

Bevezetés a biológiába

1. előadás: Mi az élet?

Jegyzetkezdemény (Müller Viktor)

0. Mi ez a jegyzet?

Ez a jegyzetkezdemény gyors hiánypótlás, kidolgozottabb jegyzetre sajnos idén sem jutott időm. Az előadás ppt fájljával együtt használandó, egyelőre még az ábrákat sem emeltem át. Arra viszont odafigyeltem, hogy az ehhez az előadáshoz kapcsolódó valamennyi lehetséges vizsgakérdés válasza benne legyen. Remélem, már ez is használ valamit.

1. Bevezetés

A biológia az élet tudománya, pontosabban az élőlényeket, azok részeit és közösségeit vizsgáló tudomány. A biológus mindennapi munkája során az élet egy-egy szűkebb szeletével, az élővilág egy-egy szerveződési szintjével (molekula, sejt, egyed, közösség stb.) foglalkozik, de sajátos módon egyáltalán nem szembesül azzal a kérdéssel, hogy mi is valójában az élet. Ugyanakkor az „átlagembernek” sem okoz gondot, hogy a környezetében található dolgokról eldöntse, élnek-e vagy sem. Az élet meghatározásának nehézségét csak akkor ismerjük fel, ha megpróbálkozunk vele – erről szól ez az előadás. A nyilvánvalóan élőből kiindulva több irányban keressük a határt, hogy egyértelmű definícióval meghúzhassuk – de nem ígérem, hogy sikerrel járunk majd...

2. Szerveződési szintek, szerveződés

Szent-Györgyi Albert nyomán¹ kezdjük egy gondolat kísérlettel. Egy vidáman ugráló békáról meglehetősen bizonyossággal állíthatjuk, hogy él. De mi történik, ha elaltatjuk a békát, és óvatosan kivágjuk a szívét? Ha megfelelő sókat tartalmazó oldatba helyezzük, a szív vígan ver tovább. Sőt, a béka is felébred, és (nyilván kevésbé vígan) ugrál még egy darabig. Úgy tűnik, él a szív, és él a szívtelen béka. Miért gondoljuk, hogy él a szív? Azért, mert ütemesen összehúzódik, és ha alaposabban megvizsgáljuk, kiderül, hogy oxigént fogyaszt és szénsavat termel, a cukrokat pedig tejsavvá erjeszti. De menjünk tovább: daráljuk le a szívet, és készítsünk belőle kivonatot. A kivonatot vízbe fecskendezve vékony fonalak alakulnak ki, amelyek másféle kivonat hozzáadására maguk is összehúzódnak, oxigént és cukrot fogyasztanak, „lélegeznek”. Élnek-e ezek a szálacskák? De még tovább is mehetünk: a kivonatokat összetevőikre bonthatjuk, ezek némelyikét por alakban megszárázhatjuk. Élnek-e a porok? Ha azután a porokat ismét feloldjuk, és megfelelő módon összekeverjük, ismét megindul az összehúzódás, erjesztés és légzés.

A béka nyilvánvalóan élt, a porok nyilvánvalóan nem élnek – de hol a határ a kettő között? Hol és miért veszett el útközben az élet? Mi különbözteti meg az élő békát a ledarált békától, miközben ugyanazok a molekulák építik fel őket?

¹ Szent-Györgyi Albert (1973). Az élő állapot. Kriterion, Bukarest

A kulcsszó: a rendezettség. Külön-külön a béka összes molekuláját képesek lennénk szintetizálni², de attól még nem lenne béka belőlük, mint ahogy a ledarált békából sem lesz már³. Az élet tehát nem a molekulák szintjén dől el, az élőlényekben nincs olyan különleges molekula, ami ne létezhetne nem élő formában is⁴. A kulcs az, ahogyan a molekulák el vannak rendezve. Az élő szervezetekre magas fokú, jól meghatározott rendezettség jellemző – ennek hiányában ugyanazok az összetevők nem alkotnak élőlényt. A béka porai (béke poraira...) nem élnek, viszont ugyanaz az anyag a békára jellemző módon összerakva élő békát alkot. Nem elvi, hanem az élőlények iradatlanul komplex rendezettségéből fakadó technikai nehézség, hogy még egy „egyszerű” baktériumot sem sikerült összeraknunk, nemhogy egy békát – de már nagy erővel dolgoznak az ügyön.

Első körben tehát elmondhatjuk, hogy **az élet az anyag rendezettségéhez köthető**. A rendezettség (molekuláris komplexitás) mértéke önmagában is kiemeli az élőlényeket az élettelen világban tapasztaltaktól, a mértéken túl azonban további, speciális sajátságok köthetők hozzá. Ennek megértéséhez induljunk el az élőtől egy újabb irányba, a halál felé.

3. Élet és halál mezsgyéjén

Szent-Györgyi egy másik gondolat kísérletében béka helyett macskát egzécíroztat. Képzeli el, hogy elszorítja a macska mindkét nyaki ütőerét. A macska rövidesen elájul, pár perccel később pedig már hiába engedjük el az ütőeret, soha nem tér magához, meghalt. Ha ellenben jól időzítve, egy-két perc után engedjük el, a macska még magához tér, életben marad. A határ úgyszólván észrevehetetlen. A gyakorlati biológus, ha lelkiismeretesen (de lelkiismeretétől nem háborgatva) meg akarja vizsgálni a kérdést, akkor fog egy rakás macskát, csoportokra osztja őket, és az egyes csoportok macskáinál pontosan mért, különböző hosszúságú ütőér-szorogatást alkalmaz, majd gondosan feljegyzi a csoportok túlélési arányait. Mi maradunk a gondolat kísérletnél, és képzeletben vizsgálunk meg két macskát: egyet, ami már nem tér magához, és egy másikat, aminek egy pillanattal hamarabb engedjük el az ütőerét, és már kezd magához térni. A frissen megölt és a még eszméletlen, de hamarosan felébredő macska között nemigen találunk különbséget, még ha mikroszkóppal vizsgáljuk is a legtöbb szövetüket⁵. Az elpusztult macska rendezettsége gyakorlatilag megegyezik az élő macskáéval. Mi a különbség közöttük? Ha egy picit várunk, kiderül. Az élő macska felkel, szaladgál, megéhezik, eszik és – ha a kísérletező is úgy akarja – még jó darabig macska marad. Az elpusztult állat viszont hamarosan bomlani kezd, és egyre kevésbé emlékeztet macskára – elveszíti azt a rendezettséget, ami élővé és macskává tette. Az élő és az éppen elpusztult macska közötti különbség tehát abban rejlik, hogy képesek-e fenntartani a testük rendezettségét. **Az élet önfenntartó rendezettség.**

A bomló macska esete jól példázza, hogy a rendezettség aktív karbantartás nélkül nem lehet stabil – a spontán folyamatok az entrópia (rendezetlenség) növekedése felé mutatnak (persze a macska bomlásába jócskán besegítenek a biológiai folyamatok, de ezek csak katalizátorként gyorsítják az elkerülhetetlen bomlást).

² Pontosabban egy komplett békakromoszóma szintézisével még meggyűlne a bajunk, de ez csupán technikai jellegű probléma, amit a nem túl távoli jövőben leküzdhetünk. Bakteriális genomot már sikerült szintetizálni.

³ Csak lábjegyzetben teszem hozzá, hogy egy ledarált szivacs viszont képes újra összeállni...

⁴ A XIX. századig a szerves anyag különleges természetében („életerő”) gyanították a titkot, úgy gondolták, hogy szerves anyag csak élő szervezetben jöhet létre. Lélektani áttörésnek számított, amikor Wöhler 1828-ban elsőként szintetizált szerves anyagot (karbamidot) szervetlenből.

⁵ Alaposabb vizsgálattal megtalálhatjuk, hogy a visszafordíthatatlan károsodás a legérzékenyebb agysejtekben keletkezett.

Bizonyos körülmények között, illetve speciális alkalmazkodás révén a szervezettség passzívan, nyugvó vagy tetszhalott állapotban is hosszabb ideig fennmaradhat. Számos baktérium képes kedvezőtlen körülmények között spórát képezni, amely hosszú ideig életképes maradhat víz és táplálék nélkül (vagy akár extrém körülmények között, például vákuumban). Az állatvilág túlélőbajnokai a medveállatkák, amik kiszáradt nyugalmi állapotukban („bödönalak”) akár egy évtizedet is átvészselhetnek, és őket sem hatná meg, ha közben egy úrhajó külső burkolatán kellene megtenniük oda-vissza egy Föld-Mars utazást. A növények pedig mag formájában képesek hosszú, nyugvó túlélésre. 2005-ben sikerült csírázatni egy datolyamagot, amit az izraeli Maszada erődjében ástak ki, és a becslések szerint kétezer éves volt...

Vegyük észre persze, hogy a tetszhalott passzív állandóság nem más, mint az aktív állandóság képességének megőrzése. Megfelelő körülmények közé kerülve a baktériumspóra és a medveállatka feléled, a nyugvó mag kicsírázik, és aktívan, energiát felhasználva tartja fenn a szervezete rendezettségét. Definíció kérdése, hogy a nyugvó vagy tetszhalott szervezeteket élőnek vagy csupán „életképesnek” nevezzük-e. Gánti Tibor definíciója szerint a halál az életképesség megszűnése – eszerint a nyugvó magok is élnek --, a klasszikus életjelenségek (lásd lentebb) alapján viszont nem. Az élet mindenképp az aktív állandóság képességéhez köthető⁶, és a tetszhalál is azért érdekes, mert megőrzi ezt a képességet, ami bármikor újraéleszthető.

4. Aktív állandóság

Az élő szervezeteket vizsgálva azt találjuk, hogy bár az alakjuk állandó, az anyaguk korántsem az. A molekulák folyamatosan bomlanak, a helyüket újonnan szintetizáltak foglalják el. Bennünk, lévén komplex többsejtű lények, a legtöbb sejt is folyamatosan cserélődik – anyagunkat tekintve csak nagyon kis részben vagyunk azonosak tíz évvel ezelőtti önmagunkkal. Ez az „anyagcsere” minden élőlény (és majdnem minden szerveződési szint) sajátja. Mondhatjuk tehát, hogy az élő szervezetek állandósága nem a szobor, hanem a folyó állandósága, vagy éppen a gázégő lángjáé, ami megőrzi alakját, de közben folyamatosan újabb anyag áramlik át rajta. Az alak fenntartásához energia is kell: az élőlények folyamatosan anyagot és energiát vesznek föl a környezetükből, ami átáramlik rajtuk, majd szétszóródik (disszipálódik).

Az alak állandósága mellett az állapot állandóságáról is gondoskodni kell. Az élő szervezetek működése a környezeti változók (hőmérséklet, pH stb.) meghatározott tartományán belül lehetséges, és aktív szabályozó folyamatok gondoskodnak arról, hogy a belső környezet a kívánatos tartományban maradjon. E folyamatok összességét nevezzük homeosztázisnak.

Ludwig von Bertalanffynak nagy érdemei vannak abban, hogy a biológiai rendszerek aktív állandóságát általános fizikai elvekhez tudta párosítani. Felismerte, hogy az élő szervezetek *nyílt rendszerek*, vagyis folyamatos anyag- és energiacserét folytatnak a környezetükkel, az utóbbiban pedig nettó fogyasztók. Az aktív állandóság *stacionárius állapot*, vagyis olyan dinamikus egyensúly, amit egymást kiegyenlítő ellentétes folyamatok tartanak fent. Az alak állandósága az építő és bomlási/lebontó folyamatok egyensúlyát tükrözi, a belső környezeti változók állandósága pedig a külső hatások és az azokkal ellentétes belső szabályozó folyamatok egyensúlyát (például éppen annyi hőt termelünk, mint amennyit kisugárzunk a környezetbe). A nyílt rendszerek sajátja, hogy az entrópiájuk csökkenhet is, méghozzá a környezet entrópiájának rovására. Az élő szervezetek saját

⁶ A továbbiakban pedig az élet tárgyalásából többnyire kizárom a tetszhalált.

rendezettségüket a környezetből felvett energia segítségével építik fel, ez azonban a környezet entrópiáját növeli, például azért, hogy a magas energiatartalmú és rendezettségű táplálék felhasználása után kisebb energiatartalmú és rendezettségű végterméket bocsátunk vissza a környezetbe. Mivel semmilyen folyamatunk hatékonysága nem 100%-os, az összentrópia (a szervezeté és a környezeté együttesen) növekszik, az univerzális elv nem sérül.

Végül a nyílt rendszerek további sajátja a szabályozás lehetősége, aminek egyik lehetséges következménye az *ekvifinalitás* („azonos végűség”). Az ekvifinalitás azt jelenti, hogy a rendszer különböző kezdőállapotokból képes ugyanabba a végállapotba eljutni. Ez lényegében vezérlést jelent, nem egyszerűen egy adott állapot fenntartását, hanem egy folyamat végig vitelét, a külső-belső környezet változékonysága ellenére. Az élővilágban ennek legmarkánsabb példája az egyedfejlődés: a külső környezet változékonysága ellenére képes a meghatározott „terv” szerinti szervezetet felépíteni, a fenotípus variabilitásában csak tompítva jelenik meg a környezeté (ezt nevezzük a genetikában kanalizációnak).

Az absztrakció után pedig összegezzük újra, amire idáig jutottunk: **Az élő állapot olyan komplex rendezettség, amely megfelelő körülmények között, átáramló energiát felhasználva, szabályozó folyamatok révén fenntartja önmagát.** Az alábbi szakaszban azt a kérdést feszegetem, hogy lehet-e tökéletes az önfenntartás, azután áttérünk egy további sajátjára, ami az élő szervezetek általános meghatározó jegye.

5. Szükségszerű-e az öregedés?

Az élő szervezetek önfenntartása nem tökéletes: idővel romlanak a funkciók, az élőlények megöregednek, végül elpusztulnak. Nem ismerünk kivételt ez alól, az újabb kutatások tükrében még a baktériumok is mutatnak öregedési jelenségeket. Miért van ez így, és vajon szükségszerű-e? Elképzelhető-e „halhatatlan” élőlény, vagy ez elvileg is lehetetlen?

A *miért* típusú kérdésekre a biológiában mindig kétféle válasz adható. Egy közvetlen, „technikai jellegű” válasz, ami a mechanizmusra vonatkozik, és egy „végső válasz”, ami a jelenség evolúciós hátterét firtatja („miért alakult így?”). Az öregedés mechanizmusával óriási irodalom, rengeteg kutatás foglalkozik, de itt most erre nem térek ki részletesen, csak egy motívumot ragadok ki: a csírvonal halhatatlan. A csírvonal az ivarsejtek és az azokat képző sejtek leszármazási vonala, amely sejtosztódások megszakítatlan során át visszavezethető a legelső élő sejtig. Ivarszerveink sejtjei a zigóta leszármazottai (számos sejtosztódás által), amelyből a testünk kialakult. A zigótává összeolvadó ivarsejtek szüleink ivarszerveiben keletkeztek, akik valaha maguk is megtermékenyített petesejtként kezdték életüket – és így tovább, vissza a régmúlt idők homályába, vissza egészen az ivarosság és a többsejtűség előtti időkbe, amikor az egyedek leszármazási vonala megegyezett a sejtekével, és vissza egészen a legelső élőlényig. A csírvonalak is változnak persze, az evolúció időskáláján, de nem öregednek. Fiala egyedről fiatal egyedre ugorva utaznak örök ifjan az időben – úgy tűnik, nem szükségszerű az öregedés.

Egy másik érvet az ember alkotta szerkezetek analógiája adhat a kezünkbe. Bármilyen alkatrészt képesek lennénk újragyártani, így bármely gépet tetszőleges ideig tudnánk javítani és működtetni,

amíg a rendelkezésünkre állnak az alkatrészyártáshoz szükséges erőforrások⁷. Nem azért nem tesszük ezt, mert lehetetlen, hanem mert rendszerint nem kifizetődő. És itt van a kutya elásva, ha az öregedés evolúciós magyarázatát keressük. Ha elvileg lehetséges volna a halhatatlanság, akkor vagy nem volt felé járható evolúciós út (nem lehetségesek olyan mutációk, amelyek sorával „versenyképes” közbülső állomásokon keresztül elérhető), vagy a halandóság evolúciós előny. Alább az utóbbi mellett érvelek.

Vizsgáljuk meg a halhatatlanság evolúciós egyenlegét!⁸ A tökéletes önfenntartás megőrizné az egyedben működő génekópiákat (ahogy Woody Allen mondta: „Én nem a műveim által akarok halhatatlan lenni, hanem úgy, hogy nem halok meg”), de önmagában nem járulna hozzá az adott géneket hordozó egyedek terjedéséhez – ehhez szaporodás szükséges. Persze miért ne szaporodhatna a „halhatatlanság génjét” hordozó egyed is? Szaporodhat, de ebben az esetben nem biztos, hogy sokat ér a halhatatlanság (ami, ne feledjük, valójában csak örök ifjúság lehet: a sérülések, betegségek előbb-utóbb öregedés nélkül is elhoznák a halált). A halhatatlanság a gének egyetlen (homozigóta diploid egyed esetén kettő) másolatát őrzi meg: a halandó versenytársaknak mindössze egyvel (ivaros szaporodás és diploidia esetén kettővel) több utódot kellene létrehozniuk generációnként, hogy ledolgozzák ezt a hátrányt. Ennyi a halhatatlanság értéke: egy-két (tegyük hozzá: az ivarérett kort elérő) utód – ugyanakkor ára is van, és ezen bukik meg a dolog. Ha húsz évig akarjuk használni a kocinkat, többet kell javításra költenünk, mint ha öt év után túladunk rajta. Nincs ez másképp az élő szervezetekkel sem: a hosszabb élettartam, a lassabb öregedés nagyobb „befektetést”, több erőforrást igényel, márpedig ez a szaporodásra fordítható erőforrásokat csökkenti. A „cserearány” általános elvébe ütköztünk bele, ami az evolúciót minden szinten áthatja. Akár az államkassza, az élőlények is véges erőforrásból gazdálkodnak: ha többet fordítanak az egyik funkcióra, kevesebb jut a másikra. Így általános helyzet, hogy bármely funkció csak mások rovására javítható, és az evolúció nem a tökéletes, hanem az elégséges megoldások, illetve a legjobb kompromisszum felé halad. Esetünkben az élettartam növelése és a szaporodás sebessége (utódok száma időegység alatt) között áll fenn cserearány, mivel az önfenntartásba, illetve szaporodásba fektetett energia csak egymás rovására növelhető. A legjobb kompromisszum (az „evolúciós optimum”) pedig ebben az esetben az az arány (és a hozzá tartozó élettartam és szaporodási ütem), amely mellett az élőlény egész élete során a leszármazottak (génmásolatok) száma a legmagasabb. Úgy tűnik, ez az evolúciós egyenlet nem kedvez a halhatatlanságnak. Úgy tűnik, hogy a tökéletes önfenntartás költsége nagyobb lenne, mint az „eggyel több” utódé nemzedékenként. Sajnos, a génjeinknek megéri, hogy halandók vagyunk...

6. Célszerűség

Az öregedés kitérője után térjünk vissza az élet jellemzéséhez, definíciójához! Az élő szervezeteknek még egy különleges jellemzője van, ami megkülönbözteti őket a természet élettelen objektumaitól: a részeik funkcióval bírnak, még hozzá olyan funkciókkal, amelyek a szervezet túlélését és reprodukcióját segítik. Jól meghatározott funkciója van a szerveinknek, a sejtjeinknek, de még az egyes molekuláknak is, amiket a sejtjeinkben előállítunk. Ez gyökeresen különbözik az élettelen világban tapasztaltaktól. Nincs értelme (a természettudomány határain belül) feltenni a kérdést, mire

⁷ Az élő szervezeteknek persze megvan az a speciális nehézsége, hogy a „javítás” közben is folyamatosan működniük kell – a legprofibb autószerelő sem vállalná, hogy menet közben kicseréli a motort. De ez is csak gyakorlati, nem pedig elvi nehézség. Az élőlények önjavítása már most is elég jól működik „menet közben”.

⁸ Ez a bekezdés részlet a *Természet Világa* előkészületben lévő evolúciós különszámában megjelenő cikkemből.

jó egy hegy, vagy milyen szerepet tölt be a nitrogénatomban egy elektron. Ellenben tökéletesen értelmes, a vizsgálódást elősegítő kérdés eltűnődni azon, mire jó a szív, a zsírsejt vagy az alkohol-dehidrogenáz enzim⁹. Ennek a funkcionalitásnak egyetlen párhuzama van az élettelen világban: az ember által tervezett szerkezeteké. Az óra részei is funkcióval bírnak, még hozzá olyan funkciókkal, amik lehetővé teszik, hogy az óra az idő múlását mérje és mutassa. Az órát látva (és a működését értve) nem kételkedünk benne, hogy a funkció nem a „véletlen”, hanem gondos tervezés műve. Az analógia elvén logikus következtetés, hogy az élő szervezetekre jellemző célszerűség ugyancsak tervezés eredménye kell, hogy legyen, vagyis ilyenformán egy tervező, vagyis *Teremtő* munkáját tükrözi. Ez az érvelés voltaképpen természettudományos logikán alapszik¹⁰, és komolyabb természettudományos ismereteket és szemléletet feltételez. A XVIII. századi *természetleológia* rendszerében bukkant fel, maga a híres óras hasonlat pedig az irányzat egyik legismertebb alakjától, William Paley-től származik. Mikor Paley 1805-ben meghalt, még négy évet kellett várni Darwin megszületésére, aki felismerte azt a természetes folyamatot, ami az élő szervezetekben szükségszerűen, tervezés és beavatkozás nélkül funkciót, célszerűséget hoz létre. A természetes szelekció révén zajló evolúcióról van szó, amire később részletesebben visszatérek.

Az eddigiek alapján foglaljuk össze ismét az élő állapot sajátosságait: ***funkcióval bíró részek és szabályozó folyamatok révén önfenntartó komplex rendezettség***. Ez már épp eléggé kacifántos, de vajon elég-e ahhoz, hogy egyértelműen eldöntsük, él-e valami, avagy sem?

7. A definíció határai

Az eddig megalkotott definíció az összes nyilvánvalóan élő szervezetre igaz. A kérdés az, hogy vajon csak ezekre igaz-e? Vegyünk néhány mesterséges (ellen)példát. Az olyan egyszerű szerkezetek, mint a termosztát vagy a centrifugális nyomásszabályzó, funkcióval bíró részekből épülnek fel, és ezek révén szabályozó folyamatokra képesek. Világos, hogy mégsem nevezhetjük élőnek őket. A definíció első felét teljesítik, a második felét (komplex önfenntartó rendezettség) viszont már kevésbé: mondhatjuk, hogy egy termosztát nem eléggé komplex ahhoz, hogy élőnek tekintsük, és a szabályozó képessége nem elegendő a rendezettségének fenntartásához. Igen ám, de hogyan határozzuk meg, hogy mi „elég komplex”? A komplexitás folytonos skálán változhat, és meglehetősen nehezen definiálható, az ember alkotta szerkezetek komplexitása pedig a technika fejlődésével egyre nő. Vajon komplexebb-e egy egyszerű baktérium, mint egy szuperszámítógép? Az önfenntartás képessége is elképzelhető gépekben, ez sem elvi, csupán mérnöki nehézség. Ha (illetve amikor) megalkotjuk az első önjavító gépet (ami szükségképpen komplex is lesz), élőnek kell-e majd tekintenünk? Nemigen tudunk olyan elvi definíciót adni, amit az összes földi élőlény kielégít, de egy önjavító gép nem.

Szokás még a reprodukciót is az élőlények meghatározó sajátosságai közé sorolni (bár ez nem tekinthető szigorú kritériumnak, hiszen nyilvánvalóan él egy öszvér vagy egy ökör is), de ez sem kizárható gépekben. Neumann János (John von Neumann) elvi bizonyítás adott arra, hogy önreprodukáló gép létezhet, vagyis elképzelhető olyan szerkezet, ami magában hordozza az

⁹ Az élővilág határain belül a funkcionalitás az egyed szintjén ér véget: nincs értelme feltenni a kérdést, „mire jó egy jegesmedve”. Ez alól csak az államalkotó vagy koloniális szervezetek kivételek, ahol az egyed fölötti szerveződési szint is szelekció alatt áll, így az egyedek (például a társas rovarok kasztjai) a magasabb egység számára hasznos funkciót szereztek az evolúció során.

¹⁰ A kreacionisták boldogan fogják idézni eddig a pontig az „evolúcióbiológus szavait”...

előállításához szükséges információt. Ez a fontos elvi jelentőségű tétel éppen a biológusokat lepheti meg a legkevésbé: mi tudjuk, hogy minden élő szervezet önreprodukáló gép...

A definíció – tágan értelmezve – pedig akár olyan „szervezetekre” is ráhúzható, mint egy cég, egy államapparátus vagy éppen egy egyetem. Komplexek, a részeik meghatározott funkciókat töltenek be, amik az egész működését (és túlélését, növekedését) segítik, szabályozó folyamatokat, sőt „anyagcserét” is folytatnak, hiszen a részfeladatokat betöltő egységek és emberek cserélődnek. Még szelektációs folyamatokról is beszélhetünk, ami – akár az élővilágban – a funkciók javulásához, „evolúciójához” vezethet.

Ezek a nehézségek Szent-Györgyit a következő pesszimista megállapításra ragadtatták: „Hogy valami élő vagy sem, az a mi felfogásunkon múlik, azon, hogy mit nevezünk élőnek, milyen kritériumokat választunk. Az „élet”-nek mint főnévnek nincs értelme, ilyen dolog nem létezik.”. Ha azonban nem is adható egyetlen kielégítő definíció, a különféle lehetőségek körbejárása sokat elmond az élet nehezen megragadható természetéről. Nézzünk meg példaként egy régi és egy újabb kritériumrendszert, amik részben átfednek az eddigi eszmefuttatásainkkal.

8. Az élet kritériumai

A klasszikus életjelenségek a mozgás, a táplálkozás, a növekedés, a szaporodás és az ingerlékenység. Ez a rendszer az eddigi definíciónknál kevésbé absztrakt, magasabb szinten vizsgálja azt, hogy milyen viselkedést várunk el egy élő rendszertől. A kapcsolódási pontok mindazonáltal felismerhetők. Az anyagcseréhez nélkülözhetetlen a táplálkozás, a szabályozáshoz pedig a környezet észlelése és az ingerekre adott megfelelő válasz, vagyis az ingerlékenység. A szervezetség fenntartásához mindenképp szükséges a regeneráció, ami egyúttal a növekedés alapját is megteremti. A mozgás molekuláris szinten – az anyag és a kémiai jelek továbbításához – elengedhetetlen. A szaporodás pedig a legkevésbé bebetonozott kritérium, láttuk, hogy egyetlen szervezet élőnek tartásához nem is várjuk el, inkább az „élővilág” fenntartásához, no meg az evolúcióhoz van rá szükség. (Szent-Györgyi arra is felhívja a figyelmet, hogy „egyetlen nyúl” nem is tud szaporodni, így csak egy párt tekinthetnénk élőnek bármilyen ivaros úton szaporodó fajból...).

Formálisabb definíciót ad Gánti Tibor, aki a kritériumokat két osztályba sorolja. **Reális (abszolút) kritérium**, ami minden élőlényben, élete minden pillanatában megvan. Ezek sorban a következők:

1. **Inherens módon egység.** Gánti ezen azt érti, hogy az élő rendszer új szerveződési szint, azaz olyan tulajdonságokkal rendelkezik, amelyek minőségileg mások, mint a részeinek tulajdonságai és egyszerű összegzéssel nem vezethetők le azokból. Ehhez még hozzátehetünk praktikus vonatkozásokat is: az élő rendszer egyértelműen különüljön el a környezetétől, hogy a környezettel folytatott anyagcsere szabályozható, a szervezet információtartalma megőrizhető legyen.
2. **Anyagcserét folytat.** Ez megegyezik a korábbi tárgyalással.
3. **Inherensen stabil,** vagyis rendelkezik a belső állapot szabályozásának (homeosztázis) és a rendezettség fenntartásának képességével. Vegyük észre, hogy abszolút kritériumként a homeosztázis képessége (nem maga a homeosztázis) szerepel, amivel a nyugvó mag és a baktériumspóra is rendelkezik, így kielégíti azt a feltételt, hogy az élőlények életének minden pillanatában érvényes. Az aktív élő állapot jellemzőjeként Gánti is a működő homeosztázist jelöli meg.

4. **Információs alrendszerrel rendelkezik**, amely a szervezet számára hasznos, kódolt információt tartalmaz. Kódolt az információ, ha a hordozó alapvető szerkezetén túlmutat: egy szobor (vagy bármilyen objektum) is tartalmazza saját szerkezetének információját, de egy nyomtatott könyv, egy zenei CD vagy egy kromoszóma az alakján túl is hordoz információt. Ez szintén abszolút kritérium, alighanem elengedhetetlenül szükséges a komplex szerveződés létrehozásához és javításához. Az információs alrendszernek természetesen nemcsak az információ tárolására, hanem az értelmezésére, dekódolására is képesnek kell lennie.
5. **Rendelkezik a szabályozás és a vezérlés képességével.** Ebből a szabályozás lényegében benne foglaltatik a korábbiakban. A vezérlés annyiban jelent újat, hogy nemcsak egy adott állapot fenntartását, hanem a rendszer meghatározott állapotokon való átvezetését jelenti. Az élővilágban ennek legalapvetőbb példája az egyedfejlődés, illetve egysejtűek esetében a sejtciklus végrehajtása. Ez a kritérium talán egy fokkal vitathatóbb a többinél, hiszen ha egyszer sikerül mesterséges életformát létrehozunk, akkor elvileg „kihagyhatnánk” belőle az egyedfejlődés képességét, de minden egyéb szempontból élő lehetne.

Ez a kritériumrendszer viszonylag absztrakt, de mégis fogódzót kínál sok nehéz esetben. Az inherens egység kritériuma például a legelső gondolat kísérletünkben azt a választ adná, hogy a béka boncolgatásakor a legkisebb még élő egység a sejt volt. A második gondolat kísérletünkben pedig eleve Gánti kritériumainak megfelelő választ adtunk: addig él a macska, amíg „inherensen stabil”.

Gánti ezen túl felsorol még **potenciális (potenciáló) kritériumokat** is, amelyek az élővilág túléléséhez, illetve fejlődéséhez szükségesek. Ezek a következők:

1. **Növekedés és szaporodás.**
2. **Öröklődő változások.**
3. **Halandóság.**

Látni fogjuk, hogy az első két kritérium megegyezik az evolúció kritériumaival, aminek a jelentőségét a következő szakaszban részletesebben tárgyalom. A halandóságot pedig azért sorolja ide Gánti, mert az élővilág fejlődéséhez, evolúciójához szükséges az egyedek cserélődése is.

9. Az evolúció kritériumai

Idáig jobbra azzal foglalkoztunk, hogy az élő szervezetektől milyen szerveződést és működést várunk el. Az egyik kulcsmotívum a részek célszerűsége, funkcionalitása volt – most vegyük alaposabban szemügyre a természetes szelekcióval zajló evolúció folyamatát, ami ezt a jellegzetességet az élővilágban létrehozza. **Olyan egységek populációi képesek evolúcióra, amelyek rendelkeznek a szaporodás, öröklődés és változékonyság képességével.** A szaporodás során egy egyedből több lesz. Az öröklődés azt jelenti, hogy az utódok szüleikre hasonlítanak, azaz a hasonló hasonlót hoz létre. A változékonyság pedig az új változatok létrehozásának képessége. Az evolúció feltétele szorosabban véve a variáció, azaz a változatosság, hiszen ebből válogathat a szelekció. A tartós evolúciónak azonban az is feltétele, hogy folyamatosan újabb változatok jöjjenek létre, különben a változatosság egyre szűkülne, és előbb-utóbb megrekedne a folyamat. Kiegészítő feltétel, hogy a változékonyság érintse az egyedek túlélését és/vagy termékenységét meghatározó tulajdonságokat – ez azonban gyakorlatilag magától értetődő, ha a változékonyságot létrehozó mechanizmus eléggé általános érvényű. A természetes szelekció folyamata a következő. Ha megjelenik egy öröklődő tulajdonság,

amely a túlélést és/vagy a termékenységet javítja, a hordozó egyednek az átlagnál több utóda lesz a következő nemzedékben. Ezek az utódok az öröklődésnek köszönhetően maguk is hordozzák az új tulajdonságot, így annak a gyakorisága generációról generációra nő, végül az egész populációban elterjedhet. Röviden: természetes szelekció akkor zajlik, ha vannak olyan bélyegek, amelyek öröklődő változásokat okoznak a túlélésben és/vagy a termékenységben. Vegyük észre, hogy ez a folyamat szükségszerűen magában hordozza a funkció, a célszerűség létrehozását és javítását. Az a tulajdonság, ami a túlélést és/vagy a termékenységet javítja, definíció szerint e két képesség valamelyikét segítő funkciót jelent. Ha az evolúció három kritériuma adott, akkor az élő szerveződésre jellemző célszerűség kialakulása lényegében elkerülhetetlen.

Mivel a természetes szelekció révén zajló evolúción kívül nem ismerünk olyan spontán folyamatot, ami a célszerűséget létrehozhatja, az utóbbi pedig az élő szerveződés nélkülözhetetlen velejárója, H. J. Muller¹¹ javaslata nyomán az evolúció kritériumait tekinthetjük egyúttal az élet kritériumainak is. Ez a javaslat alighanem érvényes valamennyi spontán keletkezett életformára, viszont mesterséges ellenpéldákkal megint csak zavarba hozható: ha sikerül mesterséges úton létrehoznunk „szintetikus sejtet”, akkor megtehetjük, hogy kihagyjuk belőle az evolúció képességét, miközben például Gánti abszolút kritériumait teljesíti.

10. Az élet kettős természete

Ezen a ponton újból összefoglalhatjuk, amit tudunk. Az életet kétféle szemszögből jellemeztük (és ennek megfelelően az életdefiníciók két fő osztályba sorolhatók): egyrészt hogyan működnek az élő szervezetek – ezek a **fenotípusos definíciók**, amik az aktív állandóság, önfenntartó rendezettség, anyagcsere, homeosztázis képességére koncentrálnak. Másrészt hogyan alakulhattak ki spontán folyamatok révén az előbbi képességekkel rendelkező szervezetek – ezek a **genetikai-evolúciós definíciók**, amik az evolúció képességére koncentrálnak, mivel spontán folyamatként csakis az evolúció hozhatta létre a fenotípusos kritériumokat kielégítő funkciókat. A két aspektus között van némi átfedés: a növekedés képessége mind az önjavításhoz (aktív állandóság), mind a szaporodáshoz (evolúció) szükséges. A természetes élő szervezetek az élet mindkét aspektusával rendelkeznek.

11. A chemoton modell

A chemoton modell a kettős természetű élet legegyszerűbb elképzelhető egységéről, amolyan „protosejtről” ad félig-meddig formális koncepciót. A chemoton három alrendszerből áll:

1. **Autokatalitikus „kémiai motor”.** Az autokatalízis azt jelenti, hogy a kémiai folyamat végén a kiindulási molekulából két példány keletkezik, azaz egyfelől ciklussá zárul a folyamat, másfelől minden „fordulóban” megkettőződik a részt vevő anyagok mennyisége. Ez minden biológiai növekedés alapja. A chemoton „kémiai motorja” egy autokatalitikus ciklus, amely egyúttal az információs alrendszer és a membrán felépítéséhez szükséges építőegységeket is előállítja. Nyersanyagként a környezetből felvett anyagokat használ, az alacsony energiaállapotú melléktermékeket pedig a környezetbe adja le.
2. **Kettős membrán,** mely a chemoton protosejtjét határolja. Beengedi az autokatalitikus ciklus számára szükséges molekulákat, kiengedi a szükségtelen melléktermékeket, de nem engedi szétdiffundálni a rendszer alkotóit.

¹¹ Hermann Joseph Muller, Nobel-díjas amerikai genetikus.

- 3. Információs alrendszer**, amely egyszerű építőkövekből álló polimerként szintén autokatalitikusan replikálódik, és a chemoton további alkotójának szintéziséhez is hozzájárul, vagyis a rendszer további részéről is hordoz információt. A chemoton alapverziójában a membránalkotók szintéziséhez szükséges molekulát termel -- általánosságban a chemoton többi elemének szintézisét befolyásolja.

A chemoton modell nem valódi molekulákból és anyagcsere-utakból épül fel, hanem absztrakt módon mutatja meg, milyen funkcióval és kapcsolatokkal rendelkező alkotóelemek szükségesek a minimális élő szerveződéshez. Fontos elv, hogy a három alrendszer sztöchiometriailag kapcsolt, vagyis az alkotóelemeik egyenlő arányban termelődnek. Ez az egyszerű elv a spontán osztódás képességét is magyarázni tudja, mivel így a membrán alkotóelemei a „sejtplazma” alkotóelemeivel (a másik két alrendszer) azonos ütemben keletkeznek. A gömb alakú sejt felszínét a membránalkotók, a térfogatát pedig a sejtplazma alkotóinak mennyisége szabja meg. A felszín a sugár négyzetével, a térfogat viszont a köbével arányos, a térfogat megkettőződése esetén tehát a felszín – azonos alak mellett – kettő a kétharmadikon-szorosra, azaz kb 1.6-szeresére nő. A chemotonban azonban a térfogat megkettőződése a membránalkotók megkettőződésével jár, így a felszín nagyobb lesz a gömb alakhoz szükséges felszínénél. Szimulációs modellezéssel kimutatták, hogy ennek hatására a felszín betüremkedik, és ha a betüremkedés eléri a túloldali membránt, összeolvadhat vele, bekövetkezhet a spontán sejtosztódás, amellyel helyreáll az ideális gömb alak.

A chemoton tehát képes növekedni és osztódni. Ha pedig az információs alrendszer többféle állapotban, változatban létezhet, és ezek a változatok a többi alrendszerben is alternatív változatok szintéziséhez vezetnek, akkor a chemoton az evolúció képességével is rendelkezeni fog.

12. Amikor az egyik aspektus hiányzik

Végül nézzünk néhány természetes és mesterséges példát olyan esetekre, amikor az élet kettős természetéből csak az egyik aspektus van jelen, a másik hiányzik.

Sol Spiegelman 1965-ben végezte híres kísérletét, amelyben élő sejtek nélkül, kémcsőben hozott létre molekuláris evolúciót. A kémcsővekbe az RNS-molekulákat felépítő építőköveket és a Q β -fág (egy baktériumot fertőző vírus) replikáz enzimét tette. Ehhez hozzáadta a vírus (kb. 4000 bázis hosszúságú) RNS-molekuláját, amelyet a replikáz sokszorosítani kezdett. A replikáz a másolás során ejt hibákat, így a másolatok között az eredeti molekula sokféle változata keletkezett. Az alapanyagok elfogytával természetesen megállt a replikáció, ezért bizonyos idő után mintát vett a kémcsőből, és a mintát újabb kémcsőbe oltotta, amelyben a replikáz enzim mellett az RNS építőkövei voltak jelen, de az eredeti RNS már nem. Az új nyersanyagokat használva a mintával átjutó RNS-molekulák replikációja újra megindulhatott. Az átoltást sokszor megismételte, majd megvizsgálta az utolsó kémcsőben keletkezett RNS-molekulákat. A kémcső túlnyomó többségben az eredetinél jóval rövidebb, kb. 220 bázis hosszúságú RNS-molekulát, illetve annak közeli változatait tartalmazta. Mi történhetett?

A kémcsővekben valódi evolúció zajlott. A replikáció feltétele, hogy az RNS-molekula képes legyen a replikázhoz kötődni, a kötődés hatékonysága pedig az RNS bázissorrendjétől függ. A molekula hossza is befolyásolja a replikáció sebességét: minél rövidebb az RNS, annál gyorsabban elkészül róla a másolat. Különböző RNS-molekulák tehát különböző sebességgel másolódnak, a változatosságot pedig a másolás során ejtett hibák biztosították. Azok a molekulák, amelyek jól kötődtek a

replikázhoz és/vagy rövidebb hosszuk miatt gyorsabban másolódtak, nagyobb mennyiségben keletkeztek a kémcsövekben, és nagyobb eséllyel jutottak át a mintával a következő kémcsőbe. A másolási hibák révén újabb és újabb változatok szálltak versenybe. A másolás néha nem haladt végig a molekulák teljes hosszán, így rövidebb változatok is keletkeztek, amelyek előnyt élveztek és ezért kiszorították a hosszabbakat. A folyamat azonban nem mehetett a végtelenségig, hiszen nem vesztetett el az a szakasz, amely a replikáz kötődését biztosította. Így alakult ki az optimális molekula, amely a leggyorsabban replikálódott. Érdekes, hogy a kísérletet sokszor megismételve mindig nagyon hasonló molekula lesz a végeredmény, azaz a kísérleti körülmények eléggé pontosan meghatározzák az optimális hosszt és bázissorrendet.

Megváltozott körülmények között más lehet az optimum. Ha a kémcsövekhez a replikációt gátló anyagot adtak, másmilyen RNS-molekula lett a végtermék, amely az eredeténél jobban másolódtott az inhibitor jelenlétében. Mi több, annyira alkalmazkodott az inhibitorhoz, hogy nélküle éppen hogy lassabban másolódtott!

A Spiegelman-kísérletben az RNS-molekulák teljesítették az evolúció feltételeit: a rendszer rendelkezett a szaporodás (másolódás), öröklődés és változékonyság képességével, és az öröklődő változások befolyásolták a szaporodást. Az önálló anyagcsere képessége azonban hiányzott – az RNS-molekulák nem élnek.

Hasonló, de egy fokkal nehezebb a vírusok esete. Replikáció és evolúciós potenciál tekintetében valóságos bajnokok, lefőzik az „igazán élő” szervezeteket. Az, hogy replikációra csak a megfertőzött gazdasejten belül képesek, még nem is különítené el őket a sejtes szerveződésű élővilágtól, mivel ez az obligát endoparazita baktériumokra is igaz. A vírusok azonban nem képesek anyagcserére, a vírusrészecske állandósága statikus állandóság, nem képes kijavítani a sérüléseket, nem képes kicserélni az alkotóelemeit. Ha tehát az élet kettős természetét kérjük számon rajtuk, akkor nem tekinthetők élőnek – a biológusok többsége ezt az álláspontot osztja. Az „eset” azért nehezebb mégis, mert – az RNS-molekulákkal ellentétben – a vírusok nyilvánvalóan önálló egységei a természetes evolúciónak is, a komplexitásuk pedig vetekedhet a sejtes élőlényekével.

Néhány évvel ezelőttig tisztább volt a helyzet, mert a legegyszerűbb baktériumot és a legkomplexebb vírust elég nagy szakadék választotta el egymástól. Ez a szakadék azonban azóta benépesült. A Mimivírus volt az elsőként megtalált óriásvírus, ami 400 nanométeres átmérőjével, 1,2 megabázis méretű, közel 1000 fehérjét kódoló genomjával betolakodott az intracelluláris baktériumok méretének és komplexitásának tartományába. Mivel az ember jobban hisz az agyának, mint a szemének, először baktériumnak is hitték, és a megtévesztő külső („mimikri”) okán nevezték el, mikor valódi természetére fény derült. Az óriási vírus meglehetősen apró lényeket, amőbákat fertőz, amelyek hűtőtornyok vizében élnek. A „hagyományos” vírusoktól pedig nem csak méretében tér el: tekintélyes genomja a transzlációban, DNS-repairben és szintetikus anyagcserében részt vevő fehérjéket is kódol – csupa olyan funkció, amit korábban a sejtes élőlények kiváltságának vélték. Önálló anyagcserére nem képes, de „besegít” a gazdasejt apparátusának, amit természetesen a saját replikációjához hasznosít, akár a többi vírus – de ezt is különleges módon teszi. Az amőbasejtben külön sejtszervecskét hoz létre, amit „vírusgyárnak”¹² (virus factory) neveznek: ebben képződnek az új vírusrészecskék. A vírusgyár a fertőzés 24-órás ciklusa során növekszik is – tekinthetjük-e a gyárat

¹² Egyszerűbb vírusgyárat másfajta vírusfertőzésekből is ismerünk.

élő szervezetnek, aminek a vírus csak szaporítóképlete? A vírus fehérjéi a gazdasejt riboszómáin transzlálódnak – az egyetlen biztos „leíró kritérium” tehát, ami az élőlények megkülönböztetésére megmaradt, a riboszóma jelenléte. De ez meglehetősen sovány lenne életkritériumnak: az első önállóan osztódó élőlényeknek bizonyosan nem voltak riboszómáik. Az pedig, hogy komplex molekulákat a környezetből vesz fel a vírus(gyár), nem egyértelmű kizáró ok, hogy élőknek tekintsük: az intracelluláris baktériumok is tesznek ilyet, és az élet hajnalán az első organizmusok is bizonyosan támaszkodtak az abiotikus úton kialakult komplex vegyületekre.

Ha ez nem lenne elég, a Mimivírus még beteg is lehet. Egy változatában (amit Mamavírusnak neveztek el) találtak egy kisebb vírust, ami kizárólag a Mamavírussal együtt fordul elő az amőbákban, és annak vírusgyárában szaporodik. Ha jelen van, a képződő Mamavírus részecskék egy része torzult, fertőzőképtelen lesz, az amőbasejt pedig hosszabb ideig életben marad. A vírust fertőző vírusokat általánosságban **virofág**nak, a Mamavírus kórokozóját pedig Sputniknak nevezték el.

Az óriásvírusok részecskéi a kettős definíció alapján továbbra sem tekinthetők élőknek, de a határ elmosódóban van...

Nemcsak az evolúció képessége létezhet aktív állandóság nélkül, hanem a fordított eset is előfordul. Dinamikusan állandó, „anyagcserét” folytató rendszer a lefolyóban képződő víztölcsér vagy a gázégő lángja is: a forma állandó, az anyag átáramlik a rendszeren. A tűz még replikálni is képes önmagát – újabb tüzeket gyűjthet –, de „utódai” nem öröklik a sajátosságait: méretük, alakjuk a meggyújtott anyagtól fog függeni, nem az őket meggyújtó tűz méretétől és alakjától. Emiatt nem evolválódnak, nem válnak komplexebbé, és nem szereznek a fenntartásukat és a replikációjukat elősegítő struktúrákat. Ezekből a példákban tehát az információs-evolúciós aspektus hiányzik, és nyilvánvalóan senki sem gondolná élőknek őket. Fogósabb kérdés, ha eljátszunk egy mesterségesen (szintézissel) előállított sejt vagy komplexebb élőlény gondolatával. Ha képesek leszünk erre (ami lényegében technikai kérdés), akkor alighanem kihagyhatjuk belőle az osztódás és az evolúció képességét, úgy hogy közben az anyagcsere képességét tökéletesen meghagyjuk. Élni fog-e ez a lény?

13. Utóhang

A természettudós egy kérdésre egy választ szeret kapni, a bölcész hozzá van szokva, hogy egy kérdésre párhuzamosan több válasz létezhet, és nem biztos, hogy van közöttük egy „legjobb”. A „mi az élet” kérdése sajátos módon az utóbbi kategóriához esik közelebb. Ugyanakkor bízom benne, hogy a kérdés boncolgatása közben hasznos és érdekes részkérdésekre érdekes válaszokat kaptunk, és menet közben tanultunk némi természettudományt...

14. Függelék: a Földön kívüli élet lehetőségéről

Az élet definíciójának tárgyalásakor felmerül, hogy a képzelőerőnket óhatatlanul korlátozza, hogy egyetlen, közös eredetű élővilágot látunk. Egészen bizonyos például, hogy a transzláció gépezete nem szükségszerű kritériuma az életnek, noha minden földi élőlény rendelkezik vele. Elképzelhető, hogy vannak további közös sajátosságok, amiket szükségszerűnek vélünk, de nem azok, hanem *esetlegesen*, a közös múltnak köszönhetően vannak jelen minden földi élőlényben. Tanulságos (no meg fölöttébb izgalmas) volna a földtől függetlenül fejlődött élővilágot felfedezni.

A Naprendszer határain túl a mi életünkben aligha lesz esélyünk élet után kutakodni. A legújabb kutatások fényében azonban talán a Naprendszeren belül sem esélytelen a dolog. Egyrészt a földi mikroorganizmusokat vizsgálva jelentősen bővült a képzelőerőnk arra nézve, mennyire extrém

körülmények között fordulhat elő élet, másrészt egyre többet tudunk a Naprendszer égitestjeiről, és az új ismeretek egy része ugyancsak reményt keltő.

Legközelebbi és talán legígéretesebb reménységünk a Mars, amelyen fejlődésének korábbi szakaszában volt légkör és folyékony felszíni víz, azaz adottak voltak az élet keletkezésének feltételei. Elképzelhető, hogy kialakult az élet, de mára – a légkör elszökésével – kipusztult. Ekkor is megtalálhatjuk azonban fosszilis nyomait. Még izgalmasabb azonban az a lehetőség, hogy a haldokló marsi élővilág utolsó hírmondóit esetleg még ma is életben találhatjuk: tudjuk, hogy a felszín közelében ma is van (fagyott) víz, a légkör metántartalma furcsa ingadozásokat mutat, és a földi példák alapján el tudjuk képzelni egy bakteriális életforma továbbélését. A lehetséges marsi élet további érdekessége, hogy elképzelhető a földivel közös eredet: az extrém körülményeket elviselő baktériumok elviselhetnek egy Föld-Mars vagy Mars-Föld utazást is, és ismertek olyan meteoritok, amelyek megtették ezt az utat. Mivel a kialakulása után a Mars a Földnél hamarabb hűlt le, az sem lehetetlen, hogy az élet ott jelent meg először, és onnan jutott el a Földre. Ebben az esetben persze kevésbé nyernénk megvilágosodást a földi élet jegyeinek esetlegességéről.

Távolabbi célpont a Jupiter holdja, az Europa, amelynek felszínét vastag vízjég kéreg borítja. A 10 kilométer vastag kéreg alatt folyékony vízóceánt gyanítanak, amelyben talán megjelenhetett a vizes alapú, de a földitől független élet. Az élet kialakulásához és fennmaradásához szükséges energiát a távoli Nap helyett az óceán mélyén feltörő hóforrások biztosíthatják, akár a földi óceánok „pöfögőire” épülő életközösségek esetén. További esélyt kínál egy másik jeges hold, az Enceladus, ami a Szaturnusz kísérője.

Végül még egzotikusabb lehetőség a Titán, a Szaturnusz holdja, amelyen a Cassini űrszonda Huygens leszállóegysége folyóvölgyekre, tengerekre emlékeztető képződményeket talált. Azóta bebizonyosodott, hogy a mélyedéseket folyékony metán-etán keveréket tartalmazó óriási tavak és vízfolyások töltik meg, melyeket metán-etán esők táplálnak. Ebben a bolygó méretű szerves vegykonyhában egészen bizonyosan komplex vegyületek képződnek – ezekből talán kialakulhatott olyan önfenntartó szerveződésű „élőlény”, amelyben víz helyett folyékony szénhidrogén az oldószer.

Hogy e célpontok valamelyikén van-e élet, az talán még a mi életünkben kiderül.