

A Z É R T E L E M M E G K Í S É R T É S E

RICHARD DAWKINS

**A Valószínűtlenség
Hegyének
meghódítása**

MŰSZAKI KÖNYVKIADÓ, BUDAPEST

A mű eredeti címe: Climbing Mount Improbable

Fordította: Ortmann-né Ajkai Adrienne

Copyright © 1996 by Richard Dawkins
Original Drawings Copyright © 1996 by Lalla Ward
All rights reserved.

© Hungarian translation Ortmann-né Ajkai Adrienne, 2001
© Hungarian edition Műszaki Könyvkiadó, 2001

ISSN 1585-1214

ISBN 963 16 2726 8

Kiadja a Műszaki Könyvkiadó Kft.
Felelős kiadó: Bérczi Sándor ügyvezető igazgató
Felelős szerkesztő: Demeter László
Borítótér és tipográfia: Biró Mária

Műszaki vezető: Abonyi Ferenc
Műszaki szerkesztő: Csoór Gabriella
Tördelőszerkesztő: Buris László
Terjedelem: 21,45 (A/5) ív
Azonosító szám: MK-3020104

Nyomta és kötötte az Oláh Nyomdaipari Kft.
Felelős vezető: Oláh Miklós

*Robert Winstonnak,
aki kiváló orvos és remek ember*

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

E könyv alapja a Royal Institute egy Karácsonyi Előadás-sorozata, melyet a BBC „A Világegyetemben nőttünk fel” főcímmel közvetített. A címet kénytelen voltam megváltoztatni, mivel azóta legalább három könyv jelent meg szinte ugyanilyen címmel, ráadásul maga a könyv is változott, már nem adja vissza hűségesen az előadásokat. Ennek ellenére szeretném megköszönni a Royal Institute igazgatójának, hogy csatlakozhattam a Karácsonyi Előadások Michael Faradayjel kezdődő történelmi sorozatához. Bryson Gore a Royal Institute-tól, valamint William Woolard és Richard Melman az Inca televíziótól nagy hatással voltak az előadásokra; hatásuk e könyvön is érezhető.

Michael Rodgers a fejezetek első vázlatát olvasta el és illette építő kritikával; tanácsai döntő hatással voltak az egész szerkezet átalakítására. Fritz Vollrath és Peter Fuchs szakértőként tanulmányozták át a 2., Michael Land és Dan Nilsson az 5. fejezetet. Mindannyian nagylelkűen hozzájárultak tudásuk megcsapolásához. Mark Ridley, Matt Ridley, Charles Simonyi és Lalla Ward Dawkins végigolvasták a teljes könyv egy későbbi változatát, majd megfelelő arányban adagolták a segítő kritikát és a biztató bátorítást. Mary Cunnane (W. W. Norton) és Ravi Mirchanandani (Viking Penguin) hihetetlen türelemmel és nagylelkűséggel vették tudomásul, hogy a könyv növekszik, saját életét éli, majd ismét kezelhető méretűre zsugorodik. John Brockman bátorítóan figyelt a háttérben: sosem szólt közbe, de mindig kész volt segíteni. A számítógépes szakemberek: ritkán megénekeltek hősök. E könyvben Peter Fuchs, Thiemo Krink és Sam Zshokke programjait használtam. A bonyolult Arthromorf program kidolgozásában és megírásában Ted Kaehler volt a munkatársam. Saját „Órásmester” programjaim sorozata sokat nyert Alan Grafen és Alun ap Rhisiart tanácsaiból. Az Oxfordi Egyetemi Múzeum Állat- és Rovartani Gyűjteményének munkatársai kölcsönpéldányokkal és szakmai tanácsokkal segítettek munkámat. Josine Meijer lelkesen és találékonyan kutatta fel a képeket. A rajzok (bár az elrendezés nem) feleségem, Lalla Ward Dawkins művei – átviláglik rajtuk a darwini teremtéstörténet iránt érzett szeretete.

Szeretnék köszönetet mondani Charles Simonyinak – nemcsak mérhetetlen nagylelkűségéért, hogy megkaptam jelenlegi állásomat Oxfordban mint tudományos ismeretterjesztő, de azért is, hogy megosztotta velem gondolatait a tudomány széles rétegekhez való eljuttatásának művészetéről – melyek egyeznek az én elképzeléseimmel:

Ne beszélj nagyképpen! Próbálj fellelkesíteni mindenkit a tudomány költészetével; magyarázataid legyenek olyan egyszerűek, amennyire azt a tisztesség megengedi, ugyanakkor ne kerüld el a nehéz kérdéseket! Különös figyelemmel igyekezz azoknak magyarázni, akik maguk is erőfeszítéseket tesznek a megértés érdekében!

SZEMBEN A RUSHMORE-HEGGYEL

Nemrégiben hallottam egy előadást a fügéről. Nem botanikai előadás volt, hanem irodalmi. A fügét megtaláljuk az irodalomban mint metaforát, beszélhetünk különböző megjelenéseiről: mint a nemi szervek jelképéről, vagy azok szégyenlős elrejtőjéről, a „fügéről” mint sértésről („fügét mutat”), a füge „társadalmi” felépítéséről, arról, hogy D. H. Lawrence szerint hogyan kell fügét enni társaságban, de talán még „a füge mint szöveg”-ről is. Az előadó végkövetkeztetése ez volt: felidézte A teremtés könyvéből Évát, aki kísértésbe viszi Ádámot, hogy egyen a tudás fájáról. A teremtés könyve – emlékeztetett – nem mondja ki, milyen gyümölcsről van szó. A hagyomány szerint almának tartjuk. Ő azonban úgy véli, hogy inkább füge volt – fejezte be beszédét e pikáns fordulattal.

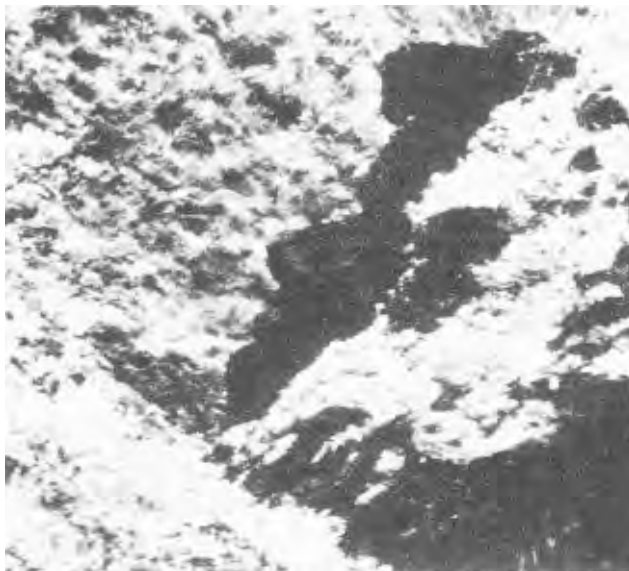
A fenti gondolatfűzés mindennapos bizonyos irodalmi körökben, engem azonban ingerel. Az előadó nyilvánvalóan tudta, hogy az Édenkert, benne a jó és rossz tudásának fájával, sohasem létezett. Akkor mit akart tulajdonképpen mondani? Véleményem szerint volt valami sejtelve, hogy „valamiképpen”, „éppen úgy is mondhatjuk”, „bizonyos értelemben”, „ha úgy vesszük”, „bizonyos szinten” valahogy „igaz”, hogy a történetben szereplő gyümölcs füge „kellett” hogy legyen. Ebből azonban elég. Nem arról van szó, hogy irodalmárok legyünk-e és száraz filiszterek, de elegáns stílusú előadónk rengeteg mindenről *nem vett tudomást*. A fügében valóban páratlan paradoxon és igazi költészet rejtőzködik, olyan bonyolult dolgok, melyek próbára teszik a kutató elmét, és olyan csodák, melyek felemelő esztétikus gondolatokat keltenek. Könyvemben olyan helyzetet szeretnék teremteni, ahol elmesélhetem a füge igazi történetét. Ez azonban csak egyetlen történet abból a sok millióból, mely mind ugyanazon a darwini nyelven, ugyanazzal a logikával szól – bár a füge története az evolúció egyik legizgalmasabb, legbonyolultabb története. Könyvünk központi metaforájával élve, a fügefafa a Valószínűtlenség Hegyének egyik legmagasabb csúcsán áll. Az ilyen magas csúcsokat az expedíció végén tanácsos megmászni. Előbb még sok mindent el kell mondanunk, ki kell alakítanunk és meg kell magyaráznunk egy teljes életképet, rejtélyeket kell megoldanunk és paradoxonokat kibogoznunk.

A füge története, mint mondtam, lényegében ugyanaz a történet, mint bolygónk összes többi élőlényének története. Bár a felszínes részletek különböznek, minden élőlény csupán egy téma: a DNS és szaporodása 30 millió módjának variációja. Utunk során alkalmunk lesz megcsodálni a pókok hálóját, azt a döbbenetes, bár nem tudatos zsenialitást, ahogy készül és ahogy működik. Felidézzük a szárnyak és az elefántagyar lassú, fokozatos evolúcióját. Látjuk majd, hogy „a” szem, melynek evolúciója gyakran legendába illő titoknak tűnik, valójában legalább negyven, de lehet, hogy hatvan egymástól független alkalommal is kialakult az állatok világában. Számítógépes

programokat kell segítségül hívnunk, hogy képzeletben könnyedén sétálhassunk abban az óriási múzeumban, melyben nemcsak a valaha élt és elpusztult lények találhatók meg, de még számosabb képzeletbeli unokatestvérük is: azok, akik sohasem születtek meg. Bejárjuk a Valószínűtlenség Hegyének ösvényeit, távolról megcsodáljuk függőleges meredélyeit – de szüntelenül keressük azt a lankás utat, mely a túlsó oldalon felvezet. A „Valószínűtlenség Hegye” metafora értelmét is megmagyarázzuk, sok egyéb mellett. Azzal kell kezdenem, hogy tisztázom a természet látszólagos tervezettségének problémáját és ennek viszonyát a valódi, ember általi tervezettséghez, valamint a véletlenhez. Ez az első fejezet célja.

A londoni Természettudományi Múzeumban van egy mulatságos kögyűjtemény, melynek darabjai közismert tárgyakra: csizmára, kézre, gyerekkoponyára, kacsára, halra emlékeztetnek. Olyan emberek küldték be őket, akik azt gondolták, hogy ez a hasonlóság jelent valamit. A mállás során a közönséges kövek annyiféle alakot felvehetnek, hogy nem csoda, hogy néha találunk egyet-egyét, ami kacsát vagy csizmát juttat az eszünkbe. A rengeteg kő közül, ami az emberek szeme elé kerül, a múzeum azokat őrizte meg, amiket felvesznek és elraknak mint különlegességet. E gyűjtemény darabjainak véletlen hasonlósága érdekes, ám nem bír jelentéssel. Ugyanez áll arra az esetre is, amikor az elszálló felhőkben vagy a hegyvonulatokban arcokat vagy állati alakokat vélünk felfedezni. Ezek a hasonlóságok csak véletlenek.

Az 1.1. ábrán látható sziklás hegyoldal egyesek szerint a néhai Kennedy elnök arcéleire emlékeztet. Akinek felhívják erre a figyelmét, az valóban felfedezhet némi hasonlóságot John vagy Robert Kennedyyel. Sokan viszont nem látják meg ezt; nem nehéz elhinni, hogy a hasonlóság véletlenszerű. Másrészt egyetlen épelméjű embert sem lehetne meggyőzni arról, hogy a dél-dakotai Rushmore-hegy véletlen mállás következtében vet te fel Washington, Jefferson, Lincoln és Theodore Rooseveltnél elnökök képét.



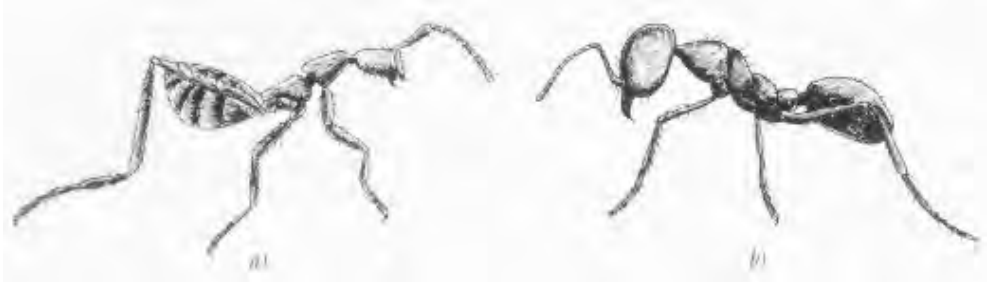
1.1. ábra. Egy igazi véletlen. Kennedy elnök arcéle egy hegy oldalában Hawaiiiban.

Nem kell magyarázni, hogy ezeket tudatosan (Gutzon Borglum irányítása mellett) faragták ki. Nyilvánvaló, hogy nem a véletlen szülöttei: rájuk van írva a tervezettség.

A különbség a Rushmore-hegy és John Kennedy mállott hasonmása (vagy a természetes mállás más érdekes művei, pl. a mauritiusi St. Pierre-hegy) között a következő: a Rushmore-hegyi arcok olyan tömémentelen sok részletben hasonlítanak eredetijükre, hogy ez nem jöhetett létre véletlen útján. Az arcok tisztán felismerhetők, még akkor is, ha különböző szögből nézzük őket. Az 1.1. ábra véletlen hasonlósága Kennedy elnökhöz csak egy adott szögből, adott fényviszonyok mellett észlelhető. Természetesen elképzelhető, hogy egy szikla úgy mállik, hogy egy bizonyos kilátópontonról egy orra hasonlít; néhány másik pedig úgy, hogy ajkakra. Ez a szerény hasonlóság még nem követel túl sokat a véletlentől, főleg ha a fényképész több nézőpont közül választhat (ráadásul, mint arra majd hamarosan visszatérek, az emberi agy mintegy szándékosan igyekszik arcokat látni). A Rushmore-hegy azonban más. Ez a négy fej *tervezett*. Egy szobrász megálmodta őket, papíron megrajzolta, gondos méréseket végzett a sziklán, és felügyelte a munkások csapatát, akik légalapácsokkal és dinamittal alakították ki a húszméteres szobrokat. Az időjárás is elvégezhetette volna ugyanezt a munkát, mint az átgondoltan alkalmazott dinamit – ám a szikla mállásának összes lehetséges módja közül csak elenyészően kevés az, amikor az eredmény négy adott emberi alakhoz hasonlít. Még ha nem is ismernénk a Rushmore-hegy történetét, megbecsülhetnénk, hogy annak valószínűsége, hogy véletlenszerű mállás hozta létre a négy fejet – elképzelhetetlenül csekély. Akkora, mint ha egy pénzérmét feldobva negyvenszer egymás után fejet kapnánk.

Úgy gondolom, világos a különbség – elméletben feltétlenül, ha gyakorlatban nem is mindig – véletlenszerű és tervezett között; most azonban bevezetek egy harmadik kategóriát, amit már kevésbé könnyű elkülöníteni. *Tervezettnek tűnő* dolgoknak fogom őket nevezni. A tervezettnek tűnő dolgok az élőlények és azok a dolgok, amelyeket ők állítanak elő. A tervezettnek tűnő dolgok tervezettnek *tűnnek*, mégpedig olyan mértékben, hogy egyesek – talán az emberek többsége? – úgy gondolják, hogy *valóban* tervezettek. Ezek az emberek tévednek. Helyes azonban meggyőződésüknek az a része, hogy e dolgok nem lehetnek a véletlen szüleményei. A tervezettnek tűnő dolgok nem véletlenszerűek. Egy olyan csodálatra méltó nem véletlenszerű folyamat hozta létre őket, mely a tervezettség szinte tökéletes illúzióját kelti.

Az 1.2. ábrán egy élő szobrot láthatunk. A bogarak rendszerint nem hasonlítanak a hangyákra. Ha egy bogár szinte pontosan úgy néz ki, mint egy hangya – ráadásul egy olyan bogár, mely teljes életét hangyabolyok belsejében éli le –, joggal gyanakodhatunk, hogy ennek a hasonlóságnak oka van. A bal oldali állat tulajdonképpen bogár – legközelebbi rokonai a fürgebogarak (*Anthicidae*) –, de úgy néz ki, mint egy hangya, úgy mozog, mint egy hangya, és a hangyabolyban, hangyák között él. A jobb oldali képen igazi hangya látható. A hasonlóság, mint bármely realista szobornál, nem véletlen. Más magyarázatot követel, mint a pusztán véletlen. Mi lehet ez a magyarázat? Mivel minden, a hangyákhoz meghökkentően hasonlító bogár hangyabolyban vagy legalább hangyákkal szoros kapcsolatban él, talán valamilyen, a hangyáktól származó természetes anyag vagy fertőzés lenne, ami rákerül a bogarakra



1.2. ábra. Nem tervezett, de nem is véletlenszerű hasonlóság
 a) hangyautánzó bogár (*Labidus praedator*); b) hangya (*Mimeciton antennatum*)

és megváltoztatja növekedésüket? Nem; a valódi magyarázat – a darwini természetes szelekció – ettől nagyon eltérő, mint majd később részletezzük. Pillanatnyilag elégedjünk meg annyival, hogy biztosak lehetünk benne: ez a hasonlóság, akárcsak a mimikri más esetei, nem véletlen. Nézzük meg az állati mimikri néhány további példáját, nyitva hagyva egyelőre annak magyarázatát, hogy hogyan jöhetett létre. A fenti példa megmutatta, milyen remek munkát végezhet a bogár teste, ha „utánozni akar” egy másik rovar. Vegyük szemügyre az 1.3b ábrán látható teremtményt. Olyan, mintha természet lenne – nézzük meg összehasonlításképpen az 1.3a ábrán a valódi természet. Az 1.3b ábrán is egy rovar látható, de ez nem természet: ez egy bogár. Igaz, láttam már jobban sikerült hasonmást is a rovarvilágban, pl. az előző ábrán bemutatott hangyautánzó bogarat. Ez a „bogár” valahogy furcsa. Mintha nem lennének szabályos ízelt lábai, csak kis hurkák a lábak helyén. Mivel a bogaraknak a többi rovarhoz hasonlóan ízelt lábaik vannak, azt hihetnénk, hogy sikeresebb lesz a természet ízelt lábainak utánzata. Mi lehet a talány nyitja? Miért olyan ez az utánzat, mint egy felfújt bábú, ahelyett hogy igazi, ízelt lábú rovar lenne? A választ az 1.3c ábra adja meg, mely a természettudomány egyik legmeglepőbb látványa: a természetutánzó bogarat oldalnézetből ábrázolja. A bogár feje picike (szemét a szabályos, ízelt csáp tövében láthatjuk); ezt karcsú tor követi, melyen megvan a három pár szokásos ízelt láb – ezeken jár az állat. A trükk kulcsa a potroh, mely ívben visszahajolva ernyőként teljesen elfedi a fejet, a tort és a lábakat.



1.3. ábra. a) valódi természet (*Amitermes hastatus*);
 b) természet utánzó bogár (*Coatonachthodes ovambolandicus*); c) a trükk titka

A teljes „termesz” valójában csupán a potroh (anatómiailag) hátsó részéből alakult ki. A „termeszfej” a potroh vége; a „termeszlábak” és „termeszcsápok” csupán lebegő potrohnyúlványok. Nem csoda, hogy ez az utánzat messze elmarad a hangyautánzó sógor előző képen bemutatott teljesítményétől. Ez a természetutánzó bogár ugyanúgy természetvárakban él és élősködik, mint az 1.2. ábra hangyautánzó bogara hangyabolyokban. Bár a hasonlóság foka kisebb, ha az „alapanyagot” is figyelembe vesszük, a természetutánzó bogár „szobrászati” teljesítményét kell magasabbra értékelnünk. A hangyautánzó bogár testének minden porcikáját úgy módosította, hogy az a hangya megfelelő testrészéhez hasonlítson. A természetutánzó azonban a természet összes testrészét saját testének egyetlen tájából – a potrohából – alakította ki.



1.4. ábra. A mimikri magasiskolája: nőstény tengeri sárkány (*Phycodurus eques*) Ausztráliából

Kedvenc állati „szobrom” a tengeri sárkány (1.4. ábra). A tengeri sárkányhal, a csikóhalak egy faja, melynek teste tengeri hínár alakját vette fel. Ez kiváló védelmet biztosít számára, hiszen tengeri hínárok között él, így rendkívül nehéz észrevenni. Hasonlósága túl tökéletes ahhoz, hogy egyszerű véletlen műve legyen. Közelebb áll a Rushmore-hegyhez, mint a Kennedy-szirthez. Meggyőződésem részben azon alapul, hogy meglepően sok különböző nézőpontból tűnik valami másnak; másrészt azon a tényen, hogy a halaknak rendszerint nincsenek efféle testfüggelékeik. Ebben a tekintetben a tengeri sárkány közelebb áll a természetutánzó, mint a hangyautánzó bogár mimikrijéhez.

Mindaddig olyan dolgokról szóltam, amelyek „realista szoborként” tesznek ránk nagy hatást: azért érezzük, hogy nem lehetnek véletlenek, mert túlságosan hasonlítanak valami másra. A tengeri sárkányok és a hangyautánzó bogarak tervezettnek tűnő szobrok: a legkisebb kétséget kizáróan úgy festenek, mintha egy művész tervezte volna őket valaminek a hasonlatosságára. Az ember azonban szobrokon kívül mást is tervez. Más művei nem azáltal nyűgöznek le, hogy valamire hasonlítanak, hanem azáltal, hogy

mennyire hasznosait egy adott cél szempontjából. A repülőgép nagyon hasznos, ha repülni akarunk; a fazék remekül használható víz tárolására; a kés vágásra.

Ha díjat tűznénk ki olyan kövekre, amelyek természettől fogva olyan élesek, hogy vágni lehet velük, vagy olyan alakúak, hogy vizet lehessen bennük tárolni, valószínűleg kapnánk néhány valamirevaló hasonmást. A kovakő hajlamos arra, hogy élesen törjön; kőfejtőkben és hegyomlásokon kalandozva valószínűleg nem egy kézreálló természetes kést találhatunk. A kőzetek mállása hihetetlenül változatos formákat hozhat létre; pl. olyan horpadásokat is, amelyekben megáll a víz. A kristályok bizonyos fajtái a természetben éppen üregek fala mentén válnak ki; ha egy ilyen zárványt tartalmazó követ kettétörünk, két használható csészét kapunk. Még nevük is van e képződményeknek: geódák. Nekem is van egy az íróasztalomon, papírnehézzékként használom. De használhatnám éppen csészeként is, ha a belseje nem lenne olyan érdes; így nehéz lenne kimosni.

Könnyen kitalálhatunk egy olyan mértéket, mely megmutatja, hogy a természetes „edények” kevésbé célszerűek, kisebb „hatásfokúak”, mint az ember által készítették. A hatásfok: a haszon/költség hányadosa. Egy edény hasznosságának mértéke lehet, hogy mennyi víz fér bele. A költségeket is kényelmesen megmérhetjük ennek megfelelő egységekben: milyen térfogatú anyagot tartalmaz az edény? Papírnehézzékkövembe $87,5 \text{ cm}^3$ víz fér. Térfogata (Arkhimédész híres Heuréka!- [fürdőkád-] módszerével mérve) 130 cm^3 . Ezen „edény” hatásfoka tehát kb. 0,673, ami elég alacsony érték. Nem csoda, hiszen e követ senki se tervezte arra, hogy vizet tároljon – csak éppen arra is jó. A fenti mérést elvégeztem egy borospohárra is: 3,5-öt kaptam. Egy barátom ezüst tejszínes kancsója még jobb hatásfokú: 250 cm^3 víz fér bele, míg maga a kancsó csupán 20 cm^3 vizet szorít ki, hatásfoka tehát 12,5.

Nem minden ember tervezte edény jó hatásfokú ebben a tekintetben. A konyhaszekrényben találtam egy testes edényt, melybe 190 cm^3 víz fér, de 400 cm^3 márványból készült. Hatásfoka tehát mindössze 0,47 – alacsonyabb, mint a tervezetlen üreges kőé. Hogyan lehetséges ez? A válasz sokat elárul: a szóban forgó edény – egy mozsár. Nem arra tervezték, hogy vizet tároljanak, hanem hogy fűszereket és más élelmiszereket kézi erővel, mozsártörő segítségével apróra zúzzanak benne. A mozsártörő vastag bot, mely nagy erővel érintkezik a mozsár falával. Egy borospoharat nem lehet mozsárként használni: rögtön darabokra törne. Az edények hatékonyságának mérésére kitalált mértékünk csődöt mond, ha az illető edényt mozsárnak tervezték. A mozsár hatásfokának mérésére valami más haszon/költség arányt kell kitalálni, olyat, ami a haszon oldalán azt is figyelembe veszi, hogy elég erős ahhoz, hogy a mozsártörő ne zúzza össze. Jó lenne vajon mozsárnak a természetes geóda? Az erősségével valószínűleg nem lenne gond, de érdes felszíne hátrányosnak bizonyulna: a réseibe szoruló darabkákat nem érné el a mozsártörő. Mértékünket tehát ki kéne egészíteni úgy, hogy tartalmazza a belső felület simaságát is. Márványmozsáram tervezettségét szabályos kör keresztmetszete, elegáns ívben hajló széle és talpzata bizonyítja.

Kések hatásfokának mérésére is kitalálhatunk hasonló mértéket. Biztos vagyok benne, hogy a kőbányákban gyűjthető kovakőtöredékek nem veszik fel a versenyt nemcsak a svédacél pengékkel, de a múzeumok újkőkori gyűjteményeinek szép mívű kőpengéivel sem.

A természetes, véletlenszerű edények és mozsarak még egy tekintetben alulmaradnak tervezett társaikkal szemben. Rengeteg követ kell megvizsgálunk és félredobunk, míg találunk egy elég éles kovaködarabot vagy „kőedényt”. Mérőszámunkban valójában nem az edény térfogatával kellene elosztani a tárolható víz mennyiségét, hanem a keresés során félredobott kő vagy agyag mennyiségével! A fazekas korongolta edény estében ez a plusz költség szinte semmi. Egy faragott szobornál vannak forgácsok, de mennyiségük csekély. A véletlenszerű kések vagy edények esetében a „hulladék” költsége óriási: a kövek túlnyomó többsége nem alkalmas víz tárolására, és nem is elég éles. Egy olyan kultúra, mely mesterségesen alakított tárgyak helyett „talált tárgyakra” alapoz, hatalmas ballasztot cipel magával a kiselejtezett tárgyak óriási szemétdombja formájában. A tervezés sokkal jobb hatásfokú, mint a keresgélés.

Fordítsuk most figyelmünket a tervezettnek tűnő dolgokra – az élőlényekre, melyek úgy néznek ki, mintha tervezettek lennének, ám valójában teljesen más folyamat során jöttek létre. Kezdjük tervezettnek tűnő edényekkel. A kancsóka (1.5. ábra) is tekinthető edénynek; hatásfoka a borospohárral összehasonlítva kiváló, ha nem is éri el az ezüstkancsót. Olyan, mintha zseniálisan megtervezték volna: nemcsak arra, hogy folyadékot tároljon, de arra is, hogy a rovarok belefúljának és megeméssze őket. Rafinált, a rovarok számára ellenállhatatlan illatot áraszt. Ez az illat, no meg a csábító színek és mintázat a kancsó tetejére csalja a rovarokat, akik egyszerre – nem véletlenül – egy alattomosan síkos lejtő tetején találják magukat, melyen ráadásul lefelé hajló szőrök éktelenkednek – megnehezítve az utolsó menekülési kísérleteket. Ha belecsúsznak a kancsóka sötét gyomrába – márpedig ettől ritkán menekülnek meg –, ott nemcsak a vízbe fulladnak bele. A részletek, melyekre munkatársam, dr. Barrie Juniper hívta fel a figyelmemet, olyan fantasztikusak, hogy röviden beszámolok róluk.

Egy dolog elkapni a rovar – ám a kancsókának nincs erős, fogakkal felfegyverzett állkapcsa, hogy „emészthető” állapotban tartsa őket. Talán elképzelhető lenne, hogy a növényeknek is kialakuljanak fogaik és rágó állkapcsaik, ám „ők” egyszerűbb megoldást választottak. A kancsóka vízében férgek és hasonló állatok népes serege él. Ezek sehol máshol nem fordulnak elő, mint a kancsóka vízében, és bírnak azzal, amit a növény nélkülöz: állkapcsokkal. A kancsóka áldozatainak testét az albérlő apró állatok állkapcsa és emésztőnedvei dolgozzák fel. Maga a növény a maradékot, illetve az állatok ürülékét hasznosítja, amit a kancsó falát bélelő sejtek vesznek fel.

A kancsóka nem csupán elfogadja a magánmedencéjébe pottyanó férgek szolgálatát: tevőlegesen fáradozik azért, hogy ő is adjon viszonzásul valamit, amire szükségük van. A kancsóka vízének elemzése egyedülálló tényrt tárt fel: ez a víz nem poshadt, mint ilyen körülmények között várható lenne, hanem oxigénben meglepően gazdag. Enélkül az oxigén nélkül a növény számára létfontosságú állatok elpusztulnának – de vajon honnan származik? Maga a kancsóka termeli, sőt számos jel arra utal, mintha egyenesen oxigéntermelésre tervezték volna. A kancsót bélelő sejtek több klorofillt tartalmaznak, mint a külső, a napfény és a levegő felé forduló sejtek.



1.5. ábra. Tervezettnek tűnő edény. Kancsóka (*Nepenthes pervillei*) a Seychelles-szigetéről.

E józan észnek ellentmondani tűnő megoldás kulcsa egyszerű: a belső sejtek arra specializálódtak, hogy oxigént válasszanak ki a vízbe. A kancsóka nemcsak kölcsönkéri „állkapcsait”: bérleti díjat is fizet oxigénforintokban.

A tervezettnek tűnő csapdák gyakoriak. A Vénusz légycsapója ugyanolyan elegáns megoldás, mint a kancsóka, sőt még mozgó részei is vannak. A rovar a növény érzékelőszőreit megérintve kioldja a csapdát, mely összezárul. Az állati csapdák legközismertebbje a pókháló – ennek szenteljük az egész következő fejezetet. Víz alatti megfelelője a patakban élő tegzeslárvák hálójá. A tegzeslárvák arról is nevezetesek, hogy házat építenek maguknak – egyes fajok kavicsokból, mások fadarabokból, levelekből vagy apró csigahéjából.

A világ sok táján gyakori látvány a hangyalesők kúp alakú verme. Ez a félelmetes teremtmény egy finoman csipkézett szárnyú, a fátyolkákkal közeli rokonságban álló

rovar – ugyan mi másé lenne? – lárvája. A hangyalesőlarva a verem feneké alatt lapul a homokban, várva, hogy egy hangya vagy más rovar beleessen. A verem szinte tökéletes kúp alakját – mely roppant módon megnehezíti, hogy az áldozat kimásson – nem tervezésnek köszönheti, csupán néhány egyszerű fizikai törvényszerűségnek, melyet a hangyaleső ásásmódja révén kihasznál. A mélyülő verem aljáról fejének erőteljes mozdulatával dobálja ki a homokot. A fenékről felröppenő homok ugyanolyan tökéletes, előre meghatározható lejtésszögű kúp alakú mélyedést alakít ki, mint a homokórában a lefelé csurgó homok.

Az 1.6. ábra visszatérít az edényekhez. Sok magányos darázs petéit szúrásával megbénított, üregbe rejtett zsákmányra rakja. Az üreg bejáratát úgy lezárja, hogy észre se lehet venni. A lárvát a raktározott táplálékon fejlődik, majd kifejlett rovarként előbújva zárja a kört. A magányos darázsok legtöbb faja földbe készíti fészkelőüregét. A fazekasdarázs agyagból építi meg gömbölyű edényét, magasan fenn egy faágon, jól elrejtve (1.6a ábra).



1.6. ábra. Tervezettnek tűnő állati alkotások
a) fazekasdarázs; b) kőművesméh bölcsője

A kancsókához hasonlóan ez az „edény” is jó minősítést kap hatásfoktesztünkön: A magányosan élő méhek hasonlóképpen üregekbe rejtik petéiket, de állati zsákmány helyett virágport raktároznak el. A fazekasdarazsakhoz hasonlóan a kőművesméhek is maguk építik fészkeiket. Az 1.6b ábrán látható fészek nem agyagból, hanem apró, összeragasztott kövekből áll. Túl azon, hogy ez az építmény nagyon hasonlít valamilyen praktikus, ember alkotta tárolóedényre, a képen bemutatott faj még egy egyedülálló érdekességgel bír. A képen csak egy fészék látható, pedig négy van ott. A többi hármát a méh sárral fedte be, ami megszáradva tökéletesen beleolvad a környező sziklába. Nincs olyan ragadozó, mely megtalálná a bennük fejlődő lárvát! Munkatársam, Christopher O'Toole csak azért fedezhette fel ezeket egy izraeli útján, mert a méh még nem végzett az utolsó fészekkel.

Ezek a rovarfészek mind magukon viselik a „tervezettség” ismertetőjegyeit. A kancsókával ellentétben ezeket valóban egy ügyes – bár minden valószínűség szerint nem tudatos – teremtmény hozta létre. E tekintetben a fazekasdarazsak és kőművesméhek fészkei közelebb állnak az ember edényeihez, mint a kancsókanövény. A darazsak és méhek azonban nem tudatosan vagy szándékosan tervezik meg fészkeiket. Bár rovarok tevékenységének eredményeképp születtek sárból vagy kavicsokból, a lényegyet tekintve nem különböznek az embrionális fejlődés során kialakuló rovartesttől. Ugye meglepően hangzik? Hadd magyarázzam meg. Az idegrendszer úgy fejlődik, hogy az élő darázs izmai, végtagjai és állkapcsai bizonyos összerendezett módon mozognak. Ezen óraműszerű mozgások eredménye, hogy a végtagok összegyűjtik és fészekké formálják az agyagot. Nagyon valószínű, hogy a rovar nem tudja, mit csinál vagy miért. Nincs fogalma a fészekről mint művészeti alkotásról, sem mint tárolóalkalmatosságról vagy gyerekszobáról. Pusztán izmai mozognak az idegek által meghatározott módon – és ebből fészek születik. Ezért határozottan – bár talán meglepő módon – állítom, hogy a darazsak és méhek fészkei nem tervezettek, csak tervezettnek tűnnek: nem az állat saját, alkotó szándéka teremti őket. Hogy őszinte legyek, nem tudom, hogy a darazsak valóban nem rendelkeznek-e alkotó szándékkal és valódi tervezőkészséggel. Megelégszem azzal, hogy magyarázatom akkor is megállja a helyét, ha éppen rendelkeznének. Ugyanez igaz a madarak fészkeire (1.7. ábra) és nászlugasaira, a tegzesek hálójára és tegzére – de nem igaz a Rushmore-hegyre és azokra a szerszámokra, melyekkel kifaragták: ez utóbbiak tényleg tervezettek.

Karl von Frisch világhírű osztrák zoológus, a méhek táncnyelvének megfejtője így ír: „Ha a természetet képzeletben ember nagyságúra és váraikat is hasonló arányban felnagyítanánk, a legmagasabbak mintegy 1500 méteresek lennének: négyszer akkora, mint a New York-i Empire State Building.” Az 1.8. ábrán látható felhőkarcolók az ausztráliai iránytűtermeszek művei. Az iránytűtermeszek nevüket onnan kapták, hogy építményeik mindig észak-déli irányban tájoltak: az eltévedt utazók iránytűnek használhatják őket (mint pl. a parabolaantennák Nagy-Britanniában: úgy tűnik, mindegyik dél felé áll).



1.7. ábra. Tervezettnek tűnő mesterművek
a) szövőmadár fészke; b) varrómadár (*Orthotomus sutorius*) fészkével



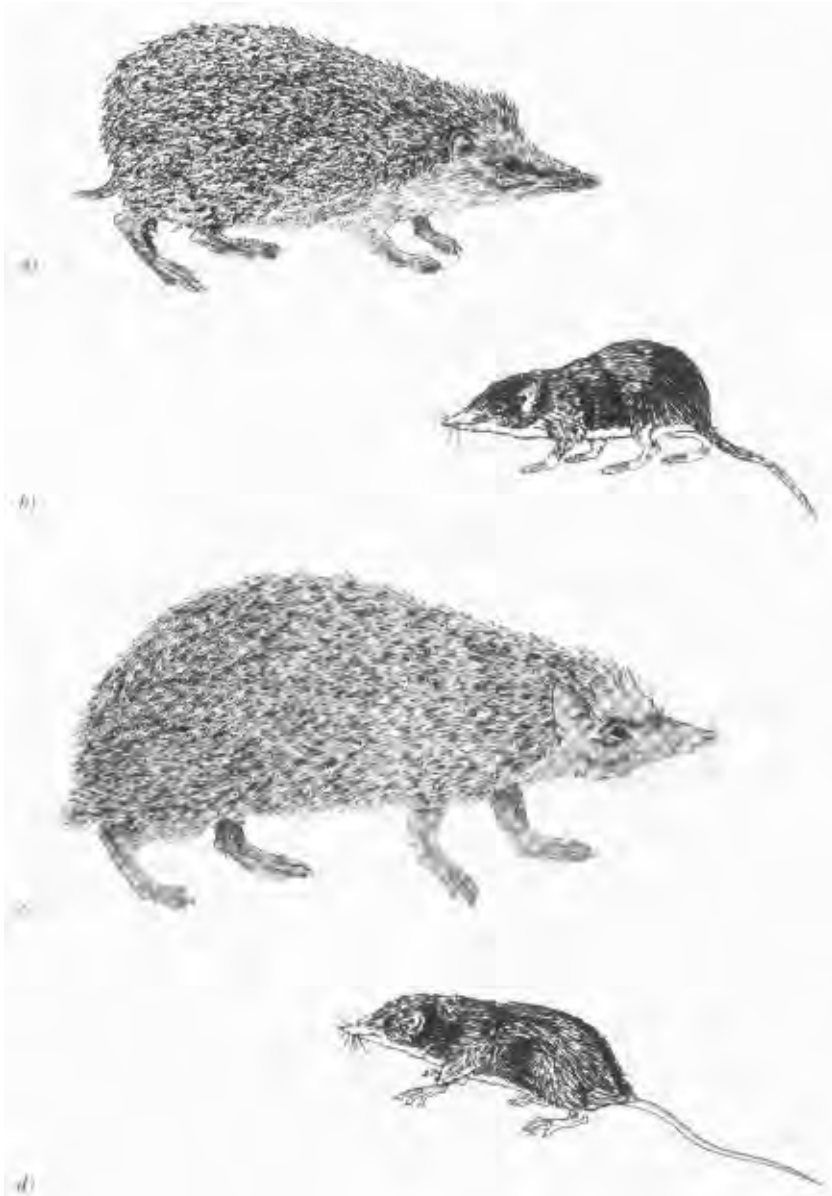
1.8. ábra. Rovarak építette észak-déli irányba tájolt felhőkarcolók.
Iránytűtermeszek várai Ausztráliában.

A fenti tájolás haszna a természetek számára az, hogy a kora reggeli és késő délutáni nap felmelegíti otthonukat; de védve van a déli nap gyilkos sugaraitól, mert észak felé – ahonnan a déli félgömbön a déli nap süt – csak egy keskeny éle mutat. Megbocsátható tévedés lenne, ha azt gondolnánk, hogy a természetek szándékosan építkeztek ilyen bölcs módon. Értelmesnek tűnő viselkedésük alapelve azonban ugyanaz, mint ami tervezettnek tűnő lábuk vagy állkapcsuk háttérben rejlik. Egyik sem tervezett – csak tervezettnek tűnő.

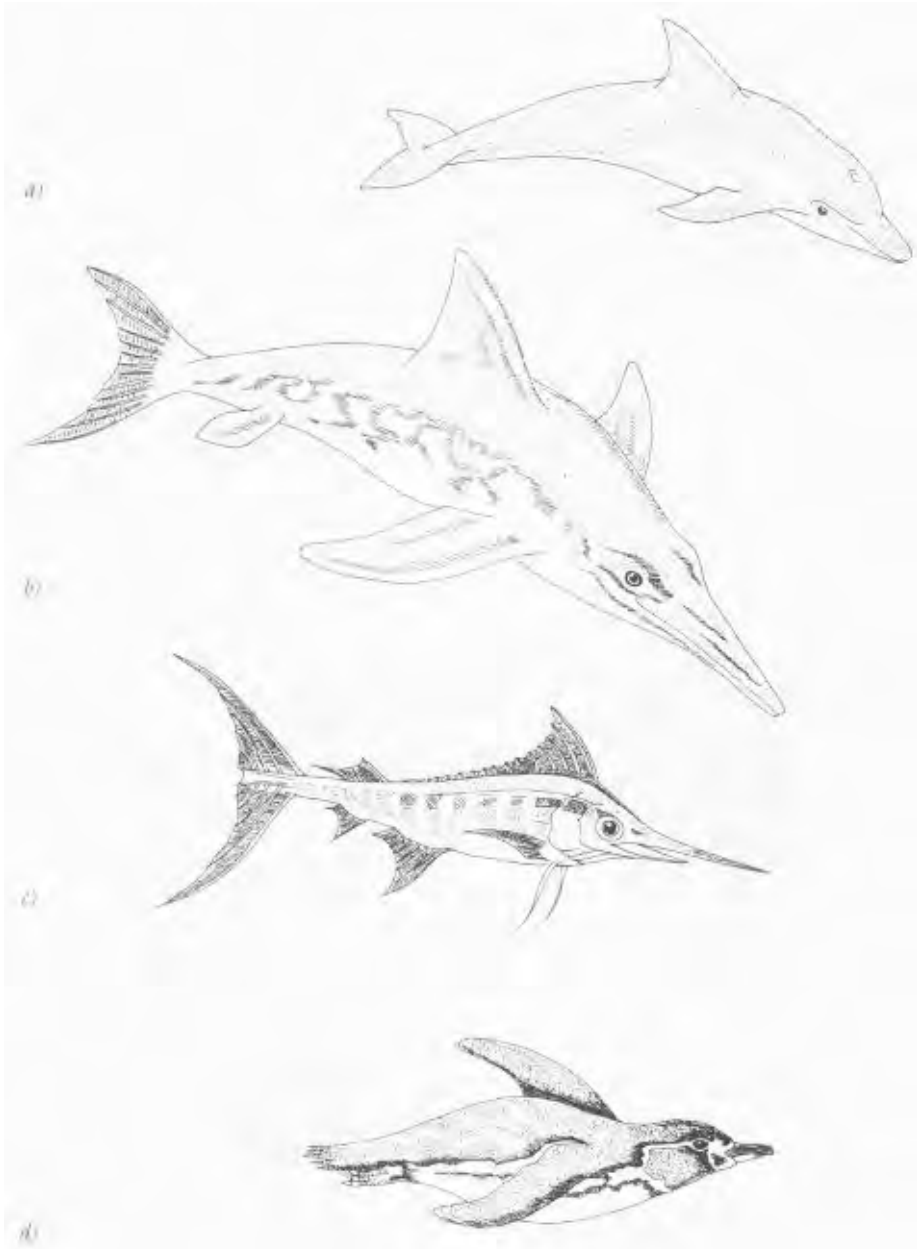
Az állatok művei – természet- és tegzeslakások, madárfészkek vagy a kőművesméhek fészkei – csodálatra méltók, ám csupán a tervezettnek tűnő dolgok – egy kíváncsiságunkat felkeltő furcsaság – egy csoportját képviselik. A „tervezettnek tűnő” kifejezést elsősorban élőlényekre és azok testrészeire használom. Az élőlények testét nem szakavatott kezek, csőrök vagy állkapcsok „rakják össze”, hanem az embrionális fejlődés bonyolult folyamatai. A túlskatulyázó rendszerezés büvkörébe került agy a darázs-fészkeket és társaikat esetleg „másodrendű tervezettnek tűnő dolgok”-nak nevezhetné, vagy egy, a tervezett és tervezettnek tűnő közötti kategóriába sorolhatná, de azt hiszem, ez zavaró lenne. Tény, hogy a fazekasdarázs fészke nem élő sejtekből, hanem sárból alakul ki, olyan végtagmozdulatok eredményeképp, melyek felszínesen tekintve hasonlítanak az ember fazekas kézmozdulataira. De a „tervezettség”: a szemet gyönyörködtető külső, a hasznos feladat betöltésére való alkalmasság forrása a két esetben gyökeresen eltérő: Az ember alkotta edény fogalmát, tervét az alkotó képzelet folyamata szüli meg a fazekas agyában, esetleg egy másik fazekas munkájának szándékos lemásolásával. A darázs-fészkek szépségét és célszerűségét egy egészen más folyamat során nyeri el: ez pontosan ugyanaz a folyamat, mely a darázs testének szépségét és célszerűségét is kialakítja. Ha tovább folytatjuk az élő szervezetek mint tervezettnek tűnő dolgok vizsgálatát, a fentiek érthetőbbé válnak.

A valódi tervezettség és a tervezettségnek tűnő áltervezettség felismerésének egyik módja, hogy szembeötlő a hasonlóság valami más dologhoz. A Rushmore-hegy fejei nyilvánvalóan tervezettek, hiszen nagyon hasonlítanak a valódi elnökökhöz. Az is kétségtelen, hogy a tengeri sárkány nem véletlenül hasonlít a hínárokhoz. Az élővilágban azonban messze nem ez, nem is a természetutánzó bogár vagy a botsáska a hasonlóság egyetlen megdöbbentő fajtája. Gyakran elálmélkodunk azon, hogy mennyire hasonlít egy-egy élő szerkezet és egy ugyanarra a célra készült ember alkotta eszköz. Az emberi szemet „utánozó” fényképezőgép példája olyan közismert, hogy itt nem részletezzük. Az állati és növényi test működésének tanulmányozásához gyakran a mérnökök rendelkeznek a legmegfelelőbb ismeretekkel: a jól működő megoldások – legyenek tervezettek vagy tervezettnek tűnők – alapelvei ugyanazok.

Az élő szervezetek gyakran egymástól függetlenül nagyon hasonló alakot vesznek fel – nem azért, mert egymást utánozzák, hanem azért, mert ez az alak mindnyájuk számára egyformán előnyös. Az 1.9. ábrán látható sün és süntánrek annyira hasonlóak, hogy szinte felesleges időpazarlásnak tűnt mindkettőjüket lerajzolni. Elég közeli rokonságban állnak egymással: mindketten a rovarvők rendjébe tartoznak. Más bizonyítékok azonban azt mutatják, hogy rokonságuk elég távoli ahhoz, hogy biztosak lehessünk abban: tüskeruhájukat egymástól függetlenül fejlesztették ki, feltételezhetően azért, mert védelmet nyújt a ragadozók ellen.



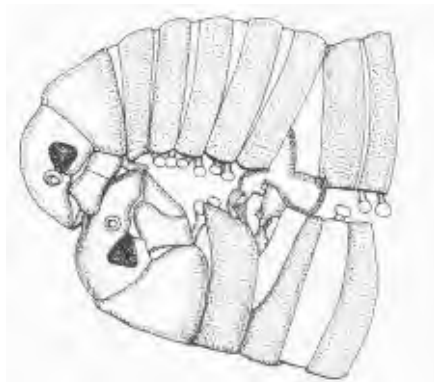
1.9. ábra. A hasonló életmódú állatok gyakran jobban hasonlítanak egymásra, mint legközelebbi rokonaikra. Az *a*) algériai sün (*Erinaceus algirus*) közeli rokona a *b*) cickánysűnnek (*Neotetracus sinensis*). A *c*) nagy süntanrek (*Setifer setosus*) közeli rokona a *d*) hosszúfarkú tanreknek (*Microgale melanorrachis*).



1.10. ábra. Konvergens evolúció: az áramvonalasság egymástól függetlenül többször is kialakult. *a)* palackorrú delfin (*Tursiops truncatus*); *b)* *Ichthyosaurus*; *c)* kormos nyársorrúhal (*Makaira nigricans*); *d)* galapagosi pingvin (*Spheniscus mendiculus*)

Mindkét tuskés állatka mellé rajzoltunk egy-egy cickányszerűt: ezek közelebbi rokonaik, mint a másik tuskés. Az 1.10. ábrán további példát mutatunk be. A tengerfelszín közelében gyorsan úszó állatok gyakran hasonló alakúak – ahogy a mérnökök mondanák: áramvonalasak. A képen egy delfint (emlős), egy kihalt halgyíkot (a delfinek hulló megfelelői lehetnek), egy nyársorrú halat (csontoshal) és egy pingvint (madár) láthatunk. A fentiek mind a konvergens evolúció példái.

A látszólagos konvergencia nem mindig bír jelentéssel. Azok az embertársaink – nem feltétlenül misszionáriusok –, akik a szemtől szembe közösülést a magasabbrendűség jelének tekintik, bizonyára el lesznek bűvölve az 1.11. ábra ezerlábúitól. Ez az egybeesés valószínűleg nem konvergencia eredményeképp jött létre; inkább arról lehet szó, hogy véges azon testhelyzetek száma, amelyekben egy hím és nőstény egyed közel kerülhet egymáshoz, és számos oka van annak, hogy egy faj melyiket választja.



1.11. ábra. Ezerlábúak (*Cylindroiulus punctatus*) „misszionárius helyzetben” párosodnak

Ezzel sikerült körbejárjunk nyitó témánkat: a véletlen kérdését. Vannak élőlények, amelyek emlékeztetnek valamilyen más dologra, de ez a hasonlóság túl felszínes ahhoz, hogy más legyen, mint véletlen. A vérzű szívű galamb mellén vörös tollcsomó található: olyan, mintha halálos sebet kapott volna, de nem valószínű, hogy ez bármit is jelentene. Hasonlóképpen véletlen, hogy a maldív dió női szervre hasonlít (1.12a ábra). Hasonlóan a Kennedy-arcú sziklához, statisztikai okunk van azt hinni, hogy e hasonlóságok csupán véletlenek. A galamb vérző szívét csupán néhány vörös toll képviseli. A maldív dió hasonlósága már meglepőbb: nem csak egy, hanem két-három jellegzetességből áll össze. Még a fanszörzetet is felismerni vélhetjük. Az emberi agy azonban lázasan kutat hasonmások után, különösen ha a számunkra rendkívül érdekes saját testünk hasonmásairól van szó. Gyanítom, hogy ezért látjuk ilyenek a maldív diót, akár csak Kennedy arcképét.

Ugyanez mondható el a halálfejes lepkéről (1.12b ábra). Tény, hogy agyunk szinte egyetlen erőfeszítéssel igyekszik arcokat látni, ahol csak lehet. Ez az alapja az egyik legmegdöbbentőbb érzékcsalódásnak, amit a pszichológusok felfedeztek.



1.12. ábra. Véletlenszerű hasonlóság a természetben:
a) maldív dió (*Lodoicea maldivica*); *b)* halálfejes lepke (*Acherontia atropos*)

Ha veszünk egy közönséges műanyag álarcot, és a visszáját mutatjuk egy társunk felé (olyan háttérrel, hogy a szemüregek jól látsszanak), a néző ezt domború arcként fogja észlelni. Ez roppant furcsa következménnyel jár, ha az álarcot elkezdjük jobbra-balra mozgatni. Ne feledjük, hogy a néző úgy érzékeli, domború arcot lát, pedig csak egy üreges álarcot. Ha az álarc balra mozdul el, a szemén át érkező tapasztalat csak akkor hozható összhangba az agy előfeltételezésével (hogy az arc domború), ha azt is feltételezzük, hogy az ellenkező irányba mozog! Pontosan ez az érzékcsalódás éri a nézőt: úgy tűnik számára, hogy az arc valójában jobbra halad.

Ezért tűnik tehát valószínűnek, hogy a halálfejes lepke hasonlóságának is a véletlen az alapja. Hozzá kell tennem, hogy az evolúcióelmélet egyik legnevesebb szakembere, a jelenleg a New Jersey-beli Rutgers Egyetemen tanító Robert Trivers szerint a rovarok hátoldalán látható arcmintázat a ragadozók, pl. madarak elriasztása céljából jöhetett

létre (mi ugyan emberi koponyának látjuk, de majomarcnak is nézhető). Nagy valószínűséggel igaza van – ekkor ez az eset is a tervezettnél tűnő példák sorát gyarapítja. Más okból, de ugyanez áll a japán szamurájrák arcutánzatára. Ennek a rákfajnak a hátán egy szamuráj harcos vad vonásainak (igaz, nem túl élethű) képe látható. Feltételezik, hogy a japán halászok – az emberi agy arcok meglátására irányuló hajlamától segítve – arcra emlékeztető mintázatokat fedeztek fel egyes rákok hátán. Babona vagy tisztelet okán nem akarták megölni az emberarcot – sőt: szamurájarcot! – hordozó rákokat, így inkább visszadozták őket a tengerbe – évszázadokon át. A feltételezés szerint az emberarc így sok rák életét megmentette, ezek utódai a következő nemzedékben nagyobb arányban fordultak elő. Minél jobb volt az arcutánzat, annál nagyobb volt hordozójának az esélye – így a hasonlatosság nemzedékről nemzedékre fokozódott.

Ha azt szeretnénk kitalálni, hogyan tehetünk szert kőkésre úgy, hogy egyszerűen „megtaláljuk”, egyetérthetünk abban, hogy ennek egyik módja az, hogy a világ összes követ szemügyre vesszük, és a tompákat – ez a túlnyomó többség – kiselejtezzük. Ha elég kőbányát és omladékot átvizsgálunk, bizonyára fogunk olyat találni, amely nemcsak éles, de kézhez álló nyele is van. Nem egyszerűsítjük túl a dolgokat, ha azt mondjuk, hogy a gyógyszeripar is hasonlóképpen működik: megvizsgál töméntelen, véletlenszerűen előállított molekulát, majd az ígéretesnek tűnő keveset kipróbálja, alkalmas-e gyógyításra. Azt azonban el kell fogadnunk, hogy a *találás*, mint egy hasznos eszköz megszerzésének módja, rendkívül alacsony hatásfokú. Sokkal hatékonyabb, ha a megfelelő anyagot – legyen az kő vagy acél – tervek alapján alakítjuk. A tervezettnél tűnő dolgok – a tervezettség jegyeit magukon viselő élő szerkezetek – azonban nem így jönnek létre. Az élőlények végső soron olyan folyamat eredményei, mely nagyon hasonlít a „találásra” – bár jelentős mértékben különbözik az egyszerű „rábukkanás”-tól.

Egy kőről szólva talán furcsa, amit most mondani fogok, de nézzük meg, hová vezet. A kőnek nincsenek gyermekei. Ha lennének, ezek örökölnék azt a képességet, hogy nekik is gyermekeik legyenek. Ebből következik, hogy unokák, dédunokák is lennének, számtalan nemzedéken keresztül. Elég légből kapott spekuláció, de mi lenne, ha így lenne? A kérdés megválaszolásához keressünk valamit, ami alig észrevehetően éles, de vannak utódai.

Egyes nádfajok hosszú, kemény levelei kifejezetten élesek. Ez az élesség valószínűleg a levél más sajátosságainak véletlen mellékterméke. A nádlevél elég kellemetlenül megvághatja a kezünket, de nem annyira, hogy tervezettségre kellene gyanakodnunk. Biztos, hogy egyes levelek élesebbek, mint mások – végigkutatathatjuk egy tó partját, hogy megtaláljuk a legélesebb nádlevelet. Itt jön a különbség a kövekkel szemben. A nádlevéllel nemcsak vágathatunk: *tenyészthetjük* is azt a növényt, amelyről származik. Keresztezzük a legélesebb levelű növényeket, irtsuk ki a tompákat: mindegy, hogy hogyan, de biztosítsuk, hogy a legélesebb levelűeknek legyen a legtöbb utódjuk. Nemcsak egyszer, de nemzedékről nemzedékre. Ahogy a nemzedékek követik egymást, továbbra is élesebb és tompább nádleveleket fogunk találni, de az átlag folyamatosan egyre élesebb lesz. 100 nemzedék során talán sikerül borotvapengét

nemesíteni. Ha eközben a keménység alapján is válogatunk, lehet, hogy a torkunkat is el tudjuk már vágni egy nádlevéllel.

Bizonyos értelemben többet tettünk, mint egyszerűen *meztaláltuk* azt, amire szükségünk volt: nem faragtunk, pattintottunk, élesítettünk vagy csiszoltunk, csak megkerestük a legjobbat abból, ami volt, a rosszabbakat meg kiselejteztük. A történet ugyanaz, mint mikor éles köveket kerestünk, egy fontos különbséggel: ez a folyamat felhalmoz. A kövek nem szaporodnak, ám a levelek – pontosabban az őket létrehozó növények – igen. Amikor meztaláltuk adott nemzedék legélesebb levelét, nemcsak használtuk, míg el nem kopott, hanem sikerünket azzal fokoztuk, hogy továbbszaporítottuk: előnyös tulajdonságát átvittük a következő nemzedékre. Ez a folyamat felhalmozó jellegű (kumulatív) és soha nem ér véget.

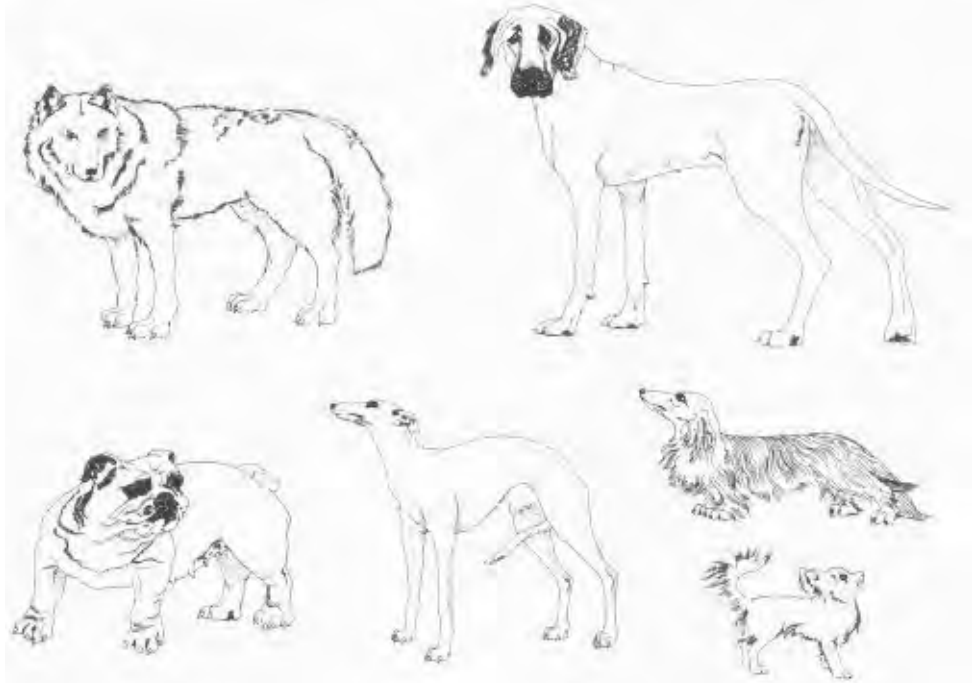
Még mindig csak keresünk és találunk, de mivel a genetika lehetővé teszi a felhalmozást, egy késői nemzedék legjobbjá jobb, mint egy korai nemzedéké (a keresett tulajdonságra nézve). Mint a harmadik fejezetben látni fogjuk, ezt nevezem a Valószínűtlenség Hegye megmászásának.

A folyamatosan élesebbé váló nádlevél gondolkísérlet volt a fentiek megértésére. Természetesen valós példákön is nyomon követhetjük a fenti elv működését.



1.13. ábra. A fenti zöldségeket mind egyetlen ősből, a vadkáposztából (*Brassica oleracea*) nemesítették: kelbimbó, karalábé, karórépa, fejes káposzta, karfiol, fodros kel

Az 1.13. ábra zöldségei mind egyetlen vadon élő fajból, a vadrepcéből (*Brassica oleracea*) származnak. A vadrepcé jellegtelen növény, egyáltalán nem hasonlít a káposztához. Az ember néhány rövid évszázad leforgása alatt nemesítette ki belőle a tápláléknövények változatos sorát. A kutyák története is hasonló (1.14. ábra).




1.14. ábra. A mesterséges szelekció állatokat formáló ereje. A képen látható kutyafajtákat az ember mind ugyanabból a vad ősből, a farkasból (fenn) tenyésztette ki: dán dog, angol bulldog, agár, hosszú szőrű tacskó, hosszú szőrű csivava.

Bár ismernek kutya-sakál, illetve kutya-préfarkas hibrideket, napjainkban a legtöbb szakember egyetért abban, hogy a házikutya összes fajtája egy néhány ezer éve élt farkasos (az ábra bal felső sarkában látható) leszármazottja. Olyan, mintha mi, emberek úgy gyúrtuk, formáltuk volna a farkashúst, mint a fazekas az agyagot. Persze nem a két kezünkkel dagasztottuk és kelesztettük a farkashúst agárrá vagy dakszlivá: felhalmozó találás, közismert szakkifejezéssel tenyésztés, vagyis mesterséges kiválogatás eredményeképp hoztuk létre őket. Az agártenyésztők *találtak* olyan példányokat, melyek agárszerűbbek voltak az átlagnál. Ezeket tenyésztették tovább, majd utódaik közül ismét a legagárszerűbbeket válogatták ki – és ez így ment nemzedékeken keresztül. Persze ennyire nem ment egyszerűen, és a tenyésztők fejében nem formálódott ki távoli célként a modern agár képe. Valószínűleg csak tetszettek nekik azok a vonások, amelyeket ma agárszerűnek tartunk, sőt az is lehet, hogy e külső jegyek más tenyészcél – pl. kiemelkedő nyúl vadász készség – melléktermékeként

jöttek létre. Az agarak és tacsók, dán dogok és bulldogok mind egy olyan folyamat szülöttei, mely jobban hasonlít a találásra, mint az agyagból való formázásra. Nem azonos azonban az egyszerű találással sem, mivel nemzedékről nemzedékre gyarapszik. Ezért nevezem ezt *felhalmozó találásnak*.

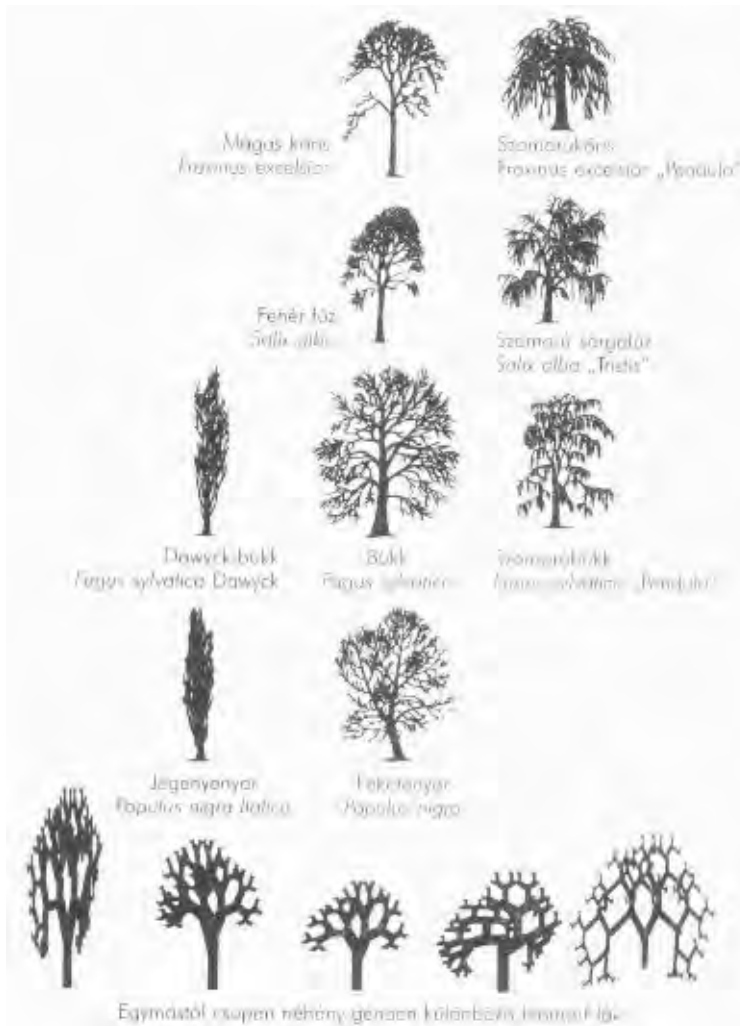
Vannak dolgok, amelyeket véletlenül lehet találni. A tervezett dolgokat egyáltalán nem lehet találni: ezeket alakították, öntötték, gyúrták, összeszerelték, kifaragták: így nyerte el formáját az egyedi tárgy. A tervezettnek tűnő dolgok felhalmozó találás útján születtek, az ember (pl. kutyák vagy káposztafajták) vagy a természet (pl. cápák) közreműködésével. Az öröklődés tényei biztosítják, hogy az egyes nemzedékek *véletlenszerű* javulásai sok nemzedék során felhalmozódnak. Sok nemzedéken át folyó felhalmozó találás eredményeképp tervezettnek tűnő lények jönnek létre, melyek láttán elakad a lélegzetünk a csodálkozástól, olyan tökéletesen megtervezettnek látszanak. Pedig ez nem valódi tervezettség, hiszen gyökeresen más folyamat hozta létre őket.

Milyen szép lenne, ha mindig be tudnánk mutatni ezt a folyamatot, ahányszor csak kívánjuk! A kutyák nemzedékei gyorsabban követik egymást, mint a mieink, de még így is tovább tart egy emberöltőnél, míg a kutyaevolúció látható mértékben előrehalad. Az ember kb. tízezred annyi idő alatt tenyésztette ki a csivavát, mint amennyi időre a természetnek volt szüksége, hogy a dinoszauruszok kihalásának idején élt csivavaméretű (bár egészen más alakú) rovarévó ősből kitenyessze a farkast. A valódi élőlények mesterséges szelekciója – legalábbis ha baktériumnál nagyobbakról van szó – még így is túl lassú ahhoz, hogy meggyőző bizonyítékot szolgáltatson a türelmetlen és rövid életű emberek számára. A folyamatot számítógép segítségével lehet rendkívüli mértékben felgyorsítani. A számítógépek – minden hibájukkal együtt – szemképrázlatot gyorsasággal képesek bármely jól meghatározható folyamatot szimulálni, többek között az állatok és növények szaporodási ciklusait is. Ha szimuláljuk az öröklődést – az élet legalapvetőbb folyamatát – és lehetőséget adunk arra, hogy időnként véletlenszerű mutációk léphessenek fel, döbbenetes, hogy mi képes evolválódni szemünk előtt a szelekció hatására néhány száz nemzedék alatt *A vak órásmester* című könyvemben próbálkoztam ezzel a megközelítéssel egy azonos nevű program segítségével. E program mesterséges szelekción keresztül számítógépes biomorfoknak nevezett teremtmények nemzedékeit tenyésztí ki.

A számítógépes biomorfok valamennyien egy ilyen  közös ősből fejlődnek ki, lényegében ugyanazon folyamat során, mely a kutyaajtát a farkasból létrehozta. A számítógép képernyőjén véletlenszerű mutációval keletkezett utódok csoportjai jelennek meg, és az ember választhat, hogy ezek közül melyikeket tenyésztí tovább. Ez magyarázatot igényel. Először is: mit jelent e számítógépes objektumok esetében az „utód”, a „gén” és a „mutáció”? Minden biomorf embriológiája megegyezik. Alapfelépítésük egy elágazó fa, vagy több ilyen egymással összekapcsolt fa sorozata. A fa részleteit – pl. hogy hány ága van, ezek milyen szögben állnak és milyen hosszúak – számok formájában tárolja a számítógép. A valódi fák génei – akárcsak a mieink vagy a baktériumokéi – DNS-nyelven írott kódolt üzenetek. A DNS nemzedékről nemzedékre nagy pontossággal, de nem tökéletesen másolódik át. A DNS minden nemzedékben „leolvasásra kerül”, és befolyást gyakorol az állat vagy növény alakjára. Az 1.15. ábra bemutatja, hogyan alakíthatja át csupán néhány gén megváltozása az

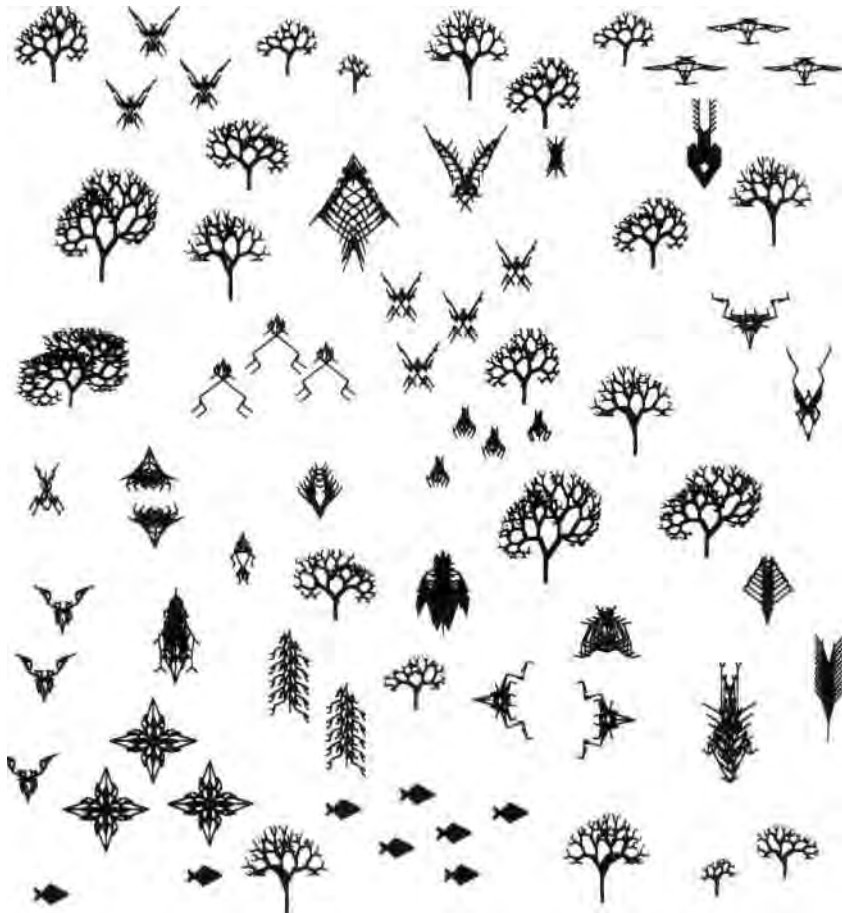
egész növény alakját új ágak kihajtását programozó növekedési szabályokon keresztül, valódi és számítógépes biomorf fák esetében egyaránt. A DNS ugyanúgy digitálisan kódolt információ, mint a számítógépben tárolt számok; a biomorfok „numerikus génjei” ugyanúgy adódnak át nemzedékről nemzedékre, mint a DNS-gének az állatoknál és növényeknél.

A biomorf utóda öröklí szülője összes génjét (csak egy szülője van, a biomorfok világában nincs nemiség), de adott a véletlenszerű mutációk lehetősége. A mutáció egy gén számértékének kismértékű, véletlenszerű csökkenése vagy növekedése. Az utód tehát hasonlít szülőjéhez, annyi eltéréssel, hogy pl. egyik ága meredekebb lesz, mert a 6. gén értéke 20-ról 21-re nőtt.



1.15. ábra. Valódi és számítógépes biomorf fák példái arra, hogy a növekedési szabályok egészen csekély megváltoztatásával hogyan változhat meg egyes fajok alakja. Egyes fafajoknak van „szomorú”, másoknak „égbetörő” kertészeti változatuk.

Biomorftenyésztő üzemmódban a számítógép a képernyő közepére rajzol egy biomorfot, köréje pedig kissé mutált utódainak csoportját. Mivel a gének csak kismértékben változhatnak, az utódok családként hasonlítanak szülőjükre és egymásra, de az emberi szem gyakran felfedezhet közöttük apróbb különbségeket. A számítógép egerének segítségével kiválaszthatunk egyet közülük továbbtenyésztésre. A képernyő a kiválasztott lény kivételével elsötétül, az a középső, szülői helyre kúszik, majd megszüli mutáns utódai csoportját. A nemzedékek során a kiválogató gyakorlatilag ugyanúgy irányíthatja az evolúciót, mint azt a kutyatenyésztők tették – csak sokkal gyorsabban. Az egyik dolog, ami engem meglepett, amikor először írtam ezt a programot, az volt, hogy a biomorfok milyen gyorsan eltávolodnak a kezdeti faalaktól. Kitenyészthetők „rovart”, „virágot”, „denevért”, „pókot” vagy „vadászgépet”. Az 1.16. ábra biomorfjai valamennyien száznemzedéknyi mesterséges szelekció eredményei. Mivel e lényeket számítógépen tenyésztjük, percek alatt sok-sok nemzedék születhet meg. Ha néhány percet játszunk e programmal egy nagy teljesítményű, modern számítógépen, kézzelfogható, eleven képet kapunk a darwini szelekció működéséről.



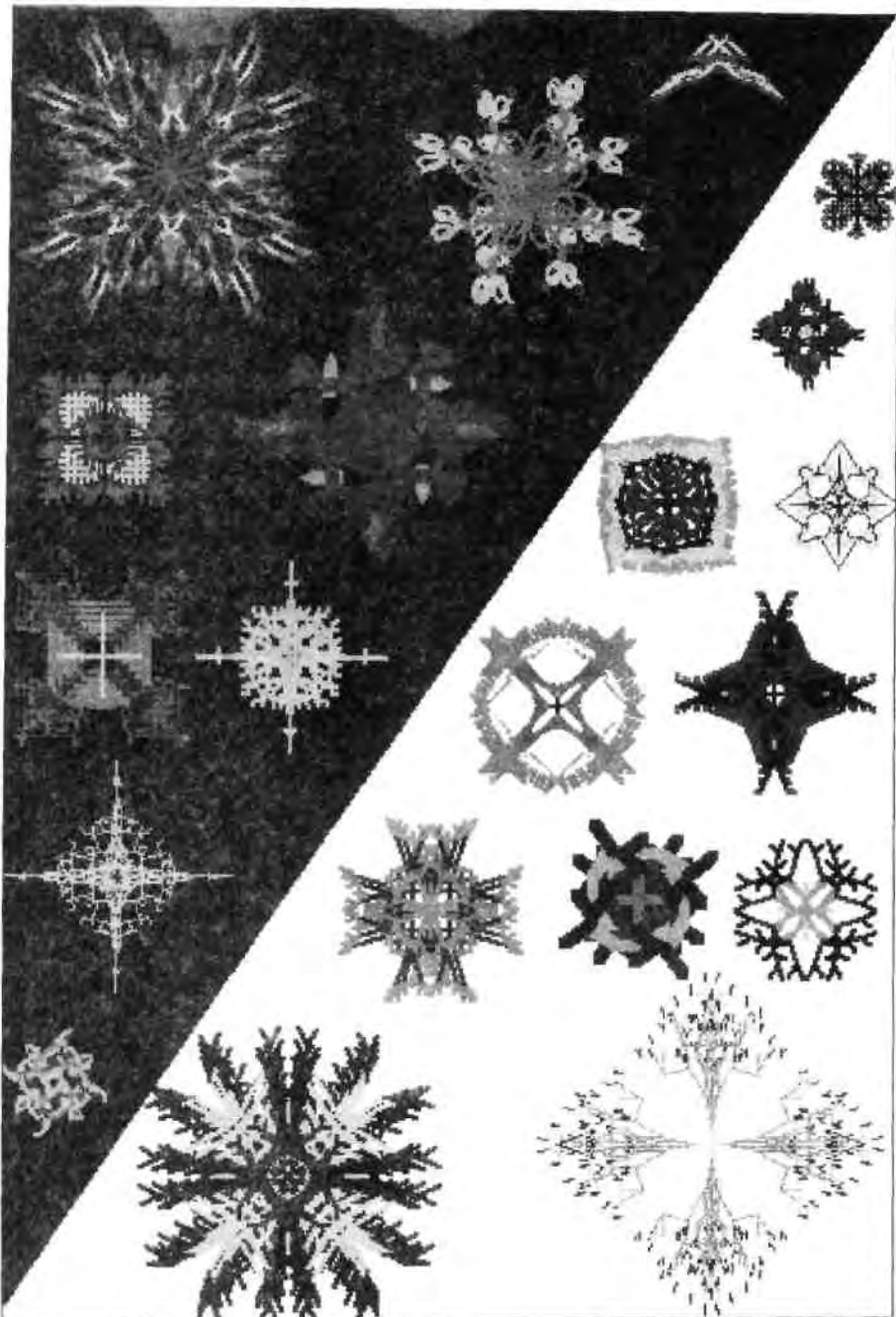
1.16. ábra. A „Vak Órásmester” programmal létrehozott fekete-fehér biomorfok kertje

Az 1.16. ábra állatkertjének biomorfjai számomra darazsak, lepkék, pókok, skorpiók, laposférgek, tetvek és olyan „teremtények”, melyek „biológiaiak” tűnnek, bár nem hasonlítanak Földünk egyetlen *bizonyos* fajára sem. Valamennyien rokonai, sőt közeli rokonai, a fáknek, amelyek között állnak, és a jobb felső sarokban látható vadászgépeknek egyaránt. Mindegyiknek 16 génje van, csupán e gének számértékében különböznek. Az állatkert bármely tagjától bármelyikig, sőt még több milliárd másikig is eljuthatunk egyszerű mesterséges kiválasztással.

A biomorfprogram legújabb változata színükben is változó biomorfokat is létre tud hozni. Alapja a régi program, de „embriológiája” bonyolultabb, és újabb géneket is bevezettem, amelyek az egyes ágak színét határozzák meg. További új gének azt szabják meg, hogy az ágak vonal, téglalap vagy ovális alakúak-e, hogy az alakzat kitöltött vagy üres, és milyen vastagok a vonalak. Az 1.17. ábra aligha adja vissza, milyen varázslatosak ezek a színes biomorfok. A színes programmal játszva úgy érzem, hogy nem a rovarok és skorpiók, hanem a virágok felé vezető evolúciós ösvényt járom, vagy egy olyat, mely a tapéta- és fűrdőszobacsempe-minták elvont világába vezet.

A biomorfokat az ember válogatja mesterséges módon. E téren a káposzta- vagy kutya-fajtákhoz hasonlítanak. A mesterséges kiválogatáshoz emberre van szükség, márpedig könyvünk elsősorban nem erről szól. A mesterséges szelekciót – Darwin nyomdokain járva – csupán egy másik folyamat: a természetes szelekció modellezésére használom. Végre elérkezett az idő, hogy magáról a természetes szelekcióról beszéljek. A természetes szelekció ugyanolyan, mint a mesterséges, csak hiányzik belőle a válogató ember. Nem az ember, hanem a természet „dönti el”, hogy melyik utód maradjon életben és szaporodhasson, és melyik pusztuljon el. Az idézőjel elengedhetetlen, hiszen a természet „döntése” nem tudatos. Ez olyan nyilvánvalónak tűnhet, hogy van, aki nem is érti, miért kell hangsúlyozni; nos, megdöbbenően sokan vannak, akik úgy gondolják, hogy a természetes szelekcióban valamiféle tudatos választás is szerepet játszik. Ez a lehető legnagyobb tévedés. Csupán arról van szó, hogy egyes utódok nagyobb eséllyel pusztulnak el, míg mások rendelkeznek azzal, ami a túléléshez és továbbszaporodáshoz szükséges. Ennek következtében a nemzedékek során egy-egy populáció tipikus egyede egyre tökéletesebbé válik a túlélés és a reprodukció terén. Mindig jobbra, ahogy azt majd pontosabban meghatározom, egy abszolút mértékkel mérve. A gyakorlatban nem feltétlenül lesz sikeresebb, mivel a túlélést állandóan fenyegetik más, szintén evolválódó, tökéletesedő lények. Lehet, hogy egy faj egyre agyafűrtabb módon menekül meg a rá vadászó ragadozó elől, de a ragadozó vadásztechnikája is egyre finomul, így a zsákmányállat végső soron nem nyer semmit. Az „evolúciós fegyverkezési verseny” érdekes kérdés, de nem szaladjunk előre.

A mesterséges szelekciót viszonylag könnyű számítógéppel modellezni – láttuk a biomorfok példáján. Az álmodom az, hogy megalkossam a természetes szelekció számítógépes modelljét is. A legjobb esetben szeretném az evolúciós fegyverkezési verseny feltételeit úgy beállítani, hogy „ragadozók” és „zsákmányállatok” jelenjenek meg a képernyőn, és hajszolják egymást az evolúciós tökéletesedés útján, míg mi karosszékünkben hátradőlve figyeljük őket.



1.17. ábra. A „Színes Órásmester” biomorfjainak kertje (fekete-fehérben). A háttér fekete-fehér háromszögei csupán esztétikai célt szolgálnak.

Sajnos ez nagyon kemény dió, az alább vázolandó okok miatt. Azt mondtam, hogy egyes utódok nagyobb valószínűséggel fognak elpusztulni – a nem véletlenszerű pusztulás szimulálása nem nehéz feladat. A szimuláció azonban akkor lesz élethű, ha a természetes pusztulás a számítógépes teremtmény valamilyen hiányosságának következménye: pl. rövid a lába, így lassabban fut, mint a ragadozó. Egyes biomorfok, pl. a 16. ábra rovarszerű lényei néha olyan függelékeket viselnek, amelyekről úgy gondoljuk, hogy lábaknak látjuk őket. A biomorfok nem használják őket semmire, és nincs is ragadozó, ami elől menekülniük kéne. Nincs zsákmányuk vagy tápnövényük. Világukban nincs időjárás, sem betegség. Elméletben a fentiek bármelyikét szimulálhatnánk; ám ha csak elszigetelten egyet vizsgálunk közülük, ez ugyanolyan mesterséges, mint maga a mesterséges szelekció. Megtehetjük pl., hogy kikötjük: a hosszú, vékony biomorfok gyorsabban elmenekülhetnek a ragadozók elől, mint a zömökek. Nem jelent gondot, hogy a számítógép meghatározza a biomorf méreteit és a legkarcsúbbakat válassza ki túlélőnek. Az ebből eredő evolúció azonban nem lesz túl érdekes. A nemzedékek múltával egyre girhesebb biomorfjaink lesznek – ennyi az egész, semmivel sem több annál, hogy mindig szabad szemmel választjuk ki a legsoványabb biomorfot. Nem árul el többet a természetes szelekció emergens tulajdonságaiból – pedig ezt várnánk egy jó szimulációtól.

A való világban zajló természetes szelekció sokkal nehezebben megfogható. Bizonyos tekintetben sokkal bonyolultabb, más szempontból mélyértelműen egyszerű. Az egyik probléma, hogy a javulás egy adott irányban, pl. a hosszabb láb irányában, csak korlátok közt javulás. A valóságban ugyanis létezik túl hosszú láb. A hosszú láb könnyebben eltörik, könnyebben belegabalyodik az aljnövényzetbe. Némi fantáziával megalkothatjuk a törés és belegabalyodás számítógépes szimulációját. Beépíthetjük a törés fizikáját: megtalálhatjuk a módját annak, hogyan szimuláljuk a legnagyobb kockázatnak kitett helyeket, a feszítőerőket, a rugalmassági tényezőket – bármit, amiről tudjuk, hogyan működik. A probléma azokkal a tényezőkkel van, amelyeket nem ismerünk eléggé vagy nem is gondolunk rájuk – és ebbe a kategóriába tartozik szinte minden. Nemcsak az optimális lábhosszt határozza meg számtalan tényező, amire nem is gondolunk: nagyobb baj, hogy a hossz csupán egyetlen az állat lábának számos tulajdonsága közül, amelyek egymással és más tényezőkkel kölcsönhatásban meghatározzák az állat túlélését. Szerepet játszik a láb vastagsága, merevsége, törékenysége, súlya, amit hordozni kell, az ízületek száma, a lábak száma, a lábak hegyessége. És eddig csak a lábakról beszéltünk, pedig az állat többi testrésze is belejátszik a túlélés valószínűségét meghatározó kölcsönhatásokba.

Míg próbáljuk elméleti számítógépes programba építeni egy állat túlélésének minden meghatározóját, állandóan mesterséges, emberi döntéseket hozunk. Ideális esetben teljes fizikát és ökológiát kéne szimulálnunk szimulált ragadozókkal és zsákmányokkal, szimulált növényekkel és élősködőkkel. Mindezen modell-lényeknek evolúcióra képeseknek kellene lenniük. A mesterséges döntések elkerülésének legegyszerűbb módja talán az lenne, ha kiselejteznénk a számítógépet, és mesterséges lényeinket háromdimenziós robotokként építenénk meg, melyek egy térbeli, való világban üldözik egymást. Ez esetben viszont olcsóbban megússzuk a dolgot, ha nem kellene robotok sem, hanem elkezdjük megfigyelni a való világ hús-vér állatait –

vagyis visszatérünk kiindulópontunkhoz. Ez az ötlet nem is olyan bizarr, mint amilyennek első pillanatra tűnik, egy későbbi fejezetben még visszatérek rá. Ezen felül a számítógép még valamire jó – de nem a biomorfok terén. A biomorfok egyik nagy hiányossága, hogy fluoreszkáló pontokból épülnek fel egy kétdimenziós képernyőn. A kétdimenziós világ sok tekintetben nem felel meg a valódi élet fizikájának. Olyan tulajdonságok, mint a ragadozók éles foga vagy a zsákmányállat erős páncélja; a ragadozó támadásának kivédéséhez szükséges izomerő vagy egy mérgező anyaggal szembeni ellenálló képesség nem születnek meg természetes módon e kétdimenziós világban. Létezik egyáltalán a ragadozó-zsákmány kapcsolatnak akár egyetlen olyan vonatkozása is, mely megjeleníthető természetes módon, művi túlbonyolítás nélkül, egy kétdimenziós képernyőn? Szerencsére létezik. A tervezettnek tűnő csapdákról szólva már említettem a pókhálókat. A pókok teste háromdimenziós, és a mindennapi fizika bonyolult világában élnek, akárcsak az élőlények többsége. Egyes pókok vadász módjának azonban van egy eleme, mely kiválóan alkalmas kétdimenziós szimulációra: a pókháló. A tipikus kerekháló, bármilyen szemszögből is nézzük, kétdimenziós szerkezet. Az áldozatul eső rovar ugyan a harmadik dimenzióban mozog, ám az igazság pillanatában, amikor eldől, hogy hálóba kerül vagy megmenekül, minden kétdimenziós térben játszódik. A pókháló a lehető legjobb példa, amit ki tudok találni a természetes szelekció kétdimenziós számítógépes képernyőn való érdekességeket feltáró szimulációjára. A következő fejezetet ezért nagyrészt a pókhálóknak szentelem: először felvázolom a valódi hálók természetrajzát, majd áttérek a hálók és evolúciójuk modellezésére a számítógépes természetes szelekció segítségével.

EZÜSTSZÁLAK HÁLÓJA

Egy élőlény megértésének egyik remek módja, hogy elképzeljük – játékosan, több mint költői szabadsággal –, hogy annak (vagy ha így jobban tetszik, feltételezett „teremtőjének”) feladatok sorát kell megoldania. Megfogalmazzuk a feladatokat, majd elgondolkozunk azon, hogy milyen megoldási lehetőségek jöhetnek szóba. Ezután megnézzük, mit tett az élőlény. Ennek során gyakran újabb problémákat fedezünk fel, amelyekkel az illető állatnak szembe kell néznie, így a sor folytatódik. *A vak órásmester* második fejezetében a denevérek bonyolult ultrahang-visszaverődésen alapuló tájékozódási rendszerét faggattam ezzel a módszerrel. Most a pókhálók esetében alkalmazom az eljárást. Ne feledjük, hogy a problémák egymás utáni megoldása nem egyetlen állat élete során megy végbe. Ha időbeli előrehaladásról van szó, annak léptéke az evolúciós lépték; de lehet, hogy az előrehaladás logikai síkon történik.

Az alapfeladat: rovarokat kell fogni, hogy jóllakhassunk. Egy lehetséges megoldás: a gyors repülés. Emelkedjünk a levegőbe, akárcsak zsákmányállataink. Repüljünk szélnél is sebesebben, tátott szájjal, pontos célzásra alkalmas éles szemekkel. Ezt a módszert követik a fecskék, de a gyors repüléshez, manőverezéshez és a megfelelő irányító rendszerhez roppant költséges „beruházásokra” van szükség. Ugyanez mondható el a denevérek megoldásáról, mely az előző éjszakai változata: fénysugarak helyett visszaverődő ultrahangot használnak a zsákmány felkutatásához.

Teljesen más irányt követnek az „ülj és várj” típusú megoldások. A fogólábúak, kaméleonok és sok más gyíkfaj egymástól függetlenül, konvergens módon fejlesztette ki ezeket. Lényegük a test kiváló álcázása és az őrjítően lassú becserkészás, majd a kirobbanó végső roham: a nyelv vagy a mellső láb villámgyors mozdulata. A kaméleon nyelve képes elcsípni egy legyet az állat testhosszával összevethető sugarú körön belül bárhol. Az imádkozó sáska fogólábának hatósugara hasonló nagyságrendű. Azt hihetnénk, hogy e megoldás javítható, ha a nyelv vagy a fogóláb hosszát növeljük. A testnél jóval hosszabb nyelv vagy fogóláb kialakítása és fenntartása korlátozó mértékben költséges: az így elcsípett pluszlegyek nem fedezik a többletráfordítást. Találunk-e olcsóbb megoldást a fogószerv hatósugarának kiterjesztésére?

Mi lenne, ha hálót szőnének? A hálóhoz anyagra van szükség, és az nincs ingyen. A kaméleon nyelvvel ellentétben azonban a hálónak nem kell mozognia, így megspórolhatjuk a nagy tömegű izomszövetet. Ha tündérhaj-vékonyágú, csekély ráfordítással nagy területet beboríthat. Ha a fogóláb vagy a nyelv izomzatának megfelelő fehérjetömegből selyemszálát készítünk, az sokkal hosszabb lesz, mint a kaméleon nyelve. Akár a test felületénél százszor nagyobb területet is beboríthat az a mennyiség, mely a test kicsiny mirigyeiben csekély költséggel előállítható.

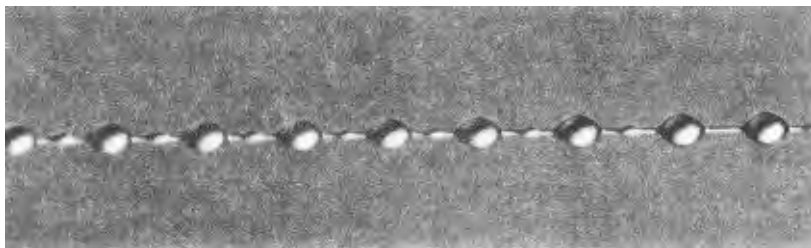
Az ízeltlábúak világában (ide tartoznak a rovarok és a pókok) gyakori a selyem. Az araszolóhernyók egyetlen selyemszállal rögzítik magukat a gallyhoz. A szövőhangyák leveleket erősítenek össze a lárváik által kiválasztott selyemfonállal, amit élő vetélőként tartanak a szájukban (2.1. ábra). Sok hernyó selyembe pólyálja magát, mielőtt kifejlett rovarrá alakulna. A szövőlepkék hernyói egész fájukat selyemfátyolba burkolják. A selyemhernyó gubója készítéséhez közel másfél kilométernyi selyemszálat sző. Bár az ember selyemiparának alapja a selyemhernyó, az állatvilág selyemszövő mesterei a pókok. Meglepő, hogy a pókfonalat nem használjuk többre, mint hogy mikroszkópok finom hajszálkeresztjét készítjük pókfonalból. Jonathan Kingdon zoológus és művész *Maga, erejéből lett ember (Self-Made Man)* című gyönyörű könyvében arról elmélkedik, hogy vajon nem a pókfonal hatására fedezték-e fel a gyerekek technikánk egyik legfontosabb elemét: a kötelet. A madarak mindenestre felismerték a pókfonal mint építőanyag kiváló tulajdonságait: 165 madárfajt ismerünk, melyek fészükbe pókfonalat is beledolgoznak. (E fajok 23 különböző családba tartoznak, így feltételezhető, hogy a pókfonal hasznosítását többször, egymástól függetlenül is felfedezték.) A jellegzetes kerekhálót készítő koronás keresztspók (*Araneus diadematus*) teste végén található szövőszemölcséből hat különböző selyemtípust bocsát ki, melyek a potroh szövőmirigyekben termelődnek; tetszés szerint tudja őket váltogatni attól függően, hogy milyen célból van rá szüksége. A pókok jóval korábban készítettek selymet, mint hogy a hálóépítés képességét megszerezték volna. A hálót soha nem készítő ugrópókok ugrás előtt biztonsági szállal rögzítik magukat – mint a hegymászók, akik biztosítókötélüket az utolsó biztos pontra kötik.

A selyemfonál tehát már ősidők óta megtalálható a pókok eszköztárában, és remekül megfelel arra a célra, hogy rovarfogó hálót készítsenek belőle. Arányait tekintve a hálót szövő pók olyan, mint egy bálnányira tátott szájú fecske vagy egy tizenöt méteres nyelvű kaméleon. A pókháló hihetetlenül gazdaságos. Míg a kaméleon izmos nyelve az állat testtömegének jelentős részét teszi ki, egy pókháló selymének tömege – hossza egy nagy háló esetén elérheti a húsz métert – kevesebb, mint a pók testtömegének ezredrésze. A pók ráadásul újrahasznosítja a selymet: a használt hálót megeszi, így nagyon kevés anyag megy veszendőbe. A hálókészítés technikájának természetesen megvannak a maga buktatói is.

A hálójában ülő pók számára nem mellékes, hogy a hálóba ütköző rovar ott is maradjon. Két gond lehet. A rovar széttépi a hálót és továbbrepül. Ez megelőzhető, ha a háló anyaga nagyon rugalmas, ám ez a megoldás fokozza a második probléma fellépésének valószínűségét: a hálóba ütköző rovar visszapattan, mint egy gumiasztrólól. Az ideális selyem, a kutató kémikusok álma, hosszan kinyúlik, hogy elnyelje a nagy sebességgel nekirepülő rovar lendületét; alakjának visszanyerése azonban – a gumiasztrálólól kiküszöbölése végett – késettett. Mint Fritz Vollrath oxfordi, majd jelenleg aarhusi (Dánia) professzor és munkatársai megállapították, a pókfonalak legalább néhány fajtája – rendkívül bonyolult szerkezetének köszönhetően – éppen ilyen. A 2.2. és a 2.3. ábrán nagyítva bemutatott selyemfonál jóval hosszabb, mint amilyennek tűnik, mivel hossza nagy részt vízceppszerű golyócskákban feltekerve található.



2.1. ábra. Selyemművesek. Szövőhangyák lárváikat élő vetélőként használják.
Oecophila smaragdus, Ausztrália



2.2. ábra. Pókháló selyemfonalának gyöngyöcskéi



2.3. ábra. Egy gyöngyöcske nagyítva: látható benne a feltekeredett, csörlőként működő fonál

Olyan ez, mintha egy nyaklánc gyöngyeiben tartalék fonál rejtőzne. A feltekerés hogyanját még nem egészen értjük, de az eredmény kétségtelen. A pókfonál nyugalmi hosszának tízszeresére is megnyúlhat, visszaugrása pedig elég lassú ahhoz, hogy a zsákmányt ne lője ki a hálóból.

Hogy a zsákmány ne szabadulhasson ki, a hálónak ragadósnak is kell lennie. Az előbb említett módon feltekeredett fonalakat borító anyag valójában nem vízszerű, hanem ragacsos. Elég, ha a rovar csak hozzáér – nem egykönnyen szabadul. A ragadósságot az egyes pókok nem egyformán érik el. A fonálszűrős pókok különleges szövőmirigye – a hozzá csatlakozó fonálszűrő nevű szerkezetnek köszönhetően – többszálú selymet termel. A szálakat a lábszárakon található fésűszerű nyüstön húzzák át. Az így „feltupírozott” többszálú selyem kusza bozonttá duzzad (2.4. ábra), mely szabad szemmel ugyan nem látható, de éppen megfelelő ahhoz, hogy a rovarlábak belegabalyodjanak. A fonálszűrőn átfésült „tupírozott” selyemszálak pontosan úgy viselkednek, mint az előbb említett ragadós szálak, csak „ragadósságuknak” más az eredete. Ez a ragadósság tovább megmarad. A ragasztóanyagot használó pókoknak minden reggel újra kell szőniük hálójukat. Igaz, ez a munka – bármilyen hihetetlen – egy órán belül elkészül, de a természetes szelekcióval szemben minden perc számít.

A ragadós szálak viszont újabb, ironikus kérdést vetnek fel. A ragasztóanyaggal bekent vagy gubancossá tupírozott szálaikat, melyek képesek a zsákmányt fogságba ejteni, nehézséget jelentenek a hálójában ügyködő pók számára is. A pókok semmiféle varázslatos védettséggel nem rendelkeznek, de az evolúció során kialakítottak egy olyan megoldást, mely legalább részben megakadályozza, hogy „a saját vermükbe essenek”. A ragasztós hálójú pókok lábát speciális olajos bevonat védi attól, hogy odaragadjanak. Ha éterbe mártjuk a pók lábát, ez a védőréteg leoldódik – oda a védelem! A másik, részleges megoldás, hogy a pókok beépítenek néhány nem ragadós szálat is: a központból minden irányban kifutó főküllőket. A pók maga – a finom fonál megragadására alkalmas apró karmokat viselő lábaival – ezeken szaladgál, gondosan elkerülve a küllőfonalakat ácsolatára csigavonalban felerősített ragadós fogófonalat. Ez nem jelent gondot számára, mivel rendszerint a háló középpontjában, a köldökben ül – innen pedig a legrövidebb út a háló bármely részéhez egy küllőn át vezet.



2.4. ábra. Így is lehet egy fonál ragadós: fonálszűrős pók „tupírozott” fonala

Térjünk most át azon problémák sorozatának vizsgálatára, melyeket a hálószővés során kell megoldania pókunknak. A pókok nem egyformák; példaként a közismert

koronás keresztespókot (*Araneus diadematus*)¹ választottam. Az első feladat: hogyan juttassa át az első szálát azon a térrészen, ahol a háló majd kifeszül – pl. egy fa és egy szikla között. Ha ez az első, létfontosságú szál megvan, használhatja hídként. De hogyan építse meg a hidat? A gyalogos megoldás: a fonalat maga után húzva lemászik, átmegy, majd újra föl. Valóban előfordul, hogy ezt a megoldást választja, de van ennél szellemesebb is. Pl. a sárkányeregetés. Ki tudja-e használni a selyemfonál könnyűségét? Természetesen. Íme, mit tesz a pók, ha van elég légmozgás: Egyetlen fonalat kezd kibocsátani, a végén apró, lapos selyemvitorlával vagy „sárkánnyal”, ami lebeg a levegőben. A sárkány ragadós: ha hozzáér a túloldalra valami szilárdhoz, odaragad. Ha nem kapaszkodik meg, a pók visszavonja, megeszi, hogy az értékes anyagot újrahasznosíthassa, majd új sárkánnyal újra próbálkozik. Végül sikerül használható hidat kifeszítenie. Saját oldalán gondosan odaragasztja – készen áll a híd, tessék átkelni!

Az első híd valószínűleg laza, hiszen a fonál hosszát a véletlen határozta meg, nem az adott távolsághoz szabták. A pók vagy megrövidíti, hogy a háló egy oldalát képezze, vagy V alakban kihúzza, ekkor két főküllő lesz belőle. Gond azzal lehet, hogy a V nem elég mély ahhoz, hogy két megfelelő küllő legyen; ilyenkor pókunk nem a hidat változtatja meg, hanem arra támaszkodva új, hosszabb szállal helyettesíti, a következő módon: a híd egyik végén állva új fonalat bocsát ki és gondosan rögzíti azt. Ezután elharapja a régi hidat, a szabaddá vált véget lábai közé fogja, és elindul az új híd maradékán, míg hátulról az egyre hosszabbodó új fonál tartja. Míg átmászik, élő kapcsolatot képez saját hídja két fele között. Az első híd megtette kötelességét, ezért a pók megeszi. Fantasztikus módon kel át a levegőn: eszi a régi hidat, hátul pedig építi az újat. Ráadásul hátul gyorsabb ütemben bocsátja ki a selymet, mint ahogy elől fogyasztja. Az új híd tehát, gondosan szabályozott mértékben, hosszabb, mint a régi. Mindkét végén rögzítve éppen a megfelelő mélységben lóg le a közepe ahhoz, hogy V alakba húzva ki lehessen alakítani a háló középpontját.

Ennek érdekében pókunk visszamászik új hídjának közepére, és saját súlyát felhasználva petyhüdt görbéből feszes V-vé húzza. A V két szára lesz a háló két főküllője. Könnyű kitalálni, melyik küllő lesz a következő. Logikus, hogy függőlegest kell bocsátani a V hegyétől lefelé, hogy a leendő hálót alulról is rögzítse, és a V-t feszesen tartsa akkor is, ha a pók súlya nem húzza ki. Pókunk tehát új fonalat ragaszt a V csúcsához, majd függőön módjára leereszkedik a talajra vagy más alkalmas pontra, ahol rögzíti a függőleges küllőt. Takaros Y-t formázva készen van a háló három főküllője.

¹ Tudományos neveket fogok használni, és remélem, olvasóim megbocsátják az alábbi tankönyvízü lábjegyzetet, mivel úgy érzem, hogy a művelt emberek meglepően nagy része – akik ugyanakkor szemforgatóan hivatkoznak Darwin mesterművére, a *Fajok eredetére* – nem tudja, hogyan kell azokat használni. A tudományos („latin”) nevek két részből: egy nemzetség- (pl. *Homo*) és egy fajnévből (pl. *sapiens*: a *Homo* nemzetség egyetlen ma élő faja) állnak. Ezeket rendszerint dőlt betűvel írjuk, eltérően a nagyobb rendszertani egységek nevéétől: a *Homo* nemzetség az emberfélék (Hominae) családjába tartozik. A nemzetségnevek mindig egyediek: csak egyetlen *Homo*, csak egyetlen *Vespa* nemzetség létezik. Ugyanaz a fajnév több fajt is jelölhet, a kavardást a nemzetségnevet egységessége kizárja. A *Vespa vulgaris* darázs nem keverhető össze az *Octopus vulgaris* polippal. A nemzetségnevet mindig nagy, a fajnevet mindig kis kezdőbetűvel írjuk (bár régebben a nevekből képzett fajnév megtartotta a nagy kezdőbetűt, ma már a *Darwini*-nak is *darwinii* a helyes írásmódja). A *homo sapiens* vagy *Homo Sapiens* írásmódok – bár találkozhatunk velük – mindenképpen hibásak.

A következő két feladat: megépíteni a középpontból sugárirányban kifutó további küllőket és a háló külső peremét. Pókunk zseniális módon gyakran egy időben oldja meg ezt a két feladatot, lélegzetelállítóan bonyolult módon dupla, sőt tripla szálakat szőve, melyeket később, a már meglévő küllőkön haladva szétválaszt. E fejezet első változatában részletesen leírtam, hogyan viszi végbe ezt a hihetetlen ügyességet igénylő varázslatot, de beleszédültem. Mikor szerkesztőim egyike panaszkodott, hogy forgott vele a világ, mire elolvasta, fájó szívvel bár, de kihagytam ezt a részt. A pók munkálkodása ezen szakaszának gyümölcse egy tökéletes kerék 25-30 küllővel (számuk fajról fajra és egyedről egyedre is változhat) – a háló főváza. Most azonban még olyan, mint egy biciklikerek: felülete nagyrészt üres, egy légy könnyedén átrepül rajta. Még ha neki is ütközne a fonalnak, nem ragad oda, mert ezek nem ragadós fonalak. Szükség van még sok-sok, a küllőkön keresztbe futó szála. Ezt többféleképpen is meg lehet csinálni. Beszöhetné a pók egymás után az egyes küllőközöket ide-oda cikcakkolva, a középponttól kifelé haladva majd vissza. Ennek során azonban nagyon sokszor kellene irányt változtatnia, ez pedig idő- és energiapocsékolás. Jobb, ha csigavonalban halad körbe-körbe a hálón, és valóban, a pókok többsége ezt teszi – bár néha cikcakkolnak is.

Cikcakk vagy csigavonal, vannak még más gondok is. A rovarokat ténylegesen megfogó ragadós fonál kifeszítése nagy pontosságot igénylő munka. A fonalnak egymástól pontosan adott távolságra kell futniuk. A küllőkkel való kapcsolódást gondosan kell kivitelezni, különben a háló kusza gubanccá ugrik össze, nagy lyukakkal, ahol kiszállhat a zsákmány. Ha e precíz elhelyezést a pók úgy próbálná megoldani, hogy egyedül a küllőn egyensúlyoz, súlya valószínűleg kitértené azt a megfelelő helyzetből, így a ragadós fonalat rossz helyen, rossz feszítéssel rögzítené. Másrészt a háló pereme felé két küllő távolsága gyakran nagyobb, mint amit a pók lábaival át tud hidalni. Mindkét probléma megoldható, ha a fogófonalak csigavonalát a háló közepéből indítjuk és kifelé haladunk. A köldök közelében a küllők közötti rés szűk, az egymást támogató küllők nehezebben deformálódnak el a pók súlya alatt. Kifelé haladva a küllők közötti távolság szükségszerűen nő, de ez nem baj: a már kifeszített spirálkörök áthidalják a rést és erősítik a szerkezetet. A gond csak az ezzel az elképzeléssel, hogy a rovarfogásra alkalmas fonál nagyon vékony és rugalmas – nemigen lehet bekapaszkodni. Ha az egész spirál elkészült, a háló stabil, de félkész állapotban még gyenge.

Ez a finom fogófonalak felrakásának legsúlyosabb, de nem egyetlen nehézsége. Jusson eszünkbe, hogy bár a sugárirányú küllők nem ragadósak és viszonylag jó fogódzót nyújtanak a pók lábainak, most már ragadós, kifejezetten rovarfogásra való fonalakról van szó. Már láttuk, hogy a pókoknak maguknak is gondot jelent saját hálójuk ragadóssága. De még ha nem is így lenne, ha mindig a spirálkész íven mászva készítenék el a következő ívet, a fogófonál veszítené értékes ragadósságából. Hiába tűnik tehát jó ötletnek, hogy a spirált belülről kifelé, a kész íveken mozogva kell felrakni, ez az út – szó szerint értelmezve is – nem járható.

A pók megoldja a feladványt, mégpedig úgy, ahogy az építkező ember is szokta: ideiglenes állványzatot emel. Készít egy belülről kifelé haladó csigavonalat, de ez még nem a végleges fogóspirál, hanem egy különleges segédspirál, melyet csak egyszer

használ, arra, hogy ennek mentén szerkessze meg a fogóspirált. A segédspirál nem ragadós, és ritkásabb menetű, mint a végleges: nemigen lehetne vele zsákmányt ejteni. Ugyanakkor erősebb, mint a majdani fogóspirál. Megmerevedve szilárdítja a hálót, és biztos támasztékot nyújt a póknak a küllők között, mikor végre nekiáll elkészíteni a végső, ragadós spirált. A segédspirál csak 7-8 fordulatot tesz a köldök és a perem között. Mikor elkészült, a pók bezárja nem ragadós szövömirigyeit, és megnyitja a halált hozó fogófonalat termelőket. Most visszafelé halad a spirálon, a peremtől a köldök felé, szorosabb és egyenletesebb csigavonalban rakja fel a fogófonalat. Az ideiglenes segédspirált nemcsak állványzatként és támasztékként, de vonalvezetőként is használja. Menet közben szakaszonként elrágja a feladatát betöltött segédspirált. Mikor keresztez egy küllőt, a ragadós fonalat gondosan, gyakran takaros, a csirke- vagy halászhaló csomóira emlékeztető módon rögzíti. Az ideiglenes állványzat anyaga sem megy kárba: darabjai ott maradnak a küllőkhöz rögzítve, majd a háló végső lebontásakor – talán azért nem korábban, mert túl sok időt veszítene, míg leszededgeti őket a küllőkről – a pók ezeket is megeszi.

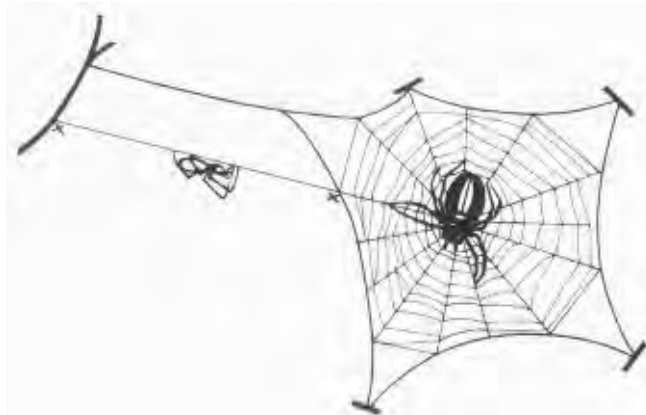
Mikor a pók visszatér a köldökbe a befelé tartó csigavonal mentén, még mindig nincs kész a háló. Még be kell szabályozni a feszességet: finom, nagy gondosságot igénylő munka ez, mint egy húros hangszer hangolása. Pókunk a háló középpontjában állva finoman húzogatja azt lábaival, hogy érezze a feszességet; ha szükségesnek érzi, lazít vagy feszít egy keveset, majd más szögből újra megismétli a műveletet. Egyes pókok bonyolult csipkeszövevényt készítenek a köldök köré, melyet a háló feszességének finom szabályozására használnak.

Hím és nőtény pókok egyaránt szőnek hálót, sőt a frissen kikelt pókocskák is készíthetnek apró hálócskákat. A nőtények nagyobbak és feltűnőbbek. Ha ehhez hozzávesszük azt a tényt, hogy a pókok – legyenek bármely neműek vagy korúak – mindent megesznek, ami náluk kisebb, megérthetjük, hogy a hím pókok nincsenek könnyű helyzetben. A pókok bogarak, hangyák, százlábúak, békák, gyíkok, cickányok és sok madár étlapján szerepelnek. A darazsak egyes csoportjai kifejezetten pókfogásra specializálódtak, ezzel etetik lárváikat. A pókok legveszélyesebb ragadozói azonban minden valószínűség szerint a többi pókok, tekintet nélkül a faji határokra. Minden pók, amikor egy nagyobb pók hálójába téved, halálos veszélyben forog – egy hím póknak azonban szembe kell ezzel néznie, hogy megtehesse, amit meg kell tennie.

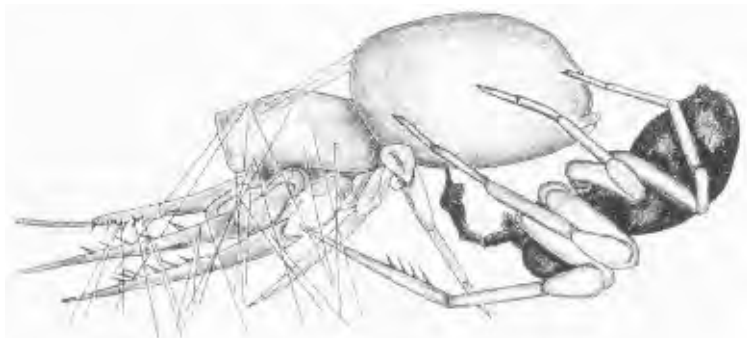
Hogy a hímek hogyan birkóznak meg ezzel a feladattal, az fajról fajra változik. Van, amelyik selyemfonalba csomagolt legyet ajándékoz a nőténynek. Megvárja, míg annak csáprágói biztonságos mélységben belehatolnak a légybe, ekkor lát csak hozzá a párzáshoz. A csomagolt légy nélkül érkező hímekkel megeshet, hogy a nőtény gyomrában végzik. Másrészt az is előfordulhat, hogy a hím üres csomaggal veri át párját, vagy párzás után kiragadja annak csáprágói közül a finom falatot, és kereket old vele – talán azért, hogy egy másik hölgynek ajánlja fel. Más fajokban a hímek azt használják ki, hogy közvetlenül vedlés után, mielőtt az új kültakaró megszilárdulna, a nőtény többé-kevésbé védtelen. A hímeknek, ha valamikor, hát ilyenkor van esélyük a párzásra; egyes fajoknál nem is lehet ezt máskor megfigyelni, csak amikor a nőtény, közvetlenül vedlés után, lágy és engedékeny – de legalábbis ellenállásra képtelen.

Más fajok vonzóbb módon közelednek; ez mégér egy kitérőt. A hálókészítő pókok selymes feszültségek vibráló világában élnek. A selyemfonalak kiterjesztett végtagok, kutató antennák, szinte olyanok, mint a szemek vagy a fülek. A feszülések és lazulások, összehúzódások és elernyedések, elmozduló egyensúlyok eseményekről árulkodnak. A nőstény pók szívének húrja feszes, erős selyemből készült. Ha egy hím udvarolni kíván, ráadásul úgy, hogy ne egyék meg vagy legalább ne rögtön, legjobb, ha megtanul e húrokon játszani. Jobb oka magának Orfeusznak sem volt. Egyes hímek közvetlenül a nőstény hálójának széléhez telepsznek, és úgy pengetik azt, mintha hárfá lenne (2.5. ábra). A ritmikus pengő hang más, mint amit bármely zsákmány kivált, és úgy tűnik, felkelti a nőstény érdeklődését. Sok faj hímje nem merészkedik ilyen közel: különleges „párfonalat” rögzít a nőstény hálójához, és úgy játszik rajta, mint egy dzsesszgitáros egy egyhúros basszusgitáron. A rezgések a párfonálon át átvéődnek a nőstény hálójára, és megrezegtetik azt. Elnyomják vagy késleltetik a választott hölgy normális táplálkozásra való késztetését, és arra csábítják, hogy a párfonalat végigkövetve megkeresse a dallam forrását – itt kerül sor a párfásra. A történet nem mindig zárul happy enddel a hím halandó testére nézve – ám hallhatatlan génjei már biztonságban utaznak tovább a nőstény testében. A földet benépesítő pókok között szép számmal találunk olyanokat, melyek hím felmenői nem sokkal élték túl a nászt. Olyan pók azonban nincs, amelynek ősei ne vállalták volna a kockázatot.

Mielőtt befejeznénk e selymes-erotikus történetek sorát, elmesélek még valamit – kiki értse tetszése szerint. Vannak olyan pókfajok, amelyeknél a hím párfás előtt lekötözi a nőstényt, akárcsak a törpék Gullivert (2.6. ábra). Csábító a magyarázat, hogy a hím kihasználja, hogy a nőstény táplálkozási ösztönét egy időre elnyomja a nemi vágy: ilyenkor megkötözi, hogy biztonságosan elmenekülhessen, ha a hölgy étvágya visszatér. A következőt hallottam, nem tudom, igaz-e: párfás után a nőstény könnyedén lerázza magáról a kötelékeket, és továbbsétál. Talán a rituális megkötözés egy ősi, komoly gúzsbakötés szimbolikus csökevénye.



2.5. ábra. Diszkréció: a hím pók párfonalat erősít a nőstény hálójához



2.6. ábra. A hím pók lekötözi a nagyobb testű nőstényt

Az is lehet, hogy csak addig szükséges a nőstényt akadályozni, amíg a hím egérutat nyer, hiszen a hímnek sem érdeke, hogy párja kötelek között pusztuljon el: le kell raknia petéit, különben az egész veszedelmes kaland genetikai szempontból hiábavaló volt.

Térjünk vissza a kerek hálók építéséhez és használatához. Hálóépítő pókunkat kerek hálója köldökében hagytuk, a hálószövés vége felé, a háló kifeszítésének finomítása közben. Hogy gondjaink sorát folytassuk, egy olyan háló, mely elég sűrű szövésű ahhoz, hogy zsákmányt ejtsen, túl sűrű ahhoz, hogy a pók egyik oldaláról a másikra átmászhasson. A háló pereméig vezető hosszú út elkerülése érdekében gyakran „átjárót” nyit a pók: ez rendszerint egy gyűrű a köldök körül, ahol nincsenek ragadós fonalak. Mások, pl. a *Zygiella* keresztespók-nemzetség tagjai, egy teljes körcikket szabadon hagynak. Bár „átjárónak” neveztem azt a képződményt, lehet, hogy ez nem is olyan fontos szerepe, mint gondolnánk, mert éppen a *Zygiella* nem a köldökben szokott üldögélni, mint a pókok többsége, hanem az egyik oldalon sző magának csőszerű búvóhelyet – olyan okból, mely elvezet a pókok következő megoldandó feladatához.

A pókok maguk is ki vannak téve annak, hogy valaki, pl. egy madár megeszi őket. A háló selyme olyan finom, hogy szinte csak bizonyos szögben beeső fényben vagy harmatcseppektől gyöngyözötten lehet észrevenni. Közepén trónoló építője azonban sokkal feltűnőbb. Egy jól táplált, madaraknak szembeötölő pók jobban teszi, ha nem a hálóban üldögél. Másrészt viszont a pókok vadászmodsjának alapvető vonása, hogy hosszú időn át lesben ülve várják a zsákmányt; erre viszont a köldök a legalkalmasabb, hiszen itt fut össze az összes nem ragadós selyem országút. Ismét kompromisszumos megoldásra van szükség, melyet a különböző fajok különbözőképpen hoznak meg. Az előbb említett *Zygiella* nőstény hálóján kívül telepszik le, de azért igyekszik az események középpontjában maradni: búvóhelyéről jelzőfonál vezet a köldökhöz. Ez a feszes jelzőfonál minden rezgést azonnal közvetít a lesben ülő póknak, és az rajta keresztül egy pillanat alatt felszaladhat a köldökbe, majd onnan a legmegfelelőbb küllőn a vergődő zsákmányhoz. A jelzőfonál éppen az előbb említett üres hálócikk közepén fut. Talán azért üres ez a rész, mert keresztben futó ragadós szálak akadályoznák a pókot, mikor a köldök felé rohan? Vagy azért, mert a rezgés közvetítését zavarnák?

A *Zygiella*, tehát azt a kompromisszumos megoldást választotta, hogy a hálón kívül ül lesben. Ennek kétségkívül az az ára, hogy némi hátránnyal indulhat a hálóban

vergődő zsákmányhoz (ha nem értenék, miért fontos itt a gyorsaság, később még visszatérek rá). A másik lehetséges megoldás: a pók a köldökben ül, de igyekszik olyan észrevehetetlen lenni, amennyire csak lehet. A pókok gyakran sűrű selyemmatracot szőnek a köldökbe, mely mögé elbújhatnak vagy aminek a háterébe beleolvadhatnak. Némely hálók közepén rendkívül sűrű, cikcakkos fonálszövedék látható, mely elterelheti a figyelmet a közepén lapuló pókról – de az is lehet, hogy e szálak csak a háló finom kifeszítésének eszközei. Mások különféle „díszeket” szőnek hálójukba, melyek mintha „álpókokra” hasonlítanak – talán az a céljuk, hogy megóvják gazdájukat a madárcsőröktől; bár felvetették azt is, hogy egészen más a szerepük: a (számunkra láthatatlan) ultraibolya sugárzást úgy verik vissza, hogy a rovarok szeme azt kék égbé, vagyis: lyukként látja.

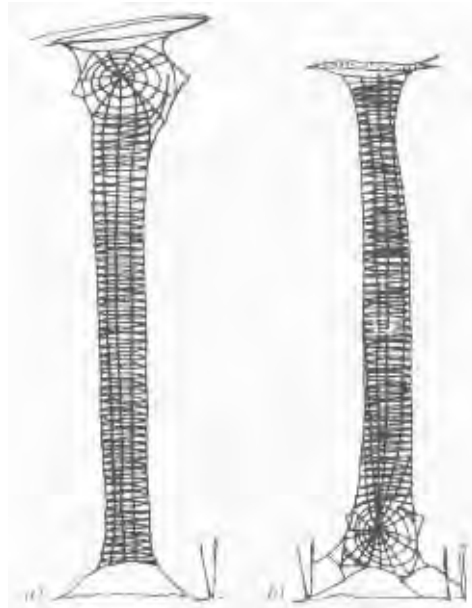
Említettem, hogy a póknak a lehető leggyorsabban kell zsákmányához rohannia. Miért? Miért nem várja meg, míg a haláltusa befejeződik? A válasz az, hogy a vergődés gyakran sikerrel jár. A hálóba esett rovarok, főleg az erősek, nagytestűek, pl. a darazsak, néha kiszabadulhatnak. Ha már egyszer megvan a rovar, hogyan akadályozzuk meg, hogy elszabaduljon? Ez a következő pókfeladat.

A legkézenfekvőbb megoldás kegyetlenül egyszerű. A vergődés keltette rezgések irányában rohanj oda az áldozathoz és mard halálra. Ha abbahagná a vergődést, míg keresed, mozgasd meg a küllőket, és azok feszüléséből állapítsd meg, hol terheli meg egy rovar súlya a hálót. Ha odaértél, birkózd le, és próbálj halálos vagy bénító idegméreg-injekciót adni neki. A legtöbb pók éles, üreges csáprágójához méregmirigy csatlakozik. Némelyikük, pl. a hírhedt fekete özvegy marása az emberre is veszélyes, de a közönséges pókok többsége nem képes átharapni az emberi bőrt, és mérge is kevés lenne ahhoz, hogy egy nagytestű állatnak ártson. Miután sikerült csáprágóit áldozatába mélyesztenie, pókunk még rendszerint vár néhány percig, hogy a vergődés megszűnjön.

A mérges marás nem az egyetlen módja az áldozat legyőzésének. A többi megoldásban – mint azt a pókoktól várhatjuk – a selyem játszik szerepet. Sok pók még a gyilkos marás előtt rávet némi selymet az áldozatra, hogy annak testét és végtagjait jobban lekötözze. Ha a zsákmány veszélyes, pl. darázs, a pók körbe-körbe forgatva egészen beburkolja selymébe, mielőtt megadná a mérges kegyelemdőfést.

A lepkék terjedelmes pikkelyes szárnya újabb gondok forrása. A pikkelyek könnyen lepereregnek – ha egy lepkét kézbe veszünk, ujjainkat egykettőre a levált pikkelyek finom pora borítja. A pikkelypor, mivel úgy tűnik, tönkreteszi a pókfonál ragadósságát, segít a lepkének kiszabadulni. Sok éjszakai lepke, ha veszélybe kerül, eldobja szárnyait, és lepottyan a földre. Ezért-e vagy mert hálóba gabalyodott szárnyát már úgysem használhatná repülésre, sok éjszakai lepke zuhanással menekül meg a pókhálóból. Ez új lehetőséget tár a pókok elé – akik nem is hagyják azt kihasználatlannal.

Michael Robinson (jelenleg a Washingtoni Nemzeti Állatkert igazgatója) és felesége, Barbara különös hálót fedeztek fel Új-Guinea őserdejében (2.7a ábra). Az új-guineai létraháló lényegében szabályos kerekháló, de alsó oldala méteres függőleges szalaggá nyúlik. A pók a felső részen található köldökben ül. A kerekhálóba ütköző éjszakai lepkének jó esélye van a szabadulásra.



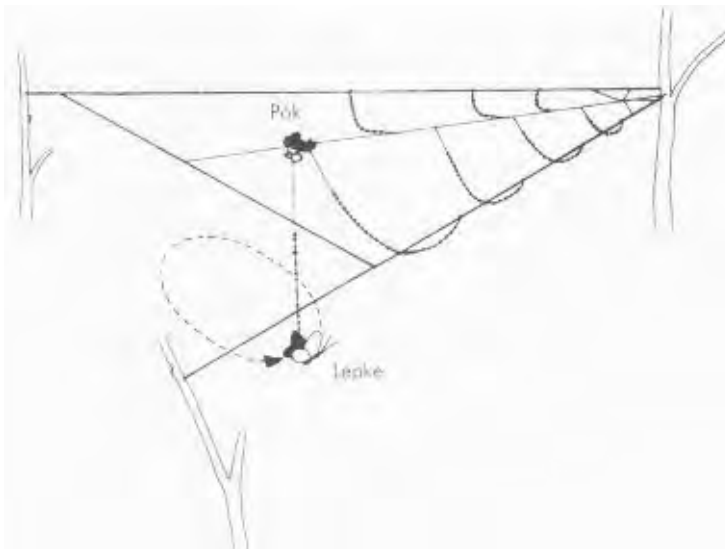
2.7. ábra. Egymástól függetlenül kifejlődött létrahálók: a) Új-Guineából; b) Kolumbiából

Az új-guineai létrapók hálójának lelógó részébe azonban újra belegabalyodhat. Minél tovább vergődik lefelé, annál több pikkelyt veszít, és annál nagyobb a pók esélye arra, hogy a létrán lerohanva elérje és halálra marja. Robinson új-guineai megfigyelése után nem sokkal William Eberhard megtalálta e háló újvilági megfelelőjét is Kolumbiában (2.7b ábra). A két hálótípust minden bizonnyal egymástól függetlenül fejlesztették ki a pókok, mivel a kolumbiainak a köldöke a háló alsó részén található. Működési elvük azonban megegyezik, és céljuk is: mindkét pókfaj fő tápláléka az éjjeli lepke.

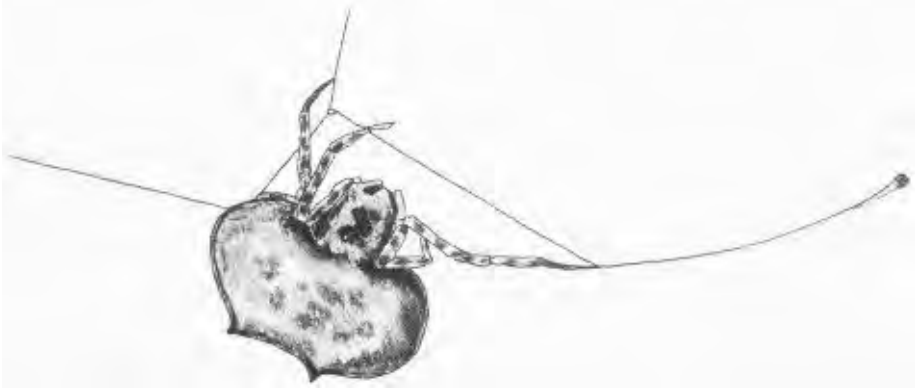
A létraháló tehát egy lehetséges megoldás a kiszabaduló zsákmányállatok újrafogására, ami főleg éjjeli lepkék esetében hatásos. A pókok más része rugós csapdát használ. A *Hyptiotes* hálója nem teljes kör, csupán egy háromszög, amit négy küllő tart. A háromszög csúcsához egy további fonál csatlakozik, ami az egész hálót feszesen tartja. Ezt a fő merevítőkötelet a pók nem rögzíti, hanem maga tartja. Lényegében eleven kapcsot képez a háló és valami szilárd fogódzópont között. Mellső lábaival kifeszíti a hálót, harmadik pár lábával pedig laza hurkot tart. Vészjósló mozdulatlanságban ül e kifeszített helyzetben, és vár. Ha rovar kerül a hálóba, azonnal megelevenedik. Eleresztja a hálót, ami rázuhan a rovarra, és a pókot is magával rántja. A hurkot újra megfogva és hátul egyre hosszabb fonalat kibocsátva ezt kétszer-háromszor is megismételheti. A rovar most már menthetetlenül belekeveredett az összegabalyodott hálóba. A pók még több selymet teker zsákmányára, majd a vastagon bebugyolált csomagot magával viszi. Csak ezután marja meg a szerencsédán áldozatot, emésztőnedvet bocsát bele, és az elfolyósodott test anyagait a selyemcsomag falán keresztül kiszívja. A háromszög alakú háló persze ilyen állapotban semmire sem használható: romjaiból kell újjáépíteni.

A *Hyptiotes* feltehetően azt a problémát oldotta meg, hogy egy kifeszített háló remekül alkalmas ugyan egy rovar elfogására, de az erős vergődés könnyen tönkreteszi. Ha rovarként belegabalyodsz ragadós fonalak tömegébe, könnyebb őket lerázni, ha feszesek, mint ha lazák. Ha lazák, nincs, amibe kapaszkodhatnál, így egyre jobban elmerülsz a selyemszálak mocsarában. Hasonlóan ahhoz, ahogy a szuperszonikus repülőgépeknek más ideális szárnyalakra van szüksége a felszálláshoz, mint a gyors repüléshez, a pókháló optimális feszültsége a rovar megfogása szempontjából más, mint a zsákmány fogvatartása szempontjából. Egyes repülőknél kompromisszummal oldják meg a feladatot: szárnyuk elég tűrhetően megfelel mindkét célnak. Mások – a változtatható szárnyfelületű vadászgépek – szárnyuk alakjának változtatásával próbálnak mindkét célnak tökéletesen megfelelni, de ehhez igen drága műszaki megoldásokra van szükség. A *Hyptiotes* változtatható feszességű hálójával vadászik.

A szabályos kerekhálót készítő pókok az elfogás szempontjából kedvező feszes hálóra szavaznak, és saját gyorsaságukra bízzák, hogy a hálón át odarohanva lebénítsák áldozatukat, mielőtt az kiszabadulna. Mások a másik irányban keresik a megoldást, elve laza hálót szőnek (2.8. ábra). A *Pasilobus* háromszögű hálójának középvonalában lóg le egy fonál. A ragadós fogófonalakat csupán néhány lazán lelógó hurok képviseli. E hurkok különlegessége – ez is Michael és Barbara Robinson nagyszerű új-zélandi felfedezése –, hogy egyik végük nagyon könnyen leszakad. Ha egy rovar, pl. egy éjjeli lepke, ráragad egy ilyen hurokra, annak egyik vége leszakad, de a másikonál fogva lógva marad. A rovar ekkor körbe-körbe kezd repülni, akárcsak egy játékreplő a zsinórján. A póknak semmiség a fonalat behúzza elintézni áldozatát. Az elrendezés előnye ismét az, hogy a rovar azért nem tud kiszabadulni, mert minden olyan laza, hogy semmiben sem tud megkapaszkodni.



2.8. ábra. A *Pasilobus* háromszöghálója a gyorskioldó fonállal



2.9. ábra. Lasszóspók

De az is lehet, hogy a gyorsan kioldó fonál haszna problémalistánk egy korábbi pontjára kínál megoldást: hogyan semlegesíthető a nagy sebességgel érkező rovar impulzusa anélkül, hogy visszapattanna, mint egy gumifalról? Más háromszögletű hálókhoz hasonlóan a *Pasilobus* is valószínűleg egy szabályos kerekháló maradványa. Mindenesetre van egy nemzetség, a *Poecilopachys*, mely hasonló gyorskioldó mechanizmust használ szabályos – bár a többségtől eltérően nem függőleges, hanem vízszintes – kerekhálóval kombinálva.

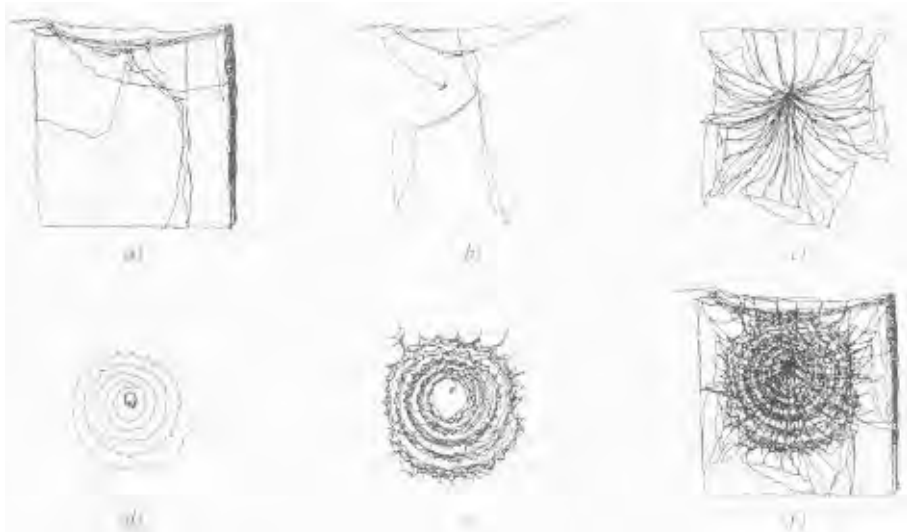
Ha a *Pasilobus* háromszöghálóját a *Poecilopachys* kerekhálója egyszerűsített változatának tekintjük, a sorozat végén a *Mastophora* lasszóspók egyetlen fonalát találjuk (2.9. ábra). A lasszó – bola – eredetileg a dél-amerikai őslakosok fegyvere, melyet a gauchók ma is használnak pl. a nandu, a pampák nagy röpképtelen madara vadászatakor. Kötél végére erősített súlypárból – pl. golyók vagy kövek – áll. Azzal a szándékkal hajtják az állat felé, hogy lábaira tekeredve a földre rántsa. A fiatal Charles Darwin is megpróbálkozott a lóhátról történő lasszóvetéssel, sikerült is elkapnia – a saját lovát, nagy örömet szerezve a gauchóknak (és persze jóval kisebbet a lónak). A lasszóspókok kizárólag az éjjel repülő bagolylepkek családjának hím tagjait zsákmányolják, nem véletlenül. A bagolylepke nőstények egyedülálló illatkötemény kibocsátásával csalogatják párjukat a távolból. A lasszóspók szinte ugyanilyen összetételű illatanyag kiválasztásával csalogatja őket – a halálba. A „lasszó” egyetlen fonál, végén súlyos csomóval. A pók egyik „kezével” körben forgatja, míg bele nem akad egy lepke, akkor behúzza. Valójában ez az eszköz sokkal rafináltabb, mint a gauchók egyszerű kövekkel töltött zacskója. Nem más, mint csepp vízbe ágyazott, szorosan feltekert selyemszál – olyasmi, mint a kerekhálók ragacsos gömböcskéi. Ha a pók meglendíti a lasszót, a fonál automatikusan kitekeredik, mint a horgászszinór, amikor a horgot bedobják. Ha eltalálta a lepkét, az odaragad és körbe-körbe röpköd. A történet ezután ugyanúgy zajlik, mint a gyorskioldó hálójú pókoké: a lepkét behúzzák és halálra marják. A lasszóspók Dél-Amerikában él – elbűvölő belegondolni, hogy talán az indiánok a lasszó ötletét e pók megfigyelése útján szerezték.

A szabályos kerekháló módosított és egyszerűsített változatai után térjünk vissza a hagyományos formájúhoz. Az előző fejezet végén azt a kérdést vetettük fel, hogy a mesterséges szelekció egy számítógépes modelljét, pl. a biomorfprogramot, hogyan

lehetne átalakítani a természetes szelekció modelljévé, ahol a válogatást nem az emberi szem, hanem a természet vak erői végzik. Megállapítottuk, hogy a biomorfok hiányossága abban rejlik, hogy egyáltalán nem kötődnek a valódi, fizikai világhoz, amelyben sikerességről és sikertelenségről, túlélésről lehetne beszélni. Elképzelhetünk ragadozóként viselkedő biomorfokat, talán még azt is, hogy kergetik a zsákmányként viselkedőket; de úgy tűnik, nem tudunk egyszerű, túlbonyolítás nélküli szabályt adni arra, hogy a biomorf mely tulajdonságai előnyösek vagy kevésbé előnyösek a zsákmányejtés vagy a ragadozók elől való menekülés szempontjából. Az emberi szem lehet, hogy félelmetes, kegyetlen rágókat lát egy biomorf egyik végén (1.16. ábra). Am e tátott száj, bármilyen ijesztőnek is tűnjön képzeletünk számára, nem bizonyíthat a gyakorlatban, hiszen nem tud mozogni, nem a valós fizikai világban létezik, ahol a fogak élességüket valódi páncélok vagy bőr szétszaggatásával bizonyíthatnák. A fogak – akárcsak a bőr – csupán képpontok mintázatai egy fluoreszkáló képernyőn. Élesség és erősség, törekenység és méreg – e tulajdonságok a számítógép képernyőjén nem jelentenek többet a programozó által összeállított bonyolult számsoroknál. Alkothatunk számítógépes játékot, ahol számok küzdenek számokkal, bár az őket elfedő grafika szemkápráztatóan izgalmas; a játékos minden bizonnyal lekicsinylőnek találná a „mesterkelt” vagy „bonyolult” minősítést. Az előző fejezet végén nagy megkönnyebbüléssel fedeztük fel a pókhálót: íme a természet egy darabja, mely természetes módon szimulálható.

A kerekhálók a való világban többnyire két dimenzióban működnek. Ha a háló túl ritka szemű, a légy keresztülzár rajta. Ha túl sűrű szövésű, a vetélytársak jóval kevesebb selyem felhasználásával gyakorlatilag ugyanolyan jó fogási eredményt érnek el, így több utódot hagynak hátra, akik takarékosabb génjeiket hordozzák. A természetes szelekció megtalálja a hatékony kompromisszumot. A számítógép képernyőjére rajzolt háló egyáltalán nem mesterkelt tulajdonságoktól meghatározott módon lép kölcsönhatásba az ugyanarra a képernyőre rajzolt legyekkel. A háló szemsűrűsége olyan mennyiség, ami valóban jelent valamit a képernyőn a számítógépes „légy” méretéhez viszonyítva. A másik ilyen mérték a selyem összes mennyisége („a selyem költsége”). A kettő hányadosával meghatározott hatékonyság még megengedhetően csekély mértékben mesterkelt. Számítógépes modellünkbe némileg bonyolultabb fizikai jellemzők is beépíthetők: Fritz Vollrath (tőle tanultam nagyon sokat abból, amit e fejezetben leírtam) és fizikus munkatársai, Lorraine Lin és Donald Edmonds kiváló alapokat biztosítottak ehhez. Könnyebb a számítógépes „selyem” „rugalmasságát” és „szakítófeszültségét” modellezni, mint mondjuk a számítógépes „ragadozó” „türelmét a lesben üléshez” vagy „éberségét a zsákmány észrevevésében”. Fejezetünkben elsősorban a hálóépítő magatartást fogjuk modellezni.

A számítógépes pók szimulációs szabályait rögzíteni igyekvő programozó előnyös helyzetben van, mivel bőséges ismeretekkel rendelkezünk a valódi pókokat irányító szabályok és a viselkedésüket tagoló döntési pontok terén. Vollrath professzor és nemzetközi pókkutató csoportja e kutatások élcsapatának tekinthető, így a lehető legalkalmasabb személyek arra, hogy tudásukat beépítsem e programba. Egy számítógépes program megírása tulajdonképpen remek alkalom arra, hogy összegezzük szabályok egy csoportjáról való ismereteinket.



2.10. ábra. Hálót készítő koronás keresztspók (*Araneus diadematus*) helyváltoztatásának számítógépes nyomon követése Sam Zschokke MozgásFigyelő programja segítségével. *a), b)* előkészületek; *c)* sugarak; *d)* segédspirál; *e)* fogóspirál; *f)* az összes mozgás egy ábrán

Csoportunkból Sam Zschokke feladata volt a hálóépítő pókok megfigyelt mozgásaival kapcsolatos leíró ismeretek számítógépes formában való összegzése; programja a MozgásFigyelő (MoveWatch). Nick Gotts és Alun ap Rhisiart munkájára támaszkodva Peter Fuchs és Thiemo Krink a másik irányból közelítettek: „számítógépes legyekre” vadászó „számítógépes pókokat” igyekeztek programozni. Ez a HálóSzövő (NetSpinner) program.

A 2.10. ábra egy koronás keresztspók mozgásainak a MozgásFigyelő által készített képe egy adott háló megszövése során. Ne feledjük el, hogy e képek nem hálókát ábrázolnak, bár ahhoz hasonlítanak: a pók időbeli mozgását rögzítik. A hálóépítő pókot munkája során videofelvételen rögzítettük, majd adott időpillanatokban elfoglalt helyét koordináták formájában betápláltuk egy számítógépbe. A számítógép ezután összekötötte az egymás utáni pontokat. A „fogófonál” görbéje (2.10e ábra) pl. azt az utat mutatja, amelyet a pók a fogófonál felrakása alatt bejár, nem magának a fonálnak a pontos elhelyezkedését ábrázolja. Ha azt ábrázolná, szabályosabb lenne. Valójában azonban „hullámokba” sűrűsödik annak megfelelően, hogy a pók az ideiglenes segédspirálon mozogva készítette el a ragadós fogóspirált (2.10f ábra).

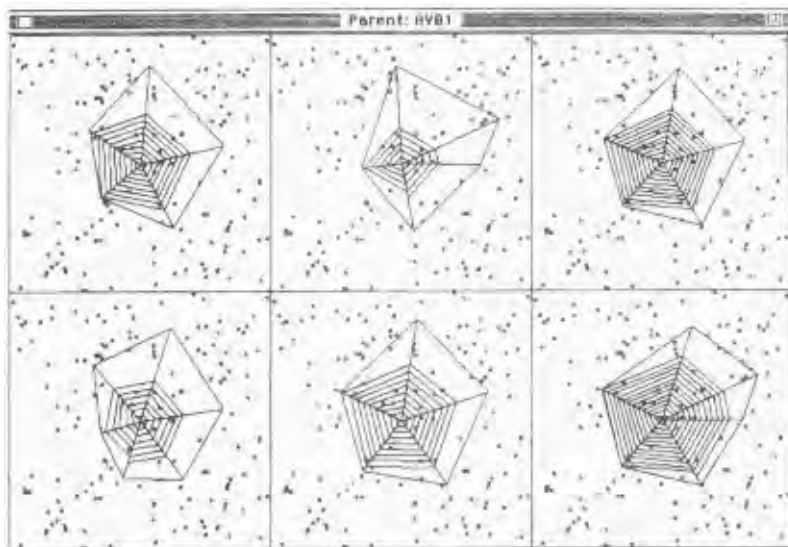
A fenti ábrásor nem egy számítógépes pók viselkedésének modellje, hanem egy valódi pók viselkedésének számítógépes leírása. Fordítsuk most figyelmünket a HálóSzövőre, arra a kiegészítő programra, mely egy elméleti, idealizált pók mozgását szimulálja (számos különböző „elméleti pók” közül választhatunk). A HálóSzövő hasonlóképpen szimulálja a mesterséges pókviselkedést, mint a biomorfprogram szimulálta a rovarszerű lények testfelépítését. „Hálókát” épít a képernyőn olyan viselkedési szabályok alapján, amelyek részletei „gének” hatására változhatnak. A biomorfprogramhoz hasonlóan a gének itt is egyszerűen a számítógép memóriájában tárolt számok, melyek nemzedékről nemzedékre továbbadódnak. A nemzedékeken

belül a gének határozzák meg a mesterséges pók „viselkedését”, ezen keresztül a „háló” alakját. Pl. egy gén kódolhatja a küllők által bezárt szöveget: ha ez a gén mutál, megváltozhat a küllők száma, a számítógépes pók viselkedési szabályai számértékeinek módosulásán keresztül. A biomorfprogramhoz hasonlóan a gének értékének csak kismértékű véletlenszerű változása megengedett a nemzedékek között. A mutációk a háló alakjának változásában fejeződnek ki, így szelekció hatása alatt állnak.

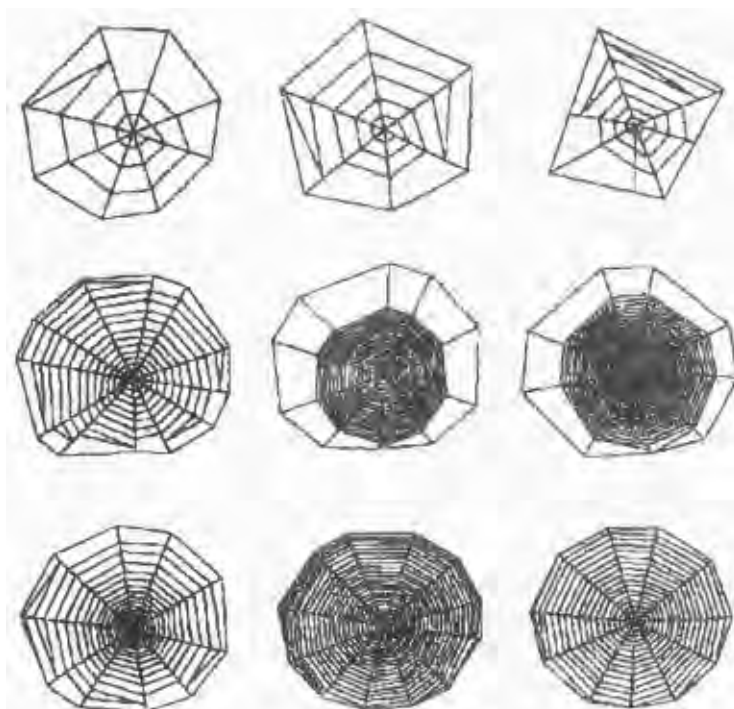
Tekintsük úgy a 2.11. ábra hálót, mintha biomorfok lennének (a pontokkal most még ne foglalkozzunk). A bal felső háló a szülő, a többi öt ennek mutáns utóda. Természetesen a valóságban a hálóknak nincsenek utódaik; a pókok (amelyek hálókat szőnek) adnak életet pókoknak (amelyek hálókat szőnek). De pontosan itt igaz, hogy amit a hálókról elmondtam, az elmondható a testekre is. A gének (melyek felépítik az ember szülőket) géneket hoznak létre (amelyek felépítik az ember gyerekeket). Számítógépes modellünkben a gének, melyek felépítették a bal felső képen látható hálót (egy, a képen nem látható elméleti pók viselkedésének befolyásolása útján), mutáltak, majd létrehozták azokat a géneket, amelyek (hasonló úton) felépítették a többi öt kép utódhálót.

Megtehetnénk, hogy pusztán a szemünkkel választjuk ki, hogy melyik hálót „tenyészük tovább” – mint a biomorfok esetében tettük. A „tenyésztés” azt jelenti, hogy kiválasztjuk, melyik egyed adhatja tovább génjeit (esetleg mutáció után) a következő nemzedékbe. Ez azonban mesterséges szelekció lenne. Éppen azért tértünk át a biomorfokról a pókhálókra, mert azok megcsillantották a természetes szelekció szimulálásának lehetőségét: azt, hogy a kiválogatás alapja ne az ember szépérzéke, hanem a „légy”-fogás mérhető hatékonysága legyen.

Most fordítsuk figyelmünket a képeken látható pontokra. Ezek a „legyek”, melyekkel a számítógép véletlenszerű módon bombázza a hálókat. Ha figyelmesen megnézzük az ábrát, kiderül, hogy minden háló ugyanazt a véletlenszerű „légysorozatot” „kapta”. A számítógép – a való világgal ellentétben – eredendően így működik; ha ezzel nem vagyunk elégedettek, tennünk kell valamit ellene. Esetünkben ez nem jelent gondot, sőt meg is könnyíti az egyes hálók összehasonlítását. Az összehasonlítás egyrészt azt jelenti, hogy a gép megsámolja, hogy a hat háló mindegyike hány legyet „fogott”. Ha csak ez számítana, a jobb alsó háló nyerné a versenyt, mert ennek fogófonala érintkezik a legtöbb léggel. A zsákmányolt legyek száma azonban nem az egyetlen lényeges változó. Figyelembe kell vennünk a selyem költségét is. A felső sor középső hálójában van a legkevesebb selyem, így ha csak ez a szempont számítana, ez lenne a győztes. A valódi bajnok az a háló, amelyiknek a legtöbb fogott legye lesz akkor, ha *levonjuk* az építési költséget (ez pedig a fonalhossz függvénye). E bonyolultabb számítás alapján az alsó középső háló a legjobb. Ezt választjuk ki továbbtenyésztésre, hogy génjeit továbbadja a következő nemzedéknek. A biomorfprogramhoz hasonlóan, ha e tenyésztési folyamatot sok nemzedéken keresztül folytatjuk, fokozatos evolúciós tendencia alakul ki. Míg azonban a biomorfprogram esetén a tendencia irányát kizárólag az ember szeszélye határozta meg, a HálóSzövő esetében az evolúció automatikusan halad az egyre nagyobb hatékonyság irányában. Éppen ezt szerettük volna: ez már nem a mesterséges, hanem a természetes szelekció modellje! Vajon mi alakul ki az adott feltételek között?



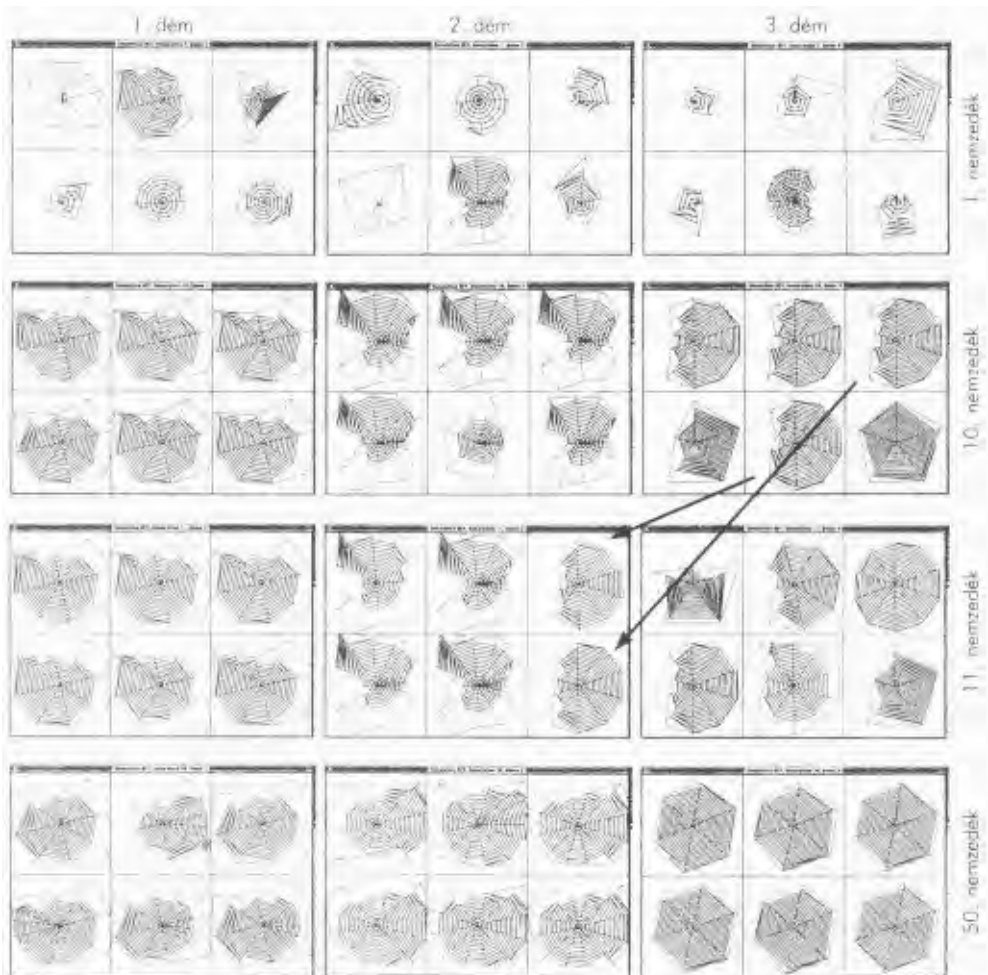
2.11. ábra. Számítógépes legyekkel bombázott számítógépes hálók.
Peter Fuchs és Thiemo Krink HálóSzövő programja



2.12. ábra. Pókhálók evolúciója a HálóSzövő program szimulációja alapján,
egyetlen éjszaka alatt. Minden ötödik nemzedéket ábrázolunk.

Nagyszerű megfigyelni, milyen életszerű hálókat kapunk egy éjszakai futtatás, negyven nemzedék elteltével (2.12. ábra).

Az eddig bemutatott képek a HálóSzövő II. verziójával készültek, mely túlnyomórészt Peter Fuchs munkája (a HálóSzövő I. korábbi verzióval itt nem foglalkozom). A HálóSzövő programok további, Thimeo Krink által átdolgozott verziói további fontos szempontból lépnek túl a biomorfprogramon. A HálóSzövő III. bevezeti az ivaros szaporodást. A biomorfok és a HálóSzövő II. pókjai egyaránt ivartalanul szaporodtak. Hogyan magyarázzuk meg a számítógépnek, hogy mi az az ivaros szaporodás? Nem fogunk a képernyőn pározó pókokat látni (bár természetesen ez is megoldható lenne, akár a kannibalista végkifejlettel is).



2.13. ábra. Számítógépes hálók evolúciója természetes szelekció útján, három ivaros szaporodó dében, ötven nemzedék során a HálóSzövő program szerint. A 11. nemzedékben a 3. dém két genotípusa vándorlás révén átkerült a 2. démbe, ahol ezután kereszteződés révén átadhatta génjeit (az ábrán ezt vastag nyilak jelölik).

A program az ivaros szaporodás genetikai értelmét valósítja meg: az egyik szülő génjeinek felét elegyíti a másik szülő génjeinek felével.

Hogyan történik ez? Minden nemzedékben legyen egy hat pókból álló populáció, „dém”. A hat pók mindegyike hálót épít. A háló alakját egy „kromoszóma”, vagyis génsorozat határozza meg. Minden gén meghatároz egy-egy adott hálóépítő „szabályt”, olyanokat, mint korábban bemutattam. A hálókat ezután legyekkel bombázzuk. A háló „jóságát” a fent ismertetett módon (a fogott legyek száma csökkentve a felhasznált selyemtől függő mértékkel). A populáció rögzített hányada minden nemzedékben elpusztul, mégpedig mindig a legkevésbé hatékony hálót készítő. Az életben maradók véletlenszerű módon párosodnak egymással, és új póknemzedéket hoznak világra. A „párosodás” azt jelenti, hogy a két pók „kromoszómái” egymás mellé rendeződnek és fonaluk egy részét kicserélik. Ez talán furcsának és túl bonyolultnak tűnik – míg eszünkbe nem jut, hogy a valóságban is éppen ez történik a kromoszómákkal az ivaros szaporodás során; nemcsak a pókoknál, de még az embereknél is.

A folyamat folytatódik, a populáció nemzedékről nemzedékre evolválódik – még egy finomítással. Nemcsak egy, hat pókból álló démünk van, hanem (teszem azt) három, félig elkülönítve (2.13. ábra). A három dém mindegyike önmagán belül evolválódik, ám időnként egy egyed „átvándorol” a szomszédba, átviszi génjeit. Ennek elméleti hátterére a negyedik fejezetben még visszatérünk. Pillanatnyilag annyit állíthatunk, hogy mind a három dém jobb hálók irányában fog fejlődni: olyan hálók felé, melyek gazdaságosabban fogják a legyeket. Lesznek dérnék, melyek evolúciós zsákutcába futnak. A bevándorló pókokat úgy tekinthetjük, mint más populációkból származó új „ötletek” meghonosítóit. Szinte olyan ez, mintha egy sikeres részpopuláció géneket küldene szét, hogy „tanácsot adjon” sikertelenebb társainak, hogy hogyan oldhatják meg a hálóépítés feladatát.

Az első nemzedékben sok különböző alakú hálót látunk, melyek többsége nem túl hatékony. Mint az ivartalan szaporodás 2.12. ábrán bemutatott esetében, itt is azt látjuk, hogy a változatosság lassan beszűkül egy jobb, hatékonyabb alak irányában. Most azonban az ivaros szaporodás gondoskodik arról, hogy az „ötletek” megoszoljanak a dém tagjai között, így az egyes dérnék tagjai egymáshoz hasonlóak. Másrészt – mivel a dérnék genetikailag nem érintkeznek – a dérnék között észlelhető különbségek alakulnak ki. A 11. nemzedékben aztán két háló génjei a 3. démből átvándorolnak a 2. démbe – úgy is mondhatjuk, hogy a 3. dém „ötletei” megfertőzik a 2. démet. Az ötvenedik nemzedékben – sok esetben már ennél jóval korábban is – jó, stabil, hatékony légyfogó hálók alakulnak ki.

Egy, a természetes szelekcióhoz hasonló számítógépes folyamat tehát olyan mesterséges hálókat képes létrehozni, amelyek hatékonyabb „légyfogók”, mint elődeik. Még nem természetes szelekció, de jókora lépéssel közelebb van hozzá, mint a biomorfok tisztán mesterséges szelekciója. A HálóSzövő azért nem teljesen természetes szelekció, mert számításokat kell végeznie annak eldöntésére, hogy melyek a jó hálók, amelyek továbbszaporodhatnak. A programozónak kell eldöntenie, hogy egységnyi mennyiségű selyem mennyi légygel ér fel. Szándéka szerint változtathatja ezt az arányt. Ha pl. megduplázza (légyértékben számolva) a selyem költségét, csökken a nagyobb vagy sűrűbb hálók szaporodási sikere, mert „túl sokat áldoztak” néhány

pluszlégység megfogására. A programozó határozza meg, hogy melyek legyenek a mértékegységek, és hogy ezek milyen viszonyban álljanak egymással. Ez csak az egyike a háttérben rejlő átváltásoknak. Azt is a programozó határozza meg, hogy a „légyhús” milyen arányban alakulhat át pókcsemetékké. Kimondatlanul, de azt is a programozó döntötte el, hogy a háló szempontjából mindegy, hogy építőik más okok miatt milyen mennyiségben pusztulnak el. Ez is egy mesterséges döntés; más döntés lehet, hogy más evolúciós eredményhez vezetett volna.

A valóságban e döntések egyike sem mesterséges. Sőt: egyikük sem döntés, és semmiféle számítógépes folyamathoz sincs közük. Csak éppen megtörténnék, természetes módon, minden hűhó nélkül. A pókcsemeték teste *felépül* néhai legyek testének anyagaiból, és *létezik* egy arányossági tényező. Az átalakulás megtörténik, akár leírja valaki ennek matematikai szabályszerűségét, akár nem. Ugyanez igaz a légyhús selyemmé alakulására. A HálóSzövő azt is feltételezi, hogy a legyek egyformák. A való életben számtalan efféle kisebb-nagyobb komplikáció adódik, magától értődően, agyafűrt mesterkedések nélkül. Eltekintve attól a tényről, hogy egyes rovarok nagyobbak, mint mások, jelentős minőségbeli különbségek is lehetnek közöttük. Tegyük fel, hogy a selyem készítéséhez szükség van egy ritkán előforduló aminosavra, ami a különböző rovarokban különböző mennyiségben fordul elő. Egy rovar értékének kiszámításakor nemcsak azt kell figyelembe venni, hogy mekkora, de azt is, hogy milyen faj. A HálóSzövő segítségével természetesen ki lehet ilyesféle hatásokat számolni, de ez további mesterkélt számításokat jelent. A való világban mindezek megtörténnék maguktól, akár tetszik, akár nem. Íme még egy bökkenő: feltehető, hogy a jóllakott pók számára kevesebbet ér egy légy, mint egy korgó gyomrú számára. A HálóSzövő nem veszi ezt figyelembe – a való élet annál inkább. A HálóSzövőbe mesterkélt módon beleépíthető a jóllakottság problémája – a való életben csak így van és kész. Nincs szükség képletekre.

Amit ki szeretnék domborítani, annyira nyilvánvaló, hogy talán nem is kellene ennyit hangsúlyozni; ugyanakkor olyan fontos, hogy mégiscsak hangsúlyoznom kell. Valahányszor beépítünk egy további bonyolult részletet a HálóSzövőbe, az okos programozóknak többoldali számítógépes kódot kell leírniuk. A való életben szembevetendő a nyílt számítások *hiánya*. A légyfehérje és a selyemfehérje közti átváltási tényező egyszerűen *létezik*. Nincs szükség programlépések beépítésére ahhoz, hogy egy légy értékesebb legyen egy éhes, mint egy jóllakott pók számára. Az lenne a meglepő, ha nem így lenne. Megszoktuk, hogy a számítógépes modellekre úgy tekintünk, mint a valóság egyszerűsített változatára. Jelen esetben azonban úgy találjuk, hogy a természetes szelekció számítógépes modellje bizonyos értelemben nem egyszerűsíti, hanem bonyolítja a valóságot.

A természetes szelekció végtelenül egyszerű abban az értelemben, hogy nagyon egyszerűen megfogalmazhatók azok a szabályok, amelyek alapján működik. Hatása és következményei viszont hihetetlen mértékben bonyolultak. Egy valódi bolygón a természetes szelekció nagyon könnyen elindítható: csupán öröklődő információra van szükség. A természetes szelekció számítógépes szimulációjához szükség van az öröklött információ megfelelőjére – de emellett még sok másra is: sok-sok költség és

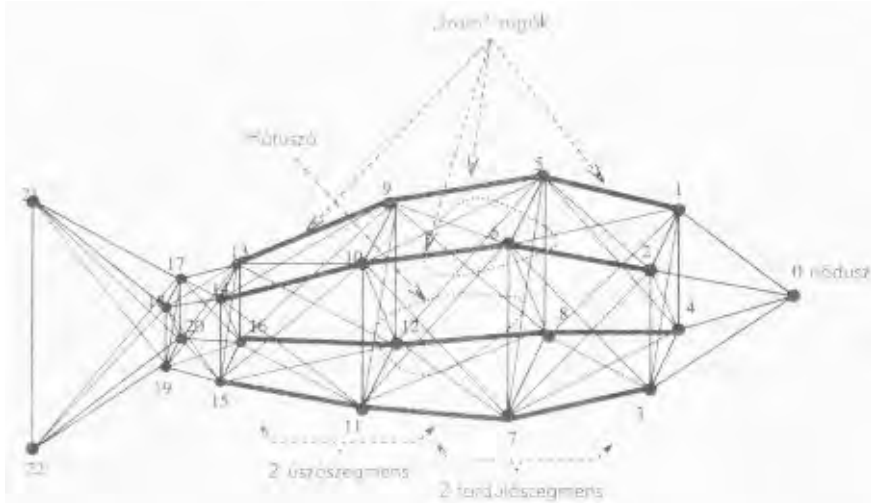
haszon körültekintő kiszámítására, és egymásba való átváltásuk feltételezhető módjának kimunkálására.

Ki kell építeni egy teljes mesterséges fizikát is. Azért választottuk vizsgálatunk tárgyául a pókhálókat, mert ezek a természetes világ számítógépes nyelven legkönnyebben megfogalmazható elemei közé tartoznak. Szárnyak, gerincoszlopok, fogak, karmok, uszonyok és tollak: tulajdonképpen bármelyiküket modellezhetnénk számítógépen, értékelhetnénk különböző változataik hatékonyságát – csupán borzasztó nagy feladatot jelentének a programozó számára. Egy szárny, uszony vagy toll csak akkor mutatja meg igazi arcát, ha megfelelő fizikai közegbe – pl. vízbe vagy levegőbe – helyezük, aminek ellenállása, rugalmassága, áramlási mintázatai vannak. Ezeket nem könnyű modellezni. A gerincoszlop vagy egy végtag egy csontja csak akkor értékelhető, ha nyomás, emelés és súrlódás bonyolult fizikai rendszerébe illesztjük. Keménység, törekenység, hajlítási és nyújtási rugalmasság – mindezt le kell írni a számítógép nyelvén. Az egymáshoz különböző szögben illeszkedő, inakkal, ízületekkel összekötött csontok sokasága dinamikus kölcsönhatásainak leírása sziszifuszi programozási feladat, melynek szinte minden lépésénél mesterkélt döntések meghozatalára kényszerülünk. A levegő szárny körüli áramlásának és örvénylésének szimulálása olyan bonyolult feladat, hogy a mérnökök szívesebben fordulnak szélcsatornában repülő modellekhez, mint a számítógéphez.

Természetesen nem akarom lebecsülni a számítógépes modellezők munkáját. A „mesterséges élet” szakterület 1987-ben született, és megtisztelő módon részt vehettem a keresztelőjén Los Alamosban – az atombomba szülőhelyén, ahol ma már építőbb célokra dolgoznak. Christopher Langton, az 1987-es konferencia szellemi atyja és szervezője, és követői azóta megalapították a mesterséges élet folyóiratát – első száma itt van a kezemben. Cikkei máris enyhítenek az előző bekezdés pesszimizmusán. Három észak-amerikai kutató – név szerint Demetri Terzopoulos, Xiaoyuan Tu és Radek Grzeszczuk – számítógépes halakat szimulált látványos módon, akik a számítógép virtuális vízében úszkálnak és élő halakhoz hasonlóan viselkednek, kapcsolatba lépnek egymással. A számítógépes világnak, melyben e halak úsznak, saját, a víz valódi fizikájára alapozott szimulált fizikája van. A programozási munka oroszlanrészét egyetlen hal szimulációja tette ki, hogy viselkedése élethű legyen. Ezután e „munkahalat”, némi módosításokkal, sok példányban lemásolták, majd mindannyiukat „beeresztették” a „vízbe”, hogy társaikat „észrevéve” kapcsolatba lépjenek egymással, pl. elkerüljék az összeütközést, és rajokat alkossanak.

Minden számítógépes hal 23, a háromdimenziós térben elhelyezett „izületből” épül fel, melyeket 91 „rugó” köt össze (2.14. ábra). 12 rugó összehúzóásra képes: ezek a mesterséges hal „izmai”. A valódi halak hullámzó mozgását, a fordulásokat is beleértve, a rugókon végigfutó szabályos összehúzó-dás-hullámok szimulálják. A hal tapasztalatai alapján megtanulja javítani az összehúzó-dás-sorozatokat, hogy ússzon, forduljon és célpontot kövessen. A halak „mentális állapotát” három „változó” írja le: „éhség”, „nemi vágy” és „félelem”; ezek kombinációiból alakulnak ki a „szándékok”, pl. „evés”, „párazás”, „úszkálás”, „elúszás” és „ütközés elkerülése”. A halnak két érzékszerve van, az egyik a víz „hőmérsékletét” méri, a másik pedig egyszerű „szem”, mely a hal környezetében lévő tárgyak helyzetét, színét és méretét „észleli”. A szépség

kedvéért az ízületek és rugók vázát élethű, halszínű burkolat borítja. A különböző halak (pl. ragadozók és zsákmányaik) nemcsak külsejükben, de viselkedésükben is eltérnek (2.15. ábra).



2.14. ábra. Mesterséges hal. A „rugók” vázlata.



2.15. ábra. Zsákmányhalak csapatát becszerkesztő mesterséges cápa

A ragadozók nemcsak színükben térnek el zsákmányuktól, de viselkedési hajlamaikban is: a három mentális változó és a különböző „szándékok” más súlyokat kapnak. Egy ilyen szimuláció még napjaink gyors számítógépein futtatva is annyira gépidőigényes, hogy egy sok halat tartalmazó virtuális világ szimulációja nem ad hihető illúziót a

valós időben. A halak úszkálnak, megkergetik egymást és udvarolnak – de mindezt lassabban, mint a valóságban. Ha élethű sebességgel akarjuk mindezt megfigyelni, a gyorsított filmfelvételek megoldásához hasonlót kell alkalmaznunk. Ennek a részletnek azonban semmi elméleti jelentősége nincs: olyan probléma, melyet a számítógépek újabb nemzedékei meg fognak oldani.

Terzopoulos, Tu és Grzeszczuk virtuális vízben úszkáló mesterséges halainak világa elég gazdag ahhoz, hogy érdemes legyen megvizsgálni az evolúció szimulálása szempontjából. Pillanatnyilag halaik képesek „párosodni”, de ez csak az udvarlási viselkedést jelenti: szaporodni nem tudnak. A következő lépés nyilvánvalóan az, mint ezt a szerzők is tudják, hogy „géneket” kell beállítani az „izmok” mozgását, majd a magasabb szinten a mentális állapotváltozókat és szándékokat irányító különböző viselkedési változók súlyozásának hátterébe. A párosodó hímek és nőstények génjei rekombinálódhatnak, néha mutálhatnak, így jön létre az új nemzedék genetikai anyaga. Ezt követheti a természetes szelekción alapuló evolúció – még ha a számítógép végtelenül mesterkélt környezetében is. Talán nem is lesz szükség arra, hogy eleve megadjuk, hogy vannak ragadozók és zsákmányállatok. Lehet, hogy ha kezdetben veszünk két, méretében, de nem viselkedésében különböző „halfajt”, és kikötjük, hogy hasonló a hasonlóval párosodhat, sok nemzedék során kialakul, hogy a nagyobbik a kisebbikkel fog táplálkozni. Ki tudja, hogy a virtuális természetrajz milyen meglepő fordulatai játszódhatnak majd le a szemünk előtt?

Lelki szemeim előtt egy szerteágazó kutatási terület bontakozik ki, melynek az önmagának ellentmondónak tűnő Mesterséges Természetes Szelekció nevet adhatjuk. Persze bizonyos értelemben a természetes szelekció való világának legegyszerűbb szimulációja: maga a való világ. A csontok törési feszültsége, nyújtási rugalmassága, keménysége, erővonalai és mindezek kalciumfelvételben kifejezett költsége valóban változik. Ha akarjuk, kiszámíthatjuk a részleteket; de akár kiszámítjuk, akár nem, tény, hogy egyes csontok eltörnek, mások nem; egyes csontok sok értékes kalciumot vesznek fel, mások hagyják, hogy az inkább az anyatejben választódjon ki. A való élet ilyen szempontból hihetetlenül egyszerű: egyes állatok nagyobb valószínűséggel pusztulnak el, mint mások. Amerika leggyorsabb számítógépe egy év drága gépidőt felhasználva ki tudna számítani sok részletet. A természetben azonban az a kegyetlen helyzet, hogy egyesek elpusztulnak, mások pedig életben maradnak. Ennyi az egész.

Ha akarjuk, felfoghatjuk úgy a világ összes élőlény-populációjának génjeit, mint egy gigantikus számítógép összetevőit, mely költségeket, hasznokat és átváltásokat elemez, ahol változó géngyakoriságok határozzák meg az elektronikus processzor egyeseinek és nulláinak váltakozását. Sokatmondó kép ez, melyhez könyvem utolsó lapjain majd még visszatérek. Most azonban annak jött el az ideje, hogy a címet megmagyarázzam. Mi a Valószínűtlenség Hegye és mit kell róla megtanulnunk?

A HEGY ÜZENETE

A Valószínűtlenség Hegye meredeken emelkedik ki a síkságból, csúcsai a kék ég párájában lebegnek. Főként tornyosuló, függőleges sziklafalai megmászhatatlannak látszanak. Apró hangyáknak tűnő, kudarcot vallott hegymászók kapaszkodnak, küszködnek lábainál, reménytelenül tekintenek fel a megközelíthetlenséget sugárzó meredélyekre. Kiábrándultan rázzák kis, elkeseredett fejüket, és a méltóságteljes csúcsokat mindörökre megmászhatatlannak nyilvánítják.

Hegymászóink túl nagyra törnek. Olyannyira hatalmukba kerítették őket a fantasztikus sziklafalak, hogy eszükbe sem jut, hogy megnézzék a hegy másik oldalát. A túloldalon nincsenek függőleges meredélyek és feneketlen szakadékok: lankás zöld réteken sétálhatunk fel kényelmesen a távoli csúcsokig. Néha akad ugyan egy-egy meredekebb, sziklás szakasz, de rendszerint találunk egy kerülőutat, mely nem túl megerőltető egy jó bakancsral és elegendő idővel rendelkező turista számára. Pusztán a csúcs magassága ne bátortalanítson el senkit, hiszen ha nem kell első nekifutásra meghódítanunk, ráérünk. Csak keressük meg a szelíden emelkedő ösvényt, és ha korlátlan mennyiségű időnk van, az egész túra nem nehezebb, mint a következő lépés.

A Valószínűtlenség Hegye természetesen csak hasonlat. Jelentését a további fejezetekben fogom kibontani.

A következőket egy levélből idézem, melyet a londoni *The Times* közölt néhány évvel ezelőtt. A szerző, akinek nevét eltitkolom, hogy ne hozzam zavarba, egy fizikus, akit kollégái olyan nagyra tartanak, hogy még a Royal Society (Nagy-Britannia legrangosabb tudományos társasága) tagjává is megválasztották.

Uram, én azon természettudósok egyike vagyok... akik kételkednek Darwin evolúcióelméletében. Kétkedésem nem vallásos alapú, és nem is az a célom, hogy egy vita bármely oldalát támogassam; egyszerűen az a véleményem, hogy a darwinizmus a tudomány számára védhetetlen.

...Az evolúciót el kell fogadnunk – minden kövület alátámasztja. Gondom csak az okkal van. Darwin azt állítja, hogy az ok a véletlen: ahogy a nemzedékek egymást követték, azok a véletlenszerű apró változások, melyek előnyösek voltak, fennmaradtak, amelyek pedig nem, azok eltűntek. Az élőlények így fokozatosan egyre jobb képességekhez jutottak mondjuk a táplálékszerzés vagy ellenségeik elpusztítása terén. Ezt a folyamatot nevezi Darwin természetes szelekciónak.

Fizikusként ezt nem fogadhatom el. Lehetetlennek tűnik számomra, hogy véletlenszerű változások hozták volna létre az emberi test csodálatos gépezetét. Vegyünk csak egy példát: a szemet. Maga Darwin is elismerte, hogy ez előtt meg kell hajolnia – nem tudja, hogyan alakulhatott ki egy egyszerű fényérzékelő sejtből... Jómagam nem látok más lehetőséget, mint hogy az élő anyag tervezett. Az élet

eredete nem magyarázható meg a hivatalos tudomány keretei között, sem az élőlények Földünk létének évmilliói alatt kialakult csodálatos láncolata.

Vajon ki volt a tervező?

Tisztelettel:

A szerző nagy gonddal kétszer is tudatja velünk, hogy fizikus, ami külön súlyt ad szavainak. Egy másik természettudós, a kaliforniai San José Egyetem kémia professzora „A szmirna fügének Istenre van szüksége, hogy termést hozhasson” című közleményével robbant be a biológiába. Leírja e fűgefaj és megporzó darazsa hihetetlenül bonyolult történetét (lásd 10. fejezet), majd az alábbi következtetésre jut: „A fiatal fügedarazs az egész telet végigalussza a kecskefűgében, de éppen időben ébred fel ahhoz, hogy petéit elhelyezze a nyári termésben, ami enélkül nem porzódna meg. Ehhez rendkívül pontos időzítésre van szükség, amiből az következik, hogy Isten gondoskodik róla! (*A felkiáltójel tőlem.*) Oktalanság azt képzelni, hogy ez a tökéletesen kidolgozott mintázat az evolúciós véletlen műve. Isten nélkül nem létezne sem a szmirna füge, se más hasonló... Az evolucionisták azt akarják elhitetni, hogy ezek a dolgok véletlenszerűen, határozott cél vagy gondosan kimunkált terv nélkül születtek.”

Nagy-Britannia egyik leghíresebb fizikusa, Sir Fred Hoyle (egyben *A fekete felhő* című könyv, minden idők egyik legkiválóbb tudományos-fantasztikus regényének szerzője) gyakran hangot ad hasonló véleményének óriásmolekulák, pl. enzimek „eredendő valószínűtlensége” kapcsán (ezen annak valószínűségét érti, hogy ezek az óriásmolekulák véletlenszerűen jöttek volna létre). Az enzimek keletkezésének valószínűségét könnyebb kiszámolni, mint a szem vagy a füge keletkezésének valószínűségét. Az enzimek úgy működnek a sejtekben, mint a molekulák tömeges termelését végző hihetetlenül nagyszámú gépek. Hatékonyságuk térbeli szerkezetüktől, térbeli szerkezetük feltekeredésüktől, feltekeredésük pedig a láncukat alkotó aminosavak sorrendjétől függ. A sorrendet közvetlenül a gének szabályozzák – ez a lényeg. Létrejöhetett mindez véletlen módon?

Hoyle válasza: nem; és igaza is van. Az aminosavak száma adott: 20. Egy tipikus enzim néhány száz aminosavból áll, melyek mindegyike e húsz közül való. Egyszerűen kiszámítható, hogy egy 100 aminosavból álló adott sorrendű lánc kialakulásának valószínűsége egy $20 \times 20 \times 20 \dots$ (százszor leírva)-ból, vagyis 1 a 20^{100} -ból. Ez felfoghatatlanul nagy szám, több, mint a világegyetem összes elemi részecskéjének száma. Sir Fred, hogy ne vádolják rosszindulattal azok, akiket – mint látni fogjuk, feleslegesen – darwinista ellenfeleinek tart, nagylelkűen leengedi az értéket 10^{20} -ra. Ez tényleg lényegesen más, de még mindig elenyészően csekély valószínűség. Szerzőtársa és asztrofizikus munkatársa, Chandra Wickramasinghe professzor őt idézve állítja, hogy egy működő enzim véletlenszerű keletkezésének valószínűsége annyi, mintha egy roncsstelepen keresztülfújó hurrikán összeállítana egy Boeing 747-es repülőgépet. Hoyle és Wickramasinghe ott téved, hogy a darwinizmus *nem* a vakvéletlen elmélete. A darwinizmus a véletlen mutációk és a *nem véletlenszerű* felhalmozó természetes szelekció elmélete. Vajon miért olyan nehéz, még jól képzett tudósok számára is, hogy ezt az egyszerű állítást megértsék?

Darwinnak magának a természettudósok egy korábbi nemzedékével kellett megküzdenie, akik szintén a véletlent kiáltották ki elmélete buktatójának. Az akkori

idők talán legkiválóbb fizikusa, William Thomson, vagyis Lord Kelvin volt Darwin legnevesebb tudományos ellenfele. Sok más tudományos eredménye mellett hűlési sebességre alapozva kiszámította a Föld korát, feltételezve, hogy az kezdetben a Nap „tüzeinek” része volt – néhány tízmillió évet kapott. A modern becslések ezt az értéket néhány milliárd évre teszik. Semmit sem von le Lord Kelvin érdemeiből, hogy becslése csak a valós érték századrésze volt. Az ő korában még nem léteztek a radioaktív bomláson alapuló kormeghatározási módszerek, és nem ismerték a magfúziót, a Nap „tüzeinek” lényegét sem, így hűlésen alapuló számításai már eleve kudarcra voltak ítélve. Ami kevésbé megbocsátható, az az, hogy „fizikusként” lenézően elvetette Darwin biológiai bizonyítékait: a Föld nem elég idős, nem volt elég idő arra, hogy a darwini evolúció folyamata eljuthasson azokhoz az eredményekhez, melyeket magunk körül látunk; a biológiai bizonyítékok szükségszerűen helytelenek, elsöprik őket a fizika felsőbbrendű bizonyítékai. Darwin joggal felelhetne volna (nem tette meg), hogy az evolúciót biológiai bizonyítékok támasztják alá, vagyis rendelkezésre állt a szükséges idő, ebből következik, hogy a fizikai bizonyítékok nem helytállóak!

A „véletlen” kérdésére visszatérve, Lord Kelvin a British Association tekintélyes elnöki posztján idézte helyeslően egy másik híres természettudós, Sir John Herschel – aki a darwinizmust a „fej vagy írás tudományának” nevezte – következő szavait:

Nem fogadhatjuk el érvényesebbnek a mesterséges és okszerű változást és természetes szelekciót mint a múlt és a ma élővilágának magától értetődően elégséges kialakítóját, mint azt, hogy Shakespeare művei vagy az *Elemek* laputi módszerrel készültek.

Herschel itt *Gulliver utazásai*-ra. utal, ahol Swift pellengérré állítja a laputi könyvírást: szavak véletlenszerű egymás után tételét. Ő és Kelvin, Hoyle és Wickramasinghe, névtelenül idézett fizikusom és Jehova tanúinak számos írománya mind ott követi el a hibát, hogy úgy kezeli a darwini természetes szelekciót, mintha az a laputi könyvírás megfelelője lenne. Egészen napjainkig, és olyan körökben is, ahol igazán jobban kéne tudniuk, a darwinizmust széles körben a „vakvéletlen” elméletének tartják.

Pedig kiabál, ordít, magával ragad az a nyilvánvaló tény, hogy ha a darwinizmus valóban a vakvéletlen elmélete lenne, akkor egyszerűen nem működhetne. Nem kell matematikusnak vagy fizikusnak lenni, hogy kiszámoljuk: a pusztán „fej vagy írás” véletlennek valóban az örökkévalóság ideje sem lenne elég, hogy egy szemet vagy akár egy hemoglobinmolekulát összerakjon. Ez messze nem kizárólag a darwinizmus problémája: a szem és a térd, az enzimek és a könyökízület és az élet többi csodája csillagászati számokkal kifejezhető valószínűtlensége éppen az a probléma, amelyet bármely, az életet magyarázó elméletnek meg kell oldania – és a darwinizmus az egyetlen, mely meg tudja oldani. Úgy oldja meg, hogy a valószínűtlenséget apró, legyőzhető lépésekre osztja el, „szétkeni” a szükséges szerencsét; megkerüli a Valószínűtlenség Hegyét, és a lankás oldalon mászik felfelé – évente egy centimétert. Valóban csak Isten próbálhatná meg, hogy egyetlen ugrással fenn teremjen a sziklafal tetején. Ha Istent kinevezzük kozmikus Teremtőnknek, ismét ott vagyunk, ahonnan elindultunk. Bármely Teremtő, aki képes megalkotni az élőlények szédítően bonyolult világát, szükségszerűen maga is minden képzeletet felülmúlóan bonyolult és

intelligens. A „bonyolult” pedig ugyanaz, mint a „valószínűtlen”: magyarázatért kiált. Ha egy teológus azt állítja, hogy Istene végtelenül egyszerű, akkor (nem túl) elegánsan megkerülte a kérdést; hogyan lenne képes egy végtelenül egyszerű Isten – bármilyen kiváló is – világegyetemet tervezni (nem is beszélve a bűnök megbocsátásáról, az imák meghallgatásáról, a bor átváltoztatásáról és egyebekről, amiket elvárnak tőle)? Mindkettő egyszerre nem megy. Isten vagy képes világot tervezni és megtenni minden mást, amit egy istennek meg kell tennie – ekkor *ő maga* követel magyarázatot; vagy nem ilyen, és akkor magyarázatot sem adhat. Istent kell úgy tekinteni, mint Fred Hoyle végső Boeing 747-esét.

A Valószínűtlenség Hegyének csúcsai megkövetelik, hogy összekapcsoljuk a szemekben és enzimmolekulákban (és az őket megtervező istenekben) összesűrűsödő tökéletességet és a valószínűtlenséget. Az, hogy egy szem vagy egy fehérjemolekula valószínűtlen, nagyon pontos állítás. Ezek az objektumok különleges módon elrendezett részek tömegéből állnak. Ezeket a részeket felmérhetetlenül sok módon lehet elrendezni – a fehérjemolekula esetében ki is tudjuk számítani ezt az értéket. Isaac Asimov elvégezte a számítást egy adott fehérje, a hemoglobinszámra, és az eredményt hemoglobinszámmak nevezte el. A hemoglobinszám végén 190 nulla áll. Ennyiféleképpen lehet elrendezni a hemoglobint alkotó aminosavakat úgy, hogy *ne* hemoglobint kapjunk. A szem esetében nem végezhetjük el ezt a számítást anélkül, hogy ne tegyünk rengeteg feltételezést, de beláthatjuk, hogy az eredmény hasonlóan döbbenetes nagyságrendű szám lenne. A részecskék valódi, észlelt elrendeződése rendkívül valószínűtlen, hiszen a lehetséges elrendezések milliárdjai közül egy csupán egyetlenegy.

Bizonyos szempontból bármely elrendeződés ugyanolyan valószínűtlen, mint egy másik. Egy roncsstelep is ugyanolyan valószínűtlen, mint a Boeing 747, hiszen darabjai millió más elrendezésben is előfordulhatnak. Itt jön be a minőség fogalma. A Boeing-alkatrészek különböző elrendezéseinek túlnyomó többsége sohasem fog repülni – csupán egy elenyésző kisebbség lesz erre képes. A szem részei milliárdnyi elrendezésének többsége sohasem lesz képes a látásra – csak egy elenyésző kisebbség. Az emberi szem a szférikus és kromatikus aberrációval korrigált éles képet alkot az ideghártyán; a pupilla tágításával vagy szűkítésével lényegében azonos mennyiségű fényt enged be, függetlenül a külső fényviszonyok erőteljes változásától; attól függően, hogy közeli vagy távoli tárgyra néz, automatikusan változtatja a szemlencse fókusz-távolságát; fényérzékelő sejtek három különböző típusának ingerületi állapotát figyelembe véve szint állapít meg. A szem részeinek gyakorlatilag bármely véletlenszerű összeállítása képtelen lesz a fenti bonyolult, kifinomult feladatok közül akár csak egynek az ellátására is. A létező elrendezés valamilyen szempontból rendkívül különleges. Minden elrendezés éppen úgyannyira valószínűtlen, mint egy másik. De azok az elrendezések, amelyek semmire sem jók, számban messze túlhaladják a hasznosakat. A hasznos eszközök valószínűtlenek, ezért külön magyarázatra szorulnak.

R. A. Fisher, a kiváló matematikus-genetikus, a modern statisztika tudományának megfelelője 1930-ban, a tőle megszokott agyonrészletező stílusban (sohasem

találkoztam vele, de szinte hallom, amint kínosan korrekt hangon diktál végtelen türelmű feleségének), így ír:

Egy élő szervezetet csak annyiban tekinthetünk egy adott helyzethez vagy a környezetét alkotó helyzetek összességéhez alkalmazkodottnak, amennyiben el tudunk képzelni olyan kismértékben különböző helyzeteket vagy környezeteket, ahol egészében rosszabbul alkalmazkodottnak minősülne; és ugyanígy, ha el tudunk képzelni olyan kissé különböző élő szervezeteket, melyek rosszabbul adaptáltak lennének az adott környezethez.

A szemek, fülek és szívek, a keselyű szárnya, a pók hálója mind lenyűgöznek bennünket nyilvánvalóan tökéletes alkotásukkal, függetlenül attól, hol látjuk őket. Nincs feltétlenül szükség arra, hogy természetes környezetükben találkozzunk velük ahhoz, hogy lássuk: alkalmasak valamilyen feladat betöltésére, és ha részeit átrendeznénk vagy megváltoztatnánk, az esetek túlnyomó részében rosszabb eredményt kapnánk. Sugárzik róluk a „valószínűtlen tökéletesség”. Egy mérnök felismerné bennük azt a szerkezetet, amit tervezne, ha megbíznák az adott probléma megoldásával.

Íme egy újabb módja annak, hogy elmondjuk: az efféle szerkezetek nem jöhettek létre pusztán véletlen útján. Mint láttuk, a pusztán véletlen alapuló magyarázat azt jelenti: egyetlen ugrással hódítjuk meg a Valószínűtlen Hegyének legmeredekebb csúcsát. Vajon mi felel meg a túloldali barátságos zöld lejtőkön való felsétálásnak? A véletlenszerű változatok lassú, fokozatos, felhalmozó, nem véletlenszerű túlélése, amit Darwin természetes szelekciónak nevezett. A Valószínűtlen Hegye metafora jeleníti meg a fejezet elején idézett szkeptikusok tévedését. Ott hibáztak, hogy nem tudták levenni tekintetüket a függőleges meredély szédítő magasságáról. Azt hitték, ezen a rémítő sziklafalon át vezet az egyetlen út a csúcsra, ahol a szemek, fehérjemolekulák és más hihetetlenül valószínűtlen alkatrész-elrendezések lakoznak. Darwin nagy tette az volt, hogy felfedezte a hegy túloldalán szelíden emelkedő sétatut.

Lehetséges lenne mégis, hogy a „nem zörög a haraszt, ha nem fúj a szél” esetével állunk szemben? A darwinizmust gyakran félreértelmezik, a vakvéletlen elméletének nevezik. Nem tett mégis valami olyasmit, amivel kiprovokálta a félremagyarázást? Igen, van valami a félreértési láz hátterében, egy gyenge kis alap a torzításra. A darwini folyamat egy láncszeme valóban véletlenszerű: a mutáció. A mutáció folyamata kínál fel újra és újra friss genetikai anyagot a szelekció számára, és ezt a folyamatot rendszerint véletlenszerűként írják le. A darwinisták azonban pusztán azért hangsúlyozzák a mutáció véletlenszerűségét, hogy *szembeállítsák* a szelekció, a másik fontos folyamat irányítottágával. A természetes szelekció működése szempontjából egyáltalán nem *szükséges*, hogy a mutáció véletlenszerű legyen. A szelekció működik, akár irányított a mutáció, akár nem. Azért hangsúlyozzuk, hogy a mutáció véletlenszerű is *lehet*, hogy felhívjuk a figyelmet arra a kulcsfontosságú tényre, hogy ezzel szemben a szelekció tökéletesen és lényegét tekintve *nem* véletlenszerű. Ironikus, hogy a mutáció, illetve a szelekció nem véletlenszerű volta közti különbség hangsúlyozása oda vezetett, hogy sokan azt hiszik: az egész elmélet a véletlenszerűségről szól.

Nem egy értelemben maguk a mutációk sem véletlenszerűek, de ezek a megközelítések a mi témánk szempontjából nem érdekesek, mert nem járulnak hozzá építő módon az élőlények valószínűtlen tökéletességéhez. Pl. a mutációk fizikai okait jól ismerjük, ilyen szempontból tehát a mutációk nem véletlenek. A röntgenasszisztensek azért adnak ólomkötenyt a betegre és azért kapcsolják be távolról a gépet, mert a röntgensugárzás mutációt okoz. A mutációk egyes génekben nagyobb valószínűséggel lépnek fel, mint másokban. A kromoszómákon ún. forró pontokat találunk, ahol a mutációs ráta jelentősen magasabb, mint másutt. Ez is a nem véletlenszerűség egy formája. A mutációk megfordíthatók (visszmutálódás). A legtöbb gén esetében az oda-vissza mutáció valószínűsége egyforma. Máshol az egyik irányú mutáció gyakoribb, mint a fordított irányú. Innen ered az ún. „mutációs nyomás” – hajlam arra, hogy az evolúció a szelekciótól függetlenül egy bizonyos irányban haladjon tovább. Ez is azt példázza, hogy a mutációt nem írhatjuk le teljesen véletlenszerű folyamatként. Vegyük észre, hogy a mutációs nyomás nem feltétlenül a tökéletesedés irányába hat, ahogy a röntgensugarak sem. Éppen ellenkezőleg: a mutációk többsége, bármilyen okból is keletkezett, a tökéletesedés szempontjából véletlenszerű, és ez jelenti azt, hogy rendszerint károsait, hiszen valamit elrontani többféleképpen lehet, mint javítani.

Elképzelhetünk egy olyan elméleti világot, ahol a mutációk a tökéletesedés irányába hatnak. Ebben a feltételezett világban a mutációk nemcsak abban az értelemben lennének nem véletlenszerűek, ahogyan pl. a sugárzás keltette mutációk nem azok; e feltételezett mutációk módszeresen arra irányulnának, hogy egy lépéssel a szelekció előtt járjanak, megfelelve az élőlény szükségleteinek. Ez azonban olyan fajta nem véletlenszerűség, melynek – ellentétben számos elmélet vágyakozásával – szinte biztosan nincs tényleg alapja: nem jellemzi, hogy a mutációk „tudomást vennének” a szervezet szükségleteiről; azt sem tudjuk, hogyan lenne ez lehetséges. Mit jelenthet a „tudomásulvétel”? Tegyük fel, hogy dermesztő jégkorszak köszönt egy korábban mérsékelt éghajlati vidékre. A vékony bundájú őzek egykettőre kihalnak. A legtöbb példány elpusztul, de a faj fennmaradhat, ha „pillanatok alatt” képes a pészmatulokéhoz hasonló dús szőr kabátot növeszteni. Elméletben kitalálhatunk egy mechanizmust, mely a megfelelő időben „bekapcsol” kedvező mutációkat. Tudjuk, hogy a röntgensugárzás megemeli az általános mutációs rátát, függetlenül attól, hogy ez sűrűbb vagy vékonyabb szőrzet kialakulásához vezet. Mi lenne, ha a rendkívüli hideg szintén megemelné a mutációs rátát, de csak egy irányban: a vastagabb bundát kódoló gének irányában? A nagy hőség pedig, szimmetrikus módon, a vékonyabb szőrzetet kódoló gének mutációval való létrejöttét segítené.

A darwinisták egyáltalán *nem bánnák*, ha ilyen segítő mutációk léteznének. Nem ingatnák meg alapjaiban a darwinizmust, csupán kizárólagos szerepét vétőznák meg. Ha hátszélben teszünk meg egy transzatlanti repülőutat, sokkal gyorsabban érhetünk célba, de ettől függetlenül továbbra is elhiszük, hogy szükség van a sugárhajtásos repülőgépre. A darwinisták azonban igencsak meglepődnének (és törni kezdenék a fejüket), ha kiderülne, hogy létezik ilyen jótékony mutációs mechanizmus, három okból is.

Először is, bár erőteljesen kutatják, mindeddig nem sikerült ilyen mechanizmust felfedezni (az állatok és növények körében semmiképpen sem; van néhány elszórt, cseppet sem általános érvényű ebbe az irányba mutató felfedezés a baktériumok világában, de az adatok nagyon ellentmondásosak). Másodszor, egyetlen létező elmélet sem tudja megmagyarázni, honnan „tudná” a szervezet, milyen mutációt kell indukálni. Elképzelhetőnek tartom, hogy ha évmilliók során már több tucat jégkorszak lezajlott, kialakulhat egyfajta „faji emlékezet”; a természetes szelekció egy ma még fel nem fedezett, magasabb rendű változata beépíthet egy helyes irányba való mutációs hajlamot, mely a jégkorszak első fuvallatára működésbe lép. Ismétlem azonban, semmiféle bizonyítékunk nincs egy ilyen hatást illetően, sőt még elméletet sem dolgoztak ki ezzel kapcsolatban. Harmadszor – és itt visszatérek korábbi állításomhoz – sok darwinista, jómagamat is beleértve, az irányított mutációk javasolt elméletét bántóan feleslegesnek érzi. Ez csupán egy érzelmi alapú vélekedés, aminek éppen emiatt nem kell nagy jelentőséget tulajdonítani. Azért viseltetünk ellenszenvvel az irányított mutáció elképzelésével szemben, mert gyakran azok javasolják, akik tévesen azt hiszik, hogy erre *szükség van*: akik nem értik, hogy a szelekció önmagában elég erőteljes ahhoz, hogy mozgassa az evolúciót, még akkor is, ha a mutációk véletlenszerűek. A nem véletlenszerű szelekció erejét éppen úgy lehet meggyőzően bemutatni, ha hangsúlyozzuk: az elmélet *megengedi*, hogy a mutációk véletlenszerűek legyenek. Mint azonban már korábban is leírtam, az elmélet szempontjából lényegtelen, hogy a mutációk valóban véletlenszerűek legyenek, és szó sincs arról, hogy emiatt az egész elméletre rá szabadna sütni a véletlenszerűség bélyegét. A mutáció lehet véletlen, a szelekció viszont határozottan nem az.

Mielőtt még ott hagynánk özeinket az egyre keményedő fagyban, tegyünk említést a gondviselésszerű mutáció elméletének még egy változatáról, melynek gondolata felvetődhetett az utolsó három bekezdés elolvasása során. Valóban nem könnyű elképzelni, honnan „tudhatja” a szervezet, hogy hidegben sűrűbb, melegben pedig vékonyabb szőrzetet eredményező mutációra van szükség. Valamivel könnyebb elképzelni, hogy a mutációs ráta – minden irányban egyformán – előre programozott módon megemelkedik, ha az élet nehezebbé válik. Ennek intuitív értelmezése a következő lehet: egy válsághelyzetet, pl. jégkorszakot vagy nagy hőséget a szervezet stresszként él meg. A súlyos stressz – váltsa ki hideg, meleg, szárazság vagy bármilyen meghatározhatatlan ok – azt jelzi, hogy a szervezet *valamiért* nem felel meg tökéletesen az adott körülményeknek. Ha nekem már nem is használ, de talán gyermekeim élete könnyebb lehet, ha génjeim az ivarszerveimben rohamos mutálásba kezdenek, véletlenszerűen, mindenféle irányokban. Bármilyen is a környezet kihívása – hideg, meleg, szárazság, özönvíz –, azok az utódaim, akik rossz irányúnak bizonyuló mutációkat hordoznak (ők lesznek többségben), el fognak pusztulni. Ők azonban nagy valószínűséggel a rossz mutáció nélkül is elpusztultak volna, ha a kihívás tényleg súlyos. Talán ha egy élőlény mutáns gnómok és szörnyszülöttek tömegét hozza a világra, megnöveli annak esélyét, hogy lesz egy olyan utóda is, amely jobban megbirkózik a válságos helyzettel, mint ő maga.

Valóban léteznek olyan gének, melyek feladata az, hogy szabályozzák más gének mutációs rátáját. Elméletben érvelhetünk azzal, hogy e „mutátor gének”-et a

stresszhelyzet aktivizálja, és ez kedvező helyzetet teremt egyfajta magas szintű természetes szelekciónak. Sajnos azonban ezt az elméletet ugyanúgy nem támasztja alá semmi, mint a gondviselészerűen irányított mutációk előbb említett elméletét. Először is, nincs rá semmi bizonyíték. Ennél is nagyobb baj, hogy komoly elméleti nehézségek vannak minden olyan nézettel, mely szerint a magasabb mutációs rátát a természetes szelekció előnyben részesítené. Egy általános érvényű érvelés ahhoz a következtetéshez vezet, hogy a mutátor gének hajlamosak arra, hogy előbb-utóbb eltűnjenek a populációból; ez érvényes az elméletünkben szereplő stresszhelyzetben lévő állatokra is.

Az érvelés röviden a következő. Minden olyan állat, mely elég hosszú időt megélt ahhoz, hogy szülő lehessen, szükségszerűen elég jól sikerült példány. Ha valami elég jót véletlenszerűen változtatgatni kezdünk, nagy az esély rá, hogy csak rontunk rajta. Tény, hogy a mutációk túlnyomó többsége káros. Az is igaz, hogy a mutációk elenyészően csekély hányada javító hatású – végül is ezért lehetséges egyáltalán az evolúció a természetes szelekción keresztül. Az is igaz, hogy a teljes mutációs rátát növelő mutátor gén segíti hordozóját abban, hogy hozzájusson egy ilyen ritka kincshez, egy javító hatású mutációhoz. Ha ez megtörténik, maga a mutátor gén is felvirágozik, hiszen közös testben lakozik azzal a javító hatású génnel, melynek születésénél bábáskodott. Azt gondolhatnánk, hogy ennek következtében a mutátor génre pozitív szelekció hat, így a mutációs ráta ily módon növekedhet. Ám vigyázzunk: hová vezet mindez?

Az újabb nemzedékekben az ivaros szaporodás alaposan megkeveri, rekombinálja az egyes testekben előforduló génegyütteseket. A nemzedékek múltával semmi sem akadályozza meg, hogy a mutátor gén elszakadjon a jó géntől, melyet létrehozott: lesznek egyedek, melyek csak a jó gént, mások csak a mutátort hordozzák. A jó gént előnyben részesíti a természetes szelekció, *egyre* gyarapodik az újabb nemzedékekben. Teremtőjét, a szerencsétlen mutátor gént azonban az ivaros folyamat keverő hatása kiszorítja. Más génekhez hasonlóan a mutátor gén hosszú távú sorsa *átlagos* hatásától függ. A mutátor által létrehozott jó gén átlagos hatása jó, ezért ez a gén egyre több és több testben fog fennmaradni a populációban. A mutátor átlagos hatása viszont rossz, így – hasznos alkalmi fellángolások ellenére – nagy átlagban a mutátor gént bünteti a természetes szelekció. Többnyire halott vagy torzszülött testekben fordul elő.

A mutátor gének pozitív szelekciója elleni fenti érvelés azon a feltételezésen nyugszik, hogy a szaporodás ivaros. Ivartalan szaporodás esetén az érvelés „keverés” láncszeme hiányzik. A mutátor géneket a természetes szelekció hosszú távon előnyben részesítheti, mivel – ivaros folyamat hiányában – nem szakadnak el az esetenként létrejövő jó génektől, így azokba kapaszkodva „potyázhatnak” át egyik nemzedékből a másikba. Ivartalan szaporodás esetében egy jó mutáció sikeres egyedek klónját indítja el. Egy rossz mutáció egykettőre eltűnik, magával rántva torzszülöttjei klónját. Ha a mutáció elég jó, klónja sokáig virágozik, és ebből minden gén részesül – a rosszak is. A rosszak azért, mert káros hatásai ellenére a klón génjei átlagban jók. A sikeres potyautasok sorában ott lesz a jó mutációk létrejöttéért elsősorban felelős mutátor gén is. A jó mutációk „szeretnék” lerázni a rossz gének ballasztját – az őket „szülő” mutátor gént is ideértve. A jó mutációk – ha gondolkoznának – valami jó, tisztító

ivaros folyamatról álmodoznának. „Ha testeim szeretkezhetnének egy jót – sóhajtoznak –, lerázhatnám e sok kellemetlen kullancsot. Végre saját értékem szerint becsülnének meg. Persze akkor is előfordulna, hogy a jó testek mellett rosszakban is megtalálom magam, de *általában* szabadon élvezhetném saját előnyös hatásomat.” A rossz gének ezzel szemben nem „vágynak” a szexre: nekik ez így a megfelelőbb. Ha saját erejükre hagyatkozva kéne versengeniük a nemiség nevű mindenki mindenki elleni genetikai játszmaiban, hamarosan eltűnnének a színről.

A fenti eszmefuttatás nem magyarázza meg, miért jött létre az ivaros szaporodás, de ennek alapján felépíthető egy ilyen magyarázat. Az, hogy a jó gének számára hasznos a nemiség, a rosszak számára pedig nem, még nem magyarázza, hogy miért léteznek. Az ivaros szaporodást sok elmélet igyekszik magyarázni, de egyik sem lehangolóan meggyőző. A legkorábbiak egyike Müller „fogaskereke”, amely fenti, a jó és rossz gének „vágypairól” szóló mesémnek tudományosan megfogalmazott változata. A mutátor génekkel kapcsolatos soraim támogatják ezt az elméletet. Az ivartalan szaporodás nemcsak megengedi, hogy a mutátor gének felszaporodjanak egy populációban – aktívan segíti őket. Ennek eredményeképp valószínű, hogy az ivartalan úton szaporodó klónok gyorsabban halnak ki, vagyis Müller fogaskerekének működése felgyorsul. A szex és eredete azonban egy másik történet, amit nem lehet egy-két szóval elmondani. Talán egy szép napon összeszedem a bátorságom ahhoz, hogy teljes mélységében foglalkozzak a témával, és írok egy könyvet a nemiség evolúciójáról.

Eddig a kitérő. A lényeg az, hogy ivaros szaporodás mellett a természetes szelekció többnyire bünteti a mutációkat, bár néhány egyedi mutációt (elenyészően keveset) esetenként előnyben részesíthet. Ez stresszhelyzetben is igaz, bár ilyenkor első pillantásra hihető módon megmagyarázható az is, miért nő a mutációs ráta. A mutációra való hajlam mindig hátrány, még ha esetenként jóra is fordulhat. A legjobb úgy felfogni – ha egy kicsit ellentmondásosnak tűnik is – hogy a természetes szelekció a nulla mutációs rátát részesíti előnyben. Szerencsénk – és az evolúció folyamatának szerencséjére – ez a genetikai nirvána sohasem valósulhat meg. A darwini folyamat második lépése, a természetes szelekció nem véletlenszerű, a tökéletesedés irányába ható folyamat. A folyamat első lépése, a mutáció véletlenszerű abban az értelemben, hogy nem vezet kimondottan a javulás irányába. Minden javulás forrása tehát a véletlen – innen az a tévhit, hogy a darwinizmus a véletlen elmélete. De ez bizony tévhit.

A meggyőződés, hogy a természetes szelekció a nulla mutációs rátát részesíti előnyben és a mutációk nem irányítottak, nem zár ki egy izgalmas lehetőséget, amit „az evolúcióra való képesség evolúciójának” neveztem, és írtam is róla egy cikket ezzel a címmel. Az ötlet újabb verzióját – a kaleidoszkópembriológiát – a 7. fejezetben fogom részletezni. Most viszont fordítsuk figyelmünket a darwini folyamat másik felére, a természetes szelekcióra. Bár megengedjük, hogy a mutációk véletlenszerűek legyenek és egy bizonyos értelemben szinte biztosra vehető, hogy azok, a természetes szelekció lényege, hogy *nem* véletlenszerű folyamat. A túlélő farkasok csoportja nem véletlenszerűen kiragadott egyedekből áll, hanem a leggyorsabb lábakat, legélesebb fogakat és érzékszerveket, legraszababb gondolkodást gyűjti egybe – ezek adják tovább génjeiket. A ma megtalálható gének múltbeli gének csoportjából vett nem véletlenszerű

minta másolatai. Minden nemzedék gészűrő. Azok a gének, melyek nemzedékek milliói után is átjutottak a szűrőn, rendelkeznek azzal a tulajdonsággal, amire a szűrőn való átjutáshoz szükség van. Millió és millió test embriológiai úton történő kialakításában vettek részt anélkül, hogy hibáztak volna. A testek milliói mind megélték a felnőttkort. Mindannyiuk elég vonzó volt ahhoz, hogy párt találjon – vonzó a saját faja ellentétes nemű egyede számára. Valamennyiük képes volt arra, hogy legalább egy utódot nemzzen vagy világra hozzon. A szűrő könyörtelen. Akik túljutnak rajta, nem véletlenül jutnak túl: a legjobbakról van szó. A legjobbakról, akik túléltek jégkorszakokat és aszályokat, betegségeket és ragadozókat, zsúfoltságot és magányt. Túléltek a körülmények változásait, nemcsak olyan értelemben, hogy túrték az esőt, a fagyot vagy a szárazságot, de fennmaradtak különböző gének társaságában, az ivaros szaporodásnak köszönhetően minden nemzedékben másokkal. A túlélő gének saját fajuk génkészletének legkülönbözőbb tagjaival együttműködve eredményesek, ami azt jelenti, hogy olyan gének, melyek képesek sikerrel együttműködni a génkészlet többi tagjával. A gének környezetének – melyben fenn kell maradniuk – meghatározó része a faj génkészletének többi tagja: útitársaik az „Édenkertből jövő folyamom”, mely egymást követő testek során keresztül halad a nemzedékeken át. A különböző fajok e folyó mellékágai, elkülönülő élőhelyek, melyekben különböző génegyütteseknek kell fennmaradniuk.

Az egyszerűség kedvéért a mutációt a darwini folyamat első, a természetes szelekciót második lépésének neveztük. Ez félrevezető abban az értelemben, hogy azt a képzetet kelti, hogy a természetes szelekció békésen várakozik, míg fel nem lép egy mutáció, amit vagy elvet, vagy megőriz, és a várakozás újból kezdődik. Így is lehet: feltételezhető, hogy egy ilyenfajta természetes szelekció működőképes és működik is valahol a világegyetemben, Földünkön azonban más a helyzet. Eleve létezik a változatok egy hatalmas készlete, melyet elsődlegesen a mutációk hoztak létre, de az ivaros szaporodás az, ami újra és újra megkeveri és tovább fokozza változatosságát. A változatokat valóban a mutáció hozza létre, de lehet, hogy jóval azelőtt, mint hogy a természetes szelekció „munkába veszi” őket.

Oxfordi munkatársam, a néhai Bernard Kettlewell például köztudottan a sötét, majdnem fekete lepkék evolúcióját vizsgálta korábban világos színű fajokban. Az általa tanulmányozott faj, a nyírfaaraszó (*Biston betularia*) esetében a sötét színű példányok kicsit szívósabbak, mint a világos színűek, de tiszta, vidéki tájakon ritkák, mert sötét színük miatt a madarak könnyedén észreveszik és bekapják őket. Ipari területeken, ahol a fakéreg a szennyezett levegőtől sötét színűvé válik, a sötét példányok kevésbé feltűnőek, és ezért kevesebbet is falnak fel közülük. Ennek következtében végre élvezhetik nagyobb ellenálló képességük előnyét is. Az ipari területeken ezért a sötét alakok a múlt század közepe óta elszaporodtak, elsőpró számbeli fölényre tettek szert világos fajtársaikkal szemben. Ez a természetes szelekció működésének leghitelesebben leírt esete. Miért éppen itt említettük ezt a történetet? Azért, mert sokszor helytelenül úgy gondolják, hogy az ipari forradalom után a szelekció egyetlen, frissen keletkezett mutációval dolgozott. Ezzel szemben biztosak lehetünk abban, hogy korábban is éltek sötét színű példányok – csak nem voltak hosszú életűek. A legtöbb mutációhoz hasonlóan minden bizonyos ez is visszatérő volt – ám a

sötét lepkéket egykettőre bekapták a madarak. Az ipari forradalom hatására megváltozott körülmények között a természetes szelekció készen találta a sötét gének egy kicsiny csoportját, mellyel elkezdhetett dolgozni.

Meghatároztuk, mire van szükség ahhoz, hogy evolúció történhessen: mutációra és természetes szelekcióra. E két folyamat automatikusan megindul bármely bolygón, ha adott egy még alapvetőbb kellék, amit bár nem könnyű, de nyilvánvalóan nem is lehetetlen biztosítani. Ez a bonyolult alapvető kellék az öröklődés. Természetes szelekció csak akkor működhet bárhol a világegyetemben, ha a létezők leszármazási sorokba rendezhetők, ahol közvetlen elődeikre jobban hasonlítanak, mint a populáció egyéb tagjaira átlagosan. Az öröklődés nem ugyanaz, mint a szaporodás. Szaporodás öröklődés nélkül is előfordulhat. A prérítüzek pl. öröklődés nélkül szaporodnak.

Képzeljünk el egy száraz, kiégett füves pusztát, mely minden irányban a szemhatárig nyúlik. Egy pontján egy gondatlan dohányos eldob egy égő gyufát, és a száraz fű egy pillanat alatt lobogó lángra lobbant. Dohányosunk elrohan, amilyen gyorsan csak fuldokló tüdeje engedi, minket azonban most jobban érdekel a tűz terjedése. Nem egyszerűen szétterjed a kiindulási pontból. Szikrákat, izzó fűdarabokat is hány a levegőbe, melyeket a szél felkap és messzire elsodor. Ha egy ilyen szikra leereszkedik, újabb tüzet lobbant fel a taplószáraz prérin. Ez az új tűz újabb szikrákat szór, amelyek újabb tüzeket szülnek valahol távolabb. Mondhatjuk, hogy a tüzek bizonyos értelemben szaporodnak. Minden tűznek van szülője: amelyik a szikrát útjára bocsátotta. Van tehát nagyszülő tüze, dédszülő tüze és így tovább, az ősatya a gondatlanul eldobott gyufa tüze. Minden tűznek csak egyetlen anyja van, gyermeke viszont több is lehet, hiszen sok szikrát szór szerteszét. Ha felülről követjük végig az eseményeket, és feljegyezzük minden egyes újabb tűz fellobbanását, megrajzolhatjuk a prérítüzek családfáját.

A történet lényege, hogy bár a tüzek szaporodnak, nem beszélhetünk *öröklődésről*. Ha lenne, egy tűznek jobban kéne szülőjére hasonlítania, mint a többi tűzre általában. Semmi gond nincs azzal a *feltételezéssel*, hogy a tűz hasonlít szülőjére. Beszélhetünk ilyesmiről, hiszen a tüzek különbözőek, akárcsak az emberek. Egy tűz lángjának vagy füstjének lehet saját, jellemző színe, pattogása és így tovább, és e tulajdonságaiban hasonlíthat szülőjére. Ha általában igaz, hogy a tüzek *hasonlítanak* szüleikre e tulajdonságokban, beszélhetünk öröklődésről. A valóságban azonban egyáltalán nem hasonlítanak jobban szüleikre, mint a prérin fellobbanó számtalan tűz valamelyikére. Minden egyes fellobbanás lángmérete, füstszíne, zaja környezetétől függ; attól, hogy a szikra hová esett: mennyire száraz ott a fű, honnan és milyen erővel fúj a szél. Ezek mind a helynek a jellemzői, ahová a szikra esett, nem pedig annak a tűznek a jellemzői, ahonnan a szikra származik.

Csak akkor beszélhetnénk öröklődésről, ha minden szikra magával vinne valamilyen minőséget, szülőtüzeének valamilyen lényeges tulajdonságát. Pl. tegyük fel, hogy vannak sárga, piros és kék lánggal égő tüzek. Ha a sárga lángú tüzek szikráiból újra sárga lángú tüzek erednek, a piros lángúakból pedig piros lángúak, akkor valódi öröklődésről van szó. A valóság azonban más. Ha kék lángot látunk, azt mondjuk: „Rézsók lehetnek ott”, nem pedig azt, hogy „ez a tűz egy távoli kék lángú tűz szikrájából lobbant fel”.

Ez az a pont, ahol az emberek, nyulak és pitypangok különböznek a tüzekről. Ne zavarjon senkit az a tény, hogy a nyulaknak két szülőjük, négy nagyszülőjük stb. van, a tüzeknek pedig mindebből csak egy. Ez fontos különbség, de most nem erről beszélünk. A kukacoskodók gondolhatnak a botsáskára vagy levéltetvekre, ahol a nőtények szűznemzéssel lányok és lányunokák nemzedékeinek sorait hozzák világra hímek közreműködése nélkül. Egy botsáska alakját, színét, méretét és temperamentumát kétségkívül befolyásolja, hogy hol, milyen körülmények között nő fel; de befolyásolja az a szikra is, mely kizárólag a szülőitől a gyermek felé száll.

Mi tehát ez a titokzatos szikra, mely átszáll a szülőiről a gyermekekre, de nem egyik tűzről a másikra? Bolygónkon ez a DNS, a világ legsodálatosabb molekulája. Könnyen elképzeltethetjük, hogy a DNS az az információ, melynek segítségével egy test előállít egy másik, magához hasonló testet. Helyesebb azonban, ha azt képzeljük el, hogy a test egy eszköz, melynek segítségével a DNS magához hasonló új DNS-t hoz létre. Egy adott pillanatban, akár éppen most is, Földünk összes DNS-e sikeres ősök töretlen láncolatán keresztül jött létre. Nincs két egyed (az egypetéjű ikrek kivételével), akiknek pontosan megegyező DNS-ük lenne. Az egyedek DNS-e közti különbség ténylegesen befolyásolja túlélésüket, és annak esélyét, hogy magukhoz hasonló DNS-t hozzanak létre. Megismétlem, mert nagyon fontos: az a DNS, mely megtette az idők útján a máig vezető utat, olyan DNS, mely évek százmillióin keresztül sikeres ősök testében lakozott. Számptalan ősjelölt fiatalon elpusztult vagy nem sikerült párt találnia – az ő DNS-ük eltűnt ebből a világból.

Könnyű lenne most helytelenül arra gondolni, hogy valami, ami a sikeres testek sajátja – a siker illata, a szentség elixírje –, „átkerül” a bennük lévő DNS-re. Nem erről van szó. A DNS folyama, mely keresztüláramlik rajtunk, tiszta folyó, mely – a mutációkat leszámítva – ugyanúgy hagyja el testünket, ahogy érkezett, bár a nemiség folyamata állandóan kavargatja. DNS-ünk felét apánktól, felét anyánktól kapjuk. Petesejtjeink vagy spermiumaink mindegyike az apai és anyai génfolyóág egyedülálló keverékét tartalmazza. Mondanivalóm lényegén azonban ez mit sem változtat. A sikeres ősök semmit sem „adnak át” a testükön a távoli jövő felé áthaladó géneknek.

A darwini felfogás nagyon egyszerű magyarázatot ad arra, hogy az élőlények miért teszik olyan jól azt, amit tesznek: őseik felhalmozott bölcsességét hasznosítják. Nem tanult vagy szerzett bölcsesség ez, hanem olyan bölcsesség, mely szerencsés, véletlenszerű mutációknak köszönhetően keletkezett, majd szelektív, nem véletlenszerű módon beépült a faj genetikai adatbázisába. A szerencse mértéke nemzedékenként nem volt nagy: éppen csak annyi, hogy egy szkeptikus fizikus (akik közül néhányat idéztem a fejezet elején) is elhihesse azt. Mivel azonban az apró szerencsék sok nemzedéken át felhalmozódtak, a végeredmény szembeszökő valószínűtlenségét joggal találjuk lenyűgözőnek. Az egész darwini játék alapja az öröklődés léte, az egész folyamat abból következik. Amikor azt írtam, hogy az öröklődés az alapvető tényező, ezen azt értettem, hogy a darwini folyamat, vagyis az élet keletkezése többé-kevésbé elkerülhetetlenül az univerzum bármely bolygóján bekövetkezik, ahol megjelenik valami, ami az öröklődéssel egyenértékű.

Visszaértünk a Valószínűtlenség Hegyéhez, a szerencse „szétkenéséhez”: vegyünk szemügyre valamit – pl. egy szemet ott, ahol korábban nem volt szem –, aminek a

létrejöttéhez, úgy tűnik, hihetetlen adag szerencsére volt szükség, és magyarázzuk meg oly módon, hogy a hatalmas szerencsét apró szerencsedarabkára osztjuk fel, melyek mindegyike hozzáadódik az előzőekhez. Már láttuk, hogyan történhet ez meg a túlélő DNS pici, ősi szerencsedarabkáinak felhalmozódásával. A genetikailag jól alkalmazkodott túlélő egyedek kisebbsége mellett rengeteg kevésbé sikeres egyed is élt, akik nyom nélkül eltűntek. Minden nemzedéknek megvannak a darwini vesztesei, ám mindenki az előző nemzedék sikeres kisebbségének leszármazottja.

A hegyek üzenete három részből áll. Az első az itt már elmondott üzenet: nem lehet nagyot ugrani felfelé, a rendezett bonyolultság nem növekedhet meg egyik pillanatról a másikra. Másodsor: lefelé vezető út nincs. Egyetlen faj sem válhat ideiglenesen rosszabbá annak érdekében, hogy később javuljon. Harmadsor: nem csak egy csúcs létezhet: ugyanarra a problémára több, egymás mellett sikeresen élő megoldás is születhet.

Vizsgáljuk meg egy növény vagy állat bármely testrészét. Van értelme megkérdezni, hogy hogyan, milyen fokozatos átalakulások során keresztül alakult ki egy ős valamilyen más testrészéből. Néha – egyre fiatalabb kővételek sorozatán át – végig is követhetjük a történeteket. Nevezetes példája ennek az emlősök hallócsontocskáinak – a hangot a dobhártyától a belső fülbe (nagyszerű impedanciailleszkedéssel, ha a kedves olvasó éppen erre a szakkifejezésre kíváncsi) átvezető három csontocska – fokozatos kialakulása. A fosszilis bizonyítékok világosan bemutatják, hogyan alakult ki lépésenként a három csontocska – a kalapács, az üllő és a kengyel – három megfelelő csontból, melyek hulló őseinkben az állkapocsízületet alkották.

A kővételek nem mindig ilyen beszédeseek. Gyakran találgatnunk kell, mik lehettek a köztes lépcsőfokok, nemegyszer más, rokon vagy nem rokon ma élő állatoktól is ötleteket lopva. Az elefánt ormányában nincsen csont, így nem is fosszilizálódik, de nincs is szükségünk fossziliákra ahhoz, hogy rájövjünk: az elefánt ormánya kezdetben egyszerű orr volt. Most pedig... de hadd idézzek egy könyvből, mely mind a mai napig felkavar, könnyekre fakaszt, ahányszor csak elolvasom: két hős, Iain és Oria Douglas-Hamilton könyve, a „*Harc az elefántokért*”. Fejezeteit a szerzők felváltva írták; álljon itt Oria borzalmat keltő leírása egy elefántmészárlás nyomairól, melynek Zimbabweban volt tanúja:

Néztem a levágott ormányt, és arra gondoltam, hány évmillióra volt szükség ahhoz, hogy az evolúció e csodája megszülessen. Ötvenmillió izma egy megfelelően bonyolult agy irányításával többtonnás erővel képes emelni vagy csavarni; ugyanakkor olyan finom mozdulatokra is képes, mint egy apró termés szájba juttatása. E sokoldalú szerv egyszerre négyliteres ürtartalmú víztartály, melynek vizét az elefánt megihatja vagy magára fröcskölheti; kinyújtott ujj, trombita vagy hangosbeszélő. Az ormány fontos szerepet játszik a társassági életben is: simogat, udvarol, megnyugtat, üdvözlő és kölcsönös ölelésben fonódik össze a társakéval; a hímek fegyverként is használják: ütnek és birkóznak vele, míg az agyarak összecsapnak, és mindkét bika győztesnek tűnik, legyen szó játékról vagy valódi küzdelemről. Most pedig itt fekszik, levágva, sok más ormányhoz hasonlóan, amit Afrika-szerte láttam.

Ez a néhány mondat ismét a megszokott hatással volt rám...

A Hegy üzenete itt az, hogy az elefántok ősei többé-kevésbé meghosszabbodott orrú állatok folyamatos sorát képezték, hasonlóan a tapirokhoz, elefántorrú cickányokhoz, nagyorrú majmokhoz és elefántfókákhoz. A fenti állatok egyike sem áll közelebbi rokonságban sem az elefántokkal, sem egymással. Hosszú orraikat egymástól függetlenül és valószínűleg különböző okokból fejlesztették ki (3.1. ábra).



3.1. ábra. Afrikai elefánt (*Loxodonta africana*) és vele nem rokon hosszú orrú állatok, akik lehet, hogy más célra fejlesztették ki az ormányt (az óra járásával ellenkező irányban, a bal felsőtől kezdve): nagyorrú majom (*Nasalis larvatus*); elefántorrú cickány (*Rhynchocyon petersi*); indiai tapír (*Tapirus indicus*); déli elefántfőka (*Mirounga leonina*)

Az elefánt kialakulása rövid orrú őseiből valószínűleg lassú, fokozatos átmenetek egymásutánja volt, átlagosan egyre hosszabbá váló orrok sora, egyre erősebb izomzattal, egyre finomabb, gazdagabb beidegződéssel. Feltehető, hogy minél hosszabbá vált az átlagos ormány, annál jobban ellátta feladatát. Sohasem állíthatunk olyat, hogy „a közepes hosszúságú ormány nem jó, mert se rövid, se hosszú – két szék között a pad alatt –, de semmi baj, néhány millió év múlva nagyszerű lesz”. Egyetlen állat sem élt még meg pusztán abból, hogy éppen úton volt egy jobb evolúciós megoldás felé. Az állatok élete abból áll, hogy esznek, elkerülik azt, hogy őket megegyék és szaporodnak. Ha egy közepes hosszúságú ormány mindezek szempontjából rosszabb lett volna a kis orrnál és a hosszú ormánynál egyaránt, a hosszú ormány sohasem alakulhatott volna ki.

Abból, hogy az ormánynak kialakulása minden szakaszában hasznosnak kell lennie, még nem következik, hogy minden átmeneti szakaszban ugyanabból a szempontból kell hasznosnak lennie. A kezdeti meghosszabbodás haszna még valószínűleg teljesen más volt, mint apró tárgyak felszedése. Talán kezdetben azért hosszabbodott meg az orr, hogy finomabb szaglást biztosítson – mint az elefántorrú cickányok esetében; lehet, hogy hangerősítő szerv volt, mint az elefántfókák ormánya; de az is elképzelhető – bár a mi szépérzékünk számára nem egyértelmű –, hogy a nemi partnert vonzó ékesség volt, mint az a nagyorrú majmognál megfigyelhető. Persze az is megtörténhetett, hogy „kéz”-ként való használhatósága az elefántevolúció során már viszonylag korán, rövid állapotában kialakult. Ezt a feltételezést a tapírok valószínűsítik, akik orrukkal tépik le és rakják a szájukba a leveleket. Ha különböző állatok hasonló „eszközeit” összehasonlítjuk, jobban megérthetjük mindegyiküket.

Az elefántormány esetében a koponya csontos, fosszilizálódó részei, elsősorban az agyarak és az azokat környező csontok szolgálnak meggyőző bizonyítékokkal. Ma élő két elefántfajunk az agyaras állatok minden kontinensen gazdagon burjánzó családfájának utolsó két hajtása. A mai elefántok agyara óriásira nőtt metszőfog; egyes megkövült fajoknak, pl. a masztodonnak az alsó metszőfogai is megnagyobbodtak és előreálltak. Néha olyan nagyok és hegyesek voltak, mint a mai felső álkapcsi agyarak. Máskor laposak voltak, így a két hatalmas fog széles elefántcsont lapátot vagy ásót képezett, amivel talán gyökereket, gumókat ásott ki gazdája. Az alsó állkapocs lapátja annyira előrenyúlt, hogy a felső ajak nem érte el a kiásott ennivalót. Valószínű, hogy az első ormánykezdemény azért jelenhetett meg, hogy az ásó által felszínre hozott eleséget a szájba juttassa. Később – találgathatjuk – az újszülött ormány olyan remekül megfelelt a táplálék szájba rakásának céljára, hogy az ásó feleslegessé vált. Ezt követően, legalábbis azokban a leszármazási vonalakban, melyek fennmaradtak, az ásó elcsökevényesedett, az ormány azonban megmaradt: mintha partra vetette volna a visszahúzódagály. Az alsó ajak visszaalakult eredeti méretére, de örökségként itthagytta az önállóvá vált ormányt. Az elefántormány evolúcióját részletesebben tárgyalja John Maynard Smith kiváló könyve, *Az evolúció elmélete (The Theory of Evolution)*.

A „preadaptáció” („előre alkalmazkodás”) szó azt jelenti, hogy egy szerv az evolúció során más szerepet kap, mint amit eredetileg végzett. Nagyszerű fogalom: sok esetben segít megoldani evolúciós eredetek rejtélyét. A tarajos sül tuskái ma félelmetes

fegyverek. Nem a semmiből keletkeztek, hanem módosult szőrök, „preadaptált” szervek, melyek eredeti feladata a test melegen tartása volt. Sok emlősállatnak vannak fejlett, erősen specializált illatmirigyei. Eredetüket nehéz lenne megfejteni, ha nem néznénk meg őket mikroszkóp alatt. Ekkor kiderül, hogy a jóval kisebb verejtékmirigyek módosult formái, melyek eredeti feladata a testet hűtő verejték termelése. Ugyanazon állat testének más részein szép számban találhatunk módosulatlan verejtékmirigyeket, így az összehasonlítás egyszerű. Más illatmirigyek valószínűleg a faggyúmirigyekből alakultak ki, melyek eredeti feladata a szőröket védő viaszos váladék kiválasztása volt. A preadaptáció és az újkeletű feladat gyakran összefügg. A verejtéknek szaga van, és történetesen akkor (is) termelődik, ha az állat izgalmi állapotba kerül (köztudott, hogy az ember is hajlamos izzadni, ha fél; magamról is tudom, hogy izzadok, ha egy fontos előadás nem úgy halad, ahogy elterveztem). Az ősi preadaptáció magától értődő módon csúszik át új formájába.

Néha nem könnyű eldönteni, melyik volt előbb – mi a preadaptáció, mi a későbbi specializáció. Darwin a tüdő evolúciós eredetét kutatva az úszóhólyagban kereste a választ. A csontoshalak e gázzal töltött hólyag segítségével szabályozzák lebegőképességüket a Cartesius-féle bűvár (üvegbe zárt apró emberkék, akik a dugó enyhe nyomására emelkednek vagy süllyednek) elve alapján. Az úszóhólyag térfogatát izmok segítségével szabályozva a hal változtathatja, hogy milyen mélységben óhajt egyensúlyi helyzetben lebegve pihenni. Erre csak a valódi csontoshalak képesek. A cápáknak (halszerű külsejük ellenére távolabbi rokonai a csontoshalaknak, mint mi, emberek) nincs úszóhólyagjuk, ezért folyamatos úszómunkával kell biztosítaniuk, hogy a kívánt mélységben lebegjenek. Az úszóhólyag hasonlít a tüdőre, így Darwin azt gondolta, ez lehet az a preadaptáció, melyből tüdönk kifejlődött. A modern zoológusok többsége úgy véli, ez róka fogta csuka: valószínűbb, hogy az úszóhólyag egy egyszerű felépítésű tüdő újkeletű módosulása (a levegőt belélegző halak napjainkban sem ritkák). Bármelyik is a régebbi, azon is el kell gondolkodnunk, mi volt azelőtt. Talán a tüdő/úszóhólyag a bél egy kitüremkedéséből alakult ki, tehát eredetileg emésztő szerepe volt. Evolúciójának minden szakaszában – a Valószínűtlenség Hegyére vezető út minden lépésénél – e kitüremkedés/üreg/tüdő hasznos kellett, hogy legyen gazdája számára.

Miért nem nőhetett ki az elefánt ormánya hirtelen, egyik nemzedékről a másikra? Miért nem születhetett tapírorrú szülőknél váratlanul elefántormányú kicsinyük? Itt három kérdés van elrejtve. Az első az, hogy léteznek-e nagyon nagy hatású, ún. makromutációk. A második, hogy ha léteznek, megőrzi-e őket a természetes szelekció? A harmadik egy bonyolultabb kérdés: mit tekintünk nagynak, ha nagy mutációs változásról beszélünk? Itt visszatérek egy olyan megkülönböztetésre, melyet egy korábbi könyvemben fejtettem ki: a „Boeing 747-es makromutációk” és az „elnyújtott DC8-as makromutációk” megkülönböztetésére.

Az első kérdésre igen a válasz. Makromutációk léteznek. Előfordul, hogy szüleiktől, fajtársaiktól gyökeresen, néha rettenetesen eltérő élőlények születnek. A 3.2. ábrán látható varangyot – az őt megörökítő Scott Gardner, a *Hamilton Spectator* fotósa szerint – két kislány találta kertjükben, az Ontario állambeli Hamiltonban. Gardner

elmondja, hogy a lányok felrakták a békát a konyhaasztalra, hogy ő lefényképezhesse. Feje külső részén egyáltalán nem volt szeme.



3.2. ábra. Makromutációk pedig vannak. Ezt a rémes varangyot, amelynek szemei a szájpadrásra csúsztak, állítólag élve fogták egy kanadai kerti tóban.

A fényképet elsőként a *Hamilton Spectator* című helyi lap közölte.

Ha azonban kinyitotta a száját, mondja Gardner, sokkal inkább reagált környezetére. A fotós elmondása szerint az állat további vizsgálat céljából a Guelph Egyetem Állatorvosi Tanszékére került, ám ez idáig semmiféle jelentésben nem bukkantam nyomára. Ezek a szerencsétlen szörnyszülöttek azért érdekesek, mert sokat elárulnak az embrionális fejlődés normális menetéről. Az emberi születési rendellenességek nem mindegyike genetikusan eredetű, de sokuk igen. Az achondropláziát (hiányos porc képződés) a végtagok csontjainak alacsony testalkatot és rendellenes testarányokat okozó súlyos megrövidülését egyetlen domináns gén okozza. Az ilyen nagy hatású mutációkat nevezik makromutációknak, néha ugrásszerű mutációnak. Az achondroplázia génjét rendszerint az egyik szülő örökíti át, de nagyon ritkán spontán, mutáció eredményeképp is előfordulhat – így kellett megjelennie első ízben is. Hasonló makromutációval elméletben elképzelhető – bár a gyakorlatban nem tartom valószínűnek –, hogy az elefántormány egyetlen lépésben keletkezett a tapír ormányából.

Áttérve a második kérdésre – ha egyszer egy torzszülött makromutáció létrejön, megőrzi-e a természetes szelekció? –, azt gondolnánk, hogy erre nincs általános érvényű válasz. Esetről esetre változik, gondolhatnánk: igen az achondroplázia, nem a kétfejű borjak esetében. Az achondropláziagén kutyákban található megfelelőjét valóban előnyben részesítette a tenyésztő ember mesterséges szelekciója, nemcsak pusztán szeszélyből, de egy hasznos munkakutya kitenyésztése érdekében. A tacszkókat arra a célra tenyésztették ki, hogy bebújjanak a borz üregébe (német neve: Dachshund = borzcutya, a *ford.*); ennek során a genetikai átalakítás fontos része volt az

achondropláziagén beépítése. Talán a természetben is előfordulhat néha, hogy egy makromutáció, mint pl. az achondroplázia, hirtelen új élet- vagy táplálkozásmód lehetőségét villantja fel: egy törpe testalkatú állat, bár súlyos hátrányban van, ha zsákmányát nyílt területen kell üldöznie, egyszer csak felfedezi, hogy társaival ellentétben üregébe is követheti a zsákmányt.

Az evolúcióelmélet szakemberei néha feltételezik, hogy a természetes evolúció folyamatába nagy ugrások is beépülnek. Richard Goldschmidt, a neves német-amerikai genetikus az elméletnek a jól hangzó „ígéretes szörnyek” elnevezést adta. Egy lehetséges példát a 7. fejezetben fogok tárgyalni. Goldschmidt elméletének azonban sohasem sikerült szélesebb körű támogatást kivínnia, és több általános ok is arra ösztönöz, hogy kételkedjünk abban, hogy a makromutációk, a torzszülöttek fontos szerepet játszanának az evolúcióban. Az élőlények rendkívül bonyolult és finoman „beállított” szerkezetek. Ha veszünk egy bonyolult felépítésű szerkezetet – még ha nem is működik tökéletesen – és belsejét nagymértékben, véletlenszerűen megváltoztatjuk, elenyészően csekély esélyünk van arra, hogy sikerül rajta javítanunk. Ha azonban csak kismértékben változtatunk a szerkezetén, van némi esély arra, hogy javítani fogunk. Ha televíziónk antennája nincs jól beállítva, egy kis mozdulattal kb. 50%-os esélyünk van arra, hogy jobb lesz a helyzet, mivel bármerre is kéne állnia, egy kis véletlenszerű változtatásnak 50%-os esélye van arra, hogy a jó irány felé mozdítja el. Ha azonban nagy szögben mozdítjuk el, valószínűbb, hogy csak ártunk. Részben azért, mert ha jó irányba is csavartuk, valószínűleg túllőttünk a célon. Általánosabban azért, mert többféleképpen lehet valamit elrontani, mint megjavítani. Egy bonyolult szerkezet, ha egyáltalán működik, már nem lehet messze a jó elrendezéstől. Egy nagy, véletlenszerű változtatással az összes lehetséges elrendezés hatalmas készletéből húzunk egyet találomra. Az összes lehetséges elrendezés túlnyomó többsége pedig rossz.

Még az az általános tapasztalat sem mond ellent érvelésemnek, hogy egy jól irányzott rúgással sok mindent meg lehet javítani. A televízió tartós darab: egy rúgás, bármilyen dühös is legyen, nem biztos, hogy nagymértékben megváltoztatja részeinek elrendezését. Lehet, hogy csak arrébb lendít egy kilazult alkatrészt, és nagy az esély arra, hogy éppen ez a laza darab okozta a hibát.²

Az élőlényekre visszatérve, *A vak órásmesterben* a következőket írtam: *Bármilyen sokféle módon lehetünk élők, mégis lehengerlően többféle módon lehetünk élettelenek.* (Nem lennék gyarló ember, ha nem dicsekednék el vele: ez a mondat bekerült az *Idézetek Oxford Szótárába!*). Gondoljunk csak bele, milyen rengetegféleképpen lehet elrendezni egy állat testrészeit – és az elrendezések szinte mindegyike alkalmatlan lesz az életre, pontosabban a legtöbb meg sem születik. Minden állat- és növényfaj a működőképesség kicsiny szigete az elképzelhető elrendezések végtelen tengerén, melyek – ha egyáltalán megszülehetnek – egykettőre elpusztulnak. Minden lehetséges állatok tengere magába foglalja azokat az állatokat, melyek szemüket a talpukon

² Judith Flanders hívta fel a figyelmemet a következő mulatságos és nagyon ideillő esetre Robert X. Cringley *Véletlen hatalmak* c. könyvéből. A történet hőse az 1980-ban piacra dobott Apple III személyi számítógép, a híres Apple II és a még híresebb Macintosh-generációk közötti modell: „...a fő áramkört összeszerelő automata gépsor több tucat csipet nem rögzített elég szorosan a megfelelő foglalatokba. Az Apple cég azt ajánlotta mintegy 90 000 vásárlójának, hogy Apple III számítógépét óvatosan ejtse le egy sima felületre kb. 20-30 cm magasról – ez talán helyrerázza a csipeket.”

hordják, szemlencséjüket a fülükben, melyeknek a bal oldalukon uszonyuk, jobb oldalukon pedig szárnyuk van; melyek koponyája a gyomrukat zárja körbe, agyuk pedig szabadon marad. Kár is folytatni a bizarr ötletek sorát. Elég ennyi annak illusztrálására, hogy a túlélés szigetei, bármilyen nagyok és számosak, méretben és számban egyaránt szinte észrevehetetlenek az élettelen működőképesség hatalmas óceánjában.

Egy szülő – akinek mutáns utódja születik – mivel él, biztonságos helyen lakozik a szigetek valamelyikén. Ha a mutáció hatása csekély – a lábesont kissé meghosszabbodott, az állkapocscsont kicsit más szögben ízesül –, utódja szintén a szigeten kap helyet, legfeljebb annak más részén, esetleg egy part menti homokpadon, mely éppen most csatlakozott a szárazföldrhez. Egy makromutáció, egy nagymértékű, forradalmian új testfelépítésű torzszülött: vakmerő ugrás a háborgó óceán kék ismeretlenségébe. A szörnyszülött hatalmas lendülettel, véletlenszerű irányban röpköd ki szülőszigetéről. Van *némi* esélye, hogy egy másik szigetre pottyan. Mivel azonban a szigetek ritkák és kicsinyek, ez az esély nagyon csekély. Esetenként, százmillió évenként egyszer előfordulhat; ilyenkor óriási hatást gyakorolhat az evolúció menetére.

Nem szabad túl messzire mennünk a szigethasonlattal. Sok hiányossága van. Mivel minden faj rokonságban áll egymással, átjáróknak kell lenniük az óceánban, melyeken az élet bármely módjától eljuthatunk egy másikig. E tekintetben semmire sem megyünk a szigethasonlattal: a Valószínűtlenség Hegye több segítséget nyújt. A szigeteket csak azért találtam ki, hogy hangsúlyozzam: minél meglepőbb, riasztóbb szörnyszülöttet hoz létre egy mutáció, annál kevésbé valószínű, hogy a természetes szelekció előnyben részesítene.

Különbséget kell tennünk a makromutációk fajtái között is. A szemüket a talpukon, szemlencséjüket pedig a fülükben viselő állatok fantazmagóriáival a figyelmet a részek különféle elrendezésére összpontosítottam. Az efféle jelentős változások valóban nagyon ritkán elég szerencsések ahhoz, hogy életben maradhassanak. Jókora változások lehetségesek azonban egy-egy testrész méretében anélkül, hogy a testrészek elrendezését megváltoztathatnánk. A tapírormány hirtelen elefántormánnyá nyúlása lehetne erre példa, ha tényleg csak növekedéssel járna. Nehezebb belátni, hogy egy ilyen típusú forradalmi változás miért jelent szükségszerűen ugrást a használhatatlanság vagy élettelenség óceánjába.

Megígértem, hogy visszatérek a „Boeing 747-es” és „elnyújtott DC8-as” makromutációkhoz. Emlékszünk még Sir Fred Hoyle tanmeséjére a ronccstelepről és a Boeing 747-esről? Állítólag ő mondta, hogy egy bonyolult szerkezet, pl. egy fehérjemolekula (vagy egy szem, vagy szív) természetes szelekcióval való létrejöttének valószínűsége kb. akkora, mint ha egy ronccstelepen keresztülszáguldó hurrikán összeállítana egy Boeing 747-est. Ha „természetes szelekció” helyett „véletlen”-t mond, tökéletesen igaza van. Sajnálom, hogy éppen őt kellett kiemelnem a természetes szelekciót alapjaiban félreértők, a véletlennel azonosítók népes táborából. Bármely elmélet, mely azt várja az evolúciótól, hogy egy új, bonyolult szerkezetet, pl. egy szemet vagy egy hemoglobinmolekulát egyetlen lépésben hozzon létre a semmiből, túl sokat vár a véletlentől. Egy ilyen megközelítés szerint a természetes szelekciónak szinte nincs is mit tennie. A „tervezést” mind elvégzi az egyetlen nagy mutáció. Ez a

fajta makromutáció az, amire érvényes a roncstelep és a Boeing 747-es hasonlata, ezt fogom Boeing 747 makromutációnak nevezni. Boeing 747 makromutációk nem léteznek és semmi közük a darwinizmushoz.

Áttérve másik repülőhöz, a „megnyújtott DC8-as” ugyanolyan, mint egy normális DC8-as, csak sokkal hosszabb. A DC8-as minden alapvető eleme megtalálható benne, csak a törzse hosszabb lényegesen a megszokottnál. Több ülés, több poggyásztartó van benne – a repülő hosszában ismétlődő elemekből több van, értelemszerűen több kábel, cső és szőnyeg is. Kevésbé nyilvánvaló, hogy ehhez számos más módosítást is végre kellett hajtani a gép más részein, hogy a meghosszabbított törzszű gép képes legyen felemelkedni a földről. A DC8-as és az elnyújtott DC8-as különbsége azonban visszavezethető egyetlen makromutációra: a törzs hirtelen lényegesen hosszabb lett, mint az elődjéé. Hirtelen, nem pedig átmenetek fokozatos során keresztül.

A zsiráfok a mai okapihoz hasonló ősökől alakultak ki (3.3. ábra). A legfeltűnőbb változás a nyak meghosszabbodása. Létrejöhetett vajon egyetlen nagy mutációval? Gyorsan leszögezem: szerintem nem. Ez azonban még nem bizonyíték. Egy Boeing 747 mutáció, pl. egy vadonutú szem szivárványhártyával, fókuszálható lencsével nem pattanhat ki a semmiből, mint Pallasz Athéné Zeusz fejéből – ez *sohasem* történhet meg, milliárd-milliárd év alatt sem. A zsiráf hosszú nyaka azonban – mint a megnyújtott DC8-as – létrejöhetett egyetlen mutációs lépéssel (bár biztos vagyok benne, hogy nem így történt). Mi a különbség? Nem az, hogy a nyak sokkal kevésbé bonyolult, mint a szem. Ismereteim szerint még bonyolultabb is lehet. Ami számít, az az eredeti és az új nyak bonyolultságának *különbsége*: ez jóval kevesebb, mint a semmi és a fejlett szem bonyolultságának különbsége. A zsiráf nyakának részei ugyanolyan módon rendezettek, mint az okapi (és feltehetően a zsiráf rövid nyakú őse) nyakának részei. Ugyanolyan sorakozik fel a hét nyakcsigolya a megfelelő véredényekkel, idegekkel, kötőszöveti szalagokkal és izomkötegekkel. A különbség csak annyi, hogy minden csigolya alaposan megnyúlt, és a hozzájuk kapcsolódó egyéb részek arányosan megnyúltak vagy eltávolodtak egymástól.

A lényeg, hogy a fejlődő embrióban csak egyetlen dolgot kell megváltoztatni ahhoz, hogy a nyak hossza megnégyszereződjön. Mondjuk csak azt, hogy milyen sebességgel növekszenek a csigolyakezdemények – a többi már ebből adódik. Ahhoz azonban, hogy a bőr helyén szem alakuljon ki, nem egy, de több száz elem növekedési sebességét kell megváltoztatni (lásd 5. fejezet). Ha egy okapi mutáció segítségével zsiráfnyakat fejleszt, ez nem Boeing 747-es, hanem megnyújtott DC8-as makromutáció. Ezt a lehetőséget nem zárhatjuk ki egyértelműen. Bonyolultság tekintetében semmi változás nem történt. A törzs – minden szükséges részletével együtt – megnyúlt, de ez csak a meglévő bonyolultság „megnyújtása”, nem új bonyolultság születése. Igaz lenne ez akkor is, ha a zsiráfnak hétnél több nyakcsigolyája lenne. Különböző kígyófajok nyakcsigolyáinak száma 200-350 között változhat. Mivel a kígyók mind rokonai egymásnak, és fél vagy negyed csigolya nem létezik, ez azt jelenti, hogy időnként világra jönnek kiskígyók szüleiknél legalább eggyel több vagy kevesebb nyakcsigolyával. E mutációkat joggal nevezhetjük makromutációknak; egyértelmű, hogy az evolúció részét képezik, hiszen ezek a kígyók mind léteznek.

Valamennyien DC8-as mutációk, mivel csak a már meglévő bonyolultságot ismétlik, nem pedig új bonyolultságot hozó Boeing 747 mutációk.



3.3. ábra. Lépések a hosszú nyak felé vezető úton. Okapi (*Okapia johnstoni*): hozzá hasonlíthatott a mai zsiráfok őse. Zsiráf (*Giraffa camelopardalis reticulata*)

Van egy mód arra, hogy az evolúció segítse egy torzszülött makromutáns életben maradását: nevezetesen az a tény, hogy egy gén kifejeződését a szervezet többi génje is befolyásolja. Egy gén szervezetre gyakorolt hatása – az ún. fenotipikus hatás – nem olvasható le magáról a génről. Az achondropláziagén DNS-kódjában nincs semmi, amit a molekuláris biológus „rövid”-nek vagy „törpé”-nek olvashatna. Csak akkor fejtheti ki végtagokat megrövidítő hatását, ha körülötte számtalan más gén is működik – nem is beszélve a környezet többi eleméről. Egy gén jelentése mindig környezetfüggő. Az embrió az összes gén együttes hatása által kialakított genetikus környezetben fejlődik. A genetikus környezet szabja meg, hogy egy adott gén milyen mértékben képes befolyásolni az embrió fejlődését. A korábban is idézett R. A. Fisher már régen megfogalmazta, hogy egyes gének hatása az, hogy befolyásolják mások működését. Jegyezzük meg: ez nem azt jelenti, hogy e gének módosítanak egy másik gén DNS-szerkezetét. Erről szó sincs. A módosító gének csupán a genetikus környezetet változtatják meg olyan módon, hogy megváltozik más gének szervezetre gyakorolt hatása – de nem azok DNS-szerkezete.

Láttuk tehát, hogy nem (abszolút) elképzelhetetlen, hogy egy tizenöt centis tapírszerű ormányú szülőnek, egyetlen gén megváltozásának hatására, hirtelen másfél méteres elefántormányt lengető borja születik – ez a makromutáció. Nagyon valószínűtlen azonban, hogy ez a vadonutáj ormány azonnal hibátlanul ellátja majd minden feladatát. Itt jöhet elméletileg segítségünkre a módosító gének és a „genetikai környezet” fogalma. Ha a makromutáció legalább nagyjából jó valamire, hordozói nem pusztulnak ki, a módosító gének ezután következő szelekciója tisztázhatja a részleteket, lecsiszolhatja a durvaságokat. Egy populációba berobbanó makromutáció olyan, mint valami környezeti katasztrófa, pl. egy jégkorszak. Ahogy egy jégkorszak is számtalan gén szelekcióját ösztönzi, ugyanezt teszi egy jelentős mutációs változás – pl. az ormány szélsőséges meghosszabbodása – az átlagos szervezet génjeivel.

A makromutáció hatását „eltisztázó” gének nemcsak annak legnyilvánvalóbb hatását befolyásolják. Hathatnak a szervezet bármely, meglepően távoli részén is, hogy kiegyenlítsék vagy enyhítsék a makromutáció káros vagy fokozzák annak előnyös hatásait. Hosszú ormány felbukkanásakor megnő a fej súlya, ezért erősíteni kell a nyak csontozatát. Az egész test egyensúlyi rendszere megváltozik, a hatás továbbgyűrűzik mondjuk a gerincoszlopra és a medencére is. A makromutációt követő szelekció rengeteg, a test más részeire ható gént befolyásol.

Bár az „utólagos tisztázás” fogalmát a makromutációk kapcsán vezettem be, a szelekciónak ez a típusa makromutációk nélkül is fontos eleme az evolúciónak. Mikromutációk is járhatnak olyan következményekkel, hogy nagy szükség lehet az „utólagos tisztázás”-ra. Bármelyik gén módosíthatja bármelyik másik gén hatását. Sok gén kölcsönösen befolyásolja egymást. Egyes szakemberek egyenesen azt állítják, hogy a bármilyen hatással rendelkező (mert nem minden gén ilyen) gének többsége befolyásolja a legtöbb egyéb gén hatását. Mikor azt mondtam, hogy az a „környezet”, melyben egy génnek fenn kell maradnia, túlnyomórészt a faj többi génjét jelenti, ugyanezt fogalmaztam meg más nézőpontból.

Kockáztatva, hogy több időt szentelek a makromutációknak, mint amennyit megérdemelnek, a félreértések még egy lehetséges forrását meg kell említenem. Létezik egy érdekes, szakmailag korrekt módon közzétett elmélet, a „pontosított egyensúly” elmélete. Részletezése szétfeszítené e könyv kereteit, de mivel erősen támogatott és sokak által félreértett elméletről van szó, szeretném nyomatékosítani, hogy a pontosított egyensúly elméletének semmi köze nincs a makromutációkhoz, és nem helyes úgy beállítani, mintha lenne. Az elmélet szerint a leszármazási vonalak hosszú ideig változatlanok, evolúciójuk áll, majd e nyugalmi állapotot evolúciós változások gyors sora szakítja meg, melyek egybeesnek új fajok születésével. Bármilyen gyorsak is e változások, azért még mindig több nemzedékre oszlanak el, még mindig *fokozatosak*. Csupán arról van szó, hogy az átmeneti alakok túl gyorsan tűnnek el ahhoz, hogy kövületeik fennmaradnának. A fokozatos változások felgyorsulása teljesen más, mint a makromutáció: az egy pillanat alatt, egyetlen nemzedékben fellépő változás. A zavar oka részben az, hogy a fenti elmélet egyik szószólója éppen az a Stephen Gould, akinek történetesen a makromutációk bizonyos fajtái a gyengéi, ezért néha elmossa a különbséget a gyors fokozatos változások és a valódi – nem a csodaszámba menő Boeing 747-es típusú! – makromutációk között. (A pontosított egyensúly elméletének másik lelkes híve Niles Eldredge.) Nem véletlen, hogy Eldredge és Gould értetlenül szemlélik, hogyan élnek vissza ötletükkel a kreacionisták, akik úgy vélik, hogy a pontosított egyensúly elmélete – jelen könyv szóhasználata szerint – hatalmas Boeing 747-es mutációkról szól, melyekről joggal állítják, hogy isteni csoda kell létrejöttükhöz. Gould így ír:

Mivel a pontosított egyensúlyok elméletét éppen a nagy evolúciós irányvonalak magyarázatára fejlesztettük ki, bosszantó, hogy újra és újra úgy idézik – szándékosan-e vagy butaságból – mintha azt ismernék el, hogy a kövületekből hiányoznak az átmeneti alakok. Az átmeneti alakok faji szinten valóban ritkák, de nagyobb csoportok esetében bőségesek.

Dr. Gould csökkenthetné a félreértés kockázatát, ha világosabban kihangsúlyozná a gyors fokozatosság és az evolúciós ugrás (más szóval: makromutáció) alapvető különbségét. Meghatározása szerint a pontosított evolúció elmélete vagy szerény és valószínűleg igaz, vagy forradalmi és valószínűleg hamis. Ha elmoszuk a különbséget a gyors fokozatosság és az ugrás között, a pontosított egyensúly elmélete forradalmibbnak tűnik. Ugyanakkor nyíltan kihívjuk a félreértést – a kreacionisták pedig egy pillanattig sem késlekednek felvenni a kesztyűt.

Banálisan egyszerű oka van annak, hogy miért nem találunk átmeneti alakokat a fajok között. Legjobb egy analógiával tudom ezt megvilágítani. A gyerekek lassan, fokozatosan nőnek fel, de a jog szempontjából a nagykorúságot egy adott születésnaphoz, pl. a tizennyolcadikhoz kötik. Így elmondhatjuk: „Nagy-Britannia 55 millió lakosa közül egyetlenegy sincs, aki átmeneti helyzetben lenne a szavazati joggal rendelkezés és nem rendelkezés között”. Ahogy a jog számára egy fiatal ember szavazóképes polgárrá válik abban a pillanatban, amikor születésnapján az óra elüti az éjfél, a zoológusok igyekeznek minden példányt besorolni valamelyik faj kategóriájába. Még ha átmeneti jellegű is egy példány (ahogy ez gyakran előfordul), a zoológusok megállapodások alapján besorolják valamelyik fajba, hogy el lehessen

nevezni. A kreacionisták vádja tehát – hogy nincsenek átmeneti alakok – a meghatározásból következően igaz faji szinten, de ennek semmi köze a valósághoz; csupán azt jelzi, hogy a zoológusok igyekeznek mindent elnevezni.

Hogy a saját házunk táján maradjunk, az *Australopithecus*tól a *Homo habilis*en, *Homo erectus*on és az ősi *Homo sapiens*en a modern *Homo sapiens*ig vezető átmenet olyan szép folyamatos, hogy a szakértők állandóan vitatkoznak egyes kövületek besorolásán. Olvassuk el egy evolúcióellenes propagandakönyv következő mondatait: „a leleteket vagy *Australopithecus*nak, tehát majomnak, vagy *Homónak*, vagyis embernek minősítik. Több mint egy évszázados buzgó ásatás és lázas vitatkozás ellenére az ember állítólagos ősenek szánt üvegszekrény még mindig üres. A hiányzó láncszem még mindig hiányzik”. Gondolkozhatunk tehát azon, hogyan is kéne kinéznie egy kövületnek, hogy átmenetinek minősítsék. Az idézett állítás a való világról semmit sem mond, csupán az elnevezés szabályairól állít valamit (nem túl bölcslet). Nincs olyan „hiányzó láncszem”, bármilyen tökéletesen átmeneti lenne is, ami elkerülhetné az elnevezés *force majeure*-jét, megúszhatná, hogy a választóvonal egyik vagy másik oldalára dobják. Az átmeneti alakok megkeresésének az a helyes módszere, hogy elfelejtjük a névcímkeket, és helyettük a kövületek valódi alakját, méretét kezdjük vizsgálni. Ha ezt megtesszük, rögtön látni fogjuk, hogy a kövületek gyönyörű átmeneti sorokat alkotnak, bár vannak rések is – némelyikük nem is kicsi –, melyekről elfogadható, hogy azért keletkeztek, mert egyes állatok egyszerűen nem fosszilizálódtak. Elnevezési szabályaink egy evolúcióelmélet előtti korban születtek, amikor a rendszerezés volt az egyetlen cél – senkinek sem jutott eszébe, hogy átmeneti alakok is létezhetnek.

Távolról vetettünk egy pillantást a Valószínűtlenség Hegyére. Láttuk a különbséget egyik oldalának megmászhatatlan meredélyei és a másik oldal hívogató lankái között. A következő két fejezetben a kreacionisták két kedvenc csúcsát vesszük szemügyre, melyek sziklafala különösen félelmetesnek tűnik: először a szárnyakét („ugyan mire lehetne használni egy fél pár szárnyat?”), majd a szemekét („a szem csak akkor működik, ha már minden egyes része a helyére került, tehát nem lehet szó fokozatos kialakulásról”).

SZAKADJUNK EL A FÖLDTŐL!

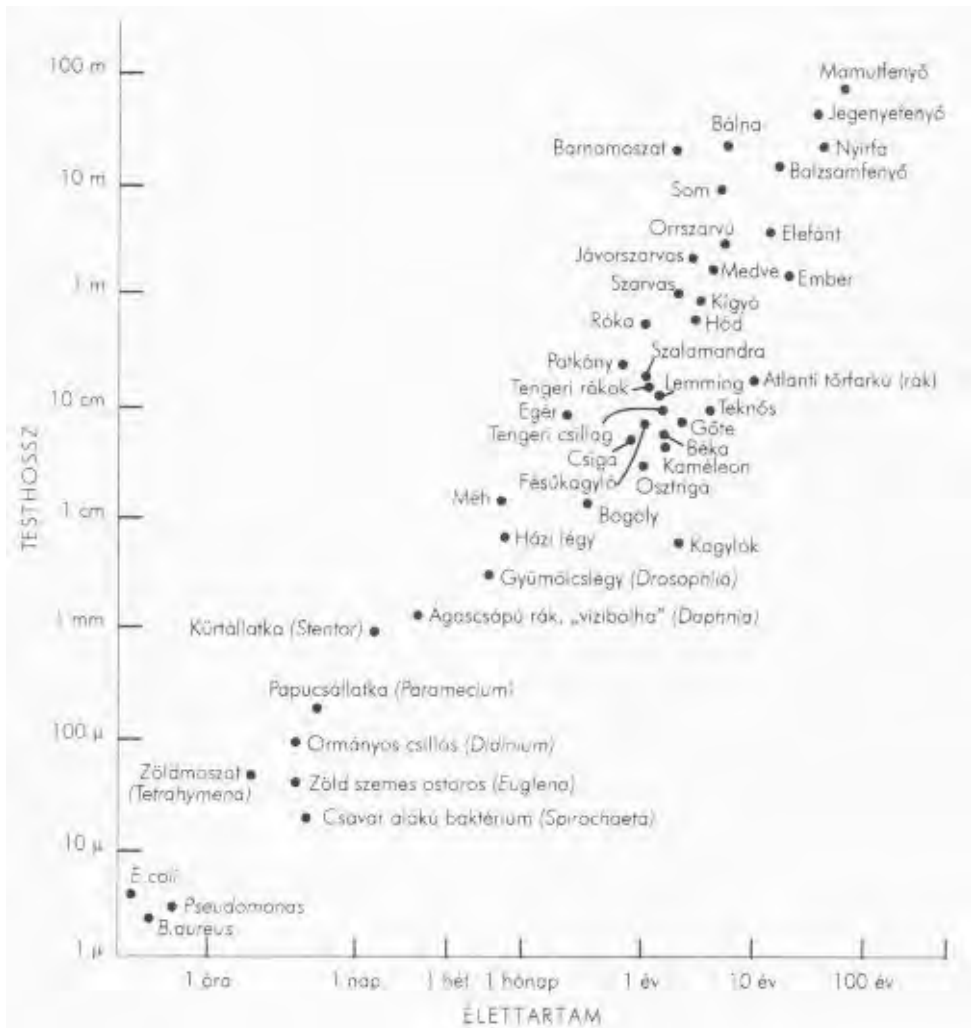
A repülés oly sokáig volt az emberiség reménytelen vágya, és végül oly bonyolult módon sikerült megvalósítani, hogy könnyen eltúlozzuk, mennyire nehéz. Pedig a repülés az állatfajok többségének második természete. Munkatársam, Robert May módosított aforizmája szerint első közelítésben minden állat repül. Azért állíthatjuk ezt, mert May szerint – hogy pontosan idézzem – első közelítésben minden faj rovar. Ha azonban csak az állandó testhőmérsékletű gerinceseket vesszük, akkor is igaz, hogy a fajok több mint fele repül: kétszer annyi madár-, mint emlősfaj létezik, és az emlősfajok negyede denevér. A repülés csak azért tűnik számunkra olyan elérhetetlen álomnak, mert nagy testű emlősök vagyunk. Van persze néhány még nálunk is nagyobb emlős, pl. az elefántok vagy orrszarvúk – ismerjük is őket jól; ám nagy átlagban az állatok kisebbek, mint mi (4.1. ábra).

A nagyon kis testű állatok számára a repülés nem gond. A legkisebbek számára éppen az a megoldandó feladat, hogy hogyan maradjanak a földön. E különbség a nagy és kicsiny állatok között a fizika általános érvényű alaptörvényeiből következik.

Azonos alakú tárgyak tömege a hosszúság növekedésével nem arányosan, hanem annak harmadik hatványa szerint változik. Ha egy strucctojás háromszor olyan hosszú, mint egy tyúktojás, tömege nem háromszor, hanem $3 \times 3 \times 3$ -szor, vagyis huszonhét-szer annyi lesz. Míg hozzá nem szokunk, ez elég meglepő. Ha egy tyúktojás egy ember reggelije, egy strucctojással egy 27 tagú csapat is jóllakik. A térfogat, így a tömeg is, a lineáris kiterjedés harmadik hatványa (köbe) szerint változik, a felszín annak második hatványával (négyzetével). A szabályt legkönnyebb kockákon megértetni, de mindenféle alakra igaz.

Képzeljünk el egy nagy, kocka alakú dobozt. Hány feleakkora élhosszúságú doboz fér bele? Ha felvázoljuk a dobozokat, azonnal látszik, hogy a válasz nyolc. A nagy dobozba nem kétszer, hanem nyolcszor annyi alma, nyolcszor annyi festékesdoboz fér. Ha viszont be akarjuk őket festeni, mennyivel több festék kell a nagy dobozra, mint a kicsire? Egy gyors vázlat ismét hamar megmutatja, hogy sem nem kétszer, sem nem nyolcszor: négyszer annyi festék kell.

A felszín és térfogat közti különbség még szembetűnőbb, ha különböző alakú tárgyakat veszünk szemügyre. Tegyük fel, hogy egy gyufagyáros reklámként embermagas gyufásdobozt készít: legrövidebb oldala kétméteres. Egy normális gyufásdoboz 2 cm magas. Ebből száz-száz darab kell, hogy akár a hosszát, akár a szélességét, akár a magasságát elérje a nagy doboznak. A teljes kitöltéshez mennyi kell? $100 \times 100 \times 100$, azaz egymillió darab. Bizonyos értelemben a nagy doboz százszor akkora, mint a kicsi, első pillantásra szemünk is annyinak látja.



4.1. ábra. Az élőlények mérete kb. nyolc nagyságrendet ölel fel. E változatosság rendezése érdekében a testméretet az átlagos élettartam függvényében ábrázoltuk (itt nem tárgyalt okból szorosan összefüggenek). Mindkét tengely logaritmikus beosztású – egyébként 1500 km hosszú papír kellene ahhoz, hogy a baktériumokat és a mamutfenyőket egy skálán ábrázolhassuk.

Más szempontból viszont egymilliószor akkora, milliószor annyi gyufa fér bele (sőt még több, mert a kartonpapír vastagsága arányosan kevesebb). Ha feltesszük, hogy az óriásdobozt ugyanolyan kartonból készítették, mint a kicsit, mennyi a papír relatív költsége? Ez nem a térfogattól, nem is a hosszától függ, hanem a felülettől. Az óriásdobozhoz nem egymilliószor, csak 10 000-szer annyi papír kell. A normális, kicsiny gyufásdoboz *térfogathoz viszonyított* felülete jóval nagyobb, mint az óriásdobozé. Ha darabokra vágunk egy kis gyufásdobozt, elég nehezen tudjuk begyömöszölni egy másikba. Ha viszont az óriásit daraboljuk fel, annak anyaga elvész egy másik azonos méretű dobozban. A felszín/térfogat arány nagyon fontos mennyiség.

A térfogat köbös növekedésével szemben a felszín csak négyzetesen növekszik. Matematikailag ezt úgy fogalmazhatjuk meg, hogy azonos alakú tárgyak felszín/térfogat aránya a hossz kétharmados kitevője szerint növekszik. A kis testek felszín/térfogat aránya nagyobb, mint a nagyoké. A kis testek „felszínesebbek”, mint az ugyanolyan alakú nagyok.

Az élet több fontos jelensége a felszíntől, mások a térfogattól, ismét mások a hosszúságtól függenek, míg egy sereg fontos dolog mindhárom kombinációjától. Képzeljünk el egy tökéletes, ám bolha méretű vízilóvat. Az igazi víziló hossza (vagy szélessége, vagy magassága) talán ezerszerese bolhányi rokonáénak. A tömege milliárdszorosa, a felszíne „mindössze” milliószorosa. A bolhavíziló *tömegéhez viszonyított* felszíne tehát ezerszerese a normális vízilóénak. A józan ész azt mondja, hogy az arányosan lekicsinyített víziló könnyebben lebeg a szélben, mint a nagy; esetenként azonban érdekes lehet megvizsgálni, mi rejlik a józan ész hátterében.

A nagy állatok nem egyszerűen a kicsik felnagyított változatai – hamarosan látni fogjuk, hogy miért. A természetes szelekció nem engedi az egyszerű felnagyítást, mivel ki kell egyenlíteni olyan tényezőket, mint a felszín/térfogat arány változása. A vízilónak kb. egymilliárdszor annyi sejtje lesz, mint a bolhavízilónak, de testfelszínén csak kb. egymilliószor annyi hámsejtje. Minden sejtnek szüksége van táplálékra és oxigénre, és mindnek meg kell szabadulnia salakanyagaitól, így a nagy vízilónak mintegy milliárdszor akkora anyagforgalmat kell lebonyolítania. A bolhavíziló jelentős felszínű bőrén keresztül megtörténhet az oxigén- és salakanyagcsere. A normál méretű víziló bőrfelülete azonban tömegéhez viszonyítva olyan kicsi, hogy meg kell növelnie felszínét, mégpedig igen jelentős mértékben, hogy el tudja látni a milliárdszorosa nőtt sejttömeget. Ezért hosszú, felcsavarodott bélrendszert, szivacsos tüdőt és hajszálcsöves felépítésű vesét alakít ki, melyeket gazdag, többszörösen elágazó érrendszer lát el vérrel. Ennek eredményeképp egy nagy állat belső felszínei látványosan nagyobbak, mint külső testfelületük. Minél kisebb egy állat, annál kevésbé van szüksége tüdőre, kopolyúra vagy véredényekre; a test külső felszíne segítség nélkül is meg tud birkózni a viszonylag kevés belső sejt anyagszállításával. Kevésbé pontosan fogalmazva azt is mondhatjuk, hogy egy kisebb állatnak viszonylag több sejtje érintkezik a külvilággal. A nagy állat – pl. víziló – sejtjeinek csak olyan elenyésző kis része felszíni sejt, hogy ezt az arányt nagy felszínű szervekkel, mint pl. a tüdő, a vese vagy a hajszálerek – kell növelnie.

A felszín határozza meg, hogy a test milyen sebességgel tud anyagokat felvenni, illetve leadni. De nemcsak ezért fontos. Ugyanez mondható el a levegőben, vízben való lebegésről. A bolhavízilóvat a legkisebb fuvallat is felkapja. A felszálló légáramlat magasra emelheti, majd lágyan libeg lefelé, puhán, sérülés nélkül ereszkedik le a földre. Ugyanilyen magasságból lepattanó valódi víziló óriási csattanással érne földet és halálra zúzná magát; ha arányosan magasabbról ejtjük le, még a saját sírját is megássza. A normális víziló számára a repülés beteljesedhetetlen vágyálom. A bolhavíziló alig bírja megállni, hogy fel ne szálljon. Ha röptetni szeretnénk az igazi vízilóvat, akkora pár szárnyat kéne rákötöznünk, mint... a terv azonban eleve kudarcra ítélt, mert e hatalmas szárnyak mozgatásához olyan súlyos izomzat kellene, amit

maguk a szárnyak nem bírnak felemelni. Ha tehát repülő állatot szeretnénk „barkácsolni”, nem a vízilóból kell kiindulnunk.

A lényeg az, hogy ha egy nagy testű állat fel szeretne emelkedni a földről, hatalmas szárnyakra van szüksége, ugyanazon okból, amiért nagy felületű vesékre és tüdőkre. Egy kis testűnek viszont szinte semmilyen új szervre nincs szüksége: teste már eleve elég nagy felületű. Gondoljunk csak a levegőplanktonra: arra a milliányi rovarra és más teremtményre, melyek magasan a levegőben lebegve utaznak a világ körül. Jó részüknek van szárnya, de rengeteg olyan is van, mely specializált lebegtető felszínnek nélkül lebeg; egyszerűen azért, mert kicsi: egy nagyon kicsi állat számára a levegőben lebegés sem nehezebb, mint nekünk fennmaradni a víz színén. A hasonlat továbbvihető: ha egy kis lebegő rovarnak vannak is szárnyai, nem azért csapkod velük, hogy fennmaradjon, hanem hogy „ússzon” a levegőben. Az „úszás” szó furcsamód még egy szempontból találó a picinyek világában. Ebben a mérettartományban a felületi feszültség már olyan jelentős tényező, hogy a kicsi rovar úgy érzi, mintha a levegő szirupszerű lenne. Szárnyainak mozgatása olyan élmény lehet számára, mintha mi megpróbálnánk mézben úszni.

Furcsállhatjuk, mire lehet jó a repülés, ha se az irányt, se a magasságot nem tudjuk szabályozni. Nem akarom részletezni, de a szétszóródás eleve érték a gének szemében, főleg az alapvetően helytűlő életmódot folytató fajoknál. Ez leginkább a növényekre vonatkozik: előbb vagy utóbb *minden* földfelszín lakhatatlan lesz, pl. ha tűzvész fut végig rajta vagy ár borítja el. Egy fényigényes növényfaj számára az erdő egész talaja lakhatatlan, kivéve ott, ahol egy kidőlő fa némi napfényt enged be. Általánosságban minden növény és állat olyan őstől származik, amelyek valahol másutt éltek, és valószínű, hogy vannak olyan génjeik, melyek segítik a máshová eljutást. Ezért van a pitypangnak bóbitája. Ezért vannak a bogáncsnak horgocskái, amikkel rátapad az állatok szőrére. Ezért lebegnek a rovarok a levegőplanktonban az ismeretlen felé.

A minden nehézség nélkül lebegő apró állatok azt sugallják, hogy elég feltételeznünk: a repülés először kicsiny állatoknál alakult ki, és a Valószínűtlenség Hegyének repüléscsúcsai máris nem tűnnek olyan visszariasztónak. Az egészen piciny rovaroknak még szárny sem kell ahhoz, hogy repüljenek. A kicsit nagyobbak apró szárnyacsonkokkal segítik magukat – már fenn is vagyunk egy kis kaptatón a Valószínűtlenség Hegye valódi szárnyakhoz vezető ösvényének kezdetén. Valójában ez sem magától értődően egyszerű, mint azt Joel Kingsolver és Mimi Koehl (Kaliforniai Egyetem, Berkeley) roppant eredeti kutatásai kimutatták. Kingsolver és Koehl elmélete szerint az első rovárszárnyak egészen más célra preadaptálódtak: melegítő napelemek voltak, a tor apró kinövései, és ekkor még nem tudtak csapkodni.

Kingsolver és Koehl ötletes kísérleti eljárást dolgoztak ki. Fából elkészítették a legősibb ismert rovarok egyszerű utánezatait. Némelyeknek egyáltalán nem volt szárnyuk. Másoknak voltak különböző hosszúságú szárnyacsonkjai, de ezek többsége túl rövid volt ahhoz, hogy szárnyak tarthassuk vagy hogy repülni lehessen vele. A különböző méretű rovarutánezatokat szélcsatornában próbálták ki, hogy mennyire alkalmasak a repülésre. Belsejükben kis hőmérőket helyeztek el, hogy megmérjék, milyen hatékonyan veszik fel egy erős Jupiter-lámpa mesterséges „napfényt”.

Alátámasztva mindazt, amit eddig elmondtam, a legkisebb rovarok mindenféle szárny nélkül is ügyesen lebegtek. A Valószínűtlenség Hegyének kis kaptatóját érintő egyetlen zavaró tényező az volt, hogy a legkisebb méretek esetében a kicsi szárnyak egyáltalán nem segítettek a lebegést! Csak akkor szolgáltattak valamirevaló felhajtóerőt, ha már egy bizonyos méretet elértek. Két centiméteres testhosszú rovarok esetében a test hosszának megfelelő szárnyak már tisztességes felhajtóerőt adtak, de a testhossz csak húsz százalékát kitevő szárnyak semmivel sem segítettek gazdájukat. Ezek szerint ez egy meredek lépcsőfok a Valószínűtlenség Hegyén, hiszen egyetlen nagy mutációt igényel, mely egyetlen lépésben rögtön elég nagy méretben megjelenő szárnyakat feltételez. Ez a lépcsőfok azonban – az alább említendő néhány további tény miatt – nem túlságosan magas.

Először is, csak a nagyon kis rovaroknak van szükségük viszonylag nagy szárnyakra ahhoz, hogy azok számottevően segítsék a lebegést. A nagyobbaknál már a kis szárnyakon is jelentős hatású. Ha a szárnyak méretét nullától kezdve fokozatosan növeljük, tízcentis testhossznál jelentősen megugrik az aerodinamikai hatékonyság.

Másrészt nagyon kis rovarutánszatokból indultunk ki. Itt a kis szárnykezdemények kiváló *fűtő* napelemeknek bizonyultak. Ha egy kicsit nagyobbak, ez a felhajtóerő szempontjából nem sokat számít, de még jobb napelemek. Ha a rovar teste nagyon kicsi, a napelemfunkció javul lassan a szárnyméret növekedésével. Az egy milliméteres szárnykezdemények jobbak, mint a semmi, a két milliméteresek jobbak, mint az egy milliméteresek, és így tovább. Az „és így tovább” természetesen nem megy a végtelenségig. Bizonyos hossz elérése után a növekedés már egyre kevésbé javítja a napelem-teljesítményt. Érvelhetnénk tehát azzal, hogy a napelem-teljesítmény javulása miatt bekövetkező hossznövekedés nem elég ahhoz, hogy létrehozza azt a szárnyméretet, ahol már előtérbe kerülhet a repülés feladata. Kingsolver és Koehl erre is kínálnak magyarázatot. Míg a kis rovarok napelemhatásuk miatt fejlesztették ki szárnykezdeményeiket, ugyanők – egészen más okokból – egyre nagyobb testűvé is váltak. Az okok különbözőek lehetnek: az állatvilágban nagyon gyakori a testméret növekedése az evolúció során. Talán azért előnyös, mert a nagyobb állatot kisebb valószínűséggel eszik meg. Bármiért is növekedtek e rovarok evolúciós időléptékben, feltételezhető, hogy napelemeik velük együtt nőttek. Végül az általános növekedés eredményeképp a rovarok és szárnykezdeményeik eljutottak abba a mérettartományba, ahol az aerodinamikai előnyök veszik át a vezető szerepet, és elindulhat a folyamatos emelkedés a Valószínűtlenség Hegye oldalán – még ha egy másik lejtőn, egy másik csúcs felé is.

Persze egyáltalán nem lehetünk biztosak abban, hogy a szélesatornában röpködő rovarutánszatok valóban azt a történetet játsszák el, ami a devon korban 400 millió évvel ezelőtt végbement. Lehet, hogy igaz, lehet, hogy nem, hogy a rovarok szárnyai napelemekként kezdték működésüket, és a repülés szempontjából semmi hasznuk sem volt, míg – más okok miatt – egy bizonyos méretet el nem értek. Lehet, hogy a valóság fizikája más volt, mint az utánszatoké, és a növekvő szárnykezdemények már a kezdetektől fogva segítettek a repülést. Kingsolver és Koehl kutatásai azonban ekkor is nagyon érdekes tanulsággal szolgálnak. Megmutatnak egy újfajta trükköt – az oldalra

való eltérést –, mely segíthet abban, hogy megtaláljuk a Valószínűtlenség Hegyére felvezető utat.

A gerincesek repülésének evolúciója nagy valószínűséggel egészen más történet, mivel ők már eleve nagyobb testűek. Valódi, erőből történő repülés egymástól függetlenül kialakult a madaraknál, a denevéreknél (talán legalább két különböző csoportban) és a repülő gyíkoknál (*Pterosaurus*). Az egyik lehetőség, hogy a valódi repülés a fák közötti siklásból alakult ki; erre sok állat képes, ha valóban repülni nem is tud. A fakoronák élővilága nagyon gazdag. Mi, emberek az erdőt alulnézetből szemléljük, a nagy, nehéz testű, esetlen talajlakó állatok szemszögéből, melyek a fatörzsek útvesztőjében igyekeznek eligazodni. Számunkra az erdő zezzugos, sötét katedrális, melynek boltívei a távoli zöld mennyezetig emelkednek. Az erdő lakóinak többsége azonban a lombkoronában él, és éppen ellenkező szemszögéből látja az erdőt. Az ő világuk hatalmas, lágyan hullámzó napfényes zöld mező, mely történetesen cölöpökre épült – de ezt csak ritkán veszik észre. Rengeteg állatfaj éli le egész életét ezen a magaslati mezőn. Itt vannak a levelek, mivel itt a napfény, minden élet végső energiaforrása.

A táj – szó szerinti értelemben – nem egybefüggő. A légi mezőt mély lyukak pötytyözik, melyeken át le lehet pottyanni a földre: ezeket át kell hidalni. Sok állat sokféle remek megoldást talált jókora távolságok átugrására. Az ugrás sikere vagy sikertelensége élet-halál kérdése lehet. A testalak bármilyen változása, mely akár a legkisebb mértékben is megnöveli az ugrás hosszát, valószínű, hogy előnyös. Egy mókus és egy patkány leginkább a farkában különbözik. A farkok nem szárny: repülni nem lehet vele. A bozontos szőrzet azonban megnövelheti annyira a felületét, hogy segítse a siklást. Egy mókusfarkú patkány minden bizonnyal hosszabbat tud ugrani, mint egy patkányfarkú patkány. Ha a mókusok ősenek patkányfarka volt, a folyamatos javulás, folyamatos bozontosodás egyenesen, töretlenül vezet el a mai mókusok zászlós farkához.

A bozontos farknál még kiválóbb siklószerv a „tollas” farkok, egy teljesen más rokonsági körbe tartozó kicsiny emlős, az oposszumegér madártollra emlékeztető farka (4.2. ábra). Az oposszumegér erszényes állat, közelebbi rokona az oposszumoknak és kenguruoknak, mint a patkányoknak és mókusoknak. Ausztrália eukaliptuszerdeinek magas lombkoronájában él. Farka természetesen nem valódi toll: az apró horgocskákkal összekapcsolt finom ágakból felépülő toll a madarak találmánya. Az oposszumegér farka azonban pontosan úgy néz ki, mint egy toll, és hasonló feladatot is lát el.



4.2. ábra. Oposzsumegér (*Acrobates pygmaeus*), ausztrál erszényes

Az oposzsumegérnek könyökétől térdéig nyúló bőrredője is van, melyet ha kifeszít, ugrását tizenharc méteres lejtős siklássá változtathatja. Az ausztráliai erszényesek egy másik csoportja, a repülő erszényesek továbbfejlesztették a bőrredőt. Az óriás erszényes mókus bőrredője még mindig csak a könyékig ér, de a siklás hossza elérheti az 50 m-t, és akár 90 fokos irányváltatásra is képes. A sárgahasú repülő erszényes még ügyesebb légtornász. Siklóredője csuklójától a bokájáig ér, akárcsak a kis és közepes repülő erszényeseké.

Külsejét tekintve szinte egyforma, de teljesen más rokonsági körbe tartozik a távolkeleti erdők vörös óriás repülőmókusa és az észak-amerikai északi repülőmókus (4.3. ábra). Valódi mókusok (rágcsálók), de bőrredőjük – a legfejlettebb sikló erszényesekhez hasonlóan – csuklójuktól a bokájukig nyúlik. Siklóképességük kb. megegyezik erszényes társaikkal.



4.3. ábra. Fákról levitorlázó, de valódi repülésre képtelen gerincesek (az óramutató járásával ellentétes irányban, a bal felsőtől kezdve): repülőmaki (*Cynocephalus volans*); repülőgyík (*Draco volans*); Wallace repülő békája (*Rhacophorus nigropalmatus*); ékes famászó sikló (*Chrysopelea paradisi*); kis repülő erszényes (*Petaurus breviceps*)

Afrikai rágcsálók is szert tettek ugyanilyen siklóképesre. A Becroft repülő mókusa és Zenker repülő mókusa nem valódi mókus, a siklórepülést az amerikai repülőmókusoktól független úton fejlesztették ki. A Fülöp-szigetek erdeinek titokzatos repülőmakija még fejlettebb bőrredővel rendelkezik, mely nyakát, ujjait, karját és lábát egyaránt végigéri. Senki sem tudja pontosan, milyen állat ez; repülő lemurnak is nevezik, de biztos, hogy nem lemur (valódi lemurok csali Madagaszkáron élnek, és egyikük sem képes sem repülni, sem siklani, még ha vannak is köztük kiváló ugrók), nem rágcsáló és nem erszényes. Vagyis bőrredőjét és az ezzel kapcsolatos viselkedésformát az előzőektől teljesen függetlenül alakította ki.

A repülőmaki, a különböző repülő mókusok és repülő erszényesek siklóképesége hasonló. Mivel azonban a repülőmaki bőrredője az ujjak között is megtalálható, míg a többieké legfeljebb a csuklót éri el, a további evolúció során különböző típusú szárnyaknak adhatják át helyüket. Még szemléletesebb példa erre a gyönyörű nevű

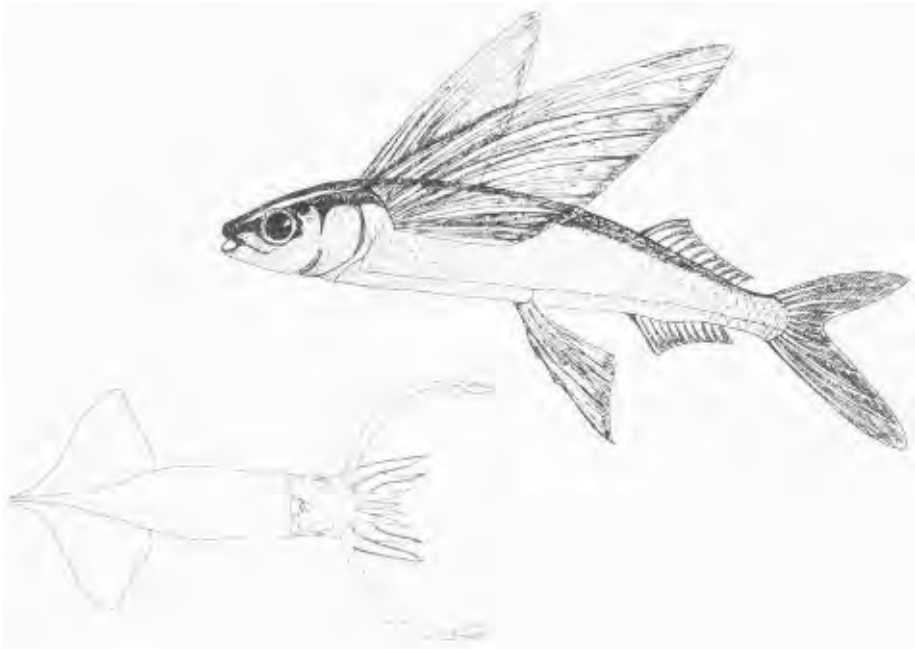
Draco volans, „repülő sárkány” vagy repülő sárkánygyík, mely szintén a Fülöp-szigetek és Indonézia erdeinek fain él. A sikló emlősökkel ellentétben bőrredői nem a végtagok, hanem meghosszabbodott bordák között feszülnek ki, melyeket az állat szándékosan felmereszthet. Kedvencem a sikló állatok közül Wallace repülő békája, a délkelet-ázsiai esőerdők egy fán élő békafaja. Bőrredője meghosszabbodott kéz- és lábujjai között feszül ki; a többi sikló állathoz hasonlóan fától fáig utazik vele.

A fenti esetek egyikében sem jelent semmi nehézséget megtalálni a Valószínűtlenség Hegyére felvezető lankás utat. Sőt az, hogy a siklórepülés ilyen sok, egymástól független esetben kialakulhatott, éppen azt jelzi, hogy ezeket a hegyi ösvényeket egyáltalán nem nehéz megtalálni. Talán még meggyőzőbb bizonyítékot szolgáltat az ékes famászó kígyó, melyet repülő kígyó néven is emlegetnek; szintén a délkelet-ázsiai erdők szülötte. Ez a kígyó, miután szándékosan eldobja magát, mesteri módon siklik fáról fára a levegőben, akár húszméteres távolságra is, bár semmiféle vitorlát, bőrredőt vagy más siklófelszínt nem tudunk rajta felfedezni. Csupán eleve elnyúlt alakja az, ami elegendő nagy felületet biztosít a súlyához képest, és ráadásul még a hasát is behúzza siklás közben, hogy homorú felület keletkezzen. Ez a kígyó remekül képviseli a repülő sárkánygyíkhöz vezető fejlődés első lépcsőfokát: ezután még a repülőredőt kell kialakítani. Ezt a második lépést kígyónk nem tette meg; talán azért, mert a meghosszabbodott bordák zavarnák élete más területén.

A repülő mókushoz vezető fokozatos evolúciót valahogy a következőképpen képzelhetjük el. A közönséges mókushoz hasonló ős a fák tetején élt, semmiféle siklóredője nem volt, de kisebb-nagyobb ugrásokkal hidalta át a réseket. Bármekkora is tudott így ugrani, egy nagyon keskeny bőrredő, egy egészen kicsit bozontosabb fark néhány centiméterrel megnövelte ugrásaink hosszát – és ez egyes esetekben életmentő lehetett. A természetes szelekció tehát előnyben részesítette a kar vagy a láb ízesülésénél kicsit lötyögősebb bőrt – így ez vált elterjedtté. A populáció egy átlagos tagjának átlagos ugrótávolsága néhány centiméterrel megnőtt. A kicsit nagyobb bőrredőjű egyedek ennél is egy kicsit nagyobb tudtak ugrani, így a későbbi nemzedékekben ez vált átlagossá – és így tovább. Bármilyen bőrredőméretnél létezik egy kritikus távolság, amikor a hajszálnyival nagyobb siklóredő életmentő lehet. A populáció átlagos tagjának bőrredőmérete egyre nagyobb lesz, így egyre nagyobb réseket át tudnak ugrani. Sok-sok nemzedék múltán a repülő erszéyesek és repülő mókusok több tíz méteres távolságot is át tudnak hidalni, és irányítani tudják földet érésüket.

Bármilyen szép is mindez, a siklás nem valódi repülés. A sikló állatok egyike sem képes siklószerével csapkodni, sem hosszú ideig a levegőben maradni. Siklásuk mindig lefelé irányul, bár testhelyzetük megváltoztatásával emelkedhetnek egy keveset, mielőtt letelepednének egy alacsonyabb fatörzsön. Lehetséges, hogy a valódi repülésre képes denevérek, madarak és repülőgyíkok ilyen sikló ősből alakultak ki. A fenti sikló állatok többsége képes szabályozni siklása irányát és sebességét, hogy egy meghatározott ponton szállhasson le. Könnyen elképzelhető, hogy a valódi, szárnycsapkodással történő repülés a siklás irányát befolyásoló izommozdulatok ismételtetéséből alakult ki, az evolúció során egyre hosszabb levegőben töltött időt biztosítva.

Sok biológus azonban a fáról induló, hosszú távú, ereszkedő siklórepülést evolúciós zsákutcának tartja. Véleményük szerint a valódi repülés inkább a földről, semmint a fákról indult. Az ember alkotta siklószerkezetek is két úton kaphatnak szárnyra: vagy hegycsúcsról indulva, vagy úgy, hogy a földön nagy sebességre gyorsulnak. A repülőhalak (4.4. ábra) ez utóbbi utat járók, ám bár nem a szárazon, hanem a vízben. Siklótávolságuk kb. megegyezik a legsikeresebb fáról induló erszényesekével. A repülőhalak nagyon gyorsan úsznak, majd kilónek a vízből – valószínűleg az őket követő ragadozók szörnyűlködésére, akik ezt szó szerint úgy élik meg, hogy „elszállt” a vacsorájuk. Jó 100 méteres siklás után pottyannak csak vissza a vízbe.



4.4. ábra. Vízből kiszökellve sikló állatok. Fecskefarkú hal (*Cypselurus heterurus*, fenn); repülő kalmár (*Onychotheuthis*)

„Vízre szálláskor” előfordul, hogy csapnak egyet-kettőt a farkukkal, úsznak egy-két tempót, majd sebességüket visszanyerve továbbrepülnek. „Szárnyaik” erősen megnagyobbodott mellúszók; a fecskefarkú halnál a hasúszók is megnagyobbodnak.

Ezeket a valódi repülőhalakat (*Exocoetidae*) nem szabad összekeverni a velük semmiféle rokonságban nem álló repülő morgóhalakkal (*Dactylopteridae*) – még ha ezt legalább két, ebéd utáni olvasmányának szánt könyv meg is teszi. Ezek a halak – pl. az európai „repülőhal” – nem repülnek: éppen ellenkezőleg, a tengerfenéken mászkálnak. „Szárnyaikat” a különböző leírások szerint támasztékként, felvillantva az ellenség elriasztására, zsákmányuk homokból való kiásására használják; ha megzavarják őket, néhány méternyire felemelkednek a vízfenék fölé, majd kiterjesztett „szárnyakkal” újból levitorláznak. Egyetlen dologra nem használják szárnyaikat: levegőben repülésre. Nem tudni, honnan ered repülőképességük legendája: talán onnan, hogy méretes mellúszóik némileg emlékeztetnek a valódi repülőhalak hasonló szerveire. A valódi

repülőhalak biztos, hogy nem fenéklakó, hanem gyors mozgású, felszínközeiben élő fajokból alakultak ki. Sok hal kiugrik a vízből anélkül, hogy ebben megnagyobbodott úszók segítenék. E sebes ugrók számára bizonyára nem jelent gondot, hogy úszóikat kicsit kiterjesztve hosszabbítsák meg ugrásukat; a későbbi nemzedékekben az úszók meg is nagyobbodhatnak, míg végül „szárnyakká” terebélyesednek. Igazán kár, hogy az akrobatikus ügyességgel ugró delfinek sohasem jutottak el a repülőhalak fejlettségi fokára. Talán azért nem, mert jelenlegi testméretüknél jóval kisebbeknek kellene lenniük ahhoz, hogy sikerrel alkalmazzák ezt a stratégiát; a hőszigetelő haj bizonyos tulajdonságaiból következik, hogy az állandó testhőmérsékletű delfineknek nem könnyű kicsinek maradniuk. Vannak ún. repülő kalmárok, akik a repülőhalakhoz hasonló trüffel menekülnek meg ugyanazon ragadozók, pl. a tonhal elől. Az *Onychotheuthis* nemzetségbe tartozó kalmárok a vízben közel hetven km/óra sebességre felgyorsulva lönek ki a levegőbe; röppályájuk hossza meghaladja a tizenöt, magassága a két métert. Bámulatra méltó sebességüket lökhajtással érik el; farki végükkel előre repülnek, mivel a vízszögük fejjük felé lövell ki. Ha víztartalékukat kiürítették, hajtóerejük kimerült, vissza kell tértünek a vízbe. Ebből a szempontból a repülőhalak előnyben vannak, hiszen, mint említettük, farkukkal akkor is tudják magukat gyorsítani, ha testük nagyobb része még kint van a vízből.

Fantasztikus, de van a halaknak egy csoportja – a dél-amerikai folyókban élő édesvízi szekercelazacok –, melyekről leírták, hogy mellúszóik gyors, hangos rezegtetésével valódi, erővel hajtott repülésre képesek a levegőben, még ha rövid távolságokra is. A szekercelazacok nem rokonai sem a valódi repülőhalaknak, sem a „repülő” morgóhalaknak. Azért szeretnék saját szememmel látni egy zümmögve elhúzó szekercelazacot! Nem állítom, hogy nem hiszem el; csak mint minden horgász tudja és megtanulhattuk a repülő morgóhalak történetéből is, néha nem árt ellenőrizni a halakról szóló mendemondákat.

A repülő (sikló) halakat azért mutattam be itt, hogy bevezessem azt az elméletet, mely szerint a valódi, szárnyacsapkodó repülést nem a fáról lesiklók alakították ki, hanem olyan talajlakó, gyors futású állatok, melyek mellső végtagja felszabadult a járásban eredetileg rá osztott szerepből. A repülőhalak és kalmárok azt példázzák, hogy ha egy siklásra képes állat elegendő gyorsan tud haladni a felszín közelében, fa vagy szirt segítsége nélkül is szárnyra kaphat. Ez az elmélet igaz lehet a madarakra, hiszen két lábon járó dinoszauruszokból alakultak ki (tulajdonképpen azt is mondhatjuk, hogy a madarak dinoszauruszok), amelyek némelyike elég gyorsan tudott futni, mint pl. ma a struccok. A repülőhalakkal való analógiát továbbfolytatva, a két láb pótolja a hal farkát a gyors előrehaladásban, a szárnyaknak pedig a mellúszók szerepe jut: eredetileg stabilizálás vagy kormányzás, majd később siklófelületekké növekszenek. Vannak emlősök is, melyek gyors előrehaladásra képesek két lábon, míg mellső végtagjaik felszabadulnak a más irányba történő evolúció számára. Úgy tűnik, az emberi faj az egyetlen, mely a madarakhoz hasonló módon két lábát váltogatva lépeget – bár nem túl gyorsan –, mellső végtagját pedig másra használja: nem repülésre, hanem tárgyak hordozására, sőt készítésére. A többi gyors mozgású kétlábú emlős kenguru módra közlekedik: nem váltott lábbal lépked, hanem páros lábon ugrál. Ez a haladási forma természetes módon alakul ki egy tipikus négylábú, pl. egy kutya mozgásából, ahol a

gerincoszlop vízszintes irányban hajlik és nyúlik meg. (Analog módon a bálnák és delfinek úszása során a gerincoszlop emlős módra fel-le hajladozik, míg a halak és krokodilok gerincüket jobbra-balra hajlítják úszás közben, a halak ősi módján. Bizony, több tisztelettel kéne adoznunk az emlősszerű hüllők azon névtelen hősének, aki „feltalálta” a gerincoszlop fel-le hajlítását – innen ered a gepárdok és agarak lélegzetállító vágója. Az ősi halmozgás csökevénye talán a kutyák farkcsóválása, főleg amikor az egész testre kiterjed, pl. magát megadó, vonagló állatnál.) A „kengurumozgás” nemcsak a talajlakó kenguruk és erszényes rokonaik sajátja. Munkatársam, dr. Steven Cobb egyszer a Nairobi Egyetemen tartott állattani előadást, ahol elmondta, hogy törpe kenguruk csak Ausztráliában és Új-Guineában élnek. „Nem, uram – tiltakozott egy hallgató – Kenyában is láttam már.” A diák valószínűleg a 4.5. ábrán bemutatott állatot látta.



4.5. ábra. Ugrónyúl (*Pedetes capensis*)

Az ugrónyúlnak nevezett állat sem nem nyúl, sem nem kenguru: rágcsáló. Ha menekül, sebességét kenguruszerű ugrásokkal növeli. Más rágcsálók, pl. az ugrógér is hasonlóképpen tesznek. A kétlábú emlősök mégsem tették meg a következő lépést, nem tettek szert a repülés képességére. Az emlősök közül valódi repülésre egyedül a denevérek képesek, náluk viszont a szárny a hátsó és a mellső végtagokat egyaránt magába foglalja: nehéz elképzelni, hogy a lábakat akadályozó szárnyak hogyan alakulhattak ki a gyorsan futó ősoknél. Ugyanez áll a repülő gyíkokra is. Véleményem szerint (ami csak találgatás) a denevérek és repülő gyíkok röpmódja a fáról vagy szikláról való lesiklásból alakult ki. Őseik egy lépcsőfokon a repülőmakikra hasonlíthattak.

A madarak története más. Középpontjában egy csodálatos szerkezet, a toll áll. A toll módosult hüllőpikkely. Lehet, hogy eredetileg más, ma is fontos cél érdekében

fejlődtek ki: hőszigetelők. Bárhogy is történt, szaruanyaguk alkalmas arra, hogy könnyű, lapos, hajlékony és mégis ellenálló repülőfelületet alakítson ki. A madárszárny teljesen más, mint a denevérek és repülő gyíkok lötytyedt bőrzacsója. A madarak ősei a tollak segítségével pompás szárnyat alakíthattak ki anélkül, hogy csontok között kellett volna kifeszíteni. Elég volt az elejére egy csontvázú kar. A többiről maguk a feszes tollak gondoskodtak. A hátsó lábak szabadon maradtak a futás céljára. A földön esetlen, nehézkes denevérekkel ellentétben – valószínűleg a repülő gyíkok sem lehettek különbe – a madarak képesek futni, ugrani, pipiskedni, mászni, zsákmányt ejteni és verekedni lábaik segítségével. A papagájok úgy használják a lábukat, mint az ember a kezét. Eközben a mellső végtag teljesen a repülés feladatához alkalmazkodott.

Íme egy elképzelés, hogy hogyan alakulhatott ki a madarak repülése. A feltételezett ős, egy kis termetű, mozgékony dinoszaurusz, rovarok után futkos, erős hátsó lábai segítségével fel-felugrik a levegőbe, hogy elcsípje a zsákmányát. A repülő rovarok már korábban megjelentek. A repülő rovar a menekülés nagymestere, így az ugráló ragadozónak nagy előnyt jelent, ha ugrás közben is tud irányt változtatni. Valami hasonlót ma is megfigyelhetünk a macskáknál. Nem könnyű feladat, mivel a levegőben semmi sincs, amire támaszkodni lehetne. A megoldás kulcsa, hogy a súlypontot kell elmozdítani, vagyis az egyes testrészeket egymáshoz képest: a fejet vagy a farkat, de legkézenfekvőbb a mellső végtagokat. Ha szokássá válik a mellső végtagok ilyen célú mozgatása, hatékonyabb lesz, ha siklófelszínekké alakulnak. Az is felvetődött, hogy az evezőtollak eredetileg rovarfogó hálóként szolgálhattak. Ez nem olyan légből kapott ötlet, mint első hallásra tűnik: egyes denevérek tényleg használják a szárnyukat erre a célra. A fenti elmélet szerint azonban a mellső végtagok legfontosabb szerepe a kormányzás és szabályozás volt. Számítások szerint az ugrás közbeni hánykolódás, forgás irányítására legalkalmasabb mozdulatok kezdetleges szárnyacsapkodásra hasonlítanak.

A fut-ugrik-kormányoz elmélet a sikláselmélethez képest megfordítja a dolgok rendjét. A sikláselmélet szerint a szárnykezdemények eredeti szerepe a felhajtóerő biztosítása volt, csak később kezdtek el kormányozni, majd csapkodni. A rovarokért ugrálás elmélete szerint először volt a kormányzás, a megnövekedett felszínű mellső végtagok csak később kapták feladatul a felhajtóerő biztosítását. Az elmélet szépsége, hogy ugyanazok az idegrendszeri hálózatok, melyek eredetileg az ugráló ős súlypontja áthelyezésében játszottak szerepet, később minden nehézség nélkül elláthatták a repülőfelszínnek irányításának feladatát. A madarait röpte rovarok után ugrálással, míg a denevéreké fáról való lesiklással kezdődhetett. De lehet, hogy a madarak is siklással kezdték – ki tudja? A vita folytatódik.

Bárhogy is történt, a madarak hosszú utat tettek meg azóta. Mondhatnám úgy is, hogy sok hosszú utat, mivel a Valószínűtlenség Hegyének számos gyönyörű csúcsát hódították meg. Az áldozatára lecsapó vándorsólyom több mint 150 km/óra sebességgel zúg alá. Az ölyvek és kolibrik bármely helikoptert megszágyenítő pontossággal lebegnek egy helyben. A sarki csér minden év felét az Északi- és Déli-sark közti oda-vissza vándorlással tölti – húszezer kilométer! A háromméteres fesztávú szárnyai ernyője alatt lebegő vándoralbatrosz örök köreit rója a Déli-sark körül, mindig az óra járásának irányában; nem csapkod, hanem éber figyelemmel kíséri a változó

szélesebbség természetes hajtóerejét az Üvöltő Negyvenesek jeges birodalmában. Mások, pl. a fécánok vagy pávák csak akkor kapnak rövid időre szárnyra robbanásszerű dőrejjel, ha hirtelen veszély bukkan fel. A struccok, nanduk és Új-Zéland sokszor elsiratott moái túl nagyra nőttek a repüléshez, szárnyaik elcsökevényesedtek hatalmas gyalogló- és rugólábaik javára. A másik véglet a sarlósfecskéké: lábaik gyengék, nem sokat érnek, de szinte szünet nélkül a levegőben vannak hipermodern, hátracsapott szárnyaikon. Csak fészket rakni ereszkednek le: még a pázást és az alvást is röptükben oldják meg. Ha leszállnak, ügyelniük kell, hogy magas helyen legyenek, mert sík terepen nem lennének képesek újra felszállni. Fészküket levegőben lebegő anyagokból építik, esetleg olyanokból, amiket fákról szakítanak le, míg elsuhanak mellettük. Egy sarlósfecske számára a földön való mozgás olyan bonyolult, természetellenes dolognak tűnhet, mint számunkra, emberek számára a légi akrobatika vagy a bűvárkodás. Számunkra a világ tevékenységünk szilárd, mozdulatlan háttere. A sarlósfecske fekete gyöngyszemein keresztül azonban a háttérvilág szüntelenül változó, szédítően ingadozó végtelenség. A mi szilárd földünk a sarlósfecske számára talán éppoly idegtépő, mint számunkra Disneyland hullámvasútja.

Nem minden madár verdes a szárnyával, de a szitáló vagy sikló fajok valószínűleg mind szárnycsapkodó őstől származnak. A szárnycsapásos repülés bonyolult és még nem minden részletében ismert. Csábító a gondolat, hogy a lefelé irányuló erőteljes szárnycsapások eredményezik közvetlenül a felhajtóerőt. Ez részben igaz is, főleg a felszálláskor, ám a felhajtóerő túlnyomó része – ha már elég nagy a sebesség – a szárny alakjának köszönhető, akárcsak a repülőgépnél. A megfelelően ívelt vagy dőlt szárnyfelületre felhajtóerő hat, ha szél fúj vele szemben vagy – ami lényegében ugyanaz – az egész madár, bármilyen okból, előrehalad a levegőben. A szárnyalt csapkodása elsősorban a szükséges előrehajtó erőt biztosítja. A szárnyalt hajtó szerepe annak köszönhető, hogy nem egyszerűen fel-le csapkodnak. A madár válla mesteri csavart írt le, ehhez finoman hozzáhangolódik a többi ízület mozgása, a tollak hajlottsága pedig automatikusan tovább segít. E csavarok, illesztések és hajlások eredményeképp a szárny fel-le csapkodó mozgása előrelökéssé alakul, hasonlóan a bálna fel-le csapdosó farkához. Ha megvan a levegőhöz képest megfelelő sebességű előrehaladás, a madár szárnyai lényegében ugyanúgy biztosítják a felhajtóerőt, mint a repülőgép szárnyai (eltekintve attól, hogy utóbbiak egyszerűbb felépítésűek, mert merevek). Minél nagyobb a sebesség, annál nagyobb a felhajtóerő – ezért marad fenn a gigászi súlyú Boeing 747-es.

A fizika könnyörtelen törvényei a szárnycsapásos repülést egyre nehezebbé teszik, ahogy a madár mérete nő. Ha elképzeljük ugyanolyan alakú madarak egyre növekvő méretű sorozatát, a testsúly a testhossz harmadik, míg a szárnyfelület csak annak második hatványa szerint növekszik. A nagyobb madaraknak, hogy a levegőben maradhassanak, aránytalanul nagyobb szárnyakat kellene növeszteniük vagy aránytalanul gyorsabban kellene repülniük. Az egyre nagyobb madarak sorában elérkezünk arra a pontra, ahol az adott méretű madár izomzata által kifejített erő – lökhajtás vagy dugattyús motor hiányában – nem elegendő a levegőben maradáshoz. E kritikus mérettartomány valamivel a nagyobb keselyűk és albatroszok mérete alatt van. Néhány nagyobb madár egyszerűen feladta a harcot, berendezkedett a földi életre és

egyre nagyobb és nagyobb lett – mint a struccok és emuk példáján láttuk. A keselyűk, kondorkeselyűk, sasok és albatroszok azonban fenn maradtak. Miért is ne?

A titkuk annyi, hogy külső energiaforrást is igénybe vesznek. A Nap melege és a Hold változó vonzereje nélkül a levegő és az óceánok csendesek lennének. Külső energia hajtja az óceánok áramlatait, kavarja a sivatagok portölcseireit, kelti a légkör házakat romba döntő, autótutakat szétszaggató viharait; ugyanez a külső energia okozza a felszálló meleg légáramlatokat, melyeket ügyesen kihasználva a felhőkig emelkedhetünk. A keselyűk, sasok és albatroszok mesteri módon használják ki ezeket. Valószínűleg ők az állatvilág egyedüli képviselői, akik az emberhez hasonló mértékben a maguk hasznára tudják fordítani az időjárás energiáit. A siklórepülést űző madarakkal kapcsolatos ismereteim elsősorban dr. Colin Pennycuick (Bristol University) írásaiból származnak, aki elmélyedt a vitorlázórepülés tudományában, részben azért, hogy megértse, hogyan csinálják a madarak, részben azért, hogy köztük vitorlázva közvetlen közelről tanulmányozhassa technikájukat.

A keselyűk és sasok ugyanúgy kihasználják a felszálló meleg áramlatokat – termikeket –, mint a vitorlázó repülőgépek pilótái. A termik meleg légoszlop, ami felfelé száll azért, mert alapjánál a talaj egy része jobban felmelegszik, mint a környezete. A vitorlázó pilóták nagymértékben függenek a termikektől, ezért nagy gyakorlattal már messziről észreveszik őket. A termikeket bonyolult jelek árulják el, pl. felettük jellegzetes alakúak a bárányszerű felhők, vagy furcsa alakzatok látszanak az alapjuknál. A hosszú távú vitorlázás legjobb módja, ha körözve felemelkedünk egy termik kéményében, akár 1500 méter magasra is, majd egyenesen siklani kezdünk a kívánt irányba. Az ereszkedés csekély lejtésű: a keselyű ereszkedése során általában tíz méter előrehaladás egy méter magasságesséssel jár. Ez azt jelenti, hogy tíz mérföldnyi távolságot megtehet, mielőtt újabb termiket kell keresnie, hogy felemelkedjen.

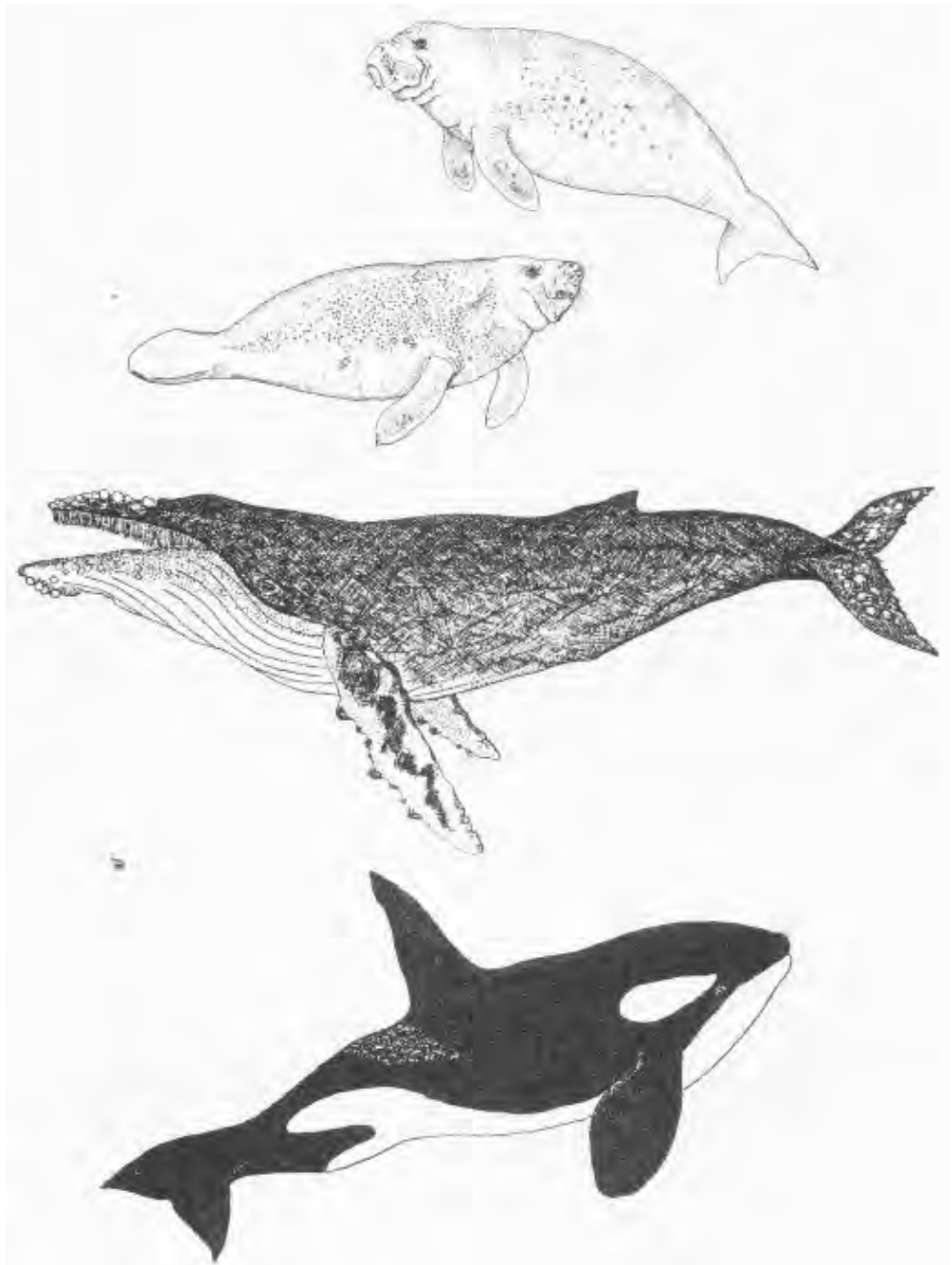
A termik gyakran „utcákat” alkotnak, amit a pilóta a felhők alakjából jó előre meglát. A keselyűk ugyanolyan hozzáértéssel követik ezeket az „utcákat”, mint a pilóták. Ha egy keselyű jó „utcát” talál abban az irányban, amerre menni szeretne, nem is vesződik a körözéssel, csak egyszerűen minden termikben emelkedik egy keveset. Ily módon jókora távolságokat megtehet anélkül, hogy köröznie kéne. Rendszerint csak akkor szorítkoznak erre, ha táplálkozóhelyük és fészük között ingáznak. Idejük nagyobb részében azonban a keselyűk nem egyenes vonalban haladnak, hanem dögöt keresve köröznek. Eközben keselyűtársaikon is rajta tartják a szemüket. Ha valamelyikük tetemet talál és leereszkedik, a többiek észreveszik, és egykettőre csatlakoznak hozzá. Az égen ilyenkor figyelmeztető hullám szalad végig, hasonlóan a dombokon felgyűrő jelzőtüzekhez, melyek Anglia széljében-hosszában szertefutva figyelmeztettek a spanyol armada jöttére.

A fehér gólyák más célból állítanak fel hasonló őrszolgálatot Észak-Európából Dél-Afrikába tartó hosszú éves vonulásuk során. Több száz létszámot is elérő csapatokban vonulnak. A keselyűkhöz hasonlóan egy termikben felemelkednek, majd egyenes vonalban lesiklanak a következő termikig. Bár a termikben együtt köröznek, amikor kikerülnek belőle, nem sűrű rajban repülnek tovább, hanem arcvonalba rendeződnek. E széles sávban nagy az esély arra, hogy valamelyikük megpillant egy termiket. Amikor

emelkedni kezd benne, szomszédai észreveszik, és csatlakoznak hozzá. Így a nagy csapat minden tagjának hasznára van a bárki által fellelt termék.

A madárrepülés eredetének bármelyik elméletét fogadjuk el – akár a fáról lesiklást, akár a futás-felugrálást –, az szinte bizonyos, hogy a keselyűk és sasok, gólyák és albatroszok siklórepülése másodlagos. Siklótechnikájukat kisebb testű, csapkodó őseik örökségéből fejlesztették tovább. A madárrepülést a siklásból származtató szemlélet számára a mai keselyűk – bár fák helyett termikeket „megmászva” jutnak fel a magasba – *visszatérést* jelentenek az ősi röpmódhoz a csapkodó repülés köztes fázisán keresztül. A köztes, szárnycsapkodó szakaszban – így az elmélet – idegrendszerük új beidegződéseket alakított ki, új szabályozó és manőverező képességekre tett szert. Az előnyök, amelyeket ezek az új képességek biztosítottak számukra, akkor is megmaradtak, amikor visszatértek a merev szárnyú repüléshez. Gyakran előfordul, hogy egyes állatok visszatérnek egy evolúciósan sokkal régebbi életformához, miután némi „gyakorlati időt” eltöltöttek egy másikban; elfogadható az az érvelés, hogy e „gyakorlat” eredményeképp sikeresebben oldják majd meg az eredeti életforma kihívásait. A vitorlázó madarak példája talán azért nem a legjobb példa erre, mert nem tudjuk biztosan, honnan ered a madarak röpte. A korábbi életmódhoz visszatérő állatok jellegzetesebb példája a néhány millió éves szárazföldi tartózkodás után a vízbe visszatért emlősök esete. Ezt a történetet szánom jelen fejezet záróakkordjának (4.6. ábra).

Ötvenmillió évvel ezelőtt a bálnák és tengeri tehenek (nevezik őket sziréneknek is: a dugongok és manátuszok vagy lamantinok tartoznak ide) ősei szárazföldi emlősök voltak: a bálnáké valószínűleg ragadozók, a tengeri teheneké növényevők. Még korábbi őseik – egyben minden más emlős ősei – tengeri halak voltak. A bálnák és tengeri tehenek visszatérése a vízbe hazatérés volt. Mint mindig, most is biztosak lehetünk abban, hogy ez lassan, fokozatosan történt. Először talán csak táplálkozni mentek be a vízbe, mint a mai vidrák. Fokozatosan egyre kevesebb időt töltöttek a szárazföldön, a fejlődés egy szakaszában a fókákhoz hasonlíthattak. Ma már sohasem hagyják el a vizet, partra vetetten teljesen tehetetlenek. Ennek ellenére szárazföldi őseik számos örökségét hordozzák, sőt, a többi emlőshöz hasonlóan, korábbi vízi életük emlékeit is. A bálnák levegővel lélegzenek, mert szárazföldi őseik elvesztették kopolyúikat. Embrió állapotban azonban minden emlősnél – így a bálnáknál és tengeri teheneknél is – felismerhetők az egykori kopolyúk nyomai, a hajdani vízi életmód eltéveszthetetlen emlékei. A főleg édesvízi tudóscsigák is a szárazföldről vándoroltak vissza a vízbe, és ők is levegővel lélegeznek.



4.6. ábra. Bálnák és tengeri tehenek: több százmillió éves szárazföldi kitérő után a tengerbe visszatért állatok. Fentről lefelé: dugong (*Dugong dugong*); manátusz (*Trichechus senegalensis*); hosszúsárnyú bálna (*Megaptera novaeangliae*); kardszárnyú delfin (*Orcinus orca*)

Még korábbi őseik a tengerben éltek, akárcsak a csigák osztályának legtöbb tagja még ma is. A csigák, úgy tűnik, a szárazföld „hídján” vándoroltak át a tengerből az édesvízbe: szárazföldi létük átmeneti állapotnak tekinthető. További, a szárazföldről a vízbe visszatért állatok: tengeri teknősök, vízibogarak, bűvárpókok, valamint a kihalt halgyíkok és plesiosaurusok. A tengeri teknősök képesek arra, hogy a vízből is felvegyenek oxigént, de nem kopolyúkkal, hanem szájuk, esetleg végbelük hámbélésén keresztül, a lágy héjú teknősöknél a teknőt borító bőrön keresztül is. A vízibogarak és bűvárpókok levegőbuborékot visznek magukkal. Ezek az állatok mind visszatértek távoli őseik vízi hazájába, de ott már – fajuk korábbi, eltérő „tapasztalatai” eredményeképp – másként viselkednek.

A vízbe visszatérő szárazföldi állatok miért nem fedezik fel újra a vízi élet teljes kelléktárát? Miért nem veszítik el a bálnák és tengeri tehenek tüdejüket, miért nem nő helyette kopolyújuk? A Valószínűtlenség Hegye ismét fontos leckét akar nekünk megtanítani. Az evolúció nem csak a lehető legjobb megoldásokkal számol. Az sem közömbös, honnan indulunk, akárcsak az egyszeri ember történetében, aki így felelt, amikor megkérdezték, hogyan lehet eljutni Dublinba: „Innen nem mennék oda”. A Valószínűtlenség Hegyének sok csúcsa van. A vízben sokféleképpen lehet élni. Fel lehet venni az oxigént a vízből kopolyúkon keresztül, de fel is lehet jönni a felszínre levegőt venni. Újra és újra feljönni a víz színére levegőért – ez elég kényelmetlen, különösképpen szokásnak tűnik. Ne feledjük azonban, hogy a bálnák és tengeri tehenek ősei közvetlenül a levegővel való légzés csúcsa alól indultak. Belső felépítésük minden részlete a levegő belélegzéséhez alkalmazkodott. Talán sikerült volna mindent átalakítaniuk és ősi kopolyúik csőkevényeit leporolva visszatérni a halak megoldásához. Ez azonban alaposan szétzilálta volna testük rendszerét. Olyan lett volna, mintha a hegység egyik csúcsáról leereszkednénk egy mély völgybe, mert végső célunk az, hogy meghódítsunk egy kicsit magasabb csúcst. Nem győzöm elégszer ismételni, hogy Darwin elmélete nem engedi meg, hogy egy hosszú távú cél érdekében ideiglenesen romoljon a szervezet.

Még ha le is tudtak volna menni a völgybe, egyáltalán nem nyilvánvaló, hogy a végül megmászott kopolyúcsúcs valóban magasabb. A vízben élő állatok nem feltétlenül járnak jobban a kopolyúkkal, mint a tüdővel. Kétségtelenül kényelmesebb folyamatosan lélegezni, mint egyéb tevékenységeinket folyton megszakítva a felszínre jönni levegőért. Véleményünket azonban befolyásolja, hogy ahhoz vagyunk szokva, hogy néhány másodpercenként levegőt vegyünk; ha néhány lélegzetvétel kimarad, már pánikba esünk. Milliányi tengerben élő nemzedék szelekciója eredményeképp az ábrás cetek ötven percet is eltölthetnek a mélyben, mielőtt fel kell jönniük levegőért. Egy bálna valahogy úgy élheti meg, hogy fel kell jönnie a felszínre levegőért, mint amikor mi kimegyünk a WC-re vagy eszünk néhány falatot. Ha a lélegzetvételre nem mint folyamatos szükségletre gondolunk, hanem mint olyasmire, mint az evés, már nem is annyira nyilvánvaló, hogy egy víz alatti lény jobban jár kopolyúkkal. Vannak olyan állatok, pl. a kolibri, melyek gyakorlatilag folyamatosan táplálkoznak. A kolibri számára – ébrenléte idején néhány másodpercenként nektárt kell szívnia – a virágok látogatása olyasmire lehet, mint a lélegzés. A zsákállatok – zsák alakú tengeri gerinctelenek, az emlősök távoli rokonai – folyamatos vízáramot szivattyúznak

keresztül a testükön, ebből szűrik ki az apró táplálékreszecsskéket. A szűrő táplálkozású állatok nem ismerik az „étkezés” fogalmát. Egy zsákállat halálra rémülne attól a gondolattól, hogy meg kell keresnie táplálékát. Lehet, hogy néha el is merengenek: vajon miért keresi sok állat nevetségesen alacsony hatékonyságú és veszélyes módszerekkel táplálékát – ahelyett, hogy kényelmesen letelepedne és belélegezné azt?

Akárhogy is legyen, a bálnák és dugongok magukon viselik szárazföldi életük teljes történetét. Ha kifejezetten a tengeri létre lettek volna teremtve, egészen mások lennének és sokkal jobban hasonlítanának a halakhoz. A múltjuk emlékeit testükön hordozó állatok a legszemléletesebb bizonyítékai annak, hogy az élőlényeket nem mai életmódjukra teremtették, hanem nagyon más őstől származnak.

A lapos halak – rombuszhalak, lepényhalak – testét egészen groteszkké formálta a rájuk írt történet. Egyetlen épelméjű Teremtő tervezőasztalán sem születhetett volna meg egy olyan torz fejű lapos hal, mely mindkét szemét kénytelen egy oldalon hordani. Inkább a ráják alapszabását követte volna: a hal a hasán fekszik, szemei szimmetrikusan a hátoldalon helyezkednek el (4.7. ábra). A lepényhalak nyakatekertsége történetükről árulkodik: őseik egyik oldalukon feküdtek. A ráják azért olyan elegánsan szimmetrikusak, mert történetük másként alakult: a tengerfenékre telepedő őseik nem az oldalukra, hanem a hasukra találtak feküdni. A „találtak” nem azt jelenti, hogy nincs oka e különbségnek. A ráják a cápáktól származnak, a cápák pedig a magas testű, pengeszerű csontshalakkal szemben eleve hát-hasi irányban lapítottak. Egy magas, pengetestű hal nem tud a hasára feküdni: eldől valamelyik oldalára. A lepényhalak fenékre telepedő ősei a Valószínűtlenség Hegye legközelebbi csúcsának indultak neki, nem törődve azzal, hogy a valószínűleg magasabb rájacsúcs is a közelükben van – csak éppen le kéne ereszkedni egy kis völgybe, hogy elérjenek a lábához. A természetes szelekció azonban – ismétlem – nem engedi, hogy lefelé menjünk a Valószínűtlenség Hegye lejtőin, így a halaknak nem volt más választásuk, mint hogy szükségmegoldásként mindkét szemüket testük egyik oldalára csavarják.



4.7. ábra. Lapos halak két különböző alapszabása: a sima rája (*Raja batis*, balra) a hasán fekszik; a rombuszhal (*Bothus lunatus*) az oldalán

A ráják ősei szintén a legközelebbi csúcsra futottak fel – szerencsájukra ez a szimmetrikus elegancia csúcsa volt. Amikor „választási lehetőségről”, „csúcsra felfutásról” beszélek, természetesen itt sem egyes halakról, hanem evolúciós leszármazási vonalakról beszélek; a „választás” az evolúciós utak elérhető lehetőségeire vonatkozik.

Hangsúlyozom, hogy lefelé menni nem lehet – de ki tiltja meg? Valóban *sohasem* következhet be? A válasz mindkét kérdésre ugyanaz, mint egy folyó esetében: a folyó sem futhat másfelé, mint amerre medre vezet. Senki sem parancsolja meg a folyónak, hogy lefelé siessen, mégis – közismert okokból – rendszerint lefelé folyik. Csak néha fordul elő, hogy kilép a medréből, esetleg le is rombolja azt – megváltoztathatja folyását.

Hogyan lehetséges, hogy a leszármazási vonalak egy kicsit lefelé menjenek, így megteremtve a lehetőségét a Valószínűtlenség Hegye egy korábban elérhetetlen csúcsa meghódításának? Ez a kérdés foglalkoztatta Sewall Wrightot, az „evolúciós tájkép” hasonlat – a Valószínűtlenség Hegye ősatya – kiötlőjét. Wright volt az amerikai tagja annak az állandóan civakodó triumvirátusnak, akik az 1920-30-as években megalapozták a ma neodarwinizmusnak nevezett irányzatot. (A két másik utolérhetetlen, ám harcos kedvű lángelme, R. A. Fisher és J. B. S. Haldane, angolok voltak, és illik megemlítenünk, hogy a harci szellemet elsősorban ők szították, nem pedig Wright.) Wright rájött, hogy a természetes szelekció, paradox módon, az abszolút tökéletesség *ellen* is hathat. Éppen ez az az ok, amit keresünk. A természetes szelekció tiltja meg a leereszkedést a völgyekbe. A hegylábi dombsor egy kiemelkedésére felkapaszkodott faj nem hódíthatja meg a magasabb csúcsokat, míg a természetes szelekció nem engedi le a dombtetőről. Csak akkor ereszkedhet le a völgy aljára, hogy aztán a túloldalon kezdje el ismét a felfelé haladást, ha a természetes szelekció szorítása enyhül egy kicsit. Ha egyszer átjutott, már üzheti felfelé a szelekció, a magasabb csúcsok felé. Globális szempontból nézve az evolúciós tökéletesedés egyik lehetősége, ha az erős szelekcióval jellemezhető időszakokat nyugodtabb szakaszok tagolják. Lehet, hogy ezek a „nyugodt szakaszok” nagyon is fontosak az evolúció történetében. Mikor kerülhet sor ilyenre? Például amikor egy üres helyet kell kitölteni. Kismértékben mindig ez történik, ha egy populáció növekszik, mert létszáma kisebb, mint amit az adott élőhely el tud tartani. Hemzsegnek a lehetőségek, pihen a szelekció, ha egy katasztrófa által „kisepert” földrészt kell újra benépesíteni. Lehetséges, hogy a dinoszauruszok kihalása után az emlősök előtt a lehetőségek olyan végtelen sora tárult fel, hogy egyes leszármazási sorok „korlátaikat veszítve” egy ideig lefelé mehettek, így később a Valószínűtlenség Hegye olyan csúcsait hódíthatták meg, amelyekről korábban el voltak zárva.

Egy másik lehetőség, hogy friss gének érkeznek máshonnan. A pókhálókról szóló második fejezetben utaltam rá, hogy erre még visszatérek. A HálóSzövő modellben a szimulált pókoknak nemcsak egy ivaros szaporodó populációjával, hanem három párhuzamosan evolválódó „démjével” foglalkoztunk. Úgy tekintettük őket, mint amelyek három különböző földrajzi területen egymástól függetlenül fejlődnek. De – és ez a lényeg! – nem *teljesen* függetlenül. A gének erecskéje, ahogy az egyedek időnként átmennek az egyik helyi populációból egy másikba, folyamatosan csörgedezik. Akkor

úgy fogalmaztam, hogy e vándorló gének új „ötleteket” hoznak más populációkból, „szinte olyan ez, mintha egy sikeres részpopuláció géneket küldene szét, hogy »tanácsot adjon« sikertelenebb társainak, hogy hogyan oldhatják meg a hálóépítés feladatát”. Mintha metaforikus hegyünk magasabb csúcsait egy becsempészett térkép segítségével hódítanánk meg.

Most már felkészültünk arra, hogy megbirkózzunk a kreacionisták kedvenc ellenvetésével, a legnehezebb akadállyal, mely útját állja az evolúció leendő híveinek, mely kihívóan kacsint a Valószínűtlenség Hegye legtekintélyesebb csúcsán: ez a szem.

Megjegyzés: A kézirat nyomdába adása után jelent meg J. H. Marden és M. G. Kramer lebilincselő tanulmánya az álkérészekről, mely a valódi, szárnycsapkodó repülés evolúciójának egy újabb lehetséges útját vázolja fel. (Marden, J. H. és Kramer, M. G. [1995]: Locomotor performance of insects with rudimentary wings [Csökevényes szárnyú rovarok helyváltoztatása], *Nature* 377, 332-4). Az álkérészek ősi típusú repülő rovarok, ami azt jelenti, hogy a feltételezések szerint jobban hasonlítanak a rovarok őseire, mint más ma élő rovarok. Marden és Kramer az *Allocapnia vivipara* nevű fajt vizsgálta, mely a víz színén futva szárnyait vitorlaként felemeli, hogy azokba belekapjon a szél. A vitorlázás sebessége közelítően arányos a szárny hosszával. A legkisebb szárnyú egyedek is gyorsabban vitorláznak, mint azok, amelyek egyáltalán nem emelik fel a szárnyukat. Ezek a legkisebb szárnyak kb. akkorák, mint korai megkövült rovarok mozgatható kopolyülemezei. Talán a szárnyatlan ősök a víz felszínén éltek és kopolyülemezeiket emelték fel vitorlaként? Az egyre növekvő kopolyülemezek egyre hatékonyabb vitorlákká váltak – ez kényelmes utat jelent felfelé a Valószínűtlenség Hegyén. A csapkodó repülés e hipotézisének következő lépcsője lehet Marden és Kramer egy további fontos megfigyelése. Egy másik álkérészfaj, a *Taeniopteryx burksi* szintén a víz felszínén szalad, de közben szárnyaival csapkod. Talán a Valószínűtlenség Hegye „Csapkodó repülés” nevű csúcsa felé igyekvő rovarok először átmentek az *Allocapnia*-szerű vitorlázás, majd a *Taeniopteryx*-szerű felszíni csapkodás szakaszain. Könnyen elképzelhető, hogy a könnyű, szárnyaikkal csapdosó rovarokat néha felkapta egy-egy fuvallat. A Hegyre vezető út következő állomása az lehetett, amikor szárnyaikkal egyre jobban meghosszabbították e „felkapások” időtartamát.

A MEGVILÁGOSODÁS NEGYVEN ÚTJA

Élete során minden állat kapcsolatba kerül környezete elemeivel – valamit csinál velük. Rájuk vagy alájuk mászik, elkerüli, felveszi vagy megeszi őket, esetleg párosodik velük vagy elmenekül előlük. Régmúlt geológiai korokban, az evolúció hajnalán meg kellett érintenie őket ahhoz, hogy egyáltalán tudja: ott vannak. Micsoda felmérhetetlen előny volt, amikor valaki először fedezte fel a távérzékelés technikáját: előbb észrevett valamit, mint mielőtt beleütközött volna: a ragadozót, mielőtt az elkapta volna, a táplálékot, amelyet még nem ért el, de már ott volt a közelében. Vajon mi lehetett ez a nagyszerű technika?

A Nap sugárzása nemcsak az élet kémiai fogaskerekeit hajtó energiát biztosítja, de lehetőséget ad egy távérzékelési technika kialakítására is. Fotonok – a világegyetem létező legnagyobb sebességével egyenes vonalban száguldó apró részecskék, melyek összevissza pattognak, száguldoznak a résekben és lyukakban, egyetlen repedést sem kifelejtve, minden szögletet felkutatva – sortüzét árasztja Földünk felszínének minden négyzetmilliméterére. Mivel a fotonok egyenes vonalban és nagyon gyorsan haladnak, mivel egyes anyagok jobban elnyelik vagy visszaverik őket, mint mások, és mivel annyira sokan vannak és mindenhová eljutnak, a fotonok nagyszerű lehetőséget kínálnak egy hihetetlenül pontos és hatékony távérzékelési technika kifejlesztésére. Vajon élt-e ezzel az evolúció? Hárommillió év elteltével könnyű a válasz erre a kérdésre: látjuk e szavakat a könyv lapjain.

Darwin köztudottan éppen a szem példájával vezeti be a „Rendkívül tökéletes és bonyolult szervek”-ről szóló írását:

Elismerem, hogy az a feltételezés, hogy a szem, példa nélküli bonyolultságával, a különböző távolságokhoz alkalmazkodó fókusz távolsággal, a változó mennyiségű fény beengedésével, a szférikus és kromatikus aberráció kiszűrésével, a természetes szelekció útján alakult volna ki, a lehető legnagyobb mértékben hihetetlennek tűnik.

Meglehet, hogy Darwint felesége, Emma kétségei befolyásolták ez esetben. Tizenöt évvel *A fajok eredete* előtt Darwin egy hosszú cikkben vázolta fel a természetes szelekción keresztül történő evolúció elméletét. Azt akarta, hogy halála esetén Emma tegye közzé az írást, ezért elolvastatta vele. Emma széljegyzetei fennmaradtak, és roppant érdekes, hogy éppen az gondolkodtatta el, hogy az emberi szem „*lehetséges*, hogy apró, de minden esetben hasznos változások fokozatos kiválogatódásával alakult ki”. Ezen a helyen Emma következő megjegyzése olvasható: „Óriási feltételezés. / E. D.” Jóval *A fajok eredete* megjelenése után Darwin így vall egy amerikai kollégájának: „A szemtől a mai napig végigfut a hideg a hátamon; ha azonban az apró, fokozatos változások ismert eseteire gondolok, az eszem azt mondja: semmi okom a

borzongásra”. Darwin alkalmankénti kétségei hasonlóak lehettek a 3. fejezet elején idézett fizikuséhoz. Ő azonban a továbbgondolkodásra való ösztönzésként fogta fel azokat, nem pedig várva várt ürügyként, hogy feladhassa elméletét.

Mikor „a” szemről beszélünk, máris hibát követünk el. Szakemberek becslése szerint a szem legalább negyven, de lehet, hogy több mint hatvan egymástól független alkalommal kialakult az állatok birodalma különböző tájain. Egyes szemek a többiekétől gyökeresen eltérő alapelveken épülnek fel. A negyven-hatvan függetlenül kialakult szemtípus körében kilenc különböző alapelvet lehet felismerni – úgy képzelhetjük őket, mint a Valószínűtlenség Hegye egy tömbjéből kiemelkedő kilenc különálló csúcsot –, mint majd bemutatom.

Honnan tudhatjuk egyáltalán, hogy valami két különböző állatcsoportban egymástól függetlenül alakult ki? Pl. honnan tudjuk, hogy a madarak és a denevérek egymástól függetlenül fejlesztették ki szárnyukat? A denevérek valódi szárnya egyedülálló az emlősök világában. Elméletileg lehetséges, hogy az ősi emlősök szárnyasak voltak, de a denevérek kivételével valamennyien elvesztették azokat. Ehhez azonban valószínűtlenül sok független szárnyvesztésnek kellett volna bekövetkeznie; a józan ész és a bizonyítékok egyaránt azt támasztják alá, hogy nem így történt. Az ősi emlősök mellső végtagjaikat nem repülésre, hanem járásra használták, hasonlóan leszármazottjaik többségéhez. Hasonlóképpen indokolhatjuk meg azt is, hogy a szemek sok egymástól független esetben jelentek meg az állatvilágban. Más ismeretekre is támaszkodhatunk, pl. annak részleteire, hogy hogyan fejlődik az embriók szeme. A békáknak és a tintahalaknak egyaránt pompás hólyagszemeik vannak, ám e szemek embrionális fejlődése annyira különböző, hogy biztosait lehetünk benne, hogy egymástól független módon evolválódtak. Ez nem jelenti azt, hogy a békák és tintahalak közös ősenek egyáltalán nem volt szeme. Nem lennének meglepve, ha kiderülne, hogy a ma élő állatok – mintegy egymilliárd évvel ezelőtt élt – közös ősenek volt szeme: talán valamilyen egyszerű, a nappal és éjszaka megkülönböztetésére alkalmas fényérzékeny pigmentfoltja. A szem mint bonyolult képképző szerkezet azonban sok független alkalommal megjelent – néha hasonló szerkezetet öltve, néha gyökeresen eltérő megoldásokkal. A legújabb kutatások feltártak néhány nagyon érdekes új bizonyítékot azzal kapcsolatban, hogy a szem az állatvilág különböző pontjain egymástól függetlenül jött létre. A fejezet végén ezekre visszatérek.

A szemek sokféleségét elemezve gyakran kitérek majd arra, hogy hol helyezkednek el ezek a Valószínűtlenség Hegye lejtőin. Ne feledjük el, hogy ezek mind ma élő állatok, nem pedig az ősök szemei, ám adhatnak némi felvilágosítást arról, hogy az ősöknek milyen szemük lehetett. Azt mindenképpen megmutatják, hogy olyan szemek is működhetek, amelyek véleményünk szerint a Valószínűtlenség Hegye lejtőinek közepén foglalnak helyet. Ez nagyon fontos, mert, mint már említettem, egyetlen állat sem élhet „ütközben” az evolúció ösvényén. Amiről azt hisszük, hogy csak egy állomás egy fejlettebb szem felé vezető úton, az lehet, hogy az adott állat legfontosabb szerve, és nagyon valószínű, hogy az adott körülmények között a legjobb lehetséges szem.



5.1. ábra. Képzeltbeli csiga az emberi látóképességnek megfelelő méretű szemekkel

A nagy felbontású képet alkotó szemek pl. nem megfelelőek egészen kis állatok számára. A csúcsmínőségű szem nem lehet kisebb egy adott – abszolút, tehát nem a testhez viszonyított – méretnél, és itt szó szerint igaz, hogy „a nagyobb jobb”. Egy kis állat számára túl költséges lenne egy nagy, kiváló szem felépítése, és túl nehéz és esetlen lenne azt cipelni. Elég idétlenül nézne ki egy csiga emberi látóképességű szemekkel (5.1. ábra)! A mai adagnál kicsit nagyobb szemeket fejlesztő csigák minden bizonnyal jobban látnak, mint vetélytársaik, ennek azonban az az ára, hogy súlyosabb terhet kell cipelniük, így nem valószínű, hogy nagyobb lenne az esélyük a túlélésre. Az ismert legnagyobb szem egyébként 37 cm átmérőjű – egy tízméteres tapogatókarokat viselő óriáspolip az a leviatán, aki ezt megengedheti magának.

A Valószínűtlenség Hegye hasonlat korlátairól nem megelégedve sétáljunk le a látás lejtőjének aljáig. Itt olyan egyszerű szemeket találunk, amelyek nem is igen érdemlik meg, hogy szemnek nevezzük őket. Helyesebb úgy fogalmazni, hogy a test egész felülete kismértékben fényérzékeny. Igaz ez sok egysejtűre, néhány csalánozóra, tengeri csillagra, piócára és sok más féregre. Ezek az állatok képtelenek a képlátásra – még azt sem tudják eldönteni, merről jön a fény. Csupán a közelükben lévő (erős) fényt képesek (bizonytalanul) érzékelni. Elég bizarnak tűnik, de pl. jó bizonyítékaink vannak arra, hogy hím és nőstény lepkék nemi szerveiben is található fényérzékelő sejtek. Nem képképző szemek, de meg tudják különböztetni a fényt a sötétségtől – ilyen lehetett az a kiindulópont, amiről a szem távoli evolúciós eredetét kutatva beszélünk. Senki sem tudja, mire használhatják ezeket a lepkék, még maga William Eberhard sem, akinek *Nemi szelekció és az állatok nemi szervei* című szórakoztató könyvéből ezt a példát merítettem.

Ha a Valószínűtlenség Hegye előtti síkságot úgy képzeljük el, hogy azt a fényre tökéletesen érzéketlen állatok népesítik be, a tengeri csillagok, piócák (és a lepkék nemi szervei) iránymeghatározásra képtelen fényérző sejtjei alig vannak magasabban a lejtőn, mint ahol a hegyi ösvény kezdődik. Lehet, hogy a teljes fényérzéketlenség síksága mindig kicsi volt. Lehetséges, hogy az élő sejtek eleve hajlamosak arra, hogy valamilyen módon érzékeljék a fényt – így már kevésbé tűnnek furcsának a lepkék nemi szerveinek fényérző sejtjei. A fénysugár fotonok egyenes árama. Ha egy foton

egy színes anyag molekulájával ütközik, fogva maradhat annak szerkezetében, és a molekula egy másik alakot vesz fel (bár ugyanaz a molekula marad). Ennek során energia szabadul fel. A zöld növények és zöld baktériumok ezt az energiát a fotoszintézis folyamatán keresztül szerves molekulák felépítésére használják. Az állatokban ez az energia idegi folyamatot válthat ki, a látás nevű folyamat első lépcsőjét, még az olyan állatok esetében is, amelyeknek nincs szemnek tekinthető szemük. Ezen a kezdetleges fokon festékanyagok széles skálája megteszi. Ilyen festékanyagok mindenfelé előfordulnak, sok egyéb feladatra is alkalmasak, mint a fény felfogása. A Valószínűtlenség Hegyén felfelé vezető első bizonytalan lépések talán e festékmolekulák (pigmentek) lassú tökéletesítését jelentették. Enyhén, folyamatosan emelkedő javuláslejtő – kis lépésekkel könnyen legyőzhető.

Az emelkedő a fényérzékelő sejt: a fotonok festékanyagok segítségével történő felfogására és hatásuk idegi impulzussá alakítására képes sejt (a fotocella élő megfelelője) kialakulása felé vezet. Az ideghártya fotonok felfogására alkalmas sejtjeire – csapok és pálcikák – továbbra is a fényérzékelő sejt elnevezést fogom használni. Valamennyiük közös trükkje: egyre több festékréteget raknak egymásra, hogy elfogják a fotonokat. Ez fontos, mert a fotonok rendkívül hajlamosak arra, hogy egy réteg pigmenten zavartalanul átszaladjanak. Miért érdekes, hogy hány foton jut át, hány marad fogva? Hát nincs belőlük elég? Nincs – ez nagyon fontos pont a szem felépítésének megértésében. A fotonok világában szigorú gazdaságosság uralkodik, olyan, mint az emberi pénzgazdálkodás, és elkerülhetetlen az „adok-kapok”.

Mielőtt belemerülnék ezen izgalmas gazdasági tranzakciók részleteibe, tisztáznunk kell, hogy kétségtelenül vannak olyan időszakok, amikor abszolút mértékkel mérve is kevés a foton. 1986 egy csípős, csillagfényes éjszakáján felébresztettem kétéves Juliet lányomat, és pokrócba csavarva kicipeltem a kertbe, ahol álmos arcocskáját a Halley-üstökös állítólagos iránya felé fordítottam. Egy szót sem értett az egészből, mégis makacsul suttogtam a fülébe az üstökös történetét, és azt, hogy én ugyan egészen biztosan nem látom soha többé, ő azonban hetvennyolc éves korában még egyszer megpillanthatja. Megmagyaráztam neki, hogy azért ébresztettem fel, hogy majd 2062-ben elmondhassa az unokáinak, hogy ő már látta ezt az üstököst, és talán eszébe jut majd rögeszmés, háborodott apja, aki kicipelte őt éjnek idején a kertbe, hogy megmutassa (lehet, hogy éppen a rögeszmés és háborodott szavakat is a fülébe suttogtam, mivel a gyerekek szeretik a számukra ismeretlen szavak zenéjét, ha szép tisztán mondjuk ki őket).

Lehet, hogy a Halley-üstökös néhány fotonja valóban elért Juliet szemébe azon az 1986-os éjszakán, de hogy őszinte legyenek, sokáig kellett gyözködnöm magamat, hogy elhiggyem: valóban láttam az üstököst. Néha úgy tűnt, mintha látnék valami halvány, szürkés derengést a megadott helyen, máskor beleolvadt a semmibe. A baj az volt, hogy az ideghártyámra eső fotonok száma alig haladta meg a nullát.

A fotonok véletlenszerű időközönként érkeznek, akárcsak az esőcseppek. Amikor zuhog az eső, semmi kétségünk nincs fölöle, és azt kívánjuk, bárcsak ne lopták volna el az esernyőnket. Amikor azonban lassan cseperegni kezd, hogyan döntjük el, hogy pontosan melyik pillanatban kezdődött? Az első cseppet észlelve rossz előérzettel, hitetlenkedve felnézünk, míg a második, harmadik csepp meg nem érkezik. Míg ilyen

apránként érkeznek az esőcseppek, egyik társunk azt mondhatja, hogy esik, míg a másik azt, hogy nem. A cseppek hullhatnak olyan ritkán, hogy egy perc is eltelhet aközött, hogy két ember kap egy-egy cseppet. Hogy biztosak legyünk abban, hogy tényleg van fény a fotonoknak elég gyakran kell ideghártyánkra érkezniük. Amikor Juliet és én a Halley-üstökös irányába bámultunk, az üstökös fotonjai talán csak 40 perc/l foton gyakorisággal érték az ideghártyánkat – ez hihetetlenül kevés! Ez azt jelenti, hogy bár egy fényérzékelő sejt felkiáltott: „fény van!”, szomszédainak többsége hallgatott. Csak azért éreztem úgy, hogy van ott valami üstökösszerű, mert agyam fényérzékelő sejtek százainak ítéletét összegezte. Két fényérzékelő sejt több fotont összegyűjt, mint egy Három még többet – így haladunk felfelé a Valószínűtlenség Hegyének oldalán. A fejlett szemek, pl. az emberé, több millió fényérzékelő sejtje olyan sűrűn áll, mint a szőnyeg csomói, és mindegyikük úgy épül fel, hogy a lehető legtöbb fotont tudja befogni.



5.2. ábra. Fotoncsapda: fényérzékelő sejt: emberi ideghártya (retina) egyetlen sejtje (pálca)

Az 5.2. ábrán egy tipikus fejlett fényérzékelő sejt látható, történetesen az ember szeméből, de másoké is nagyon hasonló. A kép közepén tekerő kukactömeg mitokondriumok: sejtek belsejében élő testecskek tömege. Őseik élősködő baktériumok voltak, de azóta nélkülözhetetlenné tették magukat: ők minden sejtünk energiatermelői. A fényérzékelő sejt „összekötő vezetéke”, egy idegsejtnyulvány a kép bal oldalán látható. A katonás rendben felsorakozó négyzetes membránrétegek sora az a hely, ahol a fotonok befogása történik. Minden rétegben megtalálhatók a létfontosságú fotonyűjtő festékanyagok. Ezen a képen kilencvenegy réteget számoltam meg. A pontos szám nem érdekes: minél több, annál jobb a fotonok befogása szempontjából, bár a túl sok réteg kialakulását gátolja az általános költségek növekedése. A lényeg, hogy kilencvenegy membrán hatékonyabban fogja el a fotonokat, mint kilencven, kilencven hatékonyabb, mint nyolcvankilenc, és így tovább, le egészen egyig, ami persze sokkal jobb, mint a semmi. Íme, ilyen példákra gondolok, amikor a Valószínűtlenség Hegyére vezető lankás lejtőről beszélek. Váratlan meredéllyel lenne dolgunk, ha mondjuk 45-nél több membrán nagyon hatékony lenne, míg 45-nél kevesebb semmit sem érne. Ám sem a józan ész, sem semmilyen bizonyíték nem utal efféle hirtelen törésre.

A tintahalak, mint már említettem, a gerincesektől függetlenül azokéhoz nagyon hasonló szemet fejlesztettek ki. Még a fényérzékelő sejtek is hasonlóak. A fő különbség az, hogy a tintahalak szemében a membránrétegek nem lemezköteggént rakódnak egymásra, hanem mint gyűrűk egy üreges cső körül. (Az ehhez hasonló lényegtelen különbségek gyakoriak az evolúció során, hasonlóképpen ahhoz, hogy pl. Angliában a villanykapcsoló az alsó, Amerikában viszont a felső állásban van

bekapcsolva.) Minden fejlett állati fényérzékelő sejt ugyanazon megoldást variálja: egyre növeli a fényérzékelő pigmentekkel megrakott membránrétegek számát, hogy a fotonoknak minél kisebb esélyük legyen érintetlenül áthaladni rajtuk. A Valószínűtlenség Hegye szempontjából az a lényeg, hogy egy újabb réteg csekély mértékben mindig növeli a fotonok befogásának valószínűségét, függetlenül attól, hogy már hány réteg van. Végül, ha már a fotonok túlnyomó többségét sikerül befogni, a csökkenő hozamok törvénye alapján az újabb rétegek többletköltsége akadályozza meg további szaporodásukat.

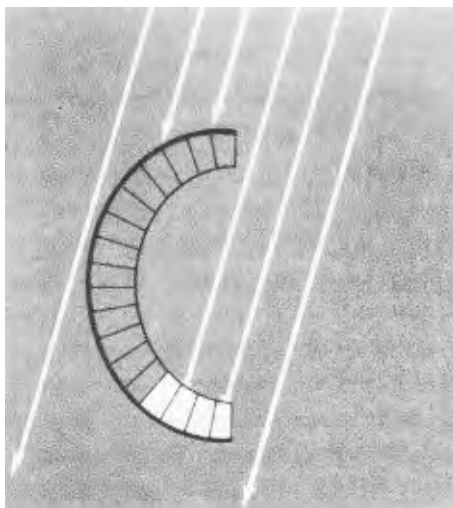
A természetben persze nincs nagy szükség arra, hogy a hetvenhat évenként visszatérő Halley-üstökös kósza fotonjait érzékeljük. Az viszont nagyon hasznos, ha valakinek olyan szeme van, amivel holdfénynél is lát, sőt – ha bagolyról van szó – akár csillagfénynél is. Egy szokásos éjszakán szemünk bármely fényérzékelő sejtje kb. percenként egy fotont fog be – ez vitathatatlanul több, mint az üstökös esetében, de még így is létfontosságú, hogy lehetőleg mind egy szálíg el legyenek fogva. Ha azonban fotonzűkéről beszélünk, nemcsak az éjszakára kell gondolnunk. Ragyogó napfényben a fotonok úgy záporoznak az ideghártyára, mint egy trópusi felhőszakadás esőcseppjei, de egy gond még ekkor is van. A képlátás lényege, hogy az ideghártya különböző részeinek különböző fényintenzitásról kell hírt adniuk; ez azt jelenti, hogy meg kell különböztetni a fotonzivatar sűrűségének helyi különbségeit. A valóság különböző részleteiről érkező fotonok szétválogatása ahhoz vezethet, hogy egyes helyekről éppen olyan kevés foton érkezik, mint éjszaka. Most ezt a „szétválogatást” vesszük szemügyre.

A fényérzékelő sejtek csupán azt mondják meg az állatnak, hogy van-e fény vagy nincs. Az állat meg tudja különböztetni a nappalt az éjszakától, és képes észrevenni egy árnyékot, mely talán egy ragadozót jelez. A fejlődés következő lépése valami egyszerű megoldás a fény vagy mondjuk egy fenyegető árnyék elmozdulása irányának érzékelésére. A legegyszerűbb mód, ha a fényérzékelő sejteket egyik oldalról sötét ernyővel leárnyékoljuk. Enélkül egy átlátszó fényérzékelő sejt minden irányból kap fényt, és nem tudja megmondani, hogy az melyik irányból jött. Egy csupán egyetlen fényérzékelő sejtrel rendelkező állat képes a fény irányába vagy attól elfelé haladni, ha a fényérzékelő sejtnek sötét a háttere, a következő egyszerű módon: jobbra-balra ingatja a fejét, és ha a két oldal eltérő fény mennyiséget érzékel, addig változtatja a menetirányt, míg azok ki nem egyenlítődnek. Bizonyos férgek pontosan így kormányozzák el magukat a fényről.

A fény irányának a fej ingatásával történő észlelése nagyon primitív megoldás, csak a Valószínűtlenség Hegye lábánál megfelelő. Jobb, ha több, különböző irányokba néző fényérzékelő sejtünk van, mindegyik sötét árnyékoló ernyővel. Két sejt fotonzáporának sűrűségét összehasonlítva mondhatunk valamit a fény irányáról. Ha szőnyegnyi fényérzékelő sejtünk van, a legjobb ezt a szőnyeget az árnyékoló ernyővel együtt ívve hajlítani – így az ív különböző pontjain található sejtek rendezetten különböző irányokba fognak nézni. Egy domború ívből végül kialakulhat a rovarok „összetett” szeme, amire később még visszatérek. Egy homorú görbe – olyan, mint egy kehely – a szemek másik fő típusához, az emberre is jellemző hólyagszemhez vezet. A kehely

különböző pontjainak fényérzékelő sejtjei különböző irányokból érkező fényre jönnek ingerületbe – minél több a sejtek száma, annál finomabb lesz a felbontás.

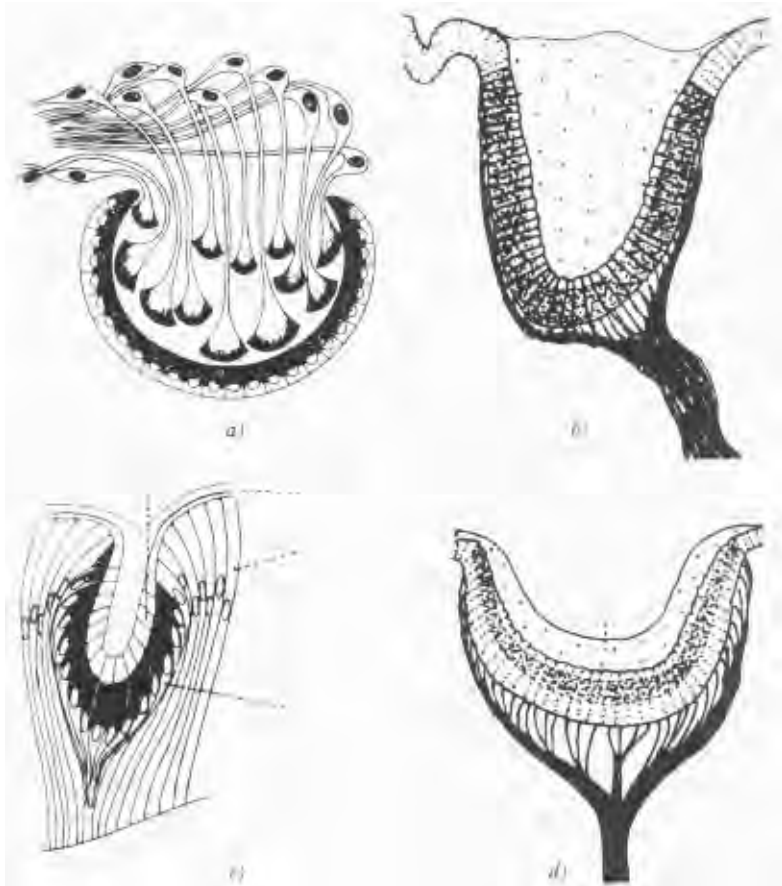
A fénysugarakat (párhuzamos fehér nyilak) megállítja a kehely hátsó részének vastag, fekete ernyője (5.3. ábra). Az ingerületi állapotban, illetve nyugalomban lévő fényérzékelő sejtek nyomon követésével az agy meg tudja állapítani, merről jön a fény. A Valószínűtlenség Hegye megmászása szempontjából az a fontos, hogy folyamatos evolúciós fokozatosság – kényelmes felfelé vezető séta – köti össze a fényérzékelő sejtek „szőnyegével” és „kelyhével” rendelkező állatokat. A kelyhek folyamatosan, lassan válhatnak egyre öblösebbé vagy laposabbá. Minél öblösebb a kehely, annál jobban képes a szem a különböző irányból érkező fénysugarak megkülönböztetésére. Felfelé vezető utunkon nem kell meredek falakra felugráljunk.



5.3. ábra. Az egyszerű kehelszerű a fény irányát képes érzékelni

A kehelyszemek gyakoriak az állatvilágban. Az 5.4. ábra kacsakagyló, soksertéjű gyűrűsféreg, kagyló és egy laposféreg szemét mutatja be. Ezek a szemek valószínűleg egymástól függetlenül nyerték el kehely alakjukat. Különösen szembeötlő ez a laposféreg szeménél, mely fényérzékelő sejtjeit a kelyhen *belül* hordja. Első pillantásra ez elég furcsa elrendezés, hiszen a fénysugaraknak az idegsejtnyúlványok sűrű szövésén kell áthatolniuk, mielőtt elérnék a fényérzékelő sejteket – de ne nagyon élcelődjünk ezen a nyilvánvaló esettelenségen, mivel saját, jóval bonyolultabb szemünkre ugyanez jellemző. Még visszatérek erre, és megmutatom, hogy nem is olyan rossz ötlet ez, mint amilyenek látszik.

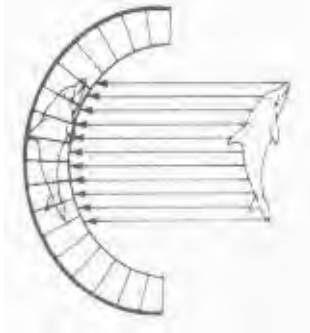
Egy kehelyszem mindenesetre nagyon messze van még attól, hogy képes legyen olyan kiváló képet alkotni, amit mi, sasszemű emberek, megfelelőnek tartunk. A mi szemünk lencseelven nyugvó képalkotása igényel némi magyarázatot. Kezdjük azzal, hogy egy fényérzékelősejt-réteg vagy egy lapos kehely miért nem alkot képet mondjuk egy delfinről, mely világosan kirajzolódik előtte.



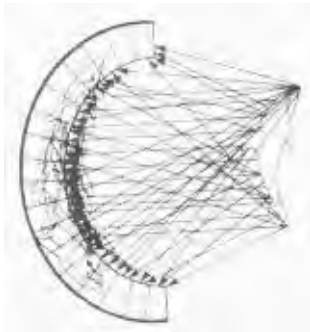
5.4. ábra. Kehelyszemek az állatvilág különböző tartományaiból: *a)* laposféreg; *b)* kétlétű (kagyló); *c)* soksertéjű gyűrűsféreg; *d)* kacsakagyló

Ha a fénysugarak úgy viselkednének, mint az az 5.5. ábrán látható, minden nagyon egyszerű lenne: a delfin képe egyenes állásban jelenne meg a retinán. Sajnos a valóság nem ilyen. Hogy pontosabb legyek, vannak fénysugarait, melyek pontosan úgy viselkednek, mint a képen látható. A baj az, hogy ezeket elnyomja rengeteg másik fénysugár, melyek ugyanakkor ezernyi más irányba szóródnak. A delfin minden pontja az ideghártya minden pontjára küld fénysugarat. És nemcsak a delfin minden pontja – a környezet, a háttér minden pontja is. Az eredményt elképzelhetjük úgy, mint számtalan delfinképet a kehely felszínén, mindenféle lehetséges állásban. A végeredmény természetesen az, hogy semmiféle kép nem látszik, a fény egyenletesen oszlik el az egész felszínen (5.6. ábra).

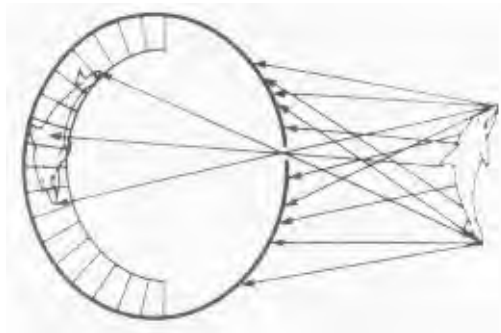
Sikerült meghatározni a baj okát. A szem túl sokat lát: végtelen számú delfint egy helyett. A nyilvánvaló megoldás a csökkentés: egy kivételével minden delfinképmást ki kell selejtezni. Mindegy, hogy melyik marad, de hogyan szabaduljunk meg a többitől?



5.5. ábra. Hogyan *nem* működik a szem – milyen egyszerű is lenne, ha a fénysugarak így viselkednének!



5.6. ábra. A fénysugarak mindenholnan mindenhová eljutnak: kép nem rajzolódik ki. A végtelen számú delfinkép egymásra vetül, semmit sem látunk.



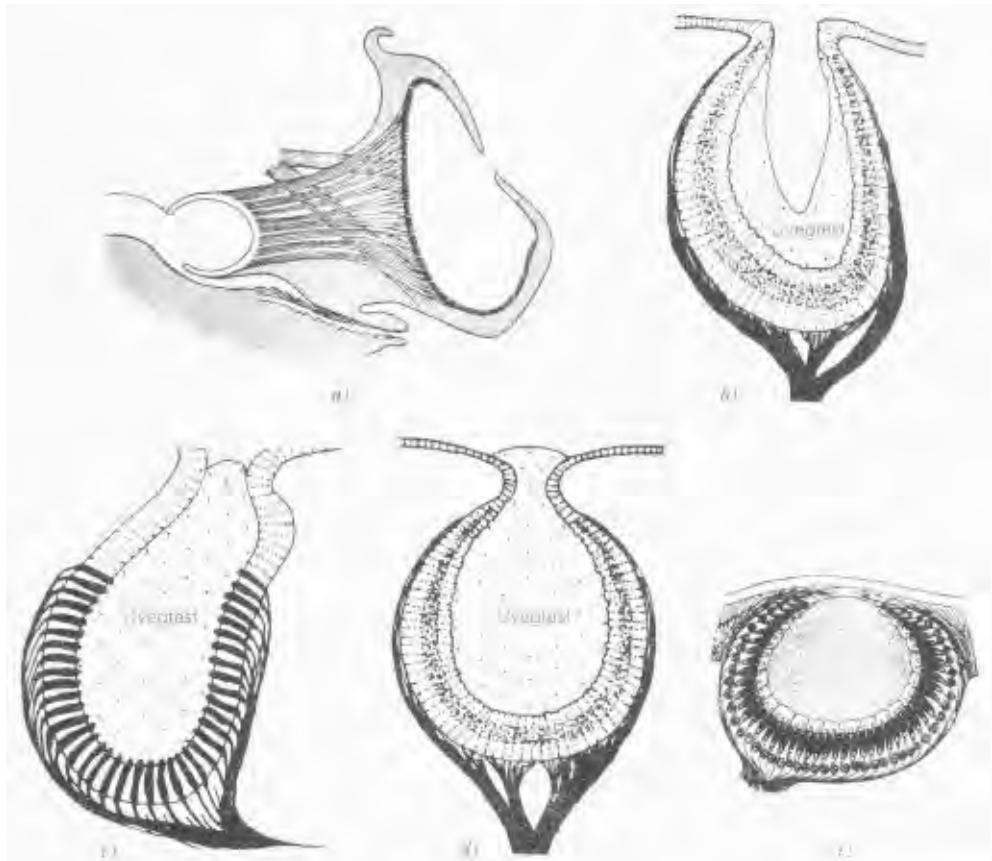
5.7. ábra. A sötétkamraszem alapelve. Az egymást zavaró delfinképek többsége kiszűrődik. Eszményi esetben egy (fordított állású) képet kapunk.

Az egyik megoldás, hogy tovább gyalogolunk felfelé a Valószínűtlenség Hegyén ugyanazon az úton, amelyen a kehelyhez eljutottunk, tovább mélyítjük és zárjuk kelyhünket, míg nyílása tűszúrásnyivá nem szűkül. Ekkor a sugarak túlnyomó többségét kizártuk. A megmaradt kisebbség néhány fordított állású képet rajzol a delfinről (5.7. ábra). Ha a nyílás végletesen kicsi, minden elmosódottság megszűnik, egyetlen éles képet kapunk (hogy egész pontosak legyünk, szélsőségesen kis nyílás

esetén másfajta elmosódottság lép fel, de ezt egyelőre felejtjük el). A túsúrásnyi nyílást tekinthetjük képszűrőnek: a delfinképek riasztó kakofóniájából egyet szűr ki.

A túsúrásnyi nyílású sötétkamraszem csupán szélső esete a kehelyszemnek, mely képes volt a fény irányának meghatározására. Nem sokkal van feljebb a Valószínűtlenség Hegye lejtőjén, nincs közöttük meredek ugrás. A szőnyegtől a sötétkamráig vezető út lassan emelkedik, kényelmesen járható. A „járás” azt jelenti, hogy az átfedő képek egyre fogynak, végül csak egy marad: ez a csúcs.

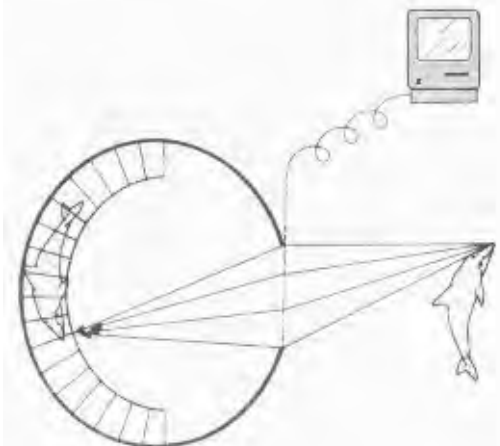
A különböző mértékben „sötétkamra”-szemek az állatvilágban elszórva sokféle előfordulnak. A legtökéletesebb sötétkamraszeme a *Nautilus*nak, ennek a titokzatos puhatestűnek – a kihalt *Ammonites*eknek, távolabbról a polipoknak a rokona, de feltekeredett héja van – van (5.8a ábra). Mások, pl. az 5.8b ábrán látható tengericsiga-szem talán inkább tekinthető mély kehelynek, mint valódi sötétkamrának – szépen illusztrálják a Valószínűtlenség Hegyre vezető ösvény fokozatosságát.



5.8. ábra. Gerinctelenek szemének sorozata, mely bemutatja durva, de használható képek keletkezésnek lehetséges módjait, a) *Nautilus* sötétkamraszeme; b) tengeri csiga; c) kagyló; d) fűreg; e) százlábú fűreg (*Nereis*)

Első pillantásra azt hihetnénk, hogy a sötétkamraszem elég jól ellátja feladatát – feltéve, hogy a lyuk elég kicsi. Ha szinte végtelen kicsire vesszük, szinte tökéletes képet kapunk – gondolhatjuk, hiszen a zavaró képek többségét sikerül kizárni. Ekkor azonban két újabb gond üti fel a fejét. Az egyik a fényelhajlás (diffrakció). Erről most szólnék néhány szót. Ez is elmosódottságot eredményez; oka, hogy a fény hullámtermészete miatt a fénysugarak interferálnak egymással. Minél kisebb a lyuk, ez a hatás annál erősebben elmossa a képet. A kicsi lyuk másik hátránya a már említett „fotonhiány”. Ha a lyuk elég kicsi ahhoz, hogy éles képet adjon, olyan kevés fény jut át rajta, hogy csak akkor látjuk a tárgyat, ha azt elérhetetlenül erős fény világítja meg. Normális megvilágítás esetén túl kevés foton jut be ahhoz, hogy a szem biztos lehessen abban, mit is lát. A kicsi lyuk problémája hasonló a Halley-üstököséhez. Megoldható, ha tágítunk a lyukon – ekkor ismét az egymásra torlódó delfinek zűrzavarával kerülünk szembe. A fotonszám kérdése választ el a Valószínűtlenség Hegye lejtőjén. A sötétkamra-alapelveivel kaphatunk éles, de sötét vagy elég világos, de életlen képet. Jól megvilágított éles képet nem. A közgazdászok efféle kompromisszumproblémák megoldásával keresik kenyerüket. Valóban nincs hát mód arra, hogy éles és jól megvilágított képet kapjunk? Szerencsére van.

Először gondolkozzunk a számítógépek nyelvén. Képzeld el, hogy nagyra tágítjuk a nyílást, hogy jó sok fény bejuthasson. De nem hagyjuk üresen tátongani, hanem beleépítünk egy „varázsablakot”, egy üvegbe ágyazott, számítógéphez kapcsolt bonyolult elektronikus szerkezetet (5.9. ábra). A számítógép-vezérelt ablak a következőképpen működik. A fénysugarak nem haladnak át egyenesen az üvegben, hanem ravasz szögben megtörnek. Ezt a szöveget a számítógép határozza meg oly módon, hogy egy adott pontról – pl. a delfin orráról – érkező fénysugarak mind az ideghártya egyetlen pontjára érkezenek. A képen csak a delfin orráról érkező sugarakat tüntettem fel, de varázsablakunk számítógépe természetesen az összes pontra elvégzi a szükséges számításokat. A delfin farkáról érkező sugarak úgy törnek meg, hogy az ideghártya megfelelő pontján találkozzanak, és így tovább.

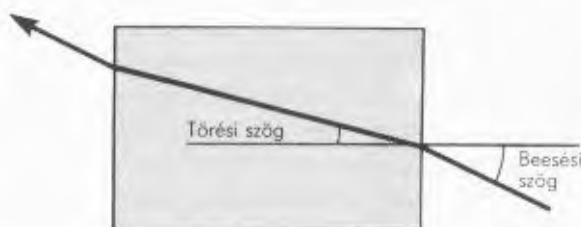


5.9. ábra. Bonyolult és nevenségesen költséges megoldás éles és elég világos kép előállítására: a „számítógép-vezérelt lencse”.

Varázsablakunkkal megvalósítható, hogy a delfin tökéletes képe jelenik meg a retinán. Ez a kép azonban nem sötét, mint azt a kis lyuk miatt várnánk, hiszen sok fénysugár (sok fotonáram) érkezik a delfin orrától, farkától, minden porcikájáról a retina megfelelő pontjára. Varázsablakunk megőrzi a sötétkamra előnyeit, a nagy hátrány nélkül.

Nagyszerű dolog gondolatban eljátszadozni egy ilyen légből kapott varázsablakkal. Beszélni persze könnyebb, mint cselekedni. Gondoljunk csak bele, micsoda bonyolult számításokat végez el varázsablakunk számítógépe. Felfog a való világ milliányi pontjáról érkező milliárdnyi fénysugarat. A delfin minden pontjáról milliányi fénysugár érkezik különböző szögben a varázsablak minden egyes pontjára. A fénysugarak összevissza keresztezik egymást, mint egy nagy tál egyenes spagetti. A varázsablak számítógépének minden egyes sugár esetében ki kell számolnia az annak megfelelő szöget, amennyivel meg kell törni. Hogyan születhet meg egy ilyen varázslatos számítógép, ha nem egy bonyolult csoda folytán? Ez lenne elméletünk Waterlooja, egy kikerülhetetlen sziklafal a Valószínűtlenség Hegyére vezető úton?

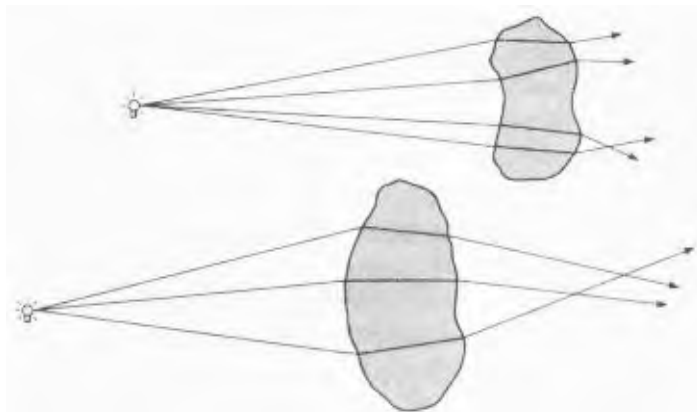
Talán meglepő, de a válasz: nem. Képünk számítógépe csupán a feladat *látszólagos*, egy adott szempontból való bonyolultságát érzékelteti. Ha azonban más oldalról közelítjük meg a kérdést, a válasz nevenségesen egyszerű lesz. Létezik egy boszorkányosan egyszerű megoldás, mely számítógép, magas szintű elektronika és egyéb bonyolult trükkök nélkül is megteszi, amit a varázsablak. Ez az eszköz a lencse. Nincs szükség számítógépre, hiszen egyetlen szöget sem kell kiszámolni. Egy átlátszó anyag görbült felületű darabkája minden gond nélkül, automatikusan helyettesíti a bonyolult törésszögszámítások millióit. Nem sajnállok némi időt a lencsék működésének magyarázatára fordítani bevezetőként ahhoz, hogy megmutassam: a lencse evolúciója nem volt feltétlenül bonyolult.



5.10. ábra. Fénytörés. A jelenség alapelve egy üvegtömbben.

Fizikai tény, hogy a fénysugarak megtörnek, ha átlépnek egy átlátszó közegből egy másikba (5.10. ábra). A törés szöge attól függ, hogy mi a két anyag: a különböző anyagok törésmutatója – fénytörő képességük mértéke – ugyanis eltérő. Ha üvegről és vízről van szó, a fény alig tör meg, mert e két anyag fénytörési állandója közel egyenlő. Ha üvegről és levegőről, a törés szöge nagyobb, mert a levegő fénytörési állandója viszonylag kicsi. Víz és levegő találkozásánál a törésszög akkora, hogy úgy látjuk: meghajlott az evező.

Az 5.10. ábrán egy üvegtömböt látunk; levegő veszi körül. A vastag vonal egy fénysugár, mely belép az üvegbe, megtörik, majd eredeti irányába visszatörve hagyja el azt. Természetesen egy átlátszó anyag tömbjének nem feltétlenül párhuzamosak a lapjai.



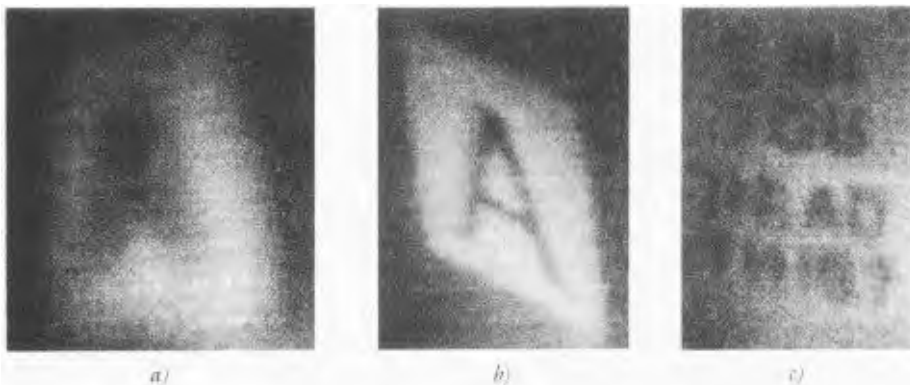
5.11. ábra. A szabálytalan alakú kavicsok összevissza törik a fényt

A tömb felszínének szögétől függően a fénysugár bármilyen irányban kiléphet. Ha a tömb felszíne nem sima, sok fénysugár sok különböző irányban hagyja el azt (5.11. ábra). Ha egyik vagy mindkét oldala domború, varázsablakunkhoz hasonlóan lencseként fog működni. Az átlátszó anyagok nem túl ritkák a természetben. A levegő és a víz – földünk két leggyakoribb anyaga – átlátszó, akárcsak sok folyadék vagy egyes kristályok, ha felületük simára csiszolt – pl. a tengeri hullámverés eredményeképp. Gondoljunk csak egy kristályos anyagú kavicsra, amit a tenger különös alakúra koptatott! Egy fényforrásból érkező sugarak minden lehetséges irányba szóródnak róla, alakjától függően. A kavicsok mindenféle alakúak lehetnek; leggyakrabban minden oldalukon domborúak. Mit tesz egy ilyen kavics egy fényforrásból, pl. lámpából érkező fénysugarakkal?

A kavicsot elhagyó fénysugarak rendszerint összetartanak (konvergálnak). Persze nem szabályosan egy pontban, hogy leképezzék fényforrásunk tökéletes képét, mint „varázsablakunk”. Ez túl sok lenne a jóból. Az összetartás jelensége azonban határozottan megfigyelhető. Bármely kvarckavics, amelyet a véletlen mindkét oldalon domborúra simított, alkalmas „varázsablaknak”, képet alkotó valódi lencsének – e kép nem lesz ugyan éles, de sokkal jobb, mint amit egy sötétkamra alkotni tud. A víz csiszolta kavicsok rendszerint valóban mindkét oldalon domborúak. Ha anyaguk átlátszó, sokuk használható – durva – lencseként.

A kavics csak egy példája a véletlen formálta, tervezetlen tárgyakkal, melyek lencseként működhetnek. Mások is vannak. A levélről lecsüngő vízcsepp – akarja, nem akarja – domború. Minden további emberi tervezés nélkül alkalmas arra, hogy kezdetleges lencseként működjön. A folyékony és kocsonyás anyagok – ha semmilyen erő, pl. a gravitáció nem akadályozza meg – maguktól domború formákat vesznek fel. Ez azt jelenti, hogy gyakran nem viselkedhetnek másként, csak lencseként. Sok esetben áll mindez biológiai anyagokra is. Egy fiatal medúza lencse alakú és gyönyörűen átlátszó. Elég tűrhetően működik lencseként – bár e képességét élete során sohasem

használja, és semmi jele annak, hogy e tulajdonságát a természetes szelekció alakította volna ki.



5.12. ábra. Különböző rögtönzött lyukakon és lencséken keresztül készült képek.
a) egyszerű sötétkamra; b) vízzel töltött laza átlátszó zacskó; c) vízzel töltött borospohár

Átlátszósága azért előnyös, mert így a ragadozók nehezen veszik észre, domború alakjának pedig valószínűleg testszerkezeti okai vannak, semmi köze a lencseszeréhez.

Íme néhány kép, amelyeket különböző egyszerű, tervezetlen lencsékkel készítettem. Az 5.12a ábrának nagy A betűjét egy sötétkamra (egy kartondoboz, melybe kicsiny lyukat fúrtam) vetítette a hátsó falára helyezett kartonra. Aki nem tudja, mit ábrázol, talán meg sem látja, pedig nagyon erős fényforrással „fényképeztem”. A lyuknak kb. egy centiméteresnek kellett volna lennie ahhoz, hogy annyi fény jusson be, hogy az A jól olvasható legyen. A nyílás szűkítésével a kép élesebb lett volna, de akkor a filmen semmi sem látszott volna – ezt a közismert ellentétet már megbeszéljük.

Most nézzük meg, mit jelent egy egyszerű, tervezetlen lencse. Az 5.12b ábrán ugyanazt az A betűt ugyanabban a sötétkamrában „fényképeztem” le, ám a lyuk elé egy vízzel töltött átlátszó zacskót akasztottam. A zacskó nem volt szándékosan lencse alakú, csak vízzel megtöltve domború alakot vett fel. Gyanítom, hogy egy gyűrődések nélküli, szép sima medúza sokkal jobb képet adott volna. Az 5.12c ábra (CAN YOU READ THIS? – el tudod olvasni?) szintén ugyanazzal a sötétkamradobozzal készült, csak egy vízzel töltött borospoharat tettem a lyuk elé. Tény, hogy a borospohár ember alkotta tárgy, de tervezői sosem szánták lencsének: gömbölyű alakja más célt szolgál. Megint arról van szó, hogy egy nem erre a célra tervezett tárgy elég jól működik lencseként.

Persze a letűnt korok állatainak se átlátszó zacskójuk, se borospoharuk nem volt. Nem azt akarom mondani, hogy a szem evolúciója átlátszózacskó- vagy sötétkamraszakaszokon ment volna keresztül. A lényege az átlátszó zacskó példájának az, hogy nem tervezték lencsének – hasonlóan a vízcsepphez, a medúzához vagy a gömbölyű kvarckristályhoz. Csak éppen lencse alakú, valami más, természetes ok miatt.

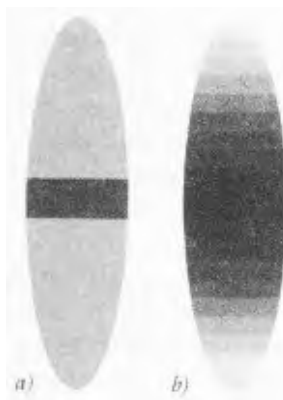
Egyáltalán nem elképzelhetetlen tehát, hogy kezdetleges lencseszerű tárgyak jöjjenek létre spontán módon. Bármilyen régi, félig-meddig átlátszó kocsonyás csomó, feltéve, hogy domború (és számos oka van arra, hogy az legyen), alkalmas arra, hogy egy kicsit javítson egy egyszerű kehelyszem vagy sötétkamraszem teljesítményén. Egy kis javulás pedig már elég arra, hogy egy centiméterrel feljebb kapaszkodjunk a Valószínűtlenség

Hegyének lejtőjén. Milyen lehetett az átmenet? Lapozzunk vissza az 5.8. ábrához. Ismét hangsúlyozni szeretném, hogy ezek ma élő állatok szemei, ezért nem azonosíthatók semmilyen konkrét ősi sorozattal. Az 5.8*b* ábrán (tengeri csiga) látható kehely átlátszó kocsonyával („üvegtest”) bélelt, aminek valószínűleg az a szerepe, hogy a fényérzékelő sejteket védje a szem nyílásán szabadon beáramló tengervíztől. A tisztán védő szerepű üvegtest rendelkezik a lencse egyik szükséges tulajdonságával: átlátszó, de nem domború megfelelő mértékben és nem is elég vastag. Az 5.8. *c*, *d* és *e* ábrákon kétéltű (kagyló), fülcsiga és százlábú fereg szeme látható. Nemcsak a kehelytől a sötétkamra felé vezető átmenetet példázzák, de üvegtestük is egyre vastagszik. A többé-kevésbé alakatlan üvegtestek nagyon elterjedtek az állatvilágban. Lencseként egyikük sem jelent komoly veszélyt Zeiss vagy Nikon urak számára, ám bármilyen, kicsit is domború kocsonyacsomó lényeges javulást jelent egy egyszerű, lencse nélküli sötétkamrához képest.

A legnagyobb különbség egy jó lencse és a fülcsiga üvegteste között az, hogy a lencse akkor működik a legjobban, ha nem érintkezik közvetlenül az ideghártyával, és a köztük lévő rést ki kell töltenie valaminek. Például egy újabb üvegtestnek. A lényeg, hogy a lencse törésmutatója nagyobb legyen, mint a rést kitöltő anyagé. Ez számos úton megvalósítható, egyik sem bonyolult. Csak egyiküket részletezem, azt, amikor a lencse a környező területek anyagából sűrűsödik össze az üvegtest első részén, mint az 5.8*e* ábrán látható.

Először is emlékezzünk arra, hogy minden átlátszó anyagnak van törésmutatója: ezzel jellemezhető, hogy mennyire képes megtörni a fénysugarakat. A lencsét készítő ember rendszerint feltételezi, hogy egy üvegdarab törésmutatója annak minden pontjában egyforma. Ha egy fénysugár belépett a lencsébe és megváltoztatta az irányát, egyenes vonalban fog haladni, míg a másik oldalon ki nem lép. A lencsekészítő művészete abban áll, hogy a lencse felületeit nagyon pontosan megszabott alakúra csiszolja és fényezi, és a különböző lencséből lencserendszereket állít össze.

Különböző fajtájú üvegek bonyolult összeragasztásával előállíthatunk összetett lencsákat, amelyek törésmutatója egyes részeiken más és más. Az 5.13*a* ábrán látható lencse középső része pl. magasabb törésmutatójú üvegből készült. A törésmutató a lencsén belül itt még ugrásszerűen változik. Elméletben semmi ok nincs arra, hogy egy lencse belsejében a törésmutató ne változhatna folytonosan, mint az 5.13*b* ábrán látható.



5.13. ábra. Összetett lencsék két típusa

Folytonosan változó törésmutatójú lencse készítése kemény dió az optikusoknak – azért, mert lencséiket az előbb ismertetett úton készítik üvegből.³ Élő lencsék azonban könnyen lehetnek ilyenek, mert nem egy csapásra készülnek: kis kezdeményből növekszenek, ahogy az állat is növekszik. Folytonosan változó törésmutatójú lencsét találtak halakban, lábasfejűekben és sok más állatban. Az 5.8e ábra figyelmes tanulmányozásával felismerhetjük, hol helyezkedhetnek el a különböző törésmutatójú részletek a szem nyílása mögött.

Térjünk azonban vissza ahhoz, hogy hogyan alakulhatott ki az első lencse az egész szemet kitöltő üvegtestből. A történet alapelvét és annak lehetséges sebességét remekül mutatja be egy svéd biológus pár, Dan Nilsson és Susanne Pelger számítógépes modellje. Elegáns modelljüket némi kerülővel fogom bevezetni. Nem egyszerűen elmondom, hogy mit is csináltak, hanem visszatérek oda, hogy a számítógépes modellek hogyan jutottak el a biomorfoktól a HálóSzövőig, és felteszem a kérdést: hogyan foghatunk hozzá a legügyesebben a szem evolúciója hasonló számítógépes modelljének kidolgozásához? Megmutatom, hogy Nilsson és Pelger ezt az utat járták, bár nem pontosan így fogalmaztak.

Emlékezzünk vissza arra, hogy a biomorfok evolúcióját mesterséges szelekció irányította: a válogatás alapja az emberi ízlés volt. Nem tudtuk életszerű módját kiagyalni annak, hogy hogyan építhetnénk be a modellbe a természetes szelekciót, ezért inkább átváltottunk a pókhálómodellekre. A pókhálók előnye az volt, hogy kétdimenziós síkban működnek, így légyfogási hatékonyságukat közvetlenül elemezhetjük a képernyőn. Ugyanez igaz az őket felépítő pókselyem költségére, így a pókhálómodellek közül a számítógép egy természetesszelekció-modell alapján automatikusan „választhat”. Beláttuk, hogy a pókhálók e téren különlegesen: nem remélhetjük, hogy egykönnyen hasonló modellt állítunk fel a vadászó gepárd hátgerincére vagy a bálna farkuszonyára, mivel egy háromdimenziós szerv hatékonyságának megbecsléséhez szükséges fizikai részletek túl bonyolultak. A szemek azonban e tekintetben hasonlítanak a pókhálókra. Egy két dimenzióban lerajzolt szemmodell hatékonyságát a számítógép képes automatikusan kiszámolni. Nem azt állítom, hogy a szem kétdimenziós szerkezet: ez nem igaz. Csak arról van szó, hogy ha feltételezzük, hogy a szem előlnézetből kerek, akkor háromdimenziós hatékonyságát megbecsülhetjük függőleges metszetének számítógépes képe alapján. A sugarak nyomon követésével és elemzésével a számítógép meghatározhatja, hogy milyen éles kép alkotására képes a szem. Ez a minőségértékelés

³ E rész megírása után egy levelezőtársam, Howard Kleyn (korábban a Cable and Wireless munkatársa) felvilágosított, hogy már az embernek is sikerült, ha nem is folytonosan változó törésmutatójú lencsét, de annak megfelelő folytonosan változó törésmutatójú optikai szálát előállítani. Leírása szerint a következőképpen működik: Végy egy kb. egy méter hosszú, néhány cm átmérőjű, jó minőségű üvegből készült üreges csövet, és forrósítsd fel! Tölts bele finom üvegport! Az üvegpör összeolvad a cső belső falával, így az vastagabbá, a cső ürege szűkebbé válik. Most jön a trükk. Az eljárást többször megismételjük, de egyre növekvő törésmutatójú üvegből készült porral. Mire a cső ürege megtelik, a csőből botot kaptunk, melynek törésmutatója a közepétől kifelé folyamatosan csökken. Ezt a rudat újra felmelegítjük és finom szállá húzzuk ki. A szál törésmutatója ugyanúgy változik a közepétől a széléig, mint az eredeti rúd. Ez gyakorlatilag egy folytonosan változó törésmutatójú lencse, csak nagyon hosszú és vékony. Lencsesajátságát nem képalkotásra használják, hanem arra, hogy optikai vezetőképességét fokozzák: nem engedi szétszóródni a benne futó fénysugarat. A többszálás optikai kábeleket ilyen szálakból gyártják.

egyenértékű azzal, ahogy a HálóSzövő kiszámolja a virtuális legyeket fogdosó virtuális pókháló hatékonyságát.

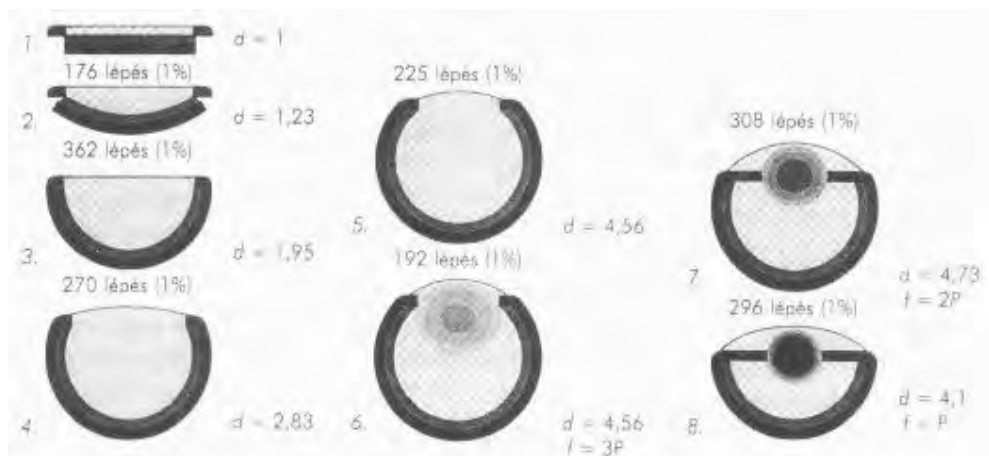
Ahogy a HálóSzövő program hálói mutáns háloutódokat is létrehozhattak, ugyanúgy létrehozhatnak szemmodelljeink mutáns utódszemeket. Minden utódszem alakja nagy vonalakban megegyezik szülőjével, ám néhány ponton apró, véletlenszerű eltérések lehetnek. Természetesen e számítógépes szemek némelyike olyannyira különbözni fog a valódi szemektől, hogy meg sem érdemli ezt a nevet, de ez nem számít. Ennek ellenére szaporodhatnak és optikai minőségük egy számmal – feltehetően elég kis számmal – jellemezhető. A HálóSzövőhöz hasonló módon természetes szelekció segítségével egyre jobb szemeket állíthatunk elő. Egy elég jó szemből kialakíthatunk egy remek szemet. De kiindulhatunk egy nagyon gyenge szemből is – vagy abból, hogy egyáltalán nincs szem.

Nagyon tanulságos lefuttatni egy, a HálóSzövőhöz hasonló programot mint az evolúció egy esetének szimulációját, kezdetleges állapotból kiindulva, és megfigyelni, hová vezet. Különböző futtatások akár különböző végeredményekhez is vezethetnek, mivel lehet, hogy a Valószínűség Hegyének több csúcsa is elérhető. Szemmodellező programunkat is futtathatjuk „evolúciós üzemmódban” – nagyszerű bemutató lesz. Ám végső soron nem fogunk többet tanulni belőle, mint ha módszeresen végignéznénk, hová vezet(nek) a Valószínűség Hegyén felfelé induló ösvény(ek). Egy adott kiindulópontból mindig felfelé, sohasem lefelé vezető ösvény az az út, amelyet a természetes szelekció követhet. Ha evolúciós üzemmódban futtatunk, az evolúció ez(ek)e)t az ösvény(ek)e)t fogja követni. Takarékoskodhatunk tehát a gépidővel, ha módszeresen megkeressük a felfelé vezető ösvényeket és a kiindulópontunkról meghódítható csúcsokat. Fontos ésszben tartanunk, hogy a játékszabályok sohasem engedik meg, hogy lefelé menjünk. Nilsson és Pelger ezt a módszeres keresést vitték véghez – talán érthető, miért vezettem be munkájukat úgy, *mintha* az evolúció szabályait terveznének meg a HálóSzövőhöz hasonlóan.

Akár „természetes szelekció”, akár „a Hegy módszeres felfedezése” üzemmódban dolgozunk, meg kell határoznunk néhány embriológiai szabályt: azokat a szabályokat, amelyek alapján a gének meghatározzák a test fejlődését. Az alak milyen változásait eredményezhetik a mutációk? Milyen nagyok, milyen kicsik lehetnek? A HálóSzövő esetében a mutációk a pókok viselkedésének ismert elemeire hatnak; a biomorfok esetében a növekvő fák ágainak hosszára és szögeire. A szemek esetében Nilsson és Pelger abból indul ki, hogy egy tipikus sötétkamraszemet három fő szövettípus épít fel. Van egy külső, a fény számára rendszerint átjárhatatlan burkolat, van a fényérzékelő sejtek rétege, és van valamilyen átlátszó anyag, mely védőablakként szolgál vagy kitölti a kehely üregét – ha van egyáltalán kehely, hiszen a szimuláció során semmit sem veszünk készen kapottnak. Nilsson és Pelger hegylábi kiindulópontja lapos fekete háttéren ülő sötétszürke fényérzékelő sejtek lapos rétege, rajtuk egy lapos átlátszó szövet (tört fehér). Feltételezésük szerint a mutáció kis százalékos változást okoz valaminek a méretében, pl. az átlátszó réteg vastagságában vagy annak egy része törésmutatójában. Kérdésük valójában az, hogy hová juthatunk el a hegyen, ha egy adott alaptáborból mindig felfelé megyünk. A felfelé haladás mutálást jelent, egyszerre mindig egy kis lépést; csak azokat a mutációkat fogadjuk el, melyek javítják az optikai teljesítményt.

Nézzük meg tehát, hová juthatunk! Nagy örömeinkre egy lankás ösvény felvezet a semmilyen szemtől a közismert, lencsével felszerelt halszemig. A lencse nem egyöntetű, mint egy ember alkotta lencse, hanem folyamatosan változó törésmutatójú, olyan, mint amilyen az 5.13b ábrán látható. Folytonosan változó törésmutatóját a képen különböző árnyalatú szürkével jeleztük. A törésmutató folyamatos, pontról pontra történő változásával „kristályosodott ki” az üvegtestből. Semmiféle mesteri csiszolás! Nilsson és Pelger nem programoztak be szimulált üvegtestükbe semmiféle lencsekezdeményt, mely arra vár, hogy növekedésnek indulhasson. Csak azt engedték meg, hogy az átlátszó anyag apró részleteinek törésmutatója genetikailag megszabott módon változhasson. Minden darabka törésmutatója egymástól függetlenül, tetszőleges irányban változhatott. A törésmutató-változatok végtelen számú mintázata *kialakulhatott* az üvegtesten belül. Azért jutottunk végül „lencse alakú” lencséhez, mert folyamatosan felfelé haladtunk, ami annyit tesz, hogy minden nemzedékben a legjobb látóképességű szem szaporodhatott tovább.

Nilsson és Pelger célja nem csak az volt, hogy bizonyítsák: létezik sima átmenet a lapos nem szemtől a jó halszemig. Meg tudták becsülni azt az időt is, ami ahhoz szükséges, hogy a semmiből szem alakuljon ki. Modelljüknek 1829 lépésre volt szüksége, ha minden lépésnél valaminek a nagysága 1%-ot változhatott. Az 1% nem bűvös szám. Ha 0,005%-nak vesszük, 363 992 lépésre lenne szükség. A szerzőpárnak a változás teljes mennyiségét nem mesterséges, életszerű egységekben kellett megadnia, vagyis a genetikai változás egységeiben. Ennek érdekében kellett tenni néhány feltételezést, pl. a szelekció erősségét illetően. Feltételezték, hogy 101, a javított változatot hordozó állat mellett 100 hagyományos maradt életben. Láthatjuk, hogy a józan ész szerint ez nagyon alacsony hatékonyságú szelekció: majdnem ugyanolyan eséllyel marad fenn az állat az újítás nélkül, mint azzal. Szándékosan választottak ilyen alacsony, „konzervatív” vagy „pesszimista” értéket, hogy az evolúció sebességére adott becslésük inkább túl alacsony legyen. Két másik feltételezésre is szükségük volt, az „örökölhetőség”-re (heritabilitásra) és a „variációs együttható”-ra.



5.14. ábra. Nilsson és Pelger halszemhez vezető elméleti evolúciós sora. Az egyes állapotok közti számok azt jelentik, hogy – önkényesen – feltételeztük, hogy minden lépésben 1%-os változás

történik valaminek a méretében. A szövegben megtalálható, hogy e mesterséges számok hogyan válhatnak át evolúciós nemzedékekké.

A variációs együtttható annak a mértéke, hogy a populáció mennyire változatos. A természetes szelekció alapanyaga a változatosság, Nilsson és Pelger itt is szándékosan pesszimistán alacsony értéket vettek. Az örökölhetőség azt fejezi ki, hogy egy populáció változatosságából mennyi öröklött. Ha értéke alacsony, az azt jelenti, hogy a populáció változatossága elsősorban környezeti tényezőknek köszönhető; a természetes szelekció hiába „választja ki”, hogy ki éljen és ki pusztuljon el, nem sok hatással lesz az evolúcióra. Ha az örökölhetőség magas, a szelekció nagymértékben befolyásolja a következő nemzedéket, mivel az egyedek túlélése gyakorlatilag a gének túlélésének felel meg. Az örökölhetőség gyakran 50% felettinek adódik, ezért Nilsson és Pelger 50%-os értéke pesszimistának tekinthető. Utolsó pesszimista feltételezésük az, hogy egy nemzedékben csak a szem egy része változhat.

A „pesszimista” a fenti esetekben mindenhol azt jelenti, hogy végső becslésünk az evolúció idejére valószínűleg túl nagy lesz. A túlbecslést a következő okból nevezzük pesszimistának, nem pedig optimistának. Az evolúció erejében kételkedők, mint pl. Emma Darwin, magától értődően ahhoz az állásponthoz vonzódnak, hogy ha egy olyan szélsőségesen bonyolult és sok részletből felépülő szerv, mint a szem, egyáltalán létrejöhett evolúció útján, ahhoz elképzelhetetlenül hosszú időre volt szükség. Nilsson és Pelger végeredménye meglepően rövid: azt kapták, hogy egy lencsével felszerelt jó halszem kialakulásához 364 000 nemzedék szükséges. Ha optimistább (és ez nagy valószínűséggel „realisabbat” is jelent) feltevésekből indulnak ki, az eredmény még kisebb lenne.

Hány év 364 000 nemzedék? Ez természetesen attól függ, hogy a nemzedékek milyen időközönként követik egymást. A szóban forgó állatok kis testű tengeri lények: férgek, puhatestűek és kis halak. Nemzedékeik többnyire évente vagy még gyorsabban váltják egymást. Nilsson és Pelger végső következtetése tehát az, hogy a lencsével felszerelt szem kevesebb, mint félmillió év alatt létrejöhett. Geológiai mércével mérve ez bizony nagyon-nagyon rövid idő. Olyan rövid, hogy az ilyen korú üledékrétegek tükrében egyetlen pillanatnak tűnik. Az az ellenvetés tehát, hogy nem volt elég idő arra, hogy a szem evolúció útján kifejlődjön, nem egyszerűen tévedés: drámai, döntő, gyalázatos mértékű ostobaság.

Persze egy tökéletesen kifejlett szemnek van néhány olyan részlete, mellyel Nilsson és Pelger nem foglalkoztak, és lehetséges (bár ők nem így gondolják), hogy ezek evolúciója hosszú időt vesz igénybe. Ilyen pl. a fényérzékelő sejtek kialakulása, amit adottnak vettek evolúciós modelljük beindítása előtt, vagy a modern szemek több sajátossága, pl. a fókuszávolság változtatását (akkomodáció) biztosító rendszer, a pupilla tágasságának változtatása és a szem mozgatása. Az agyban is ki kellett alakulnia a szem szolgáltatva információkat feldolgozó rendszernek. A szemmozgatás nemcsak a nyilvánvaló okból fontos, hanem sokkal inkább azért, hogy a test elmozdulása ellenére is folyamatosan nézhessünk valamit. A madarak nyakizmaik segítségével tartják egész fejüket egy helyben, függetlenül a test mozgásától. Az ezt biztosító fejlett rendszerek igen bonyolult agyi folyamatokon alapulnak. Könnyű azonban belátni, hogy egy kezdetleges, tökéletlen alkalmazkodás is jobb volt, mint a

semmi, így nem nehéz képzeletben összerakni az ősi alakok fokozati sorát, mely kijelöli a Valószínűtlenség Hegyére felvezető lankás ösvényt.

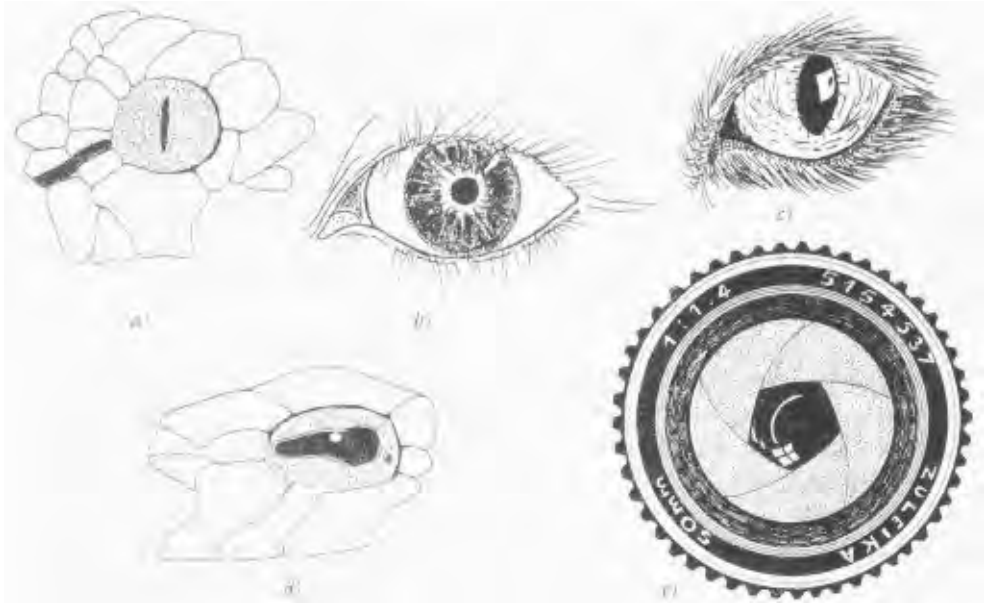
A nagyon távoli tárgyakról érkező fénysugarak fókuszálásához gyengébb lencsére van szükség, mint a közeli tárgyakról érkezőkéhez. Távoli és közeli tárgyak éles látása luxus; e nélkül is lehet élni, ám a természetben minden a túlélési esélyt javító apróság számít, ezért nem meglepő, hogy különböző állatok különbözőképpen oldják meg a fókusz-távolság szabályozását. Az emlősök izmokkal változtatják csekély mértékben a lencse alakját, akár csak a madarak és a legtöbb hüllő. A kaméleonok, kígyók, halak és békák szeme úgy működik, mint a fényképezőgép: előre-hátra mozgatják szemlencséjüket. A kisebb szemű állatok nem foglalkoznak ezzel, szemük olyan, mint egy nagyon egyszerű fényképezőgép: nem tökéletesen, de elég jól működik minden távolságra. Sajnos ahogy öregszünk, a mi szemünk is egyre inkább ilyen lesz, és gyakran bifokális szemüvegre van szükségünk ahhoz, hogy közelre és távolra is jól lássunk.

Nem nehéz elképzelni a fókusz-távolságot változtató akkomodációs mechanizmus fokozatos kialakulását. A vízzel töltött átlátszó zacskóval kísérletezve egykettőre észrevettem, hogy a fókusz-távolság változik, ha ujjammal megbököm a zacskót. Anélkül, hogy tudatában lettem volna a zsák alakjának, arra rá sem nézve, csak a kép minőségére figyelve addig bökdöstem és gyömmöszöltem összevissza, míg az élesség nem javult. Az üvegtest közelében lévő bármely izom bármilyen más célú összehúzódása véletlenül javíthatja a lencse fókuszát. Ez a fokozatos javulás széles felfelé vezető útját nyitja meg, melynek végpontja az ember vagy kaméleon típusú fókusz-távolság-változtatás lehet.

A pupilla – az a nyílás, ahol a fény bejut a szembe – méretének változtatása talán egy kicsit bonyolultabb, de nem sokkal. Hasonló okból van rá szükség, mint a fényképezőgépnél. A film/a fényérzékelő sejtek érzékenységtől függően a fény lehet túl sok (vakító) vagy túl kevés. Ráadásul minél kisebb a nyílás, annál jobb a mélységélesség – az egy időben fókuszban lévő terület. Egy bonyolult szem vagy fényképezőgép beépített fénymérővel rendelkezik, mely automatikusan zár a nyíláson, ha kisüt a nap, és tágtítja azt, ha elbújik. Az emberi szem pupillája igen bonyolult automatikával van felszerelve – bármely japán mikrotechnológiai mérnök büszke lenne rá!

Ismét az a nehéz, hogy megtaláljuk e fejlett mechanizmus eredetét a Valószínűtlenség Hegyének lábánál. A pupillát kereknek gondoljuk, pedig nem feltétlenül kell kereknek lennie. A birkák és szarvasmarhák pupillája hosszúkás, vízszintes rombusz alakú. Ilyen a polipoké és egyes kígyóké is, más kígyóké viszont függőleges hasítékú. A macskák pupillája kerektől keskeny, függőleges résig változhat.

S ő tudja-e, hogy letűnnek
utódai majd – a hold
fogy is, dagad is, s valamennyi
holdkórosan itt bolyong.
Suhan Musimacska, jelentős
magányos alak: lopódzva lép,
s a változó holdra emeli
két változó szemét.



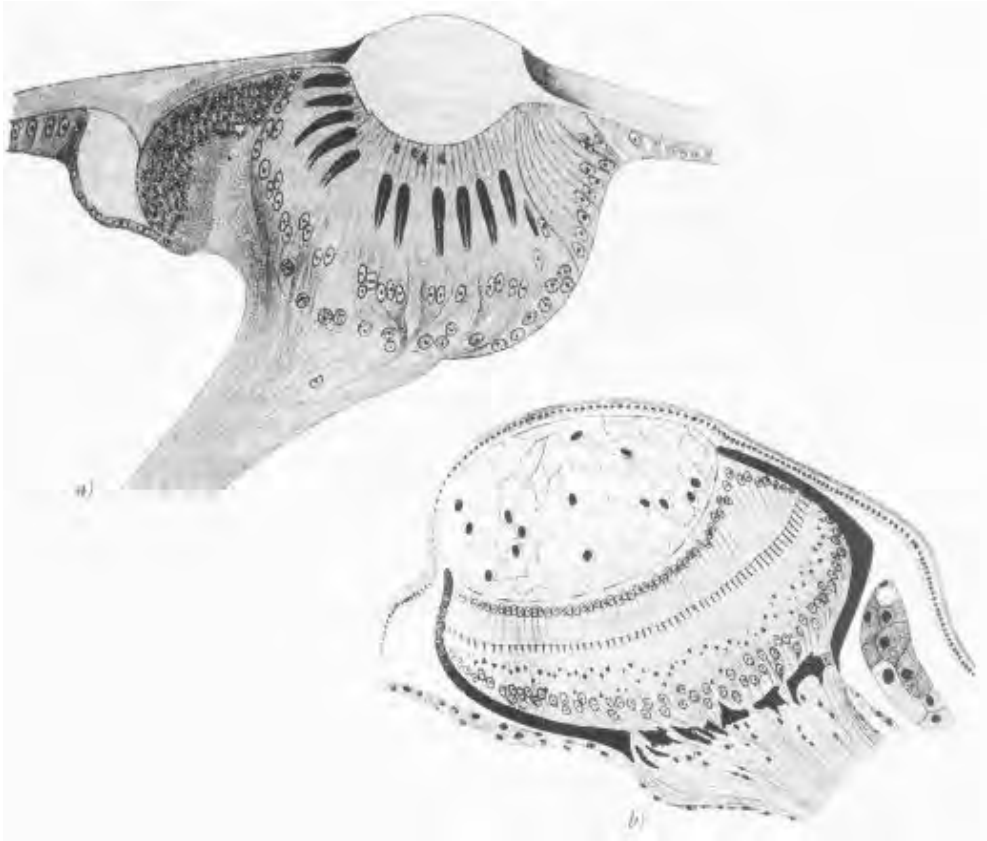
5.15. ábra. Különböző pupillák (a fényképezőgépe is). A pupilla alakja nem fontos, ezért lehet ilyen változatos, *a)* kockás pítón; *b)* ember; *c)* macska; *d)* hegyesfejű fakúszó kígyó; *e)* fényképezőgép

Még drága fényképezőgépek „pupillája” is inkább sokszög, mint szabályos kör alakú. Csak az számít, hogy szabályozza a bejutó fény mennyiségét. Ha ezt megértettük, már nem gond a változtatható pupilla eredete. Számos lankás ösvényen elindulhatunk felfelé a Valószínűtlenség Hegyén. A pupilla már csak annyira megoldhatatlan kérdése az evolúciónak, mint a végbél záróizma. A fejlődés talán legfontosabb területe a pupilla reakcióképességének gyorsítása. Ha már vannak idegek, működésük gyorsítása csupán könnyed suhanás felfelé. Az emberi pupilla gyorsan reagál – erről meggyőződhetünk, ha tükörben figyeljük saját pupillánkat, miközben egy zseblámpával hirtelen a szemünkbe villantuk. (Még látványosabb a kísérlet, ha az egyik szembe villantunk és a másikat figyeljük – a két pupilla ugyanis egyszerre működik.)

Nilsson és Pelger modelljében, mint láttuk, folytonosan változó törésmutatójú lencse alakult ki, ami különbözik az ember készített lencsék többségétől, de hasonlít a halak, tintahalak és más víz alatti lények lencseszeméhez. A lencse úgy alakult ki, hogy a korábban egyöntetű átlátszó kocsonyában helyenként magasabb törésmutatójú részek jöttek létre.

Nem minden lencse jön úgy létre, hogy egy kocsonyás tömegből sűrűsödik ki. Az 5.16. ábra két rovarszemet mutat, melyek lencséje teljesen más úton alakult ki. Mindkettő ún. egyszerű szem – nem tévesztendő össze az összetett szemekkel, melyekre hamarosan rátérek. Az első példán, a levéldarázslárva szemei esetében a lencse a szaruhártya – a külső átlátszó réteg – megvastagodásaként alakult ki.

⁴ Görgey Gábor fordítása. (W. B. Yeats: Versek. Európa, Bp., 1960)



5.16. ábra. Rovarszemlencsék kialakulásának két útja. *a)* levéldarázslárva; *b)* kérész

A második esetben, a kérész esetében a szaruhártya nem vastagszik meg, a lencse szintelen, átlátszó sejtek tömegeként alakul ld. A lencse kialakulásának e két útja ugyanúgy vezet fel a Valószínűtlenség Hegyére, mint a féreg üvegtestén keresztül vezető, amelyet korábban ismertünk meg. Úgy tűnik, hogy a szemlencsék – a szemekhez hasonlóan – többször is létrejöttek egymástól függetlenül. A Valószínűtlenség Hegyének sok csúcsa-dombja van.

Az ideghártyák változatos alakja is sokféle eredetükről árulkodik. Az eddig ábrázolt szemek egy kivétellel úgy épültek fel, hogy a fényérzékelő sejtek az őket az aggyal összekötő ideg előtt helyezkedtek el. Ez a dolgok ésszerűnek tűnő, ám nem kizárólagos rendje. Az 5.4a ábra laposférgé látszólag az összekötő ideg rossz oldalára tette fényérzékelő sejtjeit. Ilyen a mi emlős szemünk is: a fényérzékelő sejtek hátrafelé, a fényvel ellentétes irányban állnak. Ez nem olyan buta dolog, mint amilyennek elsőre tűnik. Mivel nagyon kicsi és átlátszó sejtekről van szó, nem túl érdekes, merre néznek: a fotonok többsége egyenesen keresztülhatol rajtuk, és egyenesen belerohan a rájuk váró, pigmentekkel megrakott membránredőkbe. Az egyetlen említésre érdemes gond az emlősök hátrafelé tekintő fényérzékelő sejtjeivel az, hogy az őket az aggyal összekötő idegek rossz irányban indulnak el – a fény, nem pedig az agy irányába. Az

ideghártya felszínén futnak egy adott pont, az ún. vakfolt felé. Itt keresztülhatolnak az ideghártyán és a látóideget alkotják – ezért „vak” a retina ezen a ponton. Bár e ponton valamennyien vakok vagyunk, ritkán veszünk róla tudomást, mert agyunk elég okos ahhoz, hogy rekonstruálja a képek hiányzó részletét. Csak akkor észleljük a vakfoltot, ha valamilyen apró tárgy – melynek létéről előzetesen más úton meggyőződünk – képe mozgása közben rávetődik: ekkor a kép eltűnik, mint egy kialvó láng, és helyét a háttér általános színe foglalja el.

Nem sok jelentősége van tehát annak, hogy az ideghártyánk hátrafelé néz. Kijelenthetjük, hogy – feltéve, hogy minden más tényező változatlan – egy kicsit jobb lenne, ha fordítva állna. Ez ismét jó példa arra a tényre, hogy a Valószínűtlenség Hegye magas csúcsait mély völgyek választják el egymástól. Ha egy jó szem hátrafelé néző ideghártyával kezdett el fejlődni, csak ennek az alapfelépítésnek a továbbfejlesztésével javulhat. A teljesen más szerkezetre való átállás ereszkedést jelentene – nemcsak egy kicsit, hanem egy mély szakadékba, ezt pedig nem engedi a természetes szelekció. A gerincesek ideghártyája azért néz arra, amerre, mert így alakul ki már embrionális korban, ennek oka pedig valószínűleg a régmúlt ősökre vezethető vissza. Sok gerinctelen szeme ettől eltérő módon fejlődik, ezért ideghártyájuk a „jó” irányba tekint.

Elteltekintve furcsa fordított állásuktól, a gerinces állatok ideghártyája a Valószínűtlenség Hegye legmagasabb csúcsai közül való. Az emberi retinát mintegy 160 000, különböző típusú fényérzékeny sejt építi fel. A legalapvetőbb felosztás szerint megkülönböztetünk pálcikákat (melyek csekély fény mennyiség mellett kevésbé pontos fekete-fehér látást biztosítanak) és csapokat (erős fényben színlátásra specializálódtak). E szöveg olvasásakor csak a csapsejtjeink működnek. Ha Juliet látta volna a Halley-üstököst, a pálcikáival látta volna. A csapok egy kis, központi területen, a sárgafoltban sűrűsödnek, ahol nincsenek pálcikák. Olvasni a sárgafolttal olvasunk. Ezért van az, hogy ha valami nagyon halvány dolgot szeretnénk meglátni (pl. a Halley-üstököst), nem egyenesen rá kell néznünk, hanem kicsit mellé, hogy kevéske fénye ne a sárgafoltra essen. A fényérzékeny sejtek száma és típusokra különülése semmi újabb nehézséget nem jelent a Valószínűtlenség Hegye megmászása szempontjából. Nyilvánvaló, hogy mindkét javulás megoldható kényelmes felfelé sétával.

A nagy ideghártya többet lát, mint a kicsi. Aki több fényérzékeny sejtet állít munkába, többet lát. Ennek azonban, mint mindennek, ára van. Gondoljunk csak az 5.1. ábra groteszk csigájára! Van azonban egy lehetőség arra, hogy egy kicsiny állat gyakorlatilag nagyobb ideghártya előnyeit élvezze, mint amiért megfizetett. Michael Land, a Sussex Egyetem professzora – aki irigylésre méltó ismeretanyagot halmozott fel a szemek világát érintő különleges felfedezésekből; tudásom nagy részét én is neki köszönhetem – egy nagyszerű példát hoz az ugrópókok köréből.⁵ Egyetlen póknak sincs összetett szeme; az ugrópókok lencseszeme a gazdaságosság egyik figyelemre méltó csúcspontját képviseli (5.17. ábra). Land felfedezte, hogy ideghártyájuk rendkívüli.

⁵ Az ugrópókok elbűvölő állatkák. Félrehajtott fejjel, szinte emberi bájjal néznek a szemünkbe, zsákmányukat macskaként cserkészik be, majd figyelmeztetés nélkül, kirobbanó vágtaival lerohanják. A „kirobbanó”-t többé-kevésbé szó szerint is érthetjük, mivel úgy ugranak, hogy egyidejűleg mind a nyolc lábukba testnedvet pumpálnak – kicsit hasonlóképpen ahhoz, ahogy az emberek (egyik fele) himesszőjét felmereszti; annyi a különbség, hogy a „láb erekcója” nem fokozatos, hanem hirtelen.



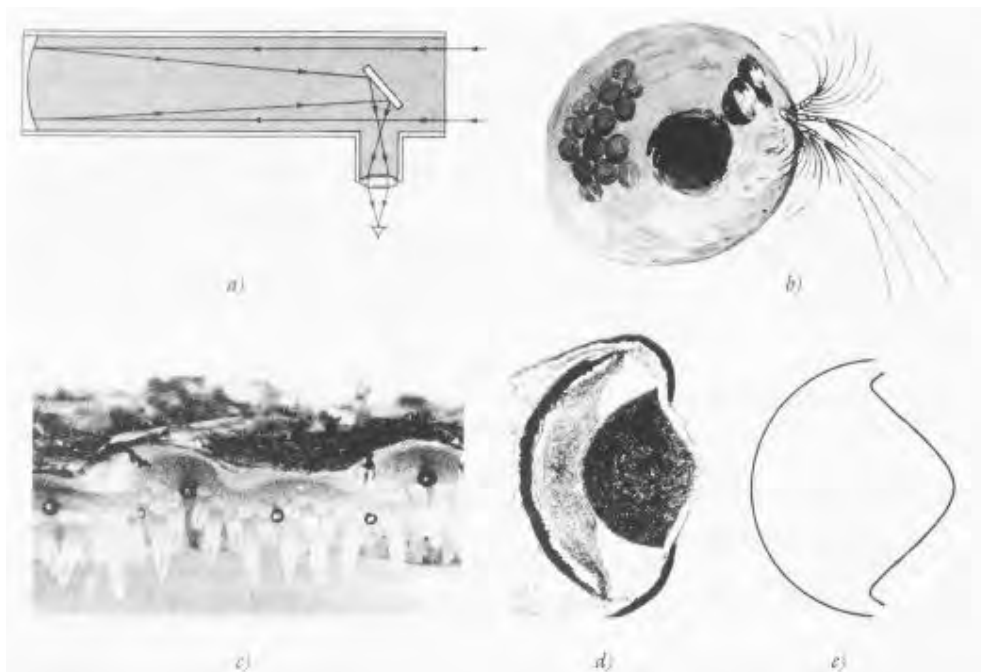
5.17. ábra. Ugrópók

Nem széles képernyő, melyre teljes kép vetődhet, hanem hosszú, függőleges szalag, mely túl keskeny ahhoz, hogy egy tisztességes kép megjelenhessen rajta. A pók azonban zseniális ötlettel küszöböli ki ezt a hiányosságot: szemét módszeresen ide-oda mozgatva pásztázza azt a területet, ahová a kép vetülhet. Működés szempontjából tehát retinája jóval nagyobb, mint fizikai valóságában – hasonlóképpen a lasszópókhoz, mely egyetlen fonal forgatásával fogóképességét kb. egy normál háló területére terjeszti ki. Ha az ugrópók valami izgalmas dologra bukkan – pl. egy mozgó légyre vagy egy másik ugrópókra –, pásztázó mozdulatait arra összpontosítja. Íme a dinamikus sárgafolt! Ötletes megoldásával az ugrópókok lencsével felszerelt szeme a Valószínűtlenség Hegye e tájának tekintélyes helyi csúcsát képviseli.

A szemlencsét úgy vezettem be, mint a sötétkamraszem hiányosságainak remekbe szabott kiküszöbölőjét. Nem ez az egyetlen ilyen megoldás. A görbe tükrös más elven működik, mint a lencse, de ugyanarra a feladatra kínál újabb megoldást: hogyan gyűjtünk össze a kép egy pontjába több, a tárgy egy pontjából érkező fénysugarat? Bizonyos szempontból ez a megoldás gazdaságosabb lehet, mint a lencse: Földünk legnagyobb optikai távcsövei mind tükrös távcsövek (5.18a ábra). A tükrös távcső kis hibája, hogy a kép a tükrös elöl, a beérkező fénysugarak útjában alakul ki. A tükrös távcsövekben ezért rendszerint találunk egy kisebb tükröt is, mely a képet a fókuszról oldalra vetíti a szem vagy felvevőgép számára. A kis tükrös nincs útban, legalábbis nem rontja túlzottan a képalkotást. A kis tükrös fókuszált képét nem látjuk, csak kissé csökken a távcső hátsó részén lévő nagy tükrösre eljutó fénysugarak mennyisége.

A homorú tükrös tehát egy fontos feladat elméletileg lehetséges fizikai megoldása. Vannak-e az állatvilágban homorú tükrösrel működő szemek? Az első adat ezen a területen idős oxfordi professzoromtól, Sir Alister Hardytól származik, egy figyelmet érdemlő mélytengeri rákról (*Gigantocypris*, 5.18b ábra) készült festményéhez fűzött megjegyzésében. A csillagászok a távoli csillagokról érkező kevéske fényt a csillagvizsgálók – pl. a Wilson-hegyi vagy a Palomar-hegyi – hatalmas homorú tükrökkel fogják fel. Kézenfekvő feltételezni, hogy a *Gigantocypris* is ugyanezt teszi az óceán mélységébe behatoló néhány fotonnal, ám Michael Land legújabb kutatásai kizárják a részletekbe menő hasonlóság lehetőségét. Ma még nem egészen világos, hogyan is lát a *Gigantocypris*.

Van azonban egy másik állat, mely egészen biztos, hogy komoly homorú tükrös segítségével lát, igaz, szemlencsége is besegít. Ezt a felfedezést is az állati szemkutatás Midasz királyának, Michael Landnek köszönhetjük. Ez az állat a fésűkagyló.



5.18. ábra. Képkalkotás homorú tükörrel, *a)* tükrös teleszkóp; *b)* *Gigantocypris*, nagy planktonikus rák (Sir Alister Hardy festménye); *c)* fészükagyló szeme kikukucsál a héj résén; *d)* fészükagyló szemének keresztmetszete; *e)* descartes-i ovális

Az 5.18c ábra e puhatestűek részének (két héjhullám szélességű) kis szakaszáról készült nagyított kép. A héj és a tapogatók között egy sorban apró szemek tucatjai ülnek. Minden szem alkot képet egy homorú tükör segítségével, mely messze az ideghártya mögött fekszik. Ennek a tükörnek köszönhető, hogy a szemecskék ragyogó kék vagy zöld gyöngyszemekként izzanak. Metszetben az 5.18d ábrán láthatók. Mint említettem, itt tükröt és lencsét is találunk – erre majd még visszatérek. Az ideghártya a lencse és a homorú tükör közötti szürke terület. A tükör az éles képet a retina szorosan a lencse felszínéhez simuló részére vetíti. Ez a kép fordított állású, a tükrőről visszaverődő fénysugarak alkotják.

Miért van szükség egyáltalán a lencsére? A gömbtükrök által alkotott kép jellegzetesen torzult, ezt nevezzük gömbi eltérésnek (szférikus aberráció). Schmidt, egy neves tükröstávcső-tervező ezt lencse és tükör ravasz kombinációjával küszöböli ki. A fészükagyló szeme, úgy tűnik, más utat követ. A gömbi eltérést elméletileg egy különleges lencsével is kiküszöbölhetjük, melynek alakja ún. „descartes-i ovális”. Az 5.18e ábra egy elméletileg tökéletes descartes-i ovális ábrázol. Most vessünk újra egy pillantást a fészükagyló valódi szemlencséjének profiljára (5.18d ábra). A megdöbbentő hasonlóság alapján Land professzor arra a következtetésre jut, hogy ez a lencse a fő képkalkotó eszköz, a tükör gömbi eltérésének kiküszöbölésére szolgál.

Hogyan jelenhetett meg a homorú tükörrel működő szem a Valószínűtlenség Hegye lábánál? Van némi alapunk a találgatáshoz. Az ideghártya mögött gyakran találunk

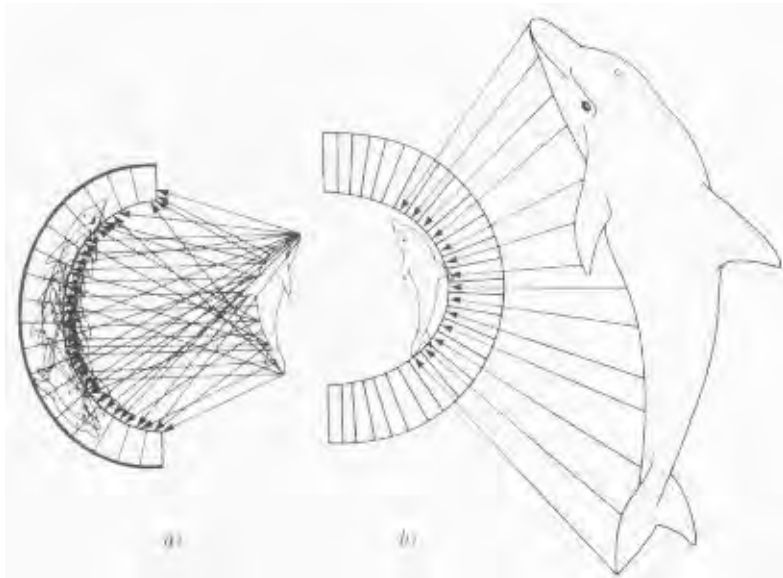
fényvisszaverő réteget az állatvilágban, bár szerepe nem képalkotás, mint a fésűkagylónál. Ha egy erős fényű zseblámpával kimegyünk éjjel az erdőbe, mindenhol fénylő szempárok fognak ránk tekinteni. Sok, főleg éjszakai emlős szemében – példaként lásd a nyugat-afrikai medvemakit vagy angwantibót az 5.19b ábrán – találunk *tapetum lucidum*ot, az ideghártya mögötti fényvisszaverő réteget. A fényvisszaverő réteg szerepe, hogy újabb esélyt adjon azon fotonok befogására, melyek áthaladtak a fényérzékelő sejteken; minden foton arra a sejtre verődik vissza, amelyik „kihagyta”, így a kép nem torzul. A *tapetum*ot a gerinctelenek is felfedezték. Bizonyos pókfajokat legkönnyebben erős fényű zseblámpával lehet megtalálni az erdőben. Az 5.19a ábrának farkaspókportréját szemlélve felmerülhet a kérdés: „macskaszemek” helyett miért nem „pókszemek” szegélyezik útjainkat? A legutolsó fotont is hasznosító fényvisszaverő réteg minden bizonnyal kialakulhatott még a lencse előtt az ősi kehelyszemekben. Talán ez az a preadaptáció, mely néhány elszigetelt esetben tükrös teleszkópszerű szemmé alakult. De az is lehet, hogy a tükör egészen más forrásból alakult ki – nehéz biztosat mondanunk.



5.19. ábra. Kevés számú foton kihasználása visszaveréssel. a) farkaspók (*Geolycosa* sp.); b) afrikai medvemaki szemének fényvisszaverő rétege (*tapetum*)

A lencse és a homorú tükör két eszköz éles kép alkotására. A kép minden esetben fordított állású és a bal-jobb oldal is felcserélődik. Egy gyökeresen más típusú szem: a rovarok, rákok, néhány féreg és puhatestű, az atlanti törfarkú (fura tengeri lény, amely állítólag közelebbi rokona a pókoknak, mint a rákoknak) és a már kihalt háromkaréjú ősrákok összetett szeme egyenes állású képet alkot. Az összetett szemek közül több típus különböztethető meg. A legegyszerűbbel, az ún. appozíciós összetett szemmel kezdem. Hogy megértsük, hogyan működik, ereszkedjünk le egészen alacsonyra a Valószínűtlenség Hegye lejtőjén. Mint láttuk, ha képalkotó szemet keresnénk, vagy egyáltalán olyat, mely többre képes, mint a fényerősség jelzésére, több fényérzékelő sejtre van szükségünk, melyek különböző irányból érkező fényt érzékelnek. A különböző irányba nézés biztosítható úgy, hogy átlátszatlan falú kehelyben helyezzük el őket. Az eddig tárgyalt szemek mind a homorú kehely alapelvéből származtak. A feladat legalább ilyen kézenfekvő megoldása, ha a fényérzékelő sejteket a kehely külső, domború felületén helyezzük el, így kifelé tekintenek különböző irányokba. Ez az összetett szem legegyszerűbb megközelítése.

Emlékezzünk vissza a delfin leképzésére! Rámutattam, hogy a feladatot úgy is felfoghatjuk, hogy hogyan szabaduljunk meg a túl sok képtől. Az ideghártyára különböző állásokban rávetődő végtelen számú delfinkép összegződésekként egyetlenegy sem látunk (5.20a ábra). A sötétkamraszem azért működhetett, mert szinte minden sugarat kiszűrte, csak a lyukban keresztveződő keveseket engedte be, így a delfinről egyetlen fordított állású kép keletkezett. A lencse csupán ennek az alapelvnek a továbbfejlesztett változata. Az appozíciós összetett szem még egyszerűbb megoldást kínál.



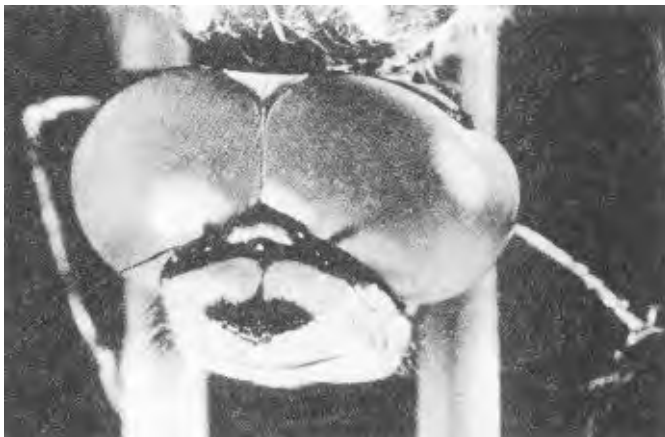
5.20. ábra. *a)* Az 5.6. ábra újból; *b)* a kifordított kehely: az appozíciós összetett szem alelve

Az összetett szem sűrűn álló, hosszú, egyenes csövek csoportja, melyek egy kupola tetején sugároznak szét minden irányba. Minden cső olyan, mint egy lőrés, saját látóterében csak a világ egy kis szeletét látja. Szűrőhasonlatunkhoz hűen úgy is fogalmazhatunk, hogy a valóság más részeiből érkező fénysugarakat a cső fala és a kupola burkolata megakadályozza abban, hogy behatoljanak a csövek mélyére, ahol a fényérzékelő sejtek vannak.

Íme az appozíciós összetett szemek működésének alapja. A valóságban az apró „csőszemek” – ommatidiumok – mindegyike csak kicsit több, mint egy cső. Van saját lencséje, saját pici, kb. fél tucat fényérzékelő sejtől álló retinája. Az egyes ommatidiumok csövének fenekekén fordított állású képek keletkeznek: tulajdonképpen hosszú, gyenge minőségű lencseszemekről van szó. Az egyes ommatidiumok alkotta képek azonban figyelmen kívül maradnak; csak az az információ továbbítódik, hogy mennyi fény hatolt be. A lencse szerepe csupán annyi, hogy minél több fényt gyűjtsön össze az ommatidium látóteréből a retinára. Az összes ommatidium által közösen alkotott kép egyenes állású, mint az 5.20b képen látható.

Mint eddig is, a „kép” nem az, amire mi, emberek gondolunk: a teljes valóság pontos, Technicolor színvonalú megjelenítése. Csupán arról beszélünk, hogy a szem *valamilyen* szinten képes a különböző irányokban történő dolgok észlelésére. Egyes rovarok összetett szeme pl. csak a mozgó célpont nyomon követésére alkalmas. Az állóképek észlelésére képtelenek. Az a kérdés, hogy vajon az állatok ugyanazt látják-e, mint mi, részben filozófiai, és valószínű, hogy a szokottnál is nehezebben válaszolható meg.

Az összetett szem elve elég jól működik pl. a zsákmányára lecsapó szitakötőnél, de ha annyi részletet akarna látni, mint az ember, hatalmas méretűre, a mi egyszerű lencseszemünkénél többszörösen nagyobbra kéne fejlődnie. Ennek vázlatosan a következő az oka. Nyilvánvaló, hogy minél több ommatidium néz különböző irányokba, annál több finom részletet látunk. A szitakötőnek 30 000 ommatidiuma is lehet, és ez bőven elég arra, hogy repülő rovarokra vadásson (5.21. ábra).



5.21. ábra. Látására támaszkodó légi ragadozó, a sebes acsa (*Aeschna cyanea*) hatalmas összetett szeme



5.22. ábra. Kuno Kirschfeld rajza arról az emberről, aki összetett szemmel szeretne emberi pontossággal látni

Ahhoz azonban, hogy annyi részletet lásson, mint az ember, milliónyi ommatidiumra lenne szükség. Ennyi ommatidium csak akkor fér el, ha nagyon kicsik. Sajnos az ommatidiumok méretének szigorú alsó korlátja van, ugyanaz, mint a nagyon kicsi sötétkamranyílásnak: a diffrakciós határ. Ebből következik, hogy egy, az emberével megegyező pontosságú összetett szem nevetségesen nagy lenne: 24 méter átmérőjű! Kuno Kirschfeld német tudós le is rajzolta, hogyan nézne ki az az ember, aki összetett szemmel szeretne embermódra látni (5.22. ábra). A rajz méhsejtmintázata fantasztikus! Minden méhsejt 10 000 ommatidiumnak felel meg. A szem a fent említett 24 helyett azért csak egy méter átmérőjű, mert Kirschfeld elismerte, hogy az ember nagyon pontosan csak a retina egy kis pontjával lát. Átlagolta az ideghártya nagyon pontos központi és a kevésbé pontos széli látását, és ehhez az eredményhez jutott. Akár egy, akár huszonnégy méter átmérőjű, egy ilyen hatalmas összetett szem már nehezen használható.

A tanulság: ha a valóságról pontos, részletes képet kívánsz, ne összetett, hanem lencseszemet használj, egyszerű, jó lencsével. Dan Nilsson az összetett szemről így ír: „kis túlzással állíthatjuk, hogy az evolúció kétségbeesetten küzd azért, hogy egy alapvetően rossz megoldáson javítson”.

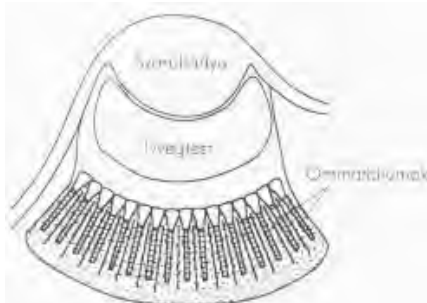
Miért nem „felejtik el” a rovarok és a rákok az összetett szemet és fejlesztenek ki helyette inkább lencseszemet? Ismét arról van szó, hogy egy völgy rossz oldalán ejtett foglyul a Valószínűtlenség Hegye. Az összetett szem csak működő átmeneti állapotok sorozatán keresztül alakulhatna lencseszemmé; nem mehetünk le a völgybe, még ha a túloldalon magasabbra is kapaszkodhatunk. Miért nem létezhetnek az összetett és lencseszem közötti átmenetek?

Egy hatalmas nehézség szembeötlő. A lencseszem fordított állású képet alkot, az összetett szem pedig egyenes állásút. Ezek között átmenetet találni – finoman fogalmazva is – kemény dió. A lehetséges átmenet: semmilyen kép. Van néhány, a tenger mélyén vagy más vaksötét helyen élő állat, mely olyan kevés fotonhoz jut, hogy feladta a képalkotást. Csupán arra törekszenek, hogy megállapítsák, van-e fény egyáltalán. Egy ilyen állat elveszítheti képfeldolgozó idegi működését, így tiszta lappal indulhat neki a Hegy egy teljesen új emelkedőjének. Ő képviselheti a keresett átmenetet az összetettől a lencseszem felé vezető úton.

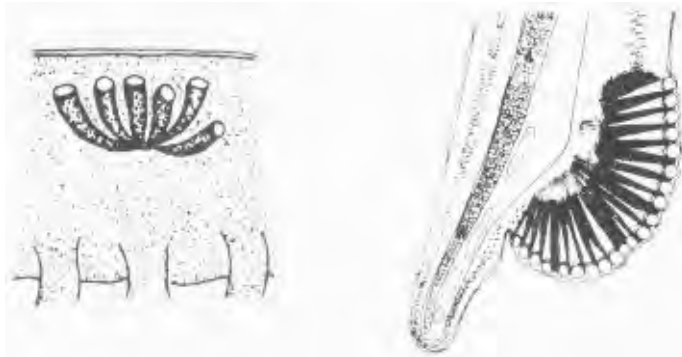
Némely mélytengeri ráknak nagy összetett szeme van lencse vagy bármely más optikai berendezés nélkül. Ommatidiumaikkal elvesztették csövüket, a fényérzékelő sejtek közvetlenül a külső felszínen ülnek, hogy az arra vetődő kevés fotont mind befogják – iránytól függetlenül. Innen már csak egy kis lépésnek tűnik az 5.23. ábrán látható érdekes szem, az *Ampelisca* nevű rák szeme. Az *Ampelisca* nem él túl nagy mélységben, talán éppen mélytengeri ősök visszatérő utóda. Szeme lencseszem, melyben egy egyszerű lencse fordított állású képet vetít az ideghártyára. Ez az ideghártya azonban kétségkívül összetett szemből származik – egy sor ommatidium maradványait őrzi. Lehet, hogy csak egy kis lépés, de csak úgy jöhetett létre, hogy az agynak a szinte teljes vakság időszakában volt elegendő evolúciós ideje elfelejteni az egyenes állású képek feldolgozását.

Íme egy példa arra, hogyan alakulhat át az összetett szem lencseszemmé (és egy újabb példa arra, hogy a szemek látszólag milyen könnyen jönnek létre egymástól függetlenül az állatok birodalma különböző részeiben). De vajon hogyan alakult ki az első összetett szem? Mit találunk a Valószínűtlenség Hegye csúcsának lábánál?

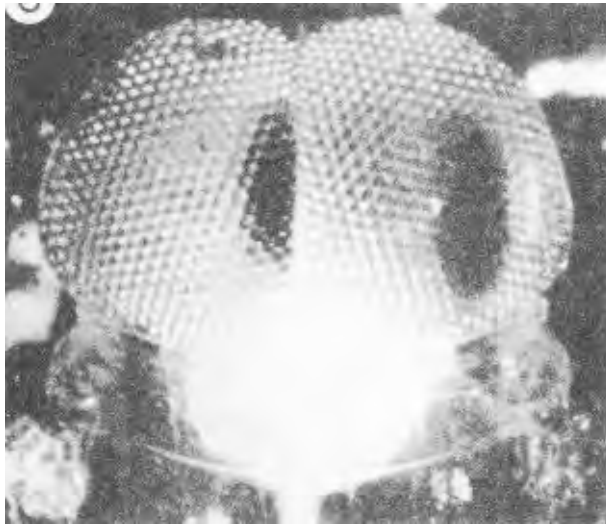
Ismét csak úgy segíthetünk magunkon, ha körülnézünk a ma élő állatok világában. Az ízeltlábúakon (rovarok, rákok és rokonaik) kívül összetett szeme csak néhány soksertéjű gyűrűsféregnek (százlábú és csővájó férgek) és néhány kagylónak (ismét valószínűleg független eredettel) van. A férgek és puhatestűek azért hasznos történetírói az evolúciónak, mert körükben megtalálunk néhány olyan ősi szemet is, melyek hihető átmeneteknek tűnnek a Valószínűtlenség Hegye Összetett szem-csúcsára vezető úton. Az 5.24. ábra szemei két különböző féregfaj szemei. Ismét hangsúlyozom: ezek nem ősök, hanem ma élő fajok, valószínűleg nem is a valódi átmenetek leszármazottai, de bepillantást engednek az evolúció előrehaladásának lehetséges menetébe, a fényérzékelő sejtek laza csoportjától (baloldalt) a jobb oldali szabályos összetett szemig.



5.23. ábra. Ősi összetett szem emlékét őrző lencseszem: az *Ampelisca* figyelemre méltó szeme



5.24. ábra. Két fereg faj feltételezhetően ősi típusú összetett szemei



5.25. ábra. Mélytengeri rák szeme szálóptikás fényvezetéssel

Ez a lejtő sem meredekebb annál, amin felmászva eljutottunk a szokásos lencseszemhez.

Az ommatidiumok hatékonysága, mint említettük, azon múlik, hogy jól el vannak szigetelve környezetüktől. A delfin farka csúcsára irányuló „lőrés” nem kaphat sugarakat a delfin egyetlen más pontjáról sem, különben megint ott vagyunk a milliányi delfinkép kezdeti problémájánál. A legtöbb ommatidiumot a csövet körülvevő sötét festékréteg szigeteli. Néha azonban ennek is lehet kedvezőtlen mellékhatása. Egyes tengeri lények álcázását az átlátszóság biztosítja. A tengervízben élnek, hát a tengervízhez hasonlítanak. Álcázásuk lényege, hogy elkerüljék, hogy a fotonok „megakadjanak” bennük. Az ommatidiumok körüli sötét réteg célja viszont éppen a fotonok „megakasztása”. Hogyan oldható fel ez az ellentmondás?

Néhány mélytengeri rák eredeti rész megoldást talált (5.25. ábra). Nincs szigetelő festékrétegük, ommatidiumaik nem megszokott csövek, hanem átlátszó fényvezetők,

melyek éppen úgy működnek, mint az ember által kitalált száloptika. Elülső végén minden fényvezető apró, a hal szeméhez hasonlóan változó fénytörő képességű lencsévé duzzad. A lencse és a fényvezető többi része mind azon van, hogy minél több fényt juttasson az alapon található fényérzékelő sejtekhez, de csak azokat a fénysugarakat, melyek a látórés vonalából érkeznek. A cső oldalára érkező fénysugarakat nem festékréteg zárja ki, hanem visszaverődnek, ezért nem lépnek be a fényvezetőbe.

Nem minden összetett szem ommatidiumai igyekeznek kisajátítani fénysugaraikat, csak az appozíciós típusú szemeké. Az ún. „szuperpozíciós” szemeknek legalább három típusuk van, amelyek valami sokkal bonyolultabbat tesznek. Nemhogy nem ejtik száloptikás vagy csőcsapdába a fotonokat, hanem azok úgy haladnak át az egyik ommatidium lencséjén, hogy a szomszéd fényérzékelő sejtjeihez érkeznek. Az összes ommatidiumnak van egy közös, átlátszó zónája. Az összes ommatidium lencséje azon „mesterkedik”, hogy egyetlen képet hozzon létre a közös retinán, mely mindannyiuk fényérzékelő sejtjeinek összeadódásával alakult ki. Az 5.26. ábrán Charles Darwin arcképe látható, amit Michael Land egy szentjánosbogár szuperpozíciós összetett szemének összetett lencséjén keresztül fényképezett.

A szuperpozíciós összetett szem, hasonlóan az appozícióshoz, de ellentétben az 5.23. ábra lencseszemével vagy az *Ampelisca* szemével, egyenes állású. Ezt is várjuk, ha feltételezzük, hogy a szuperpozíciós szem az appozíciós ősből alakult ki. Történelmi szempontból így logikus, és az agy szempontjából ebben az átmenetben semmi megerőltető nincs. Ennek ellenére figyelemre méltó tény marad. Gondoljunk csak bele, milyen fizikai nehézségeket vet fel egyetlen egyenes állású képet ezzel az eljárással elkészíteni.



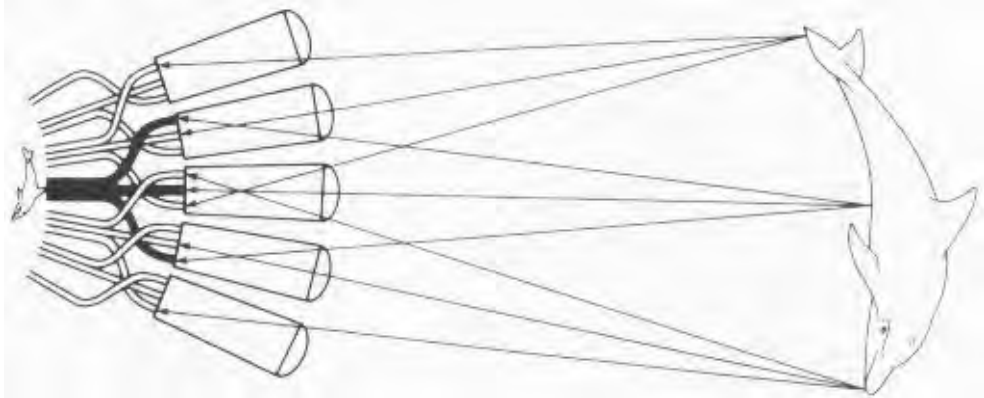
5.26. ábra. Charles Darwin arcképe, melyet Michael Land egy szentjánosbogár összetett szemének lencséjén keresztül készített

Az appozíciós szem minden ommatidiumának normál lencséje van, ami, ha alkot egyáltalán képet, hát fordított állásút. Az appozíciós szemből tehát úgy lehet szuperpozíciós, ha az egyes lencséken áthaladó fénysugarak valahogy megfordulnak. Ráadásul a különböző lencsék készítette különálló képeket úgy kell összerakni, hogy egy közös képet alkossanak. Az előny, hogy ez a közös kép sokkal világosabb lesz. A sugarak megfordítása azonban fizikai szempontból igen nehéz. Az evolúció, bámulatra méltó módon, nemcsak megoldotta a feladatot, de legalább három egymástól független módon is megoldotta: újabb lencsék, újabb tükrök és újabb idegpályák segítségével. A részletek olyan bonyolultak, hogy teljesen felborítanak e már enélkül is túlméretezett fejezet egyensúlyát, ezért csak igen röviden szólok róluk.

A fordított állású képet egyetlen lencse visszafordítja. Hasonló módon, egy megfelelő távolságban mögé helyezett lencse ismét megfordítja. Ezt a kombinációt használják a Kepler-teleszkópban. Ugyanez az eredmény érhető el egyetlen összetett, különböző törésmutatójú részekből felépülő lencsével. Mint láttuk, az emberalkotta lencsékkel ellentétben az élő lencsék könnyen lehetnek változó törésmutatójúak. Ekképp utánozzák a Kepler-teleszkópot kérészek, fátyolkák, bogarak, éjjeli lepkék, tegzesek és a rákok öt különböző csoportjának tagjai. Távoli rokonságuk arra utal, hogy legalább néhányan egymástól függetlenül fejlesztették ki ugyanazt a kepleri trükköt. Három másik rákcsoport hasonló eredményt ér el, csak tükrök segítségével. A három csoport közül kettőben olyan állatokat is találunk, amelyek a lencsés megoldással élnek. Ha végignézzük, hogy mely állatcsoportok az összetett szem több lehetséges változata közül melyikkel élnek, döbbenetes dolgot tapasztalunk: a különböző megoldások hol itt, hol ott bukkannak fel, ismét azt sugallva, hogy mintegy varázsütésre egymástól független módon alakulnak ki.

Az „idegi szuperpozíció” a kétszárnyú rovarok népes és fontos csoportjában – ide tartoznak a legyek – alakult ki. Hasonló megoldást fejlesztettek ki – úgy tűnik, megint csak független módon – a bűvárpoloskák. Az idegi szuperpozíció hihetetlenül ötletes. Bizonyos értelemben nem is nevezhetjük szuperpozíciónak, mert az egyes ommatidiumok elszigeteltek, akárcsak az appozíciós szem esetében. A szuperpozícióra emlékeztető hatást az ommatidiumok mögötti idegsejthálózat eredeti szerveződésével érik el a következő módon: emlékszünk még arra, hogy egyetlen ommatidium „ideghártyája” kb. fél tucat fényérzékelő sejtet tartalmaz. Egy szokásos appozíciós szemben e hat fényérzékelő sejt ingerülete egyszerűen összeadódik; ezért tettem idézőjelbe az „ideghártyát”: minden, a csövön végighaladó foton ingerületet kelt, függetlenül attól, hogy melyik fényérzékelő sejt fogja fel. A több fényérzékelő sejt mindössze arra jó, hogy nagyobb legyen a teljes fényérzékenység. Ezért nem számít semmit sem, hogy az appozíciós szem ommatidiuma alján megjelenő apró kép fordított állású.

A légy szemében azonban a hat sejt ingerületi állapota *nem egymással* összegződik, hanem a *szomszédos* ommatidium *megfelelő* sejtjének ingerületi állapotával (5.27. ábra). Élesség tekintetében az ábra skálázása egyáltalán nem valóságos. Ugyanezen okból a nyilak itt nem fénysugarakat ábrázolnak (azokat a lencsék megtörik), hanem azt mutatják, hogy a delfin egyes pontjai hogyan képződnek le a csövek alján. Most lássuk ezen elrendezés döbbenetes nagyszerűségét.



5.27. ábra. Az „idegi szuperpozíció” összetett szem zseniális alapelve

Az ötlet lényege, hogy az egyik ommatidium a delfin fejére néző fényérzékeny sejtjei a szomszéd ommatidiumok ugyanoda néző fényérzékeny sejtjeivel kapcsolódnak össze. Az egyik ommatidium a delfin farkára néző fényérzékeny sejtjei pedig a szomszéd ommatidiumok szintén a delfin farkára néző fényérzékeny sejtjeivel, és így tovább. Az eredmény: a delfin minden pontjáról több foton hoz jelet, mint egy szokásos, egyszerű csöves elrendezésű appozíciós szem esetében. Íme régi feladványunk – hogyan növeljük a delfin egy pontjáról érkező észlelt fotonok számát – egy újabb, ezúttal nem optikai, hanem számítástechnikai megoldása.

Érthető tehát, miért nevezzük ezt is szuperpozíciónak, bár szigorú értelemben nem az. Valódi szuperpozíció esetén a különböző ommatidiumokba újabb lencséken vagy tükrökön keresztül úgy érkeznek a fénysugarak, hogy a delfin fejéről jövők egy helyre, a farkáról jövők egy másikra stb. kerüljenek. Idegi szuperpozíció esetén a fotonok különböző helyeken fejezik be útjukat, akárcsak egy appozíciós szemben; ám az *általuk keltett jel*, az idegsejtek mesteri összekapcsolása révén ugyanoda jut az agyban.

Nilsson becslése szerint – emlékszünk rá – a lencseszem kialakulásához szükséges evolúciós idő geológiai léptékben egy pillanatnak tekinthető. Nagy szerencse lenne olyan kőületeket találni, melyek őrzik az átmeneti állapotot. Összetett vagy más típusú szemre hasonlóan részletes becslést még nem végeztek, de kétlem, hogy sokkal nagyobb értéket kapnánk. Rendszerint nem is számíthatunk arra, hogy kőületekben felismerjük a szem részleteit, mert túl lágyak ahhoz, hogy fosszilizálódhassanak. Az összetett szemek kivételt képeznek, mert részleteikről sokat elárul külső felszínük többé-kevésbé kitűnő facettáinak elegáns elrendezése. Az 5.28. ábrán egy devon korból származó 400 millió éves háromkaréjú ősrák szeme látható. Ez az, amire számíthatunk, ha a szem kialakulásának ideje geológiai szempontból elhanyagolhatóan csekély.

E fejezet mondanivalójának lényege, hogy a szemek gyorsan és könnyedén, szinte varázsütésre alakulnak ki az evolúció során. Bevezetésként idéztem egy szakembert, aki szerint a szem az állatvilág különböző részein legalább negyven, egymástól független esetben kialakult. Ennek látszólag ellentmond kísérleti eredmények egy izgalmas sorozata, melyet a Walter Gehring professzor vezetésével dolgozó svédországi kutatók csoportja tett közzé a közelmúltban. Röviden ismertetem, mit találtak, és hogy ez miért nem cáfolja fejezetem végkövetkeztetésének alapjait.



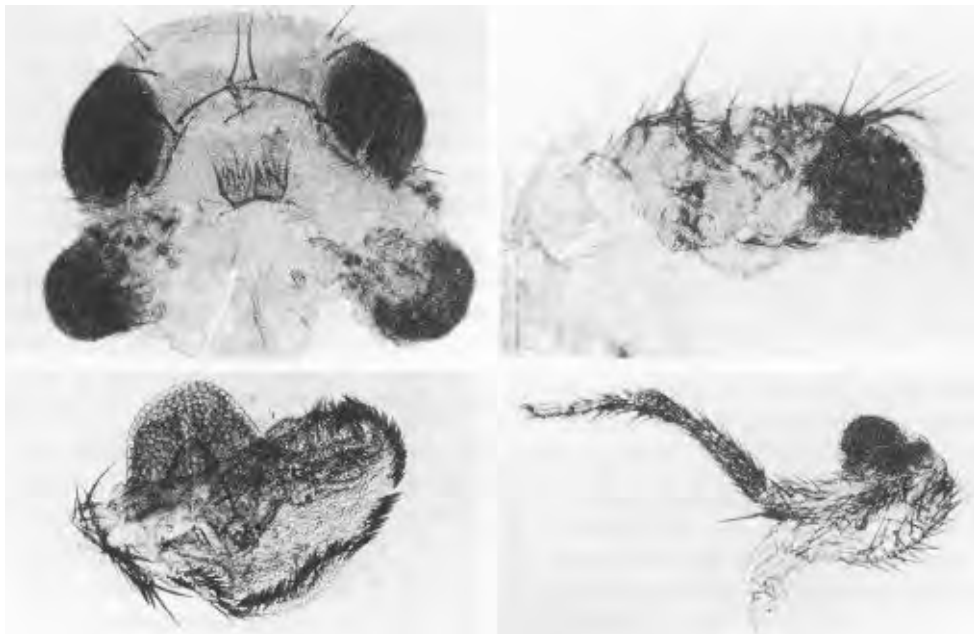
5.28. ábra. 400 millió évvel ezelőtt már fejlett összetett szemek léteztek: egy háromkaréjú ósrák megkövült szeme

Mindenekelőtt mentegetőznöm kell a genetikusok örjítően zavaró gélnevezései miatt. A *Drosophila* ecetmuslinca *szemnélküli* génje valójában szemet kódol (nagyserű, nem?). E szeméretlenül zavaró nevezéktani ellentmondás oka valójában nagyon egyszerű és tanulságos is. Akkor ismerjük fel, hogy egy gén mit csinál, amikor elromlik. Van egy gén, amely ha elromlik (mutál), a légynek nem lesz szeme. Ezért a kromoszómán ezt a génhelyet „*szemnélküli*” lokusznak nevezik („lokusz” latinul helyet jelent; így nevezik a genetikusok a kromoszóma azon pontjait, ahol egy gén különböző formái foglalhatnak helyet). Ha a *szemnélküli* lokuszról beszélünk, rendszerint az ott helyet foglaló normális, károsítatlan génre gondolunk. Innen származik az az ellentmondás, hogy a *szemnélküli* gén felelős a szem kialakításáért. Olyan ez, mintha a hangszórót „csendberendezés”-nek neveznénk, mert ha kiszereljük a rádióból, az nem fog megszólalni. Legszívesebben átkeresztelném a gént *szemkészítőre*, de ez további zavart okozna. A *szemnélküli*t sem tudom azonban elfogadni, így maradunk egyszerűen az *sz* rövidítésnél.

Általános tény, hogy bár az állatok minden génje minden sejtjükben megtalálható, a test egy-egy adott részében csak kisebb részük van „bekapcsolva”, csak kisebb részük fejeződik ki (expresszálódik). Ezért más a vese, mint a máj, bár ugyanazt a teljes génkészletet tartalmazzák. A felnőtt ecetmuslincában az *sz* gén rendszerint csak a fej területén fejeződik ki – ezért hordja itt az állat a szemét. George Haider, Patrick Callaerts és Walter Gehring felfedeztek egy kísérleti módszert, melynek eredményeképp az *sz* gén a test más részein is kifejeződhet. Az ecetmuslinca-lárvák ravasz kezelésével elérték, hogy az *sz* gén kifejeződjön a csápokon, a szárnyakon, a lábakon. A kezelt legyek kifejlett alakjai megdöbbentő módon tökéletes kialakulása összetett szemeket hordoznak szárnyukon, lábukon, csápjukon és más testrészeiken (5.29. ábra). Ezek az „ektopikus” szemek, bár kicsit kisebbek, mint a normálisak,

szabályos összetett szemek sok, szabályosan kialakult ommatidiummal. Még működnek is. Bár nem tudjuk, látnak-e a legyek rajtuk keresztül valamit, az ommatidiumokból elvezető idegek elektromos jeleinek elvezetésével kiderült, hogy fényre érzékenyek.

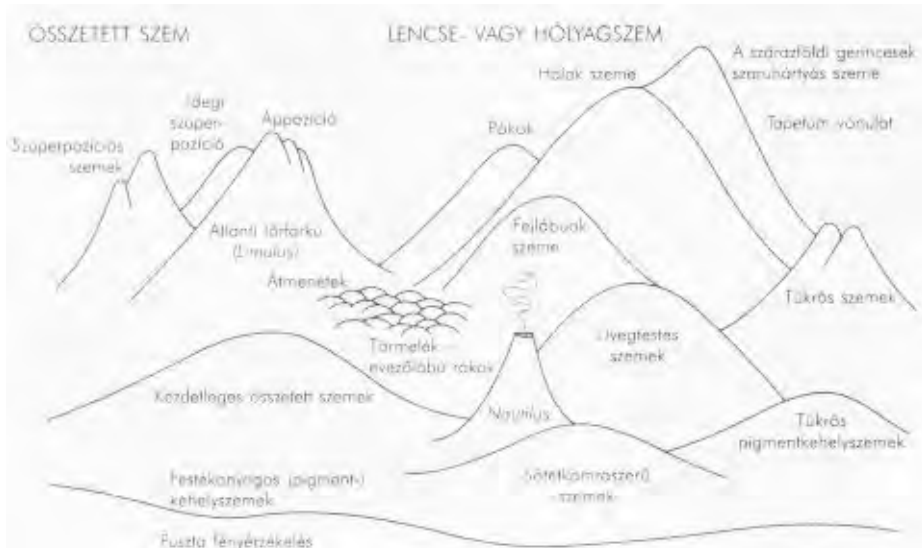
Ez az egyik elgondolkodtató tény. A másik még inkább figyelemre méltó. Az egereknek van egy *kis szem* nevű génjük, az embereknek pedig egy *aniridia* nevű. A nevek ismét a genetikusok negatív hagyományát tükrözik: a fenti gének mutációs károsodása a szem vagy egyes részeinek kisebbedését, hiányát okozza. Az ugyanabban a svéd kutatóintézetben dolgozó Rebecca Quiring és Uwe Waldorf azt találták, hogy a fenti emlősgének DNS-bázissorrendje szinte megegyezik az ecetmuslinca *sz* génjének bázissorrendjével. Ez azt jelenti, hogy ez a gén nagyon távoli közös ősből jutott el olyan, egymástól távol eső állatokba, mint a rovarok és az emlősök. Ráadásul az állatvilág e két távoli ágán egyaránt erősen hatnak a szemre. A harmadik meghökkentő tény egyenesen döbbenetes. Haldernek, Callaertsnek és Gehringnek sikerült az egérgént beültetnie az ecetmuslinca embrióiba. Láss csodát: az egérgén hatására ektopikus szemek alakultak ki az ecetmuslincában! Az 5.29. ábra alsó képén egy apró összetett szem látható, mely az egérgén hatására alakult ki az ecetmuslinca lábán. Vegyük észre: ez egy összetett rovarszem, nem pedig egy egérszem! Az egérgén egyszerűen bekapcsolta az ecetmuslinca szemkészítő rendszerét. Az *sz*-szel szinte megegyező bázissorrendű géneket találtak puhatestűekben, zsinórférgekben (tengerben élő férgek) és zsákállatokban. Az *sz* könnyen lehet, hogy az állatvilág minden tagjában előfordul, és lehet, hogy általános érvényűnek fog bizonyulni az a szabály, hogy az állatok birodalma egyik tartományából származó génváltozat egy teljesen más rokonsági kör állataiban szemek kialakulását indukálhatja.



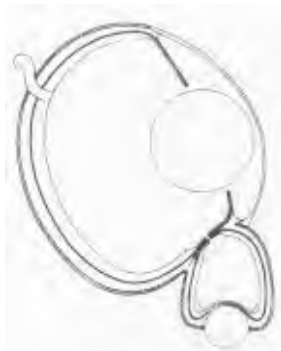
5.29. ábra. Indukált ektopikus szemek az ecetmuslincánál (*Drosophila*); az alsót egérgén indukálta

Mit mond a látványos kísérletsorozat fejezetünk végkövetkeztetése szemszögéből? Tévedtünk, amikor azt állítottuk, hogy a szemek negyven ízben egymástól függetlenül alakultak ki? Nem hiszem. Állításunk lényegét – hogy a szemek egyszerűen, szemvillanásnyi idő alatt alakultak ki – nem érinti. Talán azt igazolják, hogy az ecetmuslincák, egerek, emberek és zsákállatok közös őseinek volt szeme. E távoli közös őst látott valamennyire, és szemei, bármilyenek voltak is, valószínűleg egy olyan DNS-szakasz hatására alakultak ki, melynek bázissorrendje hasonlított a mai *sz* gén bázissorrendjére. De a különböző szemtípusok tényleges alakja, az ideghártyák, lencsék és tükrök részletei, az, hogy a szem összetett vagy egyszerű, és ha összetett, akkor vajon appozíciós vagy szuperpozíciós – ezek a tulajdonságok mind egymástól függetlenül – és rövid idő alatt – alakultak ki. Csak rá kell néznünk az állatvilágra, hogy lássuk: a különböző megoldások, rendszerek milyen szétszórót, mondhatni szeszélyes módon fordulnak elő. Röviden: egy állat szeme gyakran jobban hasonlít távoli, mint közeli rokonai szemére. Ezt a következtetést egy pillanatra sem ingatja meg annak bizonyítása, hogy mindezen állatok közös őseinek volt szeme, és hogy az összes szem embrionális fejlődése a jelek szerint hasonló egymáshoz annyira, hogy valamennyit indukálhatja ugyanaz a DNS-szakasz.

Miután Michael Land volt szíves végigolvasni és megbírálni e fejezet első munkapéldányát, megkértem, hogy próbálja felvázolni a Valószínűtlenség Hegye Szem-vidékének tájképét. Rajzát az 5.30. ábrán mutatom be. A hasonlatok természetéből következik, hogy bizonyos célokra megfelelnek, másokra viszont egyáltalán nem, és szükség esetén készen kell állnunk módosításukra vagy akár elvetésükre. Az olvasó nem első ízben fogja észrevenni, hogy a Valószínűtlenség Hegye, bár neve egyes számban áll, a Jungfrauhoz hasonlóan valójában bonyolult, többszűcsű táj.



5.30. ábra. A Valószínűtlenség Hegye Szem-vidéke: Michael Land tájképe a szem evolúciójáról



5.31. ábra. Meglepő kettős szem: a *Bathylchnops exilis* „négy szemű hal” szeme

Az állati szemek másik kiváló ismerője, Dan Nilsson, aki szintén átolvasta e fejezet munkapéldányát, a központi mondanivaló összegzéseként felhívta figyelmemet a szem evolúciója opportunistá, *ad hoc* jellegének egyik legbizarrabb példájára. Három egymástól független esetben, a halak három különböző csoportjában kialakult a „négy szeműség” jelensége. A négy szemű halak legkülönlegesebbike talán a *Bathylchnops exilis* (5.31. ábra). Van egy szabályos, a megszokott irányba néző halszeme. Ezen felül azonban, az első szem oldalában kialakult egy második, egyenesen lefelé néző szeme is. Vajon mit néz – ki tudja? Talán van egy félelmetes ragadozó, mely alulról szokott közelíteni? A mi szempontunkból a következő az érdekes: a második szem embriológiai fejlődése teljesen más, mint az elsőé, bár feltételezhetjük, hogy a természetben az *sz* gén egy változata indukálhatja kialakulását. Mint dr. Nilsson hozzám írott levelében kiemelte: „Ez a faj újra felfedezte a szemlencsét – pedig már volt neki egy. Kiváló példa annak alátámasztására, hogy szemlencsét nem is olyan nehéz kifejleszteni”.

Semmit sem olyan nehéz kifejleszteni, mint mi, emberek feltételezzük. Darwin túl sok engedményt tett, amikor elismerte, hogy a szem evolúciója lehet, hogy nagyon nehéz eset. Felesége túl messzire ment aláhúzott lapszéli megjegyzésével. A kreacionisták roppant szívesen idézik Darwinnak azt a bekezdését, amelyet én is idéztem e fejezet elején – de sohasem teljes egészében. A fenti szónoki beismerés után Darwin így folytatja:

Mikor először állították, hogy a Nap áll és a Föld kering körülötte, az emberiség gyakorlati érzéke ezt tévtannak kiáltotta ki. A *Vox populi, vox Dei* ősi mondás azonban, mint minden filozófus tudja, a tudományban nem állja meg a helyét. A józan ész nekem azt mondja, hogy ha kimutatható, hogy egy egyszerű, tökéletlen szem és egy bonyolult, tökéletes szem közti számos átmeneti alak mindegyike, amely mind hasznos gazdája számára, létezik, mint ahogy ez kétségtelen; továbbá ha a szem kismértékben változhat, és e változások örökölhetők, és bármelyikük hasznosnak bizonyulhat az állat számára az élet változó körülményei között, akkor nem lehet igazából gondunk azzal, hogy elhiggyük, hogy egy tökéletes, bonyolult szem kialakulhatott a természetes szelekció által – még ha nem is tudjuk ezt elképzelni.

MINDEN HÉJAK MÚZEUMA

A természetes szelekció az a hajtóerő, mely felfelé nyomja az evolúciót a Valószínűtlenség Hegye oldalán. A „nyomás” nagyon jó hasonlat. „Szelekciós nyomás”-ról beszélünk, és szinte érezzük, hogyan szorítja a fajokat az evolúció irányába, hogyan kényszeríti őket a felfelé haladásra. A ragadozók szelekciós nyomása – mondjuk – szorította rá az antilopokat arra, hogy gyors futású lábakat fejlesszenek ki. Eközben azonban tisztában vagyunk azzal, hogy valójában mi történik: a rövid lábakat kódoló gének gyakrabban végzik ragadozók gyomrában, ezért egyre kevesebb marad belőlük. A válogatós tojók nyomása kényszerítette a fácánkakasokat arra, hogy pompás tollakat növelessenek. Ez azt jelenti, hogy a mutatós tollakat kódoló gén az átlagosnál gyakrabban találja magát olyan spermiumban, mely a tojó testébe viszi. Ezt úgy fogalmazzuk meg, hogy a nyomás a szépség irányába hat. Semmi kétség, hogy a ragadozók szelekciós nyomása ezzel szemben a fakóbb tollruha irányában dolgozik: a ragyogó színezetű kakasok nemcsak a tojók, de a ragadozók tekintetét is vonzzák. A ragadozók nyomása nélkül a kakasok tollazata még színpompásabb, még szemképrázatosabb lenne. A szelekciós erők tehát hathatnak egymással szemben, egymással megegyező irányban vagy akár (a matematikusok le is tudják rajzolni) egymással bármilyen „szöveget” bezárva. A szelekciós nyomás lehet gyenge vagy erős – e szavak hétköznapi jelentése ismét jól megfelel. Azon az ösvényen, melyen egy adott leszármazási vonal felkapaszkodik a Valószínűtlenség Hegyére, sok-sok különböző szelekciós nyomás tol és lökdös különböző erővel és más-más irányba – néha segítve, néha akadályozva egymást.

A nyomás azonban nem minden. A választott felvezető út természetesen a lejtő alakjától is függ. A szelekciós nyomás különböző irányokba különböző erővel taszít, de léteznek kisebb ellenállású területek és megmászhatatlan meredek. A szelekciós nyomás tolnak minden erejével egy irányban, ha ott hatalmas szikla zárja el az utat, semmire sem fog menni. A természetes szelekciónak szüksége van választási lehetőségekre. A szelekciós nyomás, legyen bármilyen erős, tehetetlen genetikai változatosság nélkül. Amikor azt mondjuk, hogy a ragadozók szelekciós nyomása válogatta ki a gyors lábú antilopokat, ez csupán annyit jelent, hogy mindig a leglassúbbakat ették meg. Ha azonban nem lehet a gyors és lassú futás génjei között válogatni – vagyis a futási sebesség különbségeit kizárólag környezeti tényezők határozzák meg –, nem lesz evolúció. A Valószínűtlenség Hegyén nem találunk ilyen irányú emelkedőt.

Olyan területre érkeztünk, ahol a biológusok elbizonytalanodnak, a legkülönbözőbb vélemények pártján állnak. Az egyik végletet azok képviselik, akik szerint a genetikai változatosság létét többé-kevésbé biztosra vehetjük. Ha van szelekciós nyomás, lesz

mindig elegendő genetikai változatosság is, amivel dolgozhat. A leszármazási vonalak haladási irányát az evolúciós térben gyakorlatilag az evolúciós nyomások vetélkedése fogja megszabni. A másik végletet képviselők szerint az evolúció irányának fontos meghatározója a rendelkezésre álló genetikai változatosság. Néhányan egyenesen addig mennek, hogy a természetes szelekciónak csupán csekély, kiegészítő szerepet tulajdonítanak. A különbségeket sarkítva elképzelhetjük e két biológust, miközben azon vitatkoznak, miért nincs a malacoknak szárnyuk. A szélsőséges szelekcionista szerint azért, mert semmi hasznuk nem lenne abból, ha szárnyuk lenne. A szélsőséges antiszelekcionista szerint lenne belőle hasznuk, de sohasem történt olyan mutáció, mely létrehozta volna a továbbfejlődésre alkalmas szárnykezdeményeket.

Az ellentét ennél bonyolultabb. A Valószínűtlenség Hegye hasonlata, még annak sokcsúcú változata sem elég alapos hasonlat ahhoz, hogy megmagyarázzuk. Új hasonlatra van szükség, olyasmire, amit a matematikusok fantáziája adhat, bár nem fogunk elvont matematikai szimbólumokat használni. Több erőfeszítést kell tennünk, mint a Valószínűtlenség Hegye megértésénél – de meg is lesz az eredménye. *A vak órásmesterben tettem rövid kirándulásokat a „genetikai térbe”, a „biomorfok földjére” és „az állatok földjén keresztülvezető nyomokat” követve.* A közelmúltban Daniel Dennett filozófus hatolt be mélyebben erre az ismeretlen földre, melyet – költői utalással Borges bábeli könyvtárára – Mendeli Könyvtárnak nevezett el. A következő fejezetben a zoológiai képzelet hatalmas múzeumában fogunk kalandozni.

Képzeljünk el egy múzeumot, melynek termei elnyúlnak a látóhatár minden irányába, sőt felfelé és lefelé is, ameddig csak a szem ellát. A múzeumban megtalálható minden állati forma, mely valaha is létezett, sőt azok is, amelyeket el lehet képzelni. Minden állat azok mellett található, amelyikekre a legjobban hasonlít. A múzeum minden dimenziója – vagyis minden irány, amerre termei elnyúlnak – megfelel egy-egy iránynak, amerre az állat változhat. Ha pl. egy adott teremsoron északi irányban megyünk, a termekben található fajok szarva egyre hosszabb lesz. Ha megfordulunk, és dél felé indulunk, a szarvak egyre rövidülnek. Ha kelet felé indulunk, a szarvak nem változnak, de változik valami más, pl. a fogak egyre élesebbek lesznek. Nyugat felé indulva a fogak egyre tompábbak. Mivel a szarvméret vagy a fogélesség csak kettő azon változók ezrei közül, amelyekben egy állat változhat, a teremsorok összevissza keresztveződnek a sokdimenziós térben – nemcsak a megszokott háromdimenziósban, amit korlátolt képességű agyunk látni bír. Erre gondoltam, amikor azt mondtam, hogy meg kell tanulnunk matematikusként gondolkodni.

Mit jelent négy dimenzióban gondolkodni? Tegyük fel, hogy antilopokról beszélünk, és négy változó tulajdonságukat mérjük: szarvhossz, a fogak élessége, a belek hossza és a szőrzet hossza. Ha ezek közül egyet figyelmen kívül hagyunk – pl. a szőrzetet –, minden antilopunkat elhelyezhetjük egy háromdimenziós gráf- egy kocka – megfelelő pontján a maradék három változó, a szarvhossz, a fogak élessége és a belek hossza alapján. Hogyan jelenítsük meg a negyedik dimenziót, a szőrzet hosszát? Készítünk egy kockát a rövid szőrű, egyet a kicsit hosszabb szőrű, majd a még hosszabb szőrű és így tovább antilopok számára. Minden antilop esetében először megkeressük a szőrhossznak megfelelő kockát, majd azon belül elhelyezzük a szarvának, fogának és belének megfelelő pontra. A szőrzet a negyedik dimenzió.

Elméletben a végtelenségig folytathatjuk kockacsaládok, kocka-kockák és kocka-kocka-kockák építését – míg el nem helyeztük állatainkat a sokdimenziós térben.

Hogy legyen némi fogalmunk arról, hogy hogyan képzeljük el a Minden Állatok Múzeumát, ebben a fejezetben bemutatok egy olyan esetet, ahol többé-kevésbé megelégedhetünk három dimenzióval. A következő fejezetben visszatérek arra az ellentmondásra, amivel ezt a fejezetet megnyitottam, és próbálok építő módon közelíteni a másik félhez (elfogultságom közismert). Az ebben a fejezetben tárgyalásra kerülő háromdimenziós speciális eset a csigaházak és más csavart héjak esete. A héjak terméi azért „férnek el” három dimenzióban, mert a héjak fontosabb változatai mindössze három szám változtatásával leírhatók. A következőkben David Raup, a Chicagói Egyetem neves paleontológusának lépteit követem. Raupot viszont D’Arcy Wentworth Thompson, a régi, híres St. Andrew’s-i Skót Egyetem nagynevű professzora ihlette, akinek *A növekedésről és a formáról* című, először 1919-ben kiadott műve a huszadik században állandó, ha nem is központi hatást gyakorolt a zoológusok gondolkodására. A biológia kisebb tragédiáinak egyike, hogy D’Arcy Thompson a számítógépek korának küszöbén halt meg – nagyszerű könyvének szinte minden oldala számítógépért kiált. Raup írt egy héjformaalkotó programot, jómagam e fejezet illusztrálása céljából egy hasonlót – mint várható – egy Vak Órásmester-típusú mesterséges szelekciós programba ágyazottan.

A csigák és más puhatestűek, valamint a pörgekarúaknak nevezett, a puhatestűekkel nem rokon, de azokra felszínesen hasonlító teremtmények héjai mind ugyanolyan módon növekszenek – másként, mint mi. Mi kicsiként kezdjük életünket, és minden részünk növekszik (némelyek gyorsabban, mint a többi). Egy emberből nem vágható ki az a darab, ami csecsemőkorában volt. Egy puhatestű héjából viszont igen. A puhatestű héja is kicsiként kezd, de csak a szélein növekszik – tehát a felnőtt héj középső része a csecsemőhéj. Minden állat magával hordja saját csecsemőkori képét – héjának központi részét. A sötétkamraszeme miatt már említett *Nautilus* héja levegőt tartalmazó lebegtető kamráit sorozatából áll, kivéve a növekvő héj legnagyobb, legutolsónak épült kamráját, melyben az állat lakozik (6.1. ábra).

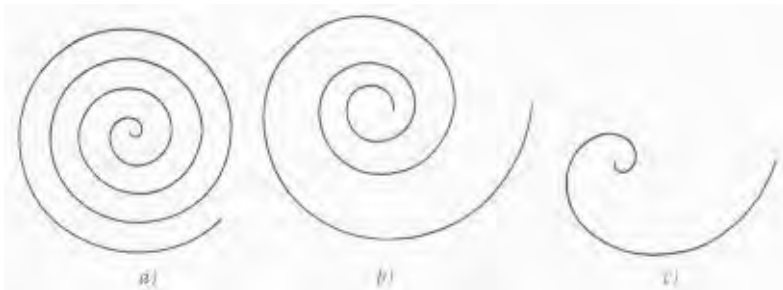
A széleken való növekedési mód eredményeképp az összes héj alapszabása megegyezik: az ún. logaritmikus vagy egyenlő szögű csigavonal (spirál) kézzelfogható példái. A logaritmikus csigavonal más, mint az arkhimédészi, mely akkor keletkezik, ha a matróz felteker egy kötelet a fedélzeten. Mindegy, hány csavarulat van, mindegyik ugyanolyan széles – mint maga a kötél. A logaritmikus csigavonal azonban középpontjától távolodva egyre nyílik. A különböző csigavonalak „emelkedése” eltérő, de egy csigavonalon belül mindig állandó. A 6.2. ábrán bemutatunk egy arkhimédészi, valamint egy kis és nagy emelkedésű logaritmikus csigavonalat.

A héj nem vonalként, hanem csőként növekszik. Egy cső keresztmetszete nem feltétlenül kör alakú, mint egy franciakürt, de egyelőre tételezzük fel, hogy az. Tételezzük fel azt is, hogy a rajzon szereplő csigavonal a cső külső szélét jelenti. A cső keresztmetszete történetesen éppen olyan ütemben növekszik, hogy belső széle pontosan illeszkedjen a csigavonal előző kanyarulatára, mint az a 6.3a ábrán látható. Mindez nem szükségszerű, hogy így legyen. Ha a cső átmérője lassabban növekszik,

mint a csigavonal külső széle, az egymásra következő kanyarulatok között egyre szélesebb rés keletkezik (6.3b ábra).



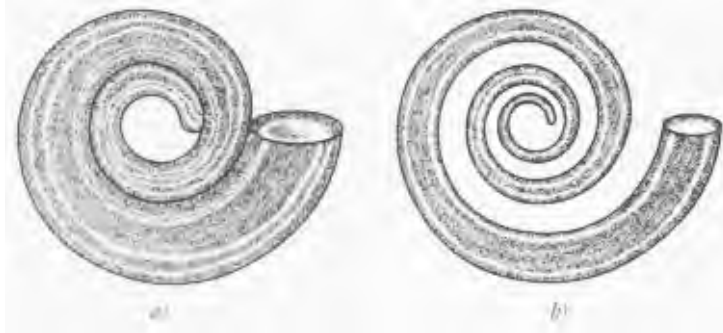
6.1. ábra. *Nautilus* héjának metszete. Az állat a legnagyobb, legújabb kamrában él.



6.2. ábra. Csigavonaltípusok: a) arkhimédészi csigavonal; b) kis emelkedésű logaritmikus csigavonal; c) nagy emelkedésű logaritmikus csigavonal

Minél „lazább” a csigavonal, annál inkább féreg, mint csiga lakásának lesz alkalmas.

Raup a csigavonalakat három értékkel jellemezte, melyeket W-nek, D-nek és T-nek nevezett el. Remélem, senki sem botránkozik meg azon, ha ezeket átnevezem *kiöblösödésnek*, *kucacnak* és *tornyosságnak*, mert ezeket könnyebb megjegyezni, mint a puszta betűket. A *kiöblösödés* a csigavonal vastagodásának mértéke. Ha a *kiöblösödés* értéke 2, a csigavonal egy kanyarulat alatt kétszeresére vastagszik. Ilyen a 6.2b ábra csigavonala: minden kanyarulat során megduplázódik a szélessége. A 6.2c ábrán látható csigavonal sokkal nyitottabb, *kiöblösödése* 10. Minden teljes körben a csigavonal szélessége tízszeresére nő (bár a valóságban a csigavonal véget ér, mielőtt egy teljes kört megtenne). Még egy szívkgagylónak is, ami olyan gyorsan nyílik, hogy nem is gondolunk arra, hogy tulajdonképpen csigavonal, van *kiöblösödésértéke*: ezres nagyságrendű.



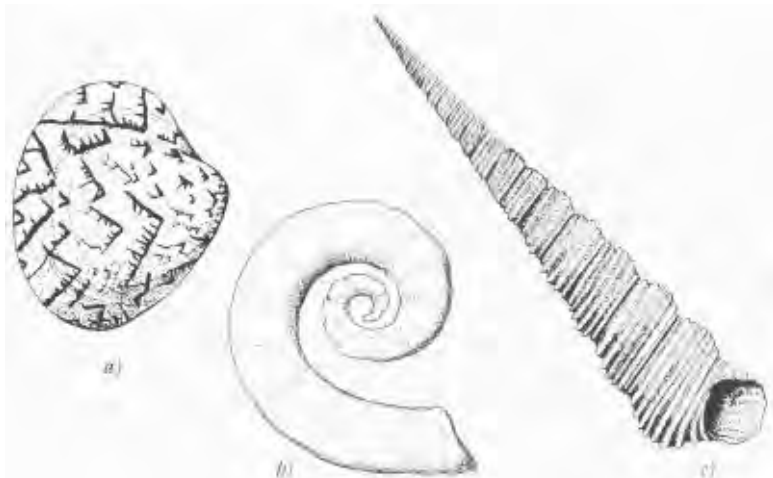
6.3. ábra. Két egyformán csavarodó, de eltérő csőméretű csigavonal:

- a) a cső elég vastag ahhoz, hogy kitöltse az egymás után következő kanyarulatok közti teret;
 b) a cső olyan keskeny, hogy a kanyarulatok közötti rész marad

A *kiöblösödés* leírásakor gondosan ügyeltem arra, hogy ne azt mondjam: ez a cső átmérőjének növekedési rátája. Itt jön be második jellemzőnk, a *kukac*. A csőnek ugyanis nem feltétlenül kell résmentesen kitöltenie a kanyarulatok közötti teret. A héj „laza” is lehet, mint a 6.3b ábrán látható. A 6.3a és 6.3b *kiöblösödésértéke* megegyezik (2), de a 6.3b *kukaca* magasabb (0,7), mint a 6.3a-é (0,5). A 0,7 *kucacérték* azt jelenti, hogy a csigavonal közepétől a kanyarulat belső széléig mért távolság a kanyarulat külső széléig mért távolság 70%-a. Mindegy, hogy a csigavonal mely részén mérünk, a *kukac* értéke állandó (bár nem feltétlenül kellene így lennie, a tapasztalatok szerint a valódi héjak jó részénél igaz, így ha mást nem kötünk ki, ezt tételezzük fel). Könnyen belátható, hogy a nagyon magas *kukacérték*, pl. 0,99 nagyon vékony, fonálszerű csövet jellemez, hiszen a cső belső szegélyének a központtól mért távolsága 99%-a a külső szél távolságának.

Milyen *kukacérték* biztosítja a 6.3a ábrán látható résmentes illeszkedést? Ez a *kiöblösödés* értékétől függ. Egészen pontosan a résmentes illeszkedés kritikus *kukacértéke* pontosan a *kiöblösödés* reciproka (1 osztva a *kiöblösödés* értékével). A 6.3. ábra mindkét csigavonalának *kiöblösödése* 2, a résmentes illeszkedés *kukaca* tehát 0,5 – ezt látjuk a 6.3a ábrán. A 6.3b ábra csigavonalán a *kukac* nagyobb, mint a „résmentes illeszkedés”-nek megfelelő érték, ezért ez a csigavonal „laza”. Ha a 6.2c ábrához hasonló csigavonalat nézünk, ahol a *kiöblösödés* értéke 10, ott a kritikus *kukacérték* 0,1 lesz.

Mi van, ha a *kukac* értéke kisebb, mint a résmentes illeszkedésnek megfelelő érték? El tudunk képzelni egy olyan vaskos csövet, mely túlmegy a résmentes illeszkedésen, és „elnyeli” az előző kanyarulatot – pl. a 6.3. ábrához hasonló csigavonalakat mondjuk 0,4-es *kucac*-al? Két megoldás is lehetséges. Az egyik, hogy megengedjük, hogy a cső magába foglalja a korábbi kanyarulatot. Ezt teszi a *Nautilus*. Következménye az, hogy a cső keresztmetszete már nem kör, hanem egy darabot „kiharaptak” belőle. Ez azonban nem baj, hiszen emlékezzünk: mesterséges kikötés volt csupán, hogy a cső mindig kör keresztmetszetű. Sok puhatestű boldogan él olyan héjakban, melyek keresztmetszete egyáltalán nem kör alakú; később még foglalkozunk velük. A csövek nem kör keresztmetszetét sok esetben a legkönnyebb azzal magyarázni, hogy magukba foglalnak korábbi kanyarulatokat.

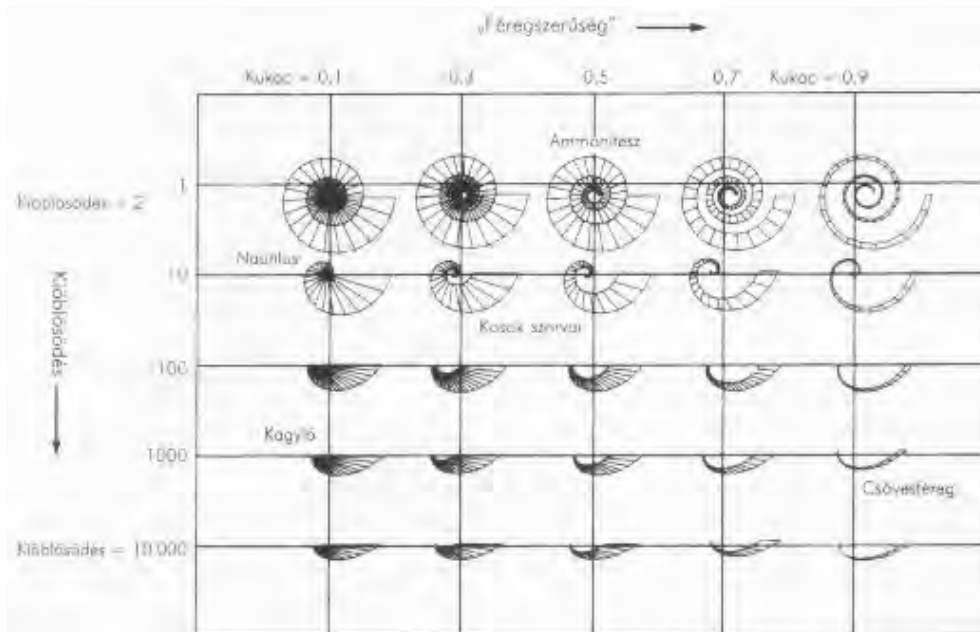


6.4. ábra. A kiöblösödés, kukac és tornyosság jellemzőket bemutató héjak:
 a) nagy kiöblösödés: *Liconcha acastrensis* kagyló; b) nagy kukac: csigáspolip (*Spirula*)
 c) nagy tornyosság: *Turritella terebra*

A korábbi kanyarulatok „elnyelése” kikerülhető úgy is, hogy a csigavonal kiemelkedik a síkból. Itt lesz szükségünk a harmadik csigavonal-jellemző számra, a *tornyosságra*. Gondoljunk csak el, hogy a növekvő csigavonal oldalra elmozdul és kúpot alakít ki. A *tornyosság* azt jellemzi, hogy az egyes kanyarulatok milyen „gyorsan” haladnak a kúp csúcsa felé. A *Nautilus tornyosságértéke* 0: minden kanyarulata egy síkban van.

Van tehát három számszerű jellemzőnk: a *kiöblösödés*, a *kukac* és a *tornyosság*. (6.4. ábra). Ha ezek egyikét, pl. a *tornyosságot*, figyelmen kívül hagyjuk, a másik kettő grafikonját elkészíthetjük egy sík papírlapon. A grafikon minden egyes pontjának megvan a maga jellemző *kiöblösödés*- és *kukacértéke*: számítógépünket beprogramozhatjuk, hogy ezek alapján megrajzolja az adott pontnak megfelelő héjat. A 6.5. ábra e grafikon 25, szabályos elrendezésű pontját mutatja be. Balról jobbra haladva a *kukac* értékének növekedésével a számítógépes héjak egyre „féregszerűbbek” lesznek, fentről lefelé haladva a *kiöblösödés* nő, a csigavonal egyre nyitottabbá válik, míg végül már nem is tűnik csigavonalnak. A jól látható kinyílás érdekében a *kiöblösödés* növekedését logaritmikusnak vettük. Ez azt jelenti, hogy minden lépés lefelé egy adott számmal (jelen esetben tízzel) való *többszöröződést* jelent, nem pedig *hozzáadást*, mint egy lineáris ábra, pl. a *kukacértékek* esetében. Azért van erre szükség, hogy egy ábrán mutathassunk be pl. szívragylókat (a kép bal alsó sarkában; *kiöblösödésértékük* ezres nagyságrendű, kis változtatások nem sokat jelentenének), ammoniteszeket és csigákat (melyek *kiöblösödése* rendszerint kis egész szám, melynek kis változása is sokat jelent). Az ábra különböző részein ammoniteszekhez, *Nautilus*hoz, kagylóhoz, csigáspoliphoz és csövesféreghez hasonló alakzatokat látunk – e neveket fel is írtam a kb. nekik megfelelő helyre.

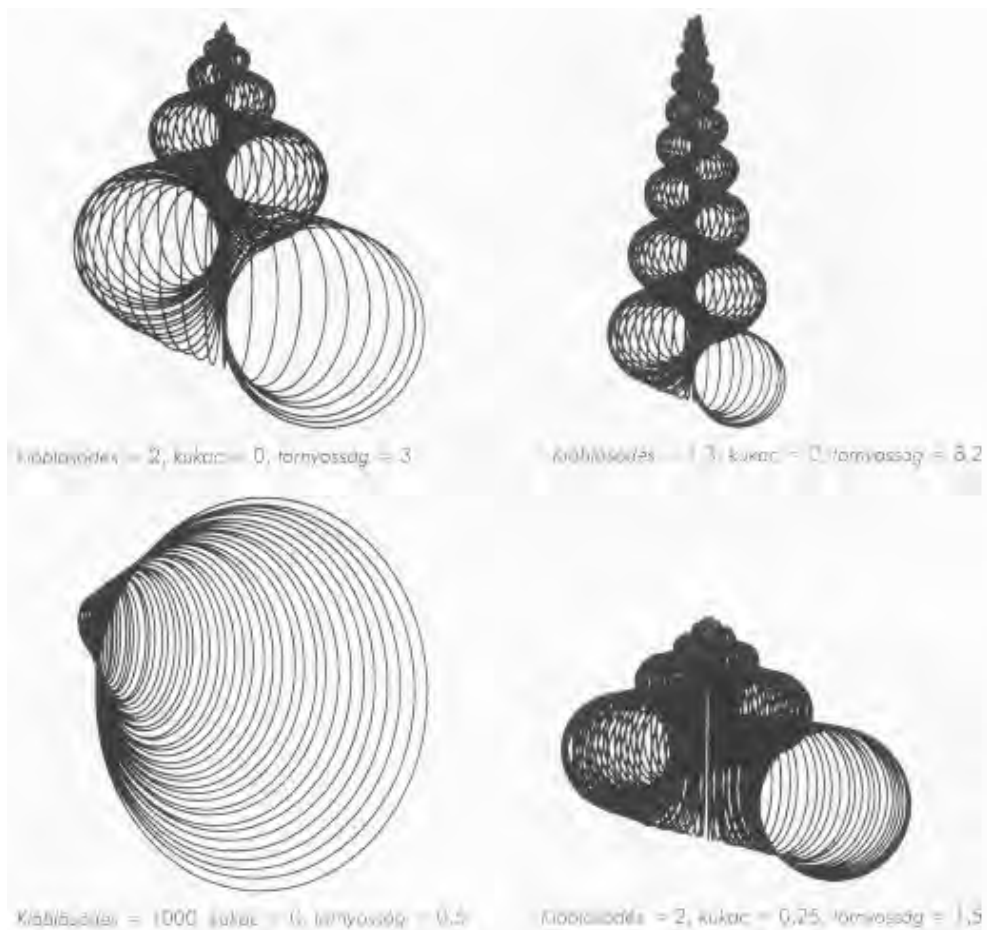
Számítógépes programom két nézetben képes megjeleníteni a héjakat. Az egyik a 6.5. ábrán látható, a csigavonal alakját hangsúlyozó nézet.



6.5. ábra. Szabályosan változó kiöblösödés- és kukacértékekkel jellemzett számítógépes héjak táblázata. A harmadik dimenzió, a *tornyosság* változása ezen az ábrán nem látható. A *kiöblösödés*tengely logaritmikus: minden egységnyi lépés lefelé a *kiöblösödés* értékének tízszeresödését jelenti. A *kukac*tengelyen egy lépés a „férégszerűség” egységnyi érték hozzáadásával való növekedését jelenti. Néhány valódi állat nevét a nekik megfelelő részen tüntettük fel.

A másik a 6.6. ábra „keresztmetszeti” vagy „röntgenkép” ábrázolásmódja, amely a héj szerkezetét hangsúlyozza. A 6.7. ábrán valódi héjak röntgenképe mutatja ennek az ábrázolásmódnak a természetét. A 6.6. ábra számítógépes és a 6.4. ábra valódi héjai úgy lettek kiválasztva, hogy bemutassák a *kiöblösödés*, *kukac* és *tornyosság* különböző értékeit. A 6.8. ábra a 6.5.-öshöz hasonló táblázat, csak a héjakat itt röntgenképként ábráztuk, a tengelyek pedig nem *kiöblösödés* és *kukac*, hanem *kiöblösödés* és *tornyosság*.

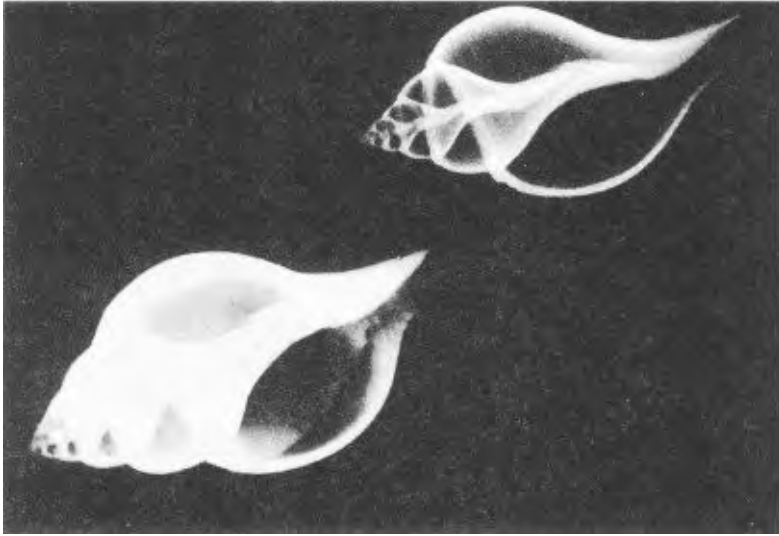
Vehetjük tengelyként a *kukac*ot és a *tornyosság*ot is, de nem pazarlom erre a helyet, inkább egyenesen áttérek Raup nevezetes kockájára (6.9. ábra). Egy héj leírásához (kivéve a cső keresztmetszetének alakját) három szám szükséges, ezért minden héj elhelyezhető egy háromdimenziós kockában a neki megfelelő helyen. A Lehetséges Héjak Múzeuma, szemben pl. a Lehetséges Medencecsontok Múzeumával, egyszerű kockaház. Minden dimenziója megfelel a fenti jellemzők egyikének. Ha elindulunk a Lehetséges Héjak Múzeumában a mondjuk a *kukac* *dimenziót* jelentő északi irányban, egyre „férégszerűbb” héjak között fogunk haladni, míg minden más állandó marad. Ha balra fordulva nyugat felé haladunk tovább, egyre nőni fog a *tornyosság* értéke, egyre inkább kúp alakúak lesznek, míg a többi tulajdonságuk változatlan marad. Végül ha nem megyünk se északra, se délre, se keletre, se nyugatra, hanem függőlegesen felfelé kezdünk mászni – ez a *kiöblösödés* dimenziója –, egyre jobban kinyíló héjakat találunk.



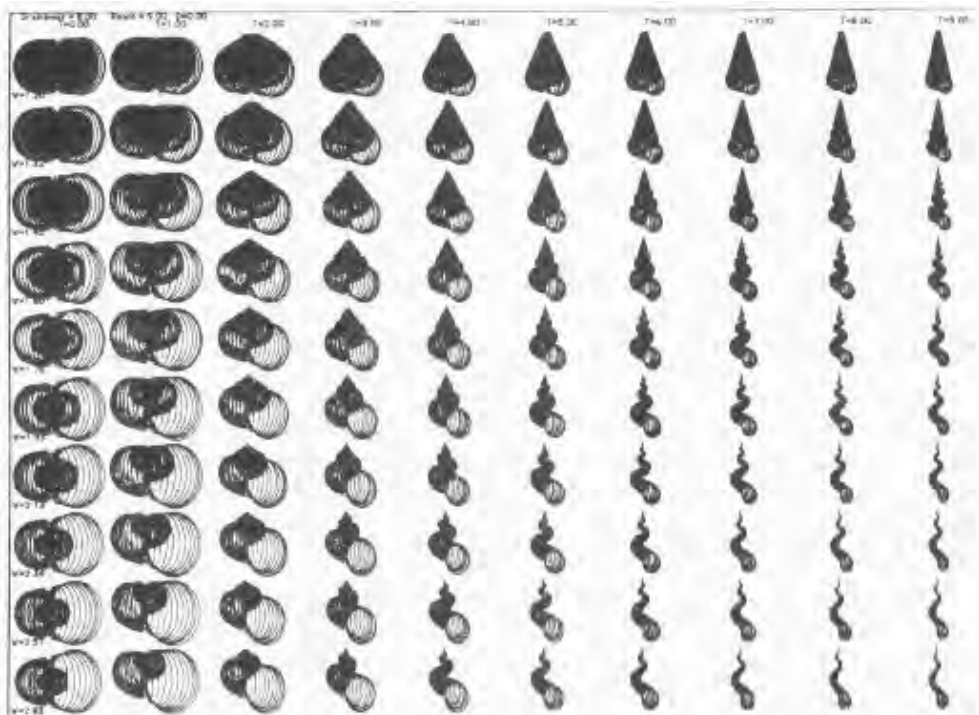
6.6. ábra. Négy számítógépes héj „röntgenképe”:
különböző *kiöblösödés*-, *kukac*- és *tornyosság*értékek

Megfelelő irányban keresztülhaladva a kockán bármilyen héjhoz eljuthatunk úgy, hogy közben folytonosan változó átmeneti alakok között haladunk végig. A 6.5. és 6.8. ábrák Raup kockája két lapjának tekinthetők. A kocka bármely, tetszőleges szögben készült metszetét megjeleníthetjük a papír síkján.

Az én programomhoz ötletet adó eredeti programot Raup írta. Megjelentetett ábráján nem azzal a lehetetlen feladattal vesződik, hogy egyszerre bemutasson minden lehetséges héjat, hanem csak bizonyos pontokra összpontosítja figyelmét. A 6.9. ábra körüli képek azokat az elméleti héjakat mutatják be, amelyek a tér adott pontjaihoz tartoznak. Némelyikük olyan, mint egy valódi héj, amit a tengerpart homokjában gyűjthetünk. Mások semmilyen földi héjhoz nem hasonlítanak, mégis benne vannak a lehetséges számítógépes héjak terében. Raup árnyékolással jelölte azokat a térrészeket, ahol a valódi héjak találhatóak.



6.7. ábra. Valódi héj röntgenképe

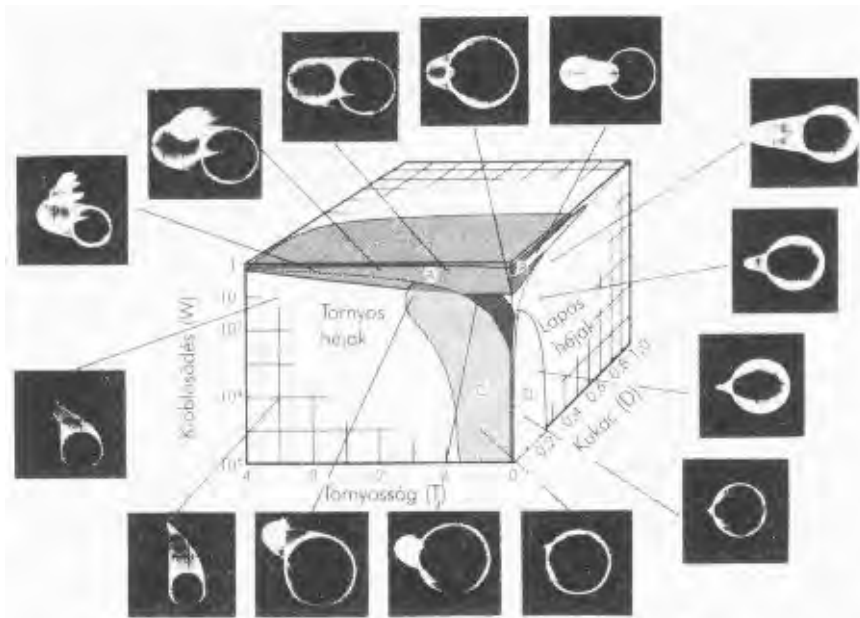


6.8. ábra. Számítógépes héjak táblázata („röntgenképek”) a *kiöblösödés* (W , függőleges tengely) és a *tornyosság* (T , vízszintes tengely) függvényében. A 6.5. ábrához hasonlóan a *kiöblösödés* tengely logaritmikus beosztású, de csak alacsony értékeit ábráztuk – itt nincsenek nagyon kinyíló héjak.

Az ammoniteszeknek, a *Nautilus*ok e valaha oly közönséges rokonainak, amelyek a jelek szerint éppoly szomorú véget értek (bármilyen volt is az), mint a dinoszauruszok, felcsavarodott, de a csigákéval ellentétben szinte tökéletesen kétdimenziós héjuk volt, vagyis *tornyosság*értékük nulla, legalábbis tipikus képviselőik esetében. Csodálatos módon azonban néhányuk, pl. a kréta korban élt *Turritis* nemzetség magas *tornyosság*értékű héjat fejlesztett ki – vagyis független módon felfedezte a csigaformát. E kivételes alakoktól eltekintve az ammoniteszek a Héjak Múzeuma keleti fala mentén lakoznak (a „keleti”, „déli” elnevezések természetesen csupán diagramunk mesterséges címkéi). A tipikus ammoniteszek nem foglalnak el többet, mint a keleti fal déli fele, azt is csupán a legfelső emeleteken. A csigák és rokonaik területe átfed az ammoniteszek folyosójával, de elnyúlik messze nyugat felé is (*tornyosság* dimenzió), és kicsit alsóbb emeleteken is megtalálhatók. Az alacsonyabb szintek többségét – ahol a *kiöblösödés* értéke nagy, a héj gyorsan kinyílik – a kettős héjú lények két nagy csoportja foglalja el. A kagylók kicsit nyugat felé nyújtózkodnak – héjukban van egy kis csigaszerű csavar, de olyan gyorsan nyílik ki, hogy egyáltalán nem hasonlít a csigaházhoz. A pörgekarúak – mint már mondtam, nem tartoznak a puhatestűek közé, de felszínesen hasonlítanak a kagylókra – az ammoniteszekhez hasonlóan egy síkban „csavarodnak”. A kagylókhoz hasonlóan a pörgekarúak csövei is teljesen kinyílnak, még mielőtt említésre méltó „csavarulatuk” keletkezne.

Bármely evolúciós történet nem más, mint egy útvonal a Minden Lehetséges Héjak Múzeumában. Ennek szellemében a héjrajzoló programot beleépítettem a Vak Órásmesterbe, a nagy mesterséges szelekciós programba. A Vak Órásmester-program faépítő embriológiáját egyszerűen kicseréltem a héjépítő embriológiára. Az új program neve Vak Csigásmester. A mutációt a múzeumban tett apró lépések jelentik – emlékezzünk vissza, hogy minden héjat hozzá hasonlók vesznek körül. A programban mindhárom héjjellemző szám egy-egy génhely, ahol a számérték változhat. Van tehát három különböző típusú mutációnk: a *kiöblösödés*, a *kukac* és a *tornyosság* értékének apró változásai, melyek bizonyos határok között pozitívak és negatívak egyaránt lehetnek. A *kiöblösödés* gén minimális értéke 1 (különben a héj nem növekedne, hanem zsugorodna), maximuma nincs. A *kukac*gén értéke 0-nál nagyobb, egynél kisebb törtszám (1 már nem lehet, mert ez már nem létezően vékony csövet jelentene). A *tornyosság* értékének semmiféle korlátja nincs: a negatív *tornyosság* értelemszerűen lefelé fordított héjat jelent. Az eredeti Vak Órásmester programhoz hasonlóan a Vak Csigásmester a képernyő közepén megjelenít egy szülőhéjat, körülötte pedig ivartalan szaporodással létrejött utódainak csoportját – random mutációban különböző szomszédait a Minden Héjak Múzeumából. A kiválogatást végző ember rákattint arra a héjra, amelyet tovább szeretne tenyészteni. Ez beúszik a központi, szülői helyre, és a képernyőn megjelennek utódai. A folyamat addig halad, míg a tenyésztőnek tart a türelme. Úgy érezzük, mintha lassan végigsétálnánk a Minden Héjak Múzeuma termeiben. Néha ismerős héjak között sétálunk, mintha csak a tengerparton lennénk. Máskor elhagyjuk a valóság határait, és kilépünk a matematikai térbe, sosem volt héjak birodalmába.

Korábban már említettem, hogy bár lényegében minden héj leírható három számmal, ennek során tettünk egy egyszerűsítő feltételezést, ami nem igaz: hogy minden héj csövének keresztmetszete kör alakú.



6.9. ábra. Raup kockája. David M. Raup háromdimenziós grafikont szerkesztett, ahol a függőleges tengelyen a (W-vel jelölt) *kiöblösödés*, a jobbról balra tartó tengelyen a *tornyosság* (T), a lap mélyébe nyúló tengelyen pedig a *kukac* (D) értékét tünteti fel. A kocka kulcsfontosságú pontjain ábrázolja a megfelelő számítógépes héjak „röntgenképeit”. Árnyékolás jelzi a kocka azon térrészeit, ahová valódi héjak tartoznak. Az árnyékolatlan részekbe olyan héjak tartoznak, melyek elméletileg elképzelhetők, de a valóságban nem bukkantak rájuk.

Általános érvényű szabálynak tűnik, hogy a kinyíló cső alakja változatlan, de nem feltétlenül kör. Lehet pl. ovális is, ezért számítógépes modellem tartalmaz még egy gént, az *alakot*, melynek értéke egy tört: az ovális magassága osztva annak szélességével. Kör esetében az *alak* értéke 1. Az *alak* gén meglepő mértékben fokozza a számítógépes héjak hasonlatosságát a valódiakhoz. De még ez sem elég. A valódi héjak keresztmetszete a körön és az oválison kívül bonyolultabb formákat is felvehet, melyek matematikai módon csak igen bonyolultan írhatók le. A 6.10. ábrán olyan héjakat mutatok be, melyek nemcsak a héjmúzeum különböző szögleteiből származnak, de csövíük keresztmetszete is bonyolult, nem kör alakú.

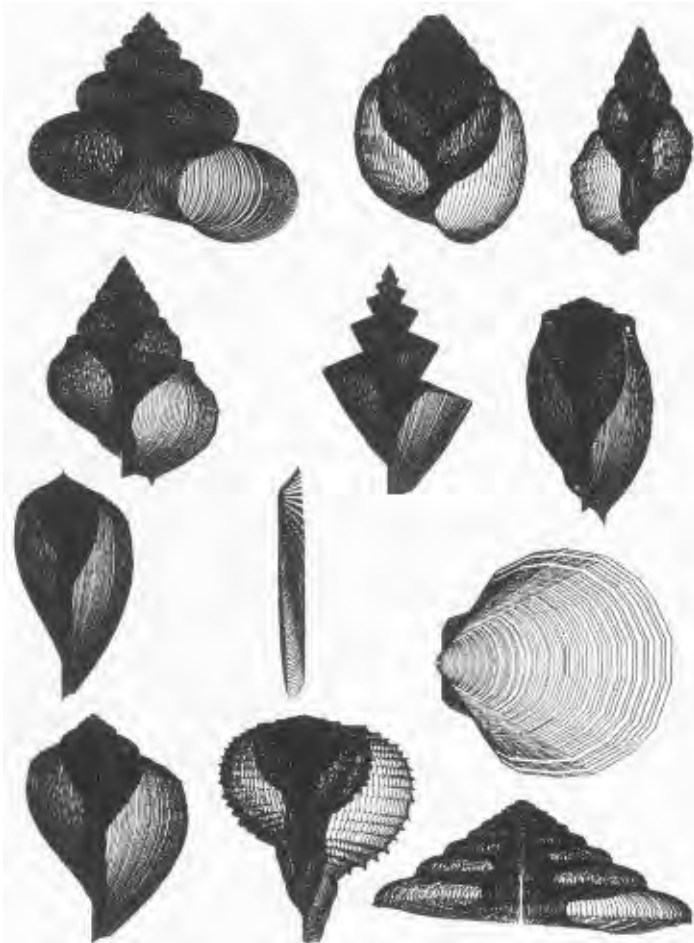
A Vak Csigásmester programba ezt a változatosságot – meglehetősen durva módon – úgy próbáltam beépíteni, hogy kész keresztmetszetek sorát kínálom fel. Ezek az *alak* gén – mutációval változtatható – értéke szerint vízszintes vagy függőleges irányban nyújthatók. A program ezután az így nyert keresztmetszetű csövet csavarja fel ugyanúgy, mint a kör keresztmetszetével tette. A feladat megoldásának elegánsabb útja lenne – majd egyszer meg is próbálkozom vele – magának a növekedési folyamatnak a beprogramozása oly módon, hogy a széleken nem egyenletes módon növekedve

jönnének létre a díszes formák. Addig is a 6.11. ábrán bemutatom a jelenlegi programmal, emberi szemmel végzett természetes szelekcióval létrehozott számítógépes héjak „állatkertjét”. A tenyésztés célja az volt, hogy hasonlítsanak valódi héjakra, pl. a 6.10. ábrán láthatókra, vagy olyanokra, amikre a tengerparton sétálva vagy búvárkodás közben bukkanhatunk.

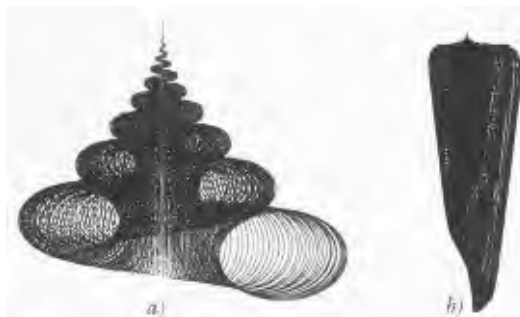
A csó keresztmetszetének alakját úgy is tekinthetjük, mint a Minden Héjak Múzeuma egy (vagy több) újabb dimenzióját. Ha ezekről most ismét elfeledkezünk, és visszatérünk korábbi, egyszerűsítő feltételezésünkhöz, a kör keresztmetszethez, a héjak egyik gyönyörű tulajdonsága, hogy könnyedén elhelyezhetők a három dimenzióban felrajzolható Minden Lehetséges Formák Múzeumában. Ez persze nem jelenti azt, hogy e múzeum minden termékét létező élőlények népesítik be. Mint láttuk, a valóságban a múzeum nagy része üres. Raup árnyékolással jelölte az életteli részeket (6.9. ábra) – ezek a kocka térfogatának kevesebb, mint a felét teszik ki.



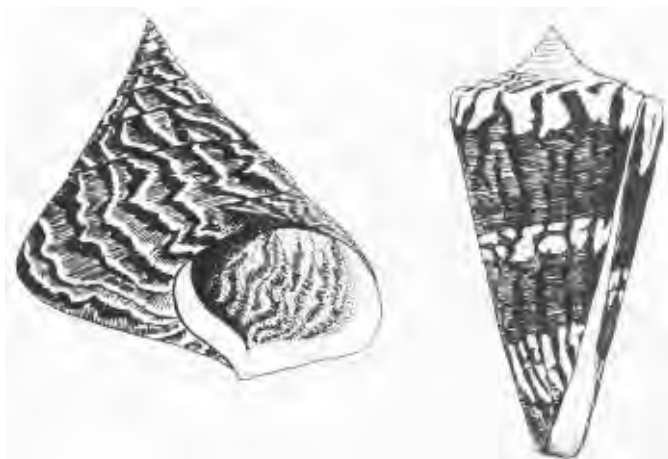
6.10. ábra. Különböző keresztmetszetű valódi héjak (a bal felsőtől az óramutató járásával megegyező irányban): foltos kürtcsiga (*Cominella adspersa*); balog neptuncsiga (*Neptunia contraria*); japán csodacsiga (*Thatcheria mirabilis*); foltos buborékcsga (*Acteon eloisae*); nagy répacsga (*Rapa rapa*); nagy fésűkagyló (*Pecten maximus*); karcsú fügecsiga (*Ficus gracilis*)



6.11. ábra. Különböző keresztmetszetű, a Vak Csigásmester programmal előállított számítógépes héjak „állatkertje”. A mesterséges szelekció alapja az volt, hogy mennyire hasonlítanak valódi héjakhoz, pl. a 6.10. ábra héjainak némelyikéhez.



6.12. ábra. a) számítógépes csiga; b) számítógépes kúpcsigája, a *tornyosság* gén értékének fokozatos változtatása eredményeképp kialakult tühegyes csúccsal



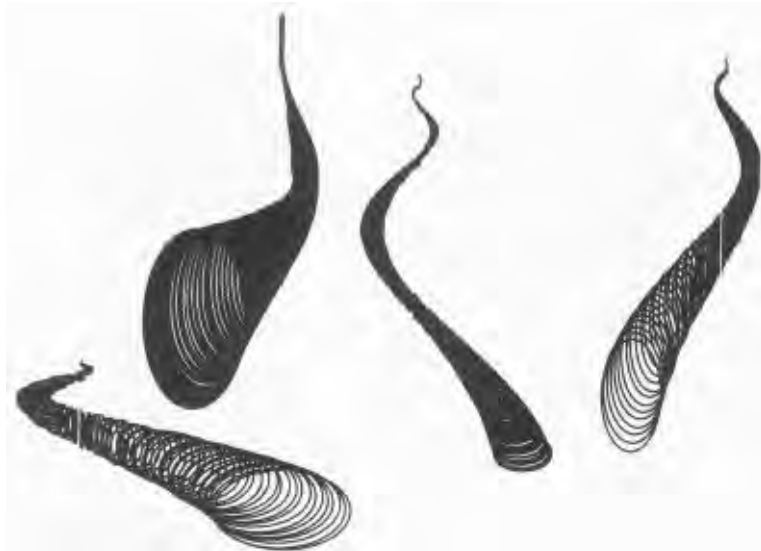
6.13. ábra. Valódi héjak, melyek – az előző ábra héjaihoz hasonló – hegyes csúcsa arra utal, hogy *tornyosságértékük* növekedésük során változott. Balra: csíkos pörgettyűcsiga (*Maurea tigris*); jobbra: generális kúpcsigája (*Conus generalis*)

Északi és nyugati irányban termék hosszú-hosszú sora nyúlik el, telve olyan héjakkal, amelyek a matematikai modell szerint létezhetnének, ám emberi szem még sosem pillantotta meg őket. Vajon miért nem? És ha már ilyeneket kérdezzünk, a létező héjak miért rendezhetők el ebben a kockaszerű épületben?

Milyen lenne az a héj, amely nem helyezhető el matematikai modellünk termeiben? A 6.12a ábra mutat erre egy számítógép alkotta példát. A *tornyosság* értéke itt nem állandó, hanem a héj növekedése során változik. A héj újabb, szélesebb részeinek *tornyosságértéke* alacsonyabb, mint a korábban kialakult, keskenyebb részeké, ezért van a héjnak „természetellenes”, valószínűleg nagyon sérülékeny hegyes csúcsa. Ez egy elméleti csiga, csak a számítógépben létezik. A 6.12b ábra „kúpcsigája” is természetellenesen hegyes csúcsú. Ezt is a Vak Csigásmester rajzolta, de a program szerint a *tornyosság* értéke nem állandó volt, hanem csökkent a növekedés során.

A 6.13. ábrán valódi héjak láthatók. Gyanítom, hogy ezek *tornyosságértéke* is változó, vagyis fiatal korukban magas volt, majd koruk előrehaladtával fokozatosan csökkent. Raup szerint egyes valódi ammoniteszeknél megfigyelhető, hogy héjjellemző

számaik értéke változott az élet folyamán. Mondhatjuk, hogy ezek a furcsa héjak életük során átvándoroltak a múzeum egyik pontjáról a másikra, de mindig a múzeumban vannak. De azt is mondhatjuk, hogy mivel a fiatalkori test része az időskorinak, az egész test a múzeum egyetlen termébe sem illik be. Vitatkozhatunk arról, hogy a 6.13. ábra állatai beleférnek-e múzeumunk három dimenziójába. Geerat Vermeij szerint, aki napjainkban a héjas állatok zoológiájának egyik legnevesebb szakértője, az, hogy a jellemző számok az állat élete során változnak, inkább általános szabály, semmint kivétel. Más szavakkal úgy gondolja, hogy a legtöbb puhatestű élete során arrébb mászik a múzeumban – legalább egy kicsivel.



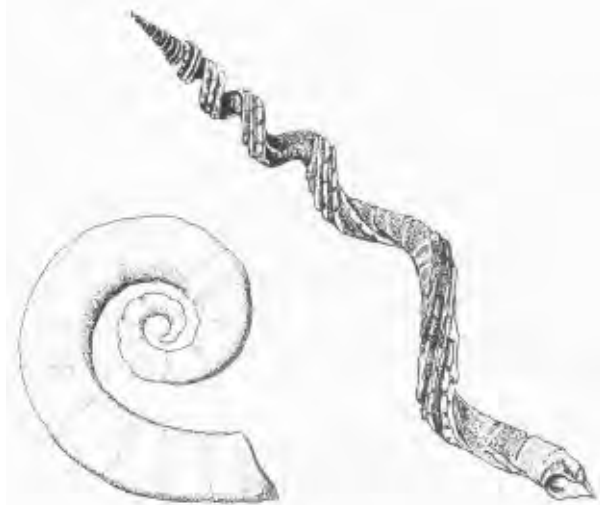
6.14. ábra. Elméleti héjak, melyek sohasem léteztek – legfeljebb antilopok fején

Nézzük most a kérdés másik felét: miért hiányoznak a múzeum oly sok terméből a valódi héjak? A 6.14. ábrán látunk néhány számítógépes héjat e „senkiföldje” szívéből. Némelyikük takaros éke lehetne egy bölény vagy antilop fejének – a puhatestűek héjai között azonban még senki sem látott hasonlót. Ha megkérdezzük, miért nincsenek ilyen alakú héjak, visszajutottunk kiindulópontunkhoz: vajon az evolúciót a rendelkezésre álló változatok szegényessége korlátozza, vagy a természetes szelekció valami miatt „nem akar” belépni ezekre a területekre? Raup maga szelekcionista módon értelmezi az üres termeket (ábrája árnyékolatlan tartományait). Nincs olyan szelekciós nyomás, mely bekényszeríti az állatokat ezekre a területekre. Más szavakkal kifejezve: ezek az elméletileg lehetséges alakú héjak az élet gyakorlatában nem bizonyulnának megfelelőnek: talán gyengék és könnyen összetörnek, vagy más okból sérülékenyek; esetleg nem elég gazdaságos az anyagkihasználásuk.

Más biológusoknak az a véleményük, hogy azok a mutációk, melyek segítségével be lehetne lépni ezekbe a termekbe, egyszerűen sohasem jöttek létre. Ezt úgy fogalmazhatjuk másként, hogy az elképzelhető héjak tömbje, amit felrajzoltunk, valójában nem ábrázolja hűen minden lehetséges héjak terét. E nézet szerint e tömb nagy része akkor is elérhetetlen, ha a túlélés szempontjából előnyös lenne. Saját

megérzésem azt súgja, hogy Raup szelekcionista magyarázata lehet a helyes, de ezt nem kívánom itt tovább részletezni, hiszen a héjak példáját csak azért hoztam fel, hogy megértessem: mit értünk a lehetséges állatok matematikai terén.

Nem hagyhatom el e „senkiföldjét” anélkül, hogy röviden meg ne emlékeznék néhány valóban létező furcsaságról. A *Spirula* kis testű, úszó lábasfejű (ide tartoznak a tintahalak és az ammoniteszek), a *Nautilus* rokona. Felnyílt héjának *kukacértéke* magas (nagyobb, mint $1/kiöblösödés$), ezért találoztunk már vele a 6.4. ábrán.



6.15. ábra. Valódi, szélsőséges alakú héjak a Minden Héjak Múzeuma ritkán látogatott részéből.
Csigáspolip (*Spirula spirula*), laza tornyoscsiga (*Vermicularia spirata*)

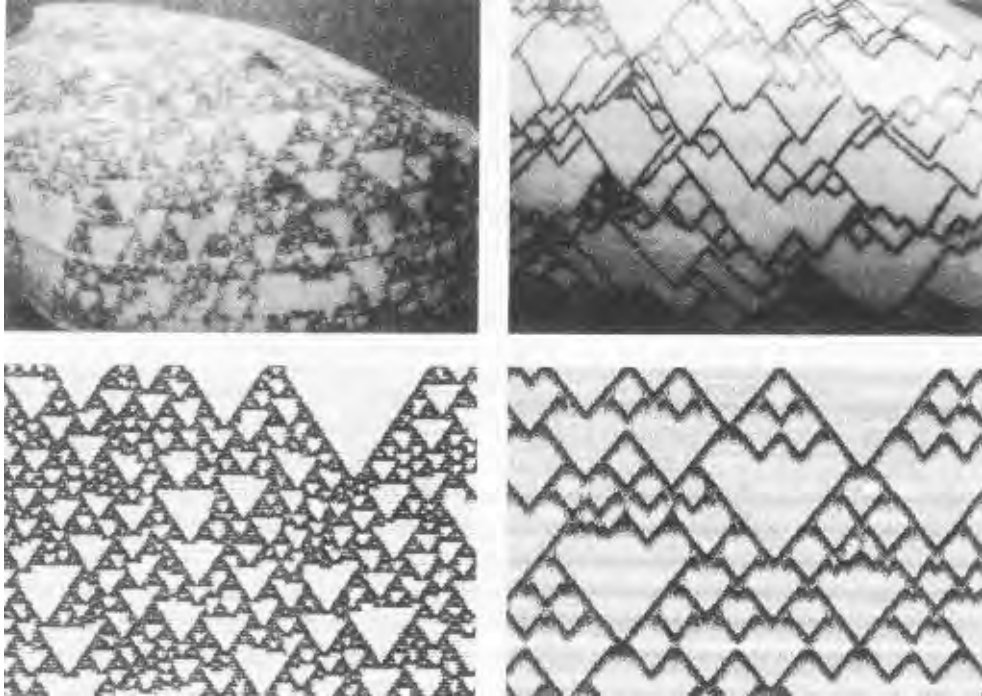
Ha arra gondolunk, hogy az ilyen magas *kukacértékű* héjak nem maradhatnak fenn, mert szerkezetük gyenge, a *Spirula* ezt remekül alátámasztja, ugyanis héját nem lakásként, hanem belső lebegtetőszervként használja. Mivel e héj szerepe nem a védelem, lehetővé vált számára, hogy egy olyan evolúciós utat kövessen, mely a Minden Lehetséges Héjak Múzeuma nem járt részeibe vezet, de szigorúan a múzeum falai között marad. Valószínűleg ugyanez a helyzet a 6.15. ábrán látható laza tornyoscsigánál, mely a csövesférgek életmódját – és alakját – vette fel. A 6.8. ábra jobb alsó részén van a múzeumnak az a területe, ahová a laza tornyoscsiga tartozik. E lény közeli rokonainak (és néhány kihalt ammonitesznek) ennél is furcsább, szabálytalanabb a héja – nincs is helyük sehol a múzeumban.

Háromdimenziós múzeumunk nemcsak azt nem veszi figyelembe, hogy a cső keresztmetszete nem feltétlenül kör alakú. A héjak felszínének díszítményeiről – a 6.10. ábra tigriscsíkjai és párdücpöttyei, a 6.4a ábra V alakú kalligráfiai és rengeteg más héj barázdás vagy bordás mintázata – sem vesz tudomást. E díszek némelyike beépíthető számítógépes modellünkbe a következő módon: míg körkörös gyűrűkből felépül a növekedő cső, legyen minden n -edik gyűrű vastagabb, mint a többi. Az n értékétől függően sűrűbb-ritkább függőleges csíkok fognak megjelenni a héj felszínén. Ha bonyolultabb programot írunk, bonyolultabb mintát is kaphatunk. E programokat tanulmányozta Hans Meinhardt német kutató. A 6.16. ábrán baloldalt két valódi héj,

egy olíva- és egy redőscsiga mintázata látható, jobboldalt pedig két hozzájuk megdöbbenően hasonló, amelyeket egy számítógép rajzolt Meinhardt programja alapján. Látható, hogy e minták hasonló szabályok alapján épülnek fel, mint a fa formájú biomorfok, csak a program nem növekvő ágakban, hanem a sejteken végigfutó festékkiválasztó és az azt gátló működés hullámaiban gondolkodik. Minderről részletesen olvashatunk *A tengeri héjak algoritmikus szépsége (The Algorithmic Beauty of Sea Shells)* című könyvében, most azonban vissza kell térnem fő témánkhoz, a Minden Héjak Múzeumához.

A múzeumhasonlatot egyes-egyedül azért találtam ki, mert – eltekintve a változó csőkeresztmetszet, a felületi díszek és a változó értékű jellemzők okozta komplikációktól – az ismert héjak túlnyomó többsége nagyjából megjeleníthető a három jellemző értékkel dolgozó rajzolási szabályokkal. Más állati formák elrendezéséhez rendszerint többdimenziós múzeumra van szükség annál, amit le tudunk rajzolni. Bár elképzelni nehéz a Minden Lehetséges Állatok Múzeumát, néhány egyszerű dolgot a fejünkben tarthatunk: azt, hogy az állatokat úgy rendeztük el, hogy mindegyiket a hozzá legjobban hasonlók veszik körül, és hogy bármilyen irányban mehetünk, nemcsak a folyosókon. Az evolúció története kígyómódra tekereg rajta keresztül. Mivel az evolúció számtalan független úton halad előre az állat- és növényvilág formákban csodálatosan gazdag világában, útvonalak ezreit képzelhetjük el, amint összevissza kanyarognak e sokdimenziós múzeum különböző részein (ugye milyen messzire kerültünk a Valószínűtlenség Hegye teljesen más képeket felidéző hasonlatától?).

Fejezetindító ellentétünket most a következőképpen fogalmazhatjuk újra: Egyes biológusok úgy gondolják, hogy bármerre is járunk a múzeumban, mindenfelé sima, fokozatos átmeneteket találunk. A múzeum nagy részén ugyan sohasem fordul meg hús-vér élőlény, de csak azért, mert a természetes szelekciónak „nem jutott eszébe”, hogy ide is betegye a lábát.



6.16. ábra. Héjak felszínének mintázatai és számítógéppel előállított megfelelőik

A biológusok egy másik csoportja szerint – velük kevésbé értek egyet, de lehet, hogy nekik van igazuk – a múzeum nagy része örökre le van zárva a természetes szelekció előtt: bárhogya is dörömbölgjön egyes folyosók ajtaján, azok nem nyílnak meg sosem, mert a szükséges mutációk egyszerűen nem jöhetnek létre. E nézet egy ötletes változata szerint a múzeum más részei viszont sülyesztőként vagy mágnesként vonzzák maguk felé a különböző állati formákat, szinte függetlenül a természetes szelekció törekvéseitől. Az élet e szemlélete szerint a Minden Lehetséges Állatok Múzeuma nem hosszú termek és tágas folyosók szabályosan berendezett sora, ahol a tulajdonságok fokozatosan változnak, hanem egy csomó jól elhatárolt, vastüskéktől szőrös mágnes. A vastüskék az állatok, a mágnesek közötti üres tér pedig az átmeneti formákat jelképezi, amelyek vagy létrejöttek, vagy nem, de tömegesen nem létezhetnek. Ezt az elképzelést talán úgy fogalmazhatnánk meg pontosabban, hogy az állati térben nem használhatunk olyan fogalmakat, mint „szomszéd” vagy „átmenet”. A valódi szomszédok azok, amelyeket egyetlen mutációs lépéssel el lehet érni, függetlenül attól, hogy szomszédnak néznek-e ki vagy sem.

A fenti kérdés tekintetében nyitott vagyok, bár hajlok az egyik irányba. Egy ponthoz azonban ragaszkodom, mégpedig ahhoz, hogy ha a természetben bármi a céltudatos, jó tervezés határozott érzetét kelti, ott a természetes szelekció az egyetlen ismert mechanizmus, ami a háttérben állhat. Nem állítom, hogy a természetes szelekció kezében van a Minden Lehetséges Állatok Múzeuma minden folyosójának kulcsa, és határozottan nem állítom azt sem, hogy a múzeum bármely része bárholnan elérhető. Nagyon valószínű, hogy a természetes szelekció nem kószálhat bármerre, amerre csak

akar. Igaza lehet számos munkatársamnak abban, hogy a természetes szelekció, akár kígyózik, akár ugrándozik a múzeumban, erősen korlátozott. Ha azonban egy mérnök megvizsgál egy állatot vagy szervet, és megállapítja, hogy kiválóan alkalmas egy adott feladat ellátására, akkor határozottan ki kell jelentenem, hogy e kiváló tervezettnek tűnőség oka: a természetes szelekció. Az Állati Tér „mágnesei”, „attraktorai” a szelekció segítségével nélkül nem képesek jól működő szerkezetek felépítésére. Álláspontom szigorúságát azonban hadd enyhítsem a „kaleidoszkópembriológia” felvetésével.

KALEIDOSZKÓPEMBRIOLÓGIA

A testek a növekedés – elsősorban az embrionális növekedés – folyamata során épülnek fel, ezért a test alakját megváltoztató mutáció rendszerint az embrionális fejlődés folyamatába avatkozik bele. Egy mutáció pl. felgyorsíthatja az embrió fejében egy bizonyos szövet növekedését – az eredmény: gorillaállú felnőtt. A korai magzati fejlődés során bekövetkező apró változásoknak később drámai hatásuk lehet: két fej vagy egy szám feletti szárnypár. Az ilyen durva mutációkat, a 3. fejezetben részletezett okok miatt, a természetes szelekció nem valószínű, hogy előnyben részesítené. Ebben a fejezetben mást szeretnék kidomborítani. Nevezetesen azt, hogy az adott faj embriológiája nagymértékben meghatározza, hogy a természetes szelekció milyen *típusú* mutációkat kap „nyersanyagként”. Az emlősök embrionális fejlődése nagymértékben eltér a rovarokétól. Hasonló, bár kisebb különbségek lehetnek az egyes emlőssztyalok embrionális fejlődéstípusai között. Arra szeretnék kilyukadni, hogy az embrionális fejlődés egyes típusai bizonyos szempontból evolúcióképesebbek, mint mások. Nem azt mondom, hogy nagyobb a mutációk valószínűsége – ez teljesen más tészta. Arra gondolok, hogy az embrionális fejlődés egyik típusa evolúciósan ígéretesebb változatokat hozhat létre, mint egy másik típus. Ezen felül egy magasabb szintű szelekció – korábban „az evolúcióra való képesség evolúciójának” neveztem – oda vezethetett, hogy világunkat olyan élőlények népesítik be, amelyek számára embrionális fejlődésük jó evolúciós képességet biztosított.

Egy vérbeli darwinista – amilyen én vagyok – szájából súlyos eretnokségnek tünnek ezek a szavak. A tisztességes neodarwinista körök véleménye szerint a természetes szelekció nagy csoportok között nem válogat. A harmadik fejezetben pedig arra a következtetésre jutottunk, hogy a természetes szelekció a nulla mutációs rátát részesítené előnyben (még szerencse, az élet jövője szempontjából, hogy ezt sosem éri el). Hogyan állíthatjuk most azt, hogy az embrionális fejlődés egy adott típusa kedvező lehet a mutációkra nézve? Nos talán a következő értelemben. Az embrionális fejlődés bizonyos típusai egy adott területen, más típusai más területen hajlamosak a változásra. E változások némelyike pedig bizonyos értelemben evolúciósan előnyösebb lehet, mint mások, pl. új formák szélesebb körű szétterjedését (radiációját) indíthatja el – ez történt az emlősökkel a dinoszauruszok kihalása után. Erre gondoltam, amikor azt a meglehetősen furcsa kijelentést tettem, hogy az embrionális fejlődés egyes típusai „az evolúció szempontjából jobbak”, mint mások.

A kaleidoszkóp jó analógiának tünik – eltekintve attól, hogy a kaleidoszkóp szép látvány, nem pedig hasznos szerkezetek létrehozására szolgál. A kaleidoszkóp színes üvegdarabkái véletlenszerű kupacot alkotnak. A trükkösen összeállított tükörrendszernek köszönhetően azonban csodálatos, szimmetrikus alakzatokat látunk –

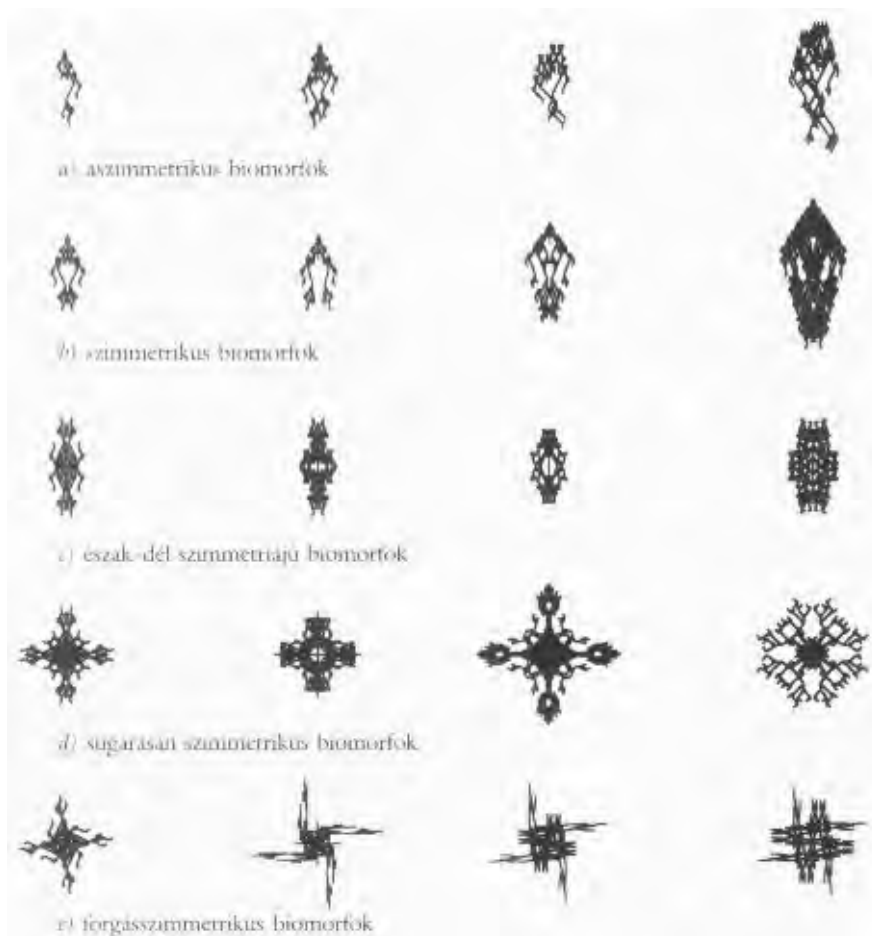
mintha színes hópehelyek lennének. A kaleidoszkóp véletlenszerű megcsavarása („mutáció”) eredményeképp az üvegdarabkák kissé elmozdulnak, de a néző azt látja, hogy e változások szimmetrikus rendben ismétlődnek a hópehely különböző pontjain. Újra és újra megcsavarva a csövet úgy érezzük, mintha Aladdin drágakövekkel teli barlangjának kicsinyített másán sétálnánk keresztül.

A kaleidoszkóp titka: a térbeli ismétlődés. A véletlenszerű változások a szélrózsa minden irányában – a tükrök számától függő számban – megismétlődnek. A mutációk ugyan egyszeri változások, de hatásuk a test különböző részeiben megismétlődhet. Ezt felfoghatjuk akár a mutációk egy újabb nem véletlenszerű tulajdonságának, a 3. fejezetben már felsorakoztatottak mellett. Az ismétlődések száma az embrionális fejlődés típusától függ. Ezért a továbbiakban a „kaleidoszkópembriológia” különböző típusaival fogok foglalkozni. A „kaleidoszkópembriológia” fontosságára a biomorfok tenyésztésének tapasztalatai és főként azok az élmények döbentettek rá, amelyeket akkor szereztem, amikor program-„tükröket” (lásd később) építettem be a Vak Órásmester programba. Nem véletlen tehát, hogy e fejezet illusztrálására sokszor biomorfokat és más virtuális „állatokat” fogok használni.

Lássuk először a szimmetriát – mindenekelőtt a hiányát. Magunk eléggé (bár nem tökéletesen) szimmetrikus szervezetek vagyunk, hasonlóan a legtöbb állathoz, amely utunkba kerül, így könnyen elfelejtjük, hogy nem szükségszerűen minden élőlény szimmetrikus. Az egyszettűek egyes csoportjai aszimmetrikusak: bárhogy is vágjuk ketté őket, a két fél sohasem lesz azonos, de még tükörképe sem egymásnak. Mi lesz egy mutáció hatása egy tökéletesen aszimmetrikus állatra? Magyarozatért legjobban, ha a számítógépes biomorfokhoz fordulunk.

A 7.1a ábra kilenc biomorfja mind ugyanazon alak mutánsa, és embrionális fejlődésüket semmiféle szimmetriakényszer nem korlátozta. A szimmetrikus alak nem tilos, de nincs is semmi, ami kialakulását elősegítené. A mutáció egyszerűen megváltoztatja az alakot, és kész: nincs semmiféle „tükör” vagy „kaleidoszkóphatás”. Nézzünk meg azonban más biomorfokat is (7.1b ábra). Ezek is mind egymás mutánsai, de embrionális fejlődésükbe beépítettünk egy szimmetriaszabályt: a programot úgy módosítottuk, hogy a test középvonalán egy „programtükör” fusson végig. A mutációk ugyanolyan sokféle dolgot megváltoztathatnak, mint az aszimmetrikus biomorfok esetében, de a bal oldal bármilyen véletlenszerű változása tükörképként megjelenik a jobb oldalon is. Ezek a formák „élőlényszerűbbnek” tűnnek, mint az előző ábra aszimmetrikus alakzatai.

Egy szimmetriaszabály az embrionális fejlődés során korlátozásnak, kényszernek tűnhet. Szigorúan véve ez igaz is: korlátok nélküli embrionális fejlődés elméletileg szintén létrehozhat szimmetrikus formákat, de még sokkal több másilyent is. Fejezetünk azonban majd megmutatja, hogy ez a korlátozás végső soron új lehetőségeket nyithat meg, vagyis nem leszűkít, hanem kitágít. A korlátok nélküli embriológia hátránya, hogy alakok milliárdjait kell végigpróbálnia, mielőtt véletlenül „talál” egy szimmetrikusat; ráadásul e várva várt szimmetriát folyton veszélyeztetik a következő nemzedékekben bekövetkező mutációk.



7.1. ábra. Különböző számú „kaleidoszkóptükör” által korlátozott, ezért különböző szimmetriatípusokat mutató biomorfok

Bármi változzon is, a szimmetria szinte mindig kívánatosnak tűnik, a korlátozott embriológia eredményesebb lesz – nemcsak a szemünknek kedvesebb. A korlátok nélküli embriológiával szemben nem vesztegeti az időt olyan aszimmetrikus formák létrehozására, amelyekből úgysem fejlődik ki semmi.

Tény, hogy az állatok nagy többsége, magunkat is beleértve, ha nem is teljesen, de nagymértékben szimmetrikus a bal-jobb síkban. A szépség önmagában nem fontos, ezért feltehetjük a kérdést: a hasznosság szempontjából miért előnyös ez a tulajdonság. Van néhány zoológus, akik annak a 18. századi elképzelésnek az elkötelezettjei, hogy az állatok azért olyanok, amilyenek, mert testük felépítése szinte misztikus hűséggel ragaszkodik valamiféle „alapszabáshoz”, „*Bauplan*”-hoz. (*Bauplan* németül egyszerűen „tervrajzot” jelent. Jellemző, hogy az ember idegen szavakat használ, ha a mélységet akarja érzékeltetni – „ó, ezek a tubaszólamok a Rajna mélyéről” –, jegyzi meg gúnyosan Sir Peter Medawar. És tényleg: ha megengednek egy futó megjegyzést,

maga a „tervrajz” kifejezés is ironikus, hiszen „redukcionista”, egy az egyhez megfeleltetést feltételez a terv és az épület között, mely genetikai értelmezésben éppen azoknak az ideológiai érzékenységét sértheti, akik a leginkább lelkesednek a *Bauplan* szóért.) A magam részéről jobban kedvelem munkatársam, dr. Henry Bennet-Clark angolszász egyszerűségét, akivel beszélgettem ezekről a dolgokról: „Az étellel kapcsolatos minden kérdésre ugyanaz a válasz (bár néha nem sokra megyünk vele): természetes szelekció.” Kétségtelen, hogy a kétoldali szimmetria pontos előnyei az egyes állattípusokban különbözők, de dr. Bennet-Clark tesz néhány általános észrevételt is:

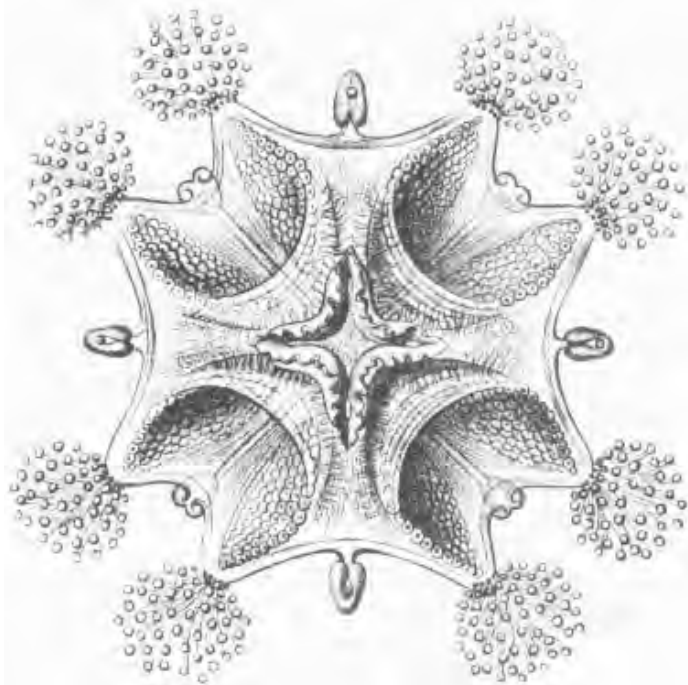
A legtöbb állat fereg vagy feregszerű ősoctól származik. Ha belegondolunk, milyen is egy fereg, logikusnak tűnik, hogy a szája az egyik végén legyen – mégpedig azon, amelyik először ütközik bele a táplálékba –, a végbélnyílás pedig a másikon, így a salakanyagokat maga mögött hagyhatja ahelyett, hogy megenné. Ez meghatározza a feji és a farki véget. Ezen túlmenően a világ rendszerint jelentős különbséget tesz fent és lent között. A legkevesebb, hogy a gravitáció miatt. Közelebről: sok állat alzaton, pl. a talajon vagy a tenger fenekén mozog. Logikus, hogy az állat alzat felé eső oldala más legyen, mint az ég felé tekintő. Ez háti és hasi oldalt határoz meg. Miután van már elől és hátul, alul és felül, kell, hogy legyen jobb és bal is. De miért kell a jobb és bal oldalnak egymást tükrözni? A rövid válasz: miért ne? Az elől/hátul, fenn/lenn aszimmetriának, mint láttuk, jó oka van; nem tudunk azonban hasonló általános okot említeni arra, hogy a bal oldal számára legkedvezőbb alak más lenne, mint a jobb oldal számára legkedvezőbb. Sőt, ha létezik legjobb alak a bal oldal számára, joggal feltételezhetjük, hogy az egyben a jobb oldal számára is a legmegfelelőbb lesz. Pontosabban fogalmazva: a kétoldali tükörszimmetriától való bármely jelentősebb eltérés oda vezethet, hogy az állat körbe-körbe kezd járni, amikor két pont között a legrövidebb utat keresi.

Feltételezve, hogy – bármilyen okból – előnyös, ha a jobb és bal oldal együtt, összekapcsolt tükörképként evolválódik, előnybe kerül a test középvonalára tükröző „kaleidoszkópszerű” egyedfejlődési típus. Az új, bármilyen szempontból kedvező mutációk automatikusan mindkét oldalon megjelennek. Mi a nem kaleidoszkópos lehetőség? Egy evolúciós leszármazási vonal szert tesz egy előnyös változásra, mondjuk, a bal oldalon. Ezután sok-sok nemzedéken át várakoznia kell, míg a másik oldal is megjelenik ugyanez a változás. Nyilvánvaló tehát a kaleidoszkóp-módszer előnye. Ezek szerint elképzelhető, hogy egyfajta természetes szelekció előnyben részesíti az egyre korlátozóbb – de ennek megfelelően egyre eredményesebb – kaleidoszkóp jellegű egyedfejlődést.

Természetesen nem azt akarom mondani, hogy nem fordulhat elő aszimmetria a két oldal között. Előfordulhatnak olyan mutációk, melyek a két oldalt nem egyformán érintik. Külön oka lehet annak, hogy alkalomadtán egy aszimmetrikus mutáció előnyös – pl. hogy a remeterák potroha beleférjen a csigaházba –, ilyenkor a természetes szelekció előnyben is részesíti. A 4. fejezetben már foglalkoztam a lapos halakkal (rája, lepényhal, rombuszhal, lásd a 4.7. ábrát). A lepényhalak az eredetileg bal oldalukra feküdtek le, bal szemük az eredetileg jobb, most felső oldalra vándorolt. A nyelvhalak ugyanezt tették, csak a jobb oldalukra fekve, ami arra utal – bár nem feltétlenül –, hogy

e szokásukat a lepényhalaktól függetlenül alakították ki. A lepényhal eredetileg bal oldala átvette az alsó, alzatra simuló testoldal szerepét, ennek megfelelően lapos és ezüstszerű lett. Az eredetileg jobb testoldal szerepe felső, felfelé néző lett – ezért megdőbült és rejtőszínt vett fel. Az eredeti has- és hátoldal bal és jobb oldal lett. A megfelelő, normális esetben annyira különböző hát- és hasúszók szinte tökéletes tükörképekké alakultak. Az, hogy a lepényhal és a nyelvhal újra felfedezték a kétoldali szimmetriát, remek érv a természetes szelekció ereje mellett a kontinentális „*Bauplan*”-okkal szemben. Érdekes (és kivitelezhető) lenne megvizsgálni, hogy vajon a lepényhal mutációi automatikusan tükröződnek-e az (új) bal és jobb oldalon (vagyis a régi hát- és hasoldalon); vagy még mindig a régi mintát követve a (rég) bal és jobb, a mai alsó és felső oldalon? Az ezüstös és a rejtőszíntű oldalak különbsége a nehézkes régi vagy a segítő új kaleidoszkópszerű embriológia révén alakult ki? Bármilyen legyen a válasz ezekre a kérdésekre, illusztrálja azt, hogy helyénvaló, ha (az evolúció tekintetében) „nehézkes” és „segítő” embrionális fejlődésről beszélünk. Ismét megkérdem: merjük azt állítani, hogy egy magasabb szintű természetes szelekciónak lehet az a hatása, hogy az embrionális fejlődést „segítővé” teszi az evolúció egyes típusai irányában?

Fejezetünk szempontjából a kétoldali szimmetria fontos vonása az, hogy egy mutáció egyszerre az állat két pontján hoz létre változást, nemcsak egyen. Ezt értem a kaleidoszkópszerű embriológián: olyan, mintha a mutációk tükröződnének. A kétoldali szimmetria nem az egyetlen eset. A mutációk tükre más síkban is elhelyezhető.

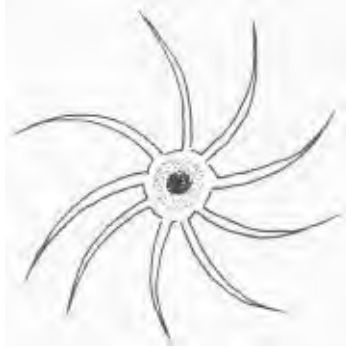


7.2. ábra. Négysugaras szimmetriájú állat: kehelymedúza. Figyeljük meg, hogy mind a négy tengely önmagában is kétoldali szimmetriát mutat, így a változások többsége valójában nyolcszorosan tükröződik.

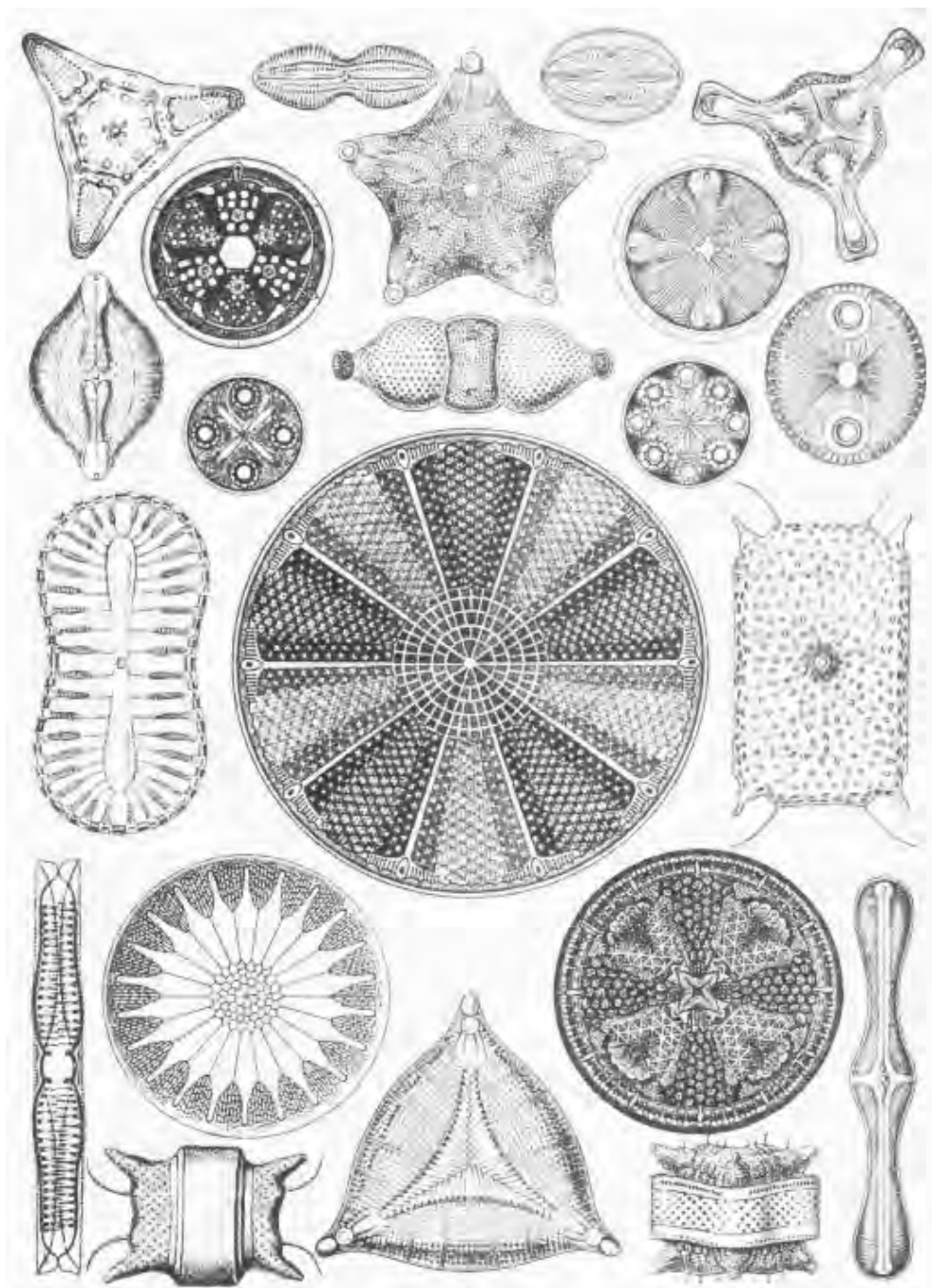
A 7.1c ábra biomorfjai nemcsak bal/jobbról, de elöl/hátul tekintetben is szimmetrikusak: olyan, mintha két tükröt állítottunk volna be egymásra merőlegesen. Ilyen „kéttükrös” egyedfejlődésű lényeket a való világban nehezebb találni, mint kétoldali szimmetriájúakat. Gyönyörű példa a vénuszövrő, a bordásmedúzák kevésbé ismert törzsébe tartozó, a planktonban lebegő szalag alakú állat. Gyakrabban találunk a 7.1d ábra biomorfjaihoz hasonló négysugarasan szimmetrikus lényeket: pl. sok medúzánál fejeződik ki ez a fajta kaleidoszkóposág. A csalánozók törzse tagjainak többsége (pl. maguk a medúzák) lebeg a tengerben vagy az alzathoz rögzül (mint a tengeri rózsák), ezért a mászó állatok, pl. férgek esetében tárgyalt elöl/hátul szelekciós nyomás nem hat rájuk. Minden okuk megvan arra, hogy alsó és felső testoldaluk különbözzön, de arra semmi, hogy a jobb és bal vagy az elülső és hátulsó is. Felülről nézve egyetlen irány sem kitüntetett, „sugaras szimmetriájuk” tehát nem véletlen. A 7.2. ábra medúzája történetesen négysugaras szimmetriát mutat, de a sugarak száma más is lehet, mint majd látni fogjuk. A kép, akárcsak sok másik is ebben a fejezetben Ernst Haeckel 19. századi neves német zoológus munkája, aki nagyszerű képeket is rajzolt.

A sugaras szimmetriájú állatok csodálatos alakgazdagságot mutatnak, de van egy korlát, mely véleményem szerint ismét nem annyira korlát, mint inkább kaleidoszkópos lehetőség. A véletlen változások mind a négy sarkon egyszerre megjelennek. Mivel azonban a négyszer ismétlődő elemek maguk is tengelyesen szimmetrikusak, a mutációk nem is négyszer, hanem nyolcszor ismétlődnek. Remekül látható ez a 7.2. ábra kehelymedúzáján, melynek nyolc kis bojtja van: kettő minden sarkán. Feltételezhető, hogy egy, a bojt alakját érintő mutáció mind a nyolc helyen megjelenik. Hogyan nézne ki a sugaras szimmetria e megkettőződés nélkül? Vessünk egy pillantást a 7.1e ábra biomorfjaira. Elég nehéz ilyen forgásszimmetrikus („horogkereszt” vagy „Man-sziget” típusú szimmetriával rendelkező) lényt találni a természetben, ám a 7.3. ábra bizonyítja, hogy lehetséges: íme egy rák spermatozoója.

A legtöbb sugarasan szimmetrikus állat, legyen akárhány sugara, ezeken belül még kétoldalian is szimmetrikus. Ha tehát meg akarjuk tudni, hogy egy mutáció hányszor sokszorozódik, meg kell számolnunk a sugarakat és az eredményt meg kell szorozni kettővel. Egy tipikus ötkarú tengeri csillag, mivel karjai kétoldalian szimmetrikusak, a mutációkat „tízszerezi”.



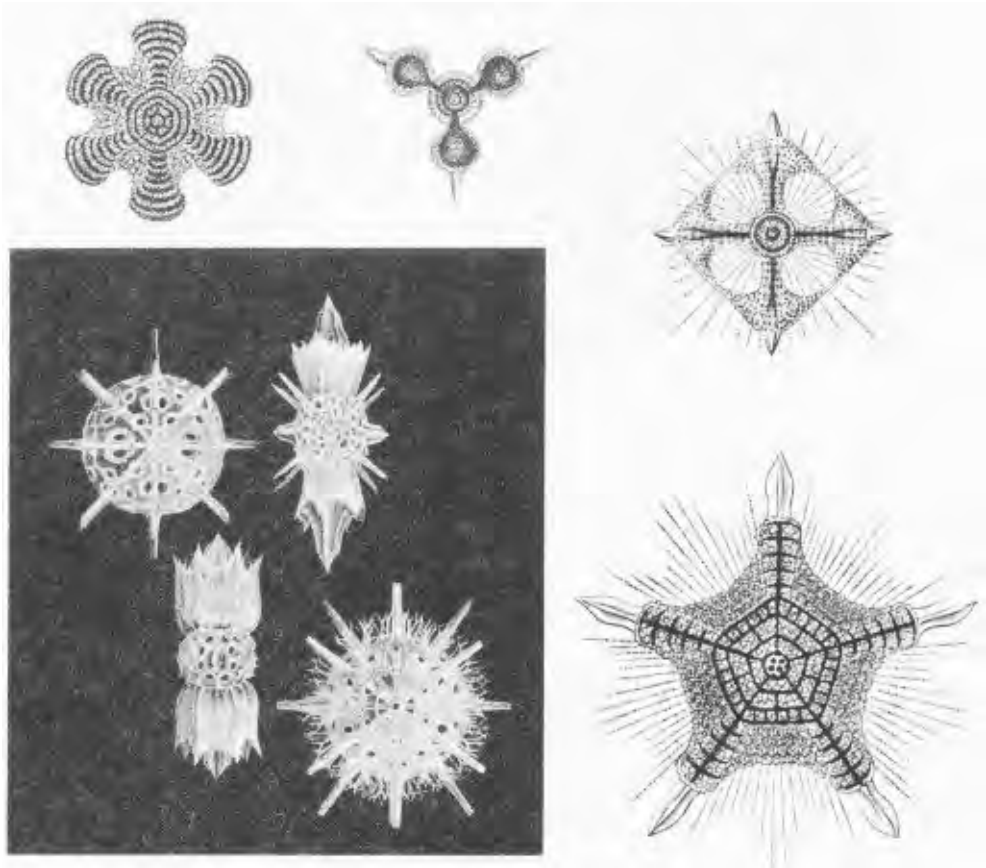
7.3. ábra. „Man-sziget” típusú szimmetria: folyami rák spermatozoája



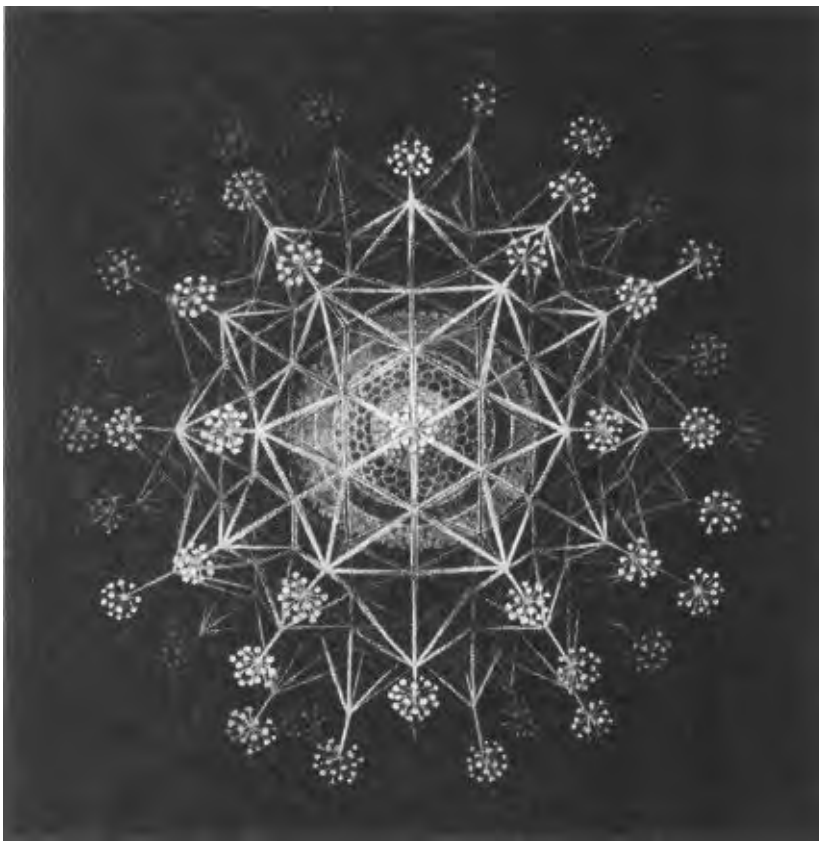
7.4. ábra. Kovamoszatok (*Diatoma*: mikroszkopikus növényi egysejtűek): különböző számú kaleidoszkópos „tükr” példái egyetlen csoporton belül

Haeckel különösen egysejtűeket szeretett rajzolni, pl. a 7.4. ábrán látható kovamoszatokat. Az egyes karokon belüli kétoldali szimmetrián túl elgyönyörködhetünk a két-, három-, négy-, öt- és még több-, „tükrös” kaleidoszkópembriológia eredményeiben. Mindegyik szimmetria esetében az egyedfejlődés olyan, hogy a mutációk nem egy, hanem rögzített számú helyen fejeződnek ki. Pl. ha a 7.4. ábra felső részén látható ötkarú csillagban megjelenik egy hegyesebb kart kódoló mutáció, egyszerre mind az öt kar hegyesebb lesz. Nem kell öt független mutációra várnunk. Feltételezhető, hogy a különböző számú tükrő szintén egymás (ritkábban előforduló) mutációjaként jelent meg. Pl. egy háromkarú csillag néha ötkarúvá mutálhat.

Számomra a mikroszkópos kaleidoszkópja bajnokai a sugárállatkák (*Radiolaria*), egy másik planktoncsoport, melyet már Haeckel is kitüntető figyelemmel kezelt (7.5. ábra). Csodálatos, különböző rendű, két-, három-, négy-, öt-, hat- sőt még többtükrű kaleidoszkópoknak megfelelő szimmetriákat mutatnak. Apró mészvázuk szemképráztaátó szépségét a kaleidoszkópos embriológia tervezte.



7.5. ábra. Sugárállatok (*Radiolaria*). Újabb példa a mikroszkopikus egysejtű lények világából az egy csoporton belül előforduló különböző számú kaleidoszkóp-, „tükrös”.



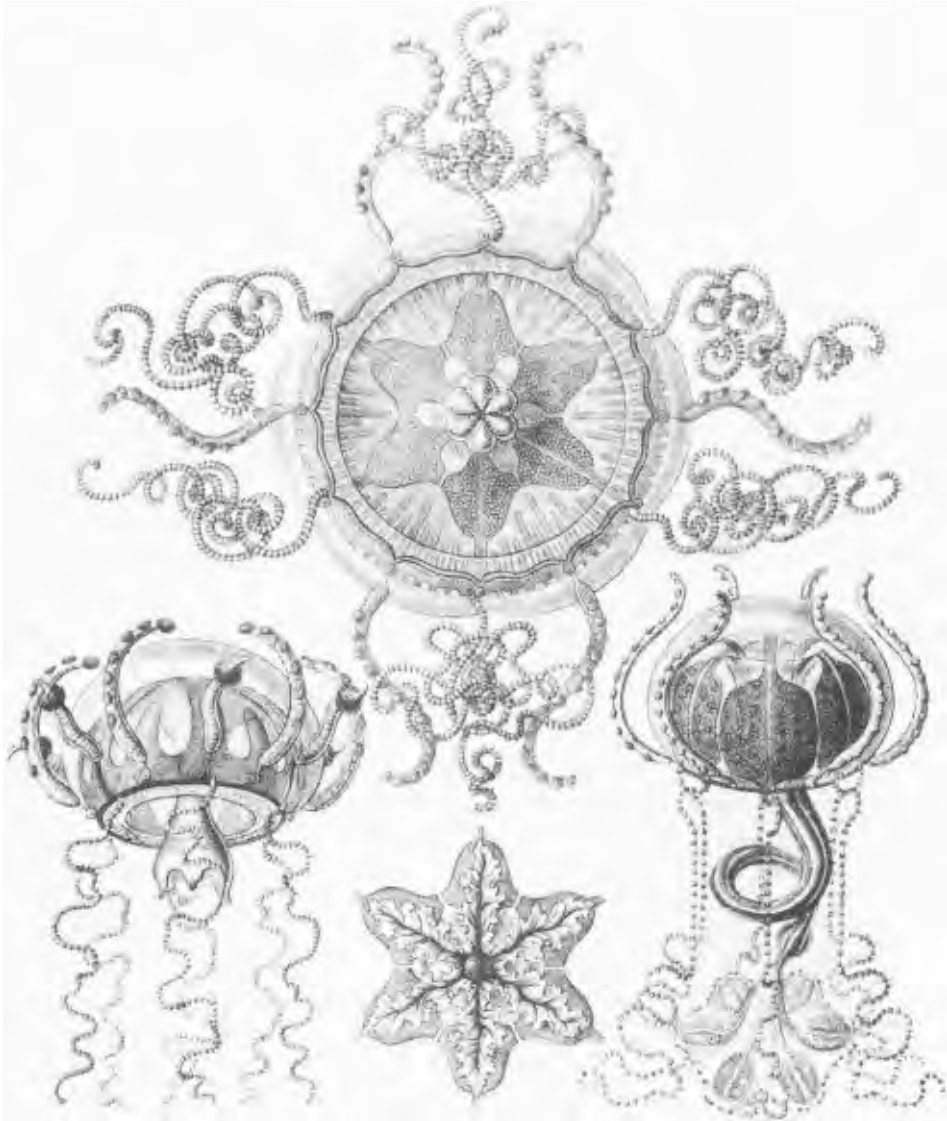
7.6. ábra. Nagyméretű, ritka szép sugárállatváz

A 7.6. ábra kaleidoszkópszerű mesterművét akár Buckminster Fuller látnoki építész is tervezhette volna (akitől volt szerencsém kilencvenes éveiben egy lebilincselő, szünet nélküli háromórás előadást hallgatnom). Fuller geodézikus dómjaihoz hasonlóan ez a héj is a háromszög stabil szerkezetű mértani formájának köszönheti erejét. Kétségtelen, hogy magas fokú kaleidoszkópszerű egyedfejlődés gyümölcse. Bármely mutáció rengetegszer megsokszorozódik. A pontos szám erről a képről le sem olvasható. Haeckel más sugárállatokat is lerajzolt, melyeket kristályszerkezettannal foglalkozó kémikusok szilárd anyagok régóta ismert szabályos szerkezetének szemléltetésére használtak, mint pl. az oktaéder (nyolc háromszögletű lap), dodekaéder (tizenkét ötszögű lap) vagy az ikozaéder (húsz háromszögű lap). D'Arcy Thompson, akivel már találkoztunk a csigahéjak kapcsán, úgy is érvelhetne, hogy e páratlan sugárállatok egyedfejlődése közelebb áll a kristályok növekedéséhez, mint a hagyományos értelemben vett embrionális fejlődéshez.

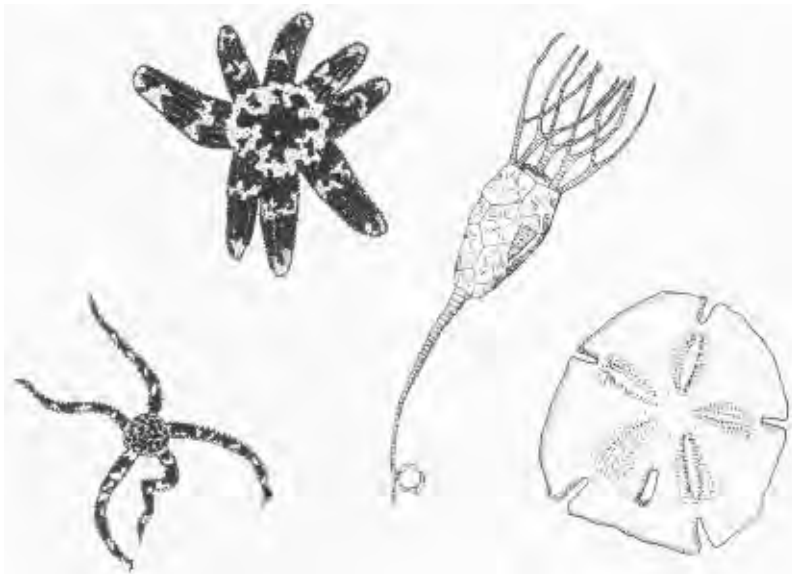
Bárhogy is legyen, az egysejtűek, mint pl. a kovamoszatok vagy a sugárállatok egyedfejlődése szükségszerűen teljesen más, mint a többsejtűeké, ezért kaleidoszkóposságuk hasonlósága valószínűleg csak véletlen. Láttunk már példát többsejtű négy sugaras szimetriájú állatra is: a medúzát. A négyes szám vagy annak

többszörösei gyakoriak a medúzák körében; feltehető, hogy a korai embrionális fejlődés valamely folyamatának egyszerű megkétszerezésével könnyen létrehozható. Vannak hatsugaras szimmetriát mutató medúzák is, pl. a hidraállatok osztályába tartozó bunkós medúzák (7.7. ábra).

Az ötsugaras szimmetria legismertebb képviselői a tuskésbőrűek. A tuskés tengeri állatok e népes törzsébe tartoznak a tengeri csillagok, tengeri sünök, tengeri uborkák, kígyókarú csillagok és tengeri liliomok (7.8. ábra).



7.7. ábra. Hatsugaras szimmetriájú medúzák

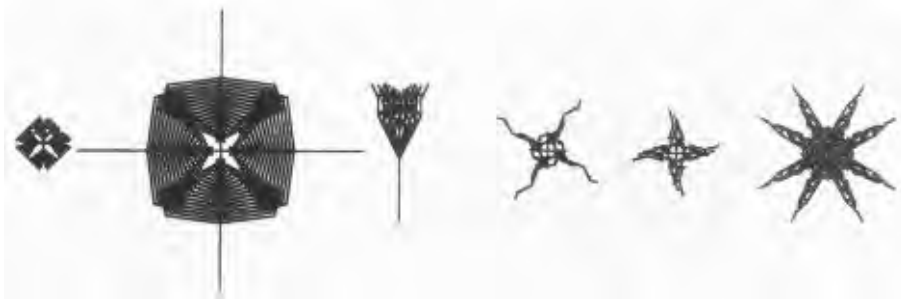


7.8. ábra. Tüskésbőrűek különböző csoportjai (balról jobbra): kígyókarú csillag, sokkarú tengeri csillag (néhány karját egyéni élete során elveszíthette és regenerálhatta, ezért különböző hosszúak a karjai), tengeri lilium, pénzsün

Egy elmélet szerint a mai, ötsugaras szimmetriájú tüskésbőrűek háromsugaras távoli őseiktől származtak, de már több mint félmilliárd éve elnyerték mai alakjukat. Nagy a kísértés, hogy az ötsugaras szimmetriát azon jól megőrzött *Bauplan*ok egyike központi elemének tekintsük, amiért úgy rajonganak a kontinentális szellemű zoológusok. Ezen idealisztikus szemlélet híveinek nagy bánatára azonban jelentős számú tengericsillag-fajnak van öttől eltérő számú karja, de még a tisztességes ötkarúak között is találunk mutáns *egyedeket* három-, négy- vagy hatsugaras szimmetriával.

Másképp – szemben azzal, amit egyszerű gondolatmenetünk alapján egy fenéken mászkáló állattól várnánk – az ilyen életmódot folytató tüskésbőrűek is rendszerint sugarasan szimmetrikusak. Ráadásul komolyan is veszik sugárszimmetrikus voltukat annyiban, hogy mindegy nekik, merre másznak: nincs kitüntetett kar. Egy időben mindig egy kar „vezet”, de ez változtatható. Az evolúció során néhány tüskésbőrű újra felfedezte a kétoldali szimmetriát. A magukat a homokba beásó szívűsünök és pénzsünök – amiket a homokban ásás erősen kényszerít az áramvonalasságra – újra felfedezték az elől/hátul aszimmetriát, és egy felszínes kétoldali szimmetria is felfedezhető testükön, melynek alapja azonban egy jól felismerhető ötsugaras tengeriuborka-alak.

A tüskésbőrűek olyan rendkívüli lények, hogy amikor a Vak Órásmester programmal életszerű biomorfokat igyekeztem előállítani, természetesen tüskésbőrűekhez hasonlókra is törekedtem. Am az ötsugaras szimmetria kialakítására való minden törekvésem kudarcba fulladt. A Vak Órásmester embriológiája nem megfelelő módon volt kaleidoszkópszerű. Nem volt meg benne a szükséges számú tükör.

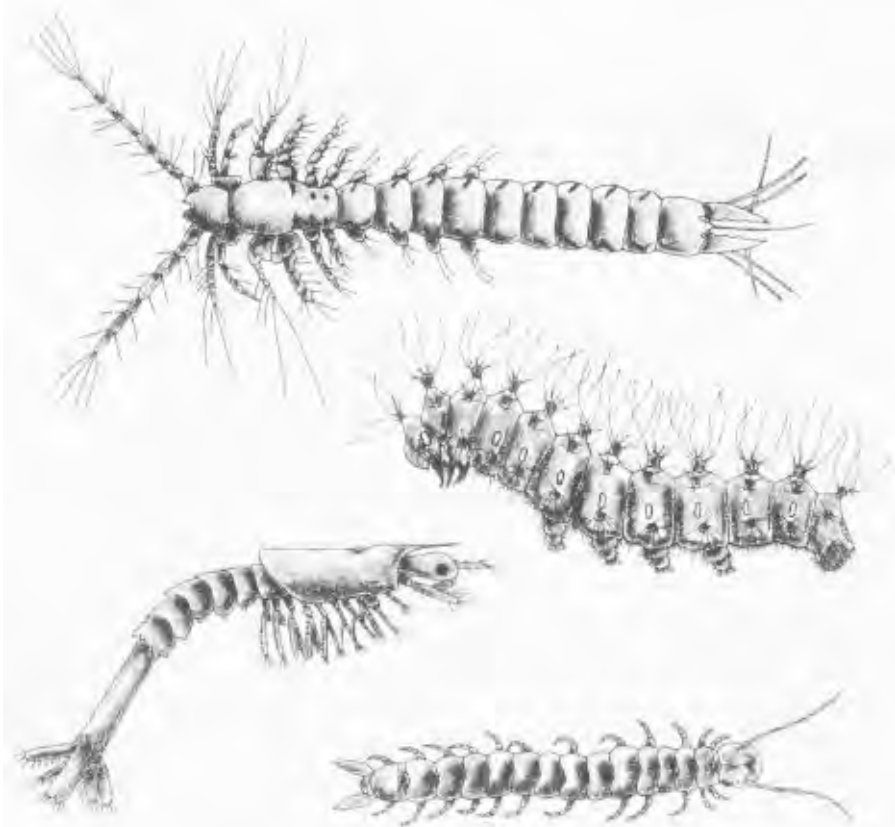


7.9. ábra. Számítógépes biomorfok, melyek első pillantásra tuskésbőrűekre hasonlítanak, de egyikük sem mutatja a valódi tuskésbőrűek megfoghatatlan ötsugaras szimmetriáját. Ehhez át kellene írni a programot.

Végül is, mint láttuk, egyes tuskésbőrűek nem átnak eltérni az ötsugaras szimmetriától – hát „bosszúból” páros sugárszámú tengeri és törékeny csillagokat, tengeri uborkákat „alkottam” (7.9. ábra).

Mindez nem változtat azon a tényen – mely egyébként fejezetünk központi kérdését is illusztrálja –, hogy a Vak Órásmester jelenlegi változata nem képes ötsugaras szimmetriájú biomorfokat előállítani. Ennek kiigazítása érdekében változtatnom kellene a programon (új „tükröt” kellene beépítenem, nem elég egy már meglévő gén mennyiségi megváltoztatása), hogy a kaleidoszkópszerű mutációk új csoportja jöhessen létre. Biztos vagyok benne, hogy ha ezt megteszem, a véletlenszerű mutációk és a szelekció mindennapos, bár időigényes folyamata eredményeképp a tuskésbőrűek fő csoportjaihoz sokkal jobban hasonló biomorfokat sikerül előállítanom. A program eredeti változata, mint azt *A vak órásmesterben* leírtam, csupán kétoldali szimmetriájú mutációk létrehozására alkalmas. A jelenlegi, kereskedelmi forgalomban kapható program képes négysugaras vagy forgásszimmetrikus biomorfok előállítására is annak eredményeképp, hogy úgy döntöttem: átírom a programot olyanformán, hogy „programtükrök” sorát genetikai szabályozás alá helyezem.

A különböző szimmetriatípusokról mint a kaleidoszkópembriológia példáiról beszéltem. A valódi állatok világában ugyanilyen fontos, bár kevésbé látványos a szelvényezettség jelensége. A szelvényezettség azt jelenti, hogy egy hosszú, rendszerint a szokásos kétoldali szimmetriát mutató állat testén fej-farok irányban végighaladva sorozatos ismétlődés figyelhető meg. A szelvényes állatok legjellemzőbb képviselői a gyűrűsférgék (földigiliszták, csaliférgék, százlábú férgék, csővájó férgék) és az ízeltlábúak (rovarok, rákok, ikerszelvényesek, háromkaréjú ósrákok stb.), de mi, gerincesek is szelvényezettek vagyunk, ha másképpen is. Ahogy egy vonat is kocsik sorából épül fel, amelyek mindegyike alapvetően hasonló, ám részleteiben különbözik, ugyanúgy egy ízeltlábú is szelvények sora, amelyek mindegyike részleteiben különbözik a többitől. A százlábú olyan, mint egy tehervonat: a kocsik szinte teljesen egyformák. A többi ízeltlábút tekinthetjük kitüntetett százlábúaknak vagy különböző különleges kocsikból összerakott vonatoknak (7.10. ábra).



7.10. ábra. Az ízeltlábúak fejtől farki végükig ismétlődő, gyakran kissé változó szelvényekből épülnek fel. (Felülről): sertéslábú rák (*Derocheilocaris*); nagy pávaszem hernyója (*Saturnia pyri*); garnéla (*Penaeus*); szövőcsévés (*Scutigera*, a százlábúakhoz hasonló Symphyla osztályba tartozik).

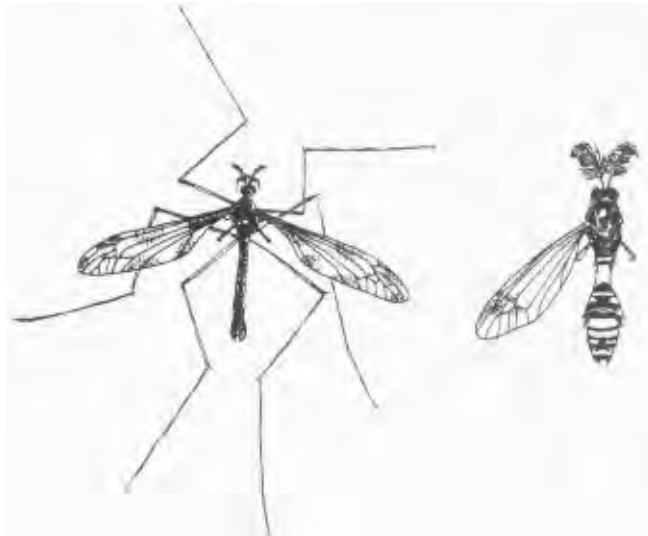
A százlábú típusú testszerveződés egyszerű ismétlésen alapul. A „vonat” teljes hosszában szabályos térbeli ismétlődés tapasztalható, ráadásul minden szelvény kétoldalian szimmetrikus. Ha azonban távolodunk a százlábúaktól és rokonaiktól, megfigyelhetjük az evolúció egy állandó irányvonalát: a szelvények egymástól egyre különbözőbbekké válnak, nem minden mutáció ismétlődik minden szelvényben. A rovarok olyan százlábúak, melyek szelvényei – az előről számított hetedik, nyolcadik és kilencedik kivételével – elvesztették lábaikat. A pókok négy szelvényen őrizték meg a lábukat. Valójában mind a pókok, mind a rovarok ennél többet őriztek meg ősi végtagjaikból, csali éppen már más célra használják őket: csápként vagy állkapocsként. A homárok, sőt még inkább a tarisznyarakok még tovább mentek a szelvények közötti nem kaleidoszkópos differenciáció terén.

A hernyók testének első részén megtaláljuk a szokásos három pár „valódi rovarlábát”, de testük hátsó részén újra felfedezték a lábat. Ezek a lábak puhák, és más téren is erősen különböznek a három torszelvénnyel kinövő tipikus kitines ízelt lábaktól. A rovarok szárnyainak szokásos helye a hetedik és nyolcadik testszelvény. Vannak szárnyatlan rovarok, amelyek minden őse is szárnyatlan volt. Mások, pl. a

bolhák vagy a hangyák dolgozói az evolúció során veszítették el őseik szárnyait. A dolgozó hangyák genetikailag alkalmasak szárnyak növesztésére: ha másként nevelnék fel, minden dolgozóból királynő lehetne, a királynőknek pedig van szárnyuk. Érdekes, hogy rendszerint a hangyakirálynő is elveszíti szárnyait élete során; néha egyenesen maga rágja le azokat a nászrepülés befejeztével, amikor felkészül a föld alatti életre. A szárnyak a föld alatt útban vannak, éppúgy, mint a gazdaállat szőrzetének vagy tollzatának sűrű erdejében, ahol a bolhák élnek.

Míg a bolhák mindkét szárnypárjukat elvesztették, a kétszárnyúak (ebbe a hatalmas családba tartozik az összes légy és szúnyog) csak az egyik párt veszítették el, a másikat megtartották. A második pár szárny erősen leegyszerűsödött formában, billéerként – a működő szárnyak mögül kikandikáló apró dobverőként – maradt fenn (7.11. ábra). Nem kell mérnöknek lenni ahhoz, hogy lássuk: a billérek arra nem alkalmasak, hogy szárnyként működjenek. Mérnök legyen viszont a talpán, aki megmondja, hogy mire alkalmasak. Úgy tűnik, a rovar kicsiny stabilizáló berendezései, hasonlóan a repülőgép vagy a rakéta pörgettyűs elhajlásmérőjéhez. A billérek a szárnycsapás frekvenciájával rezegnek. A billér alapjánál található érzékszettek fordítóerőket észlelnek a pilóták által „bólintás”-nak, „orsózás”-nak és „legezés”-nek ismert három irányban. Az evolúcióra jellemző az adott lehetőségek kihasználása: abból építkezik, amit talál. Egy repülőgépet tervező mérnök rajztáblája mellett elemekből épít fel egy stabilizáló berendezést. Az evolúció ugyanezt úgy éri el, hogy azt alakítja át, ami rendelkezésére áll: jelen esetben egy szárnyat.

Ha a szelvények az evolúció során egymástól különbözővé alakulnak, az nem kaleidoszkópszerű fejlődés: annak éppen az ellenkezője. Vannak azonban más változások, melyeket kaleidoszkópszerűnek tekinthetünk, ha bonyolultabb módon is, mint az eddig látottakat.



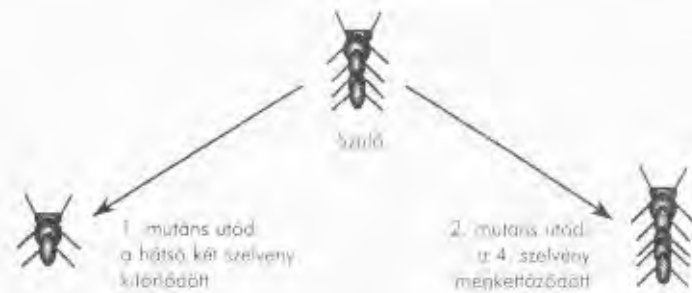
7.11. ábra. A kétszárnyúak családjának tagjai második pár szárnyuk helyén billért viselnek. A nagy testű lószúnyogokon ezek különösen jól láthatók. Balra: *Tipula maxima*; jobbra: *Ctenophora ornata* (lábait és jobb szárnyát nem ábrázoltuk).

Az ízeltlábúak testének felépítése gyakran olyan, mint egy zárójelpárokat tartalmazó mondat. (Ha egy mondaton belül megnyitunk egy zárójelet [a belső zárójelet <mint pl. ezt> megfelelő módon kell elhelyezni], azt végül be is kell zárni.) A zárójelek közötti szöveget tetszés szerint bővíthetjük vagy rövidíthetjük, ám a „(-nek mindig kell legyen „,)” párja. Ugyanígy „megfelelő módon” kell elhelyezni az idézőjeleket is. Még érdekesebb, hogy ugyanez a helyzet az alárendelt mellékmondatokkal. „Az ember, aki beleült a rajzszőgbe...” – ez a mondat olyan, mint egy megnyitott zárójel: vissza kell térnünk a főmondatához. Mondhatjuk, hogy „Az ember felugrott”, vagy hogy „Az ember, aki beleült a rajzszőgbe, felugrott”, de nem állhatunk meg ott, hogy „Az ember, aki beleült a rajzszőgbe”, hacsak nem egy kérdésre válaszolunk vagy egy képnek adunk címet – de ilyenkor a mondatot a szöveg- vagy képi környezet teszi teljessé. A mondatokban a beágyazások rendjét nyelvtani szabályok határozzák meg. Ehhez hasonlóan a közönséges és ostoroscsápú garnélák, homárok és tarisznyarakok elülső testvégén hat összeforrt fejszelvényt találunk, a hátulsó testvégükön pedig egy véglemezt – köztük sok minden lehetséges.

Már megismerkedtünk a kaleidoszkópszerű mutációk egy fajtájával: a különböző szimmetriasíkokba tükrözött mutációkkal. A „nyelvtani” mutációk más értelemben kaleidoszkópszerűek. A változás lehetősége korlátozott, valahogy ekképpen: „Nem számít, hogy a láb középső része hány ízből épül fel, de a láb végén karomnak kell lennie”. Ted Kaehler, az Apple számítógépes cég munkatársa és jómagam írtunk egy programot, mely ilyen jellegű szabályokat is tartalmaz. Hasonlít a Vak Órásmester programhoz, de az „állatokat”, amiket létrehoz, arthromorfoknak nevezzük, és embrionális fejlődésüket olyan szabályok is befolyásolják, amilyenek a biomorfokét nem. A számítógép alkotta arthromorfok teste szelvények sorozatából áll, akárcsak a valódi ízeltlábúaké. Minden szelvény egy legömbölyített törzsdarabból áll (pontos alakját és méretét a biomorfokéhoz hasonló „gének” szabják meg), melyhez csatlakozhatnak mindkét oldalra kinyúló ízelt lábak. Ezt is, akárcsak a lábak hosszát, az ízek számát, az egyes ízek hosszát és illeszkedési szögét, „gének” határozzák meg. A láb végén lehet karom, ennek létét és alakját szintén gének szabják meg.

Ha az arthromorfok embrionális fejlődése megegyezne a biomorfokéval, lenne egy *NSeg* nevű gén, mely meghatározza a szelvények számát, és mutálhat. Ha *NSeg* értéke 11, az állat 11 szelvényből fog felépülni. Lenne egy *NÍz* nevű gén, mely az egyes lábak ízületeinek számát szabályozza. Mindegy, milyen változatosak az 1.16. ábra „állatkertjének” biomorfjai – sokféleségük az én örömöm és büszkeségem –, mindegyiküknek ugyanannyi génje van: 16. A *vak órásmester*-ben bemutatott eredeti biomorfoknak csak kilenc génjük volt. A színes biomorfoknak több génjük volt (36); teljesen át kellett írni a programot, hogy ezt kezelni tudja. Ez három különböző program. Az arthromorfok nem így működnek. Nincs rögzített génkészletük. Genetikai rendszerük rugalmasabb (olvasóim közül legfeljebb a vájtfulú programozókat érdeklí, hogy az arthromorfok génjei mutatókkal ellátott kapcsolt lista formájában, a biomorfoké fix Pascal-rekordok formájában tárolódnak). Az arthromorfok evolúciója során a régi gének megkettőződésével spontán módon új gének keletkezhetnek. A gének néha egyenként kettőződnek meg, máskor hierarchikus felépítésű csoportokban. Ez azt jelenti, hogy egy mutáns utódnak elméletileg kétszer annyi génje is lehet, mint

szülőjének. Ha megkettőződéssel új gén vagy géncsoport születik, értékük kezdetben megegyezik a megkettőzött gének értékével. Deléción (kitörölődés) is lehetséges, a gének száma nemcsak nőhet, de csökkenhet is. A megkettőződés és deléción a testalak változásaiban fejeződik ki, így szelekció alatt áll (emberi szem által történő mesterséges szelekció alatt, mint a biomorfok). A gének számának változása gyakran a szelvények számának változásában mutatkozik meg (7.12. ábra), de megmutatkozhat egy végtag izeinek száma változásában is. Mindkét esetben „nyelvtani” jellegű változás jön létre: közbülső részek elmaradhatnak, de az első és hátsó rész változatlan marad.



7.12. ábra. Szelvényeik számában különböző arthromorfok.
A kép felső részén látható szülőnek két mutáns utódja lett.

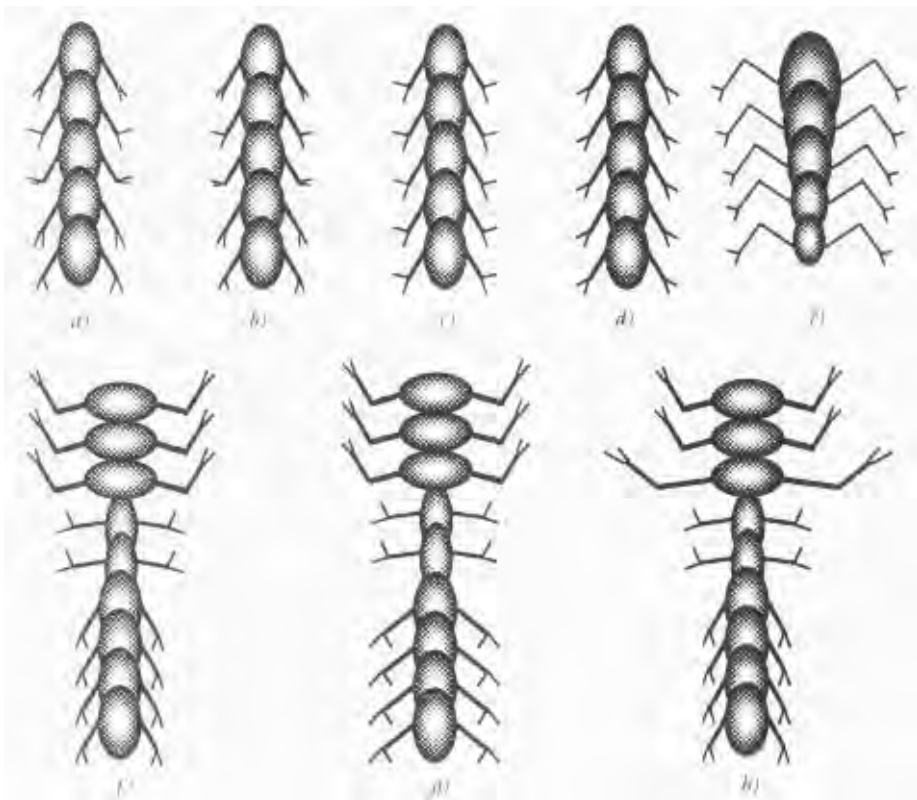
Egy szelvény megkettőződése vagy deléción az állat teste vagy végtagja közepén is történhet, nemcsak a végén. Ez adja az arthromorf embriológia „nyelvtani” jellegét: képes arra, hogy egy teljes „mellékmondatot” beépítsen egy hosszabb „mondat” kereteibe vagy kitöröljön onnan. A „nyelvtani beágyazáson” túl az arthromorfok kaleidoszkópszerű embriológiájának van még egy sajátossága. Az arthromorf testének minden, számokkal leírható részletét (pl. egy karom szöge vagy egy szelvény törzsszélessége) három gén határozza meg, melyek számértéke összeszorozódik az alább részletezésre kerülő módon. Van egy, az adott szelvényre jellemző gén, egy, az egész állatra jellemző gén és egy, a szegmentek tagjának nevezett csoportjára (testtájra) jellemző gén. A tagma (többes száma: tagmata) szót a valódi biológiából kölcsönöztük. A valódi állatokban pl. tagma a rovarok tora vagy potroha.

Bármely részletet, pl. egy karom szögét együttesen meghatározó három gén a következőképpen jellemezhető. Az adott szelvényre jellemző gén egyáltalán nem kaleidoszkóp jellegű: ha mutál, az csak erre a szelvényre lesz hatással. A 7.13a ábrán olyan arthromorf látható, melynek minden szelvényében más a karomszöget meghatározó szelvény szintű gén értéke. Az eredmény: minden szelvényen más a karom szöge. (Az összes arthromorf kétoldalian szimmetrikus.)

A – példánkban a karom szögét meghatározó – három gén közül a második az állat összes szelvényére hat. Ha ez a gén mutál, a karmok szöge az állat egész hosszában egyszerre változik. A 7.13b ábra arthromorfja ugyanolyan, mint a 7.13a ábrán látható, csak behúzta kicsit a karmait – vagyis azok megrövidültek. A karomszöget az egész test szintjén befolyásoló gén kisebb értékre mutált. Az eredmény, hogy minden egyes karom kisebb lett, de a szelvényeken belül egymáshoz viszonyított sajátosságait megtartották. Matematikai módon ez úgy írható le, hogy minden egyes szelvény szintű karomszöggén számértékét megszoroztuk a karomszög testszintű génjének

számértékével. A karom szöge természetesen csak egyike azon számokkal jellemezhető részleteknek, melyeket a test egész hosszában egyszerre hasonló szorzatok határoznak meg. Vannak pl. a lábhosszt testszinten meghatározó gének, melyek a lábhosszt szelvény szinten meghatározó génekkel szorzódnak össze. A 7.13c és d ábrákon olyan arthromorfokat látunk, amelyek szelvényei között nincs különbség, de eltérnek az egész testre vonatkozó karomszögén értékében.

A gének harmadik csoportja egy testtájat – tagmát – befolyásol, mint pl. a rovarok torát. A rovaroknak három testtájuk van, az arthromorfoknak tetszőleges számú lehet, mindegyikben tetszőleges számú szelvénnel. A szelvény szám és a tagmaszám mutációk révén egyaránt változhat a már tárgyalt „nyelvtani” módon. Minden testtájnak megvan a saját génkészlete, mely a törzs, a végtagok és a karmok alakját befolyásolja. Pl. minden tagmának van egy, a rajta található karmok szögét befolyásoló génje. A 7.13f ábrán egy három testtájú arthromorfot látunk.



7.13. ábra. Különböző típusú genetikai hatások bemutatására kiválasztott arthromorfok: a) a karomszög génje minden szelvényben más; b) a karomszög testszintű génjének mutációja; c) egyforma szelvényekből felépülő arthromorf; d) ugyanaz, mint a c), de a karomszög testszintű génje egyszeri mutációjával; e) fokozatosan változó szelvényméretek, a végtagok hossza változatlan; f) arthromorf három testtájjal (tagmata); a szelvények testtájanként különböznek, de egy tagmán belül egységesek; g) ugyanaz, mit az f), de egy mutáció befolyásolja a végtagokat a (harmadik) tagma szintjén; h) f)-nek egy szelvény végtagjait érintő mutációja.



A testgének esetében már tárgyalt módon, génértékek megsokszorozódásának hatására, a testrészek jobban különböznek az egyes tagmák között, mint ugyanazon tagmán belül.

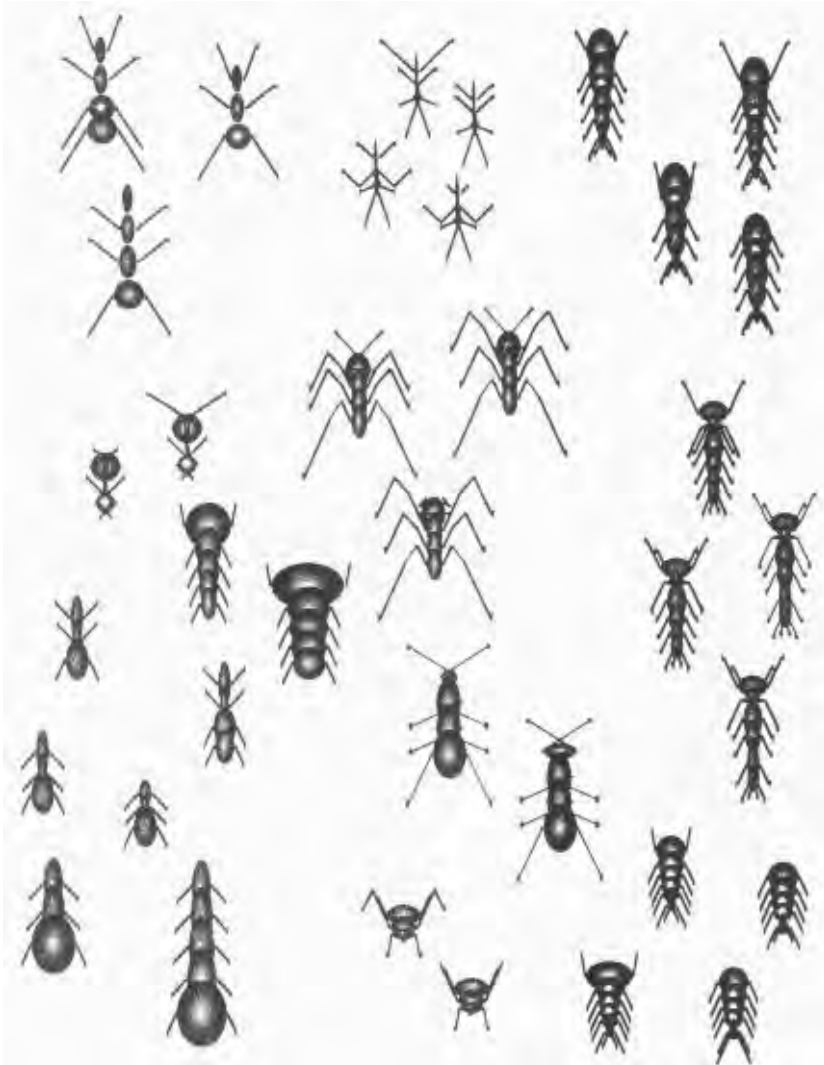
Összefoglalva: egy adott tulajdonság – pl. a karomszög – mértékét végső soron három gén számértékének szorzata adja: a karomszög szelvénygénje, a karomszög tagmagénje és a karomszög testgénje. Mivel a nullával való szorzás nullát ad eredményül, ha pl. a végtaghosszgén értéke egy adott tagmában nulla, akkor ezen a tagmán nem lesznek végtagok, akárcsak a darázs potrohán, függetlenül a másik két szint génértékeitől. A 7.13g ábrán a 7.13f egy utódját látjuk, melynek a harmadik tagmára vonatkozó végtaghosszgénje mutált. A 7.13h ugyancsak a 7.13f utódja, de itt csak egy szelvény szintű végtaggén mutált.

Az arthromorfok kaleidoszkópszerű embriológiája tehát háromszintű. A mutációk vonatkozhatnak egy szelvényre, ekkor a hatás csak egyszer tükröződik, a test másik oldalára. De kaleidoszkópszerűek lehetnek „százlábú módra” is az egész szervezet szintjén: az ilyen mutációk a test összes szelvényében megismétlődnek (és persze mindkét oldalon is), sőt kaleidoszkópszerűek egy köztes, „rovar” szinten, a testtájak, tagmák szintjén: az ilyen mutációk egy testtáj minden szelvényében megjelennek, de a test többi részén nem. Meggyőződésem, hogy ha az arthromorfoknak a való világban kellene megélniük, háromszintű kaleidoszkópszerű mutációs rendszerük ugyanolyan evolúciós-gazdaságossági okok miatt lenne előnyös, mint a tükrös szimmetriák esetében már tárgyaltuk. Ha pl. a középső testtáj végtagjai járólábakként, a hátulsó testtáj végtagjai pedig kopolyúkként működnek, az a logikus, hogy egy evolúciós változás kiterjedjen ugyanazon testtáj végtagjaira, de ne a másikra: a járófüggeléken javító változás nem valószínű, hogy a kopolyúkon is javítana. Ezért előnyös, ha vannak olyan mutációk, melyek első fellépésükkor mindjárt megjelennek egy testtáj összes szelvényében. Másrészt viszont további előnyöket rejthet, hogy az egyes szelvények végtagjai apró, egyéni módosulásokkal is alkalmazkodhassanak sajátos feladatukhoz, ezért hasznosak a csak kétoldali szimmetriát mutató mutációk. Végül lehet előnye annak is, ha egy változás a test minden szelvényében megjelenik, nem teljesen elfedve a szelvények és testtájak közötti különbségeket, de – pl. szorzás révén – súlyozva őket.

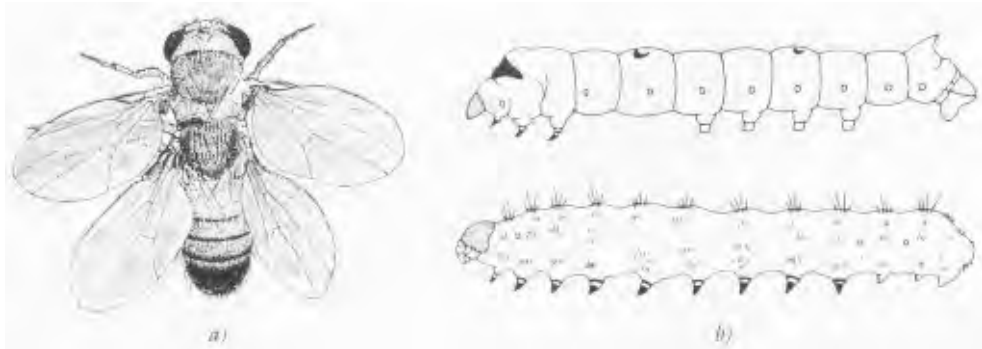
Biológiai indíttatású kiegészítésként Ted Kaehlerrel még „fokozatosság”-géneket is beépítettünk az arthromorfprogramba. A fokozatosságének biztosítják, hogy egy adott tulajdonság, pl. a karomszög, nem rögzített a test egész hosszában, hanem előlről hátra haladva fokozatosan csökken (vagy növekszik). A 7.13e ábra olyan arthromorfot ábrázol, melynek szelvényei között a különbséget egyedül a szelvényméret (negatív) fokozatossággénéje változtatja. A test hátrafelé egyre inkább elvékonyodik.

Az arthromorfok evolúcióját ugyanúgy mesterséges kiválasztáson alapuló szelekció irányítja, mint a biomorfokét. Az arthromorf szülő a képernyő közepén csücsül, véletlenszerű mutációval keletkezett utódjai körében. A válogató ember – akárcsak a biomorfoknál – nem látja a géneket, csak hatásukat, a test alakját, ebből választja ki, hogy mit tenyészt tovább (és itt sincs nemiség). A kiválasztott arthromorf besiklik középre és körülveszi magát mutáns utódai családjával. A nemzedékek változása során a színtalpak mögött véletlenszerű mutációk révén változik a gének száma és értéke. A

válogató ember csupán az arthromorfok fokozatosan evolválódó sorát látja. Hasonlóan ahhoz, ahogy minden arthromorf -ból, minden biomorf -ból származik. A szelvények takaros árnyalása csak a térbeli hatást szolgálja, jelen programon belül nem változik, bár a későbbi változatokban (háromszintű) genetikai szabályozás alá helyezhető. Az 1.16. ábra biomorfállatkertjéhez hasonlóan a 7.14. ábrán az arthromorfok állatkertjét mutatom be; hosszabb-rövidebb ideig tartó mesterséges szelekcióval tenyésztettem ki őket, rendszerint valamilyen valóságos biológiai forma irányába terelve a szelekciót.



7.14. ábra. Arthromorfok állatkertje. A képen látható arthromorfok szelekciójának alapelve az volt, hogy ránézésre hasonlítsanak valódi rovarokhoz.



7.15. ábra. Homeotikus mutációk: *a)* négyszárnyú ecetmuslinca, a normális ecetmuslincák második szárnypárját billérek helyettesítik, mint a 7.11. ábrán látható; *b)* normális (fenn) és mutáns (lenn) selyemhernyó, a normális hernyó csak a három torsiágyon visel szabályos ízelt lábakat, a mutáns hernyónak kilenc „torsiágya” van.

Az „állatkert” lényei a kaleidoszkópszerű embriológia minden szintjén változhatnak. Vannak elkeskenyedő testű lények legalább egy fokozatosságággal. Vannak határozottan testtájakra különülők: a szelvények jobban hasonlítanak közeli társaik csoportjára, mint a távolabbiakra. Felfedezhetünk azonban különbségeket egyazon testtáj szelvényei között is. A valódi rovarok, rákok és pókok testfelépítése hasonló kaleidoszkópszerű vonásokat mutat. Különösen sokatmondóak e téren a valódi ízeltlábúak ún. homeotikus mutációi, melyek eredményeképp egy szelvény úgy változik meg, hogy egy más szelvényre jellemző fejlődési folyamaton megy keresztül.

A 7.15. ábrán a homeotikus mutációra mutatok példát az ecetmuslinca (*Drosophila*) és a selyemhernyó esetében. A normális ecetmuslincának, mint minden lénynek, csak egy pár szárnya van. A második pár helyén a már részletezett billérek találhatók. A képen egy mutáns ecetmuslinca látható, mely nemcsak hogy szárnyakat visel billérei helyett, de az egész harmadik torsiágy a másodiknak a megkettőződése. Az ízeltlábúakban ez úgy jöhet létre, hogy egy „nyelvtani” megkettőződést egy deléció követ. A 7.15b ábrán egy mutáns selyemhernyó látható. A normális hernyóknak a rovarokhoz hasonlóan három pár „szabályos” ízelt lábuk van, bár a test hátsó részén lehetnek lágy, „újrafelfedezett” állábak. A 7.15. ábra alsó részén látható mutáns hernyónak azonban kilenc pár „szabályos” ízelt lába van. Az történt, hogy a tortagma szelvényei megkettőződtek, akárcsak a 7.12. ábra jobb oldali arthromorfjánál. A homeotikus mutációk legismertebbike az ecetmuslincák „antennapediája”: ezeknek a mutáns legyeknek szabályos felépítésű lábai nőnek ki – abból a mélyedésből, ahol a csápoknak kéne lenniük. A lábépítő mechanizmus rossz szelvényen kapcsolódott be.

Ezek a mutánsok nagyon sérülékenyek, nem valószínű, hogy a természetben fennmaradjanak – más szóval, az evolúció nem valószínű, hogy megőrzi a homeotikus mutációkat. Óriási fogás volt tehát, amikor (meglehetősen sietősen, mert haspók vagyok) végigszaladva egy ausztrál bankett soklábú tengeri herkentyűkkel megrakott svédasztala mellett szemembe ötlött az az állat, amit az ausztrál ínyencek egyszerűen mélytengeri poloskának neveznek.



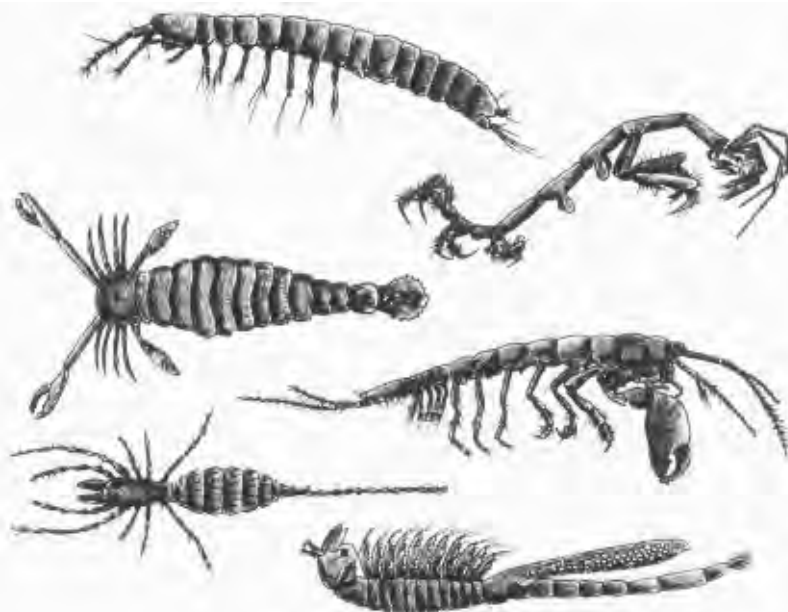
7.16. ábra. Evolúciósan sikeres homeotikus mutáns a természetben? Medverák (*Scyllarus*)

Ez egy rákfaj, mely Földünk különböző tájain medverák, papucsrák, spanyol homár vagy lapátorrú homár neveken ismert. A 7.16. ábrán egy tipikus, az Oxfordi Múzeumból kölcsönzött példány látható, a *Scyllarus* nemzetség képviselője. Az a lenyűgöző számomra ezekben az állatokban, hogy olyanok, mintha két farki végük lenne. Ennek oka, hogy az elülső testvég csápjai (egész pontosan a második pár csáp) megtévesztésig hasonlítanak az uropodium nevű függelékerekre (az utolsó pár potrohláb), melyek a medverák hátsó testvégének legszembetűnőbb jellemzői. Fogalmam sincs, miért lettek ezek a csápok ilyenek. Lehet, hogy az állat ásóként használja őket, de az is lehet, hogy a ragadozókat éppúgy becsapják, mint engem. A medverák visszahúzóási reflexe rendkívül gyors, egy hatalmas, erre a célra kifejlesztett idegsejt irányítja. Ha megijeszti, döbbenetes sebességgel menekül hátrafelé. Lehet, hogy egy ragadozó erre számítva az állat „farka” mögé kap, ami bejöhethet egy másik homárnál, de nem a *Scyllarus*nál: a látszólagos „hátsó” tulajdonképpen „elő”, így a ravaszkodó ragadozó éppen a rossz irányt választja. Akár igaz ez a gondolatmenet, akár nem, e rákoknak minden bizonnyal származik valami hasznuk fura alakú csápjaikból. Bármi is ez a haszon, egy még hajmeresztőbb spekulációt építünk e jószágokra. Feltételezésem az, hogy a *Scyllarus* lehet, hogy a vadon előforduló homeotikus mutációk egy példája, a laboratóriumi ecetmuslincák antennapediájával analóg módon. Az antennapediával szemben ez a mutáció képes volt beépülni a természetes evolúciós változások sorába. Szerény véleményem az, hogy az ősi *Scyllarus* homeotikus mutációt szenvedett: egy olyan szelvényben, ahol csápoknak kellett volna fejlődni, az uropodiumot kialakító „szubrutin” kapcsolt be, ám ez a változás valamilyen okból hasznosnak bizonyult. Ha igazam van, a természetes szelekció által megőrzött makromutáció ritka példájával, a 3. fejezetben említett ún. „reményteljes szörny” elmélet egy ritka megtestesülésével állunk szemben.

Ez mind csak találgatás. Homeotikus mutációk laboratóriumban előfordulnak, és az embriológusok beépítették őket a szelvényes test kialakulását magyarázó részletes elméletükbe. Bármely izgalmasak is ezek a részletek, könyvünk keretei közé nem férnek be. Befejezésésként arra hívom az olvasót, hogy a számítógépes arthromorfok és a

háromszintű kaleidoszkópszerű mutációk fényében vegyünk szemügyre néhány valódi ízeltlábú állatot.

Nézzük meg a 7.17. ábrán látható valódi ízeltlábúakat, és képzeljük el, hogyan alakulhattak ki az arthromorfokhoz hasonlóan kaleidoszkópszerű génműködés hatására. Felismerjük pl. valahol a 7.13e ábra elkeskenyedő szabását? Figyeljünk ismét a valódi ízeltlábúakra, és képzeljük el, hogy egy mutáció megváltoztat valami apróságot a láb hegyén vagy a szelvény törzsi részén. Először azt képzeljük el, hogy a mutáció csak egyetlen szelvényre hat. Lefogadom, hogy automatikusan a jobb és bal oldalon tükröképszerűen jelenik meg szemünk előtt, pedig ez nem szükségszerű. Most képzeljük el a láb hegyét megváltoztató mutációt, de úgy, hogy egymás utáni szelvények sorozatára hat. A 7.17. ábra állatain több példát is látunk arra, hogy egymás utáni szelvények sora hasonló. Végül képzeljük el azt, hogy ez a mutáció az egész test összes szelvénye lábainak hegyét érinti (már amelyiknek van lába). Úgy érzem, hogy az arthromorfokról és a háromszintű kaleidoszkópszerű embriológiájukról való gondolkodás eredményeképp a valódi ízeltlábúakra (mint pl. a 7.17. ábrán láthatók) is más szemmel nézünk. Ráadásul azt sem nehéz elképzelni, hogy az arthromorfokéhoz hasonló kaleidoszkópszerűre korlátozott embrionális fejlődés, a szimmetriatükrök esetéhez hasonlóan ellentmondásos módon, evolúciós lehetőségei gazdagabbak, mint egy lazább, korlátok nélküli fejlődése. A 7.17. ábra és az itt nem ábrázolt, megszámlálhatatlanul sok többi ízeltlábú alakja különös értelmet nyer számomra a fenti gondolkodásmód fényében.



7.17. ábra. Mi mindenre jók a szelvények: ízeltlábúak csokra. A bal felső sarokból indulva, az óramutató járásával egyező irányban: négy rák, egy óriási kihalt tengeri skorpió (mérete megközelítette a három métert) és szálfarkú (*Palpigrada*: a pókok és skorpiók távoli rokona).

E fejezet üzenete, hogy a kaleidoszkópszerű embrionális fejlődés, működjön akár sorba rendezett szelvénycsoportokon (mint a rovarokban) vagy szimmetria-„tükrökön” keresztül (mint pl. a medúzában), paradox módon egyszerre jelent korlátozást és lehetőséget. Azáltal segítik az evolúciót – megbocsátható módon megszemélyesítő szóhasználatl élve –, hogy a természetes szelekciót megkímélik attól, hogy idejét olyan területek bekalandozásával töltse, ahonnan úgysem származik semmi jó. A világot olyan nagy állatcsoportok népesítik be – ízeltlábúak, puhatestűek, tüskésbőrűek, gerincesek –, amelyek mindegyike az evolúciós szempontból gyümölcsözőnek bizonyult kaleidoszkópszerűen korlátozott embriológiával él. A kaleidoszkópszerű embriológia alkalmas arra, hogy örökül kapja a Földet. Ha a kaleidoszkóp-módszer – „tükrözés” – sikeres evolúciós szétsugárzást (radiációt) eredményezett, az új tükrözést e szétáradó leszármazási vonalak mindegyike magával viszi. Ez nem a szokott értelemben vett darwini szelekció, hanem annak magasabb szintű analógiája. Nem kell nagyon elereszteni a fantáziánkat ahhoz, hogy azt állítsuk: az evolúcióra való képesség evolúciója ennek következménye.

VIRÁGPORSZEMEK ÉS VARÁZSGOLYÓK

Anglia vidéki tájain autóztam hatéves Juliet lányommal, aki észrevett néhány vadvirágot az út szélén. Megkérdeztem, mit gondol, vajon miért vannak vadvirágok. „Két célból – felelte. – Először is széppé teszik a világot, másrészt segítenek a méheknek, hogy mézet gyűjtsenek nekünk.” Válasza meghatott, és szomorú voltam, hogy fel kell világosítanom: nincs igaza.

Kislányom válasza nem sokban különbözött attól, amit felnőttek sora is adott a történelem során nemegyszer. Régóta, széles körben vallják, hogy az oktalan teremtmények a mi hasznunkat szolgálják. A Teremtés Könyve első fejezete világosan beszél. Az ember „uralkodhat” minden élők felett, az állatok és növények azért vannak, hogy az embernek öröme és hasznára legyenek. Mint Sir Keith Thomas történész *Az ember és a természet világa*, c. művében adatokkal igazolja, ez a szemlélet itatja át a középkori kereszténységet, és él a mai napig. A 19. században William Kirby tiszteletes úgy gondolta, hogy a tetvekre azért van szükség, hogy tisztálkodásra ösztönözzenek. James Pilkington Erzsébet-kori püspök szerint a vadállatok fejlesztik az ember bátorságát és jó gyakorlatot kínálnak a háborúzáshoz. Egy 18. századi író szerint a böglyök azért teremtettek, „hogy az emberek gondolkodásukat és ügyességüket fejlesztve védekezzenek ellenük”. A rákok azért viselnek kemény páncélt, hogy mielőtt megennék őket, ügyesedjünk annak feltörésén. Egy másik középkori vallásos szerző úgy gondolta, hogy a gyomok hasznunkra vannak: lelkünket edzi kihúzkodásuk nehéz munkája.

Úgy vélték, az állatokat az a megtisztelés érte, hogy osztozhatnak velünk, emberekkel az Ádám bűnéért való vezeklésben. Keith Thomas idézi egy 17. századi püspök véleményét erről: „Bármilyen rossz is történik velük, az nem az ő büntetésük, hanem a miénknek a része”. Úgy érezzük, egy valóban nagyszerű vigasz lehet számukra. Henry More 1653-ban úgy gondolta, hogy a szarvasmarhák és juhok elsősorban azért kapták életüket, hogy húsuk frissen maradjon „míg szükségünk lesz arra, hogy megegyük”. E 17. századi gondolatmenet logikus folytatása, hogy az állatok egyenesen boldogok, amikor megesszük őket.

A fácán, a fogoly és a pacsirta
Házadba szállnak, mint a Bárkába.
Az ökor szántsándékkal megy a mészárszékre,
Akárcsak a bárány.
Minden állat
Áldozatul kínálja magát.

Douglas Adam futurisztikusan bizarr végletekig fejlesztette ezt az ötletet a *Vendéglő a világ végén* című könyvében, amely a *Galaxis útikalauz stopposoknak* trilógia második része. Amikor a főhős és társai leülnek ebben az étteremben, egy nagy négylábú alázatos tisztelettel asztalukhoz lép, és udvarias, kellemes, modorban felkínálja magát vacsorára. Elmagyarázza, hogy fajtáját azért tenyésztették ki, hogy arra vágyjon, hogy megegyék; világosan és egyértelműen fogalmaz: „Talán egy kis lapockát? ... Fehérborban párolva? ... De a fartó is nagyon jó... sokat tornáztattam és sok abrakot is ettem, hogy jó húsos legyen”. Arthur Dent, a vacsoravendégek legkevésbé galaktikusan bonyolult lelkű tagja elszörnyed, a többiek azonban nagy adag rostélyost rendelnek, a kedves teremtmény pedig hálásan kitrappol a konyhába, hogy agyonlője magát (közben – jegyzi meg a jóindulatú szerző – megnyugtatóan Arthurra kacsint).

Douglas Adam írása bevallottan komédia, de legjobb tudomásom szerint a következő sorokat a banánról – szó szerint idézem egy modern, sok kreacionista levelezőpartnerem egyike által küldött értekezésből – komolyan gondolták⁶:

Vegyük észre, hogy a banán:

1. Alakja illeszkedik az emberi kézhez.
2. Felszíne nem csúszós.
3. Külsőjén a belső tartalomra utaló jelzést visel: zöld: túl korai; sárga: pont jó; fekete: késő.
4. Van egy kicsomagolást segítő fogantyúja.
5. Csomagolása perforált.
6. Csomagolása biológiai úton lebontható.
7. Alakja szájba illő.
8. Csúcsán van egy pont, mely megkönnyíti a kicsomagolást.
9. Ízletes.
10. Az arc felé hajlik, hogy megkönnyítse az evés folyamatát.

Az a nézet, hogy az élőlények azért vannak, hogy hasznunkat szolgálják, még ma is uralja gondolkodásunkat, még ha indoklása már idejétmúlttá is vált. A tudományos megértés érdekében ki kell alakítanunk a természetes világ kevésbé emberközpontú megértését. Ha az állatokat és növényeket valami cél érdekében helyezték a világba – és tekintélyes számú szónoklat állítja, hogy így történt –, ez biztosan nem az emberek haszna. Meg kell tanulnunk, hogy ne az ember szemén keresztül nézzük a világot. A virágok esetében – ahol fejezetünket kezdtük – legalább egy fokkal értelmesebbnek tűnik a méhek és a többi megporzó rovar szemével tekinteni rájuk.

A méhek egész élete a virágok színpompás, illatos, nektárt csurgató világában zajlik. Nemcsak a mézelő méhekről beszéllek: rajtuk kívül még több ezer különböző méhfaj létezik, és valamennyien erősen függenek a virágoktól. Lárvaik virágporon élnek, a kifejlett rovarok repülőmotorjának egyedüli üzemanyaga pedig a nektár, amit teljes egészében a virágok biztosítanak. A „biztosítanak” szó ez esetben valóban tevékenységet is jelent. A virágpör, szemben a nektárral, nem *kizárólag* a méheknek

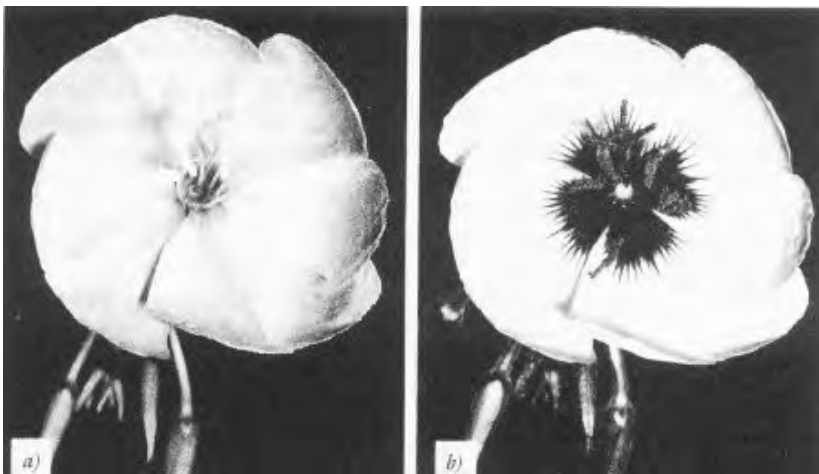
⁶ Tévedés. Nyilvánvalóan paródiája ez is a kreacionizmus által feltételezett „tervezett célszerűségnek” (E)

készül; elsősorban a növény saját célját szolgálja. A méheknek készségesen megengedik, hogy a virágpor egy részét elfogyasszák, hiszen szolgálatuk – a virágpor átszállítása más virágokra – nagyon értékes. A nektár azonban szélsőségesebb eset. Egyetlen értelme, hogy a méheket jóllakassa. A nektár kizárólag azért termelődik nagy mennyiségben, hogy kifizesse a méheket és más megporzó rovarokat. A méhek keményen megdolgoznak érte. Fél kiló lóhereméz elkészítéséhez kb. tízmillió virágot kell felkeresni.

„A virágok – mondhatják a méhek – azért vannak, hogy minket, méheket virággal és nektárral lássanak el.” Nekik sincs azonban teljesen igazuk, bár sokkal közelebb járnak hozzá, mint mi, emberek. Még azt is állíthatjuk, hogy a virágokat, legalábbis az élénk színű, látványos virágokat a méhek, lepkék, kolibrik és más megporzók „nemesítették ki”. E fejezet alapjául szolgáló előadásom eredeti címe „Az ultraibolya kert” volt. Ez egy példázat. Az ultraibolya fényt az emberi szem nem érzékeli. A méhek viszont igen, külön szinként, amelyet néha méhbíborknak neveznek. A virágok a méhek szemével nézve nagyon mások lehetnek (8.1. ábra). Hasonlóképpen a „Miért vannak virágok?” kérdésre is más választ adhatunk, ha nem az ember, hanem a méhek szempontjából közelítünk hozzá.

„Az ultraibolya kert” cím azért emlékeztet a méhek látásának furcsaságára, hogy figyelmünket arra fordítsuk, kinek vagy minek a „hasznát szolgálják” a virágok és más élőlények. Ha a virágoknak szemük lenne, az, amit a világból látnak, valószínűleg még furcsább lenne számunkra, mint a méhek ultraibolya világképe. Mire jók a *méhek* a virágok nézőpontjából? A virágport az egyik virágról a másikra átszállító távirányítású szállítóeszközök. Ennek a hátterét meg kell magyaráznom.

Először is nyomós általános genetikai oka van annak, hogy előnyös a más növény virágporával történő idegenbeporzás. A vérfertőző önmegtermékenyítés során elvesznének az ivaros szaporodás előnyei. (Hogy pontosan mik ezek, az önmagában is nagyon érdekes kérdés.)



8.1. ábra. *a)* ligetszépe (*Oenothera*) fényképe az emberi szemnek látható, *b)* ultraibolya fényben (a rovarok látják, az ember nem): így előtűnik a középpont körüli csillagmintázat. Valószínű, hogy ez vezeti el a rovarokat a nektárhoz és a virággalhoz.

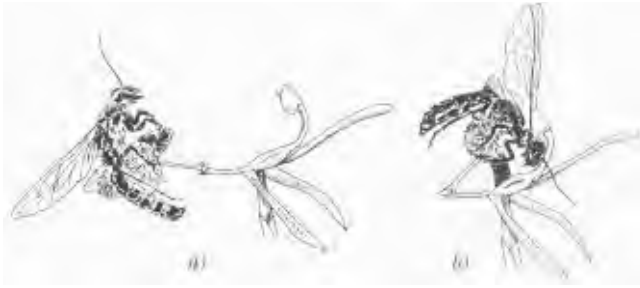
A termős virágait saját porzós virágai pollenjével megporzó fa akár ne is vesződött volna a megporzással. Hatékonyabb lett volna vegetatív klónt fejleszteni. Sok növény éppen ezt a megoldást választja, és ezt is meg lehet indokolni. Mint azonban már korábban láttuk, vannak olyan körülmények, melyek között még több érv szól a gének idegen génekkel való összekeverése mellett. Túl nagy kitérő lenne az érveket részletesen bemutatni, de kell, hogy legyen valami jelentős haszna a szex nevű hazárdjátéknak, különben a természetes szelekció nem engedné, hogy olyan elsőpró erejű szenvedéllyé váljon akár az állat-, akár a növényvilágban. Bármilyen legyen is ez az előny, lényegében eltűnik, ha génjeinket nem egy másik egyedével, hanem saját génjeink egy szinte ugyanolyan sorozatával keverjük össze.

A virágok egyetlen szerepe a növény életében az, hogy egy más génkészlettel rendelkező másik növénnyel géneket cseréljenek. Egyesek, mint pl. a fűfélék, a szél segítségét kérik ehhez. A levegő telis-tele van virágporszemekkel, amelyek egy csekély töredéke elég szerencsés ahhoz, hogy ugyanazon fajú növény női ivarszervére érkezen (egy másik részük az allergiások orrában, szemében végzi). A megporzás ezen módja nagyon esetleges és bizonyos szempontból pazarló is. Gyakran eredményesebb rovarok (vagy más megporzók, pl. denevérek vagy kolibrik) szárnyait és izmait kihasználni. Ezzel a módszerrel sokkal közvetlenebbül lehet a virágpont célba juttatni, ezért jóval kevesebbre van belőle szükség. Másrészt viszont a rovarok odacsalogatásának is ára van. Fizetni kell a meghirdetésért – élénk színű szirmok és erős illatok –, és nektárban magáért a szolgáltatásért.

A nektár kiváló minőségű repülő-üzemanyag a rovar számára, a növénynek viszont sokba kerül előállítani. Egyes növények ezt igyekeznek megspórolni, helyette csaló módon hirdetnek. A leghírhedtebbek közülük a nőstény rovarok alakját és színét utánzó orchideák. A hím rovarok megpróbálnak párosodni velük, eközben kikerülhetetlenül rájuk tapad a pollínium (8.2. ábra), vagy az út másik végén leválik róluk. Vannak nőstény méheket utánzó méhbangók, hasonlóképpen specializálódott légybangók és darázsorchideák is. A darázsutánzó orchideák egyike a találó nevű kalapácsorchidea. Álnőstényét egy felfüggesztett, rugós nyélen tartja, megfelelő távolságra a virágpont tartalmazó részeketől (8.3. ábra).



8.2. ábra. Rovarutánzó orchidea. Ibériai bangó (*Ophrys vernixia*)



8.3. ábra. Kalapácsorchidea (*Drakaea fitzgeraldii*): a) a darázs rászáll a csalira; b) a rugó kiold, a darázs hátát többször odacsapja a pollíniumokhoz

Amikor hím darázs száll az álnőtényre, a rugó kiold, és a szerencsétlen hímét többször erősen odacsapja az üllőhöz, ahol a pollenszákok vannak. Mire a hím kiszabadítja magát, hátára már rátapadt a két pollínium.

Hajszálra ugyanilyen ötletes az ún. vödörorchidea, amely a kancsókaéhoz hasonlóan működik, egy lényeges különbséggel. A virágban nagy folyadéktartály található, amelynek csábító illata egy adott méhfaj nőtényének nemi csalogatóanyagára hasonlít. A faj hímje az illat vonzásában beleesik a tartályba és kis híján belefullad. Egyedüli menekülést egy szűk alagút kínál. A vergődő állat felfedezi ezt, és rajta keresztül mászik a szabadság felé. Az alagút külső végén azonban bonyolult kapuszerkezet várja – eltart néhány percig, míg innét is kiszabadul. Az alagút kapujával való végső küzdelem során a két nagy, tömött pollenszák szépen rátapad a hátára. Végre elrepül, és – szomorúbban tán, ám semmivel sem bölcsebben – beleesik egy másik vödörorchideába. Újra kis híján megfullad, újra átvergődik az alagúton, és néhány percig ismét várakoznia kell a szabadság kapujában. Ezalatt a második orchidea megszabadítja pollenszákjától – kész a megporzás.

Ne tévesszen meg senkit a „szomorúbban, de nem bölcsebben” kifejezés. Mint mindig, most sem szabad engednünk a szándékosság feltételezése csábításának. A növényre nézve még nagyobb ez a kísértés. A helyes gondolkodás mindkét oldalon az, ha nem tudatos mérnöki mesterművekre gondolunk. A méheket kihasználó vödörorchideák felépítéséért felelős géneket tartalmazó virágport méhek szállítják. A méhek viselkedésének befolyásolásában kevésbé ügyes orchideákat felépítő géneket tartalmazó virágpornak kevesebb esélye van arra, hogy a méhek szállítsák. A nemzedékek során az orchideák egyre sikeresebben csábítják el a méheket (bár be kell ismernünk, hogy a méhbangók nem különösebben sikeresen tudják rávenni a méheket arra, hogy „párosodjanak” velük).

E csodálatos orchideák a megporzási stratégiák egy fontos vonását példázzák. Sok növény, úgy tűnik, nagy erőfeszítéseket tesz annak érdekében, hogy egy adott állatfaj porozza meg, ne valami más. Az újvilági trópusok vörös csöves virágai pl. kolibrimegporzásra utalnak. A vörös élénk, vonzó szín a madarak szemében (a rovarok viszont nem is látják színeként). A hosszú, keskeny cső mindenkit kizár, kivéve a hosszú, keskeny csőrű megporzóspecialistákat, a kolibriket. Más virágok kitérnek az útjukból és kizárólagos méhbeporzásra rendezkednek be – már láttuk, hogy virágaik színe és mintázata gyakran az (ember számára láthatatlan) ultrabolya-tartományban

észlelhető. Másokat csak éjjeli lepkék poroznak meg, ezek gyakran fehérek és a látványos hirdetéssel szemben előnyben részesítik az illatokat. A kizárólagos megporzókapszolatok fejlődésének csúcsa talán a füge és saját fügedarazsa összeforrott párosa, könyvünk nyitó- és zárópéldája. Miért vesződnek a növények annyit azzal, hogy ki porozza meg őket?

Feltehető, hogy a specialista megporzók előnye csupán szélsőséges esete annak, amiért jobb az állati megporzás a szélmegporzásnál: szűkíti a célpontot. A szélmegporzás hihetetlenül megbízhatatlan, pazarló módon az egész környéket behinti a virággal. A csélcsap repülő állatokkal való megporzás jobb, de még mindig nagyon pazarló. A mi virágunk virágpórárt szállító méh lehet, hogy egy teljesen más fajú virágon folytatja útját – kárba vész az értékes rakomány. A közönséges méhek hordta pollen nem szóródik ugyan szét az egész tájon, de még mindig elég véletlenszerűen rakódik le itt-ott. Ezzel szemben a vödörorchidea saját méh- vagy a füge saját darázsfa tévedhetetlenül, mint egy csöpp irányított lövedék, vagy mint amit orvosi újságírók „varázsgolyónak”, mágikus lövedéknek neveznek, pontosan a megfelelő virágra száll annak a virágnak a szempontjából, amelynek virágpórárt hordozza. A fügedarázs esetében, mint látni fogjuk, ez nem csupán azt jelenti, hogy egy másik fügefát választ, hanem azt, hogy a fellelhető 900 fügefajból éppen a megfelelő fajt fogja kiválasztani. A specialista megporzók „felbérleése” rengeteg virágpórt megtermelésének megtakarítását teszi lehetővé. Másrészt viszont, mint látni fogjuk, ennek is megvannak a maga költségei, így nem csoda, hogy egyes növények inkább maradtak a pazarló szélmegporzásnál. Más fajok számára a legmegfelelőbb megoldás a sörétes puskától a varázsgolyóig vezető út valamely köztes módszere. A legszélsőségesebben talán a füge ragaszkodik egy adott megporzó faj „varázsgolyójához” – őt hagyjuk meg könyvünk koronájaképp az utolsó fejezetre.

A méhekre visszatérve, megporzószolgálatuk valóban csodálatra méltó. Kiszámolták, hogy a mézelő méhek egy szép nyári napon egyedül Németországban tízmilliárd virágot poroznak meg. Azt is kiszámították, hogy az emberiség táplálékának 30 százaléka méhporozta növényektől származik, és méhek nélkül Új-Zéland gazdasága összeomlana. A méhek – mondhatják a virágok – azért teremtettek, hogy virágpórárt kedvünk szerint szállítsák.

Világunk színpompás, illatos virágai tehát a látszat ellenére egyáltalán nem a mi gyönyörködtetésünket szolgálják. A virágok a rovarok titokzatos ultraibolya kertjében nyílnak, ahol mi – bármennyire is sértse büszkeségünket – teljesen feleslegesek vagyunk. A virágokat régóta nemesítik és gondozzák, a kertészek azonban – egészen a legutóbbi időkig – nem az emberek, hanem a méhek és a lepkék. A virágok használják a méheket és a méhek használják a virágokat. Mindkét partner faragja a másikat. Mindkét partner, bizonyos értelemben, házasítja és tenyészt a másikat. Az ultraibolya kertben kétirányú a forgalom. A méhek saját céljaik szerint alakítják a virágokat. A virágok pedig saját céljaikra házasítják a méheket.

Az evolúció során nagyon gyakoriak az efféle kapcsolatok. Epifita – más növényeken élő – növények ún. hangyakerteket alkotnak: magjaikat hangyák hordták ide és vetették el bolyuk talajába. A növények a boly felszínéből nőnek ki, és levelük táplálékot biztosít a hangyáknak. Kimutatták, hogy egyes növények jobban fejlődnek

hangyabolyban gyökerezve. Más hangya- és természetfajok föld alatti gombatermesztésre rendezkedtek be: elvetik a spórákat, kigyomlálják a nem odavaló gombafajokat, és összerágott levelekből készített komposzttal trágyázzák kertcskéjüket. Az újvilági trópusok nevezetes levélvágó hangyái nyolcmillió bolyainak táplálékkereső tevékenysége frissen vágott levelek begyűjtésére irányul. Olyan irgalmatlan hatékonysággal kopasztanak le egy területet, mint a sáskajárás. A levágott leveleket azonban sem a hangyák, sem lárváik nem eszik meg, kizárólag a gombakert trágyázására használják őket. A hangyák csupán a gombát eszik, azt az egyetlen fajt, amely sehhol máshol nem él, mint ennek a hangyafajnak a „kertjeiben”. E gombák joggal mondhatják, hogy a hangyák csak azért vannak, hogy őket gondozzák; a hangyák pedig azt, hogy ez a gombafaj egyedül azért létezik, hogy őket táplálja. A „hangyabarát” (mirmekofil) növények legfigyelemreméltóbb képviselői azok a délkelet-ázsiai fán élő növények, amelyek szárukon egy jókora, hipokotil⁷-gumónak nevezett duzzanatot növesztenek. Az álhagyma belsejében üreges labirintus található. Ez a labirintus annyira hasonlít a föld alatti hangyabolyok járataihoz, hogy bárki arra gyanakodhat: a hangyák készítették. Ez azonban nem igaz. A labirintust a növény alakította ki, a hangyák csak beköltöznek (8.4. ábra).



8.4. ábra. A növény egyedi tervezésű lakást kínál a hangyáknak védelem fejében.
Myrmecodia pentasperma hipokotilgumójának keresztmetszete.

⁷ Hipokotil: szik alatti szárrész (a ford.)



8.5. ábra. Akácia tövise. Hangyák és növények együttműködésének újabb példája.
A duzzadt tövisék üres belseje remekül megfelel a hangyák számára.

Jobban ismertek a kizárólag akáciák üreges tövisében (8.5. ábra) élő hangyafajok. A vastag, duzzadt tüskéket a növény már eleve üregesre fejleszti – szemmel láthatóan abból a célból, hogy lakásként szolgáljon a hangyáknak. A hangyák mérges csípései cserébe védelmet biztosítanak a növénynek. Elegánsan egyszerű kísérletekkel bizonyították ezt be. Azokat az akáciákat, amelyek hangyáit rovarirtó szerrel elpusztították, rövid időn belül súlyosan károsították különböző növényevő állatok. A hangyák, ha gondolkoznak, nem gondolhatnak másra, csak arra, hogy az akáciatöviseket az ő kedvükért teremtették. Az akáciák pedig joggal vélhetik, hogy a hangyák azért vannak, hogy őket megvédjék a legelésző állatoktól. Azt kell tehát gondolnunk, hogy az ilyen kapcsolatokban mindkét fél a másik javát szolgálja? Inkább úgy, hogy mindkét fél *kihasználja* a másikat a saját érdekében. Olyan kölcsönös kihasználásról van szó, melyben mindkét fél többet nyer annál, mint amennyibe számára a másik segítése kerül.

Az ökológusok gyakran engednek annak a kísértésnek, hogy az élet minden formáját egymást kölcsönösen támogató csoportosulásoknak tekintsék. A növények a közösség elsődleges energiagyűjtői. Befogják a Nap sugarait, és energiájukat az egész közösség számára hozzáférhetővé teszik. Azzal járulnak hozzá a közösség javához, hogy mások megehetik őket. A növényevők, köztük a nagyszámú növényevő rovar, alkotják azt a csatornát, amelyen keresztül a Nap energiája az elsődleges termelőktől (növények) eljut a táplálkozási lánc magasabb szintjeire: a rovarevőkhöz, kisebb, majd nagyobb ragadozókhöz. Az állati salakanyagok vagy tetemek életfontosságú kémiai anyagait a lebontó szervezetek – pl. gánéjtűrők, temetőbogarak – forgatják vissza, juttatják el a talajbaktériumokhoz, amelyek ismét a növények számára felvehető formába alakítják azokat.

Nincs is semmi különösebb gond az energia és más erőforrások körforgásának ezen barátságos, jóindulatot sugárzó képével, ha világosan látjuk, hogy a résztvevők *nem* a ciklus érdekében teszik, amit tesznek. A saját érdekükben vesznek részt a körforgásban. A ganéjtűrő bogár megeszi és táplálékként raktározza el a trágyát. Pusztán véletlen, hogy ezzel olyan takarító- és visszaforgató szerepet is betölt, mely a területen élő más lények számára is hasznos.

A fű rengeteg legelő állat alaptápláléka, melyek trágyázzák a fűvet. Még az is igaz, hogy ha kizárjuk a legelő állatokat, sok fűfaj kihal. Ez azonban nem azt jelenti, hogy egyetlen fűfaj is azért létezne, hogy megegyék vagy bármilyen módon hasznára lenne az, ha megeszik. Egy fű – ha el tudná mondani vágyait – határozottan azt szeretné, ha nem ennék meg. Hogyan oldjuk hát fel azt az ellentmondást, hogy ha kizárjuk a legelő állatokat, egyes fűfajok kihalnak? A válasz az, hogy bár egyetlen fűfaj sem szereti, ha lelegetik, a füvek jobban tűrik ezt, mint más növényfajok (ezért alkotják füvek a nyírott gyepeket). Míg egy területet erősen legel(tet)nek vagy nyírnak, más növények nem léphetnek fel a füvek vetélytársaiként. Fák nem nőhetnek fel, mert magoncaik elpusztulnak. A legel(tet)és tehát közvetetten jót tesz a füvek csoportjának. Ez azonban nem jelenti azt, hogy egy egyedi fűnövény hasznot húz abból, ha lelegetik. Hasznot húz viszont abból, ha a szomszédos más növényeket és füveket, akár saját fajtársait is, lelegetik, mivel így több tápanyaghoz jut és eltűnnek vetélytársai. Persze egy fűgyed számára az a legjobb, ha megússza, hogy lelegetljék.

Annak az elterjedt tévtannak a kifigurázásával indítottunk, hogy a növények és az állatok azért vannak, hogy az ember javát szolgálják, a marhák engedelmesen csak arra várnak, hogy az emberek megegyék őket, és így tovább. Kissé védhetőbbnek tűnt az az álláspont, hogy olyan más fajok érdekében teremtettek, melyekkel természetes úton kölcsönös együttműködést (mutualizmust) alakítottak ki: a virágok a méhek, a méhek a virágok, az akáciatövisiek duzzanatai a hangyák, a hangyák az akáciák érdekében. Az „egymásért” teremtett fajok elmélete azonban *reductio ad absurdum*. Nem eshetünk bele a népszerűsítő ökológia csapdájába, a közösség, az ökoszisztéma, „Gaia” javán munkálkodó egyedek holisztikus eszményképébe. Itt az idő, hogy részletekbe bocsátkozzunk, és pontosan kifejtjük, mit is értünk azon, hogy egy élőlény „valaminek az érdekében” létezik. Mit jelent az, hogy „érdekében”? Valójában *miért* vannak virágok és méhek, darazsak és fűgék, elefántok és szálfásfenyők – *miért* vannak élőlények? Mik azok a létezők, amelyek „hasznát” szolgálja egy élő test vagy annak egy része?

A válasz a DNS. A DNS pontos, mélyenszántó válasz, a mellette szóló érvelés cáfolhatatlan, ám igényel némi magyarázatot. Ezt a magyarázatot fogom kifejteni itt és a következő fejezetben. Először is visszatérek a kislányomhoz.

Egyszer magas láza volt, és velem együtt szenvedtem én is, amikor rám került a sor, hogy ágya mellett ülve hűvös vizes szivaccsal törölgettem forró testét. Modern korunk orvosai nyugtattak ugyan, hogy nincs semmi komoly baj, ám egy szerető atya álmatlan agyában menthetetlenül felbukkant a korábbi századok számtalan gyermekhalála és a minden egyes veszteséggel együttjáró mérhetetlen fájdalom. Charles Darwin sohasem heverte ki szeretett Annie lánya érthetetlen halálát. Kislánya betegségének nyilvánvaló igazságtalansága sokak szerint hozzájárult vallásos hite elvesztéséhez. Ha Juliet ekkor

hozzám fordul, és korábbi vidám beszélgetéseink szomorú visszhangjaként megkérdezi: „Minek vannak vírusok?”, vajon mit tudtam volna erre felelni?

Mire valók a vírusok? Hogy a nehézségek győzedelmes leküzdése által erősebbek és jobbak tegyünk? (Hasonlóan Auschwitz „áldásaihoz”, melyeket egy teológusprofesszor fejtett ki egy közös vitaműsorunkban a Brit Televízióban). Hogy elegendő embert elpusztítva megakadályozzák a világ túlnépesedését? (Nagyszerű megoldás azon országok számára, ahol az egyházi tekintélyek tiltják a hatékony fogamzásgátlást.) Hogy megbüntessenek bűneinkért? (Az AIDS-vírus esetében számos lelkes helyeslőre bukkanhatunk. Szinte sajnálom a középkori teológusokat, hogy ez a csodálatosan erkölcsös kórokozó az ő idejükben még nem létezett.) Ismét csak azt mondhatom, hogy ezek a válaszok túlságosan emberközpontúak, ha negatív értelemben is. A vírusokat, akár csak bármi más a természetben, egyáltalán nem érdeklik az emberek – se pozitív, se negatív értelemben. A vírusok DNS-nyelven írott kódolt programparancsok, amelyek csakis a program javát szolgálják. A parancs így hangzik: „Másolj le és terjessz!” – és azokkal az egyedekkel találkozunk, akik ezt a parancsot végrehajtották. Mindössze erről van szó. Ez a legpontosabb válasz, ami a „Mi a vírusok értelme?” kérdésre adható. Értelmetlen válasznak tűnik, és éppen ezt akarom most hangsúlyozni. A magyarázathoz a számítógépes vírusokat fogom segítségül hívni, melyek nagyon hasonlítanak a valódi vírusokra, és e hasonlóságon keresztül sok minden érthetővé tehető.

A számítógépes vírus nem más, mint egy számítógépes program; ugyanolyan nyelven íródott, mint bármely más program, és ugyanazokon az utakon – pl. floppylemezekon vagy számítógépes hálózatok, telefonvonalak, modemek és programok internetnek nevezett hálózatán keresztül – terjed. Bármely számítógépes program csupán utasítások sorozata. Mit parancsolnak ezek az utasítások? Szinte bármit. Némelyik program számlakezelő utasítások sorozata. A szövegszerkesztők begépelte szavak elfogadását, áthelyezését majd kinyomtatást megvalósító utasítások sorozatai. Más programok, pl. a Kaszparov nemzetközi nagymestert nemrégiben legyőző Genius 2 utasításai arról szólnak, hogyan kell mesterfokon sakkozni. A számítógépes vírus programjában efféle utasítások szerepelnek: „Ha új számítógéplemezzel találkozol, másolj rá engem”. Ez egy „Másolj le” típusú utasítás. De lehet pl. az is, hogy „Töröld le az egész winchestert” vagy arra készítheti a számítógépet, hogy fémes robothangon ezt ismétlgesse: „Csak semmi pánik!”. Ez mind mellékes. A számítógépes vírus ismertetőjele, meghatározó vonása, hogy tartalmazza a „Másolj le!” utasítást olyan nyelven, amelynek a számítógép engedelmeskedni fog.

Az ember talán nem engedelmeskedne ok nélkül egy ilyen durva parancsnak, de a számítógép rabszolgaként engedelmeskedve mindaddig megteszi, míg a parancs saját nyelvén íródott. Ugyanolyan készségesen végrehajtja a „Másolj le!” parancsot, mint azt, hogy „Invertáld ezt a mátrixot!”, „Szedd dólt betűvel ezt a bekezdést!” vagy „Helyezd át ezt az értéket két cellával arrébb!”. Ráadásul számos alkalom adódik a keresztbe fertőzésre. A számítógépet használók gátlástalanul csereberélik floppyjaikat, játékokat vagy hasznos programokat adnak át barátaiknak. Könnyen belátható, hogy ha ennyi lemez forog közkézen, a „Másolj rá minden lemezre, ami az utadba kerül!”

utasítás úgy terjed a világban, mint a bárányhimlő. Pillanatok alatt sok száz másolata lesz, és ezek is egyre sokszorozódnak. Napjainkban, amikor információs szupersztrádák szelik keresztül-kasul a kibernetikai teret, a számítógépes vírusok esélyei a gyors fertőzésre jobbak, mint bármikor.

Nagy a kísértés, hogy elmerengjünk az élősködő programok értelmetlenségén, mint tettük a betegségokozó vírusokkal kapcsolatban. Mi az ördög haszna lehet egy olyan programnak, mely csupán annyit mond: „Másold le ezt a programot!”? Persze le lesz másolva, de nincs valami borzasztó nevetséges egy ilyen haszontalanul öntömjénező erőfeszítésben? Dehogyan nincs! Hátborzongatóan hiábavaló. Hiábavalósága és értelmetlensége azonban *semmit sem jelent* bizonyos szempontból. Abszolút értelmetlen, és mégis terjed. Az a tény, hogy semmi haszna nincs – sőt esetenként kárt is okoz –, semmi szerepet nem játszik. A számítógépek és lemezcserberék világában egyszerűen fennmarad, mert fennmarad.

A biológiai vírusok pontosan ugyanilyenek. Lényegében a vírus egy DNS-nyelven írott program, még abban is hasonlít a számítógépes programokhoz, hogy ez a nyelv digitális. A számítógépes vírushoz hasonlóan a biológiai vírus is csak annyit mond: „Másold le és terjedj!” A számítógépes vírusokhoz hasonlóan itt sem mondjuk azt, hogy a vírus DNS-e le *akarja* magát másoltatni. Csupán arról van szó, hogy a DNS lehetséges bázissorrendjei közül csak azok fognak terjedni, amelyek a „Terjedj!” utasítást hordozzák. Akarjuk vagy sem, a világ tele lesz ilyen programokkal. Ismét csak a számítógépes vírusokhoz hasonlóan, a vírusok itt vannak, mert itt vannak. Ha nem hordoznák azt az információt, mely biztosítja létüket, nem léteznének.

A vírusok két típusa között az az egyetlen lényeges különbség, hogy a számítógépes vírusokat tréfás kedvű vagy rosszindulatú emberek törekvései hozzák létre, a biológiai vírusok pedig mutáció és természetes szelekció révén születnek. Ha egy biológiai vírusnak káros hatásai vannak – tüsszögés vagy akár halál –, ezek csupán terjedési módjának melléktermékei. A számítógépes vírusok káros hatásai is néha ilyen jellegűek. A hírhedt Internet Worm (Internetféreg), mely 1988. november 2-án végigszárguldott az Egyesült Államok hálózatain, káros hatásai nem szándékos melléktermékek voltak (technikai értelemben egy számítógépes féreg [worm] más, mint egy vírus, de ez a különbség most számunkra érdektelen). A program másolatai memóriát és gépidőt foglaltak el, és 6000 számítógépet fagyasztottak le. A számítógépes vírusok káros hatásai, mint láttuk, gyakran nem pusztán melléktermékek vagy kikerülhetetlen tünetek, hanem a tiszta rosszindulat magyarázhatatlan megnyilatkozásai. E gonosz hatások nemhogy nem segítik az élősködő terjedését, inkább lassítják. A valódi vírusok sohasem cselekszenek ilyen emberközpontúan – legfeljebb ha biológiai hadviselést kutató laboratóriumokban tenyésztik ki őket. A természetes úton kialakult vírusok nem fáradoznak azon, hogy szenvedést vagy halált okozzanak. Szervedésünk csupán önterjesztő tevékenységük mellékterméke.

A „Másold le!” utasítás, bármely másikkhoz hasonlóan, fabatkát sem ér, ha nincs gépezet, ami végrehajtsa. A számítógépek világa kellemes, barátságos hely a „Másold le!” programok számára. Az internet révén összekötött, floppykat csereberélő emberek által működtetett számítógépek világa az önmásoló programok paradicsoma. Készen kapják a halkán zümmögő utasításokat másoló és azoknak engedelmeskedő gépezetet –

az szinte könyörög, hogy egy „Másolj le!” program kihasználja. A DNS-vírusok esetében ez a készenlétben álló másoló és engedelmeskedő szerkezet maga az élő sejt, gondosan kimunkált berendezéseivel, mint pl. a hírvivő, a riboszomális vagy a saját kódjának megfelelő aminosavakkal összekapcsolt szállító RNS-ekkel. A részletekkel most nem vesződünk – akit érdekel, lapozza fel J. D. Watson *A gén molekuláris biológiája* című, hihetetlenül jól érthető könyvét. A mi céljainkra elég annyi, hogy egyrészt minden egyes sejt tartalmazza a számítógépek utasításoknak engedelmeskedő gépezetének miniatűr megfelelőjét, másrészt hogy a sejtek kódja az egész élővilágban, a Föld minden élő teremtményében azonos. (A számítógépes vírusok nem ilyen szerencsések: a DOS-vírusok nem képesek megfertőzni a Macintosh gépeket és fordítva). A számítógépes vírusok és a DNS-vírusok utasításai azért lesznek végrehajtva, mert olyan nyelven íródtak, melynek abban a környezetben, ahol előfordulnak, vakon engedelmeskednek.

Honnan származik ez a szolgálatkész másoló és utasítás-végrehajtó gépezet? Nem jöhet létre „csak úgy”. Valakinek meg kell építenie. A számítógépes vírusok esetében a gépezet ember alkotta. A DNS-vírusok esetében a gépezet az élőlények sejtje. Vajon ki építi fel ezeket a sejteket: az emberek, elefántok és vízilovak sejtjeit, amelyek oly egyszerűvé teszik a vírusok életét? A válasz: más önmásoló DNS-ek. Az ember, az elefánt, a víziló DNS-e. Vagyis *mik* a „nagy” élőlények, az elefántok, cseresznyefák és egerek? (Azért használom a „nagy” szót, mert egy vírushoz képest még egy egér is hatalmas.) Kinek az érdekét szolgálják az egerek, elefántok és virágok?

Az összes ehhez hasonló kérdés egyetlen határozott válaszhoz vezet. A virágok és az elefántok ugyanazt a célt „szolgálják”, mint az élővilág összes többi tagja: a DNS-nyelven írott „Másolj le!” programok terjesztését. A virágok arra valók, hogy további virágok előállításának utasításait terjesszék. Az elefántok arra valók, hogy további elefántok előállításának utasításait terjesszék. A madarak arra valók, hogy további madarak előállításának utasításait terjesszék. Az elefánt sejtjei nem tudják megállapítani, hogy azok az utasítások, melyeknek vakon engedelmeskednek, elefánt- vagy vírusutasítások-e. Mint Tennyson *Light Brigade*-jában mondják, ha valaki melléfog: „Nem az a dolguk, hogy válaszoljanak, nem az, hogy mérlegeljék az igazságot, csak az, hogy cselekedjenek és meghaljanak”.

Ugye értik, hogy az „elefánt” szó itt minden nagyobb testű, önálló élőlényt jelenthet, virágokat vagy méheket, embereket vagy kaktuszokat, még baktériumokat is? A vírus utasításai csak azt mondják: „Másolj le!”. Mít mondanak az elefántutasítások? Ez a lényege annak, amit e fejezet végére szeretnék megértetni. Az elefántutasítások is azt mondják, hogy „Másolj le!”, csak sokkal körülményesebb módon. Az elefánt DNS-e hatalmas, számítógépes programhoz hasonló program. A vírus DNS-éhez hasonlóan ez is „Másolj le!” program, de szinte hihetetlenül nagy kerülővel hajtja végre az eredeti utasítást. Ez a „kerülő”: az elefánt. A program ezt mondja: „Másolj le úgy, hogy előbb felépítesz egy elefántot!”. Az elefánt táplálkozik, hogy növekedhessen; növekszik, hogy ivarérett állattá válhasson; ivarérett lesz, hogy párosodhasson és új elefántokat hozhasson a világra; új elefántokat hoz a világra, hogy bennük terjessze az eredeti programutasítások új másolatait.

Ugyanezt elmondhatjuk élőlények *részeiről* is. A páva csőre, mely felszedgeti a páva életben maradásához szükséges magokat, közvetett úton a pávacső előállítását szolgáló utasítások terjesztésének eszköze. A pávakakas faroklegyezője a még több pávakakas-faroklegyező előállítását szolgáló utasítások terjesztője. Működésének módja: vonzza a pávatyúkokat. Ugyanúgy „felcsípi” őket, mint a csőr a magokat. A leggyönyörűbb legyezőjű kakasoknak lesz a legtöbb csibéjük, akik továbbadják a gyönyörű legyező kifejlesztésére utasító géneket. Ezért olyan csodálatos a pávakakasok legyezője. Hogy mi is szépnek látjuk, az csupán véletlen melléktermék. A pávakakas faroklegyezője génterjesztő szerkezet, mely a pávatyúkok szemének bevonásával működik.

A szárnyak a szárnyak kifejlesztését szolgáló genetikai utasítások terjesztői. A páva esetében génmegőrző szerepük akkor nyilvánul meg, ha a madár egy ragadozótól megriasztva nagy robajjal felrepül. A növények is szereztek magjaik számára valami szárnyszerű röptőberendezést (8.6. ábra), bár az emberek többsége növények esetében nem érzi jogosnak a „repülés” szó használatát. A „repülés”, a „szárny” az állatokhoz kötődő fogalmak.

Lassan a testtel! A növény szempontjából nincs is szükség arra, hogy saját szárnyai legyenek, hiszen a méhek vagy lepkék szárnyai elvégzik azt a feladatot, amiért szárnyakra lehetne szüksége. Miért ne *nevezhetnénk* a méhek szárnyait a *növény szárnyainak*? Hiszen ezek olyan repülőszervek, amelyeket a *növény* arra használ, hogy virágorát eljuttassa egyik virágról a másikra. A virágok arra szolgáló szervek, hogy a növény DNS-ét átjuttassák a következő nemzedékbe. A pávakakas faroklegyezőjéhez hasonló módon működnek, csak nem pávatyúkokat, hanem méheket vonzanak. Más különbség nincs.



8.6. ábra. Szárnyaló DNS: Juhar és pitypang termése

A pávakakas legyezője, közvetett módon, arra készíti a pávatyúk lábizmait, hogy gazdájukat a kakas felé vigyék, hogy azzal párosodhasson; a virág színe és mintázata, illata és nektárja hasonló módon hat a méhek vagy kolibrik szárnyizmaira. A méheket magához vonzza a virág. Szárnyuk csapkodásával átjuttatják a virágport egy másik virágra. A méh szárnyait nyugodtan nevezhetjük a virág szárnyainak, hiszen éppoly biztosan szállítja a virág géljeit, mint magának a méhnek a géljeit.

Az elefántok teste nem képes megmondani, hogy éppen elefánt- vagy vírus-DNS terjesztésén munkálkodik, ahogy a méhek szárnyai sem tudják, hogy méh- vagy virág-DNS-t szállítanak éppen. Valójában – az idejüket méhbangókkal való „párosodásra” vesztegető megtévesztett méhek különleges esetét leszámítva – mindkettőt egyszerre terjesztik. A méh végrehajtó szerkezete nem képes észlelni a különbséget a „saját-” és a „virágpor”-DNS között. A pávák és méhek, virágok és elefántok lényegében ugyanúgy viselkednek az őket megfertőző vírus DNS-ével szemben, mint a saját DNS-ükkel szemben. A vírus-DNS programja ezt mondja: „Másolj le egyszerűen, a sejt már meglévő szerkezeteit felhasználva!”. Az elefánt-DNS ezt mondja: „Másolj le bonyolultabb, körülményesebb módon: először építs fel egy elefántot!”. A virág-DNS ezt mondja: „Másolj le még ennél is bonyolultabb és körülményesebb módon: építs fel egy virágot, majd használd fel arra, hogy közvetett módon – pl. csalogató nektár segítségével – úgy befolyásolja egy méh szárnyait (melyeket már egy másik DNS, a méh saját DNS-e a megfelelő módon felépített), hogy az elszállítsa az ezeket a DNS-utasításokat tartalmazó pollenszemeket a megfelelő virágra”. Ezt a következtetést járjuk körbe kicsit más irányból a következő fejezetben.

ÖNMÁSOLÓ ROBOTOK

Addig jutottunk, hogy a virágok és az elefántok gyakorlatilag ugyanúgy „gazdaszervezetei” saját DNS-üknek, mint a vírus-DNS-eknek. Ez a megközelítés helyes, ám nyitva hagy több nehéz kérdést. Az érvelés egy fontos lépése hiányzik. A számítógépes vírusoknak könnyű dolguk van, mert a világ már tele van nagy teljesítményű, munkára kész számítógépekkel, amelyek csak arra várnak, hogy végrehajthassák utasításaikat. E számítógépeket azonban az ember készítette, tálcán kínálja őket az élősködő programoknak. A DNS-vírusok is készen kapják gazdaszervezeteiket a teljes, bonyolult, utasítás-végrehajtó sejtgépezettel együtt. Vajon ki az, aki „tálcán kínálja”, aki létrehozta az élő szervezeteket?

Képzeljünk el egy számítógépes vírust, aminek nem áll rendelkezésére egy működésre kész számítógép, hanem a semmiből kell kiindulnia. Nem mondhatja, hogy „Másolj le!”, hiszen nincs számítógép, ami végrehajtaná az utasítást. Egy kész utasítás-végrehajtó és másoló gépezet nélküli világban mit kell tennie egy önmásoló programnak, hogy valóban önterjesztő lehessen? Azt kell mondania: „Készítsd el a másolóhoz szükséges gépezetet!”, ezelőtt azt, hogy „Készítsd el a részeket, amelyekből felépíthető a másológép!”, ezelőtt pedig azt, hogy „Gyűjtsd össze a részek előállításához szükséges nyersanyagokat!”. Ez olyan bonyolult program, hogy nevet kell adnunk neki. Nevezzük el az „Utasítások Teljes Másolása Programjának” (UTMP).

Az UTMP-nek többre van szüksége, mint egy közönséges, képernyővel és billentyűzettel ellátott számítógépre. Szüksége van arra is, hogy ügyes kezek vagy annak megfelelő műveletekre képes, érzékelőberendezésekkel összekapcsolt fogó- és alakítószerszámok álljanak rendelkezésére, hogy megmunkálja és egymással összekapcsolja az egyes részeket. Kézszerű eszközök szükségesek ahhoz, hogy megtalálják és összeállítsák a szükséges részeket, sőt még azelőtt összegyűjtsék az alapanyagokat. Egy számítógép képes arra, hogy képernyőjén szimuláljon, de arra nem, hogy a valóságban megépítsen egy magához hasonló számítógépet. Ehhez ki kellene nyúlnia a való világba, valódi, szilárd anyagokat, szilikont és hasonlókat kellene megmunkálnia.

Vegyük kicsit közelebről szemügyre a megoldandó műszaki feladatokat! A modern személyi számítógépek képesek arra, hogy színes formákat alakítsanak ki a katódsugárcsöves képernyőn vagy festékfoltokból a nyomtató papírján; vagy pl. hangokat adjanak a hangszórón keresztül. Mindezekből előállítható egy szilárd, háromdimenziós világ látszata, ám ez csak látszat: az emberi agy működésének játéka. A képernyőn megrajzolhatjuk egy kocka térbeli képét. A felszínnek megfelelő kialakításával meggyőzően háromdimenziósnak nézhet ki, de mégsem foghatjuk meg,

nem érezhetjük súlyát tenyerünkön, keménységét ujjaink között. Megfelelő program segítségével kettévághatjuk a kockát a képernyőn, és megtekinthetjük keresztmetszetét – mégsem lesz valódi szilárd tárgy. A jövő számítógépei más érzékszerveinket is megtréfálhatják hasonló módon. A jövőbeli egerek pl. lehet, hogy képesek lesznek arra, hogy a tehetetlenség valódinak tűnő érzését kölcsönözzék ujjainknak, ha egy „nehéz” tárgyat próbálunk elmozdítani a képernyőn. A „tárgy” azonban ettől még nem lesz érinthető, szilárd tárgy.

Az UTMP-t futtató számítógépünknek nemcsak az emberi képzeletre kell hatnia. Képesnek kell lennie arra, hogy a való világ szilárd tárgyait alakítsa. Hogyan lehet képes erre egy számítógép? Ez bizony kemény dió. Megértését talán azzal kezdhetjük, hogy megpróbálunk egy újfajta nyomtatót, háromdimenziós – 3D – nyomtatót tervezni. A szokásos számítógépes nyomtatók kétdimenziós papíron dolgoznak a tintával. Egy háromdimenziós kép, pl. egy macska háromdimenziós képe előállításának egyik módja az lehet, hogy metszetek sorozatát átlátszó lapokra nyomtatjuk. A számítógép fáradságos munkával metszeteket készít a macskáról, az orrától a farka hegyéig, ezeket beszkeneli, majd e metszetek százainak képét átlátszó fóliákra kinyomtatja. Végül a fóliákat szilárd tömbbé állítja össze, melyben látható lesz a macska háromdimenziós képe.

Ez még nem igazi 3D nyomtató, mert az így kinyomtatott macskánk fóliatömbbe lesz ágyazva. Javíthatunk a dolgon, ha a tintát magától keményedő gyantával helyettesítjük. A lapokat egymásra helyezük, éppen úgy, mint az előbb, majd a fóliát kioldva vagy kimaratva megkapjuk a kemény gyantaképet. Ha e terv műszaki részleteit mind sikerül megvalósítani – ami elég valószínűtlen –, olyan szerkezetet kaptunk, mely bármilyen háromdimenziós tárgyat képes felépíteni: íme a valódi 3D számítógépes nyomtató.

3D nyomtatónk még mélyen a kétdimenziós felfogásban gyökerezik. A háromdimenziós képet kétdimenziós metszetek sorozatának elve alapján állítja elő.

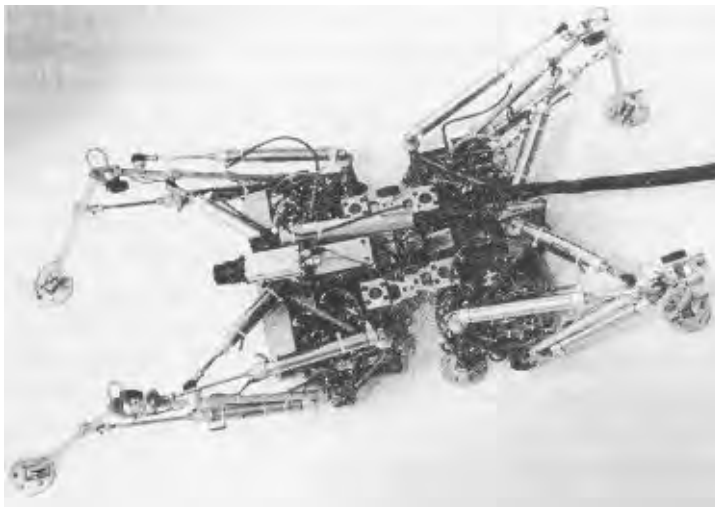


9.1. ábra. Ipari robot a jokohamai Nissan autógyárban

A metszetsorozat-elven működő eszköz azonban nem lehet megfelelő az UTMP számára. Működő gép, pl. egy belső égésű motor, sohasem állítható elő ezen az úton. Alegységekre – hengerekre és dugattyúkra, lendkerekekre és hajtóláncokra – van szüksége. Ezek az alegységek különböző anyagokból épülnek fel, és egymáshoz képest szabadon el kell tudni mozdulniuk. A motort nem építhetjük fel egymásra pakolt rétegekből: *össze kell állítani*, külön-külön elkészített, független részekből. A részeket magukat is ugyanígy kell összerakni még kisebb részekből. Az UTMP megfelelő kimeneti eszköze tehát nem lehet egy 3D nyomtató. Inkább ipari robotnak kell lennie. Kell, hogy legyen fogószervezete vagy más, készszerű része, ami alkalmas tárgyak megragadására. A „kéznek” egy „kar” végén kell lennie, amelynek minden irányba mozgatható ízületre vagy ízületekre van szüksége ahhoz, hogy a tér minden irányában képes legyen mozogni. Szüksége van érzékelőkre, melyek a következő felveendő tárgyhoz irányítják, majd oda, ahová ezt megfelelő módon be kell építenie.

Ipari robotok léteznek a modern gyárakban (9.1. ábra). Működnek is, feltéve, hogy megvan a gondosan behatárolt feladatuk a szerelőszalag egy adott pontján. Egy szokásos ipari robot azonban még mindig nem alkalmas az UTMP program végrehajtására. Képes a részek összerakására, ha azokat megfelelő helyzetben kínálja fel számára pl. egy szerelőszalagon. Gondolatkísérletünk lényege azonban éppen az, hogy elszakadjunk a megfelelő helyzetben, „tálcán kínált” dolgoktól. A mi robotunknak meg kell keresnie a részek előállításához szükséges alapanyagokat, mielőtt elkezdhetné összeállítani azokat. Ezért képesnek kell lennie arra, hogy ide-oda mozogjon a világban, keresgélje az alapanyagokat, kiválogassa, összegyűjtse azokat. A helyváltoztatáshoz mozgásszervekre van szüksége – pl. hernyótalpakra vagy lábakra.

Vannak olyan robotok, amelyeknek van lábuk vagy más mozgásszervük, amelyekkel lényegében céltudatosan képesek közlekedni a világban. A 9.2. ábrán bemutatott robot pl. kísértetiesen hasonlít egy rovarra, csak éppen nem hat lába van, hanem négy.



9.2. ábra. Tapadókorongos lábakon „járkáló” robot, Portsmouth Politechnikum, Anglia

„Lábai” tapadókorongokat viselnek, akárcsak a legyeké, mivel fő tudománya az, hogy függőleges felületeken „mászkal”. Alkotóinak kedvenc játéka, hogy kezüket oda teszik, ahová a robot éppen lépni szándékozik. A robot lába érzékeli, hogy ez a terep nem megfelelő, ezért csudálatosan életszerű pantomimba kezd, hogy jobb fogódzót találjon. Ez azonban csak egy létező robot egy különlegessége. Egy korábbi hírneves robot, a *Machina speculatrix* nevű teknős, amelyet W. Grey Walter épített a Bristol Egyetemen, bedugta csatlakozóját a konnektorba, hogy feltöltse akkumulátorait. Ahogy akkumulátorai kezdtek kimerülni, egyre nőtt az áram iránti „étvágya”, egyre nyugtalanabban keresett egy konnektort. Ha talált egyet, odatolatott, és addig maradt ott, míg fel nem töltődött. A részletek nem fontosak. Olyan szerkezeetről beszélünk, mely képes saját végtagjai segítségével helyét változtatni és saját érzékszervein és fedélzeti számítógépén keresztül keres valamit.

A következő feladat az, hogy összekapcsoljuk ezt a kétféle robotot. Képzeld el, hogy a tapadókorongos járkáló szerkezet hátán cipeli a korábban látott „ügyes kezű” ipari robotot. A gépegyüttes működését egy fedélzeti számítógép működteti. A fedélzeti számítógép programjának számos szubrutinját a lábak és a tapadókorongok, valamint a kar és az összeszerelő rész működtetése köti le. Mindez azonban egy „Másolj le!” program felügyelete alatt működik, mely lényegében ezt parancsolja: „Járlj a világban, gyűjtsd össze a szükséges anyagokat egy ugyanilyen teljes robot felépítéséhez. Készítsd el a robotot, majd fedélzeti számítógépébe tápláld be ugyanezt az UTMP programot, és indítsd el, hogy ugyanezt tegye!” Ez a feltételezett robot, melynek megalkotásán fáradozunk, lenne az UTMP névre méltó robot.

Egy ilyen, lelki szemeink előtt lassan kiformalódó UTMP robot rendkívül bonyolult, zseniális műszaki szerkezet. Alapelvét Neumann János hírneves magyar amerikai matematikus, a „modern számítógépek atyja” megtisztelő cím egyik lehetséges hordozója dolgozta ki. (A másik jelölt Alan Turing brit matematikus, aki kódfejtő zseniként talán mindenki másnál többet tett a szövetségesek oldalán a második világháború megnyerése érdekében; a háború után azonban homoszexualitása miatti, kényszerű hormoninjekciókat is magába foglaló bírósági eljárással az öngyilkosságba kergették.) Se Neumann-automatát, se önmásoló UTMP robotot nem épített még senki. Talán nem is fog. Lehet, hogy ez a feladat túl van a gyakorlati megvalósíthatóság határain.

De miről is beszélek? Micsoda butaság, hogy még sohasem épült önmásoló robot. Ugyan mit gondolok, *én magam* vajon mi vagyok? Vagy ön? Vagy egy méh, egy virág vagy egy kenguru? Ugyan mik vagyunk, ha nem UTMP robotok? Igaz, nem emberkéz alkotott valamilyen célra: az embrionális fejlődés folyamatai építettek fel, végső soron a természetes szelekció által kiválogatott gének irányításával. Amit teszünk, az pontosan az, amit a definíció szerint a feltételezett UTMP robot tesz. A világban járva-gyűjtögetjük azokat a nyersanyagokat, amelyek szükségesek saját magunk fenntartásához, majd egy hasonló vonásokkal bíró másik robot felépítéséhez. A nyersanyagok: molekulák, melyeket táplálékunk gazdag választékából halászunk ki.

Sok ember sértőnek találja, hogy robotnak nevezem magunkat. Főleg azért, mert a „robot” szóról merev mozgású, időtlen szerkezet jut eszébe, mely képtelen finom szabályozásra, nem intelligens, nem rugalmas. Ezek azonban nem szükségeszerű

jellemzői egy robotnak. Csúpan olyan robotokra jellemzők, melyeket a mai napig a rendelkezésünkre álló technológiákkal megépítettünk. Ha azt mondom, hogy egy kaméleon, egy botsáska vagy egy ember robot, mely magában hordja a saját magát programozó utasításokat, semmit sem mondtam arról, hogy ez a robot mennyire intelligens. Egy robot is lehet nagyon intelligens. Arról sem mondtam semmit, hogy mennyire rugalmas. Egy robot nagyon rugalmas is lehet. 20. századi kortársaink, akik visszautasítják, hogy robotnak nevezzék őket, a „robot” szó felszínes, nem a lényegét tükröző értelmezése miatt tiltakoznak (hasonlóan azon 18. századi elődeikhez, akik azért nem akarták a gőzgépet közlekedési eszközként elfogadni, mert nem volt előtte ló, ami húzza). A robot olyan, meghatározatlan mértékben bonyolult vagy intelligens szerkezet, melyet arra terveztek, hogy egy adott feladatot végrehajtsa. Az UTMP robot feladata, hogy saját programjának másolatait terjessze a világban, a program végrehajtásához szükséges gépezettel együtt.

Az önmásoló robotokkal kapcsolatos eszmefuttatásunk onnan indult, hogy a számítógépes vagy valódi vírusokhoz hasonló egyszerű „Másolj le!” program nagyszerű ötlet, de csak akkor működik, ha a környező világ számára nagyon kedvező: vannak benne az utasítás leolvasására és végrehajtására kész szerkezetek. A világ azonban csak akkor ilyen jóságos, ha valaki vagy valami már megépítette ezeket az utasítás-végrehajtó szerkezeteket. Ezután egy roppant bonyolult robotot képzelünk el, mely ismét hatalmas kiterőre készíti a „Másolj le!” programot. Ahelyett, hogy egyszerűen arra utasítana, hogy „Másolj le!”, ezt mondja programunk: „Gyűjtsd össze a részeit és építs meg egy teljes új gépezetet, mely képes engem lemásolni, majd tölts be a fedélzeti számítógépebe!”.

Visszaérkeztünk az előző fejezet végzaváéhoz. Az elefánt egy DNS-nyelven írott számítógépes program hatalmas kiterője. Ugyanilyen kiterő egy strucc vagy egy tölgyfa is – és persze az ember is. Valamennyien UTMP robotok, Neumann-automaták vagyunk. De hogyan kezdődött az egész? A válaszáért nagyon messzire vissza kell mennünk a múltba, három- vagy talán négy milliárd évnnyire. Ebben az időben a világ egészen más volt. Nem volt élet, nem volt biológia, csak fizika és kémia. A Föld kémiájának részletei egészen másfolyenek voltak. A szakértők eszmefuttatásainak többsége – ha nem is mind – onnan indul, hogy vajon milyen lehetett ez az ősléves, az egyszerű szerves vegyületek híg leveése a tengerben. Senki sem tudja, hogyan történt, de valahogy, a fizika és kémia törvényeinek megsértése nélkül, megjelent egy molekula, mely történetesen rendelkezett az önmásolás képességével – megjelent az első replikátor.

Ez hihetetlen szerencsének tűnik. Néhány szót kell is róla szólnom. Először is, csak egyetlenegyszer kellett megtörténnie. Ebben a tekintetben ahhoz a szerencsééhez hasonlítható, ami egy sziget benépesedéséhez kell. A világ legtöbb szigetén, még az olyan félreesőön is, mint az Ascension-szigetek, élnek állatok. Néhányuk, pl. a madarak és a denevérek olyan úton kerültek oda, amit minden különösebb szerencse nélkül meg tudunk magyarázni: a szárnyukon. Vannak azonban mások is, pl. gyíkok, amik nem tudnak röpdülni. Vakarhatjuk a fejünket: ezek vajon hogy a csudába pottyantak ide? Nem tűnik kielégítőnek az a magyarázat, hogy valami szeszélyes szerencse folytán, pl. hogy éppen az a mangroveág tört le és sodródott át a tengeren,

amin egy gyík üldögélt. Szeszély vagy sem, ez a véletlen megtörtént: élnek gyíkok az óceán távoli szigetein. A részleteket rendszerint nem ismerjük, hiszen az efféle dolgok túl ritkán történnek ahhoz, hogy esélyünk lenne saját szemünkkel látni őket. A lényeg az, hogy egyszer megtörténtek. Ugyanez vonatkozik a földi élet eredetére is.

Mi több, tudomásunk szerint ez a világegyetem milliárd-milliárd bolygója közül valószínűleg csak egyetlenegyen történt meg. Sokan úgy gondolják, hogy rengeteg bolygón megtörtént, ám *bizonyítékunk* csak arra van, hogy egyetlen bolygón megtörtént, mintegy félmilliárd-milliárd éves késlekedés után. A keresett szerencsés esemény tehát annyira valószínűtlen *lehet*, hogy előfordulásának valószínűsége mindössze egy a milliárd-milliárd-milliárdhoz évente – az egész világegyetemben. Ha az egész világegyetemben csak egyetlen bolygón is *megtörtént*, ez szükségszerűen a *mi* Földünk – hiszen mi beszélünk róla.

Sejtésem szerint az élet lehet, hogy nem ennyire ritka jelenség és megjelenése talán nem is ennyire valószínűtlen. Ezzel szemben azonban vannak ellenérvek. Az egyik érdekes ellenérv a „Hol vannak?”. Képzeljünk el egy törzset a déli Csendes-óceánon, melynek szigete oly távol esik mindentől, hogy a szájhagyomány szerint egyetlen kenu sem bukkant soha más lakott földre. A törzs vénei próbálják kitalálni, mennyi lehet a valószínűsége annak, hogy van élet az ő szigetükön kívül is. Az „egyedül vagyunk” álláspont melletti hatásos érv az, hogy a szigetet soha senki nem kereste fel. Még ha a törzs csak kenuval tud is közlekedni, nem lehetnek-e olyan törzsek, amelyeknek ennél jobb hajókat is sikerült már építeni? Miért nem jöttek el még soha?

Földünk lakott szigetei mindegyikét kereste már föl látogató, és nagyon kevés ember élhet olyan félreeső helyen, hogy életében ne látott volna még repülőgépet. A világegyetemben lebegő bolygószigetünket azonban, megfelelően hitelt érdemlő források szerint, még soha nem kereste fel senki. Még a legutolsó évtizedekben sem, mióta már fel vagyunk szerelkezve távoli rádiójelek észlelésére is. A rádióhullámok hatósugara ezer év alatt mintegy millió csillagot fed le. A csillagok és a geológia világában ezer év nem nagy idő. Ha a technikai civilizációk gyakoriak, bizonyára van olyan köztük, mely már több mint ezer évvel előttünk felfedezte rádióhullámok kibocsátását. Nem kellett volna már meghallanunk suttogásukat? Ez nem bizonyítja azt, hogy semmilyen formájú élet nem létezik a világegyetemben rajtunk kívül, de bizonyíték amellett, hogy az intelligens, bonyolult technikai civilizációt létrehozó élet nem fordul elő túl sűrűn, egy másik életszigettől rádióhullámokkal könnyen elérhető távolságra. Ha a megszülető életnek csak csekély esélye is van arra, hogy intelligens életet hozzon létre, a fentiek azt bizonyítják, hogy maga az élet ritka jelenség. A fenti gondolatmenet ahhoz az aggasztó következtetéshez is vezethet, hogy az intelligens élet kialakulása nem ritka, de rendszerint csak igen rövid idő telik el a rádió felfedezése és a technikai önmegsemmisítés között.

Lehet, hogy az élet közönséges a világegyetemben, de jogunk van azt is feltételezni, hogy rendkívül ritka. Ebből következik, hogy az az esemény, amit az élet eredetéről elmélkedve keresünk, lehet, hogy rendkívül valószínűtlen: nem olyan, amit laboratóriumban megismételhetünk, sem nem olyan, amit a kémikusok „híhető”-nek tartanak. Ez egy izgalmas paradoxon, melyet részleteiben *A vak órásmester* „Eredetek es csodák” című fejezetében fejtettem ki. Olyan elméletet keresünk nagy odaadással,

melyet amikor végre rábukkantunk, nagyon valószínűtlennek fogunk találni! Egyik oldaláról tekintve a dolgot, kifejezetten aggódhatunk, ha egy kémikusnak sikerül alátámasztani az élet eredetének egy elméletét, melyet – a valószínűség szokásos mértékével mérve – hihetőnek tartunk. Másrészt úgy tűnik, hogy az élet Földünk 4,5 milliárd éves történelmének első félmilliárd éve alatt jelent meg; a Föld történetének nyolckilenced részében már jelen volt, és sejtésem az, hogy az élet keletkezése egy bolygón egyáltalán nem kivételes esemény.

Az élet eredete mindenesetre az, hogy szerencsés véletlen folytán önmásolásra képes lény született. Ma Földünkön a DNS-molekula a számottevő replikátor, de valószínű, hogy az eredeti replikátor más volt. Nem tudjuk, micsoda. A DNS-szel szemben az eredeti replikátor molekulák nem bízhatták bonyolult szerkezetre saját maguk lemásolását. Bár sok szempontból meg kellett egyezniük a „Másold le!” utasítással, nyelvük nem lehetett egy magas fokon formalizált nyelv, mivel annak csak bonyolult szerkezet tudott volna engedelmessé válni. A mai DNS-utasításokkal és számítógépes vírusokkal szemben az eredeti replikátornak nem lehetett szüksége bonyolult dekódolási eljárásra. Az önmásolás a replikátor szerkezetének elválaszthatatlan jellemzője volt, akárcsak a gyémántnak a keménység: olyan valami, aminek nem kell „dekódolódnia” vagy „kifejeződnie”. Biztosak lehetünk abban, hogy késői követőjükkal, a DNS-molekulával szemben az eredeti replikátoroknak nem volt bonyolult dekódoló és utasításait teljesítő szerkezetük, mivel egy bonyolult szerkezet olyan dolog, mely csak sok nemzedék evolúciója után jelenhet meg a világban. Evolúció pedig nem indulhat meg, míg nincsenek replikátorok. Az „élet eredete 22-es csapdája” (lásd alább) szerint az eredeti önmásoló lényeknek elég egyszerűeknek kellett lenniük ahhoz, hogy véletlenszerű kémiai folyamatokban keletkezessenek.

Ha már megvolt az első spontán módon kialakult replikátor, az evolúció gyors léptekkel megindulhatott. A replikátorok lényéből fakad, hogy saját maguk másolatainak populációját állítják elő, vagyis továbbmásolódnak lények egy csoportját. Ez a populáció exponenciálisan növekedni fog, míg bele nem ütközik az erőforrásokért vagy nyersanyagokért való versengés gátjába. Rögtön foglalkoznom kell az exponenciális növekedés gondolatával. Ez röviden annyit tesz, hogy a populáció létszáma bizonyos időegységeként nem azonos számú egyeddel nő, hanem megkettőződik. Ez azt jelenti, hogy a replikátorok populációja rövid időn belül igen nagyra nő, így versengeni kezdenek egymással. Bármely másolási folyamat olyan természetű, hogy sohasem tökéletes: a másolás során véletlenszerű hibák lépnek fel. A populáció replikátorai tehát nem lesznek egyformák. A különböző változatok között lesz olyan, amelyik elveszti az önmásolás képességét – ez az alak eltűnik a populációból. Másoknak lehet olyan tulajdonságuk, melynek következtében gyorsabban vagy hatékonyabban másolódnak. Ezek száma egyre nőni fog a populációban. Mivel ugyanazon nyersanyagokért vetélkednek, a populáció átlagos, tipikus replikátorát folyamatosan egyre jobb új átlagos típusok váltják fel. Milyen szempontból jobb? Természetesen az önmásolás szempontjából. Később ez a javulás olyan formát ölthet, hogy a replikátor más kémiai reakciókat úgy befolyásol, hogy azok segítsék önmásolását. Ez a hatás végül olyan összetetté válhatott, hogy egy megfigyelő, ha lett volna (természetesen nem volt, hiszen évmilliók kellene ahhoz, hogy

kifejlődjön valami, ami megérdemli a megfigyelő nevet), a folyamatot dekódolásként és utasítások végrehajtásaként írta volna le. Ha pedig ezt a megfigyelőt megkérdeztük volna, hogy mit jelentenek az utasítások, minden bizonnyal ezt felelte volna: azt, hogy „Másolj le!”.

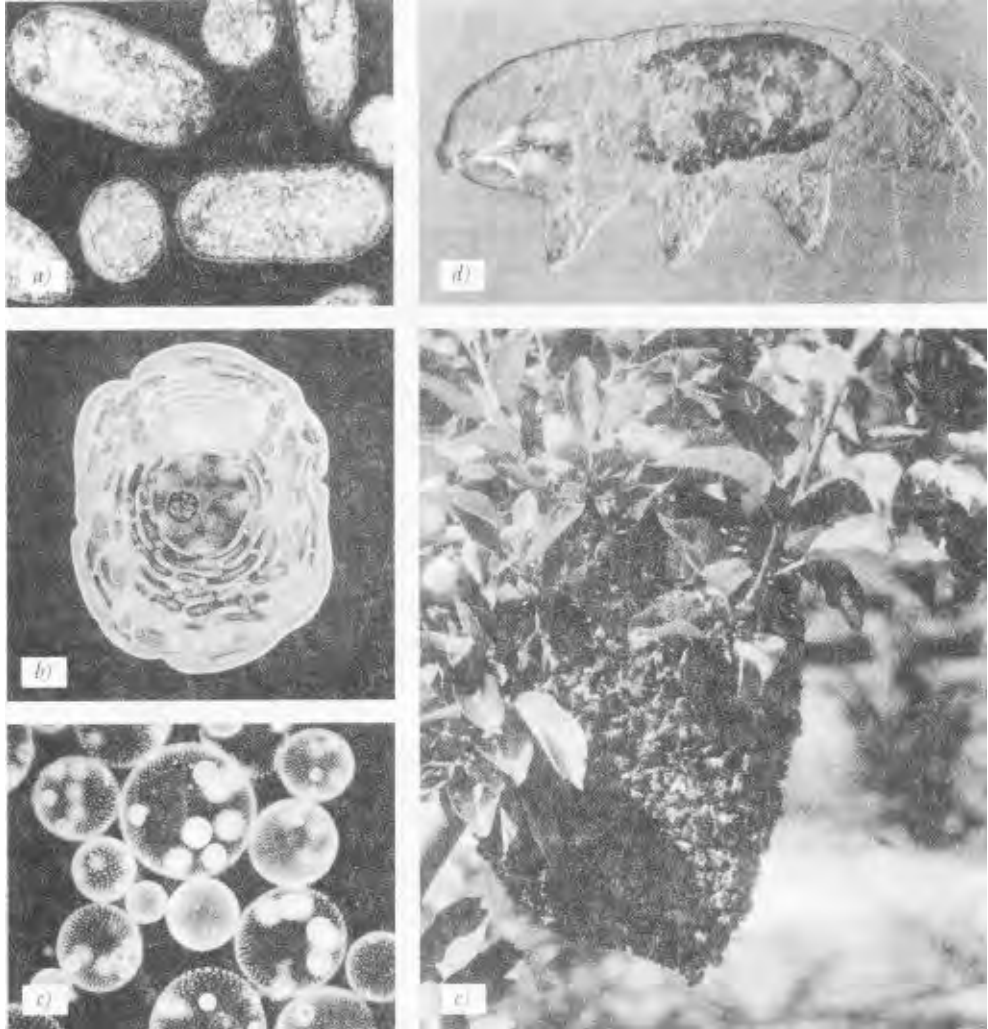
Kétségtelen, hogy vannak e történetnek homályos pontjai. Egyikükre már utaltam: „az élet eredete 22-es csapdájá”-nak neveztem. Minél több összetevőből áll egy replikátor, annál nagyobb az esélye annak, hogy másolási hiba következtében az egész működésképtelenné válik. Ebből az következik, hogy az első, ősi replikátorok csak nagyon kevés részből állhattak. Egy bizonyos számúnál kevesebb összetevőből álló molekulák azonban minden valószínűség szerint túl egyszerűek ahhoz, hogy képesek legyenek saját lemásolásuk véghezvitelére. Zseniális próbálkozások születtek e két látszólag összebékíthetetlen feltétel egyidejű teljesítésére – némi sikerrel, ám érvelésük túl matematikai ahhoz, hogy ebben a könyvben tárgyalhassam.

Az első önmásoló szerkezetek – önmásoló robotok – sokkal egyszerűbbek kellett, hogy legyenek a baktériumoknál, ám napjainkban a baktériumok az UTMP robotok legegyszerűbb ismert példái (9.3a ábra). A baktériumok életmódja rendkívül változatos – kémiai szempontból sokkal változatosabb, mint az élővilág összes többi tagjéé együttvéve. Vannak baktériumok, amelyek közelebbi rokonságban állnak velünk, mint más, fura baktériumokkal. Vannak, amelyek létalapjukat hőforrások kénjéből fedezik és az oxigén halálos mérgező számukra; vannak, amelyek a cukorból oxigén hiányában alkoholt erjesztenek; vannak olyanok, amelyek szén-dioxidon és hidrogéneken élnek, metánt termelnek; olyanok, amelyek ugyanúgy fotoszintetizálnak, mint a növények, és olyanok, amelyek fotoszintetizálnak ugyan, de egészen másképp. A baktériumok különféle csoportjai olyan gyökeresen különböző biokémiai rendszereket képviselnek, hogy hozzájuk képest az élővilág többi része – az állatok, növények, gombák és más baktériumok – unalmasan egyforma.

Különböző típusú baktériumok „összeköltözésével” több mint egymilliárd évvel ezelőtt kialakult az eukarióta sejt (9.3b ábra). Ez a mi sejtjaink: sejtmagja van és más, bonyolult belső szerkezetei, melyek jó része tekervényesen összehajtogatott belső membránokból áll, mint pl. a mitokondriumok, amelyeket röviden említettem az 5.2. ábra kapcsán. Ma az eukarióta sejtet baktériumkolónia leszármazottjának tekintjük. Az eukarióta sejtek később maguk is telepeket képeztek: a *Volvox* ma élő zöldmoszat (9.3c ábra). Lehetséges azonban, hogy azt a *fajta* állapotot képviseli, mely több mint egymilliárd éve jelent meg, amikor az eukarióta típusú sejtek először kezdtek telepeket alkotni. Ez a csoportosulás hasonlít a baktériumok eukarióta sejtekké való csoportosulásához, sőt ahhoz a korábbi csoportosuláshoz is, amikor a gének baktériumokká álltak össze. Az eukarióta sejtek nagyobb, szorosabb csoportjait szövetszerű szerkezeteknek nevezzük. A 9.3d ábra egy apró képviselőjüket, egy medveállatkát mutat be. A szövetszerű testfelépítésű állatok néha maguk is olyan csoportokat alkotnak, amelyek bizonyos szempontból egyedként viselkednek (9.3e ábra).

Mint mondtam, egy elefánt a „Másolj le!” program hatalmas kiterője, de mondhattam volna egeret is elefánt helyett, és a „hatalmas” jelző még mindig helyénvaló lenne. Egy *Volvox* néhány száz sejtől áll. Az eger terjedelmesebb, talán

egymilliárd sejtje van. Az elefánt 1000 trillió (10^{15}) sejt együttese, és e sejtek mindegyike maga is baktériumsejtek kolóniája.



9.3. ábra. Élőlények szerveződésének egyre magasabb szintjei: *a)* egysejtű baktériumok; *b)* valódi sejtmagvas (eukarióta) sejtek – eredetileg baktériumkolóniából alakultak ki; *c)* *Volvox* zöldmoszat – eukarióta sejtek kolóniája; *d)* medveállatka – differenciálódott eukarióta sejtek tömörebb, népesebb kolóniája, (az emberi test ugyanilyen sejtkolónia – kolóniák kolóniája, hiszen minden egyes sejtünk baktériumsejt-kolóniának tekinthető); *e)* méhraj – egyedi szervezetek kolóniája, kolóniák kolóniájának kolóniája

Ha az elefánt saját tervrajzát hordozó robot, akkor szinte elképzelhetetlenül nagyméretű robot. Sejtek közössége, de mivel minden sejt ugyanazon DNS-utasítások másolatait hordozza, mind együttműködnek egy közös cél: elkülönült, ám azonos DNS-eik lemásolása érdekében.

Igaz, bármely abszolút skálán mérve az elefánt sem túlságosan nagy valami. Egy csillaghoz képest kicsi. A „hatalmas” a DNS-molekulával összehasonlítva értettem, amelynek megőrzésére és terjesztésére az elefánt rendeltetett. Ahhoz a másoló elefántkészítő utasításhoz képest hatalmas, amely benne utazik.



9.4. ábra. A ló a DNS-molekulák szállítására szolgáló jármű – és hozzájuk képest megdöbbentően nagy. Ha az ember építene egy magához képest hasonló arányú trójai falovat, amelyben utazhat, amellelt eltörpülne a Himalája. Ezt a fantáziaképet édesanyám, Jean Dawkins rajzolta a Royal Institute-ban tartott egyik karácsonyi előadásom számára.

Hogy a nagyságrendekről fogalmunk legyen, képzeljük el, hogy mérnökök elkészítenek egy hatalmas robotot, amelyben utazni tudnak, mint a görögök a trójai falóban. Ezt a robotot úgy méretezik, hogy egy-egy mérnök hozzá képest akkora, mint egy DNS-molekula egy emberhez képest. (Ne feledjük: a valódi lovat úgy tekintjük, mint olyan robotot, amelyet a benne utazó gének építettek.) A hasonlat értelme, hogy ha építünk egy robotlovat, amelyben utazhatunk, és ez a robotló hozzánk képest akkora, mint egy valódi ló az *öt* felépítő génekhez képest, akkor robotlovunk nagyobb lesz, mint a Himalája (9.4. ábra). Egy valódi, élő ló sejtek trillióiból épül fel. Jelentéktelen számú kivételtől eltekintve e sejtek mindegyikében a gének teljes csapata utazik, bár többségük minden egyes sejtben alszik.

Egy valódi élő test azért lehet olyan hatalmas (az *öt* felépítő génekhez képest), mert egészen más módon növekszik, mint ahogy az ember készítette gépek; teljesen másképpen, mint ahogy ezt a robotlovat felépítenénk, ha valaha is felépítenénk. A növekedés különleges, az élőlények által alkalmazott módja az exponenciális növekedés. Másképpen úgy is fogalmazhatunk, hogy az élőlények helyi megkettőződés útján növekszenek.

Egyetlen icipici sejtől indulunk ki. Pontosabban nem is olyan kicsi: éppen megfelelő méretű az *öt* felépítő gének szempontjából. Abban a mérettartományban van, ahol a gének biokémiai módon szabályozni tudják. Hatósugaraik elérnek a sejt minden csücskébe és alakítani tudják annak bizonyos tulajdonságait. A sejt talán legbámulatraméltóbb tulajdonsága, hogy képes két önmagához többé-kevésbé hasonló utódsejtre osztódni. Az anyasejthez hasonló mindkét leánysejt ismét képes

kettéosztódni, így négy unokasejt jön létre. E négy mindegyike ismét kettéosztódhat, így már nyolc sejtünk lesz – és így tovább. Ezt nevezzük exponenciális növekedésnek vagy helyi megkettőződésnek.

Első látásra megdöbbenő az exponenciális növekedés hatékonysága. Mint ígértem, elidőzök itt egy kicsit, mivel fontos dologról van szó. Az exponenciális növekedést számos ötletes hasonlaton keresztül be lehet mutatni. Ha egy papírlapot félbehajtunk, vastagsága megkétszereződik. Még egy hajtás – négyszer olyan vastag lesz. Még egy hajtás, és nyolc réteg vastag lesz. Még kb. háromszor tudjuk félbehajtani, mielőtt olyan merev lesz, hogy többet nem hajlik: 64 réteges. Tegyük fel, hogy ez a mechanikai merevség nem gond, hajtogathatjuk tovább, mondjuk ötvenszer. Milyen vastag lesz ekkor a papírkötegünk? A válasz: olyan vastag, hogy kiemelkedik a Föld légköréből, túlnyúlik a Mars pályáján.

A sejtek helyi megkettőződése a fejlődő test minden pontján hasonlóképpen villámgyorsan csillagászati tartományokba vezet. Egy kékbálnának kb. százezer-trillió (10^{17}) sejtje van. Az exponenciális növekedésnek ideális esetben mindössze ötvenhét sejtnevezékre van szüksége, hogy egy ilyen leviatánt létrehozzon. Sejtnevezéken egy osztódási ciklust értek. Tudjuk, hogy a sejtek száma az 1, 2, 4, 8, 16, 32... sorozatnak megfelelően növekszik. 32 sejthez 6 sejtnevezék kell. Ha folytatjuk a megkettőződést, 57 sejtnevezék után elérkezünk a százezer-trillióhoz, a kékbálna sejtjeinek számához.

A sejtnevezékek ilyen módon történő kiszámítása nem valóságos, mivel minimális értéket ad. Feltételezi, hogy minden létrejött sejt továbbosztódik. A valóságban sok sejtvonala már korábban kiszáll a kettőződésből, amikor befejezték a test egy adott részének, pl. a májnak a kialakítását. Más, a bálna más testrészeit felépítő sejtvonala tovább folytatja az osztódást. Némelyikük az ötvenhét sejtnevezéknél hosszabb időn át is osztódik, mások ennél kevesebb után abbahagyják. Vannak ún. törzssejtek, olyan sejtcsoportok, amelyek „elraktározódnak” arra a célra, hogy magukhoz hasonló sejteket állítsanak elő akkor, ha azok máshonnan elfogytak.

Kiszámíthatjuk, hogy ideális kettéosztódási feltételek mellett megközelítőleg hány sejtnevezékre van szükség ahhoz, hogy egy állat elérje a fajra jellemző súlyát. Feltételezhetjük, hogy a nagy állatoknak sincsenek nagyobb sejtjeik, mint a kicsiknek. Ezen egyszerű számítások szerint egy felnőtt ember kialakításához minimum negyvenhét, egy kékbálnához kb. tízzel több sejtnevezék szükséges. A fent említett ok miatt ezek természetesen alulbecsült értékek. Az viszont változatlanul igaz, hogy az exponenciális növekedés jellegéből következően csak egy kicsit kell változtatni azon, hogy egy adott sejtvonala meddig folytatja az osztódást, és máris nagy változás következik be a létrejövő sejtcsoport végső alakjában. A mutációk néha így fejtik ki hatásukat.

E gigantikus – az őket felépítő és bennük utazó DNS szempontjából gigantikus – testek felépítését nevezhetjük *gigatechnológiának*. A gigatechnológia az építőnél legalább egymilliárdszor nagyobb szerkezetek felépítését jelenti. Olyan mesterség ez, melyről a mi mérnökeinknek semmiféle tapasztalatuk nincs. A legnagyobb, ember által épített szállítójárművek – óriási hajók – építőikhez képest nem ilyen nagyok, néhány perc alatt körbesétálhatjuk őket. Ha pl. hajót építünk, nem élhetünk az exponenciális

növekedés nyújtotta előnnyel. Számunkra nincs más mód, mint a szerkezet alkatrészeiből történő felépítése, előre gyártott acéllemezek százainak összeszerelése.

A saját szállítójárműveit felépítő DNS-nek rendelkezésére áll az exponenciális növekedés mint eszköz. Az exponenciális növekedés hatalmas lehetőséget ad a természetes szelekció kiválogatta gének kezébe. Lehetővé teszi, hogy az embrionális növekedés apró részletének módosítása drámai hatással legyen a végeredményre. Egy mutáció, mely egy adott sejtvonalnak csak annyit mond, hogy osztódjon eggyel többször – mondjuk huszonnégy helyett huszonöttször –, azt eredményezheti, hogy egy testrészmérete megkettőződik. Ugyanezzel a módszerrel, a sejtmembránok számának vagy a sejtosztódások sebességének megváltoztatásával az embrionális fejlődés során a gének megváltoztathatják egy testrészméretét *alakját* is. A mai embereknek nem is oly régen élt ősi elődjük, a *Homo erectus*hoz képest előregró álluk van. Az állalakjának megváltozásához csupán annyi kell, hogy az embrionális koponya adott részein kismértékben megváltozzon a sejtmembránok száma.

Ami csodálatra méltó, az az, hogy a sejtvonalak éppen a megfelelő időpontban hagyják abba az osztódást: akkor, amikor testrészeink egymáshoz képest arányosan megfelelő méretűek. Persze vannak olyan esetek, amikor mániákusan tovább osztódnak, nem állnak le, amikor kellene. Ha ez bekövetkezik, ezt nevezzük ráknak. Randolph Nesse és George Williams nagyszerű könyvükben (melynek a remek *Darwini orvoslás* [Darwinian Medicine] címet adták, ám a kiadók területenként különböző, megjegyezhetetlen címeket aggattak rá) igen bölcsen írnak a rákról. Mielőtt elgondolkodnánk azon, hogy miért kapunk rákot, előbb azon csodálkozzunk el: miért nem kapunk *állandóan* rákot?

Ki tudja, képes lesz-e az emberiség valaha arra, hogy gigatechnológiával építkezzen? *Nanotechnológiáról* azonban már ma beszélnek. Ahogy a „giga” milliárdot, a „nano” milliárdodrészlet jelent. A nanotechnológia azt jelenti, hogy az alkotó a saját mérete egymilliárdod részével összemérhető dolgokat készít.

Vannak olyanok – legjobbjaik nem feltétlenül a New Age vagy valamilyen kultusz megszállottai –, akik ma azt mondják, hogy a 9.5. ábra a nem is túl távoli jövőben valósággá válhat. Ha igazuk bizonyosodik, az nagy hatással lesz az emberi élet szinte minden területére. Vegyük például az orvoslást. A mai sebészek magasan képzett szakemberek, akik finom, nagy pontosságú berendezésekkel dolgoznak. Bámulatra méltó bűvészműtárvány, hogy kiemelik a szem szürkehályogtól elhomályosított lencsét, és mesterséges lencsével helyettesítik – mint azt lenyűgözően finom, precíz műszereik segítségével valóban megteszik. A nanotechnológia mérettartományához képest azonban még ez is rendkívül durva eljárás. Hallgassuk Eric Drexlert, azt az amerikai tudóst, akiben a feltörekvő nanotechnológia egyik élharcosát köszönhetjük, ahogy felidéri a jelenlegi szikák és varratok nanotechnológiai megfelelőit:

A modern szikák és varratok egyszerűen túl otrombák kapillárisok, sejtek vagy molekulák „kijavításához”. Képzelnék csak el a „mikrosebészetet” egy sejt középpontjából: egy hatalmas bárd lesújt, vakon keresztülhasít egy sejtmembrán molekuláris gépezetén, ezernyi sejtet tönkerezve. Majd egy obeliszk zúdul keresztül a megosztott tömegben, tehervonat szélességű kötelet vonszolva maga után: ezzel próbálja ismét egyesíteni, ami szétszakadt. A sejt középpontjából még a

legfinomabb, legtökéletesebb eszközökkel és a legnagyobb gondossággal végzett sebészi beavatkozás is mézárasmunka. Csak a sejtek halottaik „eltakarítására”, az újjászerveződésre és sokszorozódásra való képessége teszi lehetővé a gyógyulást.

A fent említett „obeliszk” egy hajszálvékony sebészeti tű, a tehervonat szélességű kötél finom sebészi fonál. A nanotechnológia álma, hogy olyan sebészeti műszereket lesz képes alkotni, amelyek a sejtek mérettartományában képesek dolgozni. Ezek az eszközök túl kicsik lesznek ahhoz, hogy a sebész ujjai működtethessék őket. Ha egy sebészi fonál tehervonat szélességű a sejtek szemszögéből nézve, mekkora lehet az orvos ujjja? – gondoljunk csak bele! Kis önműködő szerkezetekre, apró robotokra lesz szükség, a fejezetünk korábbi részében említett ipari robotok miniatűr változataira.

Egy ilyen icipici robot lehet, hogy remekül meg tud majd javítani mondjuk egy beteg vörösvértestet. Hihetetlen számú vörösvértest vár majd azonban rá, hiszen mindannyiunkban mintegy 30 milliárd található. Hogyan bír majd el ennyivel egy pici nanotechnológiai robot? Talán már kitalálták: exponenciális sokszorozódással. Abban reménykedhetünk, hogy a nanotechnológiai robotok ugyanazzal a módszerrel tudják majd magukat megsokszorozni, mint a vörösvértestek. A robot majd klónozza, másolja magát. Az exponenciális növekedés nyújtotta lehetőséget kihasználva a robotok létszáma ugyanúgy szárnyal majd a milliárdok felé, mint a vörösvértesteké.

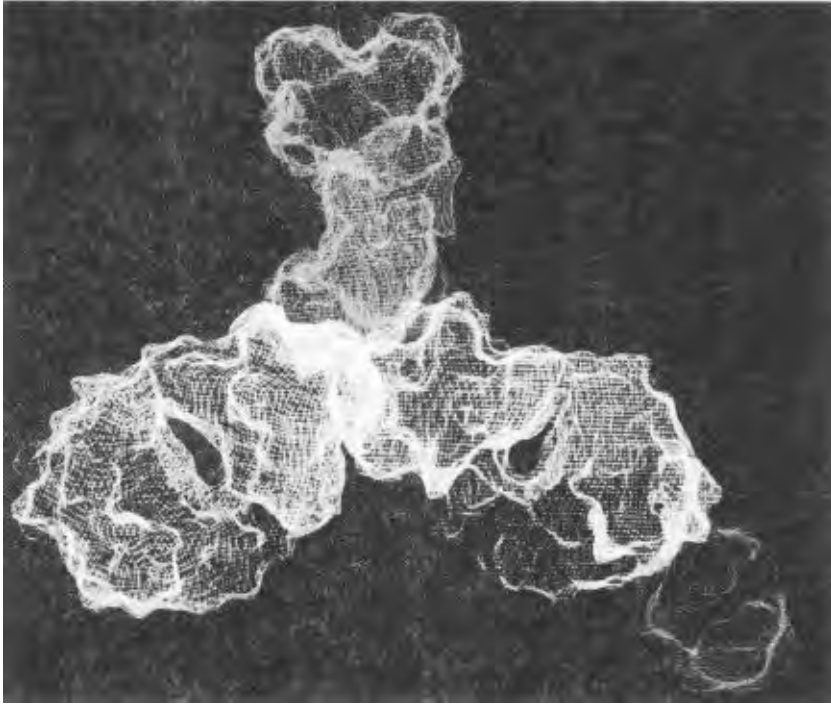
Az effajta nanotechnológia még a távoli jövő zenéje – talán sohasem valósul meg. Azok a tudósok, akik a nanotechnológiát támogatásra érdemesnek tartják, a következőkre építenek. Tudják, hogy – bármilyen különösen, idegenül hangzik is – ennek egy megfelelője már működik sejtjeinkben. A DNS és a fehérjemolekulák éppen abban a mérettartományban működnek, amelyet a nanotechnológia világának neveztünk. Amikor egy orvos immunglobulin-injekciót ad be a fertőző májgyulladás elleni védőoltásként, tulajdonképpen természetes nanotechnológiai eszközöket juttat a véráramba.



9.5. ábra. Fantáziakép a nanotechnológia világából: vörösvértestek megjavítására küldött robotok

Minden immunglobulin-molekula bonyolult szerkezet, melynek működését – mint minden fehérjemolekuláét – az alakja határozza meg (9.6. ábra). E csöpp orvosi műszerek csak azért képesek hatni, mert nagyon sok van belőlük. Az exponenciális növekedést kihasználó módszerekkel nagy tömegben állították elő – klónozták – őket. Jelen esetben biológiai eljárásról van szó: gyakran pl. egy ló vérében termeltetik az immunglobulinokat. Más oltóanyagok a szervezet saját, a lóimmunglobulinokhoz hasonló antitesteket klónozó rendszerét indítják be. Abban reménykedhetünk, hogy a nanotechnológiai „eszközöket” – melyek nagyon hasonlóak lesznek az apró ipari robotokhoz – agyafűrtan megtervezett mesterséges eljárásokkal képesek leszünk klónozni.

A nanotechnológia nagyon furcsa, alig hihető dolognak tűnik számunkra. Az atomok mérettartományában működő „gépek” világa ijesztően idegennek látszik, távolabbinak, mint a más bolygókon tenyésző élet a tudományos-fantasztikus írók fantáziája szerint. A nanotechnológia számunkra olyan valami, mely a jövőben megszülethet. Izgalmas, talán kicsit félelmetes és rendkívül új. Pedig egyáltalán nem új és idegen: nagyon is *ősi*. Mi, a nagy dolgok vagyunk újak, furcsák, idegenek. Mi vagyunk egy vadonatúj (mindössze néhány százmillió éves) gigatechnológia termékei – génjeink szempontjából. Az élet alapvetően a fehérjemolekulák – a mi szempontunkból – nanovilágán alapszik, amelyek a DNS-ben kódolt információk alapján épülnek fel és szabályozzák más molekulák kölcsönhatásait.



9.6. ábra. Az élet nanotechnológiája: immunglobulin-molekula

A nanotechnológia a jövő zenéje. Térjünk hát vissza fejezetünk és az előző fejezet fő mondanivalójához. Egy elefánt, egy ember vagy akár egy vírus génjei egy „Másolj le!” számítógépes programnak tekinthetők. A vírusgének olyan kódolt utasítások, melyek (ha éppen elefántot fertőznek) így szólnak: „Elefántsejtek, másoljatok le engem!”. Az elefántgének ezt mondják: „Elefántsejtek, építsetek egy új elefántot, amit majd be lehet programozni arra, hogy növekedjen, és újabb elefántokat hozzon létre, melyek mindegyike arra van programozva, hogy engem lemásoljon!”. Az alapelv ugyanaz. A különbség csak annyi, hogy egyes „Másolj le!” programok körülményesebbek, hosszadalmasabbak, mint mások. Csak az élőszködő programok engedhetik meg maguknak a rövidséget, mivel az ő utasításait készen kapott szerkezetek hajtják végre. Az elefántgének nem annyira nem élőszködő programok, mint inkább kölcsönösen egymáson élőszködő alprogramok. Az elefánt génjeit kölcsönösen egymást támogató vírusok hatalmas gyülekezetének is tekinthetjük. Az elefánt egy-egy génjének szerepe nem több, mint amit egy vírusgén játszik. Minden gén eljuttatja a maga kicsiny szerepét annak a gépezetnek a közös felépítésében, melyre mindannyiuknak szükségük van programjuk végrehajtására. Mindegyikük csak a többi mellett boldogulhat. A vírusgének szintén csak az egymással együttműködő elefántgének társaságában virulhatnak, de ezért semmi hasznosat nem adnak cserébe. Ha adnának, valószínűleg nem vírusgénnek, hanem elefántgénnek neveznénk őket. Másként fogalmazva minden testben találunk együttműködő és nem együttműködő géneket. A nem együttműködőket nevezzük vírusgéneknek (vagy más élőszködőknek),

az együttműködőket pedig elefánt- (ember-, kenguru-, platán- stb.) géneknek. A gének azonban, akár együttműködnek, akár nem, akár vírusgének, akár „saját” gének, mind csupán DNS-utasítások, és mind azt mondják, így vagy úgy, tisztességesen vagy csalóként, röviden vagy körmönfontan: „Másolj le!”

TITKOS KERT

Hosszú utat tettünk meg, és [végre](#) visszatérhetünk legbonyolultabb, legszövevényesebb történetemhez: a fügéhez. Kezdőmondataim első hallásra talán ugyanolyan olvasókeserítő irodalmi szövnyszüleménynek tűnnek, mint amiken könyvem első bekezdésében élcelődtem. A füge nem gyümölcs, hanem egy befelé fordított virágoskert. Úgy néz ki, mint egy gyümölcs. Olyan íze van, mint egy gyümölcsnek. Gondolataink között és az antropológusok által feltárt mély rétegekben gyümölcsnek megfelelő helyet foglal el. Ám mégsem gyümölcs, hanem titkos kert, titkos függőkert, világcsoda. Nem is engedem, hogy ez az állításom a levegőben lógjon, mint egy önmagáért való mélyértelmű bölcsesség, amit csak a vájtfülüek érthetnek, mindenki mást megbotránkoztat. A következőkről van szó.

Állításom kulcsa: az evolúció. A mai füge apró lépésekben, fokozatosan változó átmeneti alakok során alakult ki olyan ősből, melyek első pillantásra nagyon különböztek tőle. Képzeljünk el egy gyorsított filmet, melynek első kockáján egy mai füge látható, középen kettévágva és egy kartonlap közepén lefényképezve. A második kocka: egy hasonló füge száz évvel ezelőtről. A következő kockákon ismét egy-egy száz-száz évvel korábbi füge látható, köztük egy olyan, amelyet Jézus evett; amelyet Nabukodonozor egy rabszolgája szedett a babiloni függőkertben; amilyen Nód földjén nőtt Édentől keletre; amilyen a *Homo erectus*ok, *Homo habilis*ek és az etiópiai Afar környékén élt kicsi Lucy rövid, cukortalan életét édesítette meg, jóval a természetett fügék előtt; aztán jönnek az erdők vad fügéi, és így tovább. Most pergessük végig a filmet, és figyeljük, hogyan változik vissza a füge vad ősvé. Milyen változásokat látunk?

Időben visszafelé mérete kétségtelenül zsugorodik, hiszen a természetett fügéket évszázadokon át „hizlalták” kisebb, keményebb őseikből. Ez azonban csak felszínes változás; bármilyen érdekes is, visszafelé tartó időutazásunk első néhány évezedével eltűnik. Sokkal izgalmasabb és mélyrehatóbb az, amit a filmet továbbpergetve évmilliókkal korábbi időkben látunk: a gyümölcs feltárulkozik. A csúcán alig észrevehető, piciny lyuk csücsörít, tátog, majd ásít – végül már nem is lyuk, hanem kehely. Ha jól megnézzük belső felszínét, látjuk, hogy apró virágok bélelik. A kehely kezdetben mély, majd az időben visszafelé haladva egyre sekélyebb lesz. Talán olyan lapos lesz, mint a napraforgó tányérja, hiszen tudjuk jól, hogy a napraforgó sem virág, hanem virágzat: közös fészektányéron ülő több száz kicsiny virág együttese. Ezután fügekelyhünk kifordul, a virágok a külső felszínre kerülnek, akár csak a faepernél (a füge az eperfafélék családjába tartozik). Még tovább pergetve filmet, a faeperszerű állapoton túl a virágok elkülönülnek egymástól, és egyre inkább felismerhető külön-külön virágok voltak, mint pl. a jácintnál (bár a jácint nem közeli rokona a fügének).

Talán túlbonyolítottnak, erőltetettnek tűnik a hasonlat, egyetlen fűgét „titkos kertnek” nevezni. Senkinek sem jutna eszébe egy jácintot vagy szédret „nyitott kertnek” mondani. Hasonlatomat meg tudom védeni annál jobb érveléssel is, hogy csupán Salamon énekének egy sora ihlette. Nézzünk egy kertet a virágait megporzó rovar szemével. Emberi szemmel nézve a kert olyan hely, ahol sok négyzetméteren virágok nyílnak. A fűgét megporzó rovarok olyan kicsinyek, hogy számukra egyetlen füge belseje kertnek tűnik – még ha csak egy kunyhó kicsiny kertjének is –, melyet szabályos, apró részekből felépülő porzós és termős virágok százaival ültettek be. A füge ráadásul tényleg zárt, lényegében önfenntartó világ a parányi megporzó rovarok szemszögéből.

A megporzó rovarok rendszertani szempontból darazsak, valamennyien az *Agaonidae* család tagjai. Olyan kicsik, hogy tisztán csak nagyító alatt láthatók. A „rendszertani értelemben” azt jelenti, hogy bár a fűgedarazsak nem különösebben hasonlítanak a nyáridőben lekváros csuprainkon szemtelenkedő fekete-sárga darazsakhoz, azokkal közös darázsősöktől származnak. A fűgék virágait kizárólag ezek a csöpp darázkák porozzák meg (10.1. ábra). Szinte minden fűgefajnak (vannak vagy kilencszázan) megvan a maga saját darázs faja, mely egyedüli genetikai társként hűségesen kíséri az evolúciós időben, mióta együttesen elváltak füge-, illetve darázsősöktől. A darazsak egyetlen tápláléka a füge, a füge megporzása pedig kizárólag a fűgedarazsakon múlik. Bármely faj azonnal kihalna a másik segítségével nélkül. Csak a virágport szállító nőtény darazsak hagyják el bölcsőfűgéjüket. Alakjuk olyan, mint egy végletesen lekicsinyített darázs. A hímeknek ezzel szemben nincs szárnyuk, hiszen egész életüket egyetlen füge sötét, zárt világában élik le – nehéz elhinni róluk, hogy darazsak, ráadásul, hogy ugyanahhoz a fajhoz tartoznak, mint nőtényeik.



10.1. ábra. Füge belseje hím és nőtény fűgedarazsakkal

A fügedarázs életének történetét elmesélni azért nehéz, mert körforgásról van szó; nem egyértelmű, honnan kezdjük el. Önkényesen onnét indulok, hogy a kis darázslárvák kikelnek, mindegyikük egy kis tokban kuporog egy-egy termős virág tövében a titkos kert mélyén. A fejlődő magot rágcsgálva növekszenek, kifejlett rovarrá alakulnak, és kirágnak magukat a tokból – kilépnek a viszonylagos szabadságba, a füge sötét belsejébe. A hímek és nőtények életútja ettől kezdve némiképp eltér. Először a hímek kelnek ki, és addig kutatnak a fügében, míg rá nem bukkannak egy még ki nem kelt nőtény tokjára. Ha találta egyet, átrágnak magukat a magkezdemény falán, és párosodnak a még ki sem kelt szűz nőténnyel. Ezután a nőtény is elhagyja tokját, és megkezdi saját életét a miniatűr függőkertben. Hogy ezután mi történik, az fajról fajra különbözhet, leggyakrabban a következő. A nőtény porzós virágokat keres, amelyek rendszerint a füge kijáratá közelében található. Mellső lábainak célszerű felépítésű virágporkéfível a sötétben módszeresen beseperi a virágport mellkasának speciális virágportartó zsebeibe.

Sokatmondó tény, hogy ilyen fáradságos munkával pakolja meg magát virágpórral, és hogy külön erre a célra szolgáló virágportartó zsebei vannak. A legtöbb megporzó rovarrá egyszerűen rátapad a virágpórral, akár akarja, akár nem. Nincs kifejezetten a virágpórral szállítására való felszerelésük, sem virágporgyűjtő ösztönük. Kivételt képeznek a méhek: a lábukon található virágportartó kosárcsészéből néha kidagad a sárga vagy barna virágpórtömeg. A méhek azonban, a fügedarázssal ellentétben, fejlődő lárváiknak hordják a virágpórral. A fügedarázsok viszont nem azért szállítják, hogy megegyék. Szándékosan gyűjtik össze kifejezetten erre a célra szolgáló zsebeikbe, kizárólag azért, hogy megporozzák a füget (mely csak sokkal közvetettebb úton segíti a darázsszakat). A fügek és megporzóik látszólag igen szeretetteljes kapcsolatára még visszatérünk.

Az értékes virágpórral megrakott nőtény darázs kiszáll a tágas külvilágba. Hogy pontosan hogyan jut ki, az is fajról fajra változhat. Van, ahol kimászik a „kertkapun”, a füge csúcsán található kicsiny nyíláson (10.2. ábra). Más fajokban a hímek feladata, hogy lyukat vájjanak a füge falába: csapatmunkában, többtucatnyian együttműködve dolgoznak rajta. A hímek szerepe ezzel véget ér, a nőtényeket azonban még várja életük nagy kalandja. Kiröppenne az ismeretlen levegőbe szorgosan kutatnak – valószínűleg illat alapján – az egyedül megfelelő fügefaj egy másik példányá után. Az egyetlen megfelelő fügének ezen felül még éppen alkalmas életszakaszban is kell lennie: amikor termős virágai már kifejlettek.

Ha megtalálta ezt a füget, a nőtény darázs megkeresi csúcsán az icipici lyukat, és bemászik rajta a belső sötétségbe. A bejárat olyan szűk, hogy valószínűleg többször le kell szakítania szárnyait, míg benyomakodik. A kutatók e nyílásokban számos leszakadt szárnyat, csápot és más darázstestrészt találtak. A füge szempontjából azért előnyös egy ilyen gyötrelmesen szűk bejárat, mert távol tartja a hivatlan vendégeket. E szárnyszagot vevő szűk bejárat valószínűleg a baktériumoktól és más szennyeződésektől is megtisztítja a nőtény darázst. A darázs szempontjából is előnyös szárnyainak elvesztése – még ha fájdalmas is: sohasem lesz rájuk többé szüksége, sőt csak gátolná mozgását a titkos kert sötét rejtekeiben. Gondoljunk csak arra, hogy a hangyákirállyók

gyakran maguk rágják le szárnyaikat a nászrepülés végeztével, amikor már csak útban lennének föld alatti életükben.

A füge belsejében a nőstény darázs még elvégzi utolsó feladatát, mielőtt elpusztulna. Ez a feladat kettős: felkeresi és megporozza a füge belsejében található termős virágokat, és némelyikükbe petéket is rak. Nem mindegyikbe. Ha mindegyikbe belepetézne, a füge többé nem lenne képes betölteni feladatát mint a fügefafa szaporítószerve – minden magját megennék a darázs lárvái. Vajon a darázs önzetlenül kímél meg néhány virágot? A választ jól meg kell fontolni. Van néhány, darwinista szemszögből is elfogadható módja annak, hogy a darazsak körében egyfajta önkorlátozás alakuljon ki. Legalább egypár fajnál azonban maga a fügefafa érvényesíti saját érdekeit azáltal, hogy meghatározza, hány virágba engedi meg a darázsnek, hogy petézzon. A megoldások olyan zseniálisak, hogy megszakítom a darazsak életciklusának ismertetését annyi időre, hogy kettőt közülük bemutassak.

Egyes fajok esetén a fűgében kétféle termős virágot találunk: rövid és hosszú bibeszálút. (A bibeszál a virágok közepén kiemelkedő női ivarszerv középső része.)



10.2. ábra. A kert kapuja: a füge külsején látható a bejárat nyílás

A darázs mindkettőbe megpróbál petézni, de tojócsöve a hosszúak tövében nem éri el a magházat, így feladja a próbálkozást, és odébbáll. Csak a rövidekbe rak egy-egy petét, ahol tojócsöve eléri a magházat. Egy másik fügefaj, ahol nem találunk rövid és hosszú bibeszálakat, még drákóibb módon irányítja a darazsak viselkedését, legalábbis W. D. Hamilton (jelenleg oxfordi munkatársam), Darwin egyik legkiválóbb mai követője szerint. Hamilton saját braziliai megfigyelései alapján úgy gondolja, hogy a fügefaj képes felismerni, ha egy fűgén már túl sok darázs élőszködik. Azok a fűgék, amelyek minden egyes virágjába belepetéztek a darazsak, a fa szempontjából haszontalanok. A darazsak túl mohók voltak: leölték az aranytojást tojó tyúkot. Pontosabban, mondja Hamilton, a tyúk öngyilkos lesz. A fügefaj a túlfertőzött fűgét ledobja, így a benne fejlődő összes darázsvadék elpusztul. Nagy a kísértés, hogy ezt egyfajta bosszúnak tekintsük – vannak elméleti szempontból kielégítő matematikai modellek, melyek megmentenek az antropomorfizmus vádjától. Ebben az esetben a fa valószínűleg nem vérbosszút áll, csak saját veszteségeit igyekszik csökkenteni. Egy füge megérlelése költségekkel jár, ami kidobott pénz, ha ezek után az érett fűgét elpusztítják a telhetetlen darazsak. A stratégiai játékok nyelvezete – olyan kifejezéseket merek használni, mint „bosszú” vagy „vesztéscsökkentés” – sokszor felbukkan majd ebben a fejezetben. Nincs ebben semmi kivetnivaló, ha megfelelő módon – a matematikai játékelmélet értelmében – használjuk őket.

Visszatérve a fűgedarazsak tipikus életciklusához, nőtényünk Alice-hoz hasonlóan keresztülverekedte magát az aprócska ajtón, hogy sohase lássa többé a kinti világot, és nekilát, hogy megszabaduljon a virágporthól, amit még bölcsőfűgében gyűjtött. A nőtény fűgedarázs megporzó viselkedése szándékosnak tűnik. Nem egyszerűen lekeféli magáról a virágporth, mint a legtöbb megporzó rovar, dehogyis! Legalább néhány fűgedarázsfaj nőténye ugyanolyan gonddal és figyelemmel rakja le terhét, mint ahogy azt összeszedte. Ismét mellső lábainak keféit használva kilapátolja a virágporth e célra tervezett zsebeiből, és erőteljesen rárázza a termős virágok bibéire.

Miután petéit is elhelyezte a termős virágokon, bezárul az élet körforgásának története. Darazsunk élete is véget ér: elbújik a titkos kert egy párás zugába, és elpusztul. Egy darázs eltűnt a világból, de petéiben itt hagyott több megabájt gondosan lejegyzett genetikai információt – a körforgás folytatódik.

Néhány részlet kivételével – melyekről rögtön szót ejtek – a legtöbb fügefaj története a fentiekhez hasonló. A fűgék nemzetsége, a *Ficus* a jelenleg élő nemzetségek egyik legnagyobbika. Nagyon változatos fajok tartoznak ide. A (számunkra) ehető két fügefaj mellett ide tartozik a gumifa, a szent banyan fa, a Bo fa (*Ficus religiosa*), mely alatt Buddha megvilágosodott, számos cserje és kúszónövény, és a trópusok kegyetlen fojtófűgái. A fojtófűge megérdemli, hogy bővebben is szóljak róla. Az erdő talaja nagyon sötét, napenergiára éhező hely. Az erdő minden fájának az a célja, hogy felfelé nyújtózkodva elérje a napfényt, a nyílt teret. A fák törzsének az a szerepe, hogy a leveleket – a napelemeket – kiemelje a vetélytárs fák árnyékából. A legtöbb fa már magonc korában halálra van ítélve. Csak akkor kapnak esélyt az életre, ha az idő és szelek éppen a közelükben döntenek ki egy nagy fát. Az őserdő egy adott pontján erre

az öröndetes eseményre talán száz évet is várni kell. Ha ez végre megtörténik, hatalmas versenyfutás indul a napfényért.



10.3. ábra. a) fojtófüge; b) fojtófüge körülszötte baobabfa

A terület összes, számos fajhoz tartozó magonca hanyatt-homlok rohan versenyezni, hogy ő lehessen az, aki majd betölti az űrt.

A fojtófügék sajátos, rosszindulatú módon gyorsítják fel az eseményeket, gonoszságuk még a teremtéstörténet kígyójáét is felülmúlja (10.3. ábra). Nem várják meg, míg magától kidől egy fa – siettetik a halálát. A fojtófüge kúszónövényként kezdi életét. Úgy tekeredik egy fa törzsén felfelé, mint az iszalag vagy a futórózsza. Az iszalaggal ellentétben azonban a fojtófüge hajtásai egyre vastagabbak és erősebbek lesznek. Egyre szorosabban és szorosabban markolja a szerencsétlen fát, megakadályozza növekedését, végül botanikai értelemben megfojtja. A fügefafa ekkorra már tekintélyes magasságot ért el, fölényesen megnyeri a megfojtott fa után maradt fényfoltért folyó versenyt. A banyanfá is egy fojtófüge, amelynek van még egy figyelemre méltó tulajdonsága. Miután gazdafáját a halálba küldte, léggököket bocsát ki, amelyek a talajt elérve valódi felszívógyökerekké válnak, a talaj fölött viszont járulékos törzsekként működnek. Így egyetlen fa is egész erdőt alkot, amelynek átmérője elérheti a háromszáz métert, árnyékában elfér egy közepes nagyságú indiai fedett piac.

A fügék történetét részben azért meséltem el, hogy megmutassam: a fügékkal kapcsolatos tények legalább annyira lenyűgözőek, mint bármi, amit az első fejezetben idézett előadó a mitológiából vagy az irodalomból elő tudott ásni; részben pedig azért, hogy az efféle dilettánsoknak megmutassam, hogyan kell tudományos módon közelíteni egy ilyen kérdéshez. A tényeket, melyeket ilyen röviden elsoroltam, sok

kutató sokéves fáradságos, zseniális munkája tárta fel, olyan munka, mely nem a használt berendezések bonyolult vagy drága volta, hanem a megfelelő szellemi hozzáállás miatt érdemli meg a „tudományos” jelzöt. A darázsmegporzás felderítéséhez csupán arra volt szükség, hogy a fűgékét félbevágják és megfigyeljék. A „megfigyelés” túl szerény kifejezés. Nem pusztán nézelődésről van szó, hanem gondosan megtervezett adatgyűjtésről, melyek alapján számításokat lehet végezni. Nem egyszerűen leszedtek egy pár fűgét és félbevagták: módszeresen gyűjtötték őket több fáról, meghatározott magasságokból, az év meghatározott szakaszaiban. Nemcsak nézték a benne mászkáló darazsakat: meghatározták, lefényképezték, pontosan lerajzolták, megszámozták, megmérték őket. Rendszereztek faj, nem, kor és a fűgebeli tartózkodási hely szerint. Egyes példányokat múzeumokba küldtek, ahol nemzetközileg elismert mintapéldányokkal való részletes összehasonlítás alapján határozták meg őket. A mérések és számolások nem öncélúak voltak: gondosan kidolgozott elméletek ellenőrzésére szolgáltak. Ha pedig azt találták, hogy a számítások és mérések eredményei megfelelnek a feltevéseknek, még azt is részletekbe menően ki kellett számítani, hogy mi annak az esélye, hogy az eredményeket a véletlen adta, hiszen akkor nem jelentenének semmit.

Térjünk ismét vissza a fűgedarazsakhoz. Említettem, hogy sok faj esetében a hímek közösen vágják azt a lyukat, amelyen keresztül a nőstény kiszabadul. Miért? Ha egy hím meglátja, hogy társai halkkészítésen fáradoznak, miért nem vonul félre, rájuk hagyva a munkát? Íme e mikrovilág egy rejtélye, mely állandóan zavarba hozza a biológusokat: az önzetlenség rejtélye. További nehézséget jelent, amikor meg akarják ezt magyarázni a szakmán kívülieknek. A józan ész számára nincs itt semmi meglepő. A biológus tehát, mielőtt elkezdhetné ecsetelni a megoldás nagyszerűségét, előbb rá kell, hogy ébressze hallgatóit, hogy itt különleges megoldást igénylő feladvánnyal állunk szemben. A hím fűgedarazsak esetében a konkrét kérdés a következő. Ha egy hím társaira hagyja a lyukvágás munkáját, energiát takarít meg, amit arra használhat fel, hogy még több nősténnyel párosodjon, abban a biztos tudatban, hogy nem kell erőt tartalékolnia a lyukvágásra. Ha minden más feltétel megegyezik, a lyukvágást megtagadó gének terjedni fognak a lyukvágást ösztönző gének rovására. Ha azt mondjuk, hogy X gén Y rovására terjed, ez azt jelenti, hogy Y el fog tűnni és helyét X veszi át. Ennek persze az lesz az eredménye, hogy senki sem fog lyukat vágni – amit minden hím megszenved. Ez azonban nem elég ok arra, hogy a hímek lyukat vágjanak. Elég ok lenne, ha a fűgedarázshímeknek emberi előrelátásuk lenne, ám ha feltételezzük, hogy nincs, a természetes szelekció mindig a rövid távú előnyök irányában fog működni. Feltéve, hogy minden hím vágja a lyukat, rövid távon előnyt élvez az a hím, aki magát a munkából kivonva másra fordítja energiáit. E szerint az érvelés szerint a lyukvágás eltűnik a populációból, eltűnteti a természetes szelekció. Ezért kell csodálkoznunk azon a tényen, hogy mégis létezik. Szerencsére olyan rejtéllyel állunk szemben, melyről nagy vonalakban tudjuk, hogyan kell megoldani.

A megoldás kulcsa részben a rokonság: nagy a valószínűsége annak, hogy az egy fűgében élő hímek egymás fivérei. A testvérek nagy valószínűséggel ugyanazon gének másolatait hordozzák. A lyukat vágó hím nemcsak azoknak a nőstényeknek készíti az utat, akikkel ő párosodott, de azoknak is, akikkel a fivérei párosodtak, így a közös

lyukvájásra ösztönző gének tömegesen, minden nőstény testében ki fognak szállni. Ezért tudnak fennmaradni – ez egy helytálló magyarázat arra, hogy miért nem tűnik el ez a viselkedés a hímek köréből.

Lehet azonban, hogy ez a válasz nem teljes. Van a játéknak egy olyan eleme (itt részletesen nem fejtem ki), mely nem a testvérséggel, hanem a darázs és a füge együttműködésével kapcsolatos. A darázs és a füge története rideg érdekekről szól, bizalomról és csalásról, a védekezésre való kísértésről, öntudatlan osztozkodásról. Érezhettük ezt már Hamilton elméletében, a lepotyogó túlfertőzött fűgék kapcsán. Mint már annyiszor, most is el kell mondanom: mindez öntudatlanul történik. Ez első pillantásra nyilvánvalónak tűnik a történet fűgét illető részében, hiszen egyetlen épelméjű ember sem gondol arra, hogy egy növény tudatos lenne. A darázsok lehet, hogy tudatosak – fejezetünkben azonban úgy kezeljük őket, mintha stratégiájuk e téren ugyanolyan szinten állna, mint a nyilvánvalóan nem tudatos fűgefáké.



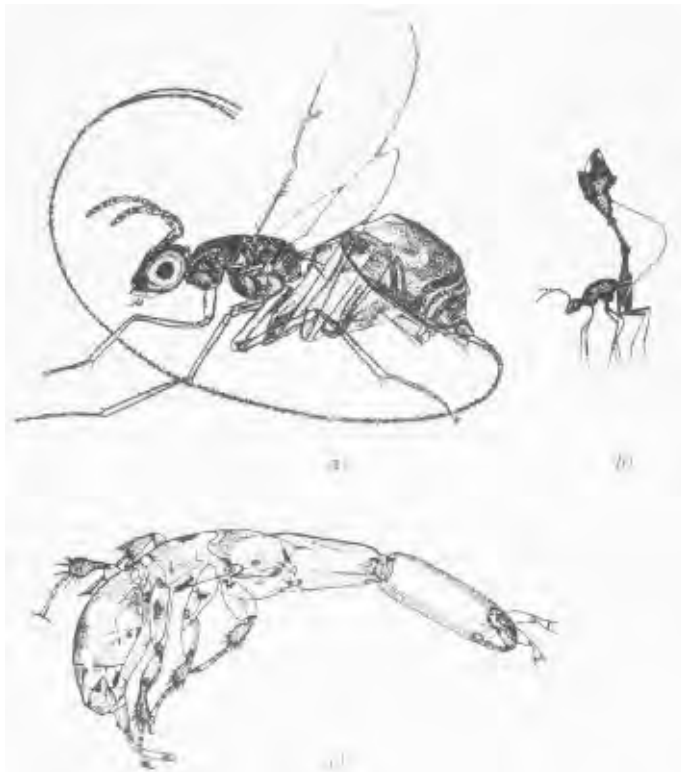
10.4. ábra. A fűgedarázslét veszélyei: a kikelő darázsra hangya les a kert kijáratánál

Titkos kertünk valódi paradicsom apró rovarok számára. Cseppet sem meglepő, hogy számos apró kúszó-mászó állatkának ad otthont a megporzó munkájukkal öt tulajdonképpen létrehozó fűgedarázsok mellett. Apró bogarak, lepkék és légylárvák ugyanolyan vidáman élnek itt, mint atkák és kicsiny férgek. A kert kapujánál ragadozók leselkednek, hogy lecsaphassanak rájuk (10.4. ábra).

A fűgében élő, „fűgedarázs” néven számon tartott apró darázsok nem mindegyike végez megporzást. Vannak potyázók is, a becsületes megporzók távoli rokonai, amelyek rajtuk élősködnek. Nem a csúcsi nyíláson hatolnak be a fűgébe, hanem peteként érkeznek annak falán keresztül, anyjuk egyedülálló módon specializált, szembeszökően hosszú és vékony tojócsövén át (10.5. ábra). A füge belsejében a tojócső csúcsa megkeresi azokat az apró virágokat, amelyekbe a megporzó fűgedarázs lerakta a petéit. Az élősködő darázs nősténye úgy néz ki és úgy is működik, mint egy fűró: a füge falán keresztül fűrt lyuk saját méreteihez képest akkora, mint egy harmincméteres kút.



10.5. ábra. Kettévágott füge élősködő darazsak nőtényeivel, amelyek „fúrójukat” a levegőben rezegetetik



10.6. ábra. Potyázó. *Apocrypta perplexa* élősködő darázs, amely nem végez megporzást, mégis hasznos hűz a fűgéből: a) nőstény; b) nőstény „fűró” testhelyzetben; c) szárnyatlan, egyáltalán nem darázsszerű hím

Hímjei gyakran szárnyatlanok, a valódi fűgedarázshímekhez hasonlítanak (10.6. ábra). Mindennek tetejében vannak másodrendű élősködő darázsok, amelyek a „fűró darázs” mellett leselkedve várják, hogy befejezze munkáját; ekkor saját, jóval szerényebb tojócsövüket a lyukba dugva ők is lerakják petéiket.

A megporzó darázsokhoz hasonlóan ezek a különféle potyázó élősködők mind bonyolult stratégiai játékokat játszanak egymással, melyeket szintén az előbb említett W. D. Hamilton és felesége, Christine tanulmányoztak Braziliában. A megporzókkal ellentétben a potyázó darázsoknak nemcsak a nőstényei, de hímjei is lehetnek szárnyasak. Egyes fajoknál minden hímnek van szárnya, másoknál csak egy részüknek, ismét másoknál egyetlenegynek sem. A szárnyatlan hímek, a fűgedarázsok hímjeihez hasonlóan, sohasem hagyják el bölcsőfűgájukat: itt harcolnak, párosodnak és pusztulnak el. A szárnyas hímek a nőstényekhez hasonlóan kirepülnek, és kinn párosodnak olyan nőstényekkel, amelyek még nem párosodtak. Kétféle híméletű van tehát, egyes fajoknál mindkettő megtalálható. Érdekes, hogy a legkritkább fajok általában szárnyasak, míg a leggyakoribbak szárnyatlanok. Ennek azért van értelme, mert egy közönséges faj hímjének jó esélye van arra, hogy saját fűgében is megtalálja a párját, míg egy ritka faj hímje nagy eséllyel fájának egyetlen képviselője ott. Hamiltonék azt találták, hogy a szárnyas hímek egyenesen *nem hajlandók* párosodni, míg ki nem repültek bölcsőfűgájukból.

Stratégiai szempontból legérdekesebbek azok a fajok, ahol mindkettő hím megtalálható. Szinte olyan ez, mintha három nem létezne. A szárnyas hímek jobban hasonlítanak a nőstényekre, mint a szárnyatlan hímekre. A szárnyas hímek és nőstények egészen darázsszerűek, csak nagyon picik. A szárnyatlan hímek azonban egyáltalán nem látszanak darázsnak. Sokuknak hatalmas rágók vannak, amiktől úgy festenek, mintha hátrafelé mászó apró fűlbemászók lennének. Úgy tűnik, ezek az állkapcsok harci szerszámok: ezekkel tépik szét, marcangolják halálra azokat a hímeket, akikkel összeakadnak egyedüli világuk, a titkos kert sötét, nedves, néma ösvényein barangolva. Hamilton professzor szemléletes leírása szerint:

Harcuk egyszerre kegyetlen és óvatos – talán a „sunyi” lenne a legjobb kifejezés, de ez méltánytalannak tűnik, ha helyzetükbe belegondolunk: mintha egy lökdösődő emberekkel zsúfolt sötét szobában a sarkokban vagy szekrényekben egy tucat éles késekkel felfegyverzett megszállott gyilkos rejtőzködne. Egy marás már halálos lehet. Egy nagy *Idarnes* hím képes arra, hogy társát félbeharpja, bár a halálos sérülés gyakran csak egy kis seb a testen, amelyet olyan gyorsan és biztosan követ a bérulás, hogy méregre gyanakszunk. Ha az első egy-két kölcsönös támadás sem eredményez komoly sérülést, az egyik hím, talán elvesztve egy lábát vagy más miatt legyőzöttnek érezve magát visszavonul, próbál elrejtőzni... innen aztán jóval kisebb kockázattal megmarhatja a győztes vagy egy másik arra járó hím lábát... egy nagy *Ficus* fa gyümölcsérlelése során talán több millió halálos végű csata is lezajlik.

Az a jelenség, hogy egy fajon belül két különböző jellegű hímeket találunk, nem ritka az állatvilágban, de sehol sem olyan szembeütő, mint a potyázó fűgedarázsok között.

Vannak szarvasbikák, amelyeknek nincs agancsuk, szaporodási sikerük mégis hasonló agancsos társaikéhoz. Az elméleti szakemberek szerint az ilyen esetekre két lehetséges magyarázat van. Az egyik a „jobbat a rosszból” elmélet. Talán ez alkalmazható a *Centris pallida* magányos méhfaj esetében. A hímek két típusát „keresgélőknek” és „szitálóknek” nevezi. A keresgélők nagyok. Szorgosan kutatnak olyan nőtények után, amelyek még nem keltek ki föld alatti bölcsőjükből: leásnak hozzájuk és a föld alatt párosodnak velük. A szitálók kicsik. Nem ásnak, hanem a levegőben lebegve figyelik azt a néhány repülő nőtényt, amelyre a keresgélők nem bukkantak rá a föld alatt. A bizonyítékok szerint a keresgélők szaporodási sikere nagyobb, mint a szitálóké, de egy kis testű hím, aminek keresgélve nem sok esélye lenne, talán jobban jár a szitáló stratégiával. Mint mindig, itt sem tudatos, hanem genetikai döntésről van szó.

A másik elmélet, mely egy fajon belül két különböző jellegű hím típus együttélésére vonatkozik, a stabil egyensúly elmélete. Valószínűleg ez alkalmazható a potyázó fügedarazsakra. A lényeg az, hogy mindkét típus szaporodási sikere egyenlő, ha a populációban egy adott, kiegyensúlyozott arányban fordulnak elő. Az arány a következők miatt marad fenn. Ha egy hím a ritkább típus tagja, elsősorban azért sikeres, mert ritka. Emiatt lesz több utódja, így egyre kevésbé lesz ritka. Ha már olyan sikeres, hogy ő lesz a gyakoribb, a ritkaság előnye átadódik a másik típusnak, így most az kezd gyakoribbá válni. Az arány tehát mintegy hőszabályzójelleggel állítódik be. Úgy írtam le a történetet, mintha nagy arányváltozásokkal járna, ám e változásoknak nem kell nagyobbaknak lenniük, mint ahogy egy hőszabályzóval szabályozott szobahőmérséklet ingadozik. Arra sincs szükség, hogy a stabil egyensúlyi arány 50-50% legyen. Bármilyen is az egyensúlyi arány, a természetes szelekció efelé hajtja a populációt. Az egyensúlyi arány az az arány, melynél a két hím típus szaporodási sikere megegyezik.

Hogyan alakulhatott ki ez a rendszer a potyázó fügedarazsagnál? Az első, amit tudnunk kell, hogy az élősködő fajok nőtényei rendszerint csak egy-két petét raknak egy fügébe, majd továbbállnak egy másikra (emlékszünk: kívülről szúrják be a tojócsövüket). Jó okuk van erre. Ha minden petéjüket egy fügébe raknák, lányaik és (szárnyatlan) fiaik nagy valószínűséggel egymással párosodnának, a vérfertőzés pedig közismerten rossz dolog, ugyanazon okból, amiért a növényeknél sem előnyös az önmegporzás. Mindenképpen tény; hogy a nőtények sok füge között szórják szét utódaikat. Ennek következtében lesznek olyan fügék, amelyekbe nem jut az adott faj petéiből; lesz olyan, ahová véletlenül csak hím vagy csak nőtény pete jut.

Gondoljunk bele, milyen sors juthat egy szárnyatlan hímnek. Ha olyan fügében kel ki, ahol nincs nőtény fajtársa, semmit sem tehet. Genetikai értelemben számára ez a vég. Ha azonban van a fügéjében nőtény, jó esélye van arra, hogy párosodjon vele, bár ezért meg kell küzdenie a fajához tartozó többi hímekkel – nem véletlen, hogy e csöpp darázshímek az állatvilág legjobban felfegyverzett és legelszántabb harcosai közé tartoznak. Ha van a fügében szárnyatlan hím, nemigen szállhat ki onnét párzatlan nőtény. Ha azonban egy fügébe csak nőtény pete jutott, abból párzatlan nőtények fognak kirepülni – ők csak a kinti szárnyas hímekkel párosodhatnak.

A szárnyas hímek tehát csak akkor szaporodhatnak, ha vannak olyan fügék, amelyekben csak nőtények kelnek ki, szárnyatlan hímek nem. Mennyi esély van erre?

Ez attól függ, mennyi a darazsak száma a fügékhez képest, valamint attól, hogy a hímek hány százaléka szárnyatlan. Ha a darazsak száma a fügékhez képest alacsony, a darázspeték jól szétszóródnak, remélhetjük, hogy lesz legalább néhány olyan füge, amibe csak nőtény pete kerül. Ebben a helyzetben a szárnyas hímeknek elég jól megy a soruk. Mi történik, ha sok a darázs? A legtöbb fügébe több pete is kerül, mindkét nemből. A nőtényeket a szárnyatlan hímek megtermékenyítik, mielőtt kirepülnének a fügéből, így a szárnyas hímek hoppon maradnak.

Hamilton mindezt pontosan kiszámolta. Arra a következtetésre jutott, hogy ha a hím peték egy fügére jutó száma kb. háromnál nagyobb, a szárnyas hímek szinte sohasem jutnak szaporodási lehetőséghez. Az ennél magasabb populációsűrűség esetén a szelekció a szárnyatlanság elterjedésének kedvez a hímek körében. Ha a hím peték száma fügénként egy vagy annál kevesebb, a szárnyatlan hímek hátrányba kerülnek, mert szinte sohasem találnak fajtársat a fügéjükben – nemhogy nőtényt. A természetes szelekció ilyenkor a szárnyas hímeket részesíti előnyben.

Ha a stabil egyensúly elmélete működik, a természetes szelekció azt a hím típust részesíti előnyben, amely – a kritikus gyakorisághoz képest – kisebbségben van, bármennyi legyen is annak értéke. Röviden azt mondhatjuk, hogy a természetes szelekció a kritikus gyakoriság irányában hat, melynek értéke fajról fajra változik, és függ a darazsak és fügék számarányától. A különböző darázsfajokat és darázs/füge arányaikat úgy képzelhetjük el, mint hőszabályzóval szabályozott hőmérsékletű szobák sorát. Minden szoba hőszabályzója más-más értékre van beállítva. Pl. egy olyan fajnál, ahol a hím peték száma fügénként átlagban három, a természetes szelekció „célja”, hogy a hímek kb. 90%-a szárnyatlan legyen.



10.7. ábra. Titkos kert

Ha a hím peték száma fügénként átlagosan kettő, a szárnyatlan hímek kívánatos aránya 80%. Ne feledjük, hogy *átlagos* értékről beszélünk, szó sincs arról, hogy minden fügében pontosan két hím lenne. Az átlag abból adódik, hogy vannak fügék, ahol egyetlen hím sincs, van, ahol egy, kettő vagy kettőnél több. A 20%-nyi szárnyas hím genetikai szempontból nem azokból a fügékből „él meg”, ahol két hím van (itt nagy valószínűséggel „lecsapják kezéről” a nőstényeket), hanem azokból, ahol egy hím sincs.

Mi a gyakorlati bizonyíték arra, hogy a fügedarazsak esetében a stabil egyensúly elmélete érvényes, nem pedig a „jobbat a rosszból” elmélet? A kettő között az a döntő különbség, hogy az elsőbből mindkét típusú hím szaporodási sikere egyforma. Hamiltonék arra utaló bizonyítékokat találtak, hogy a valóságban mindkét hím típus egyforma sikerrel párosodik a nőstényekkel. Minden fajnál azt találták, hogy a szárnyas és szárnyatlan hímek aránya megegyezik a bölcsőfügéjük párzatlanul elhagyó nőstények részarányával. Tehát egy olyan fajban, ahol a nőstények 80%-a párzatlanul repült ki a fügéből, ott a szárnyas hímek aránya is 80%. Ahol a nőstények 70%-a repült ki párzatlanul, ott a szárnyas hímek aránya 70%. Valóban úgy tűnik, a kétféle hím aránya úgy van „beállítva”, hogy minden nősténynek egyformán jusson. Ez bizonyíték a stabil egyensúly elmélete mellett, a „jobbat a rosszból” elmélettel szemben. Elnézést a bonyolult levezetésért, de a fügék világában erre kell számítanunk.

Hagyjuk most a potyázó darazsakat, és térjünk vissza a valódi, jóindulatú megporzó fügedarazsakhoz. Ha a potyázók történetét bonyolultnak találták, jól készüljenek fel utolsó történetemre. Büszke vagyok arra, hogy rendkívül bonyolult, nehézkes dolgokat is meg tudok magyarázni – a következő azonban lehet, hogy kifog rajtam. Mindenesetre megteszek mindent, ami tőlem telik – ha nem járok sikerrel, az a fügék és társaik, a darazsak bűne. Jobb azonban, ha sem engem, sem őket nem ítélik el, inkább tekintsenek bizalommal az evolúcióra, mely megalkotta az evolúciós időben e bonyolult koreográfiát. Könyvem utolsó oldalainak megértése kíván némi erőfeszítést, ám remélem, hogy megéri a fáradságot.

A következő történetben szereplő fügék „kétlakiak”, ami azt jelenti, hogy a porzós és termős virágok nem „laknak” egy fügefán, mint az eddig tárgyalt „egylaki” fáknál, hanem vannak porzós és termős fügefák. A termős fügefák fügéiben csak nőivarú virágok vannak, a porzós fák fügéiben csak hímivarúak, de ez nem minden. Az ún. porzós fügékben átermős virágok is vannak, és ez nagyon fontos a darazsak szempontjából. A termős fügék termős virágaival ellentétben a porzós fügék átermős virágai akkor sem adnak magot, ha megporozzák őket. Ezzel szemben remek táplálékot nyújtanak a darázslárváknak, ha – ez történetünk kulcsa – előbb megporozzák őket. A termős fügefák termékeny nőivarú virágai a darazsak számára genetikai temetőt jelentenek, míg a füge szaporodása szempontjából létfontosságúak. A nőtény darazsak beléjük hatolnak és megporozzák őket, de petéik nem képesek bennük fejlődni.

Íme egy sokrétű stratégiai játék elemei, melyet a különböző játékosok (darwini értelemben vett) „szándékain” keresztül írhatunk le. A porzós és termős fügék egyaránt azt „akarják”, hogy a darázs beléjük hatoljon, a darazsak viszont csak a porzós fügékbe szeretnének bejutni, oda is a tápláló átermős virágok kedvéért. A porzós fügefát az „akarja”, hogy átermős virágaiba belepetézzenek a darazsak, hogy a kikelő fiatal nőtények aztán virágpórát elvigyék. A benne kikelő hím darazsakhoz nem fűződik érdeke, mert azok nem szállítanak virágpórt. Ez meglepőnek tűnhet, hiszen a fügedarazsfaj fennmaradása érdekében hímekekre is szükség van. Mi, előrelátó emberek, akik tetteink hosszabb távú következményeivel is számolunk, nehezen üzzük ki fejünkben azt a gondolatot, hogy a természetes szelekció előrelátó lenne. Erre már több különböző alkalommal felhívtam a figyelmet. Ha a természetes szelekció képes lenne az előrelátásra, az állatok és növények fajuk fenntartásán fáradoznának, valamint azokén, amelyekre – pl. zsákmányként vagy megporzóként – szükségük van. A természet azonban, az értelmes emberekkel szemben, nem előrelátó. Az „önző gének” és a rövid távú haszon mindig előnyt élvez abban a világban, ahol mások a faj hosszú távú fennmaradásáért dolgoznak. Ha egy fügefát megteheti, hogy csak nőtény darazsakat nevel fel, meg is teszi, más fügefákra bízva, hogy felneveljék a darázsfaj fennmaradásához szükséges hímekeket. A lényeg az, hogy míg vannak olyan fák, amelyek felnevelik a létfontosságú hím darazsakat, az egyetlen önző lázadó, amely felfedezte, hogyan kell több nőtény darazsat felnevelni, ezáltal segíti saját virágpórának terjesztését, így előnybe kerül. A nemzedékek során egyre nagyobb lesz az önző fák aránya; egyre kevesebb és kevesebb fa látja el őket a szükséges hím darazsakkal. Végül a hím darazsak, felnevelésére „hajlandó” utolsó fa is elpusztul, hiszen kevésbé sikeres, mint csak nőtény darazsakat dajkáló vetélytársai.

Szerencsére úgy tűnik, hogy a fügefák nem képesek befolyásolni, hogy milyen nemű darazsak fejlődjenek terméseikben. Ha képesek lennének rá, megeshetne, hogy eltűnnek a hím fügedarazsak, és a faj kihal. Ennek sajnálatos következményeként persze a fügefák is kihalnának. A természetes szelekció nem képes ennyire előre tekinteni. A fügefák valószínűleg azért nem képesek szabályozni a darazsak ivararányát, mert a darazsak – amelyeknek szintén érdekük fűződik hozzá – lehengerlő erővel megteszik ezt.

A termős fügefának szintén érdeke (darwini értelemben), hogy a nőtény darazsak bejussanak fűgéibe – különben termős virágai nem porzódnának meg. A nőtény darázs viszont csak porzós fűgékbe kíván bejutni, hiszen csak itt találja meg azokat az álműs virágokat, amelyekben lárvái fejlődhetnek. A termős fűgékét úgy kerülné, mint a pestist, hiszen ha ilyenbe kerül, genetikai szempontból meghalt: nem lesznek utódai. Pontosabban fogalmazva: azok a gének, amelyek megengedik, hogy a darazsak termős fűgékbe petézzenek, nem jutnak át a következő nemzedékbe. Ha a természetes szelekció csak a darazsokra hatna, a világ tele lenne olyan darazsakkal, amelyek képesek megkülönböztetni a termős fügefákat a pompás bölcsőt kínáló álműs virágú porzósoktól.

Az ember persze megint tiltakozna. „A fügedarazsak biztosan arra törekszenek, hogy néhányuk termős fűgékbe is belepetézzon, még ha ez egyéni génjeik végét is jelenti, hiszen a termős fűgék létfontosságúak a fügefaj fennmaradása szempontjából. Ha a fügefák kihalnak, a fügedarazsak is hamarosan követik őket.” Ez a korábbi érvelés pontos tükörképe. Ha feltesszük, hogy vannak olyan buta vagy önzetlen fügedarazsak, amelyek a termős fűgékbe petéznak, a természetes szelekció azokat az önző darázsegyedeket fogja előnyben részesíteni, amelyek képesek arra, hogy elkerüljék a termős fűgékét és csak a porzósokba petézzenek. Biztosra vehetjük, hogy az önzés a darazsak körében előnyben van bármiféle, a közjót, a faj fennmaradását szolgáló hajlammal szemben. Akkor hát miért nem pusztulnak ki a fügefák és fügedarazsak? Nem önzetlenség vagy előrelátás miatt, hanem azért, mert a darázs/fűge vízváltató egyik oldalán jelentkező önzést kiegyensúlyozza a másik oldal önzése. A nőtény darazsak csak azért nem kerülnek el önző módon a termős fűgékét, mert a fügefák maguk tesznek keresztbe az önző darazsaknak. A természetes szelekció előnyben részesítette a termős fűgék megtévesztő taktikáját: annyira hasonlóná váltak a porzós fűgékhez, hogy a darázs nem képes őket megkülönböztetni.

A darazsak és fűgék közti játszma tehát csodálatraméltóan szimmetrikus. Az egyedeknek mindkét oldalon megvan a lehetőségük az önzésre. Ha az önzés bármely oldalon diadalmaskodhatna, a fűgék és fügedarazsak egyaránt kihalnának. Nem önzetlen önkorlátozás, nem ökológiailag tudatos előrelátás akadályozza meg ezt, hanem mindkét oldal egyedi játékosainak saját érdeküket szolgáló közvetlen ellenakciója. A fügefák, ha tehetnék, boldogan kiiktatnák a hím darazsakat, kiváltva ezzel a darazsak és saját maguk kihalását. De nem tehetik meg, mert megakadályozzák őket ebben a darazsak, amelyeknek az az érdekük, hogy hím és nőtény darazsak egyaránt a világra jöjjenek. A fügedarazsak, ha tehetnék, szívesen elkerülnék, hogy termős fűgékbe petézzenek, amivel kihalásra ítélnék a fügefákat éppúgy, mint saját

fajukat. De nem tehetik, mert a fák megakadályozzák őket ebben: gyakorlatilag megkülönböztethetetlen porzós és termős fügéket fejlesztenek.

Az eddigieket összefoglalva azt várhatjuk, hogy a porzós és termős fügefák egyaránt mindent megtesznek annak érdekében, hogy a darazsakat saját fügéjükbe csalogassák; a darazsaktól pedig azt, hogy mindent megtesznek annak érdekében, hogy megkülönböztessék a kétféle füget és csak a porzósokba petézzenek. Ne feledjük: a „mindent megtesz” genetikai értelemben annyit jelent, hogy evolúciós időléptékben olyan génekre fognak szert tenni, amelyek előnyben részesítik a porzós fügéket. Kicsit tekervényesebb módon azt is beláthatjuk, hogy mind a porzós, mind a termős fügefák érdeke, hogy olyan darazsakat neveljenek fel, amelyek *ellentétes nemű* fügékbe fognak majd bejutni. A következő bonyolult érvelést két brit biológus, Alan Grafen, a modern darwinizmus egyik legkiválóbb matematikai teoretikusa és Charles Godfray nagyszerű rovarász és ökológus egy remek cikkére alapozom.

Milyen fegyvereik vannak a fügefáknak ebben a stratégiai játszmában? A termős fák fügeiket minél inkább a porzós fügékhez hasonló külsejűvé és illatúvá igyekezhetnek tenni. Az álcázás, mint az előző fejezetekben láttuk, gyakori jelenség az élők birodalmában. A botsáskák ehetetlen botokhoz hasonlítanak, ezért a madarak figyelemre sem méltatják őket. Sok ehető lepke teljesen más rokonsági körbe tartozó rosszízű lepkékre hasonlít, amelyeket a madarak megtanultak elkerülni. Különböző orchideafajok méheket, legyeket vagy darazsakat utánoznak. Már a 19. század természetbúvárai elgyönyörködtek az efféle utánzásban, mely éppoly eredményesen csapta be a gyűjtőket, mint feltehetően a más állatokat. Ma már tudjuk, hogy a korábban csodálattal és értetlenséggel szemlélt álcázás könnyedén – és nagy tökéletességgel – létrejön a természetes szelekció útján. Biztosan számíthatunk arra, hogy a (darazsak számára nem kívánatos) termős fügék utánozni fogják a (darazsak számára kívánatos) porzós fügéket – de hogy ez hogyan megy végbe, az már kevésbé nyilvánvaló, alaposan el kell gondolkodnunk rajta. Arra is számíthatunk, hogy a porzós fügék is igyekeznek majd a termősökhöz hasonlítani a következők miatt:

A porzós fügefű azt „akarja”, hogy a darazsak felkeressék fügeit és belepetézzenek annak áltermős virágaiba. A füge ebből csak akkor húz hasznot, ha a kikelő fiatal nőtények betöltik kiszabott szerepüket, vagyis megrakodnak virággal, elhagyják a bölcsőfügét és legalább néhányuk behatol egy számára genetikai temetőt jelentő termős fügébe és azt megporozza (így terjesztve a füge, de nem a saját génjeit). Egy porzós füge, mely nagyon különbözik termős párjától, kiválóan segíti a darazsat azon célja elérésében, hogy csak porzós fügékbe rakja le petéit. Az ilyen darazsak lányai viszont jó eséllyel öröklik anyjuk fügékkel kapcsolatos ízlését. Nagy valószínűséggel csak porzós fügéket fognak felkeresni, így teljesen haszontalannak bizonyulnak bölcsőfügékük génjeinek terjesztése szempontjából (bár sajátjaikat remekül terjesztik).

Most képzeljük el azt, hogy egy porzós fügefavetélytárs fügei a termős fügékre hasonlítanak. Ennek nehezebb lesz magához csalogatnia a nőtény darazsakat, hiszen azok igyekeznek elkerülni a termős fügéket. Azok a nőtény darazsak azonban, amelyeket *sikerül* odacsalogatnia, egy különleges csoportot alkotnak: ők azok, amelyek (saját szempontjukból) elég buták ahhoz, hogy elkerüljék a termősnek kinéző fügéket. Ezek a darazsak, az előzőkhöz hasonlóan, az áltermős virágokba fognak petézni.

Leányaik szintén öröklik fűgékkel kapcsolatos ízlésüket. Milyen ez az ízlés? Ezek a fiatal darazsak olyan anyák leányai, amelyek szívesen, habozás nélkül belepetéztek egy olyan porzós fűgébe, mely *úgy nézett ki, mint egy termős fűge* – és leányaik öröklik ezt a (saját szempontjukból buta) hajlamot. Kirepülnek a világba, és termősnek látszó fűgéket keresnek. Jó részük talál is, így elpusztítja saját génjeit, de a porzós fűge virágporát pontosan oda juttatják, ahová annak kerülnie kell. Ezek a megtévesztett leányok eldobják saját génjeiket, ám virágpor szállító zsebeikben sikeres fűgegéneket hordoznak – köztük olyanokat is, amelyek hatására a porzós fűgék a termősekre hasonlítanak. A vetélytárs fűgefák génjei, azok, amelyek a porzós fűgéket a termősektől nagyon különböztetve teszik, szintén a darazsak virágpor szállító zsebeiben utaznak. Ez a virágpor azonban nagy valószínűséggel – a porzós fűge szempontjából – a szemétkosárba, egy másik porzós fűge genetikai temetőjébe kerül. Ezért a porzós fűgék „összefognak” a termősekkal annak érdekében, hogy a darazsak ne tudják őket megkülönböztetni, és így elkerüljék a genetikai temetőt – már a *fűgék* szempontjából. A porzós és termős fűgék „egyetértene” abban, hogy megkülönböztethetetlenek „akarnak” lenni.

Mint már Einstein is megmondta: Isten bonyolult! Ha azonban még bírja a kedves olvasó, még mindig lehet fokozni. A porzós fűgék belsejében található átermős virágok csak akkor termelnek táplálékot a darázslárvák számára, ha előbb meg lettek porozva. Könnyen érthető tehát – a nőtény darázs szempontjából –, hogy miért gyűjti olyan szorgalmasan a virágport, miért vannak erre a célra különleges virágpor szállító zsebei ahelyett, hogy csak rátapadna testére a virágpor. A nőtény darazsak mindent megkapnak a virágpor szállítás révén. A virágpor készíti arra az átermős virágokat, hogy táplálékot termeljenek utódai számára. Grafen és Godfray azonban rámutatnak, hogy e figyelemre méltó kapcsolat túlsó oldalán rejtőzik még egy talány. Ha visszatérünk a fűgékhez, felmerül a következő kérdés: *miért van szüksége* a porzós fűge átermős virágainak a megporzásra ahhoz, hogy a darázs lárváit táplálja? Nem lenne egyszerűbb, ha mindenképpen táplálná őket, akár kap virágport, akár nem? A porzós fűgéknek táplálniuk kell a darázslárvákat, hogy elvigyék virágporukat a termős virágokhoz. De miért ragaszkodnak az átermős virágok a megporzáshoz, mielőtt rászánnák magukat a tápláléktermelésre?

Képzeljünk el egy mutáns porzós fát, amelyik nem vacakol ezzel: egy könnyed adakozót, aki nem törődik ezzel a törvénnyel, és lehetővé teszi a darázslárvák fejlődését a meg nem porzott virágokban is. Úgy tűnik, ez a mutáns előnybe kerül törvénytisztelő társaival szemben, hiszen több fiatal darázs kel ki benne. Gondoljuk csak végig! Minden fűgébe bejutnak olyan nőtények, amelyek valamilyen okból nem hoznak virágport a zsebeikben. A törvénytisztelő fűgékben az ilyen darazsak lárvái éhen halnak, nem lesznek megporzó fiatal darazsak. A mutáns, nemtörődő vetélytárs nem bánja, ha olyan nőtény petézik bele, aki nem hozott virágport. Lárvái ennek is felnőnek, egészséges, fiatal darazsakká alakulnak. A nemtörődő fűgéből több fiatal darázs száll ki, nemcsak azon anyák utódai, amelyek hoztak virágport, de azoké is, amelyek nem. A nemtörődő porzós fűge tehát nyilvánvalóan előnybe kerül törvénytisztelő társaival szemben, hiszen több fiatal nőtény darázs fogja továbbvinni virágporát a genetikai jövőbe. Nem igaz?

Nem. Éppen itt rejlik az a hihetetlenül agyafűrt ravaszság, amit Grafen és Godfray felfedeztek. Valóban rengeteg fiatal nőtény darázs fog kirajzani a nemtörődöm fűgéből, ám – az érvelés hasonló, mint az előző esetben – ezek örökölték anyáik hajlamait. Anyáiknak pedig – mégpedig éppen a „számfeletti” anyáinak, vagyis azokénak, amelyek a nemtörődöm fűgében többletként nőhettek fel – volt egy hiányosságuk. Nem gyűjtöttek virágot, vagy más okból nem porozták meg azt a virágot, amelyben gyermekük kifejlődött. Éppen ezért „számfeletti” az utódaik. Ezek a számfeletti utódok pedig jó eséllyel öröklik ezt a hiányosságot. Hajlamosak lesznek arra, hogy ne gyűjtsenek virágot vagy valamilyen más okból sikertelen megporzók legyenek. Szinte olyan ez, mint ha a törvénytisztelő porzós fűgék szándékosan próbára tennék a belépő darazsakat. Vizsgáztatják őket, hogy vajon megtesznek-e mindent az álműs virágokkal, amit meg kellene tenniük egy valódi termős virággal. Ha megbuknak a vizsgán, utódaik nem nőhetnek fel. Ezzel a próbatétellel a porzós fűge szelektálja azokat a darázségeket, amelyek hordozóikat a fűgének jó átvivőivé teszik. Grafen és Godfray ezt „helyettes (vikariáns) szelekció”-nak nevezi. Kicsit hasonlít az 1. fejezetben tárgyalt mesterséges szelekcióhoz, ám nem teljesen azonos vele. Az álműs virágok olyanok, mint a szimulátorok, amelyek segítségével kiszűrjük a valódi repülőgép vezetésére alkalmatlan pilótajelölteket.

A vikariáns szelekció új gondolat; még a fenténél bonyolultabb kérdésekre is választ kínál. A fűge- és darázsűge nek partnerek, összeölelkezve, gyors lépésekkel táncolnak át a geológiai időn. A rengeteg fűgefaj többsűge nek megvan a maga saját darázsűfaja. A fűgék és darazsai közösen fejlődtek, evolválódtak – koevolválódtak: összhangban egymással, elkülönülve minden más fűge- és darázsűfajtól. Saját megporzó darázsűfajuk a tökéletes varázsgolyó. Egy, csupán egyetlenegy darázsűfaj felnevelve virágpork biztosan és kizárólagosan csakis saját fajuk termős virágának bibéjére kerül. Nem vesztegetik virágporkukat úgy, mintha az összes fűgefajnak egyetlen, közös megporzó faja lenne, amely csapodár módra minden fűgefaj felkeres. Kevésbé egyértelmű, hogy ez a szigorú hűség egyetlen fűgefajhoz előnyös-e a darázsűnek is, de valószínűleg neki nincs más választása. Itt nem részletezhető okokból időnként előfordul, hogy egy faj két fajra szakad, és ezek az evolúció során eltávolodnak egymástól. A fűgefák esetében az evolúciós időben pl. megváltozhatnak azok a kémiai jelszavak, melyek segítségével a darazsak felismerik a fűgét, vagy olyan kulcs-zár sajátosságok, mint az apró virágok mélysűge. A darázsűfaj pedig rá van kényszerítve az alkalmazkodásra. Ha pl. a fűge virágai (a koevolúció egyik oldala: zár) egyre mélyülnek, a darazsak egyre hosszabb tojócsövet (a koevolúció másik oldala: kulcs) fejlesztenek ki.

Foglalkozunk most egy különleges kérdéssel, melyet Grafen és Godfray vetett fel. Tágítsuk ki kulcs-zár analógiánkat. A fűgefajok „zárja” egymástól eltávolodva fejlődött, a darazsak „kulcsa” pedig követte ezt. Hasonló játszódhatott le, amikor az ősi orchideák méh-, légy- és pókbangókká fejlődtek. Itt azonban könnyű elképzelni, hogyan történt a koevolúció. A fűgék nagyon különös és kinzó kérdést vetnek fel – ez lesz az utolsó probléma, mellyel ebben a könyvben foglalkozom. Ha ez a történet is a koevolúció megszokott menetrendje szerint zajlana le, valami ilyesmit látnánk. A termős fűgék között az evolúció előnyben részesítené mondjuk a mélyebb virágokat. Ez szelekciós nyomást gyakorolna a darazsokra a hosszabb tojócső kialakításának

irányában. E fűgék különös sajátosságai miatt azonban ez a szokásos koevolúciós menetrend nem követhető. Génjeiket csak a termős fűgék valódi termős virágai adják tovább, a porzós fűgék átermős virágai nem; a nőtény darazsak közül viszont csak azok adják tovább génjeiket, amelyek az átermős virágokba petéztek; amelyek a valódi termősökbe, azok nem. Azok a darázsegyedek tehát, amelyeknek véletlenül hosszú a tojócsövük, ezért sikeresen elérik a mély termős virágok magházát, nem adják tovább a hosszú tojócső génjét. Azok a darázsegyedek, amelyek hosszú tojócsöve eléri az átermős virágok magházát, továbbadják saját génjeiket. Itt azonban nem adódnak tovább a mély virágot kódoló gének. Rejtéllyel állunk tehát szemben.

A választ, úgy tűnik, ismét a vikariáns szelekció adja meg – a repülőgép-szimulátor. A porzós fűgék „elvárják” a darazsaktól, hogy bebizonyítsák: jól meg tudják porozni a termős virágokat. Ezért – képzeletbeli példánkban – elvárják, hogy hosszú legyen a tojócsövük. A legkönnyebben ezt úgy ellenőrizhetik, hogy csak a hosszú tojócsövű nőtényeknek „engedik meg”, hogy belepetézzenek átermős virágaikba. Példánk fogalmait használva azt kockáztatjuk, hogy túl céltudatosnak hangzik az egész – mintha a porzós virágok „tudnák”, hogy a termős virágok mélyek. A természetes szelekció automatikusan megoldja, hogy azokat a porzós fűgefákat részesítse előnyben, amelyek átermős virágai minden tekintetben, így mélység dolgában is közel állnak a valódi termős virágokhoz.

A fűgék és fűgedarazsak az evolúció csúcsteljesítményét képviselik: a Valószínűtlenség Hegyének egy látványos sziklatűjét. Kapcsolatuk szinte örjítően bonyolult. Szinte kiált egy szándékos, tudatos, machiavellisztikus magyarázatért. Mégis mindenféle szándékosság, intelligencia, szellemi erő nélkül jött létre. A lényegre remekül rámutat az a tény, hogy a játék szereplői egy pindurka darázs még kisebb aggyal, és egy fa, amelynek egyáltalán nincs agya. Az egész a tudatlan, ám magas fokú darwini szerveződés eredménye, melynek szövevényes tökéletességét el sem hinnénk – ha nem látnánk a saját szemünkkel. Bizonyosfajta költség-haszon elemzésről van szó, pontosabban párhuzamosan futó költség-haszon elemzések milliárdjairól, melyek olyan bonyolultak, hogy legfejlettebb számítógépeinken is kifognak. Az a „számítógép”, amelyen futnak, nem elektronikus alkatrészekből, még csak nem is idegsejtekből épül fel. Még azt sem tudjuk meghatározni, hol helyezkedik el a térben. Automatikus működésű, szétszórt alkatrészekből álló számítógép ez, amely adatait egyedi testek milliárdjaiba szétosztott DNS-darabokban kódolja, amelyek a szaporodás folyamata során vándorolnak egyik testből a másikba.

Sir Charles Sherrington, neves oxfordi fiziológus híres írásában az agyat elvarázsolt szövszékhez hasonlítja:

Olyan ez, mintha maga a Tejút kezdene kozmikus táncba. Az agy egykettőre elvarázsolt szövszékévé válik, amelyen milliányi száguldozó vetélő elmosódó mintát sző, mely mindig jelentőségteljes, ám sohasem időtálló: részmintázatok változó harmóniája.

Az idegrendszerek és agyak kialakulásával jelenhettek meg világunkban a tervezett dolgok. Maguk az idegrendszerek, és minden más tervezettnek tűnő dolog egy ősbibb, lassúbb kozmikus tánc gyümölcse. Sherrington a fenti kép hozzásegítette ahhoz, hogy századunk első felében az idegrendszer egyik legkiválóbb kutatója legyen. Nekünk is

hasznunkra válik, ha hasonlatát kölcsönvesszük. Az evolúció elvarázsolt szövöszék, amelyen a vetélők a DNS-kódok; míg partnereikkel karöltve tovatűnő alakzatokban előtáncolnak a geológiai idők mélyéről, megszövik az ősi bölcsesség hatalmas adattárát: az ősi világok digitálisan kódolt leírását és azt, hogy hogyan sikerült azokban fennmaradni.

Ez azonban már egy új gondolatsor, melynek ki kell várnia egy új könyvet. Az itt végződő könyv fő mondanivalója, hogy az evolúció magasföldjeit nem lehet lóhalálában meghódítani. Még a legreménytelenebbnek tűnő feladványokra is van megoldás, még a legszédítőbb meredélyek is legyőzhetők, ha találunk egy lankás ösvényt, amelyen óvatosan, lépésről lépésre felgyalogolhatunk. A Valószínűtlenség Hegyét nem lehet lerohanni. Apránként – ha nem is mindig lassan – kell megmászni.

KÉPJEGYZÉK

Lalla Ward rajzai: 1.7, 1.9, 1.10, 1.13, 1.14, 2.9, 3.1, 3.3, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 5.1, 5.15, 6.3, 6.4, 6.10, 6.13, 6.15, 7.3, 7.8, 7.15*a*, 7.16, 8.2, 8.3, 8.6; 1.2 (Hölldobler és Wilson nyomán); 1.3 (Wilson nyomán), 1.11 (Eberhard nyomán); 5.30 (M. F. Land nyomán); 7.10 (Brusca és Brusca nyomán), 7.11 (*Collins Guide to Insects* nyomán); 7.17 (Brusca és Brusca nyomán); 10.6 (Heijn nyomán Ulenbertgtől).

A szerző számítógépes alkotásai: 1.14, 1.15, 1.16, 5.3*, 5.5*, 5.6*, 5.7*, 5.9*, 5.10*, 5.11*, 5.12, 5.20*, 5.28, 6.2*, 6.3*, 6.5, 6.6, 6.8, 6.11, 6.12, 6.14, 7.1, 7.9, 7.12, 7.13, 7.14 (a *-gal jelöltek Nigel Andrews rajzolatában); 5.13 Jeremy Hopes számítógépes képe.

Heather Angel: 1.5, 1.11*b*, 5.21, 8.1. Ardea: 1.8 (Hans D. Dossenbach), 1.11*a* (Tony Beamish), 6.7 (P. Morris), 9.3*c* (Bob Gibbons). Euan N. K. Clarkson: 5.28. Bruce Coleman: 10.3*a* (Gerald Cubbit). W. D. Hamilton: 10.1, 10.2, 10.4, 10.5, 10.7. Ole Munk: 5.31. NHPA: 6.1 (ifj. James Carmichael). Chris O'Toole: 1.6*a* és *b*. Oxford Scientific Films: 1.4 (Rudie Kuitert), 2.1 (Densy Clyne), 5.19 (Michael Leach), 5.19*b* (J. A. L. Cooke), 10.2*b* (K. Jell), 10.3*b* (David Cayless). Portech Mobile Robotics Laboratory, Porthsmouth: 9.2. Prema Photos: 8.5 (K. G. Preston-Mafham). David M. Raup: 6.9. Science Photo Library: 9.3*a* (A. B. Dowsett), 9.36 (John Bavosi), 9.3*c* (Manfred Kage), 9.3*d* (David Patterson), 9.6 (J. C. Revy). Dr. Fritz Vollrath: 2.2, 2.3, 2.4, 2.10, 2.11, 1.12, 1.13. Zefa: 9.1.

1.1. Michell, J. (1978): *Simulacra*. London: Thames and Hudson.

2.5. Hansell (1984).

2.7 és 2.8. Robinson (1991).

2.14 és 2.15. Terzopoulos et al (1995). Szerzői jog 1995: Massachusetts Institute of Technology.

3.2. *Hamilton Spectator* (Kanada) szívességéből.

4.1. J. T. Bonnet 1965, szerzői jog: Princeton University Press szívességéből.

5.2. Dawkins 1986 (Bridget Peace rajza).

5.4*a*, *b* és *d*, 5.8*a-e*, 5.24*a* és *b* Land (1980), Hesse 1899 nyomán.

5.4*c* Salvini-Plawen és Mayr (1977), Hesse 1899 nyomán.

5.16*a* és *b* Hesse: Untersuchungen über die organe Lichtempfindung bei niederen thieren, *Zeitschrift für Wissenschaftliche Zoologie*, 1899 nyomán.

5.17, 5.19*d* és *e*, 5.25, 5.26 M. F. Land szívességéből.

5.18*a* és *f* 5.27, 5.30 Nigel Andrews rajzai.

5.22 Kuno Kirschfeld rajza, közölve a *Naturwissenschaftliche Rundschau*, Stuttgart engedélyével.

5.23. Dan E. Nilsson szívességéből, Stavenga és Hardy (szerk.) 1989 alapján.

5.29*a-e* Walter J. Gehring és társai szívességéből, Georg Halder és társai 1995 alapján.

6.16. Meinhardt (1995) nyomán.

7.2, 7.4, 7.5, 7.6, 7.7 Ernst Haeckel (1904): *Kunstformen der Natur*. Leipzig and Vienna: Verlag des Bibliographischen Institutes.

7.15*b* Raff és Kaufmann (1983) (Y. Tanaka: Genetics of the Silkworm in: *Advanced Genetics* 5: 239-317, 1953 nyomán).

8.4. Wilson (1971) (Wheeler 1910, F. Dahl nyomán).

9.4. Jean Dawkins.

9.5. Szerzői jog: K. Eric Drexler, Chris Peterson és Gayle Pergamit. Minden jog fenntartva. Közölve: *Unbounding the Future: The Nanotechnology Revolution*, William Morrow, 1991 engedélyével.

IDÉZETT ÉS AJÁNLOTT IRODALOM

- Adams, D. (1989): *The More than Complete Hitchhiker's Guide*. Wings Books, New York.
- Attenborough, D. (1988): *Élet a Földön*. Novotrade, Budapest.
- Attenborough, D. (1989): *Az élő bolygó*. Novotrade, Budapest.
- Attenborough, D. (1995): *A növények magánélete*. Aqua Kiadó, Budapest.
- Basalla, G. (1988): *The Evolution of Technology*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Berry, R. J. – Haliham, A. (Eds.) (1986): *Collins Encyclopedia of Animal Evolution*. Collins, London.
- Bonner, J. T. (1988): *The Evolution of Complexity*. Princeton University Press, Princeton.
- Bristowe, W. S. (1958): *The World of Spiders*. Collins, London.
- Brusca, R. C. – Brusca, G. J. (1990): *Invertebrates*. Sinauer, Sunderland.
- Caroll, S. B. (1995): *Homeotic genes the evolution of arthropods and chordates*. Nature, 376, 479-485.
- Coveney, P. – Highfield, R. (1995): *Frontiers of Complexity*. Faber and Faber, London.
- Cringely, R. X. (1992): *Accidental Empires*. Viking, London.
- Cronin, H. (1991): *The Ant and the Peacock*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Csányi, V (1988): *Evolúciós rendszerek*. Gondolat Kiadó, Budapest.
- Dance, S. P. (1992): *Shells*. Dorling Kindersley, London.
- Darwin, C. (1973): *A fajok eredete*. Magyar Helikon, Budapest.
- Darwin, C. (1882): *The Various Contrivances by Which Orchids are Fertilised by Insects*. John Murray, London.
- Dawkins, R. (1986): *Az önző gén*. Gondolat Kiadó, Budapest.
- Dawkins, R. (1989): *A hódító gén*. Gondolat Kiadó, Budapest.
- Dawkins, R. (1994): *A vak órásmeister*. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Dawkins, R. (1995): *Folyam az édenkertből*. Kulturtrade Kiadó, Budapest.
- Dawkins, R. (1898): *The evolution of evolvability*. In *Artificial Life*. (Ed. C. Langton.) Addison-Wesley, Santa Fe.
- Dennett, D. C. (1998): *Darwin veszélyes ideája*. Typotex, Budapest.
- Douglas-Hamilton, I. – Douglas-Hamilton, O. (1992): *Battle for Elephants*. Doubleday, London.
- Drexler, K. E. (1986): *Engines of Creation*. Anchor Press/Doubleday, New York.
- Eberhard, W. G. (1985): *Sexual Selection and Animal Genitalia*. Harvard University Press, Cambridge.
- Eldredge, N. (1995): *Reinventing Darwin: The great debate at the high table of evolutionary theory*. John Wiley, New York.
- Fisher, R. A. (1958): *The Genetical Theory of Natural Selection*. Dover, New York.
- Ford, E. B. (1975): *Ecological Genetics*. Chapman and Hall, London.
- Frisch, K. v. (1975): *Animal Architecture*. Butterworth, London.
- Fuchs, P. – Krink, T. (1994): *Modellierung als Mittel zur Analyse räumlichen Orientierungsverhaltens*. Diplomarbeit, Universität Hamburg.
- Gánti, T. (2000): *Az élet általános elmélete*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest.
- Goodwin, B. (1994): *How the Leopard Changed its Spots*. Weidenfeld and Nicolson, London.
- Gould, J. L. – Gould, C. G. (1988): *The Honey Bee*. Scientific American Library, New York.
- Gould, S. J. (1983): *Hen's Teeth and Horse's Toes*. W. W. Norton, New York.
- Gould, S. J. (1990): *A panda hüvelykujja*. Európa Könyvkiadó, Budapest.
- Grafen, A. – Godfray H. C. J. (1991): *Vicarious selection explains some paradoxes in dioecious figpollinator systems*. Proceedings of the Royal Society of London, B., 245, 73-76.
- Gribbin, J. – Gribbin, M. (1993): *Being Human*. J. M. Dent, London.

- Haeckel, E. (1974): *Art Forms in Nature*. Dover, New York.
- Haldane, J. B. S. (1985): *On Being the Right Size*. (Ed. J. Maynard Smith.) Oxford University Press, Oxford.
- Halder, G. – Callaerts, P. – Gehring, W. J. (1995): *Induction of ectopic eyes by targeted expression of the eyeless gene in Drosophila*. *Science*, 267, 1788-1792.
- Hamilton, W. D. (1996): *Narrow Roads of Gem Land: The collected papers of W. D. Hamilton, Vol. 1. Evolution of Social Behaviour*. W. H. Freeman/Spektrum, Oxford.
- Hansell, M. H. (1984): *Animal Architecture and Building Behaviour*. Longman, London.
- Hayes, B. (1995): *Space-time on a seashell*. *American Scientist*, 83, 214-218.
- Heinrich, B. (1979): *Bumblebee Economies*. Harvard University Press, Cambridge.
- Hölldobler, B. – Wilson, E. O. (1990): *The Ants*. Springer-Verlag, Berlin.
- Hoyle, E. (1981): *Evolution From Space*. J. M. Dent, London.
- Janzen, D. (1979): *How to be a fig*. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 10, 13-51.
- Juhász-Nagy, P. (1993): *Eltűnő sokféleség*. Scientia Kiadó, Budapest.
- Kauffman, S. (1995): *At Home in the Universe*. Viking, Harmondsworth.
- Kettlewell, H. B. D. (1973): *The Evolution of Melanism*. Oxford University Press, Oxford.
- Kingdon, J. (1993): *Self-made Man and His Undoing*. Simon and Schuster, London.
- Kingsolver, J. G. – Koehl, M. A. R. (1985): *Aerodynamics, thermoregulation, and the evolution of insect wings: differential scaling and evolutionary change*. *Evolution*, 39, 488-504.
- Land, M. F. (1980): *Optics and vision in invertebrates*. In *Handbook of Sensory Physiology*. (Ed. H. Autrum.) VII/6B, 471-592. Springer-Verlag, Berlin.
- Langton, C. G. (Ed.) (1989): *Artificial Life*. Addison-Wesley, New York.
- Lawrence, P. A. (1992): *The Making of a Fly*. Blackwell Scientific Publications, London.
- Leakey, R. (1995): *Az emberiség eredete*. Kulturtrade Kiadó, Budapest.
- Lundell, A. (1989): *Virus! The secret world of computer invaders that breed and destroy*. Contemporary Books, Chicago.
- Macdonald, D. (Ed.) (1984): *The Encyclopedia of Mammals*. (2 vols.) Allen and Unwin, London.
- Margulis, L. (1981): *Symbiosis in Cell Evolution*. W. H. Freeman, San Francisco.
- Margulis, L. (2000): *Az együttélés bolygója*. Vince Kiadó, Budapest.
- Maynard Smith, J. (1988): *Did Darwin Get it Right?* Penguin Books, Harmondsworth.
- Maynard Smith, J. (1993): *The Theory of Evolution*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Maynard Smith, J. – Szathmáry, E. (1995): *Az evolúció nagy lépései*. Scientia Kiadó, Budapest.
- Meeuse, B. – Morris, S. (1984): *The Sex Life of Plants*. Faber and Faber, London.
- Meinhardt, H. (1995): *The Algorithmic Beauty of sea Shells*. Springer-Verlag, Berlin.
- Moore, R. C. – Lalicker, C. G. – Fischer, A. G. (1952): *Invertebrate Fossils*. McGrawHill, New York.
- Nesse, R. – Williams, G. C. (1995): *Evolution and Healing: The New Science of Darwinian Medicine*. Weidenfeld and Nicolson, London. Also published as *Why We Get Sick* by Random House, New York.
- Nilsson, D.-E. (1989): *Vision, optics and evolution*. *Bioscience*, 39, 298-307.
- Nilsson, D.-E. (1989): *Optics and evolution of the compound eye*. In *Facets of Vision*. (Eds. D. G. Stavenga and R. C. Hardie.) Springer-Verlag, Berlin.
- Nilsson, D.-E. – Pelger, S. (1994): *A pessimistic estimate of the time required for an eye to evolve*. *Proceedings of the Royal Society of London*, B, 256, 53-58.
- Orgel, L. E. (1973): *The Origins of Life*. Chapman and Hall, London.
- Pennycuik, C. J. (1972): *Animal Flight*. Edward Arnold, London.
- Pennycuik, C. J. (1992): *Newton Rules Biology*. Oxford University Press, Oxford.
- Pinker, S. (1994): *The Language Instinct*. Viking, Harmondsworth.
- Provine, W. B. (1986): *Sewall Wright and Evolutionary Biology*. Chicago University Press, Chicago.
- Raff, R. A. – Kaufman, T. C. (1983): *Embryos, Genes and Evolution*. Macmillan, New York.
- Raup, D. M. (1966): *Geometric analysis of shell coiling: general problems*. *Journal of Paleontology*, 40, 1178-1190.

- Raup, D. M. (1967): *Geometric analysis of shell coiling: coiling in ammonoids*. Journal of Paleontology, 41, 43-65.
- Ridley, Mark (1993): *Evolution*. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Ridley, Matt (1993): *The Red Queen: Sex and the evolution of human nature*. Viking, Harmondsworth.
- Robinson, M. H. (1991): *Niko Tinbergen, comparative studies and evolution*. In The Tinbergen Legacy. (Eds. M. S. Dawkins, T. R. Halliday, and R. Dawkins.) Chapman and Hall, London.
- Ruse, M. (1982): *Darwinism Defended*. Addison-Wesley, Reading.
- Sagan, C. – Druyan, A. (1992): *Elfeledett ősök árnyai*. Európa Könyvkiadó, Budapest.
- Salvini-Plawen, L. v. – Mayr, E. (1977): *On the evolution of photoreceptors and eyes*. In Evolutionary Biology. (Eds. M. K Hecht, W. C. Steere, and B. Wallace.) 10, 207-263. Plenum, New York.
- Szathmáry, E. – Maynard Smith, J. (2000): *A földi élet regénye*. Vince Kiadó, Budapest.
- Terzopoulos, D. – Tu, X. – Grzeszczuk, R. (1995): *Artificial fishes: autonomous locomotion, perception, behavior, and learning in a simulated physical world*. Artificial Life, 1, 327-351.
- Thomas, K. (1983): *Man and the Natural World: Changing Attitudes in England 1500-1800*. Penguin Books, Harmondsworth.
- Thompson, D'A. (1942): *On Growth and Form*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Trivers, R. L. (1985): *Social Evolution*. Benjamin/Cummings, Menlo Park.
- Vermeij, G. J. (1993): *A Natural History of Shells*. Princeton University Press, Princeton.
- Vida, G. (szerk.) (1980-1985): *Evolúció I-V*. Natúra, Budapest.
- Vollrath, F. (1988): *Untangling the spider's web*. Trends in Ecology and Evolution, 3, 331-335.
- Vollrath, F. (1992): *Analysis and interpretation of orb spider exploration and web-building behavior*. Advances in the Study of Behavior, 21, 147-199.
- Vollrath, F. (1992): *Spider webs and silks*. Scientific American, 266, 70-76.
- Watson, J. D. – Hopkins, N. H. – Roberts, J. W. – Steitz, J. A. – Weiner, A. M. (1987): *Molecular Biology of the Gene* (4th edn). Menlo Park: Benjamin/Cummings.
- Weiner, J. (1994): *The Beak of the Finch*. Jonathan Cape, London.
- Williams, G. C. (1992): *Natural Selection: Domains, Levels and Challenges*. Oxford University Press, Oxford.
- Wilson, E. O. (1971): *The Insect Societies*. The Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge.
- Wolpert, L. (1991): *The Triumph of the Embryo*. Oxford University Press, Oxford.
- Wright, S. (1932): *The roles of mutation, inbreeding, crossbreeding and selection in evolution*. Proceedings 6th International Congress of Genetics, 1, 356-366.

NÉV- ÉS TÁRGYMUTATÓ

(Az oldalszámok az eredeti kiadás szerintiek.
Az elektronikus változatban kb. 4 oldalt kell levonni.)

- 3D nyomtató 196-197
- Adams, Douglas, 182
- Agaonidae, 211
- agár, mesterséges szelekciója 27
- agyar
 megkövesedett elefántagyar 72
- akáciák és hangyák, 188
- a köveknek nincsenek gyermekeik
 26
- állatok
 művei, 20
 nagyok kicsinyítve, 84
 repülés, a méret problémája, 85
 szárazföldi, vízbe visszatérő,
 98-101
 „szobor”, 13
- Ampelisca, 131
- Araneus diadematus*,
 hálókészítése, 36
- arc
 az ember hajlama arra, hogy
 arcokat lásson 10-11
 mimikri rovarokon 10-11
- arthromorfok
 állatkertje, 177
 genetikai hatások 174
 mesterséges szelekciója, 175
 számítógép alkotta 172-176
 szelvényezettség 173
- Asimov, Isaac, 61
- aszimmetria lehetséges evolúciója,
 161
- átlátszóság, a fénytörés alapelve
 113
- átváltási tényező, légy és
 pókselyem között 183-184
- A Vak Órásmester*
 denevérek, 35
 genetikai tér, 141
 „lehengerlően többféle módon
 lehetünk élettelenek”, 75
- Bagolylepkék, mint a
 lasszóspókok zsákmányai 46
- baktériumok, mint az UTMP
 robotok példái, 202
- bálnák 96, 97
- szárazföldi történetük 96
- banán hasznossága, 182
- Bathylchnops exilis*, szemének
 evolúciója, 139
- Bauplan, 160
- Bennet-Clark, Henry, 161
- billér 171
- biomorfok, 28-29, 169
- embriológiája, 159
- fái, 29
- földje, 141-142
- kaleidoszkóptükrök, 160
- mesterséges szelekciója, 28-31
- Színes Órásmester program, 31
- Vak Órásmester program, 32
- Biston betularia*, evolúciója, 67
- bogarak, álcázás, 11
- bolhák, szelvényezettsége 171
- Brassica oleracea*, 26
- bulldog, angol, mesterséges
 szelekciója, 27
- bunkós medúza, hatsugaras
 szimmetria 167
- Callaerts, Patrick, 136
- Csapsejtek, emberi ideghártyában
 160
- csigáspolip furcsa héja 154-155
- csivava mesterséges szelekciója 27
- csó (héjak) 143-145, 145, 146
- Vak Csigásmester alkotta
 csövek 149
- Dán dog mesterséges szelekciója,
 27
- darazsak
 élősködő 218, 219
 és fűgék koevolúciója 185,
 211, 215-217, 224, 226-227
- fazekasdarazsak 18
- mint pókok zsákmánya 45
- „önzése” 224
- potyázó fajok 219
- szárnyas hímek 220-221
- szárnyatlan hímek 220-221
- tervezettnek tűnő „edényeik”
 17-18
- Darwin, Charles
 a szemről 102-103
 és a mesterséges szelekció mint
 a természetes szelekció
 modellje 31
- evolúcióelmélete 58
- darwinizmus
 a valószínűtlenség problémája
 60
- félreértése 62
- függése az öröklődéstől 77
- nem véletlenszerű természetes
 szelekció 59
- delfinek konvergens evolúciója 22
- Dennett, Daniel 141
- Diatoma*, 164
- dimenziók
 kettő és a valódi élet fizikája 34
- négy 141
- dinoszauruszok mint a madarak
 evolúciójának kiindulópontja
 92
- DNS, 9
 az evolúció szövőszekén 228
- élőlények mint a DNS
 gazdaszervezetei 189, 195
- és exponenciális növekedés
 206-207
- és öröklődés 69
- fákban 28-29
- ló mint DNS szállítására
 szolgáló jármű, 204
- vírus-DNS, 194
- Douglas-Hamilton, Ian, 70
- Douglas-Hamilton, Oria, 70
- Drexler, Eric, 206
- Drosophila
 homeiotikus mutációja, 177
- szemgénjei, 136
- Eberhard, William, 104
- edények
 hatásfoka 14-18
- rovarbölcsök 17
- Edmonds, Donald, 48
- együttműködés méhek és virágok
 között 187
- éjjeli lepkék
 evolúciója 67-68

mint póksákmány 43-44, 46
Eldredge, Niles, 80
elefántok, az ormány evolúciója, 9,
70, 72
élet
a nanovilágban 207-208
eredete 135-136
léte másutt 135-136
ritkasága 135
élettartam és testméret, 83
élő fotocella (fényérzékeny sejt)
104-105, 106
emberközpontú világszemlélet 182
ember uralma a többi élőlény felett
180
embriók változásai, 76
embriológia
biomorfoké 160
emlősöké 158
kaleidoszkópszerű 158-180
mutációk függése az
embrionális fejlődéstől 158
rovaroké 158
szabályai evolúciós modellben
118
enzimek valószínűsége 59
epifita növények 187
esőcseppek és fotonok 105-106
eukarióta sejtek 202
evolúció
a javulás egy lehetősége (friss
gének érkezése) 102
alapvető „kellékei” 68
koevolúció 227
konvergens evolúció 20
lefelé menni lehetetlen 100
makromutációk jelentősége 77
„választható” útvonalai 100
„vetélői”: DNS kódok 228
visszatérés régebbi életmódhoz
96-98
exponenciális növekedés 205, 206

Fajok rendszerezése 81

fák

akáciák és hangyák 188
és a gerincesek repülésének
evolúciója 86-87
fügefák és fügedarazsak 185
valódi és számítógépes fák 29

fán élő növények 187

farkas, mesterséges szelekció 27

fény

érzékelése 107-108
fénytörés alapelve, 113
sugarak elhajlása 112-113

fényelhajlás, mint probléma a
sötétkamraszem számára 110-
112

fényérzékeny sejtek előzetes
evolúciója 120

fényképezőgép és az emberi szem,
20 *lásd még* kehelyszem

fénytörés alapelve 113

férgek, egyszerű összetett szemek
132

fésűkagyló, tükrös képkalkotás 125

Fisher, R. A. 62, 79, 100

fizika

és szárnycsapásos repülés 94-
95

és repülés 82

háromdimenziós világ fizikája,
szemben a kétdimenzióssal
34

mesterséges, a természetes
szelekció szimulálásában
54-55

fókusz, szemé 120, 121

folyami rák spermatozoájának
szimmetriája 163

fotonok

a Halley-üstökösből 105

gazdaságosság 105

távérzékelési technika 102

fotoszintézis 105

Fuchs, Peter 49, 52

fű 189

füge (*Ficus spp.*) 9-10, 210, 214-
215

az irodalomban 9

„egyvetértés” porzós és termős
fügek között 225

fojtófüge 214

kehelyszerű füge 211

kétlaki 222

koevolúciója a fügedarazsakkal
185, 211, 215-216, 223-
224, 226-227

megporzói 211

mimikri 12, 224

termős virágok két típusa 213-
214

virágai 211

Gehring, Walter 135-137

gének

a mutációs ráta szabályozása
64

arthromorfok spontán

evolúciója 172

átrendeződése az ivaros

szaporodás során 65-66

DNS-utasítások 209

elkülönülő élőhelyek 66-67

elnevezése 136

emlősök szeme 137

érkezése más populációból
100-101

fenotipikus hatása 79

fokozatos változás 175

hatásuk az embrióra 79

kaleidoszkóposság 178-179

károsodások mutáció révén,

hatásuk a szemre 137

közös lyukvájás génjei

(fügedarazs) 216

„Másolj le!” programok 208

módosító gének 79

szelvények 173-175

testtáj 173-175

tagma 173-175

„utólagos tisztázás” mutációk
után 79

változatossága 140-141

genetikai tér 141-142

geodák, tervezettnek tűnő kövek 9

gerincesek

és tintahalak függetlenül

kialakult szemei 107

repülése 104; *lásd még*:

madarak

sikló gerincesek 88

gerincoszlop hajlékonysága,

emlősök és halak 92

Gigantocypris, a képkalkotás tükrös

megoldása 126

Godfray, Charles 224

Goldschmidt, Richard 75

Gould, Stephen 80

Grafen, Alan 224

Grzeszczuk, Radek 55-57

Haeckel, Ernst 163

halak

számítógépes szimulációja 55-
57

szemük evolúciójának modellje
119-120, 119

repülőhal 90

négyszemű hal 139

Haider, George 136-137

Halley-üstökös fotonjai 105

HálóSzövő szimulátor 117

háló evolúciója egy éjszaka
alatt 57

elméleti pókok 49-55

Hamilton, W. D. 214, 217-219,
221-222

hangyabarát növények 188

hangyák

és akáciák 188

alkalmazkodása 186
„kertjei” 187
hangyautánzó bogár 12
szelvényezettsége 169
Hardy, Alistér 125-127
hatásfok
késéké 15
mértékei 15
pókhálóké 36
szárnyaké 86
szemmodellé 117-118
természetes dolgoké 14-15
héjak
alakja 151
elméleti héjak 154
cső 144-145
kiöblösödés, kukac és
tornyosság 144, 145
számitógépes szimulációja 142,
146, 149-150
hasonlóság valódi héjakkal
152, 153
mesterséges szelekciója
152
„röntgenkép” 147, 148
helyi megkettőződés 204
hemoglobinszám 61
heritabilitás 119
hernyók lába 170-171
hernyók szelvényezettsége 170,
171
hímek két típusa 219-220
Hoyle, Fred 59, 76
Hyptiotes változó feszességi
hálója 45-46
Íbériai bangó 184
idegenbeporzás 183-184
ideghártya
csapok és pálcikák 124
„élő fotocellák” 106
független kialakulása 122-123
immunglobulinok,
nanotechnológia 207-208
Internetféreg 191
Internet Worm 191
Isten
a Valószínűtlenség Hegyén 60-
61
„gondoskodása” 59
ivaros szaporodás
DNS-rekombináció 69
és gének átrendeződése 65
kialakulása 66
Müller fogaskereke 66
pókoknál 42
szaporodás a HálóSzövőben 53
ízeltlábúak

ismétlődő szelvényeik 169
kaleidoszkópszerű genetikájuk
179
szelvények változatossága 178
testfelépítésük 172
Izrael, kőművesméhek 18
„Jobbat a rosszból” elmélet
méhek 220
és a stabil egyensúly elmélete
220
Juniper, Barrie 15
Kaehler, Ted 172, 175
kaleidoszkóposság, embriók 158-
159
Kaliforniai Egyetem 85
kancsóka gazdaságossága 15
káposztafélék mesterséges
szelekciója 26
kavics mint lencse 114
kehelymedúza, négysugaras
szimmetria 162
kehelyszem lásd szem, kehely
Kelvin, Lord 60
Kepler-teleszkóp 134
keselyük termikhasználat 95-96
Kettlewell, Bernard 67
Kingdon, Jonathan 36
Kingsolver, Joel 85
kiöblösödés (héjaknál) 94, 145-
146
spirál emelkedése 144
Kirby, William tiszteletes 181
Kirschfeld, Kuno 130
Koehl, Mimi 85
koevolúció, füge és fügedarázs
185-186, 211, 215-217, 226
konvergens evolúció 21-22
kormos nyársorrú hal konvergens
evolúciója 22
kovamoszatok kaleidoszkópszerű
szimmetriája 164
kövületek
az evolúció bizonyítékai 70-72
elefántgyar 70-72
rendszerezése 80-81
kreationisták
fajrendszerezése 80-81
kedvenc ellenvetése 101
kedvenc idézete 139
Krink, Thimo 49
kukac (héjak) 114-145, 145-146
kutyák mesterséges szelekciója 27
Land, Michael 124-133, 138
Langton, Christopher 55

lapos halak, különböző
testhelyzetek 99
laputi könyvirás 60
lebegés a levegőben, kicsiny
állatok 85-86
légzés levegővel, vízben élő
állatoknál 98
legyek
billér 171
fehérjetartalma (számítások
pókoknál) 53-54
szelvényezettsége 171
lencsék
alapelve 108-110
evolúciója 113, 116-119, 122-
124
kavics mint lencse 113
különböző fejlődése rovaroknál
123
összetett 116
rögtönzött 115
számítógép-vezérelt 112
lepényhal és rája 99
lepkék, mint a pókok zsákmányai
44
létraháló 45
Lin, Lorraine 48
ló mint a DNS szállítására szolgáló
jármű 204
Machina speculatrix (robot
„teknős”) 198
madarak
a repülés kezdetei 93
evolúciója dinoszauruszokból
92
hosszú evolúciós útja 94
nagy röpképtelen 95
szárnyak 94
makromutációk 73, 75-76
a természetes szelekció kedvez
178
és természetes szelekció 74
jelentősége az evolúcióban 77
nincsenek összefüggésben a
pontozott egyensúly
elméletével 79-80
„Másolj le” program 190, 199, 209
Mastophora egyszálú hálója 47
Maynard Smith, John 72
Medawar, Sir Peter 160-161
medúzák, hatsugaras
szimmetriával 167
medverák, homeotikus mutáció
162
medverák homeotikus mutációja
177, 178
megporzási stratégiák 185-187

- megporzók
 fűgée 211
 specialisták 185-187
- méhek
 kőműves 18
 nektár 182
 ultraibolya látás 183
- Meinhardt, Hans 155
- membránrendszerek, fényérzékeli
 sejtekben 106
- méreg, pókoké 44
- mesterséges élet, folyóirat 55
- mesterséges szelekció
 állatok 28
 arthromorfok 175
 és természetes szelekció 33
 héjak 153
 növények 26
 számítógépes biomorfok 31
- Mesterséges Természetes
 Szelekció 57
- mimikri 11-13
 arcok rovarokon 23-24
 emberi szem és fényképezőgép
 hasonlósága 20
- Minden Lehetséges Állatok
 Múzeuma 142
- Minden Lehetséges Héjak
 Múzeuma 146, 149-150, 155
- mirmekofil növények 188
- More, Henry 181
- MozgásFigyelő program,
 pókszimuláció 48-50, 49
- mutáció
 és stressz 65
 és természetes szelekció 67, 74,
 158
 gének által befolyásolt 64-65
 homeotikus 177, 177-178
 irányított 63
 jó és rossz 65
 makromutáció 73, 74
 jelentősége az evolúció
 szempontjából 77
 különböző fajtái 76
 nincs kapcsolatban a
 pontozott evolúció
 elméletével 80
 nem véletlenszerűsége 63-64
 „utólagos tisztázás” 79
 véletlenszerűsége a
 darwinizmus szerint 62
- Müller fogaskereke, az ivaros
 szaporodás magyarázata 66
- művek, állatoké 20
- Nanotechnológia 207
 immunglobulinok 207
- nanovilág élete 208-209
 „napelemek” és rovarszárnyak 86
 nap és távirányítási technikák 102
 nektár
 méhek kifizetése 182-183
 rovarok üzemenyaga 183
- Nesse, Randolph 206
- Neumann János 198
- Nilsson, Dan 117-120, 130, 135,
 139
- növekedés, exponenciális 205-206
- Nyak evolúciója 78
 nyírfaaraszoló, evolúciója 67
- Okapi nyakának evolúciója 78, 79
- ommatidiumok 129-130
 a sötét festékanyag
 mellékhatása 132
- oposszumegér, 87
- orchidea
 kalapács 185
 rovarutánzó 184
 vödör 184-185
- ormány, elefánt 9, 70, 72
- O’Toole, Cristopher 18
- Önzetlenség, hím fűgedarazsak
 216
- öröklődés
 és DNS 69
 különbözősége a szaporodástól
 68
 mint a darwinizmus eleme 69
- örökölhetőség 119
- ősleves 199
- összetett szem *lásd* szem, összetett
- Pálcikasejt 106, 124
- Pasilobus* háromszögletű hálója
 46, 46
- Pedetes capensis* *lásd* ugrónyúl
- Pelger, Susanne 117-120
- Pennycuik, Colin 95
- „pihenő” evolúció 100
- Pilkington, James 181
- pingvin, galapagosi, konvergens
 evolúció 22
- Poecilopachys* vízszintes
 kerekhálója 47
- pókfonal 36, 54
 és ivaros szaporodás 42
 ragadósága 38
lásd még: pókok, hálók
- pókháló *lásd* pókok, háló
 pókok
 feladatai 39-44
- hálók 9, 30-57
 a fonál kifeszítésének
 nehézségei 40-41
 építése 39-42
 evolúció a HálóSzövővel
 51
 finomszabályozás 43
 fonál kifeszítése 39
 gazdaságosság 36
 hatékonyság 35
 ideális feszültség 45
 küllőfonalak 40
 ragadóság 38
 számítógépes szimulációja
 47-56
 természetes szelekció
 szimulálása 35
- hímek: a párzás veszélyei 41-
 42
 a nőtény lekötözése 43
 párzófonál 42
- hímeknél nagyobb nőtények
 41
- lasszóspók 46-47
- párzás 41-42, 44-45, 53
- párzófonál 42
- ragadozók 41
- „saját verembe esés” elkerülése
 39
- ugrópókok 124-125
- vadászata 43
- zákmány megmérgezése 44
- pontozott egyensúly elmélete
 (nincs kapcsolatban a
 makromutációkkal) 80-81
- populációk exponenciális
 növekedése 205
- preadaptáció 72
- pupilla
 méretváltozása 120
 evolúciója 122-123
 változatos alakja 114, 115
- Quiring, Rebecca 137
- Radiolaria* *lásd* sugárállatkák
- rája és lepényhal 99
- Raup, David 142-143, 146, 153-
 154
- „reményteljes szörnnyek” elmélete
 75
- rendszerzés, fajoké 80-81
- repülés 82
 eredete madaraknál 96
 és fizika 82
 evolúciója 85-98
 kezdete a talajon 90-91

különböző típusai a madaraknál 92
méret problémája 85-86
szárnycsapkodó repülés 93
repülő erszényesek 88
repülőgép szárnyai 94
repülőmókus evolúciója 89
retina *lásd* ideghártya
Robinson, Michael 44
robotok
 meghatározása 198
 ló mint DNS-szállító jármű 204
 ipari 197-198
 mozgása 197-198
 önmásolása 198-199
 UTMP 198-199
robotteknős (*Machina speculatrix*) 198
rovarcsapdák 14
rovarok
 „edényei” 17-18
 elfogása: kancsóka 14-17
 hasznukra lezárt kerek 217
 összetett szem 107-108
 repülés 86
 szemlencsék különböző fejlődése 123
 zsákmányfogó módszerek hatékonysága 35
rugós csapda, pókok zsákmányoló módszere 45
Rushmore-hegy 9-34

Sasok, termikkhasználás 95
Scyllarus *lásd* medverák
sejtek
 alapelve 202, 203
 DNS-kódja 192
 eukarióta 202
 fényérzékeny, korai evolúciója 120
 nemzedékei 205
sejtnemzedékek 205
Sherrington, Sir Charles 228
siklás
 gerincsek 87-92, 88
 víz felszínén, 90
sikló erszényesek 87-88
sötétkamraszem 117-119
 a fényelhajlás problémája 112
 tökéletlenségének javításai 124-125
Spirula *lásd* csigáspolip
stabil egyensúly elmélete
 bizonyítéka 220
 kéttípusú hímek 220
stressz

a természetes szelekció bünteti a mutációkat 66
és mutáció 64-65
megnövekedett mutációs ráta 66
sugárállatkák 164
sün 21

Számítógépes szimuláció 54
 arthromorfok, szelvényezettség 172
 halak 55-57
 szemlencse 112
 természetes szelekció modellje 50-52
 nemesítés 30-31
 héjak: mesterséges szelekció 152
 hasonlóságuk a valódi héjakhoz 153
 csigák 152
 pókok 47-54
 pókhálók 52
 lásd még biomorfok
szaporodás
 ivaros: gének átrendezése 65
 különbözösége az öröklődéstől 68
 Müller fogaskereke 66
szárazföldi állatok visszatérése a vízbe 96-99
szárnyak 10
 aerodinamikai hatékonyság 85
 fügedarazsak 211
 genetikai információ terjesztése 193-194
 madarak és repülőgépek 94
 rovarok 171
 terméseken 193
szárnyas termések 193
szárlábú szelvényezettsége 169-170
szelekció, mesterséges *lásd*
 mesterséges szelekció
 helyettes szelekció 226
 természetes *lásd* természetes szelekció
 vikáriáns szelekció 205
szelekciós nyomás 140-141
szelvényezettség 169-180
szerencse „szétkenése” 69
szférikus aberráció 124-125
Színes Órásmester biomorfjai 32
szem, 102-139
 átmenet az összetett és lencseszem között 130
 csigák szeme 104, 104
 Darwin a szemről 102-103

evolucionisták gondoljai a szemmel 100-101
fényképezőgép és szem, 20 fókusz távolság, változtatása 120-121
gének mutációs károsodása 137
gerinctelenek szeme 111
halszem, evolúciós modell 118, 119
kehelyszem 108-110, 108
 fény iránya 108-109
 kifordított 128
 problémái 109-110
kettős szem 139
modell a hatékonyság felbecslésére 117
nem képalkotó szemek 105
összetett szem 108, 127
 alapelve 129
 appozíciós 128
 emberhez viszonyítva 130
 ősi 132
 részletek látása 129
 szuperpozíciós 134, 135
részeinek elrendeződése 61
sötétkamra *lásd*
 sötétkamraszem
 szükséges méret 104
 típusai 103
 tükrök 127-128
szem, lencseszem
 evolúciós ideje 135
 ugrópókoké 124-125
szimmetria 159-170
 forgásszimmetria 163
 hatsugaras 153, 152
 kétoldali 162
 négy sugaras 162
 ötsugaras 169
 sugaras 163
 számítógépes biomorfok 159-160, 160
 tüskésbőrűek 168
„szobrok”
 állati 11-12
 tervezettnek tűnő 12
szövőmadár fészke 16
szuperpozíció 134, 135
születési rendellenességek, genetikai 74

Tacsókó, mesterséges szelekciója 27
tanrek 19, 20
teleszkóp, kepleri 134
tengeri sárkány 13-14
tengeri tehenek 96, 97

- tengeri tehenek szárazföldi története 96
- termesz
 iránytűtermesz 12, 12-18
 mimikri 12-13, 13
- természetes szelekció
 álcázás állatokban 11-12
 és makromutációk 74, 178-179
 és mesterséges szelekció 31-33
 és mutáció 66, 74, 158
 és változatosság 119
 félreértelmezése 77
 hasonlósága a laputi könyvirással 60
 hím darazsak 212-213
 mutációt büntető 66-67
 nem véletlenszerű felhalmozó 59
 szimulációja 33, 51-52, 53-54
 tervezettnek tűnés 156-157
- Természettudományi Múzeum 10
- termik 95
- tervezettnek tűnés felismerése 20
- tervezettnek tűnő dolgok
 csapdák 16
 „másodrendű” 20
 meghatározása 11
- tervezettség
 érzete 157
 szembe a véletlenszerűséggel 9
- Terzopoulos, Demetri 55-57
- Thomas, Keith 181
- Thompson, D'Arcy Wentworth 142
- Thomson, William 60
- tintahal
 függetlenül kialakult szemek 107
 repülő 91
 tollak
- hőszigetelés 93
 módosult pikkelyek 93
- tornyosság (héjak) 142-146, 144, 145, 146
- törésmutató 113
- Trivers, Robert 25
- Tu, Xiaoyuan 55-57
- túlélés
 hozzájárulás az állat túléléséhez 35
 tudó evolúciós eredete 73
- tükrös szemek 126
- tüskésbőrűek
 és biomorfok 168, 169
 ötsugaras szimmetria 167
 „szimmetriatükrei” 165
- tűzek szaporodása 68-69
- Ugrásszerű mutáció, genetikai rendellenességek 74
- ugrónyúl 92
- ultraibolya fény és a méhek látása 183
- „Utasítások Teljes Másolása Programja” (UTMP) 195, 202
- Üveg, a fénytörés alapelve 113
 üvegtest 116-118
- Vak Órásmester számítógépes program
 nem ötsugaras szimmetria 169-170
 számítógépes biomorfok 28-30
- Valószínűtlenség Hegye
 Hasonlata 58
 Szem-Vidék 138
- változékonyság és természetes szelekció 118-119
- varrómadar fészke 19
- véletlen 62, 76
- véletlen és tervezettség 11
- Vénusz légycsapója csapdája 16
- Vermeij, Geerat 153
- virágok
 DNS átadása 193-194
 előnyben részesített megporzás stratégia 185-186
 értelme 181-189
 füge 211
- virágpor
 átvitele 183-184
 és fügedarazsak 211
- vírusok
 biológiai „értelme” 189-192
 DNS, gazdaszervezet 194
 számítógépes vírusok 190
- víz
 élet a vízben 96-97
 nagytestű emlősök visszatérése a vízbe 96-97
- Vollrath, Fritz 36, 48
- Volvox, a korai élet képviselője 202, 203
- von Frisch, Karl 18
- Waldorf, Uwe 137
- Walter, W. Grey 198
- Watson, J. D. 192
- Wickramasinghe, George 59
- Wright, Sewall 100
- Zschokke, Sam 51
- ZSíráf
 és okapi 77
 hosszú nyak evolúciója 78

TARTALOM

Köszönetnyilvánítás.....	4
<i>1. fejezet</i>	
Szemben a Rushmore-heggyel.....	5
<i>2. fejezet</i>	
Ezüstsálak hálója.....	31
<i>3. fejezet</i>	
A Hegy üzenete.....	54
<i>4. fejezet</i>	
Szakadjunk el a földtől!.....	79
<i>5. fejezet</i>	
A megvilágosodás negyven útja.....	100
<i>6. fejezet</i>	
Minden Héjak Múzeuma.....	138
<i>7. fejezet</i>	
Kaleidoszkópembriológia.....	157
<i>8. fejezet</i>	
Virágporszemek és varázsgolyók.....	181
<i>9. fejezet</i>	
Önmásoló robotok.....	196
<i>10. fejezet</i>	
Titkos kert.....	212
Képjegyzék.....	232
Idézett és ajánlott irodalom.....	233
Név- és tárgymutató.....	236