben élettevékenység jeleit mutatják. A bristoli John Parkes és munkatársai a Földközi-tenger, az Atlanti- és a Csendes-óceán tíz helyszínéről vett mintákat tanulmányoztak.^[96] Ezúttal is gondos óvintézkedéseket tettek a szennyeződés elkerülésére. A magmintákat speciális, nitrogénnel elárasztott steril berendezésbe helyezték, és fűrésszel kivágták a középső szakaszukat. A minta vágásfelületeit ezután lánggal kezelték és kupakkal látták el. A magokat oxigénmentes környezetben, 4 °C-on tárolták, amíg néhány héttel később sor került laboratóriumi elemzésükre, amikor is tovább darabolták és tanulmányozták a mintákat.

Szenzációs eredmények születtek. A bristoli kutatók 750 méteres mélységig minden tanulmányozott mintában találtak mikrobákat. A tengerfenékben tanyázó mikrobakolóniák termékenyebbeknek bizonyultak, mint a kontinensek alatt talált társaik. Parkesnak mikroszkóp alatt sikerült közvetlenül számba venni a kőzetbe zárt baktériumokat, ami igazolta meghökkentő termékenységüket. A populációk létszáma köbcentiméterenként a felszín közelében több mint egymilliárdtól a mélyebb rétegek tízmilliójáig terjedt. Furcsa módon akad rá bizonyíték, hogy egy bizonyos mélység alatt ismét emelkedni kezdenek a számok, egyelőre ismeretlen nagyságig. Különösen nagy horderejű, hogy a baktériumok hozzávetőleg öt százalékát kapták osztódáson, ami egyértelműen bizonyította, hogy éltek, amikor felhozták őket a mélyből. Mi több, némelyikük még az elemzés idején is

életben volt, ezeket Parkesnak egy módosított túlnyomásos kuktaedényben sikerült laboratóriumi körülmények között tenyésztenie.

Ezekből a legutóbbi felfedezésekből kiviláglik, hogy a Föld egy mindenütt jelen lévő, eleven alvilággal rendelkezik, amelyet éppen csak elkezdünk felfedezni. Összességében félelmetes mennyiségű élőtömeg rejtőzhet odalent. Ha a baktériumok fél kilométeres mélységig, vagy az alatt is elszaporodtak, amint arra a vizsgálatokból következtetni lehet, akkor az egész bolygón összességében a Föld biomasszájának egytizedét tehetik ki. De még ez is alatta maradhat a valóságnak, mert egyes mikrobatípusok nagyobb mélységekben is vidáman élnek. Ha kiállnak $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ -t, akkor akár négy kilométerrel a föld, és hét kilométerrel az óceánfenék alá nyúlhat a mikrobabirodalom. Ha pedig, mint Parkes véli, $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ig tart a hőmérsékleti tartományuk, akkor még lejjebb is terjedhet a lakható övezetük.

Felvetődik a kérdés, hogy hogyan juthattak el először élő szervezetek ilyen mélységekbe. Felülről hatoltak át a kőzeteken és magával sodorta őket a talajvíz? Vagy réges-régen estek csapdába, amikor először kialakultak az üledékes kőzetek? Valószínűnek látszik, hogy bizonyos mértékig mindkét útvonalat követték. Csakhogy az ilyen magyarázatok abból a feltételezésből indulnak ki, hogy a felszíni élet a „normális”, a föld alatti pedig a szokatlan alkalmazkodás. De biztosra vehetjük, hogy ez így van? Nem lehetséges, hogy ez feje tetejére állított okoskodás, és éppen az ellenkezője felel meg az igazságnak?

Felszállás a Hádészből

Darwin alkalmi feltevése óta, miszerint az élet valamiféle meleg pocsolyában jött létre, a konvencionális tanítás a felszínhez kötődő jelenségnek tekinti az életet. A fortyogó mélység bioszférájának felfedezése azonban megrendítette ezt a nézetet. Ha az élet a Föld felszínétől távoli mélységekben is virulhat, talán lefelé kellene keresnünk az olvasztótégelyt, amelyben összekotyvasztották az első élőlényt.

Számos ok indokolja, miért látszik olyannyira ígéretes közegnek a tengerfenéken vagy még inkább az alatta fekvő üledékes kőzetekben lévő helysín az élet keletkezéséhez és korai evolúciójához. A legnyilvánvalóbb ilyen ok a kozmikus becsapódásoknak az előző fejezetben tárgyalt veszélye. A kései nehézbombázás ismételten hatékonyan sterilizálhatta a Föld felszínét. Az elgőzölgő kőzetekkel, elforró óceánokkal, megolvadt szárazföldekkel legalább tízméteres mélységig halálosak lehettek a viszonyok. Mélyebben azonban nagyon nagy becsapódásokat is átvészelhettek a mikroorganizmusok. A Föld felszínén a távoli múltban további kockázatot jelentett az ibolyántúli sugárzás. Az akkor még nem létező ózonpajzs hiányában halálosnak bizonyult a napfény. Mérhetetlen mennyiségű port okádhattak a jelenkoriaknál sokkal hevesebb vulkánkitörések. Valószínűleg igen nagyok voltak a sokáig a légkörben lebegő szemcsékkel összefüggő klimatikus ingadozások és a kozmikus bombázás által az atmoszféra

nyomásában előidézett változások. A felszín alatt azonban sokkal stabilabbak és egyenletesebbek lehetnek a feltételek.

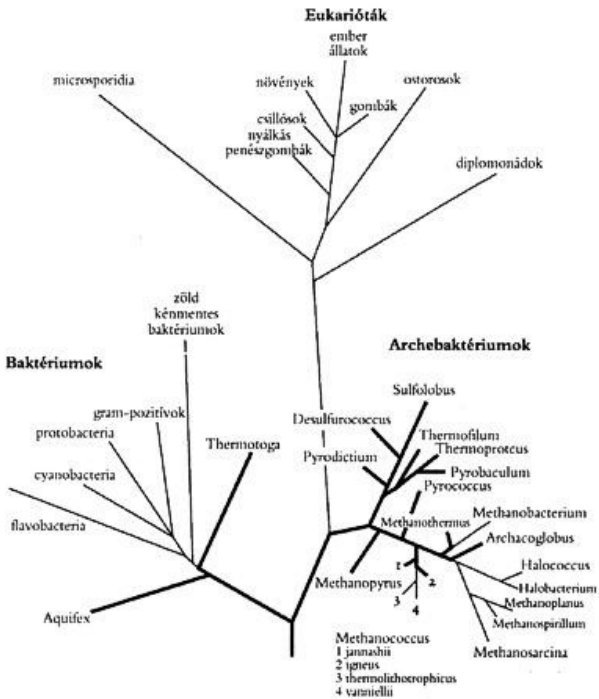
A mély helyszínek másik előnye, hogy rendelkezésre állnak az élet számára szükséges nyersanyagok. A Föld kérge manapság is folyamatosan választ ki hidrogént, metánt, hidrogén-szulfidot és más redukáló gázokat. Éppen az ilyesféle anyagok szükségesek biomolekulák hatékony előállításához. Nevezetes kísérletében Miller és Urey feltételezte, hogy a Föld ősi atmoszféráját ilyen redukáló gázok alkották, most azonban, hogy a geológusok inkább széndioxid és nitrogén keverékére szavaznak, nem tűnik túl biztatónak a felszíni ősseves elmélete. Ezzel szemben a felszín alatti birodalomban, különösen a vulkáni kürtők tőszomszédságában, a kéreg bőségesen kínálhatott redukáló vegyi anyagokat, köztük két vegyértékű vasat. Más tápanyagok, mint a kén és a mangán, ugyancsak nagy mennyiségben fordulnak elő a kőzetekben és a vulkáni kiömlésekben. A tengerfenék bazaltjának porózus jellege az alagutak és üregek labirintusával segíti elő a szerves anyagok összegyűlését, tagoltsága révén pedig hatalmas felszínt biztosít a reakciók katalizálásához. Mindez együttesen vitathatatlanul termékeny biokémiai környezetet alkot, amely várakozást kísérletek is igazolják. A geotermikusan fűtött óceánkéreg szimulációi sokkal több szerves anyagot eredményeztek, mint a hagyományos Miller-Urey-kísérletek.

A nyersanyagokhoz hasonlóan lényeges tényező az energia. A St. Louis-i Washington University munkatársa,

Everett Shock kiszámította a mélytengeri hidrotermikus kúrtók környékének energia- és entrópiamérlegét. „Hatalmas termodinamikai erő hajtja a szerves vegyületek képződését, ahogy a tengervíz és a hidrotermikus folyadék egyensúlytól távol álló keveréke egy stabilabb állapot felé halad” – magyarázza.^[97] Shock úgy találja, hogy 100-150 °C körül a legnagyobb a hozzáférhető energia, pontosan abban a hőmérsékleti tartományban, amelyben a hipertermofilek élnek. Ezek az organizmusok nemcsak könnyedén megcsapolhatják a roppant kémiai és hőenergia által kínált készleteket, hanem egyszerű szerves vegyületek felépítésével *nyerhetnek* is energiát. Ekkor lehet kifizetni a felszabadult energiával a termodinamikailag kedvezőtlen reakciókat, mint amilyen a peptidszintézis. Shock úgy becsüli, hogy a kúrtó körüli jellegzetes élet elképesztő, 2,5 kilogrammos óránkénti iramban történő biomassza-létrehozással aknázhatja ki a termodinamikus lelőhelyet. Ez szemben áll a felszíni élet által alkalmazott fotoszintézis vesződéses küzdelmével, ami speciális mechanizmusokat igényel a termodinamikai hátrányok legyűréséhez. Gyakran mondják, hogy ingyen nem lehet jóllakni. Úgy tűnik, a hidrotermikus mikrobák egyenesen fizetséget kapnak azért, hogy jóllakjanak! „Sehol másutt a Földön nem olyan élesen szembeszökő a geokémiai és a biológiai folyamatok közötti kapcsolat, mint a hidrotermikus rendszerekben” – vonja le a következtetést Shock.^[98]

Bármilyen meggyőzőek is legyenek azonban mindezek az érvek, az élet forró és mély kezdeteire egyáltalán nem a

kémia szolgáltatja a leglenyűgözőbb bizonyítékot, hanem a genetika. Mint azt az előző fejezetben kifejtettem, a jelenleg élő szervezetek génjei megörökítették a múlt egy darabját, és az egyetemes ős természetének megismeréséhez a molekuláris biológiához kell folyamodnunk. Milyen volt és hol élt? A génszekventálásnak a 3. fejezetben említett technikája, melynek úttörője Carl Woese, alkalmazható az élet fájának rekonstruálására és a különféle mikrobák közötti evolúciós távolság meghatározására. Az ilyen vizsgálatokból ki lehet következtetni, hogy a szervezetek mely csoportja fejlődött a legkevesebbet az idők során, azaz melyik hasonlít a leginkább a korai életre. Ennek a kutatásnak az eredményei egyenesen az archebaktériumokra mutatnak. Idézzük fel, hogy archebaktériumok alkotják az élet három nagy tartományának egyikét. Nagyon régen, valószínűleg már 3,8 milliárd évvel ezelőtt elvált a másik két tartománytól, a baktériumokétól és az eukariótákétól. De míg a legtöbb baktérium és eukarióta alapvető genetikai változásokon ment át, az archebaktériumok számára csak igen lassan ketyegett az evolúciós óra.^[99]



7.1. ábra

Élő kövületek. Az élet fájának ez a részlete azt ábrázolja, mennyire különültek el egymástól genetikailag a különféle fajok. Az ágak hosszúsága a genetikai eltávolodás mértékével arányos. A vastag vonalak a

hőkedvelő mikrobákat (hipertermofilek) jelölik. Látható, hogy a fa legrövidebb és legalacsonyabban fekvő ágait elfoglaló legkevésbé fejlett fajok kivétel nélkül hipertermofilek. Forrás: Evolution of Hydrothermal Ecosystems on Earth (and Mars?). Szerk.: Gregory Bock és Jamie Goode (Wiley & Sons Ltd, Chichester, 1996), a Novartis Foundation engedélyével.

A sok ismert archebaktérium faj némelyike azzal tűnik ki, hogy a többiekénél is lassabban halmozta fel a genetikai változásokat. Ezek az evolúciós maradiak olyan elnevezésekkel rendelkeznek, mint a *Pyrodictium* és a *Thermoproteus*. Karl Stetter és Susan Barns a 16SrRNS elemzésnek nevezett eljárás alkalmazásával tanulmányozta az ilyen archebaktériumokat, amely vizsgálat a riboszomális RNS egyik alegységére utal, amelyet természetes úton ki lehet vonni nem tenyésztett szervezetekből. A [7.1. ábra](#), amely Woese és munkatársai korábbi munkáján alapul, az élet fájának egy részén szemlélteti a legutóbbi eredményeket.^[100] A legszembetűnőbb, hogy a fa legalacsonyabban elhelyezkedő és legrövidebb ágait a termofilek és a hipertermofilek uralják. Vagyis a termikus óceáni kürtők körül csoportosuló és a forró felszín alatti kőzeteket lakó szervezetek afféle evolúciós csökevények. A gének egyértelmű üzenete úgy szól, hogy a hőkedvelő, mélységkedvelő mikrobák hasonlítanak a leginkább az egyetemes ősszervezetre.

Ez talán nem is akkora meglepetés. Míg a Föld felszíne

hihetetlenül átalakult a földtörténeti korszakok során, a felszín alatt kevesebb változás történt. Egyes helyszínek, mint a tengerfenék üledékes kőzetei és a víz alatti hidrotermikus kürtők, alig különböznek milliárd évekkel ezelőtti hasonmásaiktól. Ha az élet valamilyen forró, mély helyen kezdődött, nagy a valószínűsége, hogy az ilyen környezetek mindmáig folyamatosan lakottak. Állandó körülmények között az evolúció jelentősen lelassul, és okkal számíthatunk rá, hogy ezeknek a felszín alatti vidékeknek a lakói alig különböznek őseiktől. A talaj és a tengerfenék alatt lakozó, a forró vizekben a hidrotermikus kürtők körül összegyűlő mikrobák ilyenformán annak a viharos korszaknak lehetnek a hírmondói, amikor az élet igyekezett megtelepedni egy forró és veszedelmes bolygón.

Amikor először fedezték fel a hipertermofileket, a legtöbb mikrobiológus hajlamos volt rendellenességnek tekinteni őket, olyan különös szervezeteknek, amelyek valahogy nyilván befurakodtak bizonyos magas hőmérsékletű zugokba, és oly módon fejlődtek, hogy megbirkózhassanak a szokatlan körülményekkel. A jelenleg rendelkezésünkre álló bizonyítékok épp ennek a menetrendnek az ellenkezőjére utalnak: a legkorábbi mikroorganizmusok valamennyien termofilek voltak, és csak később alkalmazkodott egyikük-másikuk az alacsonyabb hőmérsékletre. Bizonyos föld alatti zugsugokban, ahol a körülmények a réges-régen uralkodó állapotokat idézik, még mindig találhatóak organizmusok, amelyek négy milliárd éven keresztül őrizték az őseredeti életmódot. Egy fekete füstölő félelmetes lehet számomra, vagy bármelyik másik

embernek, de egy olyasféle alvilági lénynek, mint a *Pyrodictium occultum* vagy a *Thermoproteus tenax* igazi paradicsom. Ezek a csudabogarak, ahogy jóllakottan gubbasztanak geotermikus kuckóikban, voltaképpen biológiai anyámasszony katonái, akik belecsimpaszzkodnak az élet bölcsőjébe, míg kalandosabb természetű rokonaik mindenfelé felkerekedtek és sokasodtak, és megtanultak megküzdeni az élet durvább valóságával a Föld felszínén vagy annak közelében. Amennyiben ez az elmélet helytálló, a mikrobák migrációja nem lefelé, hanem felfelé irányult. A föld alatti élet nem beásta magát oda, hanem az első pillanattól fogva ott volt. Az élet a mélységekből emelkedett fel.

Az élet mély és forró kezdeteiről szóló elméletet 1981-ben Jack Corliss (University of Maryland) vetette fel először,^[101] és Tommy Gold népszerűsítette az 1992-ben megjelent úttörő értekezésében^[102] *The deep hot biosphere* (A mély, forró bioszféra) címmel. Az elméletet eleinte ugyan nem csekély szkepticizmussal fogadták, de aztán számos szakterület tudósai körében gyorsan nőtt az elfogadottsága. A molekuláris biológiából is felvonultathatók mellette érvek. A hipertermofilek például sajátos módon dolgozzák fel a szenet, egy egyszerű és meglehetősen primitív kémiai ciklus révén. Az élet fáján legmélyebben eredő szervezetek egyaránt különleges hőlékeshullám-fehérjéket használnak a vulkáni rendszerek mellett várható hirtelen hőmérséklet-ingadozások elleni védekezésül. Ezek a fehérjék a vulkáni kiömlésekben gyakori fémeket, például cinket és molibdént tartalmaznak.

További alátámasztást nyújt a mikrobák hőmérsékleti adottságainak a részletes elemzése. Mint láttuk, sok hipertermofil tartozik az archebaktériumok közé. Az archebaktériumoknál általában fejlettebb és komplexebb eukarióták alig egy maroknyit számlálnak. Ami a baktériumokat illeti, néhány hipertermofil, sok termofil és még több mezofil tartozik közéjük. Mindent összevetve a populációk összetétele arra utal, hogy az eukarióták elsődlegesen mindig is hűvösségkedvelő lények voltak, amelyek közül némelyik alkalmazkodott a forró környezethez, míg az archebaktériumok és a baktériumok eleve a meleget részesítették előnyben, csak némelyikük indult lefelé a hőmérsékleti skálán.

Az archebaktériumok genetikai felépítése cáfolhatatlanul arra utal, hogy a fortyogó mélység ősi hírmondói. Ebben az esetben ezen mikrobák révén egy pillantást vethetünk a távoli múlt életére és Földjére. De folyamodhatunk fordított okfejtéshez is: ha az archebaktériumok életmódja megegyezik azzal, amit a távoli múlttól tudunk, akkor ez alátámasztja, hogy ezek a szervezetek afféle miniatűr időkapszulák.

És egyenek követ

Bármennyire jogosak is a veszélyeztetett fajokat és a biodiverzitás elvesztését illető félelmeink, az élet összességében a markában tartja bolygónkat. Az idők során a Föld, minden változása mellett, megfelelt a biológia igényeinek. Legalább 3,5 milliárd éven keresztül az

elképzelhetetlenül hatalmas pusztítást végző és sok fajt kiirtó kisbolygó-becsapódások sem tudták az ökoszférát egészen kiküszöbölni. A földi élet ma is olyan erőteljességet és változatosságot mutat, ami szavatolja, hogy valamilyen formában a legnagyobb csapásokat követően is fennmarad.

Nem vethető össze ezzel a jelenlegi állapottal a 3,8 milliárd évvel ezelőtti helyzet. A megtelepedésért küzdő mikrobák léte nemegyszer hajszálon múlhatott. Mielőtt változatossá kezdtek válni, ami némi védelmet jelent a váratlan események hatásai ellen, az óriás kisbolygók mellett más veszedelmek között is vesszőt kellett futniuk. A táplálékválság, pontosabban energiakrízis jelentette a legnyomasztóbb nehézséget. A létező élet bőségének hiányában nem hagyatkozhattak szerves táplálékra, így máshonnan kellett energiát szerezniük. Két forrás kínálkozott: a napfény és a vegyi anyagok. Tekintettel a fotoszintézis folyamatának bonyolultságára, nyilván a kemotrófia bizonyult kivitelezhető módszernek.

A kemotrófiára utaló első jelzést egy orosz bakteriológus, bizonyos Szergej Vinogradszkij munkásságában lelhetjük fel, aki az 1880-as években tanulmányozta a kénes forrásokban tenyésztő fonalbaktériumokat. Úgy találta, hogy a *Beggiatoa* nemzetség ként eszik. Ez valójában csak végső eszközként történik meg. Vinogradszkijnek sikerült tenyésztenie a baktériumokat vízben oldott hidrogén-szulfid közegben. Bár ez az oldat a legtöbb szervezet számára halálos mérég, a *Beggiatoa* nyilvánvalóan előszeretettel fogyasztotta. A nyers ként sem utasították vissza, de csak

ha kénytelenek voltak ráfanyalodni.

Vinogradskij jelentős felfedezést tett. Mindaddig a biológusok feltételezték, hogy valamennyi szervezet vagy más szervezetek részeivel táplálkozik, vagy fotoszintézisből nyeri az energiáját. Ám itt volt egy mikroba, amelyik hidrogén-szulfid- vagy kénétrendből is vidáman megszerzi a betevőt, noha ezek teljesen szervesetlen anyagok. Vinogradskij találta ki az „autotróf” szót azon szervezetek számára, amelyek szervesetlen forrásokból nyerik az energiájukat. A sors fitoraként aztán kiderült, hogy a *Beggiatoa* végső soron nem is igazi autotróf, de Vinogradskij kétségbevonhatatlanul jó nyomon járt, és sok kemotróf mikrobát fedeztek fel azóta. Egyikük a figyelemre méltó *Thiobacillus thio-oxidans*, a csatornahálózatokat romba döntő kénfaló baktérium.

A kemotrófok szén-dioxidból készítenek biomasszát, ez a vegyület pedig mindig elegendő mennyiségben állt rendelkezésre a Földön, akár gáz, akár vízben oldott formában. Az energiát sokféle kémiai reakció szolgáltathatja. Ezek egyike a kén vagy hidrogén-szulfid oxidációja, ami közkedvelt eljárás a felszínlakó baktériumok körében, amelyek a levegőből jutnak oxigénhez. Számunkra ezúttal érdekesebbek az anaerobok, az oxigényűlölők, mivel az egykori Földről hiányzott a szabad oxigén. Az eddig azonosított mintegy 50 hipertermofil-faj közül a legmagasabb növekedési hőmérsékletet mutató organizmusok közé tartozik a *Pyrodictium* és a *Pyrobaculum*, amelyek egyáltalán nem foglalkoznak oxigénnel, ami összhangban áll azzal az

elmélettel, hogy ezek a hőkedvelő archeobaktériumok egy réges-régi oxigénmentes korszak élő kövületei. Kén és hidrogén egyesítéséből nyerik energiájukat, amivel hidrogén-szulfidot állítanak elő.

A kén, amely sok fontos biomolekulában megtalálható, jelentéktelenebb, de fontos elem a jelenleg létező életben. A kénanyagcserét folytató baktériumok közé tartozik a legősibb hipertermofilek némelyike, ami az élet kialakulásában játszott kulcsszerepére utal. A kén régies neve kénkő; ördögi anyagként tartották számon, vad vulkánokkal és a pokollal társították. Az ősi Földön közönséges elemnek számított, különösen hidrogén-szulfid formájában. Van ebben valami felülmúlhatatlanul csúfondáros: nem elég, hogy az igazi Édenkert nagy valószínűséggel a Hádész pokla volt, még az is kiderül, hogy az élet kénkőből jött létre!

A vas is az élet számára fontos elemek közé tartozik. Gyakran fordul elő kénnel együtt, pirit ásvány (kénkovand) formájában. A piritet tételezi fel a biogenezis fő katalizátorának Gunter Wächterhäuser,^[103] míg Mike Russellnek az 5. fejezetben leírt elmélete szerint a vasszulfid membránoknak jut döntő szerep az élet keletkezésében. A pirit mindmáig a kemotróf *Thiobacillus ferro-oxidans* élelemforrása; ez a mikroba a vas és a kén alkotóelem oxidációjából egyaránt nyer energiát. Mellesleg, a bányamérnökök nagyon is a tudatában vannak ezen szorgos kis organizmus tevékenységének. A melléktermékként létrehozott három vegyértékű vas több vasat és ként szabadít fel a piritből, és létrehozza a

reakciók elszabaduló ciklusát. Ahol nagy mennyiségű pirit fordul elő egy hányóban, szénbányában vagy szénérben, a fenti folyamat korrodálhatja a gépeket és a „savas bányavíz-telenítés”-ként emlegetett súlyos szennyezési problémát okozza. A *Thiobacillus ferro-oxidans* más ásványi szulfidokat is megemészthet, legyenek azok réz-, ón- vagy akár urániumalapúak, és ezt a tulajdonságát használják ki ásványderítésnél. Egy másik vasevő kemotróf, amelynek jelenléte tetten érhető, a *Gallionella*, a vasban gazdag vízfolyások lakója; az oldható vastartalmú sókat oldhatatlan három vegyértékű vasállapotúvá alakítja át, ez eredményezi a víz jellegzetes rozsdaszínét. A kén és a vas könnyen lehetett a bába az élet születésénél a Föld kérgében, és továbbra is gazdag szüretet biztosítanak egyes mai mikroorganizmusoknak. Mikor az olvasó legközelebb megpillant egy rozsdásan barnálló vízfolyást, jusson eszébe, hogy olyan folyamat szemtanúja, amely közvetlen kapcsolatban áll az élet eredetével.

A mikrobák sok másféle kemotrofikus utat is feltártak. A bámulatos archebaktériumok három csoportba sorolhatók: termofilek, halofilek (sókedvelők) és metanogének. Ez utóbbiak metán előállításából nyerik az energiájukat, ami az anyagcsere annyira alapvető formája, hogy még mindig széles körben elterjedt a mikrobák világában. A vegyész hidrogénből és széndioxidból közvetlenül tud metánt készíteni. Nos, pontosan ezt teszi a *Methanothermus*, ez az Izland hévízforrásait lakó, pálcika alakú mikroba. Legutóbb a richlandi (Washington) Pacific Northwest Laboratory munkatársai, Todd Stevens és Jim McKinley

botlottak a Columbia folyó környékén folytatott kutatófúrás során olyan mikrobákba, melyek mélyen a föld alatt művelnek valami hasonlót.^[104] Akkor figyeltek fel a föld alatti metanogének jelenlétére, amikor robbanás következett be egy bazaltréteg átfúrásakor. A vizsgálat során Stevens és munkatársai felfedezték, hogy a mélyben fekvő kőzetek hidrogént bocsátanak ki. A hidrogéngáz erősen robbanékony a levegőben, és meglepetésként ért, mikor értesültem, hogy természetes körülmények között előfordulhat manapság ilyesmi a Földön. Láthatólag különféle kémiai folyamatok idézik elő, például víz behatolása vasban gazdag szilikátokba. Meghökkenítő módon vannak bizonyos helyek Ománban, Kaliforniában és Japánban, ahol a hidrogén nagyon magas koncentrációban szivárog a felszínre.

A hidrogéngáz kedvelt energiaforrás a metanogének számára, amelyek egyesítik azt oldott állapotú széndioxiddal és közben biomasszát készítenek. Ez a folyamat vélhetőleg az anyagcsere legrégebbi formája. A felsoroltak egytől egyig olyan kemotrófok, amelyek valóban függetlenek a felszíni élettől, és még közvetve sem támaszkodnak a fotoszintézis termékeire. Ilyenformán támogathattak egy mélyen a felszín alatt, a teljes sötétségben viruló táplálék- és élettáncot. Ez a feltételezés nem meddő találgatás. Stevensnek és McKinleynek sikerült kitenyésztenie a fúrólukból nyert baktériumokat, és megállapították, hogy némelyik mikroba kezdettől fogva parazita módon élőszködik a többiek által termelt szerves anyagokon. A tudósok úgy vélik, hogy egy komplex

ökoszisztéma lakozik a Columbia folyó bazaltjában, és az ékesszóló SLIME (*Subsurface Lithoautotrophic Microbial Ecosystem*: felszín alatti litoautotróf mikroba-ökoszisztéma; *slime*: iszap) betűszót találták ki a jelölésére. Szinte bizonyosra vehető, hogy másutt is vannak felfedezésre váró SLIME-ok.

A metanogének foglalják el az archebaktériumok fájának egyik legalacsonyabb ágát, így értelemszerűen a legkorábbi életformák közé tartoznak. Az egyik metanogén, a *Methanopyrus* rendelkezik az egyik legmagasabb fejlődési hőmérséklettel (110 °C) és egy olyan sajátos membránvegyületet tartalmaz, ami a legtöbb archebaktériumban megtalálható lipidmembránok előfutárának tűnik. Mindezek a jellegzetességek arra utalnak, hogy a *Methanopyrus* az ez idáig élénk került legprimitívebb szervezettípusok közé tartozhat.

Annak, hogy rekonstruálhassuk az élet fájának mikrobatövét, az a legnagyobb akadálya, hogy fogalmunk sincs, miféle élő szervezetek lappanghatnak felfedezetlenül, talán holmi rejtett SLIME-ban. A mikrobiológusok nem csak új fajokat találnak folyamatosan, de alkalmanként egész új birodalmakat. A Yellowstone Nemzeti Parkban az Obsidian-tóból mostanában került elő két mindeddig ismeretlen archebaktérium, amelyek egy elkülönülő, alacsonyan fekvő ágat foglalnak el az eukarióták és az archebaktériumfajok többi ága között. A Susan Barns, Norman Pace és munkatársaik által végzett szekventálás olyan különálló csoport létét jelzi, ami a legprimitívebb ismert mikrobabirodalmat reprezentálhatja.

Természetesen egyetlen jelenlegi szervezet sem lehet a pontos mása egykori őseinek. Ilyen mérhetetlen időtartam során elkerülhetetlen bizonyos evolúciós módosulás. Mindazonáltal megpróbálhatjuk megbecsülni, melyik ismert mikroba mutathatja a legközelebbi hasonlóságot az egyetemes őshöz. Az egyik valószínűsíthető jelölt a kénredukáló *Pyrodictium*; jól fejlődik 110 °C-on, ami mélyben élő, termofil ősrre utal. Telepei gömb alakú élőlények parányi csövecskékkel összekötött különös hálózatai. Az ember önkéntelenül is eltűnődik, efféle szövevényes hálózatokat laktak-e távoli elődeink valami föld alatti forró üregben, úgy négymilliárd évvel ezelőtt.

A többi már történelem

Összegezve: a gének arról tanúskodnak, hogy az egyetemes ős mélyen a Föld felszíne alatt élt, jóval 100 °C fölötti hőmérsékleten, és valószínűleg ként evett. Ám nyilvánvaló, hogy ez a kis lény már kifinomult életforma volt, a kódolt fehérjeszintézishez hasonló komplex sajátosságokkal. Mint azt már hangsúlyoztam, nem az első élőlény volt az egyetemes ős. Hosszú evolúciós történetnek kellett megelőznie. Szinte semmit nem tudunk azokról körülményekről, amelyek az első élőlényt összekapcsolják az egyetemes őssel.

Csábító lenne találgatásokba bocsátkozni arról, hogy az élet egy geotermikusan fűtött, ásványi anyagokban gazdag, föld alatti zugolyban kezdődött, és ott helyben fejlődött az egyetemes ősig, mielőtt birtokába vette volna az egész

bolygót. Csakhogy nem tudjuk, valóban így esett-e. Az élet egy teljességgel eltérő környezetben is kialakulhatott, hogy aztán csak a későbbiek folyamán hatoljon le a forró, felszín alatti övezetekbe. A 6. fejezetben ismertettem Norman Sleep és mások arra vonatkozó elgondolását, hogy az erőteljes kozmikus becsapódások nyomán kiáradó kőzetgőzök hatására időszakonként sterilizálódhatott a Föld felszíne. E Sziszüphosz-elmélet szerint az élet újra és újra megsemmisült, csak hogy ismét felbukkanjon, mint a fönixmadár, önnön hamujából. A kozmikus bombázás csillapodásával időről időre még kiégett a felszín, a mélyen fekvő kőzetrétegekben azonban menedéket lehetett találni. Ezek a mélyen fekvő, geotermikusan forró kőzetek csak a hipertermofileknek nyújthattak otthont; ebben a közegben még a mezofilek is elpusztultak. Ezután semmi meglepő nincs abban, hogy egy hipertermofil lehetett az egyetlenős: ezek a szervezetek tanyáznak ugyanis a kozmikus becsapódások hőhullámainak hatósugaránál mélyebben fekvő rétegekben. A termofileket esetleg megelőző, hidegkedvelő felszíni mikroba megfőtt a becsapódások nyomán, az élet fáján őket képviselő ágak hirtelen megszakadtak. Amennyiben helytálló ez a forgatókönyv, akkor a hipertermofilek elhelyezkedése az élet ismert fájának tövénél nem szükségszerűen azt jelzi, hogy az élet forrón és mélyen kezdődött, csak azt, hogy a Föld áthaladt a meteorikus zárótűz által előidézett hőmérsékleti „útszűkületen”.^[105]

Az élet egy korábbi szakaszára utaló jelzés lehet azoknak az autotróf baktériumoknak a felfedezése, amelyek nem

csak a nulláról indulva, szén-dioxid felhasználásával képesek biomasszát előállítani, hanem komplexebb szerves anyagok, például ecetsav használatával is. Az ilyen szervezeteket mixotrófoknak nevezzük; vagy fényt használnak energiaforrásként, mint a zöld kénbaktériumok, vagy valamilyen kémiai reakciót, mondjuk a kén vagy a hidrogén oxidációját. Ha az ősi Föld felszínét a kozmikus becsapódásokból származó szerves anyagok borították, az bőséges nyersanyagkészletet jelenthetett. A legelső szervezetek talán felszínlakó mixotrófok voltak, és egy maroknyi mikrobában élnek tovább az anyagcsereszokásaik. Természetesen, ugyanezen érvelés alapján, az élet elindulhatott magukban az üstökösökben is, mely elképzelésre a 9. fejezetben még visszatérek.

Bár nem tudjuk megjelölni, hogy végső soron hol jött létre az élet, egyre valószínűbbnek látszik, hogy a pusztító kozmikus bombázás után az élet a tengerfenéken vagy alatta található helyszínekre szorult vissza, akár vulkáni kürtők közelében, akár hidrotermikus rendszerekben. Miután az élet biztonságban berendezkedett egy ilyen helyen, már nyitva állt előtte az út a burjánzáshoz és a változatossá váláshoz. Bár az események alatt következő menete jórészt megint csak feltételezés, úgy vélem, valahogy így mehetett végbe, ami eddig kimaradt a történetből. A legkorábbi mikrobák hipertermofilek voltak, melyek 100 és 150 °C közötti hőmérsékleten érezték jól magukat. Legalább egy kilométer mélységben lakoztak a felszín alatt, valószínűleg a tengerfenéken, de még valószínűbb, hogy az alatta található porózus kőzetekben. A

szuperforró vízben lubickolva, ásványokkal jóllakottan, vasat, ként, hidrogént és más hozzáférhető anyagokat fogyasztottak és dolgoztak fel, ezekből a primitív és kevésbé hatékony kémiai ciklusokból szabadítottak fel energiát. Ezek a korai sejtek kezdetleges kövők voltak. Sem a fény, sem az oxigén nem játszott szerepet az anyagcseréjükben. Szerves anyagokra sem volt szükségük; közvetlenül a kőzetekből és vízben oldott széndioxidból elégítették ki az igényeiket.

Az első mikrobakolóniának az egész világ anyag- és energiakészlete a rendelkezésére állt, amiért is szédületes sebességgel terjedhetett. A robbanásszerű terjedés folytán a mikrobák gyorsan behatoltak minden elérhető üregbe. Konkurencia híján gyorsan megörökölhették volna a Földet. Csakhogy, tekintettel a népességrobbanásra, a kolónia hamarosan elérte élőhelye határait. Mivel az emelkedő hőmérséklet megakadályozta, hogy mélyebbre hatoljanak, a hidegebb felszíni rétegekben pedig képtelenek voltak szaporodni, a mikrobák csak vízszintesen terjedhettek, a tengeri vulkáni hátságok mentén, és oldalvást a tengerfenék bazaltján át.

Egy bizonyos szakaszban, talán 3,8 milliárd évvel ezelőtt, elérték az első nagy evolúciós elágazást, amikor a mikrobák egy csoportja hirtelen azon kapta magát, hogy bizonyos geológiai mozgások, például vulkánkitörés vagy földrengés következtében kívül rekedt forró és meghitt mennyországon. A fő teleptől elszigetelt és hidegebb övezetben veszteglő szinte valamennyi mikroba szunnyadó állapotba került vagy elpusztult, membránjuk ugyanis túl

merev volt ahhoz, hogy az anyagcseréjük ezen az alacsonyabb hőmérsékleten működjön. Ám egy szerencsés mutáció, amelyiknek történetesen rugalmasabb volt a membránja, életben maradt és sokszorozódott. A mutáns mikroba jelentette az átmenetet a hűvösebb körülményekhez, és kitűzte a bolygó lakatlan felszínére vezető utat. A föld alatti birodalmukba kényelmesen bezárkózott eredeti kolónia tagjai számára pedig mindmáig ugyanúgy folytatódik az élet.

Korai kulcsfejeményként egyes szervezetek a vegyi folyamatokból nyerhető energiáról átnyergeltek a fényre, melynek révén az élet elterjedhetett a felszínen. Az első ilyen „fototrófok” valószínűleg a modern klorofill alapú fotoszintézisnél kezdetlegesebb eljárást alkalmaztak. Egyes holt-tengeri archeobaktériumok még mindig a fotoszintézis meglehetősen primitív formáját alkalmazzák, ami egy, az A-vitaminnal rokon vörös anyagra épül. A napfény igazi befogása azokkal a baktériumokkal kezdődött, amelyek felfedezték, hogyan szakítsanak ki szoláris fotonokkal gerjesztve elektronokat az ásványokból, és hogyan használják a tárolt energiát szerves vegyületek készítésére. A folyamat későbbi tökéletesedése kiszabadította a baktériumokat az ásványfüggőségből, mivel képesek lettek rá, hogy a vízből nyerjenek ki elektronokat, aminek következményeként oxigén szabadult fel. Ebben a leleményes eljárásban a klorofill számított a döntő tényezőnek; az az anyag, amitől zöldellnek a növények. Csak vízre, szén-dioxidra és fényre van szükség, és zöldbe borul az egész bolygó.

Még mindig nem kaptunk azonban választ arra, hogyan és mikor jött létre a három nagy tartomány: az archebaktériumoké, a baktériumoké és az eukariótáké. Valószínűnek tűnik, hogy az élet fáján a nagy elágazás az archebaktériumok és a baktériumok között a fotoszintézis „feltalálása” előtt következett be, talán már 3,9 vagy 4 milliárd évvel ezelőtt – azaz igencsak a kozmikus nehézbombázás időszakában. A bizonyítékok arra utalnak, hogy az archebaktériumok a legrégebbi és legkezdetlegesebb szervezetek, míg a baktériumok valamivel később jelentek meg. Az archebaktériumok és a baktériumok között olyan széles és mély szakadék tátong, hogy igazán soha nem számítottak riválisoknak; még manapság, több milliárd évnyi evolúció után is alapvetően eltérő élettereket foglalnak el. Végezetül, valószínűleg akkor következett be az eukarióták birodalmát létrehozó mély szakadás, amikor valamelyest hűvösebbre fordultak a körülmények. Bizonyos okból, talán mert örökösen egy kevésbé állandó környezet kihívásaival kellett szembenézniük, az alacsonyabb hőmérsékleten élő eukarióták sokkal gyorsabban fejlődtek. Az élet rákövetkező virulása, kibomlása fajok sokaságává és hihetetlen biológiai komplexitássá, közvetlenül az élet fájának eukarióta elágazásából ered. E nagy horderejű lépések nélkül ma valószínűleg nem élne a Földön gondolkodó lény, aki mindennek a jelentőségén eltűnődhetne.

8. MARS: VÖRÖS ÉS HALOTT?

Azt, hogy a Marsot valamiféle élőlények lakják, legalább olyan bizonyosságnak kell tekintenünk, mint amennyire bizonytalanok vagyunk e lények pontos mibenlétét illetően.

PERCIVAL LOWELL, 1906^[106]

1996. augusztus 7-én Bill Clinton elnök szembenézett a világsajtóval és illően fellengzős kifejezésekkel bejelentette, hogy a NASA birtokába került bizonyítékok szerint van élet a Marson. Clinton arra a felfedezésre utalt, hogy egy 1984-ben az Antarktison talált marsi meteor talán életjeleket is tartalmazhat. Azzal a megjegyzéssel folytatta, hogy ha ez a meghökkentő felfedezés igaznak bizonyul, akkor döntően megváltoztatja az emberiség kapcsolatát a kozmosszal.

A marsbéli élet lehetősége hosszú múltra tekinthet vissza. A tizenhetedik és a tizennyolcadik században tudósok, filozófusok, mi több, teológusok is bőségesen tűnődtek a marsi, vénuszi és más, Földön kívüli lényekről. A tizenkilencedik század végére azonban a csillagászok már sokkal kétkedőbben Viszonyultak a más bolygókon létrejött élet kérdéséhez. Mindazonáltal 1877-ben Giovanni Schiaparelli olasz csillagász bejelentette, hogy egyenes vonalából álló mintázatot fedezett fel a Mars felszínén. A „csatornák” jelentésű „canali” olasz szót használta ezeknek a domborzati sajátosságoknak a jelölésére. Az Egyesült Államokban Percival Lowell és mások lecsaptak az ötletre,

és azt állították, hogy Schiaparelli csatornái valójában mesterséges csatornák. Lowell úgy vélekedett, hogy a marslakók a kiszikkadt felszínnek a sarki jégsapkákról származó olvadékkal történő öntözésére építették a csatornákat. A csatornahálózat feltérképezésére obszervatóriumot létesített az arizonai Flagstaffban. Lowell haldokló, kiszáradóban lévő bolygónak tartotta a Marsot. Ebből következően az intelligens marslakók igencsak kétségbeejtő helyzetben lehetnek és kénytelenek kiterjedt öntözőrendszert létesíteni. A haldokló bolygó és a mi zöldellő, lakályos bolygónk felé forduló irigykedő marsi tekintetek témáját ragyogóan aknáztta ki H. G. Wells híres regényében, az 1898-ban megjelent *War of the Worlds*ben (Világok háborúja).

Kevés csillagász osztotta Lowell elképzelését a csatornaépítő marslakókról, és ahogy javult a megfigyelések minősége, úgy csökkent az esély, hogy életet találnak a Marson. Egyes tudósok azonban továbbra is meggyőződéssel vallották, hogy a Marson létezik a vegetáció primitív formája, talán egyfajta zuzmó, és az időszakos színváltozásokat hozták fel rá bizonyítékkul. Ám az űrkorszak beköszöntével még ez a szerény lehetőség is elenyészett. A vörös bolygóhoz küldött szondák nyomát sem találták életnek, csatornákról nem is beszélve.

1977-ben végül a NASA közvetlen vizsgálatot folytatott a Viking űrszondapáros leszállításával a Mars felszínére. A szondákat kifejezetten az élet keresésére tervezték. Addigra már kevesen reménykedtek abban, hogy néhány talajlakó mikrobán kívül más, fejlettebb életforma is

előkerülne. A Viking adatai megerősítették ezt a szkeptikus véleményt. A talajvizsgálatokkal nem sikerült meggyőző bizonyítékot találni marsi mikroba léte. A vörös bolygót, sokak csalódására, halottnak nyilvánították.

A Viking útja után húsz éven át a tudományos-fantasztikus irodalom kategóriájába sorolták a marsi élet elképzelését. És ma sem lenne másképp, ha időközben nem bukkantak volna egy sor meghökkentő felfedezésre – nem a Marson, hanem itt, a Földön. Ezek a felfedezések egészen új megvilágításba helyezték a kérdést. Jelenleg úgy tűnik, mintha a tudósok egy kicsit elkapkodták volna, amikor a Marsot kihúzták az élet számára szóba jöhető lakhelyek listájáról.

Nem éppen üdülőhely

A Mars kétségkívül látványos bolygó. Ahogy baljós, mélyvörös árnyalatban ragyog az éjszakai égbolton, az embernek az az érzése támad, hogy rászolgál a háború ókori istenének nevére. Fehér sarki sapkák és nagy homályos foltok bontakoztak ki a távcsövek előtt. Alkalmanként porviharok söpörnek végig az egész bolygón. Űrszondák közelképei kráterekkel pettyezett, hatalmas szurdokokkal és völgyekkel szabdaltságot mutatnak. Óriási, kialudt vulkánok tarkítják a tájat. A terep az ausztrál sivatag legkietlenebb részeire emlékeztet: okkervörös talaj kövekkel és dűnékbe hordott homokkal teleszórva. A narancsszínű égbolt alatt elterülő táj bágyadt napfényben fürdik.

Az élet szempontjából a Marson jelen van minden elképzelhető kockázat. A hőmérséklet szinte mindig fagypont alatt jár, és akár $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ig is süllyedhet. A főként szén-dioxidból és nyomokban előforduló oxigénből és nitrogénből álló atmoszféra szánalmasan vékony; a légnyomás nem nagyobb 7,5 millibarnál, vagyis annyi, mint 35 000 méter magasan a Földön, amit már a világűr szélének tekintenek. Mivel nincs védelmező ózonréteg, a felszín a Nap halálos ibolyántúli sugaraiban fürdik. A talaj maróan oxidáló, és olyan száraz, hogy ahhoz képest a Szahara valóságos mocsár. Ami azt illeti, ha a marsi atmoszféra teljes vízpáratartalma egyszerre a talajra zúdulna, az épp csak megnyirkosítaná a talajt. A szárazság teszi olyannyira félelmetessé a homokviharokat. Ha feltámad az olykor az óránkénti 650 kilométeres sebességet is elérő szél, 50 kilométeres magasságig felkavarodik a por. Mindent összevéve, a Mars nem az a kimondott üdülőhely.

A bolygón uralkodó kellemetlen viszonyok alapvetően a kicsiny méretére vezethetők vissza. Átmérője a Földének hozzávetőleg a fele, gravitációja a Földének mindössze 38 százaléka. Ennek következményeként légkörének legnagyobb része elillan az űrbe. Az alacsony nyomás még fagypont fölött is meggátolja a folyékony víz létezését a felszínen; ha a Marson kitöltenénk egy csésze teát, azonnal elpárologna. A vékony atmoszféra egyúttal jelentősen csökkenti az üvegházhatásból adódó felmelegedést. A hideget fokozza a bolygó átlagosan 228 millió kilométeres távolsága a Naptól, vagyis mintegy másfélszer messzebb

van tőle, mint a Föld.

Merő időpocsékolásnak vélhetnénk tehát az élet keresését egy ilyen fagyos és száraz bolygón. Csakhogy az 1970-es években, amikor a Viking programot tervezték, a tudósok már tudták, hogy egyes baktériumok Az Antarktiszéhoz hasonló hideg, száraz körülmények között is életben maradhatnak, így a marsi talajban esetlegesen fellelhető mikrobaélet utáni kutatásra tervezték meg a szonda által elvégzendő kísérletsorozatot. Robotkarokkal látták el a leszállóegységeket, melyekkel földmintát vételezhettek a minilaboratóriumban sorra kerülő elemzés számára.

Három-három kísérletet hajtottak végre a két szondán. Először a gázcserélődési kísérletre került sor. Abból állt, hogy tápoldatot öntöttek a talajmintákra és figyelték, milyen gázok szabadulnak fel. Mielőtt a tápanyagokat hozzáadták volna, a mintákat vízpárának tették ki. A tudósok meglepetésére ez a kezdeti lépés erőteljes választ váltott ki, ami tetemes mennyiségű oxigén kibocsátásával járt, némi nitrogén és szén-dioxid társaságában. Napfénynek kitett és kövek alól vett talajminták esetében is hasonló eredményeket kaptak. Ha a talajt előmelegítették 145 °C-ra, mely hőmérsékleten minden ismert földi mikroba elpusztul, mérséklődött az oxigén-kibocsátás, bár ennek az eredménynek a megbízhatóságával kapcsolatban kétségek merültek fel. Amikor aztán ténylegesen hozzáadták a tápoldatot, további bonyolult, de értelmezhető rend nélküli gázcsere zajlott le. Annyi bizonyos, a marsi talaj egyáltalán nem úgy viselkedett, mint a földi talaj. A programban részt vevő tudósok némiképp zavarba jöttek,

és arra a következtetésre jutottak, hogy a Mars felszíne kémiaailag rendkívül potens, úgyhogy a víz egyszerű hozzáadására is pezsegni kezd a talaj. A történetek magyarázatához nincs szükség mikrobákra, bár az igazat megvallva, a gázcserélődési kísérlet nem zárta ki a létüket. Az eredményeket a legjobb esetben is többféleképp lehetett értelmezni.

Azután következett a radioaktív tápoldatos kísérlet. Ennek során is tápoldatot adtak a talajhoz, de eltérő összetétellel. A tápoldat radioaktív nyomjelző szénizotópot tartalmazott, és folyamatosan mérték a felszabadult gázok radioaktivitását. Az alapfeltételezés szerint a szénfeldolgozó esetleges marsi szervezetek szén-dioxidot szabadítanak fel, és valamennyi radioaktív gázt hoznának létre, amit, a kellő érzékenységgel, észlelni lehetne. A kísérlet végül pozitív eredményt hozott. Ráadásul, amikor a talajt erősen hevítették, negatív lett az eredmény, pontosan úgy, ahogy az mikroorganizmusok működése esetén várható.

Harmadszorra a hőbontásos vizsgálatot végezték el. Ez bizonyos értelemben az előző kísérlet fordítottja volt. A talajmintákat radioaktív szén-dioxidból álló szimulált légkör hatásának tették ki, a Napot pedig erős fényforrás helyettesítette. A cél az volt, hogy lássák, felhasználnak-e szén-dioxidot a feltételezett marsi szervezetek az életműködésük során, úgy, ahogy például a földi növények széndioxidot használnak fel. Ez a kísérlet néhány esetben ugyancsak pozitív eredményt hozott. A minta 170 °C-ra hevítése csökkentette, de nem szüntette meg egészen a reakciót.

Végeredményben a Viking kísérletei akár valamiféle közvetett bizonyítéknak is tekinthetők a marsi talajban élő mikrobák létezésére. Ám a NASA tudósai szinte egyöntetűen az ellenkező következtetésre jutottak. A talajminták viselkedésének bonyolultsága és váratlansága kétségbe vonta az egyértelmű biológiai értelmezést, és az az álláspont alakult ki, hogy valószínűleg a szokatlan kémiai folyamatok a talajban és feltehetőleg a vele járó erős oxidálás hozta a kapott eredményeket. Ezt a következtetést támasztotta alá, hogy a Viking nem lelte nyomát szerves anyagoknak a marsi talajban, ami különös, mivel ha nincs is élet a Mars felszínén, az űrből kellett volna odajutnia valamennyi szerves anyagnak. Ezt a tényt az erőteljes ibolyántúli sugárzással és az oxidáló hatású talajjal hozták összefüggésbe, ami bizonyára felbontott minden, a felszínen szétszórt szerves molekulát.

Összességében a Viking kísérleteknek nem sikerült egyértelmű bizonyítékot szolgáltatniuk a marsi élet létezésére, és a program hivatalos eredménye úgy szólt, hogy a Mars élettelen bolygó. Csakhogy nem szabad megfeledkeznünk arról, hogy a bizonyíték hiánya nem azonos a hiány bizonyítékával. Számos oka lehet annak, hogy miért nem sikerült a Vikingnek életet észlelnie a Marson (azon a kézenfekvő magyarázaton kívül, hogy azért, mert nincs):

– A kísérleteket nem a megfelelő életformához készítették elő, hanem arra, hogy földi szervezetek működésére válaszoljanak. A marsi élet alapulhat egészen eltérő biokémián, vagy lakozhat más hőmérsékleti

tartományban. A Viking mini-laboratóriumában uralkodó körülmények boldoggá tehetek földi mikrobákat, a marsbelieket azonban megölhették.

– Nem biztos, hogy a döntő kísérletek elég érzékenyek voltak a talajlakó marsi mikroorganizmusok viszonylag alacsony sűrűségének észlelésére. (Grammonkénti egymillió mikroba már könnyen észrevétlen maradhatott.)

– Lehet a marsi talaj legfelső szintje steril, de attól még létezhet élet a kőzetek hasadékaiban mélyén, ahol némi védelmet talál a kíméletlen körülmények elől.

– Lehet, hogy a kísérleteket megfelelően választották ki, a leszállás helyét azonban nem. A Mars felszínén bizonyos, a két leszállóegységtől távol eső kedvező helyszíneken talán létezik élet.

– Létezik élet a Marson, de nem a felszínen. Alkalmas élőhelyek a sarki jégsapkák alatt vagy mélyen a föld alatt is elhelyezkedhetnek; erre a lehetőségre még röviden vissza fogok térni.

Ha nem számolunk is ezekkel a kifogásokkal, a biológusok számára egy egyszerű okból még mindig roppant horderejű lehet a Mars. Manapság ugyan vigasztalan képet nyújt a vörös bolygó, ám nem mindig a fagyott pusztaság jellemezte. Rengeteg bizonyíték igazolja, hogy a távoli múltban a Mars meleg, nedves, Föld-szerű, az élethez sokkal barátságosabb bolygó volt. Akár teljesen halott manapság a Mars, akár nem, jó esély van arra, hogy egykor virult rajta az élet.

Vízözön

Nem is igen mondhatunk mást, mint hogy a Mars egykor lakályosabb volt az élet számára, ha szemügyre vesszük a Mariner és a Viking űrszondák által készített felvételeket. Azonnal szembeötlenek a folyóvölgyek. Könnyen felismerhető csatornákat vájt a víz a hegyes fennsíkok közé, a homokos síkságokba, mélyen a hegyoldalakba hasított, lecsordult kráterek pereméről, mellékfolyók, torkolatok és árterek jól felismerhető rendszerének nyomaival. Hozzá kell tennem, hogy ezek a folyómedrek nem emlékeztetnek Lowell híres egyenes vonalú csatornáira: a földi folyókhoz hasonlóan elágazóak és kanyargósak, vitathatatlanul természetes, nem pedig mesterséges képződmények.

Sajnálatos módon semmi nyoma annak, hogy maradt volna víz a Mars ősi folyómedreiben; ezek réges-rég kiszáradtak. De biztosra vehetjük, hogy ezek a völgyek valóban folyómedrek, hiszen a földi folyók valamennyi jellegzetességét mutatják: vannak zuhatagaik, ívelő folyópartjaik és könnyecsepp alakú szigeteik, ahol a magával sodort iszapot rakta le az áramlat. Nem lehet kétséges: valaha bőségesen folyt víz a Marson. De honnan volt ennyi víz? És hová lett? Szokványos folyómedrekben hömpölygött-e, esőből és hóolvadékból táplálkozva, vagy föld alatti források és víztározók táplálták? A folyók tavakba és tengerekbe torkolltak, vagy egyszerűen elenyésztek a homokban? Mindenekelőtt pedig, mennyi idővel ezelőtt jöttek létre ezek a folyóvölgyek?

A tudósok éveket töltöttek a fényképek böngészésével, és

a legapróbb részleteket is igyekeztek szóra bírni és értelmezni a fenti kérdések megválaszolására tett merész kísérlet során. Felületes vizsgálatból is hamar kiviláglik, hogy a nagyobb völgyek közül sok nem annyira folyómeder, inkább elöntött árterületek, melyeket a hatalmas mennyiségű víztömeg hirtelen elszabadulását követő dühöngő áradatok hasítottak maguknak. A megfejtés kulcsa: a forma. A kataklizmatikus áradat általában minden átmenet nélkül kezdődő, kevés oldalággal rendelkező, mély csatornát hoz létre. A folyó ezzel szemben vékony érként kezdődik és egyre nagyobb és mélyebb lesz, ahogy befogadja a mellékfolyók vizét.

Számszerűsítve döbbenetesnek bizonyul a marsi áradatok nagyságrendje. A csatornák szélessége a felföldeken látható néhányszor tíz kilométerestől száz és száz kilométeresig terjed ott, ahol a víz egykor átvágtatott a nyílt síkságokon, az erodált föld medencéin. Elképesztő, tízezer Amazonasnak megfelelő vízmennyiség düböröghetett végig a nagyobb csatornában. A legnagyobb ismert kataklizmatikus áradás a Földön úgy 12 000 évvel ezelőtt duzzasztotta fel a Washington államban található Columbia folyót. Abban a köztételen a Michigan-tóénak megfelelő víztömeg vett részt, és alig két nap alatt le is vonult. A marsi áradatok háromezer-százszor nagyobbak voltak ennél!

Továbbra is vitatott a hatalmas marsi vízözönök pontos oka. Szinte bizonyos, hogy nem heves felhőszakadásokkal álltak összefüggésben. Úgy látszik, mintha hirtelen hatalmas felgyülemlett víztömegek szabadultak volna el. Az a legvalószínűbb, hogy ezt a folyadékmennyiséget

mindaddig egy olvadásnak indult, majd összeomló jéggát tartotta kordában. Az sem kizárt, hogy talaj alatti víz tört a felszínre egy permafrost, örökké fagyott földrétegen át, mint valami kolosszális szökőkút. Ilyen nagyságrendű kitörés bekövetkezhetett, ha egy meteorit fúródott a kéregbe, vagy vulkáni eredetű olvadás következtében, vagy egyszerűen a hidrosztatikus nyomás megnövekedése révén.

Nem mindegyik kiszáradt marsi vízfolyás a katasztrófális áradat útvonala. A régebbi déli felföldeken sok sajátosság (hosszú, keskeny völgyek, szelíd vízmosások, a föld lassú eróziója) a szokványos folyórendszerekre utal. Ezek a folyómedrek több tíz kilométer hosszúak, némelyik a három kilométeres szélességet is eléri, és a földi folyókhoz hasonlóan mellékfolyók hálózatával is rendelkeznek. A vélemények megoszlanak abban a kérdésben, hogyan alakultak ki a völgyhálózatok. Az egyszerűen a víztöbbletet képző és a völgyeket lassú erózióval kivájó eső vagy hó nem áll teljes összhangban a tényekkel. Ilyesmi mostanában bizonyosan nem történhetne meg, mert a kis vízfolyásokból elillanna a víz, esetleg megfagyna, mielőtt a fő folyóba ömlene. De még ha egykor kedveztek is a feltételek a folyékony víznek, a völgyek alakja nem felel meg a lefolyás okozta erózióknak.

Van azonban egy másik folyamat, ami itt a Földön völgyeket képez: a talajvíz-alámosás. Kis léptékben ezt láthatjuk a homokos tengerpartokon, amikor egy forrás bugyog fel a homokba, és a víz kifolyik a tengerbe. A rendszer fejlődésével, a vízfolyás forrása utat tör felfelé a homokba, és haladás közben széles ösvényt vág a

folyással szemben. A Mars számos völgye kelti azt a benyomást, mintha ilyen módon jött volna létre.

A US Geological Survey munkatársa Michael Carr, a marsbéli víz vezető szakértője úgy véli, hogy valójában nagyon kevés folyadék folyt a felszínen ahhoz, hogy létrehozza a völgyeket. Szerinte a medrek lapos alja és meredek oldala egyfajta süppedésre utal. Carr szerint a víz legnagyobb része a föld alá szivárgott, folyamatosan alámosta a földet, aminek eredményeként az megereszkedett vagy elmállott, vagyis nem a felszínen vágató, az anyagot magukkal sodró áramlat alakította ki ezeket a medreket. A felszín alatti vízáram síkosító hatására a fölötte lévő anyag megcsúszhat és elindulhat, így felszíni erózió hiányában is létrejöhet vízmosás. Carr szerint nem annyira az esőzési ciklus, hanem valamiféle geotermikusan működő áramlási ciklus révén tért vissza a víz újra és újra a föld alatti tározókba. A marsi vízrajz vonalait ilyenformán a folyamatos felszíni vagy felszín alatti áramlás rajzolta meg a völgyek lassú kialakításával, valamint az alkalmankénti hirtelen és katasztrofális áradások.

Kamaszkoromban kaján örömmel bocsátkoztam vitába Jehova tanúival. Kedvenc kérdésem Noé vízözönére vonatkozott: hova lett mindaz a tengeri víz? A marsi vízözönökkel kapcsolatban is feltehetjük ugyanezt a kérdést. Az egyszerű válasz így hangzik: a földbe. Akárcsak a Földet és a Holdat, a Marsot is heves kozmikus bombázás érte az első hétszázmillió éve során, és ez annyi anyagot kavart fel, hogy az több kilométeres

vastagságban elborította az egész bolygót a regolit (málladéktakaró) néven ismert törmelékkel. Mivel a Mars sokkal kisebb a Földnél, nincs tektonikus tevékenységet működtető nagy, olvadt magja, így ez a törmelékkel borított felszín nem került újrafeldolgozásra. A porózus regolit következőképp megmarad olyannak, mint egy mérhetetlenül nagy szivacs, ami hatalmas mennyiségű folyadékot képes elnyelni. Így a jelenleg rendkívül száraz felszín ellenére a Mars még mindig bőséges vízkészletekkel rendelkezhet, ami a felszín alatt rejtőzik, örökké fagyott formában, vagy sok kilométerrel lejjebb, kőzetek közé zárt folyadékként. A becslések erősen eltérnek, de valószínűnek látszik, hogy ha mindez a víz egyszerre felszabadulna és lecsapódna a felszínre, legalább egy kilométer mély, az egész bolygót elborító óceánt alkotna.

Egyes szakértők szerint a vörös bolygón a porózus felszín ellenére valaha jókora tengerek és tavak hullámoztak. Sok mély szurdokban ősi tóüledékek rétegezett és nagyon vastag nyomai fedezhetők fel, míg egyes alacsony fekvésű északi síkságok foltjai ugyancsak szélesen elterülő tavakra utalnak. A nagy tengert jelző bizonyíték kétségesebb, egy lehetséges óceánhatár azonban kivehető az északi alföldek körül, ahol a daliásabb időkben a kráterekkel borított fennsíkokról vezethették le a vizet a kifolyások széles csatornái. A vélt partvonalat erodált sziklafalak, lépcsős teraszok és hegyfokok jelzik. Az Oceanus Borealisnak nevezett marsi tenger a bolygó egyharmadát boríthatta.

Az egykori óceán létének bizonyítékait a bolygó déli féltekéjének nagyszabású eljegesedésére utaló egyértelmű jelek egészítik ki. Ma a Mars vékony északi sarki sapkát visel, mely szárazjéggel (fagyott szén-dioxid) kevert vízjeget tartalmaz, és van egy jelentősebb déli sarki sapkája, mely túlnyomórészt szárazjégből áll. A sapkák az évszakok változásával növekednek és csökkennek; az északi sapka esetenként teljességgel el is tűnhet. A régmúltban azonban vastag vízjégmező nyúlt el a Déli Sarktól egészen a 33. szélességi körig. Mindennek a jégnek a forrása az Oceanus Borealis párolgása lehetett.

A korszakok során a Mars fokozatosan kiszáradt, ahogy az alacsony gravitáció miatt a vízpára elszökött az űrbe. Hetvenméteres globális mélységnek megfelelő vízmennyiség távozhatott ezen a módon. Még súlyosabb következményekkel járt a hideg. A hőmérséklet csökkenésével a körülmények alkalmatlanná váltak a folyékony víz számára, és a marsi tenger legnagyobb része egyesült a permafrosttal. A magasabb földrajzi szélességeken valószínűleg szilárdodó fagyok a tavak, maradványaik még mindig ott lehetnek por- és kőrétegek alá temetve.

Bár a marsi víz természetének és sorsának részleteit illetően megoszlik a tudósok véleménye, abban egyetértenek, hogy a hidrológiai aktivitás döntően a nagyon távoli múltban történt. Ha voltak is egykoron méltóságteljesen hömpölygő folyamok vagy háborgó óceánok, legalább 3,5 milliárd éve kiszáradtak. Ám az éghajlati viszonyok hanyatlásának nem kellett feltétlenül

egyirányú folyamatnak lennie. A lassú kiszáradást megszakíthatták rövid, melegebb időszakok, amikor ismét bőségesen áradt a víz. Ezt a lehetőséget az támasztja alá, hogy egyes marsbéli völgyek meglehetősen későn alakultak ki, valamint, hogy némelyik vízvezető csatorna félreismerhetetlenül több alkalommal jött létre ugyanazon a helyen, ami az áradásos időszakok sorozatára utal. Mindennek alapján joggal feltételezhető, hogy a Marsra, ha nem is hosszasan, de időről időre visszatért a meleg és vele a folyékony víz. Olyankor ismét jelentős vízkörforgás zajlott a talajon és az atmoszférán át. De az áradásos és eljegesedéses időszakok minden egyes ciklusával több víz szökött el. Meglehet, egyes folyók alig néhány százmillió éve még ott kanyarogtak a Marson, ezek azonban csak halvány másai lehettek az ősi vízözönöknek és csekély hatást gyakoroltak a Mars éghajlatára.

A marsi üvegház

A marsi folyók kézenfekvő bizonyítékot szolgáltatnak a bolygó egykor melegebb és nedvesebb éghajlatára. De mi lehetett ennek az oka? Joggal feltételezhetnénk, hogy a Marsnak a múltban még hidegebbnek kellett lennie, különös tekintettel a „halvány fiatal Nap” jelenségére. Ahogy a Nap öregszik, a kémiai szerkezetében beállt változások következtében lassan egyre fényesebb lesz. Négybillió évvel ezelőtt 30 százalékkal halványabb lehetett, mint ma, tehát jelentősen kevesebb hő juthatott el a távoli Marsra. Ezzel szemben a múltban jóval erősebb volt a

radioaktivitásból származó és a bolygó kialakulásából tárolt hő által létrehozott geotermikus fűtés. Csakhogy kizárólag a geotermikus hőáramlás nem ellensúlyozta volna a halvány ifjú Napot, így más okokat kell találnunk az enyhébb éghajlatra.

A legkönnyebben az üvegházhatás révén melegíthetünk fel egy bolygót. Az üvegházgázok – például a szén-dioxid – takaróhoz hasonlóan viselkednek, abban az értelemben, hogy a bolygó felszíne közelében elfogják a Nap hőjét. Jelenleg a Mars atmoszférája túlságosan ritka ahhoz, hogy számottevő üvegház-felmelegedést okozzon, az első egymilliárd évben azonban egész bizonyosan sokkal sűrűbb volt. Ahogy a Föld, a Mars is rendelkezett egy elsődleges sűrű légkörrel, ami egyfelől a bolygó kigázosodásából, valamint üstökösök, kisbolygók és jeges bolygókezdemények révén a bolygóra érkezett illékony anyagokból állt össze. A nagy mennyiségű szén-dioxid jelentősen fokozhatta a hőmérsékletet.

A tudósok úgy becsülik, hogy a Mars sokkal több szén-dioxiddal rendelkezett a múltban, ezt azonban nem könnyű számszerűsíteni. Először is meg kell határozni, hová tűnt a széndioxid. Nagyon valószínű, hogy a legnagyobb része, a heves kozmikus becsapódások eredményeként az űrbe szökött. Ahogy azt a 6. fejezetben kifejtettem, a nagy üstökösök összeütközése a bolygókkal becsapódási eróziót okoz, amely akár az egész atmoszférát lehánthatja. A Mars esetében a nagyon ritka légkör lett a végeredmény, de magának a kozmikus bombázásnak az időszakában tág értéktartományban változhatott a nyomás. Számítások

szerint a Mars az első hétszázmillió év során bekövetkező becsapódások következtében az atmoszférája 99 százalékát elvesztette, míg a maradéknak a 90 százalékát az ezt követő különböző folyamatok hatására. Amennyiben helytállóak az értékek, akkor elmondhatjuk, hogy a Mars légkörének egykor a mainál ezerszeresen nagyobb nyomása is lehetett, ami elegendő ahhoz, hogy fagyponthoz emelje a hőmérsékletet, és akár egy nagy kiterjedésű óceán létét is lehetővé tegye.

Nemigen lehet kétségünk azt illetően, hogy a Mars egykor sűrű atmoszférával rendelkezett, mivel a régebbi becsapódási kráterek falai igencsak viharverték. A 15 kilométeresnél kisebb átmérőjű kráterek teljes mértékben megsemmisültek. Ezzel szemben a későbbi kráterek alig erodálódtak. A változás alapján a kutatók úgy vélik, hogy az atmoszféra nem sokkal a kései kozmikus nehézbombázás vége után, úgy 3,8 milliárd évvel ezelőtt ritkult meg. A legtöbb katasztrofikus áradásra minden jel szerint ezen korszak előtt vagy folyamán került sor, minthogy a vízvezető csatornákat rengeteg, jó állapotban fennmaradt kis kráter pettyezi. A Mars fennállásának legnagyobb részében az erózió hiánya tartotta meg érintetlen állapotban rendkívül régi folyómedreit. A Földön egyetlen folyóvölgy sem maradna fenn évmilliárdokon keresztül.

Miután alábbhagyott a bombázás, különféle okokból tovább fogyott a Mars szén-dioxidja. Egy része kiszökött az űrbe, valamennyi feloldódott a vízben, vagy magába itta a regolit, míg tekintélyes mennyiség karbonátokba vagy a kőzetek más ásványaiba épült be. Ellensúlyozó hatású folyamat

nélkül a szén-dioxid szinte tüstént elnyelődött volna. Valószínűleg a geotermikus fűtés fordította vissza ezen folyamatok némelyikét és juttatta vissza a szén-dioxid egy részét az atmoszférába. Néhány százmillió éven át mérsékelten magas légnyomás uralkodhatott, és érvényesülhetett az ezzel járó üvegház-felmelegedés. Végső soron azonban a geotermikus hő elenyészett, abbamaradt a szén-dioxid körforgása, és zuhanni kezdett a légnyomás, ennek következtében pedig létrejött az a fagyos, száraz sivatag, amilyenek ma látjuk a Marsot.

Az a tény, hogy egyes folyóvölgyek nyilvánvalóan a viszonylagos közelmúltban jöttek létre, alkalmankénti felmelegedésre utal. A jelenség egyik magyarázata a visszacsatolási folyamatokból ered. Ha a helyi geotermikus fűtés vagy vulkáni tevékenység hirtelen nagy mennyiségű vizet szabadított a felszínre, akkor rengeteg oldott szén-dioxid is vele tartott. Ez viszont emelte a hőmérsékletet, a magasabb hőmérséklet még több vizet olvasztott meg és még több széndioxidot szabadított fel. Ahogy a megolvadt víz elöntötte a fagyott alföldeket, felmelegítette a regolitot, ami további szén-dioxid felszabadulásához vezetett. Mindent egybevetve, ebben az önmagát erősítő folyamatban felszabadulhatott annyi szén-dioxid a bolygóból, hogy átmenetileg egy erős üvegházhatást mutató, sűrűbb atmoszférát hozzon létre.

Egy másik tényező lehet a bolygó mozgása. A Mars pályája meglehetősen excentrikus, és nincs olyan holdja, amely stabilizálná a forgási tengelyét. De bizonyára volt olyan kor, amikor a forgás és a pályamozgás kedvező

kombinációja jelentősen növelte a Naptól eredő meleget. Alkalmilag a forgási tengely dőlése olyan lehetett, hogy a sarkok több napfényt kaptak, mint az egyenlítői övezet. Ez megolvashatta a sarki jégsapkákat és megszaladó üvegházhatást hozhatott létre. Mindent összevéve, inkább arról van szó, hogy az áradás, óceánképződés és eljegesedés ismétlődő közjátékait az inaktivitás hosszú időszakai követhették, nem pedig egyszerű, folyamatos lehűlésről.

Az élet szempontjából nagy horderejű az a tény, hogy a Mars 3,8-3,5 milliárd évvel ezelőtt meleg és nedves volt, mivel azt jelenti, hogy a Mars akkoriban hasonlított az életet hordozó Földre. Ebből egyes tudósok arra a következtetésre jutottak, hogy abban a korban a Mars is alkalmas lakóhely lehetett az élet számára. Önmagában azonban a folyékony víz jelenléte csak a történet egy része. Az élet kilátásait az a mozzanat teszi kedvezővé, hogy a Marson nem csak víz hullámozott, hanem vulkánok is működtek.

Volt-e élet a Marson?

A marsbéli Olympus Mons hegye 27 kilométerre tornyosul a Tharsis masszívum fölé, és teljes egészében 550 kilométer a kiterjedése. A maga nemében a Naprendszer legnagyobb hegye, tömegét tekintve akkora, mint hét földi Mount Everest. Az Olympus Mons jelentősége azonban nem a méretében rejlik, hanem abban, hogy vulkán. Ahol vulkánok együtt fordulnak elő vízzel, ott nagy

valószínűséggel létrejönnek meleg források, a földiekhez hasonló hidrotermikus rendszerek, amelyek valószínűleg az első földi szervezetek bölcsői lehettek. Virult-e mikrobaélet a Marson is 3,8 milliárd évvel ezelőtt valamilyen bugyborékoló forrásban, talán az Olympus Mons lejtőin, vagy mélyen a porózus kőzetekben, a rég eltűnt marsi tenger alatt?

Négymilliárd évvel ezelőtt a Mars még izzott a kialakulása hőjétől. Radioaktivitás fűtötte a kérget. Kozmikus becsapódások olvasztották a felszínt. Ahogy a bolygó igyekezett megszabadulni ettől az őseredeti hőtől, félelmetes mennyiségű lávát vetett ki a vulkánokból; ez a láva dermedt a Hold „tengereit” idéző olvadt kőzetek végeláthatatlan síkságaivá. A kéreg hűlésével folyamatosan csökkent a vulkáni tevékenység, úgyhogy amikor abbamaradt a kozmikus nehézbombázás, addigra nagyrészt három fő régióra szorítkozott: Tharsisra, Elysiumra és Hellasra. Meglehet, ma is akadnak a Marson működő vulkánok, mindenesetre semmiféle jelét nem mutatják az aktivitásnak.^[107] Ám a Mars történetét végigkísérik a kitörések, például az Olympus Mons környékén az utóbbi 1,5 milliárd éven belül, az Alba Patera közelében pedig alig ötszázmillió évvel ezelőtt. Mivel valószínűtlen, hogy a Mars négymilliárd éven át egyfolytában vulkanikusan aktív lett volna, csak viszonylag újabban függesztette volna fel ezt a fajta működést, ésszerűnek látszik arra következtetni, hogy még mindig léteznek forró helyek, valószínűleg mélyen a föld alatt.

A távoli múltban, tekintettel a bolygón akkoriban

bőségesen megtalálható vízre, a termikus kürtők környékén minden feltétel adott volt, hogy melegforrások keletkezzenek. A terepfelvételek egyértelmű bizonyítékot szolgáltatnak a víz és a vulkánok kölcsönhatására. Sok áradatot valószínűleg a permafrostot és a talajjeget megolvasztó láva indított el, és a lávaömlések alól vízfolyások bukkantak elő. Az erősen vulkanikus Tharsis régiót kiömlési árkok szabdalják. Másutt sűrű völgyhálózatok tűnnek fel a vulkánok oldalán. Egyes lapos tetejű hegyek olyanok, mint az izlandi táblahegyek, ahol láva szivárog a jég alól. Az Elysium jellegzetes alakú gerincei ugyancsak a láva és jég együttes hatásának jeleit mutatják. Mindez együttesen meggyőző másodlagos bizonyítékot jelent az ősi Mars hidrotermikus rendszereinek léteire, bár a különleges ásványlelőhelyek felfedezése – ami egyértelmű árulkodó jel volna – még várat magára.

Amíg ezek a Marsra induló új felderítőutakra várnak, a NASA tudósai serényen kijelölték a bolygó felszínén azokat a pontokat, ahol hidrotermikus aktivitásra lehet számítani. A Hadriaca Pladera vulkán oldala megfelelő helynek tűnik. Itt sok egymásba fonódó, egy ősi kaldera pereméről induló folyóvölgy található, melyeket egy látványos, a lejtő közepe táján hirtelen felbukkanó dagálymeder metsz át. Egy másik vulkánon, az Apolloniaris Paterán különös fényes képződményt látni a kaldera pereme mellett: ez akár melegforrásos ásványlelőhely is lehetne. Egy hasonló, erősen erodált lejtőjű vulkán a kráterekkel borított, Terra Cimmeria néven ismert területen található és egy nagy vízfolyás kezdeténél helyezkedik el.

A Mars sok folyóvölgye kaotikus benyomást keltő terepen található, hatalmas, egymásra halmozott kőzettömbök társaságában. Erről a topográfáról úgy vélik, hogy akkor alakult ki, amikor olvadt kőzet hatolt a talaj jegébe. Ahogy a jég megolvadt, a víz elfolyt, a talaj pedig véletlenszerű módon beomlott. Az ilyen területek az elsődleges helyszínek, ahol felszíni hidrotermikus rendszerek keletkezhetnek.

Amennyiben az élet berendezkedett valamelyik melegforrásban, megkövesedett maradványokat hagyhatott maga után. Az erózió viszonylagos hiánya miatt a marsi kőületek valószínűleg jobban ellenálltak az idő pusztításának, mint földi társaik. A jövőben a helyszínen folytatott kutatások során ilyen valószínűsíthető mintákat lehetne keresni és a Földre küldeni. A további lehetséges kőülethelyszínek közé tartoznak a folyóvölgyek, ahol az áradatok magukkal ragadhattak parányi marsi szervezeteket az állóvizekbe, és a hatalmas vetődési árok, a Valles Marineris, ahol mély kőzetrétegek kerültek a napvilágra. Érdekeseek lehetnek a kiszáradt tómedrek is, ahol a mikrobák lerakódhattak az üledékes kőzetben. A Gusev nevű kráter is ígéretes jelöltnek tűnik, mert valaha nagy folyam torkoltt bele. Réges-rég egy mély tónak kellett ott lennie, rengeteg üledékkel az alján.

Ezeknek a kitüntetett helyeknek a felkutatásában 1997 júliusában tették meg az első kis lépést, amikor a Pathfinder program sikeresen letette a Marsra a Vikingek utáni első leszállóegységet. Kis terepjáró járművével, a Sojournerrel a Pathfinder adatok sokaságát közvetítette a

Földre az Ares Valles ármeder torkolatától. A szonda mellett a terepet mindenféle kövek borítják, melyeket az ár sodort odáig. Ez a törmelék ősi hidrotermikus rendszer töredékeit tartalmazhatja, vagy akár még a mélyen a talaj alatt élő mikrobák kövületeit is, melyek az áradatban kerültek a felszínre és sodródtak lefelé. Sajnos a Pathfinder nem rendelkezett az ilyen feltevések ellenőrzésére alkalmas felszereléssel.

1997 szeptemberében a bolygó körüli pályára állt a Mars Global Surveyor. Arra készítették, hogy méteres nagyságrendű pontossággal feltérképezze a bolygó felszínét, és jelenleg is értékes jeleket küld a Mars hidrológiai történetéről és az életnek otthont adó valószínűsíthető helyszínekről. A NASA, az ESA, Japán és Oroszország további szondák küldését tervezi, melyek mintahozatali programmal teljesebben ki, talán 2005-ben. Bár ezek a programok jórészt a bolygó éghajlatának és geológiájának a megismerésére irányulnak, kétségkívül minden eredményt buzgón fognak tanulmányozni a múltbéli élet nyomai után.⁽⁵⁾

Van-e élet a Marson?

Amennyiben 3,8 milliárd évvel ezelőtt kialakult az élet a Mars felszínén, az idővel folytatott kétségbeesett versenyfutásra kényszerült. Épphogy abbamaradt a sterilizáló kozmikus bombázás, amikor megkezdődött az éghajlat romlása. Ahogy lezuhant a hőmérséklet és megfagyott a víz, egyre ritkultak a megfelelő élőhelyek. Alig

pár száz millió év alatt minden valószínűség szerint az összes fennmaradt szervezetnek különleges menedékhelyekre kellett visszavonulnia, például jégpáncéllal védett, elszigetelt tavakba, vagy mély, felszín alatti helyszínekre.

Elképzelhető, hogy még ma is ott tengődik az élet? Utólag már látjuk, hogy a Viking leszállóegységeknek kiszemelt helyek, amelyeket elsődlegesen a leszállást megkönnyítő szempontok alapján választottak ki, talán a legkevésbé megfelelő helyszínek az élet számára. A Viking elindult, mielőtt a biológusok rádöbbenek volna a melegforrások jelentőségére. Sajnos, úgy tűnik, a Mars felszínén már valamennyi hidrotermikus rendszer megszűnt.

Hiba lenne azonban teljesen lemondani a Marsról, mint a jelenleg is létező élet lakhelyéről. Ha a kitörő vulkánok és az okádó kúrtók a múlthoz tartoznak is, mélyen a föld alatt még mindig működhet az alapvető geotermikus fűtés. Bár az állandóan fagyott talaj kilométeres mélységig nyúlik, bőségesen lehet alatta folyékony, vélhetően sós víz. Tudjuk, hogy a Föld bioszférája mélyen lenyúlik a kéreg alá. Márpedig ha itt a Földön élő szervezetek lakoznak sorsukkal elégedetten a felszín alatti zónában, ugyanezt a Marson is megtehetik. Bár a Marsról hiányozhat a mi óceánmedrünk fekete füstölgőinek bőségszaruja, nincs arra indok, miért ne tudtak volna a marsi mikrobák az idők során alkalmazkodni bolygójuk spártaibb körülményeihez. A Földön a baktériumok és az archebaktériumok a legfélelmetesebb élőhelyekre is behatoltak, és olyan közegekben is virulnak, amelyekhez képest kifejezetten

űdítőek a marsi permafrost alatti feltételek.

Ha van élet a Marson, az valószínűleg a Föld mélyén fekvő kőzetrétegekben talált, kemotrófokra épülő SLIME-okhoz hasonlít (lásd 7. fejezet).^[108] Idézzük fel, hogy a kemotrófok az elsődleges energiatermelők: nincs szükségük fényre, szerves táplálékra vagy oxigénre. Tápanyagaik a mélyből származó szervesetlen vegyi anyagok, mint a hidrogén és a hidrogénszulfid, melyeket a vízkörforgás hord szét a kéregben. Az ősi anyagcsere-folyamatok, amelyeket alkalmaznak, igen megfelelőek lennének a Mars jelen feltételei között, ahol kén- és vaslerakódások szolgáltatják a szükséges vegyületeket. Egy olyan organizmus, mint a hidrogént és szén-dioxidot metánná alakító *Methanococcus*, valószínűleg otthon érezné magát a Mars felszíne alatt.

Hogyan lehetne próbára tenni ezt a feltételezést? Élő mikrobákat juttatni a permafrost alá még egy emberekből álló expedíciónak is bonyolult feladatot jelentene. Elképzelhető, hogy műholdas felderítések a felszín alatti életről árulkodó jeleket fognak észlelni, például metándiffúziót az atmoszférába. Ám a marsi szervezetek megtalálására az a legjobb esély, ha fennmaradtak egyes válogatott helyeken a felszínen vagy a felszín közelében. Mondjuk egy viszonylag új keletű kozmikus becsapódás a felszínre vethetett mély, mikrobákkal teli rétegeket; egyes organizmusok fagyottan, inaktívan, de életképesek maradhattak a kráter falának árnyékában, amely megvédte őket a Nap ibolyántúli sugaraitól. Az sem kizárt, hogy a kiszáradt tómedrekben ősi halofilok rejtőznek

sókristályokba zártan.

A NASA Mars-szakértője, Chris McKay a jeges sarki övezetekre szavaz, ahol, véleménye szerint, megbújhatnak szunnyadó mikrobák.^[109] Bár az ottani hőmérséklet végzetesen alacsony, legalább a jég rendelkezésre áll, ellentétben a teljesen száraz egyenlítői területekkel. További nyomra vezető jeleket kínál az egyetlen olyan hely a Földön, amelyik némiképp emlékeztet a Mars mai felszínére: az Antarktisz. A jóval a fagypont alatti hőmérséklet, a vad száraz szelek és a számottevő ibolyántúli sugárzás ellenére mikroorganizmusok lakják a McMurdo Dry Valleys jéggel borított tavainak alját. A napfény, a geotermikus hő és az olvadékvíz beáramlása azokban a rövid időszakokban, amikor nulla fok fölé emelkedik a hőmérséklet, a jégpáncél alatt megőrzi folyékonyak a vizet, még olyankor is, amikor az átlaghőmérséklet fagypont alatt jár. Egy efféle helyen a marsi szervezetek is találhattak végső menedéket, ahol százmillió évekre biztosíthatták a túlélésüket.

McKay az antarktisi élet egy még figyelemreméltóbb formáját tanulmányozta. A kriptosporangiumok az áttetsző homokkövek egy övezetét foglalják el. Elég közel laknak a felszínhez ahhoz, hogy a fény behatoljon, de vékony, szilárd réteg védi őket az ibolyántúli sugárzástól és a szélétől. A kő által elnyelt napfény elég nedvességet hoz létre a zárványvízből ahhoz, hogy fenntartsa a baktériumok életműködését, még 1500 méteres magasságban és állandóan fagypont alatti hőmérsékletnél is. Egész baktérium-, gomba-, zuzmó-, alga- és élesztőgomba-

közösségek éldegélnek kényelmesen az amúgy kegyetlen körülmények között. Ezen organizmusok némelyike valószínűleg a mai Marson is életben maradna ennek a leleményes stratégiának az alkalmazásával, és az esetleges őshonos marsi mikrobák is bejárhattak hasonló fejlődési utat.

Személy szerint azon a véleményen vagyok, hogy manapság a Mars mély, felszín alatti zónája az élet legvalószínűbb fellelhető helye. A következő fejezetben kifejtendő okokból úgy vélem, hogy nagy valószínűséggel még mindig élő mikrobákat fogunk találni a marsi permafrost alatt. Pár évvel ezelőtt egy ilyen jóslat legfeljebb harsány hahotát váltott volna ki. Amíg a tudósok abból indultak ki, hogy az élet fenntartásához nélkülözhetetlen a napfény, a meleg és a készen található szerves anyagok, reménytelen esetnek tűnt a Mars. Ám a mélyen a sötétben, geotermikusan fűtött környezetben élő földi mikrobák felfedezésével a marsi élet kilátásai is megváltoztak.

Meteoritok a Marsról

1911-ben az egyiptomi Nakhla kisvárosában történt a történelem egyik legfigyelemreméltóbb eseménye, amikor egy nagy kő hullott alá az égből és agyonütött egy kutyát. Ez az egyetlen ismert kutyaszerencsétlenség, amit kozmikus test okozott. Ám eléggé elképesztő módon csak évtizedekkel később tárult fel ennek a találkozásnak az igazán rendkívüli természete, amikor a tudósok úgy találták, hogy nem szokványos meteorit volt a bűnös, hanem a Mars

bolygó egy darabkája. Napjainkig úgy egy tucatra való marsi meteoritot azonosítottak, és kétségkívül számos további rejtőzik a föld alatt.

Ránézésre a marsi meteorit nemigen különbözik bármely más kőtől. Olyannyira nem, hogy a nakhlai test egy darabját éveken át egyszerű meteoritként állították ki a University of Adelaide Geológiai Múzeumában, amíg az 1990-es évek elején fel nem ismerték a valódi jellegét. Azóta hét lakat alatt őrzik. Ezeknek a köveknek a marsi eredetéhez nem a megjelenésük jelentette a kulcsot, hanem a kémiai szerkezetük részletei. A tudósokat már régóta zavarba hozta a meteoritok *Snic*keknek vagy SNC-knek nevezett osztálya, szokatlan mennyiségű gáznemű anyaguk és az oxigénizotópjaik furcsa eloszlása miatt. Az SNC megjelölés a felfedezésük három helyszínének nevéből alkotott betűszó; az N jelenti benne Nakhlát. Az első megtalált SNC-meteorit a franciaországi Chassignynál ért földet 1815-ben, a második 1865-ben az indiai Shergottyban.

A leginkább zavarba ejtőnek az a tény bizonyult, hogy az SNC-meteoritok olyan vulkanikus eredetű kőből állnak, amelyenek szokásosan csak vulkáni környezetben fordulnak elő. Ez már több mint gyanús. A legtöbb meteorit a Mars és a Jupiter közötti kisbolygóövezetből származik. Mások üstökösökben jönnek létre. Az üstökösöknek és a kisbolygóknak azonban nincsenek vulkánjaik – csak a bolygóknak.

A döntő adalék, hogy az SNC-meteoritokban van valami különös, az 1980-as évek elejéről való, amikor radioaktivitás-méréssel meghatározták a korukat, és

százyolcvanmillió és ezerháromszázmillió év közötti eredményt kaptak. Ezzel szemben a szokványos meteoritok, amelyek az őszanyagok a Naprendszer kialakulásából visszamaradt töredékei, közel 4,6 milliárd évesek. Egy maroknyi tudós gyanítani kezdte, hogy az SNC-objektumok csakis egy bolygó felszínéről származhatnak – egy vulkánokkal rendelkező bolygóról. Bár az SNC-k bolygóeredete egy csapásra sok rejtélyt megoldott, számos másikat fel is vetett. Ezek közül az számított a legkeményebb diónak, hogy miként tudott egy jókora darab kő épségben elválni egy másik bolygótól és eljutni a Földre. Milyen fizikai folyamatok rendelkeznek akkora erővel, hogy kivessenek egy bolygóról egy szikladarabot, úgy, hogy közben nem semmisítik meg? A számítások hamarosan kimutatták, hogy még a legerőteljesebb vulkáni kitörésekről sem feltételezhető, hogy kidobjanak egy sziklát az űrbe. Így egyedül a kozmikus becsapódások lehetősége maradt. Az bizonyosan elképzelhető volt, hogy egy bolygó elegendő erővel ütközhet össze egy kisbolygóval vagy üstökössel ahhoz, hogy bizonyos mennyiségű törmelék elérje a szökési sebességet, és hogy a kivetett anyag egy része végül elérje a Földet. Csakhogy sok tudós még az 1980-as években sem volt hajlandó komolyan mérlegelni a kozmikus katasztrófákat. Ráadásul akkoriban az a nézet uralkodott, hogy egy ilyen nagyságrendű ütközés elkerülhetetlenül porrá zúzna vagy megolvasztana minden kőzetet a becsapódás övezetében. Az SNC-meteoritok azonban csak mérsékelten voltak viharverték.

Am folyamatosan nőtt az SNC-k planetáris eredete mellett szóló bizonyítékok súlya. A következő kérdés úgy szólt, hogy melyik bolygóról érkezhettek. Noha mindig is a Mars számított az első számú gyanúsítottnak, a gyanú igazolása aprólékos nyomozói munkát igényelt. Persze a Vénusz is szerepelt a jelöltek között, de sűrű atmoszférája és viszonylag magas felszíni gravitációja alaposan megnehezíti anyag kivetését az űrbe. A Hold – és maga a Föld – is szóba jöhető források. A Holdnak azonban már nem voltak aktív vulkánjai az SNC-k mért korában. A Földnek ugyan igen, a meteoritok azonban egy döntő vonatkozásban nem állták ki az összehasonlítási vizsgálatot sem a földi, sem a holdi anyaggal: a tartalmuk izotópjainak arányában. Nem csak az oxigénizotópok nem egyeztek, hanem ugyanez a helyzet állt elő a xenon izotópjainak esetében is, amiből kiderült, hogy olyan bolygóról lehet szó, amelynek ritka a légköre és mérsékelten nagy a gravitációs tere. Mindez határozottan a Marsra mutatott.

A perdöntő bizonyíték 1982-ben került elő, azoknak a váratlan epizódoknak az egyikében, amelyek oly gyakran járnak együtt tudományos felfedezésekkel. Donald Bogard, a NASA tudósa megkísérelte meghatározni az egyik vélelmezetten marsi eredetű meteorit korát a radioaktív argon gyakoriságának a mérésével egy megolvadt üvegzárványban. A kapott eredményt annyira abszurdnak találta, hogy arra következtetett, a kő valahogy szennyeződhetett. Hosszas tűnődés után arra a gondolatra jutott, hogy az a hatalmas lökéshullám, ami a követ kilőtte a

Marsról, annak légköréből kényszerítette az argont a kőbe. Szerencsére a Viking megmérte az argonizotópok gyakoriságát a Mars atmoszférájában. Az összehasonlítás során kiderült, hogy Bogard helyesen következtetett. Más nemesgázok, valamint a nitrogén és széndioxid méréseinek eredménye ugyancsak megegyeztek a Viking izotópadataival. A gázok összetétele a meteorit apró buborékjaiban pontosan megegyezett a marsi atmoszféráéval.^[110]

Miután így elfogadottá vált, hogy az SNC-k és egy maroknyi másik meteorit valóban a Marsról érkezett, a tudósok nekiláttak megvizsgálni őket a Mars felszínének fizikai körülményeire utaló nyomok után. Az egyik jelentős felfedezést a nyilvánvalóan vízzel érintkezett ásványok jelenléte jelentette a meteoritokban, ami szintén igazolta azt az elméletet, amely szerint a Mars valaha meleg és nedves volt. Az izotópgyakoriság többi adata hozzásegített, hogy összerakják a Mars légkörében lezajlott változások képét. Ezek a marsi meteoritokkal végzett munkák lebilincselőek és fontosak voltak. Ám nem mérhetőek ahhoz a meglepetéshez, ami az ALH84001 belsejében rejtőzött.

Az élet nyomai?

A NASA megdöbbenő felfedezést tett, amely felveti azt a lehetőséget, hogy több mint hárommilliárd évvel ezelőtt a mikroszkopikus élet egy primitív formája létezett a Marson.

DANIEL S. GOLDING,

Talán az Antarktisz kietlen síkságain számíthatnánk a legkevésbé arra, hogy meteorvadászokat találunk munkában. Ám ez a végeláthatatlan jégmező eszményi helyszín csillagászati titkok begyűjtésére. Ha az ember talál egy követ az Antarktisz jegében, az csak egyetlen helyről érkezhett: az égből. A jégre hullott meteoritokat hamar beledi a hó, de ahogy a jégmező, magával sodorva a meteoritokat, tovakúszik az óceán felé, eltemetett akadályokba ütközhet vagy a hegyeknek dörzsölődhet. Egy-egy eltemetett kő kivetődhet a felszínre, ahol könnyű felfedezni a fehér hóban.

Roberta Score, a United States Antarctic Search for Meteorites (meteoritok antarktisi keresése) csapatának a tagja, 1984 vége felé munkatársaival együtt azt a feladatot kapta, hogy az Allan Hills nevű terület közelében keljenek át a kietlen szélfúttá jégáron. December 27-én dél körül Score megállította a hómobilját, hogy megcsodáljon egy látványos, megfagyott hullámokra emlékeztető jégalakzatot. Ekkor fedezett fel egy, a jégmező szélén fekvő meteoritot. Megszemlélve kísérteties zöld színűnek látszott, ettől eltekintve azonban nem volt nagyobb jelentősége, mint egy újabb meteoritnak abból a száznál is többől, amelyeket Score és kollégái az expedíció során összegyűjtöttek. Mindenesetre nem dobbant meg különösebben a szívük.

A tudósok szokás szerint gondosan ügyeltek rá, hogy elkerüljék az Alan Hills után ALH-nak besorolt zöld meteor szennyezését; sterilizált nejlonzacskóba tették és

teflonszalaggal lezárták. Senki nem nyúlt hozzá pusztá kézzel. A többi lelettel együtt hidegen tartották a houstoni Johnson Space Center Meteorite Curation Laboratoryjába (Houston, Texas állam) vezető három hónapos utazása során. Ott különleges tárlóban helyezték el, nitrogénkörnyezetben a nedvesség távoltartására. Az 1984-es tételek közül ezt szándékoztak először megvizsgálni (innen kapta a 84001 megjelölést), állítólag a szokatlan színe miatt. A laboratóriumban azonban egyszerű fakószürke árnyalatúnak mutatkozott, és a kisbolygó-övezetből származó közönséges diogenitnek minősítették. Így az ALH84001 négy további éven át raktárban várta, hogy a jelentőségét felismerjék.

1988 nyarán David Mittlefehldt, a Johnson Space Center geokémikusa a diogenitek szisztematikus elemzését végezte, és elemzési mintát kapott az ALH84001-ből. Felkeltette az érdeklődését az eredeti leírás, amely szerint a kő tartalmaz bizonyos ásványokat, például plagioklászta, amelyek ritkán fordulnak elő diogenitekben. Tudta, hogy karbonátokat is tartalmaz, de automatikusan feltételezte, hogy ezek az Antarktisz eróziós termékei.

Mittlefehldt kémiai elemzése eleinte semmi rendkívülit nem tárt fel. 1990-ben aztán elektron-mikroszondával kezdte vizsgálni a mintadarab parányi szemcséit, és lassan nyilvánvalóvá vált a meteorit egyedülálló természete. A szonda – mely egy keskeny elektronnyalábot bocsát a minta felszínére és röntgensugarak kibocsátására gerjeszti – nagy mennyiségű három vegyértékű vas jelenlétét tárta fel, ami egyáltalán nem jellemző a szokványos

meteoritokra. Mittlefehldt nem erőltette tovább az ügyet, gondolván, hogy elhibázta az elemzést, ám 1993-ban írt egy tanulmányt a diogenitekről, melyben megemlítette az ALH84001 esetében kapott rendellenes eredményeket. A tanulmány egyik lektora arra biztatta, hogy ellenőrizze még egyszer a munkáját. Miután Mittlefehldt meggyőződött arról, hogy az elemzés hibátlan volt, felöltött benne, hogy az ALH84001 talán nem diogenit, hanem marsi eredetű meteorit. Az ásványösszetétele azonban nem hasonlított más ismert marsi meteorokéhoz, például az SNC-kéhez. Mittlefehldtben felülkerekedett a természetes óvatosság, és nem említette meg kollégáinak, hogy milyen következtetésre jutott.

A történet további része olyan, mint egy tudományos-fantasztikus krimi. Mittlefehldt elhatározta, hogy újabb mintákat kér az ALH84001-ből, de figyelme időközben egy másik antarktisi meteorit, az EETA79002 felé fordult, amely kétségtelenül igazi diogenit, és amellyel már annak előtte is dolgozott. A mikroszondás elemzés során ismét zavarba ejtette a három vegyértékű vas tekintélyes mennyisége. Ellenőrzésképpen Mittlefehldt tanulmányozta a vasszulfid összetételét az EETA79002-ben, és őszinte elképedésére vasdiszulfidot talált. „Döbbenetes pillanat volt – idézte fel később –, mert a diogenitek csak vasmonoszulfidot tartalmaznak.”^[112] Teljes zavarban visszatért az alapokhoz és mikroszkóp alatt megvizsgálta a meteorit egyik vékony metszetét. A legkevésbé sem emlékeztetett az EETA79002-re, annál több hasonlóságot mutatott az ALH84001-gyel. Mittlefehldt gyanút fogott, és rájött, hogy

tévesen címkézett mintát kapott; egész idő alatt az Allan Hills-i meteorit darabjaival dolgozott! Ez az eset meggyőző bizonyítékot szolgáltatott. Vas-diszulfid mindennapos a marsi meteoritokban. A három vegyértékű vas jelenléte csakis arra a következtetésre vezethetett, hogy az ALH84001 a Marsról érkezett.

Miután 1993 októberében Mittlefehldt bejelentette, hogy az ALH84001 egy újabb marsi meteorit, a lelet különleges elbánásban részesült. David McKay, a NASA ugyancsak Johnson Space Centerben dolgozó kutatója kutatócsoportot szervezett, amelynek tagjai közé került Richard Zare a Stanford Universityről. A csoport vizsgálatsorozatnak vetette alá az ALH84001-et. Különleges kémiai és izotópos elemzések révén a NASA-tudósoknak sikerült rekonstruálniuk a kő minden apró részletre kiterjedő történetét. Az első meglepetést a kora okozta, amit a rubídium és a szamárium radioaktív bomlása alapján határoztak meg. Idézzük fel, hogy a legtöbb marsi meteorit viszonylag fiatal, ám az ALH84001 kb. 4,5 milliárd évvel ezelőtt szilárdult meg, nem sokkal azután, hogy maga a Mars kialakult.

A kutatók különleges figyelmet szenteltek a meteoritban található repedéseknek. Valami – valószínűleg egy közeli kozmikus becsapódás – egy időben nyilvánvalóan roncsolta a követ, mely a folyamatban részben ismét megolvadt. Az időpont meghatározására a csoport gondos kálium-40 méréseket hajtott végre; ez a radioaktív izotóp argonná bomlik. Mivel az argon gáznemű, elillan a megolvadt kőből, megmarad viszont a szilárd anyagba

zártan. A kálium és az argon relatív mennyiségével ilyenformán be lehet határolni, mennyi idő telt el, mióta a kő lehűlt a repedéseket kiváltó megrázó kalandja után. A válasz hozzávetőleg négymilliárd év.

A kő repedéseinek az adott különleges jelentőséget, hogy a mélyükön mészkőként parányi karbonátszemcsék rejtőztek. Egy geológusnak a karbonát vizet jelent. A kulcskérdés tehát így hangzott: akkor hatolt-e be a kőbe a karbonát, amíg az az Antarktisz jegében nyugodott, vagy egyenesen a Marsról érkezett? A lerakódások kora hamarosan megválaszolta a kérdést. Noha nagyon bizonytalanul, 3,6 milliárdtól 1,4 milliárd évig terjedő tartomány adódott, mindenképpen jóval azelőtt történt, mint ahogy a kő a Földre érkezett.⁽⁶⁾

Az ALH84001 nyilvánvalóan csendes életet élt a viszonylagos közelmúltig, amikor egy nagy kozmikus becsapódás kivetette a Marsból az űrbe. Hogy a kivetődés időpontját is betájolja, a NASA csoport megvizsgálta a kozmikus sugárzás hatását a meteoritra. Az anyagot az űrben folyamatosan bombázzák a Napból és a Tejútrendszerből érkező, nagy sebességű részecskék. Ez a sugárzás új izotópokat hoz létre az anyagban. Ezek arányának megméréseivel becslést lehet tenni arra vonatkozóan, mennyi időn át volt kitéve a test a sugárzásnak. Az ALH84001 esetében ezt 16 millió évre becsülik, vagyis nagyjából ennyi időt töltött az űrben, mielőtt a Földre zuhant volna. Ahhoz, hogy megtudják, mely időpontban hagyta el a kő a Marsot, a tudósoknak pontosan meg kellett határozniuk, mikor érkezett a meteorit

az Antarktiszra. Erre a közismert szénizotóp datálási eljárást alkalmazták. A radioaktív C^{14} szénizotóp bizonyos mennyiségét a kozmikus sugárzás hozta létre, amikor a kő még az űrt járta. A Földet érése után nem keletkezett több ilyen izotóp. Az elbomlott mennyiség megméréseével kiszámítható, mennyi ideje zuhant le. Az eredmény mintegy 13 000 év volt. Vagyis az ALH84001 hozzávetőleg Kr. e. 11 000-től addig zavartalanul nyugodott a jégben, amíg Roberta Score 1984-ben fel nem fedezte.

A NASA-csoport ezután a kőben talált sajátos karbonátanyagra összpontosította a vizsgálatait. Tudták, hogy ezek a parányi részecskék fontos adalékokkal szolgálhatnak az egykori marsbéli állapotokról. Az alapos vizsgálat rétegezett szemcséket derített fel, melyek átmérője 25 nanométertől (a milliméter egymilliomod része) a milliméter tizedrészéig terjed, és vasban dús, vas-szulfidot és a vas-oxid magnetit nevű formáját tartalmazó anyag burkolta. Egyenként mindezek az ásványok létrejöhetnek különféle kémiai folyamatok révén, az egyazon helyen történő felbukkanásuk azonban elgondolkasztató. Mi hozta létre őket? Hosszas fejtörés után a kutatócsoport merész hipotézis felvázolására vállalkozott. Elképzelhető, hogy a szokatlan karbonátszemcséket élő szervezetek állították elő? Ez bevallottan vad elmélet volt, ám ha ugyanez a kő történetesen földi eredetű lett volna, az ilyesféle ásványi szemcséket habozás nélkül mikrobák tevékenységének tulajdonítják.

A kutatóknak égető szükségük volt valamilyen összehasonlító ellenőrzésre: kevés tudós hatódott volna

meg kizárólag a karbonátszemcséktől, mint az élet bizonyítékaitól. Így McKay és csapata nekilátott keresni egy nagyon eltérő kémiai anyagot, tudniillik többgyűrűs aromás szénhidrogéneket, vagy PAH-okat (*polycyclic aromatic hydrocarbons*) – ezeket a többgyűrűs molekulákat ugyanis bomló életformák hozzák létre. A tömegspektrométerrel folytatott kutatás meghozta a gyümölcsét, és a tudósok rábukkantak a PAH-ok parányi nyomaira. Pezsgőbontás előtt azonban még ki kellett mutatniuk, hogy ezek az anyagok nem az Antarktison kerültek a meteorit belsejébe. Ezt a meteoriton belüli PAH-eloszlásnak a vizsgálatával ellenőrizték, és úgy találták, hogy a koncentráció a kő belseje felé növekszik; ennek épp az ellenkezőjét tapasztalták volna, amennyiben a PAH-ok kívülről hatoltak volna be a meteoritba. Azonkívül más antarktisi meteoritok nem tartalmaztak ilyen mennyiségű PAH-ot. Ez hatalmas előrelépést jelentett, annak bizonyításához azonban még mindig kevésnek látszott, hogy a kőben marsi élőlények tanyáztak. Tudniillik a PAH-ok élő szervezetekből származnak ugyan, ám szervesetlen folyamatok révén is létrejöhetnek; találtak is ilyeneket szokványos meteoritokban, mi több, a csillagközi térben is. Így a PAH-ok jelenléte az ALH84001-ben biztató, de semmiképp sem perdöntő jel. Még ha bebizonyosodott volna is, hogy a PAH-ok a Marsról származnak, létrejöhetnek nem biológiai folyamatok révén, vagy akár az űrből is odakerülhettek.

A NASA-csoport azonban egy harmadik drámai ok miatt is gyanította, hogy egykor élő szervezetek lakták a marsi

követ, ugyanis nagy teljesítményű elektronmikroszkóp alatt ezernyi parányi, a karbonátszemcsébe kapaszkodó, kolbász alakú foltocská vált láthatóvá, szakasztott olyanok, mint a földi baktériumok. McKay és munkatársai azt a következtetést vonták le, hogy a cseppecskék feltehetőleg fosszilizálódott marslakók – olyan mikrobák megkövesedett tokjai, melyek három és fél milliárd évvel ezelőtt éltek a vörös bolygón. Ha nem tévedtek, akkor ők az első emberek a történelemben, akik látták egy idegen életforma lenyomatát.

Ezzel a három bizonyítékkal felvértezve a NASA-csoport 1996 augusztusában nyilvánosság elé lépett. Az eredmény nemzetközi szenzációt keltett, öles szalagcímek és terjedelmes televíziós tudósítások kürtölték világgá. Clinton elnök személyesen jelentette be az újságíróknak és köszöntötte a kutatókat. Al Gore alelnök nekiállt egy „következtetések” szeminárium megszervezésének a Fehér Házban. Vallási vezetők ünnepélyesen nyilatkoztak arról, milyen jelentőséggel bír a Földön kívüli élet a hívők számára. A NASA leporolta a Marsfelderítési terveket és felülvizsgálta a költségvetését. Az internet zsongott a sebtében összehozott észrevételektől és tudományos adatoktól. Az ALH84001 fényképeit letöltötték és számtalan rögtönzött előadásban felhasználták.

Én magam különös módon értesültem a hírről. Augusztus 7-én arra ébredtem, hogy találok egy, a feleségemnek címzett faxot az egyik angliai ismerősünktől, aki az iránt érdeklődött, Londonban vagyok-e, mivel éppen az imént hallott nyilatkozni a BBC-ben a marsi életről. Zavartan

félretettem a faxot, és bekapcsoltam a televíziót. Hát persze, hogy az ausztrál tévében is a NASA bejelentését tállták. Akkor kezdett derengeni bennem, mi történt, és egyszerűen nevetnem kellett. Néhány hónapon át a világ különböző pontjain előadásokat tartottam és interjúkat adtam arról a lehetőségről, hogy meteoritok belsejében mikrobák vagy a kövületeik elérhették a Földet a Marsról (és fordítva). Így aztán, amikor kipattant a szenzáció, a BBC-nek már a birtokában volt egy velem készített interjú a témáról, amit mintegy a jövőbe látva, néhány héttel korábban vettek fel, mielőtt még bármelyikünknek is sejtelme lehetett volna a NASA-nál elért eredményről. Az ausztrál média sajnos kevésbé bizonyult ügyesnek. Alig egy hónappal azelőtt látogatott meg egy forgatócsoport az Australian Broadcasting Corporationtól (ABC). Felvázoltam nekik a meteoritos forgatókönyvet, és még a nakhlai meteorit egy darabját is felmutattam a kamerába, miközben elsütöttem egy poént arról, hogy akár most meg is fertőződhettem. Véletlen egybeesés révén augusztus 8-ára tervezték ennek az interjúnak a sugárzását, az ABC azonban úgy határozott, hogy kivágja a megjegyzésemet a marsi meteoritokban esetleg fellelhető mikrobákról, akár azért, mert túl fantáziadúsnak találták, akár azért, mert túl unalmasnak! Mire bejelentették a NASA felfedezését, már késő volt visszatenni a kivágott anyagot.

Előzetes interjúim egyik mulatságos következménye a „fehér férges” esete. 1996 januárjában Londonba mentem a Ciba Foundation által támogatott konferenciára, mely a „Hidrotermikus ökoszisztémák evolúciója a Földön (és a

Marson)?" címet viselte. A sajtótájékoztatón némelyikünk felsorolta az érveket, miért gondoljuk, hogy valószínűsíthető a Marson az élet, és utaltunk a marsi meteoritokra és a földi fekete füstölgők ökoszisztémáira, az ott tanyázó csőférgekkel. Az üzenet valahogy eltorzulhatott, mert amikor aznap este megjelentem a BBC stúdiójában, felkértek, hogy beszéljek a marsbéli fehér férgek felfedezéséről! Mindent elkövettem, hogy lehűtsem a kedélyeket, a félreértés azonban sehogy sem akart teljes egészében eltűnni. Őszinte döbbenetemre, amikor bejelentették a NASA nevezetes eredményeit, a vélt mikrofossziliákat széles körben fehér férgekhez hasonlították.

McKay és társasága a média mámorának közepette is megőrizte a higgadságát. Tudatában lévén annak a sok megelőző tudományos eredménynek, amelyeket fanfárok kíséretében harsogtak világgá, hogy aztán visszavonják őket, hangsúlyozták, hogy a meteoritban fellelt jelek nem azonosak annak bizonyításával, hogy egykor volt élet a Marson, csupán összhangban állnak a marsi élővilággal kapcsolatos hipotézissel. Még rengeteg munkát kell végezni és további adatokat gyűjteni. Csak a Marsra küldött és mintákkal visszatérő expedíció dönthetné el végérvényesen a kérdést. Az ő nézetük mindenesetre úgy foglalható össze, hogy a marsbéli élet létezése az eddig ismert tényekre adható legvalószínűbb magyarázat.

A tényleges eredmények végül megjelentek a *Science* folyóiratban,^[113] de még mielőtt a nyomdafesték megszáradhatott volna, megtörtént az ellencsapás.

Szakértők számos kritikával illették az elvégzett munkát: hogy nem lehet teljességgel kizárni a földi PAH-okkal történt szennyeződést; hogy a vélt kövületek sokkal kisebbek annál, hogy baktériumok maradványai lehessenek; hogy egyetlen „baktériumot” sem találtak osztódás közben; hogy a karbonátszemcsék olyan körülmények között rakódtak le, ami túlságosan forró az élet számára. Egyes kommentátorok azon nézetüknek adtak hangot, hogy lám, lám, milyen gyanúsán szerencsés ez a NASA-csoport. „Az egész pályafutásomat azzal töltöttem, hogy archeobaktériumok mikrofossziliáit kerestem a Földön – közölte velem Malcolm Walter ausztrál paleogeológus –, és összesen ha egy maroknyit találtam. És akkor ezek a fickók marsi fossziliákat találnak alig tizenkét kő véletlenszerű mintájában!”

A „kövületek” parányi mérete kétségkívül nyomós ellenvetés. Alig 50 nanométerükkel a karbonát-kolbászkák százszor kisebbek a földi baktériumok nagy többségénél. Tulajdonképpen olyannyira aprók, hogy felvetődik a kérdés, lehetett-e valaha is élő, ami ennyire parányi. Ha DNS-alapú szervezetek, akkor csupán 1000 bázispár férhetett a génkészletükbe. És akkor még figyelmen kívül hagytuk az összes többi struktúra létét, például a sejtfalét, ami a földi baktériumok esetében legalább 25 nanométer vastag. Végrehajthatta-e egy marsi mikroba az állítólagos ásványfeldolgozási mutatóanyagokat és más anyagcsere-működések egy közönséges földi baktérium molekuláris felszereltségének kevesebb mint egy százalékával? Dehogy, vágja rá a legtöbb mikrobiológus. Igen, jelenti ki

Robert Folk és Leo Lynch az austin University of Texas munkatársa. Folk és Lynch azt állítják, hogy itt, a Földön fedeztek fel ásványosodott mikrobaformákat, amelyeket nanobaktériumoknak neveztek el és mindössze 100 nanométer átmérőjűek.^[114] Kijelentésüket alátámasztja finn orvosok egy csoportjának a munkája, akik úgy vélik, hogy élő nanobaktériumokat izoláltak az emberi vérből.^[115]

Az ALH84001-ben talált sajátosságok biológiai értelmezése ellen Ralph Harvey, a Case Western University, és Harry McSween, a University of Tennessee munkatársa intézte a legkomolyabb kihívást. Ezek a kitűnő geológusok megvizsgálták a meteoritot és arra a következtetésre jutottak, hogy a karbonátanyag legalább 650 °C-os hőmérsékleten rakódott le. Ez a legszívósabb hipertermofileket is azonnal elpusztítaná. A NASA kutatói az oxigénizotópok arányával hátrították el ezt a kifogást, kijelentve, hogy a lerakódási hőmérséklet nem volt magasabb 250 °C-nál, és akár jóval alacsonyabb is lehetett. Sajnos, az elemzésük rejt némi bizonytalanságot, mivel a könnyebb oxigénizotóp kiszökhetett az űrbe. E sorok írásakor még nem oldódott meg ez az ellentmondás. Nem minden tudós volt azonban ennyire szkeptikus. A Britain's Open University kutatócsoportja felhívta a figyelmet, hogy nem a NASA-csoport tett közzé először marsi meteoritban talált biológiai aktivitásra utaló bizonyítékot. 1989-ben Ian Wright, Monica Grady és Colin Pillinger közölték elemzésüket egy másik, ugyancsak a Marsról származó, antarktisi meteoritról, az EETA79001-ről. A brit tudósok leírták, hogyan találtak mélyen az

EETA79001 belsejében „a földi biogén-összetevőktől megkülönböztethetetlen” szerves anyagot a karbonátanyagok között. Egy alig 200 millió éves kőben! A leletük nem szükségszerűen utal életre, ők viszont tudatosan következtettek arra, hogy „következményei a Mars tanulmányozására nézve nyilvánvalóak”.^[116]

Gyilkos járvány a vörös bolygóról!

A történelem könnyen a huszadik század legjelentősebb dátumának ítélné 1969. július 21-ét, azt a napot, amikor először tette a lábát emberi lény egy másik világra. De amikor Neil Armstrong, Buzz Aldrin és Michael Collins néhány nap múlva visszatértek a Holdról, nem köszöntötték őket azonmód csókokkal és ölelésekkel, hanem egy különös kabinba dugták őket a *USS Hornet* fedélzetén, és csak az ablakból integethettek a világnak. Ez a minden ünnepélyességet nélkülöző bánásmód azt célozta, hogy elkülönítsék a Holdon járt embereket és a holdközveteket az emberiségtől. Bár kevés tudós hitt a holdlakó mikrobákban, a NASA a legcsekélyebb rést sem akarta nyitva hagyni egy esetleges gyilkos járvány előtt. A Hold felszíne végül is az eddig megvizsgált legsterilebb környezetnek bizonyult, és a további Apollo-repülések többsége esetében csendesen megszüntették a karantén szabályokat.

Amikor a későbbiekben a Viking úgy találta, hogy nincs élet a Marson, lassan lekerült a NASA napirendjéről a karantén kérdése. Manapság azonban ismét aggódó

hangok hallatszanak. Amennyiben van élet a Marson, és a NASA emberi személyzetből álló expedíciót küld oda, mi lesz, ha az űrhajósok eleven marsi bacilusokat hoznak vissza? Ki tudja, milyen következményekkel járna? Tekintettel a marsi környezet zordságára, a marsbéli mikrobák úgy terjednének a mi lakályosabb bolygónkon, mint a bozóttűz. Az emberiséget teljesen kiirthatná valamilyen gyógyíthatatlan idegen kór, vagy mondjuk a terményeinket támadná meg, amiből egyenesen következik a tömeges éhhalál. Esetleg a marsi lények alattomosan felfalnának valamilyen létfontosságú anyagot, például a nitrogént, amivel lassú éhhalálra ítélnék a bolygót. Nem egy óvatosságra intő példát ismerünk a Földről. Amikor a brit telepések nyulakat eresztettek el Ausztráliában, ökológiai katasztrófát szabadítottak el. A Földön kívüli mikrobák még rettenetesebbeknek bizonyulhatnak. Ezeket a félelmeket hamarosan próbára lehet tenni. Nem szükséges a Marsra küldött, emberekből álló expedíció, hogy ki legyen téve az idegen fertőzés veszélyének. Az anyag Földre küldése egy ember nélküli szondában – amit egyébként már javában terveznek – ugyanezt a veszélyt testesíti meg, ha a felszíni kövek élő szervezeteknek vagy szunnyadó spóráknak nyújtanak menedéket.

Bár nem egy tudományos-fantasztikus történet épül arra témára, hogy idegen kórokozók halálos járványt indítanak el, a tudósok általában pánikkeltésként vetik el az efféle elmékedéseket. Azt mondják, hogy a Földön kívüli mikrobák valószínűleg olyan alapvetően különböznek a földi

szervezetektől, hogy nem jelenthetnek valós veszélyt. Az egészségre éppen azok a mikroorganizmusok a legveszedelmesebbek, amelyek alapvető biokémiájukat tekintve a legjobban hasonlítanak a gazdaszervezetre. Thomas Jukes, a Berkeley biofizikusa szerint: „Nincs okunk feltételezni, hogy a marsi szervezetek ugyanazokat az aminosavakat vagy genetikai kódot használnák, mint a földi élet.”^[117] A másmilyen alaprendszert alkalmazó marsbéli mikrobák még csak fel sem ismernék bennünk az élőlényt. Mint Jukes rámutat, attól bezzeg senki nem retteg, hogy az Antarktiszról indul ki egy járvány – és teljes joggal nem. „Az eltérő evolúciót létrehozó elkülönültség minden ilyen veszélyt *csökkent*.” Jukes tehát arra következtet, hogy a marsi élőlényeknek még ártalmatlanabbaknak kell lenniük, mint az antarktisiaknak.

Ám jobb félni, mint megijedni. A fertőzési veszély megfogalmazásával a NASA már régen elhatározta, hogy el kell kerülni, hogy mikroba vagy spóra jusson a Földre az űrből. Az egyik dokumentum kijelenti: „Meg kell védeni a Földet minden olyan veszélytől, amit a más bolygóról visszatérő űrhajók hordozta Földön kívüli anyag jelenthet... legyen előírva az űrhajók hordozta szerves vagy biológiai szennyeződés ellenőrzése”.^[118] Újabban a National Research Council's Space Studies Board létesített egy munkacsoportot Claude Canizare elnökletével. Jelentésük, a *Marsi minták visszajuttatása; álláspontok és ajánlások* elismeri, hogy „a potenciálisan ártalmas hatások kockázata nem nulla” és számos különleges biztonsági intézkedést javasol. Például: „Kezeljék a Marsról űrhajóval érkezett

mintákat potenciálisan veszélyesként, amíg be nem bizonyosodik az ellenkezője. Nem biztonságosan elszigetelt marsi anyag, ideértve az űrjárműnek a marsi környezettel érintkezett felületét is, csak sterilizálás után juthasson a Földre. Ha a mintának a Földre vezető úton történő elszigeteltsége nem biztosítható, akkor a mintát és az űrjármű bármely alkotóelemét, amelyik érintkezhetett a mintával, vagy sterilizálják az űrben, vagy nem juthat a Földre.”^[119]

Könnyű ezt kimondani, de nehéz megtenni. A tényleges sterilizálási eljárás alapvetően problematikus. Ha mérgező vegyszerekben vagy sugárzásban fürdetjük, netán heves hőnek tesszük ki a mintákat, azzal minden valószínűség szerint megsemmisítenénk a tudományos értéküket. A munkacsoport egyik ajánlása, amely szerint a sterilizálandó űrhajó külső felületeit vonják be pirotechnikai anyaggal és gyűjtik meg az űrben, legalábbis meggondolatlanak tűnik. Sokkal ésszerűbb javaslat lenne a külső felületeket kitenni a Nap ibolyántúli sugárzásának. Csakhogy a sterilizáció pontos eljárását még nem sikerült kitalálni.

A jelentés elrendeli továbbá a karanténul szolgáló létesítmény kialakítását legalább két évvel a tényleges használatbavétel időpontja előtt, és az ellátását személyzettel, mikrobiológusoktól geológusokig. Eleinte a minták valószínűleg néhány kilogrammnyi kőre szorítkoznak, amelyeket be lehet zárni egyetlen megfelelően szigetelt berendezésbe. Nem adogatják tovább a marsi kődarabokat az érdeklődő egyetemeknek és kutatólaboratóriumoknak, ahogy az a holdközvetminták

esetében történt. Az anyagot a bioaktivitás jelei után kutatva alaposan átvizsgálják. Emberi szöveteket és más élő szervezeteket tesznek ki az anyag hatásának, hogy felfedezhetők-e idegen kórokozók. Sajnos, egy valóban tökéletesen biztonságos létesítmény felépítésének költségei megfizethetetlenek lennének. Egyes tudósokban még az az ötlet is felmerült, hogy építsenek karanténlaboratóriumot Föld körüli pályán.

John Rummel Woods Hole-i tengerbiológus korábban a NASA bolygóvédelmi tisztjeként szolgált. Neki jutott a feladat, hogy gondoskodjon arról, ne szennyezhesse az űrszonda földi mikrobákkal a Marsot, és viszont, hogy ne szabadulhassanak el marsi élőlények a Földön. Aggódott, vajon a kőzetmintákban ideérkező gyilkos járvány fenyegetése miatt? Nemrégiben elmesélte egy újságírónak, hogy bár a NASA-nak kötelessége felelősségteljesen eljárnia, a legelszántabb marsi mikroba is módfelett veszélyesnek találná megfertőzni az olyan jól körülbástyázott és az esetleges támadó szempontjából tökéletesen idegenszerű szervezetet, mint az ember. „Nem hiszem, hogy bármi, ami a Marson élhet, fenyegetné a Földet – közölte Jukes okfejtését ismételve. – Ha lenne emberfertőző szervezet a Marson, akkor az szörnyen magányosan érezhetné magát.”^[120] Michael Meyer, a NASA jelenlegi bolygóvédelmi tisztje hasonló nézeteket vall. „Annak az esélye, hogy valami olyasmi tér vissza, ami megfertőzi az embereket, gyakorlatilag nulla – mondta. – Mindazonáltal nem árt elővigyázatosnak lenni.”^[121] Jukes derülátóbb, úgy vélvén, hogy erősen eltúlozzák a

kockázatot. „Semmi nem igazolja, hogy a Föld védelmében a marsi minták elszigetelésére bármennyit is költsünk” – jelenti ki.^[122]

Bár a legtöbb tudós elutasítóan nyilatkozik a marsi mikrobák veszélyességéről, a kérdés valószínűleg egyre nagyobb aggodalmat kelt a nagyközönségben. Egyes csoportok már felkészültek a jogi kihívásokra. „Kórokozók vagy az emberiséget megfertőző bárminemű dolgok miatt nem aggódom – vallja be Rummel. – Azt hiszem, a legrettenetesebb rémálmom egy falkára való ügyvéd, amint leállítanak egy programot, mert senki nem számolt ezzel a lehetőséggel.”^[123] Jack Farmer, a NASA egyik planetológusa és a marsi élet lehetőségének a szakértője osztja Rummel nézetét: „A bolygóvédelem kérdése olyan alvó óriás, ami, ha egyszer felébred, megszabhatja a Mars-kutatás jövőjét.”^[124]

De ha mindent elkövetnek is, hogy a lehető legkisebbre csökkentsék a bolygóközi szennyeződés kockázatát, még mindig marad egy fenyegetés, amivel a világon semmit nem kezdetünk. Az ALH84001 az Anyatermészet szívességéből látogatott hozzánk a Marsról. Sem személyzettel ellátott méregdrága expedícióra, sem robotkarral nem volt szüksége, hogy eljusson a Földre. Az ismert marsi meteoritok szerény gyűjteménye csak egy kis töredékét képviseli a marsi kövek millióinak, amelyek lezuhantak és a jövőben is hullani fognak a bolygónkra. Egyes becslések szerint a Földre jutó marsi anyag össz mennyisége évenkénti átlagban elérheti a 100 tonnát. Amennyiben McKay és munkatársai nem tévedtek, akkor

az ALH84001 megkövesedett marsi mikrobákat hozott ide. És mi lesz, ha egy másik meteorit történetesen élő mikrobákkal érkezik?

Az elmúlt év során a sajtó újra és újra feltette nekem a kérdést, hogy azok a bizonyos jelek az ALH84001-ben szerintem is megkövesedett marsbéli baktériumok-e. A kérdés kifogástalannak tűnik, valójában azonban tökéletesen értelmetlen. A bizonyíték, mint mondják, relatív. Ahogy McKay és kollégái munkája nem jelent minden szempontból kikezdhethetetlen bizonyítékot, az eredményeiket csak annak fényében lehet megfelelően értékelni, amit már tudunk a marsbéli élet valószínűségéről.^[125] Ha, mint azt a tudósok többsége feltételezi, az élet egy nagyon alacsony valószínűségű véletlen eredménye, akkor annak az esélye, hogy az élet önállóan létrejöhessen a Marson is, azaz kialakuljon egyazon Naprendszer két bolygóján, végtelenül elenyésző. Az ilyen tudósok nem tekintik meggyőzőnek a meteoritban talált nyomokat. Másfelől, ha valaki annak a véleményének ad hangot, hogy 3,6 milliárd évvel ezelőtt létezett a Marson élet, akkor a NASA pontosan azt a fajta bizonyítékot találta, amire az ember számít. Engem igazán nem nehéz meggyőzni, hogy az ALH84001 valódi kövületeket tartalmaz, mert úgy vélem, 3,6 milliárd évvel ezelőtt majdnem bizonyosan *volt* élet a Marson. Ebben a kérdésben pedig nem azért vagyok olyan magabiztos, mert hitem szerint az élet egy marsi őslevesből bukkant elő (bár így is történhetett), hanem azért, mert a bolygók nincsenek, és soha nem is voltak elszigetelve egymástól.

9. PÁNSPERMIA

Képzeljük el a világűr egy pontját, fényévekre a legközelebbi csillagtól. Mindenhol csak a feneketlen űr feketélik körülötte. A hőmérséklet alig valamivel haladja meg az abszolút nulla fokot. Mindenfelé csak az űr tátong, amelyet csupán néhány kósza atom és alkalmilag tovasuhanó kozmikus sugárzás népesít be. Az ürességnek ebben a határtalanságában váratlanul feltűnik egy magányos anyagszemcse, olyan apró, hogy szabad szemmel nem is pillanthatjuk meg. Ez a parányi részecske zavartalanul szelte át a Tejútrendszert semmilyen konkrét cél felé nem vezető útján. Még nagy teljesítményű mikroszkópon át sem látnánk semmi izgalmasabbat egy porszemcsénél. Közelebbi vizsgálatra azonban erről a bizonyos szemcséről kiderül, hogy sokkal több egyszerű és érdektelen pornál. A szemcse: egy baktériumspóra.

A spóra az élet legapróbb jeléről sem árulkodik. Víztartalmát elveszítve és összezsugorodva némán szunnyad vastag védőburkában, még a molekulái is csaknem teljesen felfüggesztették a mozgásukat az űr mérhetetlen fagyában. Már annyi sugárzást állt ki, amennyi ezerszer és ezerszer megölt volna egy embert. A spóra azonban valójában nem halott. Nem tekinthető igazán élőnek sem; nem csinál semmit, csak várakozik. Várhat egymilliárd évet, várakozhat örökké. Ám van rá egy

elenyészően csekély esély, hogy egy szép nap a spóra eljut egy bolygóra, ahol folyékony vizet talál. Akkor, ezer és ezer évezrednyi zavartalan szunnyadás után a spóra hirtelen visszatér a halálból. Baktériumlelke mocorogni kezd, felizzanak genetikai memóriabankjai, anyagcseréje újraindul. A baktérium ismét élni fog, a szó teljes értelmében. És akkor újra és újra sokszorozódni kezd. Élettel termékenyítődik meg az új bolygó, amely akár a Föld is lehetett egykor.

Ezt a forgatókönyvet szülhette teljes egészében a képzelet, de elég komolyan veszik ahhoz, hogy ösztönözzön számos közelmúltbeli kísérletet. Az az elképzelés, hogy szervezetek átszelhetik az űrt, régóta szóbeszéd tárgya. 1821-ben Sales-Gyon de Montlivault felvetette, hogy a Holdról származó csírák indították el az életet a Földön. Nem sokkal később egy német fizikus, H. E. Richter vélekedett úgy, hogy meteoritok vagy üstökösök, miközben a bolygók atmoszféráját súrolják, felszedhetik és továbbíthatják más bolygókra a lebegő mikroorganizmusokat.

A huszadik század fordulóján Svante Arrhenius svéd kémikus továbbfejlesztette ezt az elméletet. Szerinte a csillagok csekély, de állandó és halmozódó sugárnyomásától hajtva sodródhatnak baktériumspórák a Galaktikában. A kialakuló Föld a szunnyadó, de még életképes mikroorganizmusok záporába került, és amint a felszíne eléggé lehűlt, kívánatos célállomásnak bizonyulhatott ezeknek az űrlakóknak. Arrhenius pánspermiának nevezte el az elméletét, jelentése: „mindenütt magok”.^[126] Az eredeti közzététele óta

számtalanszor átdolgozták ezt az elképzelést.

Ebben a könyvben mindeddig abból a feltételezésből indultam ki, hogy bármennyi is a bizonytalanság a holról és a hogyanról, a földi élet a Földön jött létre. De biztosak lehetünk-e benne? Az a tény, hogy az élet olyan hamar megtelepedett a Földön, amint kedvezővé váltak a körülmények, bizonyos mértékben inkább arra utal, hogy a világűrből kellett érkeznie, vagyis az élet igazi teremtése valahol másutt ment végbe az univerzumban.

Túlélés az űrben

Hihető-e, hogy védtelen szervezetek túléljék az űrt átszelő utazást? A világűr aligha kényezteti az életet. A csaknem tökéletes vákuumot és az alacsony hőmérsékletet sugárzás is súlyosbítja, amely tartalmazza a Nap ibolyántúli sugárzását, a napkitörésekből származó nagy sebességű protonokat, valamint a kozmikus sugárzást. Az ilyen körülmények igen hamar halálosnak bizonyulnának a legtöbb ismert életforma számára. Ám mindezen veszedelmek ellenére nem minden organizmus pusztul el egykettőre a világűrben. A legendás túlélőképességüket másutt már igazoló baktériumok az űrbéli viszonyokat is figyelemre méltó rugalmassággal veszik tudomásul.

A német Űrorvostani Intézet tudósai a NASA Long Duration Exposure Facility-jének (hosszú időre a világűrbe kitett, majd visszahozott platformjának) igénybevételével figyelték meg, mi történik az űrben a *Bacillus subtilis* spóráival.^[127] Szűrők alkalmazása lehetővé tette a tudósoknak, hogy

elkülönítve vizsgálják meg az űr vákuumának, a Nap- és a Tejútrendszer ibolyántúli sugárzásának és a kozmikus sugaraknak a hatásait. A minták visszahozatalakor a csak vákuumnak kitett baktériumok két százaléka maradt életképes. A cukor vagy sóréteg jelenléte jelentős mértékben javította az életben maradási esélyeiket. Azon példányok közül, amelyeknek az űrbéli sugárzások minden fajtáját ki kellett állniuk, hozzávetőleg minden 10.000-ból egy maradt életben, ám a védelem a Nap ibolyántúli sugárzásától jelentősen növelte a túlélési arányt.

Hogy milyen ellenállóak a mikrobák, azt japán tudósok olyan kísérletekkel bizonyították, melyek során 250 űrben töltött év körülményeit szimulálták laboratóriumban.^[128]

Vákuumkamrába zártak *Bacillus subtilis* spórákat és más élő organizmusokat, lehűtötték -196 °C -ra és Van de Graaff generátorból 24 órán át bombázták őket gerjesztett protonokkal. A minta fele túlélte ezt a mészárlási kísérletet. Az állóképességi rekordot a dohány mozaikvírus tartja, amely 85 százalékban fertőzőképes maradt.

Peter Weber és Mayo Greenberg a holland Leideni Egyetemen az űr minden sugárzása közül a legártalmasabb, az ibolyántúli sugarak hatását vizsgálta.^[129] A mélyűr hidegének szimulálására vákuumkamrában -263 °C -ra hűtötték le a spórákat (alig tíz fokkal magasabbra az abszolút nullánál), és egy lámpából intenzív ibolyántúli fényt sugároztak rájuk. A szervezetek 99,9 százaléka elpusztult a 2500 évnyi csillagfénybeni fürdésnek megfelelő körülmények között. Egy kis töredéküknek azonban sikerült életben maradniuk. Különös

módon ezek a spórák mintha egyenesen kedvelték volna a hideget: a csillagközi hőmérsékleten jelentősen megnövekedett az élettartamuk.

Az ilyen lenyűgöző sugárzástűrésnek nemigen mutatható ki az evolúciós értelme, hacsak az élet a múlt bizonyos szakaszában nem kényszerült áthaladni valamiféle sugárzási „útszűkületen”. Ha egyes mikrobáknak alkalmazkodniuk kellett az új erőteljes sugárzásához, ennek a tűrőképességnek a maradéka érhető tetten a mai földi szervezetekben. Hoyle és Wickramasinghe idézte a *Micrococcus radiophilus* baktérium esetét, amely meglehetősen ellenállást képes kifejteni a sugárzással szemben, egy speciális mechanizmus révén, amit a röntgensugarak által súlyosan károsított DNS-e helyreállítására fejlesztett ki.^[130] Ez a tehetséges kis mikroba nagyon azt a benyomást kelti, mintha a csillagközi környezet terméke volna.

Akármilyen meglehetősen erővel képesek is felvenni a harcot a sugárzás ellen, nagymértékben megnövekszik az esélye annak, hogy egy élő mikroba a bolygórendszerek között utazgasson, ha legalább részben sikerül árnyékolni a sugárzást. Weber és Greenberg szerint a mikrobák utazhattak egyfajta pajzsként szolgáló csillagközi felhők belsejében. Az ilyen felhők gyakoriak a Galaktika spirálkarjaiban; néhány tízmillió évente a Naprendszer is áthalad egyen-egyen. A Föld felső atmoszférájában lebegő, vagy becsapódás hatására kivetett anyagban lapuló mikrobák elsodródhattak a felhővel, talán hogy átszálljanak egy másik naprendszerbe. És ugyanígy, a

felhőben tanyázó bármely idegen mikroba is átszállhatott a Földre. A felhők jellemzően úgy másodpercenkénti tíz kilométeres sebességgel haladnak, és hozzávetőleg tízmillió évet vesz igénybe, amíg eljutnak egyik csillagtól a másikig. Bár sűrűségük hétköznapi értelemben nagyon csekély, a tömegük elég nagy ahhoz, hogy kizárják a sugárzás nagy részét. A lebegő mikroba továbbá felszedhet útközben egy csomó jeget és szerves anyagot, amiből újabb védőréteget alakít ki. Weber és Greenberg becslése szerint ez a fajta, a kozmikus sugárzás elleni egyesített oltalom akár több millió évre is kiterjesztheti a spórák várható élettartamát – ami elegendő időt biztosít, hogy eljussanak egy másik naprendszerbe.

A kóborló spóra akkor kerül bajba, amikor megközelít egy csillagot. Itt valósággal fürdik az ibolyántúli sugárzásban. Megfelelő elnyelő anyagból álló burkolat nélkül biztos halál várna rá. A kanadai University of Waterloo munkatársa, Paul Wesson feltételezi,^[131] hogy a pánspermiumok nagyon öreg csillagok bolygórendszereiből érkezhettek, megfelelő koromrétegbe bugyoláltan. A csillagok, mint amilyen a Nap is, öregedésük közben szénszemcsék áradatát pöfögik ki. A bolygóközi térben sodródó mikrobát elképzelhetően elegendő szenny lepheti be ahhoz, hogy mérsékelje az ibolyántúli sugárzás jelentette veszélyt – a csillagok porral borított vándorának életét éppen a por menti meg.

A pánspermia folyamatának sikere természetesen nem követeli meg, hogy minden egyes úrben utazó mikroba életben maradjon a csillagközi úton. Elég, ha egyetlen

baktérium életben marad és otthonra lel egy alkalmas bolygón.^[132] Az élet akkor is megállíthatatlanul elterjed a kozmoszban, ha a célba éréskor a mikrobák hivatalosan halottnak számítanak. Az RNS-világ elmélete, továbbá Spiegelman és Eigen a 4. fejezetben tárgyalt kísérlete szerint a vegyületek őslevesében, a megfelelő RNS-minta hozzáadásával elindulhat a replikáció. Az RNS elég hosszú töredéke ismét elindíthatja a biogenezis egész folyamatát, ha kezdetleges szakaszban is. Az élet gyakorlatilag akkor is újra létrejöhethet, ha mindössze az élet szoftveres alkotóelemét szolgáltatja hozzá a világűr.

Bármilyen szellemesek legyenek is a „csupasz” pánspermiumoknak ezek az elképzelései, én magam nehezen tudom komolyan venni. Bár elméletileg elképzelhető a különálló, kiszolgáltatott szervezetek utazása a bolygók között, az esélyek erősen ellene szólnak. Igencsak valószínűtlen, hogy ez Galaktika-szerte módszeresen zajlana; egyszerűen túl nagy veszélyt jelent a sugárzás. Ám igenis akad módszer, amellyel a mikrobák viszonylagos biztonságban utazhatnak egyik bolygóról a másikra: ha sikerül felkapaszkodniuk egy meteoritra.

Meteoritban érkezett az élet a földre?

1834-ben Jons Berzelius kémikus a franciaországi Alais városa mellett lehullott meteoritból származó mintákhoz jutott. Miután gondos kémiai elemzésnek vetette alá a mintákat, közzétette, mit talált. A legtöbb meteorit kő- vagy fémtartalmú, de Berzelius szénvegyületek jelenlétét is

észlelte. A szén számos dolgot jelenthet, de Berzelius számára rögtön az életet jelentette. Tehát az alais-i meteoritban a Földön túli életre utalt a szén? Berzelius függőben hagyta a kérdést, a későbbi kutatók azonban nyíltabban foglaltak állást. Marcellini Berthelot „szénszerű” anyagot izolált az 1864-es orgueili meteoritból. Mikroszkóp alatt pici, széntartalmú anyagba burkolt, gömbölyű szemcsék tárultak a szeme elé, amelyek megkövesedett baktériumsejtekre emlékeztették Berthelot-t.

Az 1880-as években Otto Hahn német geológus azzal a kijelentéssel állt elő, hogy különböző meteoritminták belsejében fosszilizálódott életformák egész sorát fedezte fel. Ezen szervezetek között olyan viszonylag fejlett fajok is előfordultak, mint a korallok. Hahn szenzációs állítását általánosan elvetették. A kritikusok szerint élőlényekre emlékeztető ásványi zárványok tévesztették meg, mint amikor valaki szikla- és felhőalakzatokban arcokat vél felfedezni. Mindazonáltal sok tudós képzeletét megragadta az ötlet, hogy az élet meteoritban érkezhett a Földre, és mindmáig elhangzanak az élet jeleit tartalmazó meteoritokról tudósító bejelentések.

Az ilyen kijelentéseknek csak a tudományos technikák előrelépésével lehetett megfelelően utánajárni. Az 1960-as évekre hatalmasat fejlődött a vegyelemzés, és ez arra ösztönözte az Egyesült Államokban Bartholomew Nagyot és George Claust,⁽⁷⁾ hogy elővegyék az orgueili meteoritot. Tömegspektrométerrel megerősítették a szerves anyag jelenlétét és számos komplex szénhidrogént azonosítottak. De ez még csak a kezdet volt. Nagy és Claus bejelentette

az úgynevezett „szervezett elemek” felfedezését is, és hozzáfűzték a szenzációs következtetést, miszerint a meteoritban talált szerves anyag minden valószínűség szerint biológiai eredetű.^[133]

Mint várható volt, Nagy és Claus közleménye kritikák viharát váltotta ki. A szénhidrogéneket földi szennyeződésnek, illetve egyszerű kémiai folyamatok eredményének tulajdonították. Nagy szerényen elfogadta ezen kritikák egy részét, és további vizsgálatokat indítványozott. Szépen le is csillapodtak volna a kedélyek, ha nem történik egy szerencsés esemény 1969. szeptember 28-án, amikor meteoritot láttak lehullani a délkelet-ausztráliai Murchison városa mellett. A tárgy felrobbant a levegőben, és darabjai szétszóródtak a környéken. A helyiek elkezdték összeszededegetni a különös fekete kő szilánkjait, amelyek erős denaturált szesz szagot árasztottak. Az eset hamarosan felkeltette John Lovering (Melbourne University) figyelmét, aki azonnal helyesen ítélte meg az anyag természetét. A murchisoni meteorit egy ritka kategóriába, a széntartalmú, szerves anyagokban gazdag kondritokéba tartozik; innen származik a mindmáig megőrződött sajátos szaga.

Felfedezésük óta a murchisoni szilánkok rengeteg találgatásra adtak lehetőséget, és egy sor vizsgálaton estek át, amelyek figyelemre méltó eredményeket hoztak. A meteorit belsejében talált számos szerves anyag között egyaránt akadtak a földi élet által alkalmazott és nem alkalmazott aminosavak. Ez felveti a kérdést: ezek a szerves anyagok Földön kívüli lények elbomlott

maradványai, vagy egyszerű kémiai folyamatok hozták létre őket? Jelentős tényezőnek bizonyult az ügyben annak a felfedezése, hogy a Murchison-meteorit egyes aminosavai többletet mutatnak balos csavarodású változatokból a jobbos csavarodásúakkal szemben. Mint azt a 3. fejezetben kifejtettem, a földi élet egyik jellemzője, hogy csak különféle balos csavarodású aminosavakat készít és használ, így az aminosavak csavarodásának iránya a meteoritban utalhat biológiai eredetre. Másfelől viszont ismerünk olyan fizikai folyamatokat (például a polarizált fényvel történő megvilágítás), amelyek ugyancsak a balos csavarodású aminosavak szintézisét fokozzák.^[134]

Egy dolgot a Murchison-meteor mindenestre feltétlenül bizonyít. Akadnak az űrben testek, amelyek pontosan a földi élet elindulásához szükséges szerves vegyületeket hordozzák. Az élet építőköveinek szintetizálásához semmiféle őslevesre nincs szükség a Földön. Ezek az anyagok készen hullhatnak az égből.

A Földi élet a Marsról ered?

Annak ellenére, hogy egész életemet tudományos kutatással töltöttem, nem hiszem, hogy egy tucatnál több igazán eredeti gondolatom támadt volna. Ezek a jó ötletek rendszerint fokozatosan körvonalazódtak bennem, és apránként öltöttek alakot, miközben belemerültem a munkámba. Hirtelen revelációk és a ráérzés vakító pillanatai nézetem szerint meglehetősen ritkák a tudományban. Az egyik emlékezetes alkalom, amikor a

pillanat hatására egyszer csak feltárult előttem a következtetés, 1992 júliusában esett meg, amikor Lloyd Hamilton előadását hallgattam az „Australian and New Zealand Association for the Advancement of Science” brisbane-i találkozásán. Hamilton a föld alatti bioszféráról szólván kifejtette a föld alatti kőzetekben élő szervezetekkel kapcsolatos munkásságát. Az előadása közben felötlött bennem, hogy ha nyilvánvalóan szilárd kövek belsejében élhetnek mikrobák, és ezek a kövek kozmikus becsapódások törmelékében eljuthatnak a Marsról a Földre (vagy fordítva), akkor akár mikrobák is utazhatnak bennük és így a bolygók kölcsönösen megfertőzhetik egymást. Egy védelmező pajzsként szolgáló kőben sokkal kevésbé volna kockázatos az utazás, mint Arrhenius elméletében. Ráadásul így a szervezetek már kész formájukban jutnának el a Földre, illetve a Marsra. Mindezt a hozzászólások alkalmával fel is vettem az előadás végén, de kissé vadnak tűnt az ötletem, és nem jutottunk túl messzire a megvitatásban. Mindazonáltal a következő hónapok során folytattam az elképzelés kidolgozását, és 1993 novemberében előadást tartottam róla a Milánói Egyetemen. A reakció ezúttal is visszafogottnak bizonyult. A feltételezést belefoglaltam a következő évben megjelent kis könyvembe, az *Are We Alone?*-ba (Egyedül vagyunk a Világmindenségben?). Nem sokkal ezután felfedeztem, hogy Jay Melosh (University of Arizona, Lunar and Planetary Laboratory) tőlem függetlenül hasonló következtetésekre jutott.^[135]

Sajnos, nincs új a Nap alatt. Semmi esetre sem Melosh és

én voltunk az elsők, akik felfigyeltek a lehetőségre, hogy mikrobák a kivetett kövek belsejében is utazgathatnak a bolygók között. Már 1871-ben nem kisebb tudós, mint Lord Kelvin, kimutatta, hogy egy hatalmas test bolygóba csapódása sok törmeléket eltávolíthat, és így „ezen sok nagy és kicsiny darab, magvakkal, eleven növényekkel és állatokkal, kétségkívül szétszóródna az űrben”. A British Association számára Edinburghban tartott beszédében Kelvin feltételezte, hogy a szétszóródott darabok némelyike elérhet más bolygókat, és azokat megtermékenyítheti élettel: „Mivel mindannyian szilárdan hisszük, hogy az ősidőktől fogva mindmáig volt és van az életnek sok világa a miénken kívül, a legnagyobb mértékben valószínűnek kell tekintenünk, hogy számtalan maghordozó meteorit s zeli keresztül-kasul az űrt. Ha a jelen pillanatban nem létezne élet ezen a Földön, egyetlen ilyen kő idehullása... azt eredményezhetné, hogy növényzet borítja el.”^[136]

Ha az élet valóban egyik bolygóról a másikra szökellhet, nem vehetjük biztosra, hogy a földi élet a Földön kezdődött. Érkezhetett például akár a Marsról is.^[137] Tudjuk, hogy a Földön élnek mikrobák kőzetek belsejében. Ha a Marson is volt élet, valószínűsíthető, hogy először a talajszint alatt élő kemotrófok formájában jött létre. Így a Marssal történt kozmikus ütközések nyomán kivetett kődarabok ugyancsak tartalmazhatnak mikroorganizmusokat a belsejükben. A kő belsejébe begubózott, élő marsi mikrobák sikeresen átutazhattak a Földre.

Az első pillantásra jelentős hiányosságot mutat az elmélet. Egy akkora becsapódás, ami elég nagy egy kőnek az űrbe

lövéséhez, nem morzsolná-e azonos mód péppé az összes mikrobalakóját? Érdekes módon a válasz határozottan tagadó. A mikrobákat éppen a kicsinységük óvja meg. Hogy számszerűsítsük a dolgot, egy akkora erejű becsapódás, amelynek hatására egy kő eléri a szökési sebességet a Marsról (5 kilométer másodpercenként) 10.000 g gyorsulásnak tenné ki a mikrobákat. Az ilyen hatalmas lökés egész bizonyosan szétlapítja az élő szervezetek döntő többségét. Csakhogy a mikroorganizmusok parányi mérete és csekély tömege azzal az eredménnyel jár, hogy ilyen kolosszális gyorsulási erőt is nagy valószínűséggel kiállnának és viszonylag épen és egészségesen hagynák el a Marsot.

A kivetődési folyamat során azonban jelentkezik komolyabb kockázat is. A nagy kozmikus becsapódás óriási lökéshullámot hoz létre, ami a szó szoros értelmében összesajtolja a környező kőzeteket. Mint minden anyag, a kő is felmelegszik nyomás hatására, és még a legmérsékeltőbb összenyomás is halálos értékekre emelné a hőmérsékletet. A legutóbbi időkig a geológusok feltételezték, hogy a követ egyúttal meg is olvasztja a bolygó körüli pályára repítő kataklizma. Laboratóriumi kísérletek azt jelezték, hogy a kivetett anyag legalább 1,5 megabar nyomásnak megfelelő erőteljes összenyomást szenvedne el. Ám a marsi meteoritok felfedezése megcáfolta ezt a nézetet, mert bár némelyikükön kétségkívül felfedezhetők a mérsékelt ütközési melegedés jelei, mások szemmel láthatóan érintetlenül szöktek el a Marsról.

Jay Malosht az a probléma foglalkoztatta, hogyan léphet ki az űrbe egy kő úgy, hogy nem semmisül meg a folyamatban. Kidolgozta egy kozmikus becsapódás részletes matematikai modelljét és az események következő menetét vázolta fel. A belépő kisbolygó vagy üstökös először lyukat üt a talajba. Akkora a felszabaduló energia, hogy magának a becsapódó testnek a legnagyobb része is elpárolog. Közvetlenül a felszíni robbanás epicentruma alatt az energia azonnali felszabadulása összepréseli a kőzetet, aminek következtében annak nagy része elpárolog vagy megolvad. A nyomáshullám ezután oldalirányban terjed a környező terepen és a föld mélye felé. Ennek a nyomásnak az eredményeként aztán az anyag visszaugrásaként ismét felszabadul a felszín alatti kőzetekben tárolt rugalmas energia, és ez hatalmas vertikális erőt közvetít a fedőrétegekbe. A felszíni kőzet, az alacsonyabb rétegekkel ellentétben nem nyomható össze, mivel szabadon elmozdulhat felfelé; az egyetlen korlátozó erő a légkör nyomása, ami viszont elhanyagolható. Ilyen módon a felszíni anyag kilövedik az ég felé, anélkül, hogy összemorzsolódna, és ha az erő elég nagy, akkor egyenesen kiröppen az űrbe. A becsapódási kráter nem afféle bemélyedés a földben, hanem mély üreg, amit a hirtelen felfelé emelkedés képez, és sokszorosan meghaladja a becsapódó test méretét. A kráter szélé közelében az anyag nagy része nem lefelé nyomódik a csapástól, hanem egyszerűen feldobódik. További előnyt jelent, hogy mivel a belépő test jőkora mennyiségű légkört

szorít ki, afféle óriási alagutat hasít az atmoszférába, kilövődéskor csekély súrlódási hő éri a kivetett köveket. Melosh szerint a felszíni kőzetek az alulról érkező nyomás hatására először egyetlen összefüggő anyagtablában emelkednek fel, majd ez a lap darabokra hullik. Számításai azt jósolják, hogy a darabok mérete a robbanás nagyságrendjétől függ. Egészében véve a nagyobb robbanás nagyobb darabokat vet ki. Egy jelentősebb becsapódás több millió, nagyjából tízméteres átmérőjű követ indít útnak. Ezek némelyike ugyan nagyon felforrósodik, de jó részük hőmérséklete $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ alatt marad.

Talán meglepő, de egy mikroba egy marsi kő belsejében kijuthat az űrbe úgy, hogy közben sem a nyomástól, sem a hőtől nem pusztul el. Ám nemcsak az elindulás jelent komoly nehézséget. Ha már az űrbe került, csakis kőűrhajójának pályáján múlik a végzete. A kivetett törmelék nagy része a Nap körül fog keringeni. Mivel a bolygóközi térben száguldó kő pályáját nemcsak a Nap, hanem a bolygók gravitációs ereje is befolyásolja, nagyon bonyolult, vagy akár kaotikus is lehet a mozgása. Valahányszor a Nap körüli útja során elhalad a Mars mellett, újabb lökést kap a bolygó gravitációjától. Sok ilyen rántás után a kő a Földet keresztező pályára térhet, vagy kilökődhet a Naprendszer külső vidékeire, ahol a nagyobb bolygók gravitációs perturbációjának hatása alá kerül. A kő hosszú időt tölthet ebben a kozmikus flippergépben, mielőtt eldőlné a sorsa.

Mi az esélye annak, hogy egy marsi kő elérje a Földet?

Újabb számítógépes számítás^[138] szerint a Marsról kivetett kövek 7,5 százaléka kerül végül a Földre, és hasonló mennyiség jut el a Vénuszra. A törmelék legnagyobb része (38 százalék) a Napban köt ki, 9 százalék hazaér a Marsra, míg a maradék nagy része a Jupiter felé indul, és kifelé tart a Naprendszerből. Az űrben tartózkodási idő meglepően rövid. A Földre tartó kövek hozzávetőleg egyharmada az első tízmillió év során ér célba. Ezek az eredmények összhangban állnak az ismert marsi meteoritok űrben töltött idejével, amit abból számítanak ki, hogy mennyi időn át érte kozmikus sugárzás a követ. Az eredmények az ALH84001-re kiszámított tizenötmillió évtől az EET79001 alig hétszáz ezer évéig terjednek. Egyes marsi meteoritok elkerülhetetlenül nagyon gyorsan ideérnek, ha kedvező sebességgel és szögben hagyják el a Marsot. A szimuláció során tizenhatezer év leforgása alatt megtett átkeléseket is megfigyeltek. Egyszerűen statisztikai alapon néhány kőnek egy évszázadot sem vesz igénybe az utazása.

Hogy egy Mars-kőben meghúzódó mikroba életképes állapotban éri-e el a Földet, az attól függ, hogy milyen hosszú ideig maradhat életben az űrben. Ugyan semmit nem tudunk a feltételezett marsbéli mikrobákról, de ha a földi baktériumok szívósságát vesszük alapul, akkor nagyon hosszú ideig kitarthatnak. Régészek esetenként kiásnak sírkamrákat, ahonnan a sír építésének idejéből származó baktériumspórák kerülnek elő. Találtak tizenegyezer éves masztodoncsontvázban eleven *E. cloacae*. Mélyhűtött körülmények között sokkal hosszabbra nyúlhat az életben maradási idő. Chris McKay hárommillió

éves mikroorganizmusokat fedezett fel a szibériai permafrostban. Meglepő bejelentések hangzottak el több százmillió éves sótelepekben fennmaradt baktériumokról. Egy borostyánkőbe zárt méhből negyvenmillió éves baktériumokat vontak ki és szaporítottak igazi Jurassic Park-stílusban.^[139]

John Postgate, a baktériumhalandóságot tanulmányozó brit mikrobiológus feltette a kérdést, hogy egyáltalán szükségszerűen meghalnak-e a baktériumok.^[140]

Tápanyaghiány esetén lassan előregszenek; anyagcseréjük lelassul és felfüggesztődik, méretük jelentősen csökken, és felhagynak a szaporodással. De nem szükségszerűen halnak meg a szó szokványos értelmében, egyszerűen átsiklanak a felfüggesztett életműködések állapotába. Aztán ha egy szép napon megjavulnak a körülmények, újjáéledhetnek, mint megannyi parányi Csipkerózsika. Nincs olyan ismert belső óra, ami meghatározná a pontot, ahonnan nincs visszatérés. Ami azt illeti, meglehetősen rejtélyes, mi határozza meg pontosan, hogy egy adott spóra feltámadhat-e vagy nem támadhat fel a halálközeli élményeknek ebből a legközelebbikéből. Ha nem történik odabenn semmi, ugyan miféle rejtélyes, „halál” jelű vonalon kell átkelni, mielőtt végképp meghíúsul az újjáéledés?

A baktériumhalhatatlanság feltételezi, hogy semmi nem károsítja helyrehozhatatlanul a mikroba létfontosságú részeit. Az egyik nyilvánvaló ártalomforrás a sugárzás. Bár a baktériumok rendelkeznek a sugárártalommal megbirkózni képes javítómechanizmussal, szunnyadó

állapotban ezt értelemszerűen nem működik. Ha a szunnyadó mikroba DNS-e roncsolódik, akkor úgy is marad. Egy űrutazás során kétségtelenül a sugárzás jelenti a legnagyobb veszélyt. Ám a sugárzás legnagyobb része képtelen behatolni a kőbe. Az ibolyántúli sugárzást egy vékony réteg is elnyeli, míg a legnagyobb energiájú kozmikus sugarakon kívül bármiféle sugárzást leárnyékol egyméternyi szilárd anyag. Maga a kő mutathat némi visszamaradt radioaktivitást, de mint láttuk, a baktériumok meglehetősen ellenállóak a radioaktív sugárzással szemben. A dehidratáció – hiszen az űr vákuumában elkerülhetetlen a víz elvesztése – inkább további védelmet jelent. Egy jókora kő belsejében tanyázó szervezetnek évmilliókba telhet, amíg halálos mennyiségű sugárzás éri, márpedig ennyi idő alatt könnyen eljuthat a Marsról a Földre.

A hidegről sem feledkezhetünk el, mint további tényezőről. A bolygóközi térben alacsony a hőmérséklet, de nem végletesen és végzetesen alacsony. A követ a Nap is melegítheti, és a belső hőmérséklet valószínűleg akár a -50°C -ot is elérheti. Ez tökéletesen kielégítő; baktériumokat rutinszerűen tárolnak ennél jóval alacsonyabb hőmérsékletű hűtőszekrényekben. Ha valami, hát a világűr hidege csak előnynek bizonyul a mikrobák fennmaradása szempontjából.

Bár az átkelés a világűrön sokkal kevésbé kockázatos, mint amilyennek az első pillantásra tűnt, a marsi mikrobák megpróbáltatásai nem érnek véget azzal, hogy megérkeznek a Földre. Még el kell kerülniük a halált,

amikor a kő sok kilométeres másodpercenkénti sebességgel átsüvit a légkörön. A legtöbb kis meteorit teljesen elég az atmoszférába lépéskor. Ám egy 1-10 méteres lapos szögben belépő kődarabra egészen más sors vár. A követ lelassítja a légellenállás, és valószínűleg felrobban az ütközés során, miközben szilánkokat szór a felső atmoszférába. A darabok azután viszonylag szerény végsebességgel zuhannak a felszínre. A robbanás a baktériumok egy részét még a levegőben elpusztítja, míg mások, változatlanul védve akődarabokban eléri a talajt vagy az óceánt. Sok ilyen körülmények között lezuhant meteoritról tudunk. Mivel a kövek jó hőszigetelők, a meteorit belseje akkor is hideg marad, ha a külső felszín megolvad a súrlódástól. Összességében, az adott körülmények között ezek a feltételek eszményieknek tekinthetők a kövekben meghúzódó organizmusok sikeres szétszórásához.

Miután biztonságban leért, a helyben talált körülményektől függenek a marsbéli mikroba kilátásai. Három-négymillió évvel ezelőtt, amikor a Mars hasonlított a Földre, egy marsi szervezet igencsak otthonosnak találhatta a bolygónkat, különösen, ha utazása a tengerben ért véget. Az óceáni áramlatokkal sodródva végül elérhette az eredeti marsi élőhelyekre emlékeztető mélytengeri vulkáni kürtöket.

Egyesek úgy vélekednek, hogy a kedvező körülmények azon megszakítatlan láncolatának a feltételezése, amely a marsbéli mikrobát elvezérelheti a Földre, már nem is annyira valószínűség, mint inkább hiszékenység kérdése. Kétségtelen, hogy az utat minden egyes megtett lépés után

csak az útra kelt mikrobák töredéke, meglehetősen elenyésző töredéke folytatja. Az útnak azonban egyáltalán nem kell kényelmesnek lennie, bőven elég, ha túl lehet élni. A billiónyi felkerekedett marsbéli kemotróf közül tegye meg mindössze *egyetlenegy* az utazást, és nyitva áll az út a Föld teljes gyarmatosítása előtt. Csupán egyetlen olyasféle nagy becsapódási esemény, amilyenek a Föld és a Mars arculatán is rajta hagyták kráterlenyomataikat, milliárd tonnányi anyagot vethetett ki az űrbe. Néhány méter átmérőjű kövek milliói szóródhattak szét a Naprendszerben, közülük nem egy az élet reménybeli járműve. Nagyobb becsapódások még több kivetett törmeléket eredményezhetnek. A nehézbombázási időszak végén még magasabbak lehettek ezek a számok. Nehéz kitérni a következtetés elől, hogy ha a 3,4-4 milliárd évvel ezelőtti időszakban volt élet a Marson, akkor az élő marslakók elkerülhetetlenül megtelepedtek a Földön. Ez a lehetőség a US National Research Council's Space Studies Boardban (a nemzeti kutatási tanács űrtudományokkal foglalkozó bizottsága) is felmerült. A *Mars Sample Return* című tanulmányukban így érvelnek: „Valószínűnek tűnik mikroorganizmusok életben maradása meteoritokban, ahol jórészt védve vannak a sugárzástól. Ha sikerülne kimutatni mikroorganizmusokat amelyek túléltek a kivetési körülményeket, majd a becsapódást, akkor kevés okunk lenne kételkedni abban, hogy lehetséges a biota [flóra és fauna] természetes bolygóközi áttelepedése... Ilyen cserék különösen elterjedtek lehettek a Naprendszer történetének korai időszakában, amikor sokkal magasabb

volt az ütközések aránya”.[141] Hogy a megérkezésüket követően elfoglalták-e sikeresen a Földet valamiféle marsi mikrobák, az természetesen egy másik kérdés, melyre röviden vissza fogok térni.

Felhozható-e különösebb indok, amiért az élet bölcsőjeként előnyben kellene részesítenünk a Marsot a Földdel szemben? Az egyik tényező igenlő válasza utal. Ugyanaz a kozmikus bombázás, amelyik az élő organizmusok bolygók közötti szállításának mechanizmusát biztosítja, egyúttal veszélyezteti az életben maradásukat a szülőföldjükön. Mint azt a 8. fejezetben kifejtettem, egy igazán nagy becsapódás az egész bolygót hatékonyan sterilizálja. Ebben a tekintetben a Mars biztonságosabb lehetett a Földnél. Kisebb mérete révén kevesebb kisbolygó és üstökös találta el. Az alacsonyabb gravitáció kisebb pusztítást okozó, lassabb becsapódásokat eredményezett, ami lehetővé tette a használható szerves anyag felgyűlését. A Marsot megkímélték az olyan katasztrofikus becsapódások, mint amilyen a Föld Holdját létrehozta. A Mars kialakulásának hője is szerényebb volt a Földénél, így összességében nyilvánvalónak látszik, hogy a Mars gyorsabban hűlt le, ennek következtében talán már 4,5 milliárd évvel ezelőtt lakhatóvá lett a bolygó. A Mars hűvösebb kérge egyúttal azt is jelenti, hogy a felszín alatti mikrobák komfortzónája sokkal mélyebbre nyúlik, ami viszont biztonságosabb védelmet nyújt a becsapódások hőhullámaintól.

Nem feltétlenül a mély, felszín alatti övezet a kozmikus bombázás előli egyetlen óvóhely. A másik: a világűr. A

bolygót sterilizáló becsapódási esemény hatalmas mennyiségű anyagot fröccsent a viszonylag biztonságos bolygópályára. Ha mikrobák életben maradhatnak az űrben ezeknek a köveknek a belsejében, akkor végül némelyik visszatérhet és újra megtermékenyítheti a bolygót, miután az kiheverte a kataklizma hatásait. Mivel a Marsnak alacsonyabb a szökési sebessége, mint a Földé, kisebb heveességgel vetődik ki az anyag: nagyobb a mikrobák életben maradásának a valószínűsége. A nehézbombázás időszakának vége felé a Marsot a kivetett törmelék hatalmas tömege vehette körül, amely nagyszámú számkivetett organizmusnak nyújthatott szállást.

A Mars nemcsak az élet keletkezése, hanem az evolúció számára is előnyösebb helyszín lehetett. A biológusok gyanítják, hogy az élet a Földön igazán csak akkor vált általános jelenséggé, miután úgy kétmilliárd évvel ezelőtt az atmoszférában is elérhetővé vált az oxigén. Ebben a szakaszban alakult ki a fajok igazán nagy változatossága. A Marson valószínűleg sokkal gyorsabban, talán mindössze tízmillió év alatt képződött szabad oxigén. Könnyen lehet, hogy a Marson akár már a nehézbombázás vége előtt olyan szintre fejlődött az élet, amilyent a Földön még további egymilliárd évig nem ér el.^[142]

Ha az élet egymástól függetlenül alakult ki a Földön és a Marson, akkor a Földet elérő marsbéli mikrobák már jól megtelepedett organizmusokkal találkozhattak. Az újonnan érkezett utasok tehát kénytelenek felvenni a versenyt földi megfelelőikkel. A Mars-lakókat megérkezésükkor felfalhatták a földi baktériumok. Kegyetlen fintora lenne a

sorsnak ilyen rettenthetetlen kalandorok számára; túléltek, hogy egy kozmikus becsapódás kivetette őket a világűrbe, évmilliókat vészelték át a világűrben, elkerülték, hogy elégjenek a légkörbe lépéskor, és elég szerencsések voltak ahhoz, hogy alkalmas élőhely mellett érjenek célt – és mindez csak azért, hogy aztán mohó riválisaik táplálékkaként végezzék!

Persze másként is történhetett. Akár a marsi mikrobák is megehették a földieket. Vagy mondjuk a marsi és a földi mikrobák különböző élettereket foglaltak el és békésen éltek egymás mellett. Ha alapvetően eltérő biokémián alapultak, akkor nyugodt lélekkel megtehetnék, hogy nem vesznek tudomást egymásról. Vagy éppen hogy nagyon is hasonlóaknak bizonyultak, és kölcsönös megelégedésükre szimbiózist alakíthattak ki (például marsi mitokondriumok betelepeshettek földi baktériumokba). Még az sem kizárt, hogy mindannyian hordozunk néhány marsi gént a testünkben! Esetleg a betolakodók túlságosan keservesnek találták a földi körülményeket, nem sikerült időben alkalmazkodniuk, és a gyarmatosításra tett merész kísérletet követően hamarosan kihaltak, ahogy annak idején az ausztrál pusztaságban alapított egyes kisvárosok első telepeseivel történt.

Az is elképzelhető, hogy független életformaként még mindig léteznek a Földön marsi mikrobák. A tudósok csak most kezdik felfedezni a körülöttünk élő, mérhetetlen számú mikroorganizmust. Az ez idáig felfedezettek ugyan a földi életformák közé tartoznak, egy nap azonban előáshatnak igazán idegen mikroorganizmusokat, talán valamilyen

különös vagy megközelíthetetlen helyen – mélyen a föld alatt, a felső légkörben, vagy akár az Antarktisz jégtakarója alá zártan. Ha az idegen mikrobák eltérő biokémiát alkalmaznak, akár el is kerülhették a tudósok figyelmét. Az sem elképzelhetetlen, hogy szunnyadó állapotban, spóraszerű formákban rejtőznek a közelünkben, és valamilyen döntő fontosságú alapelem nélkül képtelenek újjáéledni.

Az imént említett lehetőségek természetesen pusztán elmékedések. Csak annyit vehetünk biztosra, hogy ha van vagy volt marsbéli mikrobaélet, akkor az elmúlt négy milliárd év valamelyik szakaszában csaknem bizonyosan eljuthatott a Földre életképes marsi mikroba. Nagy kérdés, hogy valóban a Marson keletkezett-e az élet és onnan terjedt-e át a Földre. Ha igen, akkor különös gondolatra juthatunk. Ez esetben ugyanis én, az olvasó és a Föld valamennyi élőlénye Marslakók leszármazottja lenne.

A Földi élet került a Marsra?

Ha kövek belsejében utazva mikrobák átkelhettek a Marsról a Földre, akkor a másik irányba is megtehették az utat. Bár a Földnek erősebb a gravitációs vonzása, egészen bizonyosan sor került olyan erős kozmikus becsapódásokra, amelyek kivethettek földi anyagot az űrbe. Ebben az esetben tudjuk, hogy a kivetett kövek egy része mindenképpen tartalmazott mikroorganizmusokat. Ha a nehézbombázás időszakának végén már valóban volt élet a Földön, ahogy a kőületek igazolják, akkor

tekintélyes mennyiségű élethordozó anyag kerülhetett az űrbe a sok nagyon nagy becsapódás nyomán, amelyek még 3,8 milliárd évvel ezelőtt is bekövetkeztek. Ennek az anyagnak egy része nyilvánvalóan elérhette a Marsot; sőt az is nagymértékben valószínűsíthető, hogy a 3,5-3,8 milliárd évvel ezelőtti marsbeli körülmények alkalmas közeget teremthettek a kivándorolt földi organizmusok virulásához. Már csak ezért is biztos vagyok benne, hogy a múltban volt élet a Marson, és akár manapság is lehet.

Amikor felkavarta a világot a rendkívüli NASA-meteorit, a kommentátorok és a tudósok egyaránt arra gondoltak, hogy a Naprendszerben kétszer kellett létrejönnie az életnek. Az ALH84001-ben talált zárványokat szinte általánosan a Marson önállóan keletkezett élet bizonyítékának tekintették. A Clinton és mások által sietősen felvázolt mélyreható filozófiai következtetések – az élet egyetemes jelensége, az egész kozmoszt vezérlő, az életnek kedvező törvények – döntően ezen a hallgatóságos feltételezésen nyugodtak. Igen kevesen figyeltek fel az alapvető logikai hézagra: ha egy megkövesedett marsi mikroba megérkezhetett egy kőbe zártan a Földre, akkor egy élő mikroba ugyanígy eljuthatott a Földről a Marsra. A marsi élet bizonyítékának a forrása pontosan a független keletkezés elméletét ássa alá.

Ha az élet valóban a Földről került a Marsra, az bizonyára roppant izgalmas és tudományos szempontból fontos fejlemény, a filozófiai jelentősége azonban nulla, mivel semmi újat nem közöl az élet jelenségének egyedülálló vagy éppen általános mivoltáról. Egyszerűen csak azt

mutatja, hogy a Föld bioszférája kiterjedt az űrbe, ahogy a föld alá is. Ez esetben az ALH84001 feltételezett mikrofossziliái az eredetileg földi szervezetek leszármazottai lennének, és végső soron csupán hazatértek.

A bolygók közötti, különösen a távoli múltban történt kölcsönös fertőzés kulcstényező a marsbéli élet lehetőségének az értékelésére. Ha a Marsot 3,6-3,8 milliárd évvel ezelőtt beoltotta a földi élet, akkor az nem okoz igazi meglepetést, hogy 3,6 milliárd évvel ezelőtt zajló aktív élet jeleit tartalmazó marsi kövekre bukkanunk. Mint azt az előző fejezetben kijelentettem, az ALH84001-ben talált zárványok pontosan olyanok, amilyenekre számítani lehetett. Másfelől viszont, amennyiben a fertőzéselmélet téves, akkor alapvetően megváltoznak a játékszabályok. Ez esetben annak a feltevésnek kell hitelt adnunk, hogy az élet önállóan jött létre a Marson – és ez *felmérhetetlen* jelentőségű feltételezés, ami tekintélyes súlyú megerősítést igényel (lásd 10. fejezet), és ekkor sokkal kevésbé meggyőző az ALH84001 által szolgáltatott bizonyíték.

Hogyan lehetne ellenőrizni a fertőzéselméletet? Ha a tudósoknak sikerülne szert tenniük eleven marsi szervezetre, és kiderülne, hogy jobbos csavarodású DNS-re és balos csavarodású aminosavakra R, épül, ha ugyanazt a genetikai kódot alkalmazná, mint a földi élet, és ha az anyagcseréje is hasonló lenne, akkor erősen a földi élettel közös eredet felé billenne a mérleg. Ha viszont ellenkező csavarodású molekulái lennének, eltérő genetikai kódja, vagy teljességgel különböző biokémiai

formán alapulna, az önálló keletkezésre utalna. Nem könnyű eldönteni a kérdést, ha csak kövületek állnak a rendelkezésünkre. Ismerős szerves molekulák ellentétes csavarodású maradványai még mindig árulkodóak lennének, ám egyszerűen csak a mikrobaalakzatok összevetésével nem sokra megyünk. Idegen mikrobák akkor is nézhetnek úgy ki, mint a földiek, ha egészen másmilyen biokémiával üzemelnek.

Tegyük fel, mint állítom, hogy az életnek szállást adó anyag rendszeresen cserélődött a Föld és a Mars között; akkor ezek a bolygók nem tekinthetők elszigeteltnek. Azóta folyhatott a kölcsönös fertőzés, amióta csak létrejött az élet. Ha így áll a helyzet, akkor teljességgel felesleges az űrjárműveink költséges sterilizálásához folyamodnunk. És viszont, azt sem kell feltételeznünk, hogy elhanyagolható a marsi mikroorganizmusok által okozott fertőzés veszélye. Ha a marsi és a földi életformák egyazon közös őszármazottai, akkor a marsbéli mikrobák ugyanolyan biokémiával működnek, mint mi. Mint Carl Sagan írta^[143]: „Ha a feltételezett marsi organizmusok eredetileg egy Földdel történt ütközés nyomán kerültek a Marsra, akkor eléggé hasonlóak hozzánk ahhoz, hogy kórokozókként viselkedjenek.” Ha a Föld és a Mars élő organizmusokat cserélt, az jelentősen bonyolítja annak a kérdését, hogy végső soron hol jött létre az élet. Tekintettel ismereteink jelenlegi hiányosságaira, nyitott kérdés, hogy melyik forgatókönyv valósult meg ténylegesen:

1. Az élet valaha a Marson jött létre és marsi meteoritokban érkezett a Földre. Jelenleg a szülőbolygón

vagy létezik, vagy nem létezik.

2. Az élet valaha a Földön jött létre, és innen került a Marsra, ahol minden valószínűség szerint megtelepedett.

3. Az élet egymástól függetlenül jött létre a Földön és a Marson. Ezt követően ment végbe a kölcsönös gyarmatosítás (vagy akár kölcsönös megtermékenyítés).

4. Az élet egymástól függetlenül létrejött a Földön is és a Marson is, de a kövek és por cseréje ellenére sem került sor életképes organizmusok átvitelére.

5. Az élet nem a Földön és nem is a Marson jött létre, hanem valahol egészen másutt, például egy üstökösön, a Jupiter Europa nevű holdján, a Vénuszon, vagy egy Naprendszeren kívüli égitesten és valamiféle pánspermia-mechanizmus révén jutott el a Földre és talán a Marsra.

6. Az élet kizárólag a Földön jött létre, és (még) nem gyarmatosított sikeresen egy másik bolygót. A Mars élettelen, és mindig is az volt.

Figyeljük meg, hogy az utolsó változattól eltekintve a fenti forgatókönyvek szerint valaha volt és jelenleg is lehet élet a Marson. Annak alapján, amit a mikrobák hihetetlen ellenálló képességéről tudunk, a 6. változat roppant valószínűtlen. Bizonyos időszakban az életképes organizmusokat hordozó köveknek meg kellett tenniük az utat a Földről a Marsra. Akár egynél többször jött létre az élet, akár csak elterjedt a bolygók között, számomra kétségtelen, hogy történelme egy korai szakaszában a Mars otthont nyújtott mikrobapopulációknak, és talán fejlettebb szervezeteknek is. Ez ruházza fel olyan nagy jelentőséggel a marsbeli élet keresését.

Ha elfogadjuk a kőzet-pánspermia létét, akkor nem a Mars az egyetlen érdekes bolygó. Elképzelhető, hogy a földi élet máshová is elutazott a Naprendszerben. Mi a helyzet a Holddal? Manapság a Hold felszínén szélsőséges viszonyok uralkodnak, de akárcsak a Mars, valaha rendelkezett sűrű légkörrel, vulkánokkal, vízzel. Ezek gyorsabban eltűntek, mint a Mars esetében, egy csekélyke esély azonban nyitva maradhatott az élet számára. Ha ez a lehetőség időben egybevág a Földön létező étellel, akkor igen nagy a valószínűsége annak, hogy organizmusok cserélődtek a Holddal. Tekintettel a Hold közelségére a Földhöz, manapság is rengeteg földi becsapódási anyag érkezik a Holdra, és nagyon rövid az utazási idő. Lehet-e manapság élet a Holdon a felszín alatt? Az utóbbi idők felvetései, melyek szerint a Hold sarki, Nap elől árnyékolt krátereiben maradhatott jég, felveti az izgalmas – bár rendkívül spekulatív kilátást, hogy még életben lévő holdmikrobákra bukkanhatunk.

A Vénusz és a Merkúr reménytelen esetnek tűnnek, lévén mindkettő túlságosan forró. A Vénusz vélhetőleg hűvösebb volt valaha, és egy ideig otthont nyújthatott elvándorolt földi szervezeteknek. A külső Naprendszer számos holdja is szóba jöhet az élet lehetséges menedékeként, bár meglehetősen szerény az esély az út sikeres megtételére a Földről. Thomas Gold feltételezése szerint legalább tíz bolygó, illetve hold rendelkezhet a felszín alatti élővilággal, és ez a fajta életvitel nagyon elterjedt lehet az univerzumban. Úgy tartja, hogy a Föld „csak az élet különös ága”, ahol a szokatlan körülmények tették lehetővé a

felszíni életet.^[144]

Ahogy a Mars körüli pályára repített kövek menedéket nyújthattak a kozmikus bombázás elől, ugyanúgy a földi szervezetek is kikerülhettek a világűrbe, hogy aztán évmilliókkal később ismét birtokba vegyék anyabolygójukat. Ez a lehetőség új szempontot jelenít meg az életnek a 6. fejezetben tárgyalt Sziszüphoszelméletéhez. A Földet tökéletesen sterilizáló becsapódások nyomán maradhattak élő szervezetek a Föld körüli pályára került törmelékben. Ez lehetővé teszi, hogy visszavezessük a földi élet kezdeteit a nehézbombázással egybeeső időszakába, mondjuk 4,2 milliárd évvel ezelőtre, és kiküszöbölhetjük azt az ellentmondást, hogy az élet nyilvánvalóan létezett a Földön egy ilyen viharos korszakban. Természetesen, ha az ősi mikrobák évmilliókkal a bolygó elhagyása után visszatérhetnek, annak izgalmasak a következményei az evolúció tekintetében. Nem elképzelhetetlen, hogy egy tízmillió éves baktérium, amelyik a Földön már kihalt, egy nap visszatér egy meteoritban, és ismét megtelepszik.

Mi a helyzet azzal a lehetőséggel, hogy a kövek belsejében utazó élet átíveli a csillagok közötti távolságot? A statisztika sajnos erősen ellene szól ennek az elképzelésnek. Míg a Földről kivetett anyagnak számottevő az esélye, hogy eljusson a Marsra, elhanyagolható annak a valószínűsége, hogy valaha is másik bolygóra leljen a Naprendszer elhagyó kő. A csillagok között oly nagyok a távolságok, és olyan apró célpontok a bolygók, hogy még a Tejútrendszerben szétszórt kövek milliárdjai mellett is

kevés az esély arra, hogy az egyik közülük egy másik naprendszer alkalmas bolygójára pottyan. Ugyanezen okból szinte bizonyos, hogy egyetlen életet hordozó, valamely másik naprendszerből származó kő sem találta el soha a Földet. Így, míg Naprendszerünk bolygói jó eséllyel fertőzhatték meg egymást élethordozó kövekkel, rendkívül valószínűtlen, hogy az élet ugyanezzel a módszerrel elterjedhetett a Tejútrendszerben.

Ám nem a kövek a mikrobák szállítására alkalmas kizárólagos járművek. Üstökösök is szolgálhatják ugyanezt a célt. Bár az üstökösök belsejéről szerények az ismereteink, ezek akár még jobb menedéket is nyújthatnak a mikrobák számára, mint a kövek. Bizonyosan ez volt a helyzet a közvetlenül az üstökösök kialakulását követő időszakban, amikor kémiai és radioaktív hő elég magasra emelhetette a hőmérsékletet a folyékony víz kialakulásához.

Chris McKay a következő eseménysort vázolja fel az üstökös-pánspermiáról.^[145] Egy csillagközi felhő megérkezik a Naprendszer tözsomszédságába. Üstökösök, talán a felhő gravitációs terétől eltérítve, bombázzák a Földet és mikrobaspórákat tartalmazó törmeléket vetnek ki belőle. A kövek a felhőben maradnak, amíg, talán évmilliókkal később, maga a felhő kezd csillagokat világra hozni. Ekkor a kövek, a néhány még mindig életképes organizmussal együtt, összekeverednek az üstökösanyaggal egyes új protosztelláris ködök szélé közelében. A létrejött üstökösök meleg, nedves belsejében végre kényelmesen meghúzhatják magukat a türelmes mikrobák. Az előnyére változott környezet újjáéleszti a

spórákat és elindítja a robbanásszerű szaporodásukat. Valamivel később az egyik ilyen üstökös elindul a csillag felé, immár kiterjedt mikrobakolóniájával. A csillag elpárologtatja az üstökös anyagát, és szélnek ereszti a mikrobákat, melyek billiószámra vetődnek ki az üstökösporttal, egyetlen nagy, élő felhőt alkotva. Bár a szervezetek most tökéletesen kiszolgáltatottak és sebezhetőek, nem tart sokáig, amíg némelyiküket magával ragadja valamely, az üstökös csóvjában áthaladó bolygó. Lévén oly parányiak, a mikrobák túlélnek a belépést, és lassan lebegnek lefelé a viszonylag biztonságos bolygófelszínre. Ezen a módon az élet benépesítheti más naprendszerek bolygóit; és ugyanígy érkezhettek a Földre is a Naprendszeren túlról.

Az elmúlt húsz év során Fred Hoyle és Chandra Wickramasinghe a tudományos közvélemény jelentős részének kételkedése ellenére hirdette azt az elméletet, hogy az üstökösök élő szervezeteket tartalmaznak. Elképzelésüket orvosi feljegyzések elemzésével támasztják alá, kimutatva, hogy az üstökösök átvonulása járványok kitörésével esik egybe.^[146] Szerintük a nagy területeket érintő járványok, mint például az 540. évi Justinianus kori pestisjárvány, amelynek során valószínűleg százmillióan haltak meg, voltaképpen Földön kívüli eredetűek. Hoyle és Wickramasinghe nem tételezi fel, hogy az űrben az élet az üstökösökre korlátozódna. Visszanyúlnak Arrhenius eredeti felvetéséhez, hogy az egyes mikrobák minden védelem nélkül is sodródhatnak a Galaktikában. Arra hívják fel a figyelmet, hogy sok csillagközi szemcse hozzávetőleg

baktérium méretű, és azt állítják, hogy a csillagközi térben jelentős mennyiségű anyag valójában biológiai eredetű. Erre a merész elméletre azt a tényt hozzák fel bizonyítékként, mely szerint a kiszáradt *E. coli* infravörös színeke háttorzongatóan közel áll a csillagközi poréhoz. Egyáltalán nem meglepő, hogy egyes tudósok lecsaptak a pánspermia-elméletre, hiszen ez jelentősen leegyszerűsíti a biogenezis problémáját. Ha az élet elterjedhet a naprendszer között, akkor csak egyetlen bolygón kellett megszületnie az életnek, valahol a kozmosz végtelenjében, és az kielégítő magyarázatot kínál a földi élet létezésére. Én magam nem osztom ezt a lelkesedést a kérdés megkerülése iránt. Az a benyomásom, hogy a problémának a világűrbe helyezése semmivel nem járul hozzá a biogenezis központi problémájának megoldásához, ami évtizedek óta foglalkoztatja ennek a tudományágnak a kutatóit. Nevezetesen: az élet túl szép ahhoz, hogy igaz legyen.

10. ÉLETRE ÍTÉLT VILÁGEGYETEM?

Minél alaposabban kutatom a világegyetemet és tanulmányozom felépítésének részleteit, annál inkább meggyőződésemmé válik, hogy a világegyetemnek bizonyos értelemben tudnia kellett az érkezésünkről.

FREEMAN DYSON^[147]

Amikor 1997 áprilisában a sérült Galileo űrszonda lelkiismeretesen sugározta a képeket a tartalék antennájáról, a NASA tudósai repeszttek az örömtől. Mindenki az „Élet!” szót hangoztatta. Az izgalmat az első ismert Földön kívüli óceán felfedezése váltotta ki, az Európán, amelyről a tudósok már tudták, hogy jég borítja. A Galileo felfedezésében a jéghegyek számítottak lényegesnek. A jéghegyek folyékony vizet feltételeznek, vagy legalábbis kásás jeget. Mintha ennek a fagyos Jupiter-holdnak az egész fagyott kérge folyadékrétegen csúszkálna.

A kommentátorok szinte egy emberként ismételték, hogy a víz, szerves vegyületekkel kiegészülve, életet jelent – vagy legalábbis jó esélyt az élet jelenlétére. Az okfejtést a NASA-program egyik tudósa, Richard Terrile így foglalta össze a sajtónak: „Tegyük ezeket az alkotóelemeket együvé a Földön és egymilliárd éven belül életet kapunk”.^[148] Tehát az Európán is meg fog történni. „Ennyi az egész!” – ahogy az angol bűvész, Tommy Cooper szokta mondani. Sajnos, a logika vékony szála, ami a vizet összekapcsolja az étellel, nemigen több egy megfigyelésnél, amely szerint az élet lehetetlennek tűnik víz nélkül. Ám egyenlőségjelet tenni az élet és a víz közé azért elég nagy ugrás a pusztá hiedelmek birodalmába.

Lehet, hogy valóban lakozik élet az Europa jeges felszíne alatt, vagy azon viszonylag közönséges okból, hogy egy meteoritban odautazott a Földről, vagy abból a sokkal mélyrehatóbb okból, hogy a megfelelő körülmények között elkerülhetetlenül kibontakozik az élet. A biológia

determinista iskolája szerint – amely, úgy látszik, uralkodó nézet a NASA köreiben, és a médiakommentátorok többsége is osztja – minden, a Földhöz hasonló környezetben automatikusan kialakul az élet. Végy egy adag vizet, adj hozzá aminosavakat és néhány más anyagot, érleld néhány millió évig, és – csiribí-csiribá! – már él is. Ezt a népszerű tételt élesen bírálja az ellentétes iskola, amely nem győzi hangsúlyozni az akár legegyszerűbb élőlények félelmetes molekuláris komplexitását. Ez utóbbi álláspont hívei szerint az élet elképesztő bonyolultsága az események véletlen, a kozmoszban egyedülálló jelenségként kialakuló láncolatára vall. Nincs az a vízmennyiség, mondják, még ha tele volna is mindenféle leleményes vegyületekkel, ami csak úgy életre kelne. A földi élet ilyenformán a csillagászati valószínűtlenség egyszeri mázlija.

Azzal a kijelentéssel, hogy a víz életet jelent, a NASA tudósai nem pusztán a programjuk jelentőségét húzzák alá. A természet jellegéről bocsátkoznak – hallgatólagosan – *óriási horderejű* és mélyreható feltételezésbe. Voltaképpen azt állítják, hogy a világmindenség törvényei ravaszul olyannak készültek, hogy egyenesen az élet megszületését szolgálják a rideg esélyek ellenében; hogy a fizika matematikai alapelvei a maguk elegáns egyszerűségükben valamiképp előre tudnak az életről és annak mérhetetlen komplexitásáról. Ha az élet oksági megbízhatósággal következik az őslevesből, akkor a természet törvényei egy rejtett célt kódolnak, egy kozmikus parancsot, amely azt mondja: „Csinálj életet!” És az élet

révén annak kísérőjelenségeit: értelmet, tudást, felfogóképességet. Ez annyit jelent, hogy az univerzum törvényei előkészítették a saját megértésüket. Ez a lélegzetelállító látomás a természetről egész fenséges ívében magasztos és felemelő. Remélem, helytálló is. Csodálatos lenne, ha helytálló volna. De ha igen, akkor olyan mély elmozdulást jelenít meg a tudományos világnézetben, amilyent talán Kopernikusz és Darwin együttesen. Nem kellene elkenni könnyed kijelentésekkel arról, hogy víz plusz szerves vegyületek nyilvánvalóan egyenlő az étellel – tudniillik a legkevésbé sem nyilvánvaló. Ha a biológiai determinizmust valóban megerősíti az alternatív élet felfedezése a Földön kívül, az egy csapásra felborítja a darwini véletlenszerűséggel átítatott ortodox paradigmát. Az ortodoxia csökönyösen ragaszkodik hozzá, hogy az életben semmi nincs előre elrendelve, hogy a biológiai evolúció egy sor értelmetlen, céltalan véletlen. Nincsenek végső okok. Ám ha az élet valami módon elkerülhetetlen, ez azt jelenti, hogy a végzet véletlenjei ellenére egy bizonyos vég bizonyosan beteljesül; be van vésve a törvényekbe. És a „vég” ugyanolyan gyanúsán hangzik, mint a „cél” vagy „szándék” – egy letűnt vallásos kort idéző tabu szavak az utóbbi évszázad tudományában. Ilyenformán módfelett mélyrehatóak lennének a kozmoszban másutt kibontakozott élet felfedezésének következményei. Túllépnek a pusztán tudományon, és olyan filozófiai kérdésekre gyakorolnak hatást, mint hogy van-e célja a fizikai létezésnek, vagy az élet – a világegyetem meg minden – végső soron céltalan és abszurd. Ez a

lényegi jelentősége az élet keresésének a Marson és azon túl. Ezért élvez elsőbbséget ez a kutatás. És ezért olyan döntő fontosságú a pánspermia-elmélet. Hogy bebizonyíthassuk az életre ítéltetett világegyetemet, ahhoz biztosan tudnunk kell, hogy nem csak egyetlen alkalommal tűnt fel az élet, ami azt jelentené, hogy sutba kellene vágni a kölcsönös megtermékenyítés és fertőzés elméletét. Ha földi életet találnánk a Marson, az semmi újat nem közölné az élet eredetéről. De ha számításon kívül hagyhatjuk a fertőzést, akkor egy szál, árva marsbéli mikroba mindörökké megváltoztatná a kozmoszról alkotott képünket. Az élet keresése az univerzumban ilyenformán önmagunk keresése – kik vagyunk és mi a helyünk a dolgok átfogó, nagy rendjében. Nos, mire utalnak a tudományos bizonyítékok? Jelentéktelen csodabogarak vagyunk, vagy egy eredendően életre ítéltetett univerzum elvárt és kikerülhetetlen eredményei?

Van-e az életnek kezdete?

Az élet eredetéről folyó egész vita abból a feltételezésből indul ki, hogy az életnek ténylegesen van meghatározható kiindulópontja. Elképzelhető, hogy az élet mindig is létezett? A földi élet persze nyilván nem létezett mindig, hiszen maga a Föld sem létezik öröktől fogva. De az élet már fennállhatott, mielőtt kialakult volna a Föld és ideérkezett volna valamilyen pánspermikus folyamat révén. Ha élő szervezetek tényleg képesek csillagtól csillagig terjedni az univerzumon át, akkor annak a kérdése, hogy

van-e kezdete az életnek, arra a kérdésre szűkül, hogy egyáltalán van-e kezdete az univerzumnak.

A tizenkilencedik században a legtöbb tudós feltételezte, hogy a világmindenség örökkévaló. Ebben az esetben az is könnyen hihető, hogy az élet térben és időben egyaránt azonos kiterjedésű a mindenséggel. Ezt az álláspontot képviselte Svante Arrhenius és Lord Kelvin. Manapság a legtöbb tudós úgy véli, hogy az univerzum nem létezett mindig, hanem egy ősrobbanással kezdődött. Ezt az elméletet jó megfigyelési bizonyítékok támasztják alá. Csakhogy nincs ismert alapvető oka annak, hogy miért ne létezhetett volna mindig is az univerzum. Az a világegyetem-modell, amelynek nincs sem kezdete, sem vége, „állandó állapot”-elméletként ismert, és az 1950-es években örvendett nagy népszerűségnek; Fred Hoyle volt az első számú szószólója. Az ősrobbanás- és az „állandó állapot”-elméletek egyaránt feltételezik, hogy az univerzum tágul. Az ősrobbanás elméletében minden kozmikus anyag többé-kevésbé egyszerre, az első pillanatban jön létre. Ahogy tágul az univerzum és szétrepülnek a galaxisok, úgy csökken az anyag átlagos sűrűsége. Ezzel szemben az állandó állapot elméletében állandó marad az átlagos sűrűség. Az anyag folyamatosan keletkezik és alkot új galaxisokat, melyek elfoglalják a régebbi galaxisok között táguló tereket. Nagy léptékben a mindenség ugyanolyan marad korszakról korszakra, az újra és újra megteleő kúthoz hasonlóan.

Mivel az állandó állapotú univerzumnak végtelen a kora, elképzelhetjük, hogy az élet is örökről fogva létezett benne.

Akkor sem a kozmosz, sem az élet esetében nem beszélhetünk kezdetről. Feltéve, hogy az élő szervezetek találnak rá lehetőséget, hogy eljussanak a régi galaxisokból az újakba, az életnek soha nem kell újonnan kialakulnia élettelen anyagokból. Ilyenformán sikerül tökéletesen elkerülni a biogenezis problémáját. Nem szükséges az állandó állapot kozmológiájához ragaszkodni, hogy elkerüljük az élet eredetét. Feltéve, hogy az univerzum végtelenül öreg, és működnek valamiféle újratöltő folyamatai, és feltéve, hogy a mikrobák módot találhatnak a biztonságos utazásra egyik helyről a másikra, akkor az élet mindig is az univerzum alapvető sajátosságai közé tartozhatott. Voltaképpen pontosan ezt jelenti ki Hoyle és Wickramasinghe.^[149]

Az örökkévaló élet elméletének van egy igencsak különös folyamánya. Ha az élet átnyúlik téren és időn, és ha – ahogy egy állandó állapotú világegyetemben lenne – a bolygók száma végtelen, akkor végtelen számú biorendszernek is kell lennie. Ha ezeknek a rendszereknek egy töredéke kifejleszti az intelligenciát és a technikai civilizációt, végtelen számú technikai társadalomnak kell léteznie a mindenségben. Mivel nincs korlátja annak, hogy milyen régen alakultak ki ezek a technikai társadalmak, egyesek lehetnek tetszőlegesen régiek és tetszőlegesen fejlettek. Ha a mikrobaélet szerte a kozmoszban elterjedhet, ugyanígy elterjedhet a magasan fejlett intelligens élet is. Így elkerülhetetlenül arra a különös következtetésre kell jutnunk, hogy az univerzumot „elfoglalta” az intelligens élet. Egyetlenegy határtalan korú

és terjeszkedő technikai társadalom uralma alá hajtja a kozmoszt. Valójában, tekintettel a folyamat bekövetkezésére rendelkezésre álló végtelen időmennyiségre, a természetnek és a technikának mostanra hatékonyan egygé kellett válnia. Így az intelligencia ugyancsak az univerzum velejárója. Az értelemnek az univerzum éppen olyan állandó sajátosságának kell lennie, mint az anyagnak.

Ez a következmény nem kerülte el Fred Hoyle figyelmét, akinek könyve, a *The Intelligent Universe* (Az intelligens univerzum) a fentiekben vázoltakhoz nagyon hasonló helyzetet ecsetel.^[150] Hacsak a természetnek nincs olyan törvénye, ami korlátozza az intelligencia és a technika fejlődését, vagy tiltja az intelligens életformáknak, hogy elterjedjenek az univerzumban, miközben egyszerű szervezeteknek ugyanezt készséggel engedélyezi, nehéz elképzelni, hogy miként lehetne elkerülni Hoyle drámai következtetéseit. Francis Crick és Leslie Orgel ugyancsak hasonló következtetésre jutott. Ismerve az alapvető nehézségeket, amelyekkel a tudósoknak szembe kell nézniük a biogenezis magyarázatakor, előterjesztették az „irányított pánspermia” elképzelését, mely szerint a Földet tudatosan termékenyítették meg étellel intelligens idegenek.^[151] Tágabb értelemben, az élet ezen a módon úgy terjedhet el az egész világmindenségben, hogy nincs meghatározott tér- és időbeli kiindulópontja.

Sokan nagyon vonzónak találják az univerzális élet elképzelését. Tudományosan azonban kicsit csalásnak tűnik. Megpróbál kitérni az élet eredetének kérdése elől

azzal, hogy áthárítja a problémát az űrbe és addig helyezi vissza az időben, amíg teljesen el nem tűnik a látótérből. Bár logikailag semmi nem hibádzik azzal az elmélettel, hogy az élet és az univerzum mindig is léteztek, nem ad magyarázatot egyikre sem. Nem magyarázhatunk meg valamit egyszerűen azzal, hogy kijelentjük, mindig is volt. Mostantól tehát azt fogom feltételezni, hogy az élet valahol és valahogyan létrejött, talán egymástól függetlenül több helyen, és felteszem a kérdést, mi következik ebből a világegyetem természetére vonatkozóan.

A természet törvényei az életet szolgálják!

A mindenség nem volt élettal terhes, és a bioszféra sem emberrel.

JACQUES MONOD^[152]

Tévedés. Igenis azok voltak.

CHRISTIAN DE DUVE^[153]

Jacques Monod kimutatta, hogy a természetben minden két alapvető tényezőnek a terméke: a véletlené és a törvényszerűségé – vagy, ahogy megfogalmazta, a szükségszerűségé. Vegyük például a Föld Nap körüli pályáját. Ellipszis alakja a newtoni mozgási és gravitációs törvényekből fakad. Mondhatjuk, hogy a pálya alakja szükségszerűen elliptikus. Másfelől a pálya specifikus formája, nevezetesen, hogy milyen messze van átlagosan a Föld a Naptól, sok bonyolult mozzanatnak az eredménye,

köztük nem egy történelmi véletlené, nevezetesen, hogy mi mivel ütközött a szoláris ködben. Semmiféle szükségszerűség nem indokolja, hogy a Föld 150 millió kilométerre keringjen a Naptól, ne pedig, mondjuk, 200 millió kilométerre. A tényleges pálya ilyenformán részben szükségszerű, részben véletlen. Ha egy másik naprendszerben találunk egy Föld-szerű bolygót, annak a pályája nem fog kilométerre megegyezni a mienkkel; a gravitáció törvénye szerint viszont elliptikus pályát fog követni.

A szükségszerűség végletes példája a kristály szerkezete. A kristályrács geometrikus elrendezését teljes egészében az atomok közötti erők működése határozza meg. Két tiszta sókristály atomról atomra azonos kristályszerkezettel rendelkezik, ahogy két gyémántkristály is. Itt nem játszik szerepet a véletlen; a kristályoknak szükségszerűen olyan a formájuk, amilyen. Ezzel szemben, a véletlen végletes példája a flippergép. Bizonyos, hogy a golyó Newton mozgási törvényeinek engedelmeskedik, miközben ütközik a gombákkal, a végső sorsa azonban teljesen véletlenszerű. Nem is álmodhatunk róla, hogy mindig ugyanabba a lyukba érkezzenek a golyók.

Ami az életet illeti, mennyi köszönhető a véletlennek és mennyi a szükségszerűségnek? Maga Monod nem táplált kételyeket. Úgy tartotta, az élet túlnyomórészt a véletlen terméke, mely nézetet híres könyvében, a *Chance and Necessity*-ben (Véletlen és szükségszerűség) hirdette. Továbbá az élet véletlenszerűsége, állítja Monod, nem csak az evolúció véletlen és céltalan természetére vonatkozik,

hanem azokra a fizikai folyamatokra is, melyek először létrehozták az életet. Monod számára az élet teremtése csak a sors szeszélye, vak, kozmikus szerencsejáték eredménye. Mint azt a 2. fejezetben kifejtettem, kizárólag véletlen molekuláris kavargás révén elenyészően csekély az élet kialakulásának valószínűsége. Amennyiben így történt, nem is történhet meg még egyszer a megfigyelhető univerzumban.

Ha életet fedeznek fel a Marson vagy másutt, és biztosra vehetjük, hogy létrejöttében nem működött közre a pánspermikus folyamat, akkor egyszeriben kihajíthatjuk Monod véletlenségi tételét és a velejáró komor, fellengzős filozófiát. Akik szerint nem vagyunk egyedül az univerzumban, máris elvetik a vak véletlent, az élet keletkezésének magyarázataként. Feltételezik, hogy szerepet játszik a szükség- vagy törvényszerűség eleme is, vagyis azt feltételezik, hogy az élet megjelenése az élettelen anyagokból az egyetemes törvények szokásos működésének a következménye, és hogy ha ezek a törvények úgy nyilvánultak meg itt, a Földön, hogy létrehozták az életet, akkor minden valószínűség szerint más bolygókon is életet hoznak létre. Világosan jelentkezik ez az álláspont például a US National Academy of Sciences Space Science Boardnak a marsi élet lehetőségéről készített értékelésében^[154]: „Tekintettel arra, hogy az élet létrejött a Földön, valószínűnek, sőt hihetőnek látszik, hogy az élet hasonló körülmények között és ugyanakkor létrejöhetett a Marson.”

Azt a hiedelmet, hogy mivel létezik élet a Földön, akkor az

egész univerzumban mindennaposnak kell lennie, olykor biológiai determinizmusnak vagy predesztinációnak hívják.^[155] Széles körben elterjedt a csillagászok, kémikusok és fizikusok körében, viszont annál ritkábban figyelhetjük meg a biológusok között. Az élet eredete kapcsán a véletlen és a szükségszerűség egymáshoz viszonyított fontosságának mérlegelésében a legtöbb biológus Monod pártján áll, és a véletlent tekinti meghatározó tényezőnek. Akadnak azonban kivételek. A Monod-hoz hasonlóan Nobel-díjas Christian de Duve úgy véli, hogy az élet kialakulása a megfelelő feltételek mellett elkerülhetetlen és gyorsan bekövetkezik. Legutóbbi könyve, a *Vital Dust* (Eleven por), alcíme így hangzik: *Life as a cosmic imperative* (Az élet mint kozmikus kényszer). De Duve szerint a mindenség az élet „melegágya”, az életé, amely a természet törvényeinek automatikus következményeként jelenik meg. „Az élet a determinisztikus erők terméke – írja.^[156] – Az életnek létre kellett jönnie az uralkodó viszonyok között, és hasonlóképpen meg fog jelenni ahol és amikor csak adottak ugyanazok a viszonyok... Az élet és az értelem nem csak szeszélyes véletlenként jelenik meg, hanem az anyag természetes megnyilvánulásaként, az univerzum szövedékébe írva.”

Akkor hát mik ezek az életbarát törvények, amelyek nyilván arra ösztönzik a rendezetlen anyagot és energiát, hogy loholjon végig az élethez vezető ösvényen? Működik valamilyen különleges biológiai alapelv, vagy a fizika közönséges törvényei művelnek valami huncutságot? Történetileg mindkét álláspontnak akadtak jeles képviselői.

Arisztotelész szerint például az élet egy egyetemes rendezőelv megnyilvánulása. Darwin sem rejtette véka alá, hogy „az élet alapelve ezután valamiféle általános törvény részeként vagy folyamányaként mutatkozik meg”.^[157] El kell ismerni azonban, hogy manapság kevés biológus vallja, hogy az életnek ugyanúgy vannak önálló törvényei, mint a fizikának. Sokan találják túl misztikusnak, túlságosan a vitalizmust idézőnek az olyan, a fizika alaptörvényein kívül álló különleges törvények vagy alapelvek elképzelését, amelyek az anyag fejlődését az élet felé vezérik.

Így tehát az élet létrehozásához szükséges erőket maguk a fizika törvényei foglalják magukba? Képzelnék el, hogy az élet ugyanolyan kérlelhetetlenül bukkan elő egy levesből, ahogy a kristály jelenik meg a telített oldatból, az atomok közötti erők által meghatározott végső formával! Gondoljunk csak el például, hogyan kapcsolódnak az aminosavak polipeptidlánccá, a fehérjék anyagává. Hogy biológiai funkciójuk legyen, az aminosavaknak megfelelő sorrendben kell összekapcsolódnuk. Ha bármilyen más permutációban kapcsolódnak össze, elhanyagolható az esélye annak, hogy használható fehérje jön létre. De tegyük fel, hogy az atomok közötti erők, amelyek részt vesznek a peptidkötések összekovácsolásában, meg tudják különböztetni az eltérő sorozatokat. Lehet, hogy éppen az aminosavaknak azt a kombinációját szeretik összerakni, amelyik történetesen hasznos az élet számára.

Alkalmanként pontosan ezt mondják a kutatók. Az 1960-as években a Pennsylvania State Universityn dolgozó Gary Steinman és Marian Cole olyan beszámolókat ellenőrzött,

melyek szerint az aminosavak úgy alkotnak peptidláncokat, ami „minden, csak nem véletlenszerű”.^[158] Kísérleteik megerősíteni látszottak, hogy az élet szempontjából fontos molekulák kedvezményezett elbánásban részesülnek. „Ezek az eredmények arra a feltevésre indítanak, hogy kivételes, biológiailag lényeges peptidsorozatok létrejöhetnek prebiotikusan” – írják. Steinman és Cole azt is megjegyzi, hogy „a szerveződés magasabb szintjén is sikerült megfigyelni előnyben részesített kölcsönhatásokat”, végül eljutnak egészen addig a kijelentésig, hogy „a biológiai rend számos szintjén megfigyelhető egyfajta beépített »predesztináció«”.

Steinman és Cole szerint az anyag, az atomok és a molekulák között működő kémiai affinitások alapján, eredendően az élet felé tapogatózik. Nem állnak egyedül ezzel a nézettel. Sidney Fox ugyancsak arra a következtetésre jut,^[159] hogy „az aminosavak meghatározzák a saját rendjüket a kondenzációban”, és hogy ugyanez a nem véletlenszerű „önvezérlés” itatja át a makromolekulákat a döntő jelentőségű biológiai információval, kikövezve az utat az élet számára. A néhai Cyril Ponnampereuma, Sidney Foxhoz hasonlóan a biogenezis kutatásának egyik úttörője, úgy vélte, hogy „az atomok és molekulák bizonyos eredendő tulajdonságai mintha az élet szintézisére irányulnának”.^[160] Ponnampereuma megismétli az ismerős logikájú okfejtést, hogy mivel az élet építőkövei mindenütt előfordulnak az univerzumban, életnek is kell lennie.^[161] „Rádiócsillagászok szerves molekulák egész sorát fedezték fel az

intersztelláris közegben. Ilyenformán arra az elkerülhetetlen következtetésre kell jutnunk, hogy az életnek általánosnak kell lennie a kozmoszban.” (A 3. fejezetben kimutattam ennek az érvelésnek a hamisságát; a hasonlatommal élve, kizárólag csak téglák nem építenek házat.)

Ha elképzeljük a vegyületek levesét és a lehetséges reakciók szinte végtelen vonulatát, a molekuláris elrendeződések roppant döntési fája hajt és terebélyesedik ki. A fának csak néhány apró ágacskája vezet az élethez. Fox és Ponnamperuma szerint az előnyben részesített kémiai affinitások csalogatják a részt vevő molekulákat a megfelelő ösvényre ezen a fán, amíg be nem teljesül az élet. Ha ez igaz lenne, akkor nem csak elképesztő, hanem egyszerűen hihetetlen is volna. Azt állítani, hogy az *atomi* folyamatok az *élő szervezetek* számára kedvező beépített részrehajlással működnek, azt jelenti, hogy az atomfizika törvényei hatékonyan hordozzák az élet tervrajzát. Ebben az esetben közvetlen kapcsolat állna fenn az atomok alaperői és a végső, mérhetetlenül bonyolult makroszkopikus termék, a működő szervezet között. De milyen lenne ennek a kapcsolatnak a jellege? Honnan „tudhatnak” a fizika alaptörvényei olyan komplex, információgazdag entitásokról, mint amilyenek az élő sejtek?

Ellenvetésem lényege a következő: a fizikának az atomok és a molekulák között működő törvényei szinte eredendően egyszerűek és általános érvényűek. Önmagukban nem várhatjuk, hogy elkerülhetetlenül valami nagymértékben komplexhez és nagymértékben specifikushoz vezessenek.

Hadd próbáljam meg kifejtetni, hol látom a problémát. A 4. fejezetben kimutattam, hogy egy genom a bázispárok többé-kevésbé véletlenszerű sorozata, és hogy pontosan ez a véletlenszerűség a döntő, ha fejlődőképes, információgazdag molekulák szerepét akarják játszani. Ez a tény azonban homlokegyenest ellentmond annak az állításnak, miszerint a géneket egy egyszerű, megjósolható, törvényszerű folyamat hozza létre. Mint a mondott fejezetben elmagyaráztam, minden törvény az adatsűrités algoritmusos módja, ami egy egyszerű kifejezésre vagy eljárásra szűkíti a látszólagos bonyolultságot. És fordítva, önmagában egyetlen egyszerű törvény sem hozhat létre véletlenszerű, információgazdag makromolekulát. A természet ilyesféle törvénye, amit ismerünk és szeretünk, nem fog létrehozni biológiai információt, mi több, egyáltalán semmiféle információt nem fog létrehozni. Az általános törvények csak átalakítják a bemeneti adatokat kimeneti adatokká. Összezavarhatják ugyan az információt, de semmi esetre sem hozhatják létre. A fizika törvényei, amelyek meghatározzák, melyik atom melyikkel és hogyan lépjen kapcsolatba, algoritmusosan nagyon egyszerűek, ők maguk viszonylag kevés információt tartalmaznak. Következésképpen a saját erejükből nem lehetnek felelősek információs makromolekulák létrehozásáért. Az oly gyakran hangoztatott kijelentéssel szemben tehát az élet nem lehet „bevésve” a fizika törvényeibe – az általunk jelenleg ismert törvényekbe legalábbis nem.

Ha elfogadjuk, hogy a genom véletlenszerű és információgazdag, akkor nyilvánvaló ellentmondás az élet

létrehozása érdekében a nem véletlenszerű kémiai folyamatokhoz folyamodni. A nem véletlenszerűség pontosan az *ellentéte* annak, mint ami a véletlenszerű makromolekulák létrehozásához szükséges. A genetikai kódnak például éppen az a lényege, hogy *felszabadítsa* az életet a nem véletlenszerű kémiai kötések béklyójából. Egy genom választhatja bármelyik aminosav-sorozatot, ügyet sem vetve a molekulák kémiai hajlamaira. Ezt különleges, pontosan a kémiai folyamatok nem véletlenszerű viselkedésének legyőzésére készült enzimek bevetésével éri el. Ez az oka annak, hogy az élet kénytelen vállalni a kódolt információ és a szoftveres vezérlésű összeszerelés megannyi nyűgét a nukleinsav-fehérje szerződésen keresztül. Az élet nem a kémiai folyamatok irányultsága előtti behódolással, hanem kémiailag és termodinamikailag „természetes” eseményeinek *kijátszásával* működteti a maga csodáját.

Természetesen a szervezeteknek is alá kell vetniük magukat a fizika és a kémia törvényeinek, ezek a törvények azonban csupán mellékesek a biológiában. A fő szerepük abban áll, hogy lehetővé tegyék egy alkalmas logikai és információs rendszer létrejöttét. Ahol a kémiai reakciók könnyűek és termodinamikailag kedvezőek, az élet boldogan hasznosítja őket, de ha éppen „természetellenes” kémiai folyamatokra van szüksége, akkor sem zavartatja magát. Legyártja a furcsa reakciók végbemeneteléhez szükséges katalizátorokat és elkészíti a termodinamikai gradiensek ellen működni képes gerjesztett molekulákat, esetenként igen bonyolult

kombinációkban. A biogenezishez vezető kulcslépés az átmenet egy olyan állapotból, amelyikben a molekulák szolgaián követik a földhözragadt kémiai utakat, abba az állapotba, amelyikben megszervezik magukat és új utakat törnek. A szoftvervezérlés „szezón-fazon” egyesítési képessége, mint a genetikai kód alkalmazása példázta, ennek az átlépésnek a legkézzelfoghatóbb megnyilvánulása. Az élet igyekszik kivonni magát a kémiai folyamatok kötöttségéből egy információs vezérlőcsatorna alkalmazásával, hogy felszárnyaljon az atomi kölcsönhatások földhözragadt bukdácsolása fölé, és a független tevékenység új, felemelkedő világát hozza létre.

Miután tisztáztuk ezt az alapvető részt, világossá vált a biogenezis igazi problémája. A molekuláris biológia szédületes sikerei óta a legtöbb kutató a molekulák fizikájában és kémiájában keresi az élet titkát. De hiába fognak kutakodni a konvencionális fizikában és kémiában, hogy magyarázatot leljenek az életre, mert ez a közvetítő eszköz és az üzenet összetévesztésének klasszikus esete. Az élet titka nem a kémiai alapjaiban rejlik, hanem az általa kiaknázott logikai és informatikai szabályokban. Az élet pontosan azért boldogul, mert kibújik a kémiai kényszerek alól.

Nem szabad elhallgatnom, hogy mutatkozik egy hiányosság az okfejtésemben. Idézzük fel a 4. fejezet témáját az algoritmusos komplexitásról és a bináris sorozatokról. Ha találunk egy tömör kifejezést valamely adott sorozat létrehozására, akkor nyilvánvalóan bebizonyosodott, hogy a sorozat nem véletlenszerű. Ám ha

megpróbáljuk, és nem sikerül ilyen kifejezést találni, azzal még nem bizonyosodott be az ellenkezője, vagyis hogy a sorozat kifejezetten és vitathatatlanul véletlenszerű. Lehet, hogy csak átsiklott a tekintetünk egy rejtett képleten, ami létrehozza a szóban forgó, véletlenszerűnek látszó sorozatot. Voltaképpen kimutatható, hogy a véletlenszerűséget nem lehet bizonyítani.^[162] A biogenezis esetére alkalmazva: soha nem zárhatjuk ki annak a lehetőségét, hogy egy adott genom egyszerű, törvényszerű módon jött létre, például a fizika fortélyosan forgatott törvényeivel. De ha így volna, annak is meg kellene fizetni az árát, nevezetesen, hogy akkor az élet csak bonyolultnak *látszódná*, valójában azonban nagyon is egyszerű lenne. Sok példa akad a természetben a megtévesztően bonyolult jellegű rendszerekre. Spontán módon kialakult mintákat láthat bonyolultnak a felületes pillantás, de kiderülhet, hogy van rejtett mögöttes egyszerűségük. Ilyenek a hihetetlen kacskaringókat vagy labirintusokat mutató minták, például a partvonalak, a homokdűnék felszíne és a Szaturnusz gyűrűi. Sok efféle természetes sajátosságot lehet pontosan modellezni a fraktálnak nevezett geometriai leírással. A fraktálok végtelenül szabálytalannak és komplexnek látszódnak, valójában azonban egy egyszerűsítő matematikai tulajdonság, az önhasonlóság határozza meg őket. Nagyjából arról van szó, hogy önhasonló az a minta, amely a felbontástól függetlenül többé-kevésbé ugyanolyan mértékben szabálytalan. Következésképp a fraktálok leírása vagy létrehozása nem igényel nagy adag információt.^[163] Az egyik leghíresebb fraktál a Mandelbrot-

halmaz, amit gyakran ábrázolnak színesen, mint művészi alkotást, számítógépen egy rendkívül egyszerű algoritmussal létrehozható.^[164] Vagyis a véletlenszerű komplexitás példájának tűnő számos nem biológiai rendszer valójában egyáltalán nem véletlenszerű.

Ilyen volna az élet is? Látszólag bonyolult, valójában azonban roppant egyszerű, mint a fraktálok, és ilyenformán egyszerűen leírható törvényszerű folyamat eredménye? Nem szükséges feltételezni, hogy minden élet egyszerű: csak az első élőlény. Miután valamilyen törvény révén az élet már megszületett, a darwini evolúció hozzáteheti az egyszerűsíthetetlen komplexitást. Én személy szerint nem hiszem, hogy így volna, már csak ezért sem, mert ez az álláspont hihetetlenül mesterkéltszerű természetszemléletet igényel. Túlságosan is kiagyalt azt állítani, hogy igazából működik egy „kód a kódban”, ami egyszerű mintákból kívánságra élőlényeket hoz létre.

Elejétől végéig darwinizmus?

Az előző részben azt mondtam, hogy az afféle ravasz rendszerrel nem számolva, ahol az élet valójában komplexitásnak álcázott egyszerűség, egyedül a normál fizikai törvények nem tudják rendelésre kicsikarni az életet. Ám ez nem jelenti azt, hogy kezdettől fogva kudarcra ítélt a biológiai determinizmus valamennyi formája. Az is lehet, hogy az alkalmas körülmények között az élet elkerülhetetlen, vagy legalábbis erősen kedvezményezett. Egyes tudósok a biológiai determinizmus egy kevésbé

végletes és összességében hihetőbb formáját képviselik. Christian de Duve például úgy látja, hogy bár fontos szerepet játszik a véletlen, de különféle fizikai megszorítások mérséklék a működését, és egy átfogó tendenciát helyeznek fölé, az étellel, mint megjósolható végcéllal. Ezek a megszorítások, bár szigorúak, de nem olyan specifikusak, hogy a kémiai szintézis minden egyes részletét megszabják. De Duve inkább a kötelezően a krátertől a szurdok felé folyó vízhez hasonlítja a helyzetet, amelynek az általános irányát előre meghatározza a táj domborzata. Ennek szellemében írta: „Az élet megjelenése nagymértékben meghatározott folyamatok eredménye volt, az akkoriban uralkodó fizikaikémiai viszonyok között gyakorlatilag meg kellett történnie.”^[165]

Stuart Kauffman, akinek az elképzeléseit az 5. fejezetben tárgyaltam, nem állítja, hogy az életnek előzetesen megszerkesztett tervrajza volna, csupán egy hajlam a szervezett komplexitások számára, hogy a megfelelő körülmények között megjelenjenek. Így az élet egyáltalán nem olyan nagy meglepetés, hanem „a komplex rendszerek várt közös tulajdonságá”-nak a megnyilvánulási módja.^[166] „Számos különböző út vezet az élethez, miközben eredete mélyen gyökerező, mégis egyszerű.” Kauffman elmélete szerint az önszerveződés alapelveibe nincs kódolva semmiféle *specifikus* végcél, nincs megjelölt mikroba, csak egy általános irányzat az olyasféle komplex állapotok felé, amelyek valószínűleg az élethez vezetnek. Bármilyen vonzóak is legyenek azonban ezek a gondolatmenetek, még mindig nem oldódik meg a rejtély,

hogy honnan erednek a biológiai információk. Az ellenvetések, amelyeket az előző részben tettem, továbbra is érvényesek. Amennyiben a fizika szokásos törvényei nem szolgáltatathatják az információt, és ha kizárjuk a csodákat, akkor hogyan lehet az élet előre meghatározott és elkerülhetetlen, nem pedig a véletlen szeszélye? Hogyan lehetséges *együtt*, törvény jelleggel létrehozni véletlenszerű komplexitást és specifikusságot? Minduntalan ehhez az alapvető paradoxonhoz jutunk vissza.

Úgy vélem *van* megoldás a problémára, még hozzá egy olyan radikális megoldás, aminek sok tudós még a gondolatát is kerüli. Ám minél többet tűnődöm a biogenezis kérdésén, annál inkább érzem, hogy nem térhetünk ki valami efféle felvállalása nélkül. Hadd vázoljam fel, mire gondolok. Mint a 2. fejezetben említettem, Schrödingert olyannyira foglalkoztatta az élet, hogy „új típusú fizikai törvényt” javasolt. Schrödinger szerintem jó nyomon járt. Ám nincs szükségünk másik fizikai törvényre. Másutt kell keresgelnünk. De hol?

Két kutatási területen találhatunk kínálkozó megoldásokat. Az első a komplexitáselmélet. Már említettem Kauffman idevágó munkáját a kémiai hálózatokról és az autokalitikus ciklusokról. A legutóbbi években rengeteg munka foglalkozott általánosságban a komplex rendszerekkel. Sok kutató jutott arra a következtetésre, hogy léteznek olyan matematikai alapelvek, amelyek az ilyen rendszerek viselkedését irányítják. Ezek a „törvények” nem az alapul szolgáló fizikai törvényekből fakadnak, mivel nem a szokásos értelemben vett fizikai törvények; a rendszer

logikai szerkezetéből erednek, és csak közvetetten függnek a részt vevő fizikai erőktől. Ezért az ilyen rendszerek könnyen modellezhetők számítógépen, mint „játékok”. Sok efféle számítógépes modell meghökkentően életszerű tulajdonságokat mutat. Az egyiket úgy is hívják: *The Game of Life* (Az élet játszámája).^[167] Az egyik mostanság felívelő kutatási terület az ilyen számítógépes modelleken alapuló „mesterséges élet”.^[168] Sok komplexitásteoretikus abban reménykedik, hogy bizonyos önszervező fizikai folyamatok egy fizikai rendszert a komplexitás egy bizonyos küszöbe fölé emelhetnek, ahol elkezdnek megnyilvánulni ezek az újfajta „komplexitástörvények”, rendkívüli hajlammal és hatékonysággal ruházva fel a rendszert az önszerveződésre és az önkomplexizálásra. Az eredmény egy sorozat átmenet volna, amely hirtelen feljebb lendíti a rendszert a komplexitás létráján. Az ilyen törvények kényszerében a rendszer igen gyorsan az élet felé irányulhat. Ez esetben viszont az élet nem annyira a fizika törvényeibe, hanem inkább az univerzum logikájába van beépítve.

Véleményem szerint a komplexitás törvényeinek a megjelenése megalapozza a reményt nemcsak a biogenezis, hanem a biológiai evolúció megértésére is. Az ilyen törvények egy alapvető és fontos tekintetben feltétlenül különböznek a fizika ismerős törvényeitől. Míg a fizika törvényei pusztán tologatják ide-oda az információt, addig egy komplexitástörvény ténylegesen *létrehoz* információt, vagy legalábbis kiragadja a környezetből és anyagi

struktúrába vési.^[169] Ez számottevő eltávolodást jelentene a hagyományos redukcionista világréptől, amely szerint az erők a tehetetlen anyagi részecskék között működnek, az információt pedig másodlagos, lezármaztatott fogalomként kezeli. Az én felvetésem annak elfogadását jelenti, hogy az információ valódi fizikai mennyiség, amit ugyanúgy cserélhetnek az „információs erők”, ahogy a fizikai erők mozgatják az anyagot. Egyúttal a komplexitásnak, mint fizikai változónak az elfogadását is jelenti, valóságos oksági hatóerőként, nem a szóban forgó rendszer bonyolultságának pusztán minőségi leírásaként. Úgy vélem, csakis valamilyen információs törvény működésének a hatására jöhet létre a genetikai kóddal együtt járó információs csatorna vagy szoftveres vezérlés. Ebben a formájában a felvetésem talán radikálisabb benyomást kelt, mint amilyen valójában. Az információs- vagy szoftvertörvények közel sem jelentenek akkora újdonságot. Sok más kutató állt elő már hasonlóval. Manfred Eigen például a következőképp írt^[170]: „A feladatunk olyan algoritmust, olyan természeti törvényt találni, amely elvezet az információ eredetéhez.” A molekuláris darwinizmus döntő szerepének elismerése mellett Eigen és munkatársai mindazonáltal szükségesnek látják a kiegészítést más fizikai folyamatokkal, amelyek a biológiai információ további forrásai lehetnek.^[171]

A „szoftvertörvények” elképzelésével először a *The Cosmic Blueprint* (A kozmikus tervrajz) című könyvemben hozakodtam elő, melyben úgy tárgyaltam az új törvényeket, mint amelyek az alapvető fizikai törvényekkel összeférnek,

de azokra nem egyszerűsíthetők. Amikor a jelen könyv megírásába belevágtam, még nem gondoltam, hogy ilyen törvényeket igényelne a biogenezis magyarázata. Feltételeztem, hogy ez is az „elejétől végéig darwinizmus” esete. Lenyűgözött a replikátormolekulák előállítását célzó laboratóriumi munka és az a látszólagos könnyedség, amellyel egyszerű szerves építőelemek létrejönnek, így eszembe sem jutott megkérdőjelezni, hogy kizárólag a véletlen is meglehetősen gyorsasággal létrehozhat egy kis replikátormolekulát. Ezután a molekuláris evolúció venné át a hatalmat és vezetné folyamatosan a rendszert a sejtélet felé. Most, hogy átrágtam magam az elmélet sokféle változatán, sokkal szkeptikusabb vagyok. Roppant valószínűtlennek találom, hogy kizárólag a megfelelő kémiai reakciókra vagy a megfelelő molekulákra volna szükség, és ripsz-ropsz, meg is jelenik az élet. Úgy vélem, a biogenezis misztériumában nem újszerű kémiával történik majd meg az igazi áttörés, hanem valamiféle elvileg új révén.

A molekuláris darwinizmus és a szerveződési komplexitás törvényeinek keveréke jelölheti ki az előre vezető utat. Egy ilyen szellemben elképzelt forgatókönyvben a véletlen viszonylag kis replikátormolekulákat hoz létre; ezek a darwini eszközökkel kezdenek fejlődni, ám a folyamatot alkalmanként segítik vagy egyenesen átveszik vezérlését a szerveződési elvek, melyek felruházzák specifikussággal és információval.^[172] Ezek a szerveződési elvek egyúttal jelentősen fokozzák az evolúciós folyamat szelektivitását, és a komplexitásban hirtelen ugrásokhoz, nem pedig a

darwini evolúció kizárólagos működésétől várható fokozatos fejlődéshez vezetnek.

A biogenezist érintő vizsgálat másik szála még spekulatívabb, és a kvantummechanikát, az anyag különös atomi szintű viselkedésével foglalkozó tudományt hívja segítségül. A biokémikusok és a molekuláris biológusok többsége figyelmen kívül hagyja a kvantummechanikát. Az atomokat és a molekulákat apró építőkövekként kezelik, amelyek különféle formákban állnak össze, a mikrovilág valósága azonban lényegesen kifinomultabb ennél. Először is, ott a közismert hullám-részecske dualitás: egy atom egyaránt mutat hullámtermészetű és részecsketermészetű megnyilvánulásokat. Nevezetesen, a hullám azonosítható az információval vagy szoftverrel, mert leírja, ami a rendszerről ismert. Másfelől a részecskének felfogott atom megfelel a hardvernek. Kvantummérések esetén a hullám „összeomlik” – hirtelen megváltozik –, mert megváltozik a rendszer tudása. Ez viszont befolyásolja a részecske rákövetkező viselkedését.^[173] A kvantummechanikában ilyenformán fennáll egyfajta hardverszoftver összefonódás. Az információ (vagy tudás) lefelé irányuló okozati erőtt mutat. Íme egy tekintélyes fizikai elmélet, melyben az információ meghitt viszonyban áll az anyaggal. Továbbá az atomok között fellépő, a biológiai molekulákat, például a fehérjéket és a nukleinsavakat létrehozó erők valójában kvantummechanikai természetűek. Lehetséges, hogy éppen valamiféle kvantumszerveződési folyamatban keresendő az információs makromolekulák eredetének magyarázata?

Ezt a feltételezést egy meglepő irányból érkező bizonyíték támasztja alá. Híres könyvében Erwin Schrödinger felvetette, hogy az átöröklési egység egy „aperiodikus kristály”. Ez alatt elég stabil molekuláris struktúrát értett ahhoz, hogy megőrizze a formáját, de elég komplexet ahhoz, hogy rengeteg információt tároljon. Egy szokványos periodikus kristálynak nagy a stabilitása, de csekély az algoritmos információs tartalma (lásd 5. fejezet). Schrödinger elképzelése prófétainak bizonyult. A DNS-molekula rendelkezik szerkezeti stabilitással (ha nem is tökéletessel – az információ megőrzése ugyanis javító- és szerkesztőfolyamatok alkalmazását igényli). Az aperiodicitás azért jön létre, mivel a bázissorozat főként véletlenszerű, így információgazdag – ahogy erről már szó esett.

Néhány évvel ezelőtt a vegyészeket meglepte egy meglehetősen más aperiodikus kristály, az úgynevezett kvázikristály felfedezése. A kvázikristályok különös, ötszörös szimmetriával rendelkeznek; azaz 72 fokkal elforgatva ugyanolyan látványt nyújtanak. A szokványos kristályokkal szemben azonban nem periodikusak; kimutatható, hogy az atomok mintázata soha nem ismétlődik.

Hogy a kvázikristályok akkora meglepetést okoztak, az az egyszerű geometriára vezethető vissza. Köztudott, hogy háromszögekkel, négyzetekkel vagy hatszögekkel kicsempézhetünk egy falat, ötszögekkel viszont nem, mert hézagok maradnak. Az ötszörös szimmetria nem engedélyezi az egyszerű, ismétlődő mintát. Csakhogy egy

híres tételben Roger Penrose bebizonyította, hogy egy végtelen falat kirakhatunk ötszörös szimmetriával, ha két különböző alakú csempét, egy széles és egy vékony rombuszt használunk.^[174] A kvázikristályok a Penrose-féle csempeminta természetben előforduló, háromdimenziós megfelelői. Maga Penrose azt állította, hogy éppen a kvázikristályok létezése az igazi rejtvény, tekintettel aperiodikus természetükre. A szokványos periodikus kristály atomról atomra nőhet, mivel szabályos, ismétlődő struktúrát képez, a kvázikristály azonban valamiféle hosszú távú szerveződést igényel, ami biztosítja, hogy megfelelő részek kerüljenek a megfelelő helyekre. Penrose szerint a kvantummechanika, és akár a kvantumgravitáció finom megnyilvánulásai játszhatnak szerepet ebben a geometrikus szerveződésben.

Ötszörös szimmetriája miatt a kvázikristály nagyon kevés információt tárol a felépítésében, viszont lineáris, aperiodikus sorozatában korlátlan mennyiségűt. Valamelyest egyesíti tehát Cairns-Smith elképzelését a szennyezett kristályokról és Schrödinger ötletét az aperiodikus láncmolekuláról. Akárcsak a DNS, az első pillantásra a kvázikristályok is mérhetetlen algoritmusos komplexitással rendelkező „képtelen objektumoknak” tűnnek. A kvantummechanika azonban mégis lehetővé teszi a létrejöttüket. Nem arra célozok, hogy a kvázikristályok lehetséges genomok volnának (bár ki tudja...), csak hogy a tanulmányozásuk rávilágíthat, hogyan szervezi meg a kvantummechanika a nagy információtároló képességű komplex fizikai struktúrák kialakulását.^[175]

A kvantumszámítás manapság divatos tudományából ered a további nyom, hogy a kvantummechanika lehet a ludas a biológiai információgazdálkodásban is.^[176] A kvantumszámítógép kezelhetővé tehet egyes számítástechnikailag megoldhatatlan problémákat (például az általam már említett utazó ügynök problémáját), ami megint csak arra utal, hogy a számításilag „képtelen objektum”, például egy algoritmusosan véletlenszerű genom, viszonylag könnyedén létrehozható kvantumfolyamatok révén, még ha klasszikus eszközökkel hosszú és nehézkes eljárást követelne is.

Elismerem, hogy az általam ebben a részben érintett elképzelések túlnyomórészt feltevéseken alapulnak, de éppen az a tény húzza alá a probléma makacs mivoltát, hogy a biogenezis kérdése sarkall ilyen feltételezésekre. Ennek ellenére továbbra is széleskörűen hangoztatják azt a nézetet, hogy az élet alapvető kozmikus jelenség, amely eleve elrendelten kifejlődik, valahányszor lehetővé teszik a körülmények. Az „élet meg fog jelenni” állítás kevés szószólója érti meg teljes mértékben felvetése mélyreható következményeit. A determinisztikus gondolkodás még a de Duve- és Kauffinan-féle enyhébb formájában is alapvető kihívást jelent a fennálló tudományos paradigmának, elegendőt ahhoz, hogy a biológusok többsége beleborzongjon. Noha a biológiai deterministák határozottan tagadják, hogy bármilyen tényleges tervet vagy elrendelt célt vonna maga után a javaslatuk, az az elképzelés, hogy a természet törvényei az életre irányulnak, bár nem mond ellent a darwinizmus betűjének, bizonyosan

sérti a szellemét. Visszacsempészett ugyanis a természetbe egy teleológiai elemet, másfél évszázaddal azután, hogy Darwin száműzte onnan. Sok tudós számára a biológiai determinizmus egyenértékű a természet köntösébe öltöztetett csodával. Ami persze nem feltétlenül teszi tévessé. Attól még mindig igaz lehet! Az élet akár valóban megjelenhet menetrendszerűen, valahányszor alkalmasak rá a feltételek. De ha így van, annak félelmetesen mélyrehatóak a következményei.

A tudomány háromszáz éven át a redukcionizmusra és a materializmusra épült, így elkerülhetetlenül az ateizmushoz és ahhoz a hithez vezetett, hogy a fizikai létezés nélkülözi a célt és az értelmet. Egy életre ítéltetett univerzum döntő változást okozna. Jelentőségét elegánsan fejezte ki de Duve:^[177] „A determinizmus nézőpontjából... – írja – nem »kozmosz viccnek« tekintem az univerzumot, hanem értelemmel bíró entitásnak, ami oly módon készült, hogy életet és értelmet hozzon létre, kénytelen legyen életet adni gondolkodó lényeknek, akik képesek felismerni az igazságot, méltányolni a szépséget, szeretetet érezni, áhítani a jóságot, elutasítani a gonoszt, átélni a misztériumot.”

A fejlődés létrája?

A tudomány történetében egyetlen elképzelés sem gázolt oly mélyen az ember önbecsülésébe, mint Darwin evolúciós elmélete. A Darwin és a keresztény egyház között öröklődő közvélemény példázza, hogy milyen fájdalmas

is lehet, midőn a tudományos eredmények alapvetően megrendítik azt a fogalmi bázist, amire a természetről alkotott képünk épül. Manapság majdnem egyetemesen elfogadják az evolúciót; még a pápa is áldását adta rá. A tudomány csöndes csarnokaiban azonban még mindig kísért a régi harc árnyéka. Nem vont magára sok figyelmet, és kevés teológus csatlakozott hozzá, ám filozófiai jelentősége alapján ez a kései csetepaté legalább olyan fontos, mint a tizenkilencedik századi küzdelem Darwin és Wilberforce között.

A kockán forgó ügy ma nem az, hogy az élet fokozatosan fejlődött-e ki évmilliárdok leforgása alatt – erre döntő bizonyítékok állnak a rendelkezésünkre –, hanem hogy felismerhető-e valami célzatosság az evolúció módjában. A tizenkilencedik században divatos volt úgy tekinteni az életet, mint a felfelé haladó utat követő fejlődést. A primitív élet, mondták, lassan „fejlődött” és változott egyre bonyolultabb és kifinomultabb formákba, míg elérte a tetőpontját a *Homo sapiens*ben, az annyit magasztalt intelligenciánkkal és logikus gondolkodó képességünkkel. Ezt az utat szemlélve az evolúció nem annyira kanyargós ösvény volt, mint inkább a haladás létrája, amely folyamatosan vezetett felfelé a mikrobától az emberig. Meg kell hagyni, kegyetlen és vesződéses volt felkapaszkodni a létrán, minthogy a természetes kiválasztódás kivetette rá a vámját, ám rendületlenül haladó irányzata egyfajta zord dicsőséget hordozott és különleges státust biztosított az emberiségnek.

Továbbra is élénken él a haladás evolúciós létrájának a

képe, és tudat alatt sok tudós és laikus elfogadja anélkül, hogy a belőle fakadó mélyreható metafizikai következtetéseket is elfogadnák. Amennyiben az evolúció valóban haladó, akkor nemcsak arról van szó, hogy a természet törvényei az élet kedvéért születtek, hanem egyúttal a fejlődése kedvéért is.

A „haladó” biológia ellenfelei számos területen támadják ezt az elképzelést. Először is kimutatják, hogy értékítéletet tartalmaz, amely szerint az emberek valamilyen módon „jobbak”, mint a majmok vagy a békák. Erről az elfogultságról árulkodnak az olyan jelzők, mint a „magasabb rendű” emlősök vagy az „alacsonyabb rendű” gerincesek, amelyek híven tükrözik a hagyományos „haladás létrája” gondolatot. És politikailag is helytelenek. Pontosan mi is az, kérdezik a kritikusok, ami az embert fejlettebbé teszi más szervezeteknél? A puszta számok alapján elsöprő győzelmet aratnak a mikrobák. Amennyiben az alkalmazkodási siker a kulcsfeltétel, akkor a „csudabogár” baktériumok és archebaktériumok viszik el a pálmát. Na persze, az embereknek magas az intelligenciájuk. Ez tesz minket sikeressé, amikor az IQ-ra hagyatkozhatunk, de azt se feledjük el, hogy reménytelenül rossz úszók vagyunk, repülni pedig egyáltalán nem tudunk. Ha az intelligenciát tekintjük fontosnak, akkor vitathatatlanul a létra tetején állunk. De ez nem egyszerűen csak a sovinizmus tipikus esete? Mi magunk választottuk ki azt a feltételt, ami a csúcsra emel minket. Kiválasztottuk a nekünk kedvező helyet, aztán magunk alá húztuk a létrát. Ezek után cseppet sem meglepő, hogy ha lenézünk, akkor

kevésbé intelligens elődök nyüzsögnek az alacsonyabb fokokon. És akkor mi van? Abszolút értelemben jobb-e az intelligencia, mint mondjuk az éles látás vagy hallás, mely tekintetben az ember legfeljebb mérsékelten fejlettnak tekinthető?

Ezek a nehézségek tették elfogadhatatlanná a „haladás” szót a biológusok számára. Mindazonáltal még mindig fennállhat az az eset, hogy a szervezetek valamilyen tulajdonsága – egy kulturálisan semlegesebb jellegű minőség – mutathat általános „felfelé” irányultságot az idők során. Gyakran javasolják ilyen minőségnek a komplexitást. Vitathatatlan, hogy egészében a bioszféra jóval komplexebb manapság, mint hárommilliárd évvel ezelőtt volt. Az is nyilvánvaló, hogy a legkomplexebb szervezeteknek napjainkban sokkal nagyobb a komplexitásuk, mint a távoli múlt legkomplexebb szervezeteié volt. Igaz, ez nem egy töretlenül felfelé haladó menetelés során valósult meg. Időről időre bekövetkeztek katasztrofális méretű pusztulások, mondjuk kisbolygó-becsapódások következtében, aminek eredményeképp a fajok döntő többsége eltűnt a bolygóról. Ezek az epizódok bizonyosan drámaian csökkentették a biológiai komplexitást, ám az (ez idáig) mindig megújult erővel tért vissza. Az tehát a benyomásunk, hogy *ha hagyják virulni*, az élet szívesen felpattan a fejlődés mozgólépcsőjére. Kitölt minden elérhető zugot, új és jobb lehetőségeket tár fel és egyre bonyolultabb formákat fejleszt ki.

Ez a módszeres előrehaladás a szervezet komplexitásában annyira szembeszökő, hogy a természet

törvényének látszik. Jól összefér a legújabb kozmológiai gondolkodással, amely egészében a világegyetemet az ősrobbanás óta folyamatosan növekvő komplexitásúnak tekinti. Az alaposabb értékelés azonban komoly problémákat tár fel ebben az egyszerű képben. Először is, a darwinizmus alapelvei kizárják az élet „jobbra való törekvésének” teleologikus fogalmát. A darwini evolúció úgy működik, hogy pillanatról pillanatra alkalmazza a természetes kiválasztódás szűrőjét a vaktában létrejött változatokhoz, úgy, hogy a jó változásokat megtartja, a rosszakat elveti. Ebben a paradigmában nincs mechanizmus az előrelátásra, nincs rá mód, hogy módszeres menetelés induljon egy előre meghatározott cél felé. Ha a nagyobb komplexitás nagyobb túlélési lehetőséget biztosít az adott korban, és csakis az adott korban, akkor kiválasztódik. Ha nem, akkor félre vele!

Másodszor: sok példát ismerünk olyan szervezetekre, amelyek az idők során kevésbé komplexekké fejlődnek; például a sötét barlangokban élő halak, amelyek elvesztették a látási képességüket. Ebben nincs semmi meglepő. Adódhatnak olyan körülmények, melyek között határozottan hátrányt jelent a nagy komplexitás. Spártai körülmények között a túlélés akadályainak bizonyulhatnak a többletszervek, vagy fölösleges terhet jelenthetnek, amikor jól mennek a dolgok. Klasszikus példa a biológiai visszafejlődésre Spiegelman szörnye, amelyről az 5. fejezetben ejtettem szót. Ott a „kanállal etetett” RNS az eredeti vírus méretének töredékére zsugorította magát a minél gyorsabb replikálódás értelmében.

Ami a kövületeket illeti, az adatok általánosságban azt a szemléletet támogatják, mely szerint az átfogó biológiai komplexitás az idővel növekszik. Bár egynémely fajok egyszerűbbek lesznek, mások egyre összetettebbé válnak. De a globális katasztrófától eltekintve az átlag felfelé tart. Csakhogy óvatosan kell kezelnünk az átlag fogalmát. Az élet egyszerű mikrobákkal indult. Amennyiben azon volt, hogy elinduljon valahová, azt csakis a nagyobb komplexitás irányába tehetta. A darwinizmus szerint az evolúció véletlenszerűen bejárja a biológiai lehetőségek birodalmát, minden célt és szándékot nélkülöző tapogatózással. Nyilvánvaló, hogy ha egy különösen egyszerű kezdeti állapotból indulunk ki, akkor még a véletlenszerű bolyongás is a nagyobb komplexitás irányába fog vezetni, legalábbis eleinte.

Stephen Jay Gould jól szemlélteti ezt az esetet a téglafalnak támaszkodó részeg példájával. A részeg vakon botorkálni kezd, és végül az árokban köt ki.^[178] Nem azért kerül az árokba, mert erre törekedett, és módszeresen arrafelé haladt. Véletlenszerűen tántorog; bármely adott időpontban ugyanakkora valószínűséggel tarthat az árok, mint a fal felé. A lényeg, hogy mivel a fal az egyik irányban korlátozza a haladását, átlagosan nyilvánvalóan valószínűbb, hogy távolodik a faltól, és amikor itt az ideje, merőben véletlenül, de elkerülhetetlenül az árokba pottyan. Gould rámutat, hogy az egyszerűségnek van egy korlátja, ahol a szervezet még élőnek nevezhető; ez felel meg a falnak. Ha a földi élet a „falnál”, azaz a legegyszerűbb sejtekkel kezdődött, majd véletlenszerűen fejlődött,

elkerülhetetlenül növekedni fog az átlagos komplexitás, az aszimmetrikus valószínűség-eloszlásnak megfelelően [10.1. (a) ábra]. Gould azonban felhívja a figyelmünket, hogy ne értelmezzük ezt az egyszerű szóródást szisztematikus irányultságnak. Értékelése szerint nincs másról szó, csak a rendelkezésre álló lehetőségek véletlenszerű feltárásáról.

Úgy vélem, Gouldnak tökéletesen igaza van. Ha a komplexitás növekedése az idővel pusztán az egyszerűségtől távolodó véletlenszerű bolyongás eredménye, akkor nem tekinthető törvényszerű irányultságnak. Ahhoz, hogy valódi trendnek minősíthessük, az adatoknak a 10.1 (b) ábrához kellene hasonlítaniuk. Hogy az evolúcióban a részeg tántorgás mellett fennáll-e valódi irányultság, azt a tudományos vizsgálódásnak kell eldöntenie. Nos, mik a tények: (a) vagy (b)?

Sajnos, nem könnyű elemezni a helyzetet. A nagyobb, komplexebb szervezeteket könnyebb észrevenni, így jelentékenyebb státust adunk nekik, mint a mikrobáknak. De mint Gould hangsúlyozta, a Földön a mikrobaélet van túlsúlyban. Az úgynevezett „fejlettebb” élet csak egy végződés, egy farkinca az eloszlásban, és ügyelnünk kell rá, hogy ne a fark csóválja a kutyát. Másfelől, a mikrobiológusok szerint még a mikrobák is figyelemre méltóan magasan fejlettek. Kétségtelen, hogy manapság a „legprimitívebb” mikrobák is sokkal fejlettebbek, mint az első élő sejt. Így, bár a legtöbb földi életforma „elakadt” a mikrobák szintjén, még ezen az osztályon belül is úgy tűnik, hogy általános irányultság mutatkozik a komplexitás felé. Ami a többsejtű életet illeti, a legközvetlenebb mód az

ellenőrzésre – a kövületek vizsgálata – sajnálatos módon igencsak kétértelmű. Maga a leletsor nem folyamatos. Mutatkozik például irányvonal a nagyobb komplexitás felé úgy, hogy a főemlősök agyának mérete idővel megnőtt. Ezzel szembeállítva Gould azt idézi, hogy a Santa Fe Institute for the Study of Complexity munkatársának, Dan McShea-nek a gerincesek gerincoszlopában nem sikerült a komplexitás felé irányuló trendet találnia.^[179] Egészében elmondható, hogy a komplexitás szisztematikus fejlődésének a bizonyítéka a legjobb esetben is hiányos.

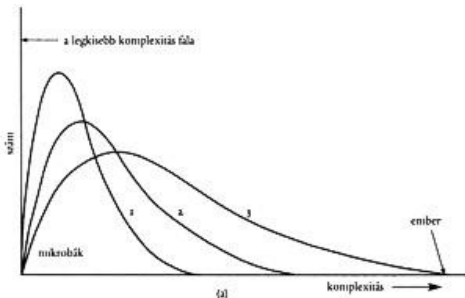
A részeg tántorgás analógiája természetesen csak annyiban helytálló, amennyiben az evolúció véletlenszerűségére számíthatunk. Richard Dawkins hangsúlyozta,^[180] hogy bár az egyedi mutációk általában véletlenszerűek, a természetes kiválasztódás a legkevésbé sem az. A kiválasztódás kiszűri ezen szervezetek közül azokat, amelyek kevésbé előnyösen alkalmazkodtak a körülményekhez, a jobban alkalmazkodókat pedig jutalmazza, ami elkerülhetetlenül a jobb *alkalmazkodás* irányába mutató trendet eredményez. A jobb alkalmazkodás azonban nem feltétlenül jelent növekvő komplexitást is. A „legjobban alkalmazkodott szervezet” meghatározása különben is a változó környezeti feltételektől függően változó. Nincs előre meghatározott „legmegfelelőbb”, nincs optimális alkalmazkodás és nincs rögzített „cél”, amely felé a természetes szelekció hajtja az evolúciót. Az alkalmazkodásban jelentkező minden irányultság nagy valószínűséggel az átmeneti igazítások folyamatát rejti, és nem alkotja az egész átfogó trend

részét.

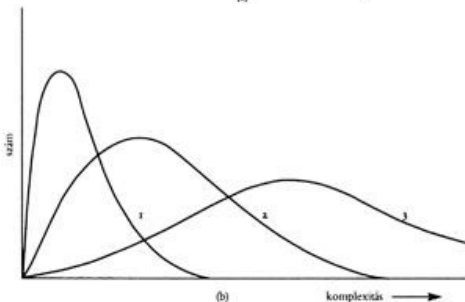
A biológusok többsége azt a nézetet vallja, hogy a komplexitás bármilyen növekedése kielégítően magyarázható a „részeg tántorgás hatással”. Azonban rejtett ideológiai szándékok gyanúja merült fel. Gould nem csinál titkot a tényből, hogy szerinte a komplexitás csak a haladást helyettesíti, amit ideológiai alapon „kártékony” fogalomnak tekint. Mint írja^[181]: „Úgy vélem, hogy az élet történetének legtudósabb kutatói mindig is érzékelték a kövületek abbéli kudarcát, hogy támogassák a nyugati jólét leginkább vágyott alkotóelemét: a haladás világos jelét, mint az élet egészére vonatkozó, az idők során folyamatosan növekvő komplexitással mérhető mennyiséget.”

Gouldnak azonban semmi köze ehhez a barátságos szemlélethez, és ironikus nagyszerűséget lát az élet teljes céltalanságában^[182]: „Egy megjósolhatatlan folyamat dicsőséges véletlenjei vagyunk, minden elszántság nélkül a komplexitásra; nem az evolúciós elvek elvárható eredményei, melyek olyannyira áhítoznak létrehozni egy saját szükségszerű felépítésének módozatát megérteni képes teremtményt.”

Gould szerint a fejlődő komplexitásba vetett hit a pre-darwinista szentimentalizmus maradványa, amely oly szívesen eljátszadózott a természetfölötti tervezés gondolatával. Másfél évszázaddal Isten vezérlő kezének a bioszférából történő kiűzése után a biológusok érthetően vonakodnak ismét visszaereszteni, ezúttal a természeti törvény álruhájában.



(a)



(b)

10.1. ábra

A fejlődés létrája? Az idő előrehaladtával növekszik a biológiai komplexitás, de ez szisztematikus irányzat, vagy csak véletlenszerű diffúzió, „az egyszerűség téglafalától” való távolodás? A Gould által támogatott diffúziós modellt mutatja be az (a) ábra. Az 1, 2 és 3 görbék egymás követő korszakokat jelenítenek meg. Az életformák közül továbbra is az egyszerű mikrobák maradnak túlsúlyban,

de az eloszlás vége jobbra tart. Ha határozott irányultság mutatkozna a komplexitás felé, a görbék inkább a (b) ábrán láthatókhoz hasonlítanának.

E tekintetben is egyetértek Goulddal. A növekvő komplexitás irányzata bizonyítékot kínál a a mindenséget átható célra. Természetesen ha volna ilyen irányzat, az sem zárná ki a véletlen jelentős szerepét. Akkor az a kérdés merülne fel, hogy pontosan mely biológiai sajátosságok a véletlen eredményei, és melyeket tekinthetünk az irányzat részének. Nem könnyű elképzelni, hogy apróbb részletek, például az ujjak száma vagy a szemöldök léte valamilyen alapvető törvény megnyilvánulása lenne. Másfelől, a soksejtű szervezetek lényegi felépítése könnyen lehet a szerveződés bizonyos matematikai elveinek az eredménye. Véleményem szerint ki fog derülni, hogy erről van szó. De ebben a kérdésben hadd mondja ki az utolsó szót de Duve, aki olybá nyilatkozik, hogy ha megfosztjuk az élet fáját terebélyes és szövevényes koronájától, akkor: „Szembeszökő a törzs szerkezete, a nagyobb komplexitás felé irányuló meredek emelkedéssel.”^[183]

Predestinált-e az értelem?

Az univerzum feltalálta önmaga megismerésének módját.

ALAN DRESSLER^[184]

A földi biológia folyamatai során létrejött valamennyi

komplex szerkezet közül egyik sem olyan jelentős, mint a legkomplexebb szerv, az agy. Az agy az evolúció véletlen eredménye vagy a törvényszerű komplexizáló folyamat elkerülhetetlen mellékterméke? Általános feltételezés szerint, amennyiben az élet létrejön más bolygókon, evolúciója a földihez hasonló lesz. A Földön kívüli intelligencia keresésének (SETI) támogatói azt mondják, hogy a Földön kívüli élet évmilliárdok alatt olyan komplexsé válik, hogy növényeket és állatokat hoz létre, végül pedig felfedezi a megismerést és az intelligenciát, pontosan úgy, ahogy itt történt. Úgy tartják, az intelligens élet legalább a lakott bolygók egy töredékén eljut a technikai civilizáció létrehozásáig, és ezen technikai társadalmak némelyike akár most is megpróbál rádiójelek útján kapcsolatba lépni velünk. Azaz a SETI kutatói általában aláírják a fejlődési létra fogalmát, elfogadják, hogy nemcsak az élet, hanem az intelligencia is bizonyos értelemben arra rendeltetett, hogy megjelenjen az univerzumban.

Bármennyire elterjedt is ez az álláspont, megint csak rendkívüli horderejű feltételezést rejt magában a mindenség természetéről. Nevezetesen nemcsak annak az elfogadását jelenti, hogy a természet törvényei a komplexitás, illetve az élet kedvéért lettek kitalálva, hanem az értelem kedvéért is. Hatásvadászóbb módon megfogalmazva azt előfeltételezi, hogy az értelem alapvetően a természet törvényeibe van vésve. Ebben az esetben bizonyosan roppant jelentőségű, hogy a természet komplexizáló irányultságának termékei – intelligens lények,

mint a *Homo sapiens* – képesek éppen azokat a törvényeket megérteni, melyek létrehozták a „megértést”. Kétségkívül lelkesítő nézet. De hihető is? Elhíhetjük, hogy az univerzum nemcsak az életnek, hanem az értelemnek is kedvez? 1964-ben George Simpson biológus szkeptikus értekezést írt *On the nonprevalence of humanoids* (A humanoidok ritka előfordulásáról) címmel,^[185] melyben a Földön kívüli fejlett élet keresésének hiábavalóságát hangsúlyozza, és a történelem legkedvezőtlenebb esélyű szerencsejátékának nevezte. Miután kimutatta, hogy az ember számtalan rendkívüli történelmi véletlen eredményeként alakult ki, levonta a következtetést: „A feltételezés, amire oly könnyedén ragadtatják magukat csillagászok, fizikusok és egyes biokémikusok, hogy ha valahol megszületik az élet, akkor végső soron és elkerülhetetlenül megjelennek a humanoidok is, egyszerűen téves.” A SETI-t támogató Carl Sagan-nal folytatott újabb keletű vitában Ernst Mayr biológus Simpson szkepticizmusát visszhangozta^[186]: „A Földön a leszármazási ágak és szervezetek milliói és vagy ötvenmilliárd fajképződési esemény közül mindössze egyetlenegy vezetett magas intelligenciához; ez pedig elhitheti velem a teljes valószínűtlenségét.”

Stephen Jay Gould hasonlóképp elítéli azt az elképzelést, hogy az életet értelem létrehozására szánták. Képzeljünk el, mondja, valamilyen katasztrófát, ami a mikrobák kivételével eltörli az összes fejlett életformát a Földön. Újrakezdődik az evolúciós színjáték; és tegyük fel a kérdést, mi fog történni. A fejlődés nagyjából hasonló

menetére számíthatunk-e, halakkal, gerincesekkel, hüllőkkel, emlősökkel és intelligens kétlábúakkal? Szó sincs róla, vonja le a következtetést. Az élet története a Földön afféle gigantikus szerencsejáték, amelynek összehasonlíthatatlanul több a vesztese, mint a nyertese. Oly sok végzetes véletlent tartalmaz, oly sok önkényes fordulatot, hogy a változás mintája alapvetően véletlenszerű. Bizonyosan nem kerül sor a mi leszármazási águnkat felépítő szerencsés lépések millióira, még hozzávetőlegesen sem. A történelem „másik úton zúdulna végig”, és ezen az úton „az újrajátszások döntő többsége soha nem hozna létre... öntudattal rendelkező teremtményt”, írja. „Annak esélye, hogy ez az alternatív [azaz újrajátszott] halmaz olyasmit is fog tartalmazni, ami akár távolról is emlékeztet emberi lényre, gyakorlatilag nulla.”^[187]

Nehéz hibát találni Simpson és Gould érvelésének logikájában. Ha az evolúció kizárólag csak szerencsejáték, részeg tántorgás, akkor nemigen találni okot, miért lépne túl az élet a mikrobák szintjén, és semmiféle olyan várakozás nem indokolt, hogy feltétlenül az intelligencia és a tudat felé fog tartani, még kevésbé, hogy fejlett humanoid sajátosságokkal fog rendelkezni. Ez esetben arra kényszerülünk, hogy osszuk Monod szomorú következtetését^[188]: „Az ember végre tudja, hogy egyedül van a világegyetem érzéketlen végtelenségében, melyből csupán a véletlen emelte ki.” Csak ha más is szerepet játszik a véletlen kívül, ha a természet eredendően beépített részrehajlást mutat az élet és az értelem iránt, csak akkor számíthatunk rá, hogy más bolygókon is a

Földön bekövetkezettéhez hasonló fejlődési irányt találunk. Az élet keresése az univerzum más tájain ilyenformán két egymással homlokegyenest szemben álló világnézet küzdőtere. Az egyik az ortodox tudományé, mely a céltalan mindenség nihilisztikus filozófiáját vonultatja fel, egy kozmoszt, ahol az élet és az értelem, a tudomány és a művészet, a remény és a félelem csupán a visszafordíthatatlan kozmikus felbomlás kárpitjára hímzett szerencsés véletlenek. Másfelől létezik egy alternatív szemlélet, kétségkívül romantikus, de talán igaz. Ez az önszervező és önkomplexizáló mindenség látomása, amelynek szellemes törvényei úgy kormányozzák az anyagot, hogy az az élet és a tudatosság felé fejlődjön. Egy olyan univerzumé, ahol a gondolkodó lények megjelenése a dolgok átfogó rendjének alapvető és elválaszthatatlan része. Egy univerzumé, ahol nem vagyunk egyedül.

A SZERZŐ JEGYZETEI

ELŐSZÓ

¹ Fred Hoyle: *The Black Cloud* (Penguin, Harmondsworth) 1960, magyarul: *A fekete felhő* (Gondolat, Budapest, 1969).

² Eugene Wigner: The probability of the existence of a self-reproducing unit. *The Logic of Personal Knowledge*, ismeretlen szerk. (Routledge & Kegan Paul, London, 1961) 231. o.

³ Erwin Schrödinger: *What is Life?* (Cambridge University Press, Cambridge, 1944).

⁴ Carter munkáját mindazonáltal széles körben tárgyalja az irodalom; lásd például John Barrow és Frank Tipler: *The Anthropic Cosmological Principle* (Clarendon Press, Oxford, 1986).

⁵ B. Carr és M. J. Rees: The anthropic principle and the structure of the physical world. *Nature* 278, 605 (1979)

⁶ Lásd például Manfred Eigen: *Steps Towards Life* (ford. P. Woolley, Oxford University Press, Oxford, 1992) és Christian de Duve: *Vital Dust* (Basic Books, New York, 1995). A legtöbb biogenezist tárgyaló kommentár hangnemét jól jellemzi a következő idézet: „Nincs okunk kételkedni benne, hogy apránként fel fogjuk fedezni a fizikai és kémiai evolúció valamennyi lépését. A közbeeső lépéseket akár még reprodukálhatjuk is laboratóriumban... Méltán lehetünk optimisták.” Cyril Ponnampereuma: *The origin, evolution, and distribution of life in the universe. Cosmic Beginnings and Human Ends*, szerk. Clifford Matthews és Roy Abraham Varghese (Open Court, Chicago, 1993).

⁷ Az „istent a hiányokba!” kifejezést teológusok használták, utalva a természet tudományos magyarázatában mutatkozó hiányosságok kitöltésére tett, valamiféle isteni aktus részvételét feltételező kísérletekre.

⁸ Paul Davies: *The Mind of God* (Simon & Schuster, London és New York, 1992); magyarul: *Isten gondolatai*, 3. kiad. (Vince Kiadó, Budapest, 2000).

[9](#) Paul Davies: *Are We Alone?* (Penguin, London és Basic Books, New York, 1995); magyarul: *Egyedül vagyunk a világegyetemben?* (Kulturtrade Kiadó, Budapest, 1996).

1. FEJEZET. AZ ÉLET MINT OLYAN

[10](#) Jacques Monod: *Chance and Necessity*. (Ford. A. Wainhouse, Collins, London, 1972), 167. o.

[11](#) Francis Crick: *Life Itself: Its Nature and Origin* (Simon & Schuster, New York, 1981), 88. o., magyarul: *Az élet mikéntje* (Gondolat, Budapest, 1987).

[12](#) David Mowaljarlai és Jutta Malnic: *Yorro Yorro* (Magabala Books, Broome, Western Australia, 1993), 23. fejezet.

[13](#) A közös leszármazás elméletét ténylegesen Charles Darwin nagyapja, Erasmus Darwin vetette fel elsőként, művében: *Zoonomia, or the Laws of Organic Life* (London, 1794).

[14](#) New Scientist, 1996. február 10. 26. o.

[15](#) Stephen Jay Gould: *Life's Grandeur* (Jonathan Cape, London, 1996), 14. fejezet. A 10. fejezetben visszatérek erre a témára.

2. FEJEZET. SZEMBEN AZ ÁRRAL

[16](#) H. W Longfellow: *A Psalm of Life*.

[17](#) A. S. Eddington: *The Nature of the Physical World* (Cambridge University Press, Cambridge, 1928), 74. o.

[18](#) A. I. Zotin: The second law, negentropy,

thermodynamics of linear processes. *Thermodynamics of Biological Processes*. Szerk.: I. Lamprecht és A. I. Zotin (de Gruyter, New York, 1978), 19. o.

[19](#) A. S. Eddington: The end of the world: From the standpoint of mathematical physics. *Nature* 127, 447 (1931).

[20](#) Erwin Schrödinger: *What is Life?* (Cambridge University Press, Cambridge, 1944), 81. o.

[21](#) Két szervezet entrópiájának az összevetése meglehetősen bizonytalan. Pontosabb értékelést nyerhetünk a genomjuk relatív komplexitása alapján, az algoritmusos entrópiának nevezett mennyiséggel kifejezve (lásd 4. fejezet). Ebben az esetben a „magasabb rendű” szervezetnek magasabb (nem pedig alacsonyabb) az algoritmusos entrópiája, így ebben a tekintetben nem ütköznek a második főtétellel.

[22](#) Az eredeti német szöveg megjelenési helye: *Populare Schriften*, Leipzig, 26 (1905); az angol fordítást idézi Klaus Mainzer: *Thinking in Complexity* (Springer-Verlag, Berlin, 1994), 82. o.

[23](#) C. E. Shannon és W Weaver: *The Mathematical Theory of Communication* (University of Illinois Press, Urbana, 1949).

[24](#) Az olvasó elbizonytalanodhat, miért azonos egy választás az információ bevezetésével, de a legtágabb értelemben az információ a lehetőségek kizárása. Ha egy fizikai rendszernek csak egy lehetséges állapota van, akkor semmi újat nem tanulunk a vizsgálatából. Minél több

a lehetőség, annál többet tudhatunk meg az adott állapot felfedezéséből. A természetes kiválasztódás kiküszöböli az alkalmatlan szervezeteket, és így csak bizonyos genomokat választ ki a sokkal nagyobb számú lehetséges halmazból. Az összes többi lehetőség kizárása jelenti az információ hozzáadását a genomhoz.

3. FEJEZET. KIAZ INGOVÁNYBÓL

[25](#) *Evolution from Molecules to Men*. Szerk.: D. S. Bendall (Cambridge University Press, Cambridge, 1983), 127. o.

[26](#) A gravitáció „rossz irányú” tulajdonsága szorosan kapcsolódik ahhoz a tényhez, hogy a gravitációs energia negatív.

[27](#) Roger Penrose: *The Emperor's New Mind* (Oxford University Press, Oxford, 1989, magyarul: *A császár új elméje* (Akadémiai Kiadó, Budapest, 1993) és *Shadows of the Mind* (Oxford University Press, Oxford, 1994).

[28](#) Lee Smolin: *The Life of the Cosmos* (Oxford University Press, Oxford, 1997), 159. o.

[29](#) Azon olvasók számára, akik többet szeretnének tudni a kvantum nemlokalizáltságáról és különös tulajdonságairól, lásd például Paul Davies és Julian Brown: *The Ghost in the Atom* (Cambridge University Press, Cambridge, 1986).

[30](#) Annak részleteiért, hogyan állhatnak elő ilyen paradox helyzetek, lásd Paul Davies: *About Time* (Viking, London, 1995), 11. fejezet.

[31](#) *Evolution from Molecules to Men*. Szerk.: D. S. Bendall (Cambridge University Press, Cambridge, 1983), 128. o.

[32](#) Adrian Desmond és John Moore: *Darwin* (Michael Joseph, London, 1991), 230. o. Figyeljük meg, hogy az élet fája szétterül az idő haladásának irányában, ellentétben a családfákkal, amelyek (legalábbis eleinte) időben visszafelé terülnek szét.

[33](#) Lásd például, *Evolution of Hydrothermal Ecosystems on Earth (and Mars?)*. Szerk.: Gregory Bock és Jamie Goode (Wiley & Sons Ltd, New York, 1996), 1-2. fejezet.

[34](#) A modern sztramatolitok más mikroorganizmusok, köztük algák tevékenységét is magukban foglalják. Nehéz pontosan megmondani, mi csinálta a kövületeket.

[35](#) Újabb keletű áttekintésért lásd: The oldest known records of life: early archaean stromatolites, microfossils, and organic matter. *Early Life on Earth*. Szerk.: S. Bengtson (Columbia, New York, 1994), 193. o.

[36](#) S. J. Mojzsis és mások: Evidence for life on Earth before 3,800 million years ago. *Nature* 384, 55 (1996).

[37](#) Gerald Feinberg és Robert Shapiro: *Life Beyond Earth* (William Morrow, New York, 1980), 113. o.

[38](#) Charles Thaxton, Walter Bradley és Roger Olsen: *The Mystery of Life's Origin* (Philosophical Library of New York, New York, 1984), 12. o.

[39](#) *Evolution from Molecules to Men*. Szerk.: D. S. Bendall (Cambridge University Press, Cambridge, 1983),

128. o.

[40](#) Idézi Andrew Scott: *The Creation of Life* (Blackwell, Oxford, 1986), 49. o.

[41](#) Idézi Svante Arrhenius: *Worlds in the Making* (Harper, London, 1908), 216. o.

[42](#) Ha a reakciók nem híg levesben, hanem valamilyen felületen – például agyagon vagy kövön – mennek végbe, akkor a termodinamikai megfontolások valamelyest a szintézis javára módosulnak.

[43](#) Ez sokkal több, mint az atomok száma a megfigyelhető világegyetemben.

[44](#) Maga Fox azt állítja, hogy a megfelelő nem a véletlen révén jött létre, hanem a vegyi folyamatok kedveznek a biológiailag jelentős peptidláncok parányi töredékeinek. Lásd például: *Molecular Evolution and the Origin of Life*. Szerk.: S. Fox és K. Dose (Marcel Dekker, New York, 1977). Az a kijelentés, hogy a vegyi folyamatoknak valahogy „tudomásuk van” a biológiáról, merész és provokatív; a 10. fejezetben visszatérek rá.

[45](#) Fred Hoyle: *The Intelligent Universe* (Michael Joseph, London, 1983) 19. o.

[46](#) *Omnia*, British Airways Flight Magazine, 1997. szeptember-október, 26. o.

[47](#) A különösen szerencsés körülményekhez folyamodó magyarázat, noha nem képtelenség, eredendően valószínűtlen. Az ilyen körülmények ellen szóló esélyeket tekinthetjük a véletlenelmélet iránt táplált hitetlenségünk vagy bizalomhiányunk mennyiségi mértékének.

4. FEJEZET. ÜZENET A GÉPBN

[48](#) Közismert, hogy a fizikai rendszerek megismerésének alapvető korlátai vannak. Heisenberg kvantummechanikai bizonytalansági elve például tiltja, hogy egyidejűleg ismerjük egy atom helyzetét és mozgását. Atomi szinten tehát egyfajta kifürkészhetetlenség jellemzi a természetet. Ilyen jellegű az élet titka is? Niels Bohr fizikus, a kvantummechanika egyik megalapítója, így vélekedett. Arra a következtetésre jutott, hogy az élet ugyanúgy elrejtí előlünk a titkait, ahogy az atom. „Ebből a szempontból az élet létét olyan elemi ténynek kell tekinteni, amit nem lehet megmagyarázni”, írta. Lásd Niels Bohr: *Light and life. Nature* 131, 421 és 457 (1933).

[49](#) Esetenként egy huszonegyedik aminosavat használnak.

[50](#) John Maynard-Smith és Eörs Szathmáry: *The Major Transitions in Evolution* (Freeman, Oxford és New York, 1995) 81. o., magyarul: *Az evolúció nagy lépései*, Scientia Kiadó, Budapest, 1997.

[51](#) Carl Woese: Evolution of the genetic code. *Naturwissenschaften* 60, 447 (1973).

[52](#) J. D. Bashford, P. D. Jarvis és I. Tsohantjis: Supersymmetry in the genetic code. *Physical Applications and Mathematical Aspects of Geometry*. Szerk.: H. D. Doebner, P. Nattermann, W Scherer és C. Schulte (World Scientific Press, Singapore 1998), sajtó alatt.

[53](#) Érdekes módon vannak látszólag véletlenszerű

sorozatokat a DNS-ben, melyek mintha semmilyen célt nem szolgálnának, amiért is DNS-hulladéknak nevezik.

[54](#) Lásd például Gregory Chaitin: *Information, Randomness & Incompleteness – Papers on Algorithmic Information Theory* (második kiadás, World Scientific Press, Singapore, 1990).

[55](#) Az olvasónak ismerősek lehetnek az úgynevezett kaotikus rendszerek. Ezek olyan példák, ahol a rendszer viselkedése alapvetően véletlenszerű és algoritmusosan nem tömöríthető.

[56](#) Egyes vírusok DNS helyett RNS-t használnak (lásd 5. fejezet). Ennek a példának a forrása Bernd-Olaf Küppers: *Information and the Origin of Life* (MIT Press, Cambridge, Mass., 1990), 101. o.

[57](#) A legtöbb genom természetesen nem teljesen véletlenszerű sorozat, legalábbis nem a genetikai kód központi szabályai miatt. Ráadásul egész DNS-darabok duplikálódhatnak vagy felcserélődhetnek, különösen az eukarióták esetében. Ám kihámozhatjuk ezeket az egyszerű, nagy léptékű szabályosságokat, és még mindig az a kérdés, véletlenszerű-e a maradék. Az egyes fehérjespecifikáló sorozatokban nem fedezhető fel rendszeralkotó mintázat.

[58](#) Schrödinger egyértelműen állt ehhez, amikor felvetette, hogy a genomnak „aperiodikus kristályból” kell állnia. Párhuzamot vont a szokványos kristály és egy tapétaminta között, megjegyezvén, hogy a genom jobban hasonlít a tapétára. Lásd Erwin Schrödinger: *What is Life?* (Cambridge University Press, Cambridge, 1944), 64. o.

Nagyon világos kifejtése található a különbségnek a rend és a szervezettség között, beleértve annak a részletes kifejtését, hogy miért véletlenszerű és specifikus a genom a következő műben: Hubert Yockey: *Information Theory and Molecular Biology* (Cambridge University Press, Cambridge, 1992). A 10. fejezetben visszatérek erre a témára.

[59](#) Pozitív válaszokat ad egészen az egysejtű szervezetek szintjéig Stuart Hameroff Quantum coherence in microtubules: a neural basis for emergent consciousness? *Journal of Consciousness Studies* 1, 91 (1994).

5. FEJEZET. A TYÚK ÉS A TOJÁS PARADOXONJA

[60](#) Lásd például Michael Behe: *Darwin's Black Box* (The Free Press, New York, 1996).

[61](#) Népszerű magyarázatát lásd Thomas Cech: RNA as an enzyme. *Scientific American* 255, 5. sz., 64 (1986).

[62](#) A biológusok a „genotípus” szót a genomban generációk között továbbadott információra utalva használják, a „fenotípust” a genotípus adott megjelenésére az élő szervezet formájában. Az RNS-világban a genotípus és a fenotípus egy és ugyanaz.

[63](#) Áttekintését lásd Sol Spiegelman: An in vitro analysis of a replicating molecule. *American Scientist* 55, 221 (1967).

[64](#) M. Eigen és P. Schuster: *The Hypercycle: The Principle of Natural Self-Organization* (Springer-Verlag,

Berlin, 1979), II. rész, 14. fejezet.

[65](#) M. Eigen és P. Schuster: *The Hypercycle: The Principle of Natural Self-Organization* (Springer-Verlag, Berlin, 1979).

[66](#) Természetesen meg kell magyaráznunk, miért nincs tele a világ ezekkel az oly egyszerűen elkészülő minireplikátorokkal. Az egyik magyarázat az lehet, hogy igenis léteznek, ám egy nagyon különböző világban, mint amilyenben az élet manapság virulni szokott, például egy üstökös belsejében vagy a Szaturnusz egyik holdja, a Titán atmoszférájában (lásd 9. fejezet). Egy másik magyarázat szerint a szerves élet a kialakulásakor elpusztította őket.

[67](#) Julius Rebek: Synthetic self-replicating molecules. *Scientific American* 271, 1. sz., 34 (1994).

[68](#) Összefoglalást lásd Philip Cohen: Can protein spring into life? *New Scientist*, 1997. április 26., 18. o. Maga a munka a *Nature*-ben jelent meg, 382, 525 (1996).

[69](#) Freeman Dyson: *Origins of Life* (Cambridge University Press, Cambridge, 1985).

[70](#) E. G. Nisbet: *The Young Earth* (Allen & Unwin, London, 1987), 8. fejezet.

[71](#) Michael Russell, Roy Daniel, Allan Hall és John Sherrington: A hydrothermally precipitated catalytic iron sulphide membrane as a first step toward life. *Journal of Molecular Evolution* 39, 231 (1994). Népszerű beszámolóért lásd Michael Russell: Life from the depths. *Science Spectra*, 1, 26 (1996).

[72](#) Népszerű összefoglalást ad A. G. Cairns-Smith:

Seven Clues to the Origin of Life (Cambridge University Press, Cambridge, 1985).

[73](#) Ilya Prigogine és Isabelle Stengers: *Order out of Chaos* (Heinemann, London, 1984), 5. fejezet.

[74](#) Népszerű összefoglalását lásd Stuart Kauffman: *At Home in the Universe* (Oxford University Press, Oxford, 1995).

[75](#) John Maynard Smith: Life at the edge of chaos? *New York Review*, 1995. március 2., 28. o.

[76](#) Lásd például [73.](#) jegyzet.

6. FEJEZET. A KOZMIKUS KAPCSOLAT

[77](#) Titus Lucretius Carus: *A természetről* II. 1070-1077. (Ford.: Teravagimov Péter.)

[78](#) Ennek az eredménynek egyszerű az okfejtése. A Föld szénjének össztömege osztva a testünkben található szénnel, bár nagy szám, mindazonáltal sokkal kisebb, mint a szénatomok száma a testünkben.

[79](#) A. D. Taylor, W. J. Baggaley és D. I. Steel: Discovery of interstellar dust entering the Earth's atmosphere. *Nature*, 380, 323 (1996).

[80](#) Idézi *Astronomical and Biochemical Origins and the Search for Life in the Universe*. Szerk.: C. B. Cosmovicci, S. Bowyer és D. Werthimer, (Editrice Compositori, Bologna 1997), 106. o. Az üstökösök szerepének átfogó áttekintését lásd *Comets and the Origin and Evolution of Life*. Szerk.: Paul Thomas, Christopher Chyba és Christopher McKay (Springer-Verlag, New York, 1997).

[81](#) James Hutton: *Theory of the Earth* (Royal Society of Edinburgh, Edinburgh, 1788), 304. o.

[82](#) Norman Sleep, Kevin Zahnle, James Kasting és Harold Morowitz: Annihilation of ecosystems by large asteroid impacts on the early Earth. *Nature* 342, 139 (1989).

[83](#) Kevin Maher és David Stephenson: Impact frustration of the origin of life. *Nature* 331, 612 (1988).

7. FEJEZET. CSUDABOGARAK

[84](#) C. D. Parker: The corrosion of concrete. *Australian Journal of Experimental Biology and Medical Science* 23, 81 és 91 (1945). Általános áttekintését lásd Michael Madigan és Barry Mairs: Extremophiles. *Scientific American* 276, 4. sz., 66 (1997) és John Postgate: *The Outer Reaches of Life* (Cambridge University Press, Cambridge, 1996).

[85](#) Erasmus Darwin: *The Temple of Nature* (J. Johnson, London, 1793).

[86](#) Lásd *Evolution of Hydrothermal Ecosystems on Earth (and Mars?)*. Szerk.: Gregory Bock és Jamie Goode (Wiley & Sons Ltd, New York, 1996), 37. o.

[87](#) Valójában nem lehet teljesen sötét; kísérteties derengés járhatja át a kürtők környékét, melyet valamilyen, ez idáig még nem kielégítően ismert folyamat okoz. Egyes tudósok felvetették, hogy a fotoszintézis a napfény helyett e halvány tenger alatti fény révén fejlődhetett ki. Lásd Ruth Flanagan: The light at the bottom of the sea. *New Scientist*,

1997. december 13., 42. o.

[88](#) A fekete füstögők közelében élő szervezetek többsége közvetetten függ a napfénytől, akár az oldott oxigén felhasználásával (ami a fotoszintézis mellékterméke), vagy úgy, hogy a felszínről lesüllyedő szerves darabkával táplálkozik. Harminc évvel ezelőtt George Wald biológus így írt: „Érdekes intellektuális gyakorlat elképzelni, milyen módon jöhetne létre és tarthatná fenn magát élet egy sötét bolygón; de erősen kétlem, hogy valaha is megtörtént volna vagy megtörténne a jövőben.” Lásd *Life and Light. Scientific American*, 201, 4. sz., 92 (1959). Wald azonban tévedett. Ismerünk kemotrófokat, amelyek teljes mértékben függetlenek a felszíni élettől.

[89](#) T Gold: The deep hot biosphere. *Proceedings of the National Academy of Science USA* 89, 6045 (1992).

[90](#) 1955-ben tengerbiológusok baktériumokat fedeztek fel a Csendes-óceán fenekéről származó üledékes kőzetekben. Az elemzésükre alapozva magabiztosan kijelentették, hogy a bioszféra pontosan 7,47 méterig tart lefelé! Lásd R. Y Morita és C. E. Zobell: Occurrence of bacteria in pelagic sediments collected during the Mid-Pacific Expedition. *Deep-Sea Research* 3, 66-73 (1955).

[91](#) Lloyd Hamilton: *Aspects of metallogenesis and microorganisms in the Red Sea region of Saudi Arabia*. PhD disszertáció, University of London (1973).

[92](#) Lásd 89. jegyzet.

[93](#) J. P. McKinley és mások: D. O. E. seeks origin of

deep subsurface bacteria. *EOS, Trans. Am. Geophys. Union* 75, 385 (1994).

94 Mikrobák kiaknázását az olajkinyerés segítésére először egy tudóscsoport javasolta Ausztráliában 1983-ban, ám felvetésük süket fülekre talált. A megjelent összegzés a következő tanulmányban található: B. Bubela, P. L. Stark és M. Kords: Microbiologically enhanced oil recovery. *Baas Becking Geobiological Laboratory Annual Report* (Canberra 1983), 53. o. Újabban számos kereskedelmi szervezet mutat élénk érdeklődést a kiaknázatlan föld alatti bioforrások iránt. Az olaj- és gázszektorban történő fejlesztések mellett hamarosan kibontakozik a „bio-helyreállítás” jelentős új iparága, mely szennyezett föld és víz megtisztításával foglalkozik mikrobák alkalmazásával. A mély vagy megközelíthetetlen helyszíneken mérgező anyagokkal táplálkozó „csudabogarak” munkába állításával környezet-rehabilitációra költött dollárbilliókat lehetne megtakarítani. Ugyancsak hatalmas lehetőségek rejlenek az egyes enzimek és más molekuláris reagensek azonosításában és kiaknázásában, melyek meghökkentő képességekkel ruházzák fel ezeket a szervezeteket. A US National Cancer Institute (US Nemzeti Rákintézet) már több mint 5000 felszín alatti szervezet tenyésztését szűrte ki rákellenes hatóanyagok és AIDS-vakcinák kutatása közben.

95 Tim Appenzeller: Deep-living microbes mount a relentless attack on rock. *Science* 258, 222 (1992).

96 R. J. Parkes és mások: Deep bacterial biosphere in Pacific Ocean sediments. *Nature* 371, 410 (1994).

[97](#) Everett Shock: High temperature life without photosynthesis as a model for Mars. *Journal of Geophysical Research – Planets*, 102, 23687 (1997).

[98](#) Lásd 97. jegyzet.

[99](#) Pontosabban szólva a bizonyítékok arra utalnak, hogy a termofilek lassabban fejlődnek az alacsony hőmérsékleten élő mikrobáknál. Mivel a legtöbb archebaktérium termofil vagy hipertermofil, ez azt jelenti, hogy mint osztály az archebaktériumok kevésbé fejlettek, mint a baktériumok. Akad azonban néhány hipertermofil baktérium, például az aquifex, amelyek ugyancsak nagyon lassan fejlődtek, míg némelyik mezofil archebaktérium alapvető evolúciós változáson esett át. Hálás vagyok Susan Barnsnek, hogy felhívta rá a figyelmemet.

[100](#) Lásd *Evolution of Hydrothermal Ecosystems on Earth (and Mars?)*. Szerk.: Gregory Bock és Jamie Goode (Wiley & Sons Ltd, New York, 1996), 1-2. fejezet.

[101](#) J. B. Corliss és mások: Submarine thermal springs on the Galapagos rift. *Science* 203, 1073 (1979).

[102](#) Lásd Gold, 6. jegyzet. Lásd még Karsten Pedersen: The deep subterranean biosphere. *Earth Science Reviews* 34, 243 (1993).

[103](#) G. Wächterhäuser: Evolution of the first metabolic cycles. *Proceedings of the National Academy of Science USA* 87, 200 (1990).

[104](#) Todd Stevens és James McKinley: Lithoautotrophic microbial ecosystems in deep basalt Aquifers. *Science* 270, 450 (1995). Népszerűbb összefoglalást lásd James

Fredrickson and Tullis Onstott: Microbes deep inside the Earth. *Scientific American* 275, 4. sz., 42 (1996), Stephanie Pain: The intraterrestrials. *New Scientist*, 1998. március 7., 28. o. és Larry O'Hanlon: How life would be at home on Mars. *NewScientist*, 1995. október 28., 19. o.

[105](#) Ez az elmélet ugyancsak magyarázatot nyújthat azoknak a szélsőséges halofil archebaktériumoknak a létére, amelyek nagyon sós környezetben élnek. Ahogy mérséklődött a bombázás, a Föld még továbbra is elég nagy becsapódásokat szenvedett el ahhoz, hogy felforrjon az óceánok egy része. Így koncentrált sós rétegek jöttek létre, amelyek minden nem só- és hőtűrő szervezet számára halálosak voltak. Ebben az esetben azonban kevésbé meggyőző a bizonyíték, mivel a legtöbb ma élő halofil nem minden kétséget kizáróan ősi eredetű.

8. FEJEZET. MARS: VÖRÖS ÉS HALOTT?

[106](#) Percival Lowell: *Mars and its Canals* (Macmillan, New York, 1906), 376. o.

[107](#) Kiömlés nyoma észlelhető még mindig aktív vulkáni kürtőkből a Valles Marineris szurdokaiban. A Pathfinder adatai ugyancsak egészen új keletű vulkáni tevékenységre utalnak.

[108](#) Lásd például Penelope Boston, Mikhail Ivanov és Christopher McKay: On the possibility of chemosynthetic ecosystems in subsurface habitats on Mars. *Icarus* 95, 300 (1992). Népszerű összegzés ugyanazoktól a szerzőktől, lásd Considering the improbable: life underground on Mars. *The Planetary Report* 14, 13 (1994).

[109](#) Christopher McKay: The search for life on Mars. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere* 27, 263 (1997). Népszerű összefoglalását lásd *Astronomy*, 1997. augusztus, 38. o.

[110](#) D. D. Bogard, L. E. Nyquist és P. Johnson: Noble gas contents of shergottites and implications for the martian origin of SNC meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta* 48, 1723 (1984). Népszerű összefoglalását lásd Andrew Chaikin: A stone's throw from the planets. *Sky and Telescope*, 1983. február, 122. o.

[111](#) Statement from Daniel S. Golding, NASA administrator. NASA News, Johnson Space Center, Press Release, 1996. augusztus 6., 96-159 o.

[112](#) David Mittlefehldt: The source of ALH84001. *The Planetary Report* 17, 5 (1997).

[113](#) D. S. McKay és mások: Search for past life on Mars: possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH84001. *Science* 273, 924 (1996). A bizonyíték újabb áttekintése: Everett Gibson és mások: The case for relic life on Mars. *Scientific American* 277, 36 (1997).

[114](#) Robert Folk és E Leo Lynch: The possible role of nanobacteria (dwarf bacteria) in clay mineral diagenesis, and the importance of sample preparation in high magnification SEM study. *Journal of Sedimentary Research* 67, 583 (1997).

[115](#) Olavi Kajander és mások: Nanobacteria from blood, the smallest culturable autonomously replicating agent on Earth. SPIE (*The International Society for Optical*

Engineering) 3111, 420 (1997).

[116](#) I. P. Wright, M. M. Grady és C. T. Pillinger: Organic materials in a martian meteorite. *Nature* 340, 220 (1989).

[117](#) Thomas Jukes: Lessons from evolution: ruling out danger. *The Planetary Report* 14, 14 (1994).

[118](#) Idézi John Rummel and Michael Meyer: Where no one has gone before: what is planetary protection anyway? *The Planetary Report* 14, 5 (1994).

[119](#) Kenneth Nealson és mások: *Mars Sample Return: Issues and Recommendations* (National Academy Press, Washington, 1997), 3. o.

[120](#) Magnóra rögzített interjú Tim Radforddal, *Guardian* (UK) 1996.

[121](#) Idézi Ryder Miller: The natural universe. *Mercury* 26, 28 (1997).

[122](#) Lásd 119. jegyzet, Nealson és mások, 15. o.

[123](#) Lásd 121. jegyzet.

[124](#) Jack D. Farmer: *Exploring Mars for evidence of past or present life: roles of robotic and human missions* című tanulmány tartalmi kivonata az „Origins” konferencián, Estes Park, Colorado, 1997. május.

[125](#) Ezt az intuitív elképzelést az úgynevezett Bayes-szabállyal lehet pontosan mérni, amit gyakran alkalmaznak bíróságnak benyújtott bizonyítékokra. Tegyük fel például, hogy a vádlottat már nagy valószínűséggel bűnösnek ítélik és benyújtanak egy további ujjlenyomat-bizonyítékot. Az esküdtszéknek azt mondják, hogy az ujjlenyomat véletlen odakerülésének az esélye tíz az egyhez. Ez elegendő a

vádolt elítéléséhez. Másfelől, ha a vádolt nagy valószínűséggel ártatlannak látszik, akkor kisebb az ujjlenyomat jelentősége. Téves volna arra következtetni, hogy a „tíz az egyhez” egyezés esetében 90 százalék a bűnösség esélye. A teljes valószínűség kiszámítása előtt súlyozni kell az esélyeket a bűnösség megelőző valószínűségével. A marsbéli élet esetében ez az előzetes valószínűség erősen változik a nullához egészen közeli értéktől majdnem egyig, a pánspermiáról tartott feltételezésünktől függően (lásd 9. fejezet).

9. FEJEZET. PÁNSPERMIA

[126](#) Svante Arrhenius: *Worlds in the Making* (Harper, London, 1908).

[127](#) G. Horneck, H. Bucker és G. Reitz: Long-term survival of bacterial spores in space. *Advances in Space Research* 14, 1041 (1994).

[128](#) J. Koike és mások: Survival rates of some terrestrial microorganisms under simulated space conditions. *Advances in Space Research* 12, 4271 (1992).

[129](#) Peter Weber és Mayo Greenberg: Can spores survive in interstellar space? *Nature* 316, 403 (1985). Lásd még az ezt követően megjelent munkát: Curt Mileikowsky: Can spores survive a million years in the radiation of outer space? *Astronomical and Biochemical Origins and the Search for Life in the Universe*. Szerk.: C. B. Cosmovici, S. Bowyer és D. Werthimer (Editrice Compositori, Bologna, Olaszország 1997), 545. o.

[130](#) Fred Hoyle: *The Intelligent Universe* (Michael

Joseph, London, 1983).

131 Paul Wesson, Jeff Secker és James Lepock: Panspermia revisited: astrophysical and biological constraints. *Astronomical and Biochemical Origins and the Search for Life in the Universe*. Szerk.: C. B. Cosmovici, S. Bowyer és D. Werthimer (Editrice Compositori, Bologna, Olaszország, 1997), 539. o.

132 Csak a legutóbbi időkben sikerült csillagászoknak pozitívan azonosítaniuk bolygót a Naprendszeren kívül. A Naprendszeren kívüli bolygók észlelését az nehezíti, hogy akár a legnagyobb felbontóképességű távcsövek számára is túl halványak. Csak közvetetten lehet igazolni a létüket. Ahogy egy bolygó kering a csillaga körül, a gravitációs vonzása egy kicsit „megrángatja” a csillagot. A hatás rendkívül apró, de jellegzetesen megmutatkozhat a csillag fényének spektrumában. Nagyon gondos megfigyelések eredményeként számos, a Földtől néhány fényéven belüli távolságra található nagy bolygót észleltek. A jelenlegi technikák nem elég jók egy Földhöz hasonló tömegű és pályájú bolygó felfedezéséhez, de tekintettel más bolygórendszerek léteire, igencsak valószínűnek látszik, hogy akadnak Föld-szerű bolygók is, bizonyára még a mi galaxisunkban is milliós számra, és mindegyik az élet egy-egy potenciális lakhelye. Lásd Paul Halpern: *The Quest for Alien Planets* (Plenum, London, 1998).

133 George Claus és Bartholomew Nagy: A microbiological examination of some carbonaceous chondrites. *Nature* 192, 594 (1961). Az élet meteoritokban történő keresésének kitűnő összefoglalását, külön

hivatkozással a Murchison-meteoritra, lásd David Seargent: *Genesis Stone* (Karagi Publications, Sydney, 1991).

[134](#) Az élet bizonyítékát a Murchison-meteoritban Hans Pflüg német tudós szolgáltatta, aki optikai mikroszkóp alatt tanulmányozta a kő vékony metszeteit. Pflüg talált néhány nagyon különös struktúrát, amelyek közeli hasonlóságot mutattak a fonalbaktériumokkal. Lásd *Ultrafine structure of the organic matter in meteorites. Fundamental Studies and the Future of Science*. Szerk.: N. C. Wickramasinghe (University College Cardiff Press, Cardiff, 1984), 24. o. Más tudósok nem voltak restek azonnali elutasítani Pflüg kijelentését.

[135](#) H. J. Melosh: The rocky road to panspermia. *Nature* 332, 687 (1988). Népszerű összefoglalását lásd H. J. Melosh: Swapping rocks: exchange of surface material among the planets. *The Planetary Report* 14, 16 (1994).

[136](#) Svante Arrhenius: *Worlds in the Making* (Harper, London, 1908) 219. o.

[137](#) 1964-ben így írt a kitűnő biológus, George Gaylord Simpson: „Rendkívül valószínűtlen, már-már a lehetetlenséggel határos, hogy bármilyen életforma eljuthatott természetes eszközökkel egyik bolygórendszerből a másikba”, mindazonáltal arra a következtetésre jut: „Az ilyen utazás a Föld és a Mars között tehát egyazon bolygórendszeren belül, ugyancsak valószínűtlen, de nem zárható ki teljességgel.” Lásd George Gaylord Simpson: On the nonprevalence of humanoids. *Science* 143, 772 (1964).

[138](#) Brett Gladman és mások: The exchange of impact ejecta between terrestrial planets. *Science* 271, 1387 (1996).

[139](#) Raul Clano kaliforniai mikrobiológus állítólag társaságot alapított ezeknek az ősi mikrobáknak a kiszűrésére a lehetséges mezőgazdasági hasznosításuk érdekében. Ezt az NZPA jelentette, például *The Weekend Australian*, 1997. április 12.

[140](#) John Postgate: *The Outer Reaches of Life* (Cambridge University Press, Cambridge, 1994).

[141](#) Kenneth Nealson és mások: *Mars Sample Return: Issues and Recommendations* (National Academy Press, Washington, 1997), 18. o.

[142](#) Lásd Christopher McKay: The search for life on Mars. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere* 27, 263 (1997).

[143](#) Carl Sagan: Is it dangerous to return samples from Mars to Earth? *The Planetary Report* 14, 3 (1994).

[144](#) T Gold: The deep hot biosphere. *Proceedings of the National Academy of Science USA* 89, 6045 (1994).

[145](#) Christopher McKay: Promethean ice. *Mercury* 25, 15 (1996).

[146](#) Fred Hoyle és Chandra Wickramasinghe: *Diseases from Space* (Dent, London, 1979).

10. FEJEZET. ÉLETRE ÍTÉLT VILÁGEGYETEM?

[147](#) Freeman Dyson: *Disturbing the Universe* (Harper & Row, New York, 1979), 250. o.

[148](#) *The Philadelphia Inquirer*, 1997. április 9.

[149](#) Fred Hoyle és Chandra Wickramasinghe: *LifecLOUD* (Dent, London, 1978).

[150](#) Fred Hoyle: *The Intelligent Universe* (Michael Joseph, London, 1983).

[151](#) Francis Crick: *Life Itself Its Nature and Origin* (Simon & Schuster, New York, 1981), magyarul: *Az élet mikéntje* (Gondolat, Budapest, 1987).

[152](#) Jacques Monod: *Chance and Necessity* (ford. A. Wainhouse, Collins, London, 1971), 145. o.

[153](#) Christian de Duve: *Vital Dust* (Basic Books, New York, 1995), 300. o.

[154](#) Kenneth Nealson és mások: *Mars Sample Return: Issues and Recommendations* (National Academy Press, Washington, 1997), 13. o.

[155](#) Ennek a filozófiának az élesen kritikus értékelését lásd Robert Shapiro: *Origins: A Skeptic's Guide to the Creation of Life on Earth* (Summit Books, New York, 1986).

[156](#) Christian de Duve: *Vital Dust* (Basic Books, New York, 1995), XV., XVIII. o.

[157](#) Mint idézi D. S. Bendall: *Evolution from Molecules to Men* (Cambridge University Press, Cambridge, 1983), 128. o.

[158](#) Gary Steinman and Marian Cole: Synthesis of biologically pertinent peptides under possible primordial conditions. *Proceedings of the National Academy of Science* 58, 735 (1976).

[159](#) Sidney Fox: Prebiotic roots of informed protein synthesis. *The Roots of Modern Biochemistry*. Szerk.: Horst Kleinkauf, Hans von Dohren és Lothar Jaenicke (de Gruyter, Berlin 1988), 897. o.

[160](#) Mint idézi Shapiro, *Origins* (lásd 9. jegyzet, fent), 186-187. o.

[161](#) Cyril Ponnamperna: The origin, evolution and distribution of life in the universe. *Cosmic Beginnings and Human Ends*, szerk. Clifford Matthews és Roy Abraham Varghese (Open Court, Chicago 1993), 91. o.

[162](#) Ez az eredmény Gödel eldönthetlenségi tételéhez kapcsolódik a matematikában.

[163](#) Ezt a technikát használják ki a komplex képek adattárolásában. Sok természetes kép esetében olcsóbb az információt fraktalizálni, mint pixelekre bontani. Lásd például Barry Fox: Fractals set the pattern for online video. *NewScientist*, 1996. szeptember 7., 23. o.

[164](#) Lásd, például Paul Davies: *The Cosmic Blueprint* (Heinemann, London, 1987), 5. fejezet.

[165](#) Christian de Duve: The chemical origin of life. *Astronomical and Biochemical Origins and the Search for Life in the Universe*. Szerk.: C. B. Cosmovici, S. Bowyer and D. Werthimer (Editrice Compositori, Bologna 1997, 392. o.

[166](#) Stuart Kauffman: *The Origins of Order* (Oxford University Press, Oxford, 1993), 285. o.

[167](#) Lásd például Peter Coveney és Roger Highfield: *Frontiers of Complexity* (Ballantine, New York, 1995), 4.

fejezet.

[168](#) Christopher Langton: *Artificial Life* (Addison-Wesley, Redwood City, Ca., 1988). Népszerű összefoglalását lásd Coveney and Highfield (21. jegyzet, fent), 8. fejezet.

[169](#) Az 1. fejezetben megpendítettem az elképzelést, hogy ebben szerepe lehet a gravitációnak.

[170](#) Manfred Eigen: *Steps Towards Life* (Ford.: P. Woolley, Oxford University Press, Oxford, 1992), 12. o.

[171](#) Küppers például így ír: „Következésképp a darwini alapelvel együtt léteznie kell az anyag önszerveződésének egy további elvének, ami az átmenetet vezérli az élettelenről az élőbe.” Lásd Bernd-Olaf Küppers: *Molecular Theory of Evolution* (Springer-Verlag, Berlin, 1985), 279. o.

[172](#) Az eseményeknek ez a forgatókönyve hasonló az Eigen által leírthoz, melyben a hiperciklusok fokozzák a rendszer szelektivitását, és felülmúlhatják a molekuláris darwinizmust (lásd 5. fejezet).

[173](#) A kvantummechanikai mérések problémáját lásd például P. C. W Davies és J. R. Brown: *The Ghost in the Atom* (Cambridge University Press, Cambridge, 1986).

[174](#) Roger Penrose: *The Emperor's New Mind* (Oxford University Press, Oxford 1989), 10. fejezet. Magyarul: *A császár új elméje* (Akadémiai Kiadó, Budapest, 1993).

[175](#) Furcsa módon a DNS-nek tízszeres, ennél fogva ötszörös a szimmetriája, ha a végétől nézzük.

[176](#) Lásd Gerard Milburn: *The Feynman Processor*

(Allen & Unwin, Sydney, 1988).

[177](#) Christian de Duve: *Vital Dust* (Basic Books, New York, 1995), XVIII. o.

[178](#) Stephen Jay Gould: *Life's Grandeur* (Jonathan Cape, London, 1996).

[179](#) Uo., 202-212. o.

[180](#) Richard Dawkins: *Climbing Mount Improbable* (Viking, London, 1996).

[181](#) Stephen Jay Gould: *Life's Grandeur* (Jonathan Cape, London, 1996), 167. o.

[182](#) Christian de Duve: *Vital Dust* (Basic Books, New York, 1995), 216. o.

[183](#) Uo., 299. o.

[184](#) Mint idézi George Musser: The Copernican revolution comes around. *Mercury*, 25, 15 (1996).

[185](#) George Gaylord Simpson: On the nonprevalence of humanoids. *Science* 143, 772 (1964).

[186](#) The search for extraterrestrial intelligence: scientific quest or hopeful folly? Az Ernst Mayr és Carl Sagan közötti vita. *The Planetary Report*, 16, 4 (1996).

[187](#) Stephen Jay Gould: *Life's Grandeur* (Jonathan Cape, London, 1996), 175., 214., 216. o.

[188](#) Jacques Monod: *Chance and Necessity* (Ford.: A. Wainhouse, Collins, London, 1971), 180. o.

* - A könyvben a szerző eredeti jegyzetei mellett a magyar kiadó további jegyzeteket helyezett el. A megkülönböztetés érdekében a szerző jegyzeteit [szögletes] zárójellel, a magyar kiadó jegyzeteit (normál) zárójellel jelöltem a mobil változatban (E)

1 Szathmáry Eörs magyar biológus, az ELTE Növényrendszertani és Ökológiai Tanszékének tanszékvezető professzora.

2 Az összes egész és törtszámot együtt racionális számoknak nevezzük. Minden racionális szám előállítható véges vagy szakaszos végtelen tizedes tört alakjában. A nem racionális, vagyis irracionális számok viszont csak nem szakaszos végtelen tizedestört alakban írhatók fel; egy részük egész együttthatójú algebrai egyenletek nem egész gyöke (algebrai irracionális számok). A racionális és irracionális számokat együttesen valós számoknak nevezzük.

3 Úgy tűnik, hogy éppen ezt az űrt képes kitölteni Gánti Tibor magyar vegyész-biológus professzor ún. chemoton-elmélete azáltal, hogy a kémiai folyamatrendszer önszerveződésének új elvét állítja fel. A három különböző autokatalitikus körfolyamat összekapcsolódásával létrejövő kémiai szuperrendszer modellje – a chemoton modell – alkalmas lehet arra, hogy segítségével választ lehessen adni e könyv egyes alapvető kérdéseire: mi az élet és hogyan keletkezett. A könyv szerzője a kézirat megírásakor még nem ismerhette a chemoton-elméletet, mivel hiányzott annak megfelelő nemzetközi publikálása. A közeljövőben

az Oxford University Press kiadó megjelenteti angolul Gánti Tibor fontosabb műveit.

4 A Giotto európai űrszondát megelőzve repült el a Halley-üstökös mellett két VEGA űrszonda is, amelyek távolabbról, de ugyancsak eredményesen vizsgálták az üstökös magját. Mindkét űrszonda fedélzetén több magyar berendezés működött: hazánk részt vett a fedélzeti televíziós rendszer, a fedélzeti adatgyűjtő berendezés és két töltöttrészecske-detektor (PLAZMAG és TÜNDE) tervezésében és elkészítésében.

5 A kézirat lezárása óta a Mars Global Surveyor megfigyelései segítségével jelentősen előrehaladt a Mars felszínének és történetének megismerése. Néhány fontosabb új eredmény a következő. A képek tanúsága szerint bizonyos helyeken a völgyek oldalán erős rétegződés tapasztalható. Ugyancsak a nagy felbontású felvételek mutatták meg, hogy egyes ősi völgyek aljzatán olyan csatorna fut végig, amely szintén fontos érv a folyóvíz egykori tartós jelenléte mellett. A lézeres magasságmérések és a gravitációs vizsgálatok egyik legfontosabb eredménye, hogy a Mars kérge délen sokkal vastagabb, mint északon. Ez azzal jár, hogy az északi, sima felszín 6 km-rel alacsonyabban fekszik, mint a déli sarkvidék, ezért a Mars esetében a tömegközépponttól mintegy 3 km-rel délre található a Mars-alak középpontja. Ennek következtében a folyóvíz annak idején az északi félgömb felé áramolhatott, ahol valóban létezhetett egy nagy kiterjedésű északi óceán. Az új mérési eredmények alátámasztják, hogy a Marson valaha működhetett a

lemeztektonika. Erre utal egyrészt az északi félgömbön a vékony kéreg jelenléte, másrészt az ősi idők erős vulkanizmusa, továbbá az a felfedezés, hogy a Mars felszíni mágneses tere csíkos szerkezetű. A hasonló mágneses szerkezetet a Földön a lemeztektonika hatásának tulajdonítják. 1999 végén sajnos mindkét amerikai Mars-szonda, a Mars Polar Lander és a Mars Climate Orbiter is kudarcot vallott. A NASA a Mars kutatását automata űreszközökkel folytatja, de csökkentett intenzitással. Még nem lehet tudni, hogy mikor kerül sor az első mintahozatalra a Mars felszínéről.

6 1999. március 18-án David McKay bejelentette, hogy két sokkal fiatalabb marsi meteoritban az ALH84001-ben találtakhoz hasonló struktúrát fedezett fel. A Nakhla meteorit, amely Egyiptomban esett le 1911-ben, 1,3 milliárd éves, míg az 1865-ben Indiában talált Shergotty meteorit kevesebb mint 200 millió éves. A fossziliák a Nakhlaban jelentősen nagyobbak, mint amit az ALH84001-ben mutattak ki, és nagyon hasonlítanak a földi baktériumkövületekhez.

7 Nagy Bertalan és Claus György magyar származású amerikai tudósok.

MAGYAR NYELVŰ AJÁNLOTT IRODALOM

Almár L: *A SETI szépsége* (Vince Kiadó, Budapest, 1999)

Attenborough, D.: *Élet a Földön* (Novotrade Kiadó, Budapest, 1989)

Brooks, J. – Shaw, G.: *Az élő rendszerek eredete és fejlődése* (Gondolat Kiadó, Budapest, 1981)

Crick, E.: *Az élet mikéntje, eredete és természete* (Gondolat Kiadó, Budapest, 1987)

Davies, P.: *Egyedül vagyunk a Világegyetemben?* (Kulturtrade Kiadó, Budapest, 1996)

Davies, P.: *Isten gondolatai* 3. kiadás (Vince Kiadó, Budapest, 2000)

Dawkins, R.: *Folyam az Édenkertből* (Kulturtrade Kiadó, Budapest, 1995)

Gánti T.: *Az élet principiuma* 2. kiadás (Gondolat Kiadó, Budapest, 1978)

Gánti T.: *A kvarkoktól a galaktikus társadalmakig* (Kossuth Kiadó, Budapest, 1975)

Gánti T.: *Az élet és születése* (Tankönyvkiadó, Budapest, 1980)

Gánti T.: *Chemoton elmélet I-II.* (OMIKK, Budapest, 1984, 1989)

Gánti T.: *Kontra Crick, avagy az élet mivolta* (Gondolat Kiadó, Budapest, 1989)

Hoyle, F.: *A fekete felhő* (Gondolat Kiadó, Budapest, 1969)

Margulis, L.: *Az együttélés bolygója* (Vince Kiadó, Budapest, 2000)

Maynard Smith, J.: *Kulcskérdések a biológiában* (Gondolat Kiadó, Budapest, 1988)

Maynard Smith, J. – Szathmáry E.: *Az evolúció nagy*

lépései (Scientia Kiadó, Budapest, 1997)

Penrose, R.: *A császár új elméje* (Akadémiai Kiadó, Budapest, 1993)

Szathmáry E. – Maynard Smith, J.: *A földi élet regénye* (Vince Kiadó, Budapest, 2000)

Oparin, A. J.: *Az élet keletkezése a Földön* (Gondolat Kiadó, Budapest, 1960)

Várkonyi T.: *Kozmikus biológia* (Antikva Kiadó, Budapest, 1998)

Venetianer P.: *A DNS szép új világa* (Vince Kiadó, Budapest, 1998)

Vida G.: *Az élet keletkezése* (Gondolat Kiadó, Budapest, 1981)

Tartalom

- [ELŐSZÓ](#)
- [1. AZ ÉLET MINT OLYAN](#)
 - [Az élet rejtélyes eredete](#)
 - [Mi az élet?](#)
 - [Az „életerő” és más, lejáratott fogalmak](#)
 - [Az ősi molekula meséje](#)
 - [Mikrobák és az édenkert keresése](#)
- [2. SZEMBEN AZ ÁRRAL](#)
 - [A degeneráció elve](#)
 - [Honnan származik a biológiai információ?](#)
 - [Entrópiarés: a gravitáció mint a rend kútfője](#)
- [3. KI AZ INGOVÁNYBÓL](#)
 - [Az élet fája](#)
 - [Az élet három tartománya](#)
 - [A legkorábbi kövületek](#)
 - [Spontán kialakulás](#)
 - [Az ősleves rekonstrukciója](#)
 - [A véletlen és az élet keletkezése](#)
- [4. ÜZENET A GÉPBEN](#)
 - [Sokasodj, sokasodj!](#)
 - [Élőt alkotni](#)
 - [A genetikai kód](#)
 - [Miből lesz az üzenet?](#)
 - [Kód a kódban?](#)
- [5. A TYÚK ÉS A TOJÁS PARADOXONJA](#)
 - [Először az RNS](#)

- Utóbb az RNS
- Önszerveződés: valamit semmiért?
- 6. A KOZMIKUS KAPCSOLAT
 - Csillagpor a szemedben
 - Kozmikus vegykonyha
 - Genezis az űrből
 - Becsapódás
 - A Sziszüphosz-effektus
- 7. CSUDABOGARAK
 - Van, aki forrón szereti
 - Élet az alvilágban
 - Felszállás a Hádészből
 - És egyenek követ
 - A többi már történelem
- 8. MARS: VÖRÖS ÉS HALOTT?
 - Nem éppen üdülőhely
 - Vízözön
 - A marsi üvegház
 - Volt-e élet a Marson?
 - Van-e élet a Marson?
 - Meteoritok a Marsról
 - Az élet nyomai?
 - Gyilkos járvány a vörös bolygóról!
- 9. PÁNSPERMIA
 - Túlélés az űrben
 - Meteoritban érkezett az élet a földre?
 - A Földi élet a Marsról ered?
 - A Földi élet került a Marsra?
- 10. ÉLETRE ÍTÉLT VILÁGEGYETEM?

- Van-e az életnek kezdete?
- A természet törvényei az életet szolgálják!
- Elejétől végéig darwinizmus?
- A fejlődés létrája?
- Predestinált-e az értelem?
- A SZERZŐ JEGYZETEI
- A MAGYAR KIADÁS JEGYZETEI
- MAGYAR NYELVŰ AJÁNLOTT IRODALOM