

Természet Világa

TERMÉSZETTUDOMÁNYI KÖZLÖNY

154. évf. 9. sz.

2023. SZEPTEMBER ÁRA: 1450 Ft

Előfizetőknek: 1350 Ft



FÖLDISMEI BÁNYÁSZEGYLET
ÉLŐSZÖVET AZ ÜVEGVÁZON
ÁTFORDULÓ FORDULÓPONT
GYARAPODÓ MOHÁCSI BUCÓK
SÖRFŐZŐ FIZIKUS FAMÍLIA



A TUDOMÁNYOS ISMERETTERJESZTŐ
TÁRSULAT FOLYÓIRATA

Megindította 1869-ben
SZILY KÁLMÁN

KIRÁLYI MAGYAR
TERMÉSZETTUDOMÁNYI TÁRSULAT

A TERMÉSZETTUDOMÁNYI KÖZLÖNY
154. ÉVFOLYAMA

2023. 9. Szeptember
Magyar Örökség-díjas és
Millenniumi Díjas folyóirat



Nemzeti
Kulturális
Alap



KULTURÁLIS ÉS INNOVÁCIÓS
MINISZTERIUM

EMBERI ERŐFORRÁS
TÁMOGATÁSKÉZELŐ

Megjelenik a Nemzeti Kulturális Alap,
a Kulturális és Innovációs Minisztérium,
az Emberi Erőforrás Támogatáskezelő
támogatásával.

Főszerkesztő: GÓZON ÁKOS

Szerkesztőség:
1088 Budapest, Bródy Sándor u. 16.
Telefon: 06-30-755-5691
E-mail-cím: info@termvil.hu
Internet: termvil.hu

Felelős kiadó:
PIRÓTH ESZTER
a TIT Szövetségi Iroda igazgatója

Kiadja a Tudományos Ismeretterjesztő Társulat
1088 Budapest, Bródy Sándor utca 16.
Telefon: 06-30-755-5702

Nyomás:
PAUKER Nyomda

Felelős vezető:
Vértes Dániel

INDEX25 807
HU ISSN 0040-3717

Hirdetésfelvétel a szerkesztőségben

Korábbi számok megrendelhetők:
Tudományos Ismeretterjesztő Társulat
1088 Budapest, Bródy Sándor utca 16.
Telefon: 06-30-755-5691
e-mail: info@termvil.hu

Előfizetés, reklamáció:
Magyar Posta Zrt.
Telefon: 06-1-767-8262
E-mail: hirlapelofigetes@posta.hu
Internet: eshop.posta.hu
Postacím: MP Zrt., Budapest 1900.

Előfizetésben terjeszti: Magyar Posta Zrt.
Árusításban megvásárolható a Lapker Zrt.
árusítóhelyein.

Előfizetési díj:
fél évre 8160 Ft, egy évre 16 200 Ft

ZACHAR ISTVÁN: Eukarióták eredete – A felemelkedés (1. rész) 386

BABINSZKI EDIT: Földismeit bányászegylet –

175 éves a Magyarhoni Földtani Társulat..... 393

KOVÁCS LÁSZLÓ: James Prescott Joule –

Sörfőző volt nagyapja, apja és ő maga is..... 399

P. B.: Újrahasznosítás százötven éve –

Hulladékgazdálkodás a Természettudományi Közönyben..... 406

PÁLYÁZATI FELHÍVÁS..... 409

MACZÁK MÁRTON: New York City létrejötte – 125 éve történt (2.rész)..... 410

FARKAS CSABA: Kedvező bucó-hírek Mohácsról –

Gyakoribbak lehetnek, mint eddig hitték 416

MÁRKUS BÁLINT: Élőszövet az üvegvázon –

Kovamoszatok fényképeken 418

KÖRFORGÁSOS GAZDÁLKODÁS 426

FÖLDTUDOMÁNYI FIGYELŐ (Szoucssek Ádám)..... 427

DIÁKMELLÉKLET (Tratnyek Sára: A Dráva változó mozgású vizének életet,
életteret befolyásoló hatása lakóhelyem, Vízvár térségében)..... 431

FOLYÓIRATSZEMLE (Landy-Gyebnár Mónika)..... 438

Címlapképünk: Fosszilis és ma élő kovamoszatok vázai a világ minden tájáról
(Márkus Bálint kompozíciója)

Borítólapunk második oldalán: Illusztrációk a New York City létrejötte
című cikkünkhöz

Borítólapunk harmadik oldalán: Körforgásos gazdálkodás ihlette gyerekrajzok

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

Elnök: VIZI E. SZILVESZTER

Tagok: ABONYI IVÁN, BACSÁRDI LÁSZLÓ, BOTH ELŐD, HORVÁTH GÁBOR,
KECSKEMÉTI TIBOR, KORDOS LÁSZLÓ, LOVÁSZ LÁSZLÓ, NYIKOS LAJOS,
PAP LÁSZLÓ, PATKÓS ANDRÁS, RESZLER ÁKOS, SCHILLER RÓBERT, CHARLES SIMONYI,
SÓTONYI PÉTER, SZATHMÁRY EÖRS, SZERÉNYI GÁBOR, VIDA GÁBOR

Főszerkesztő-helyettes:

PÁSZTOR BALÁZS (pasztor.balazs@eletestudomany.hu)

Szerkesztők:

TEGZES MÁRIA (tegzes.maria@termvil.hu)

LÓRINCZ HENRIK (lorincz.henrik@termvil.hu)

SZOUCSSEK ÁDÁM (szoucssek.adam@termvil.hu)

Tervezőszerkesztő: LÉVÁRT TAMÁS

Gazdasági ügyintéző: FARKAS VIKTÓRIA

Partnerkapcsolati ügyintéző: SZALAI ZSUZSANNA (info@termvil.hu; 06-30-755-5691)



EUKARIÓTÁK EREDETE

A felemelkedés

1. RÉSZ

A körülöttünk lévő élet túlnyomó része eukarióta, vagyis sejtmagvas sejtekből áll, mint például a növények, állatok és az emberek is. A Föld biomasszájának nagyobb részét viszont a sejtmag nélküli baktériumok és ősbaktériumok alkotják, azaz a prokarióták. Az eukarióták körülbelül két milliárd évvel a baktériumok után jelentek csak meg, azonban olyan evolúciós újításokat hoztak, amelyek nélkül a magasabb rendű élet nem alakulhatott volna ki. Az átmenet ritka és nehéz lehetett, ráadásul nem sok nyom maradt fenn róla, éppen ezért ma is heves viták övezik. E cikksorozatban a legelső eukarióták nyomába eredünk, hogy megtudjuk, mi indította el kialakulásukat és miért töretlen azóta is a csoport sikere, illetve, hogy hol tart ma a tudomány. Ebben a részben megismerjük a prokarióta és eukarióta egysejtűek világát, hasonlóságaikat és különbségeiket, az eukarióta sejt eredetét magyarázó főbb elméleteket és a nyitva maradt legfontosabb kérdéseket.

2022-ben izgalmas tudományos hír jelent meg, miszerint egy nemzetközi kutatócsoport *Christa Schleper* német mikrobiológus vezetésével szaporodásra bírt a laborban egy meglehetősen jelentéktelennek tűnő ősbaktériumot [1]. Előttük ez mindössze egyetlen japán kutatócsoportnak sikerült, nagyjából tíz év küzdelmes munka megkoronázásaként [2]. Már önmagában ez is hatalmas eredmény, mivel az ősbaktériumok (vagyis *archeák*) notóriusan nehezen tarthatók laborban a lehetetlen mélytengeri vagy más módon szélsőséges életfeltételeik, valamint az ismeretlen, de nélkülözhetetlen bakteriális partnereik hiánya miatt. Schleperék munkájának azonban nem ez a legfontosabb eredménye.

Korábban ezt a mélytengeri fajt, amelyet egzotikus lelőhelyéről (a Loki kastélya nevű, 2 kilométer mélységben megtalálható mélytengeri kűrtőkről) *Lokiarcheának*

neveztek el, csak „összelegőzött” genomdarabkáiból (DNS-töredékekből) ismertük. Ezért csak közvetett módon, a töredékekből rekonstruált genom alapján sejtettük, hogy a Loki milyen fehérjékkel, struktúrákkal és anyagcserével rendelkezik. Az évek során aztán számos olyan gént találtak bennük és rokonaikban, amelyről eddig azt hittük, csak az eukariótákban (a sokkal bonyolultabb sejtmagvas élőlényekben) található meg. A szaporodó eredmények alapján hamar kiderült, hogy a gének nem lopással, hanem leszármazással kerültek oda, és a Lokit is tartalmazó, északi mitológia Áz isteneiről Asgardnak elnevezett archeacsoport a legközelebbi élő prokarióta rokona minden mai eukariótának — köztünk nekünk is. Ez nagy szó, különösen annak fényében, hogy ez a rokonság körülbelül két milliárd éves!

Mindeddig azonban senki nem tudta, mihez is kezd a Loki az eukarióta rokon génjeivel (amiket a közös ős-től örökölt), mint például a sejtvázfűrjét kódolókkal. Schleperék meggyőzően demonstrálták, hogy ezek a gének valóban megtalálhatók a Lokiban, ráadásul róluk fűrjék íródna át, melyek aktív szerepet játszanak a belső sejtvázf, például sejtnyúlványok alakításában, mozgásában. Ez borzasztó erős bizonyítéka annak, hogy az eukarióta és archea sejtvázfak egymás genetikai rokonai, és e rokonság a két csoport közös őse előtt eredezik. Vagyis akárki is lehetett az első eukarióta, az már rendelkezett ilyen sejtvázfal. Azon túl, hogy e munka vizuálisan is igazolta az Asgard archeák korábban csak feltételezett genetikáját és rokonságukat az eukariótákkal is, a következmények messzebb nyúlnak: megoldást nyújthatnak az egyik legizgalmasabb evolúciós problémára: az eukarióták sokat vitatott eredetére. De ne szaladjunk ennyire előre.

Egysejtűek világa

A minket körülvevő, látható élet szinte mind eukarióta, vagyis sejtmagvas sejtekből áll. Ide tartoznak az algák, gombák, növények, állatok és persze minden ember is. Az eukarióták formagazdagsága, összetettsége és sikerre vitathatatlan, különösképpen, ha arra gondolunk, hogy a legsikeresebb fajuk éppen mostanában ért el olyan szintre, ahol képes elpusztítani a saját anyabolygóját. A földi élet azonban nem volt mindig ilyen változatos, és évtizedek óta izgatja a tudósokat, hogy miképp jött létre az első sejtmagvas sejt és annak első energiatermelő sejtsejvecskéje (*mitokondrium*) a prokariótákból.

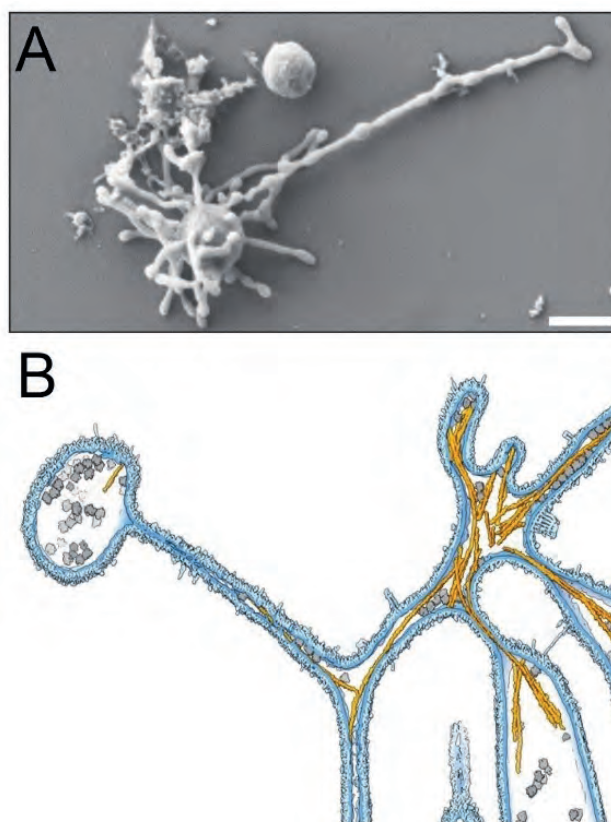
Az eukarióták eredete az egyik legfontosabb lépésnek bizonyult a földi élet evolúciója során. Abban mindenki egyetért, hogy ezeket többek között a sejtmagjuk és a mitokondriumaik különböztetik meg a prokariótáktól. Ez utóbbról is megbízhatóan tudjuk, hogy valaha szabadúszó baktériumként létezett, ami valamiképpen bekerült a gazdasejtbe (egy archeába). Sikeres együttműködésük a magasabb rendű (például többsejtű) szerveződési formák, köztük az ember kialakulásához is elvezetett. Ezért is nevezzük *nagy evolúciós átmenetnek*, mely fogalmat John Maynard Smith és Szathmáry Eörs vezette be 1995-ben, hogy megfelelő névvel illessék a nagy hatású és kritikus evolúciós lépéseket, mint amilyen az első sejtek, a többsejtűség vagy az *eusocialitás* (állati társadalmak) megjelenése [3]. Az eukarióták eredete klasszikus példája a nagy átmeneteknek, hiszen két *független* leszármazási vonal egyesült, és az önálló életet élő sejtek idővel teljesen feladták saját szaporodásukat (2. ábra). Az átmenet különlegessége abban rejlik, hogy az így létrejött

új evolúciós egységben (az eukarióta sejtben) az alacsonyabb szintű egységek teljesen átvették a gazda energia-háztartásának feladatát — belőlük lettek a mitokondriumok.

Más átmeneteket tekintve úgy tűnik, hogy az eukarióták megjelenése sokkal nehezebb lehetett, mint akár az élet megjelenése, akár a többsejtűség vagy az eusocialitás kialakulása. Előbbi nagyon hamar megjelent a lehűlő Földön, utóbbiak egymástól függetlenül többször is kialakultak, a többsejtűség például a növényekben, állatokban, gombákban, míg az eusocialitás számos ízeltlábú csoportban és néhány gerincesben. Az eukariótákra ezzel szemben körülbelül két milliárd évet kellett várni, és az azóta eltelt ugyanennyi évben nem tudunk második példáról. További minták híján és mivel a korabeli nyomok igen homályosak, korántsem egyértelmű, hogy milyen feltételek mellett és lépéseken keresztül történt a kialakulásuk.

A kérdés olyannyira nem triviális, hogy még több mint száz évvel azután, hogy Konstantin Merezhkovskij kalandos életű orosz biológus először felvetette a sejtsejvecskék *endoszimbiotikus* eredetének lehetőségét [4], és közel 60 évvel azután, hogy Lynn Margulis (akkor még Lynn Sagan, a kozmológus Carl Sagan felesége)

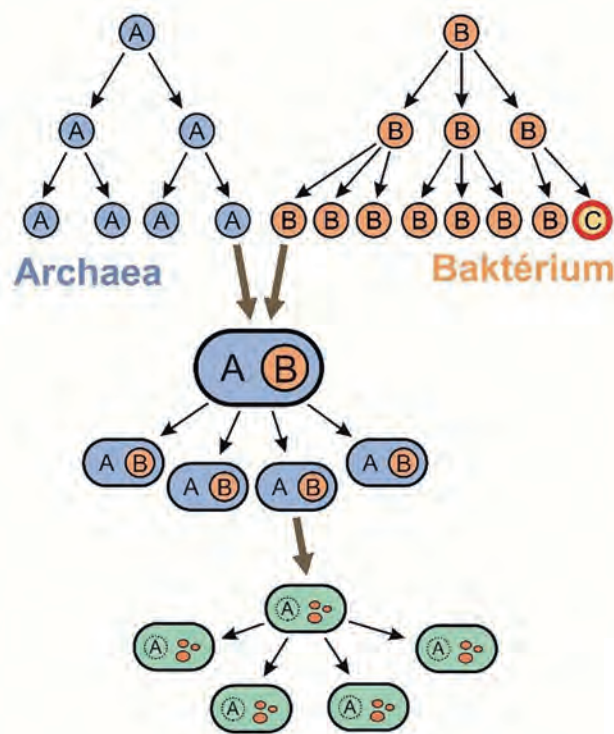
1. ábra. Lokiarchea sejtvázf. A: *Lokiarchaeum ossiferum* elektronmikroszkópos képe. Jól láthatók a nyúlványok, melyek elágazhatnak. B: Kriotomográf metszet a sejttről. A sárga csövek jelölik a sejtvázf filamentumait, melyek a nyúlványokba is beérnek, azokkal párhuzamosan rendeződnek. Talán ilyen nyúlványokkal vette körül, kapta el és belezte be az eukarióták őse a mitokondrium őst is? Ez is egy lehetséges forgatókönyv, de nem az egyetlen. (Forrás: Rodrigues-Oliveira et al., 2022)



bebetonozta az *evolúcióbiológiába* a mitokondrium bakteriális eredetét [5], még mindig születnek új (néha egészen vad) elméletek az eukarióták eredetének magyarázatára. Ráadásul a lassan csordogáló új *filogenetikai* adatok folyamánként rég eltemetett elméleteket is leporolgatunk, ha a szükség úgy hozza.

Az ember azt várná, hogy mostanra megegyezés alakul ki az átmenetről, de ez messze nincs így. Még a legalapvetőbb kérdésekben is heves viták zajlanak. A korai mitokondrium-megjelenést támogatók szerint az eukarióták egy gyors, robbanásszerű fejlődéssel alakultak ki, melyet az energiatermelést felturbózó mitokondrium váltott ki és hajtott (például *Bill Martin* hidrogén hipotézise [6]). Mások, például a néhai *Tom Cavalier-Smith* egy lassabb, graduális folyamatot javasoltak, miszerint a mitokondriumok nem fejlődhettek ki primitív prokarióta sejtekben, szükség lehetett valamilyen szintű összetettségre ahhoz, hogy a mitokondrium őse bejuthasson a gazdába (kései mitokondrium-elméletek [7]). A vita olyanira elmérgesedett, hogy a két tábor tagjai habozást nem tűrően sietnek megcáfolni egymás legújabb eredményeit a szaklapokban (esetleg nem is vesznek részt egymás konferenciáin). Ezért is tűnik alkalmasnak az idő, hogy alaposabban is bemutassuk az eukarióta eredetét és az azt övező misztériumot egy cikksorozatban, hogy kontextusba helyezzük a legújabb eredményeket.

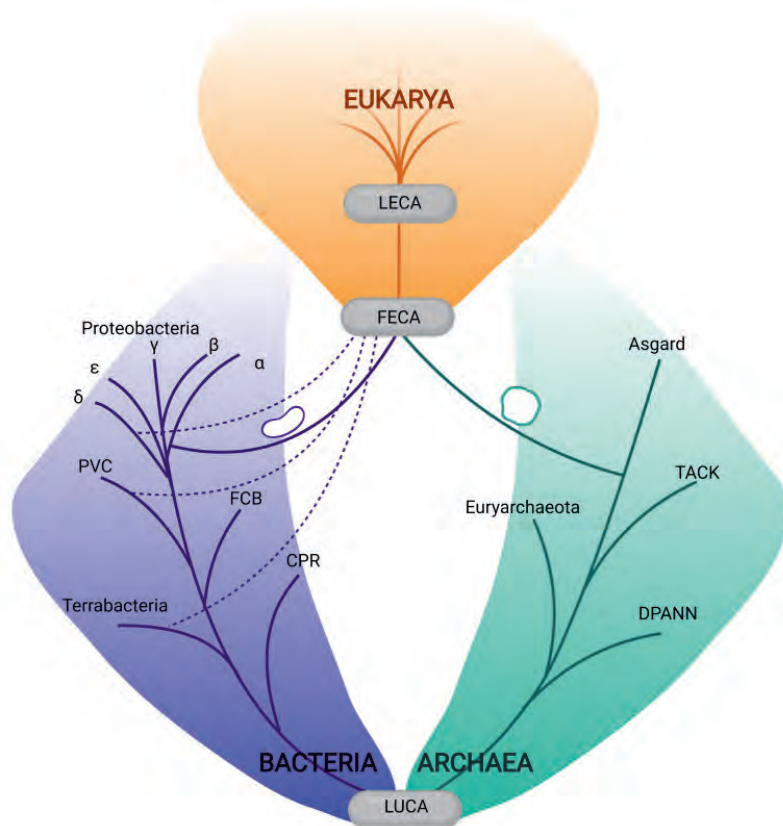
2. ábra. Az eukarióták és a mitokondrium eredete egy nagy evolúciós átmenethez köthető. Az ősi partnerek, az eukarióta gazda őse (kék archea) és a mitokondrium őse (narancs baktérium) eredetileg önállóan sokasodtak és fejlődtek, változtak (lásd piros mutáns, C). Egy ponton olyan szoros fizikai kapcsolatba léptek, hogy az önállóságukat feladva már csakis együtt tudtak szaporodni. Egy új, kiméra sejtvonallá jött létre: az eukarióták (zöld), s bennük a mitokondriumok (narancs).



Prokarióta Föld

Először is nézzük, mi lehetett az eukarióták előtt. Ha valaki az első körülbelül két milliárd évben körbenézett volna a korai Földön, nagy valószínűséggel nem talált volna bonyolultabb, s egyúttal érdekesebb életformát egy baktériumnál, még akkor sem, ha mikroszkóppal keresi. A földi biomaszra nagyobbik részét ma is ezek a veterán, sejtmag nélküli organizmusok, a prokarióták alkotják. Ezek két nagy csoportra oszthatók: a valódi és ősbaktériumokra. A *πρό κάρυον* (*prokarion*) görögül annyit tesz: „mag előtti”, utalva egyszerű szerveződési struktúrájukra és a fő különbségre a sejtmagvas eukariótákhoz képest. A prokarióták mind egysejtűek, de összehasonlíthatatlanul egyszerűbbek, mint a sejtmagvasok egysejtűi, például egy amőba vagy egy zöld szemesostoros, nem is beszélve a többsejtű eukariótákról, mint amilyen egy szivacs, tölgyfa vagy ember. Érdekes módon, 60 évvel ezelőttig még azt sem tisztázták, miben is rejlik a baktériumok és eukarióták közötti különbség [8]. Az ősbaktériumokról pedig, akik most látványosan fürödnek a mikroszkóp „rivaldafényében”, akkor még nem is tudtuk, hogy léteznek. Azt már egy ideje tudjuk a filogenetikai kutatásokból, hogy az ősbaktériumoknak elképesztően fontos szerep jutott az eukarióták eredettörténetében — ezek a kutatások azonban még mindig csak a felszínt kapargatják a tekintetben, hogy pontosan mi is lehetett ez a szerep, milyen is lehetett az eukarióta őse és miért lépett kapcsolatba a mitokondrium ősével.

Általános vélekedés szerint, ha találunk is életet a Naprendszer más bolygóján, az hasonlatos lesz a földi bakteriális élethez. E mögött az a sejtés áll, hogy egy prokarióta szintű szervezet nemcsak egyszerű, de meglehetősen könnyen alakul ki és él túl, akár sanyarú körülmények között is. Ezt igazolni látszik az a tény, hogy az első élő szervezetek rendkívül hamar megjelentek a Földön: amint a korai Naprendszerben még gyakori kisbolygó-becsapódások csillapodtak és a földkéreg kihűlt, lecsapódtak az első óceánok, s benne megjelentek az első élő szervezetek is. Ez nagyjából 3,7-4 milliárd éve történhetett: közvetett *biogeokémiai* nyomok sokasága utal az ilyen idős kőzetekben arra, hogy ekkor már valószínűleg megjelentek olyan biológiai szervezetek, amelyek megkötötték a szenet és a kén-t. Ezekben a korai földi kőzetekben a szén- és kénizotópok aránya eltér a Naprendszer (és a még fiatalabb Föld) átlagától — ez nehezen magyarázható mással, mint biológiai aktivitással, amely során a biológiai organizmusok jelentősen módosítják például a C, S, N, O természetes izotóparányait, amelyet a szerves törmelékükből keletkezett kőzetek megőriznek.



3. ábra. Az élet törzsfája. A két ősi domén, a baktériumok és archeák minden élő utolsó közös ősétől (*Last Universal Common Ancestor*) származnak. Velük szemben az eukarióták nem a LUCA-tól erednek, hanem a két nagy domén kereszteződéséből, amely során egy archea (Asgard) gazda bekebelezett egy alfaproteobaktérium őst, amiből a mitokondrium lett. Az utolsó eukarióta közös ős (LECA) már minden olyan tulajdonsággal rendelkezett, amivel a mai egysejtű eukarióták rendelkeznek. Bár az ábra ezt sugallja, azt nem tudjuk, hogy az első eukarióta közös ős (FECA) rendelkezett-e már mitokondriummal. A szaggatott vonalak további lehetséges, de elvetélt endoszimbiotikus integrációkat jelölnek. (Forrás: Nobs et al., 2022)

Hogy az első sejtek milyenek lehettek, nem tudjuk, de úgy véljük, nem sokban különbözhettek a mai baktériumoktól. Nemcsak, hogy hamar megjelentek a kihűlő *archaikumi* őslevesben, de ráadásul rendkívül sikeresnek is bizonyultak, és négy milliárd év alatt minden létező élőhelyet belaktak a Földön. Mivel gyorsan szaporodtak és az evolúciójuk is hamar lezajlott, nagyon hatékonyan alkalmazkodtak bármilyen hozzáférhető forrás hasznosításához, legyen az hidrogén, metán, kén, szén, oxigén, fény vagy lényegében bármi, amit megcsapolhattak az energiáért. Ma is így csinálják, ezt igazolják a laboratóriumi kísérletek is, például *Richard Lenski* hosszú távú evolúciós kísérletsorozata [9], illetve *Ron Kishony* térben is vizualizált adaptív evolúciója: <https://hms.harvard.edu/news/bugs-screen> [10].

De mi tette lehetővé számukra ezt a gyors térhódítást és a fennmaradást még a legmostohább körülmények között is? Mi az, ami miatt rendkívül gyorsan

tudnak alkalmazkodni a folyton változó körülményekhez, antibiotikumokhoz, mérgekhez, sugárzásokhoz, és gyakorlatilag bármilyen forrást tudnak fogyasztani (egyesek még nukleáris hulladékot is)? Mindezt egyszerű felépítésük és mutációktól kevésbé védett örökítőanyaguk okozza. Minden baktérium tulajdonképpen egy biológiai membránba csomagolt folyadékcsepp, egy plazmaszák, amelyben szinte minden anyagcsere-folyamat ugyanabban a térrészben, a sejtplazmában megy végbe. Itt történik az örökítőanyag (DNS) tárolása, másolása, átírása, a fehérjék termelése, a tápanyagok lebontása, szállítása stb. Nincsenek elkülönülő, membránnal határolt belső „rekeszek” az egyes munkafolyamatok számára és nincs központi szervezés. Az egész olyan, mintha egy gyár minden gépét, eszközét és dolgozóját egy hatalmas üzemcsarnokba terelnénk, és mindenfajta központosítás nélkül hagynánk, hogy egyszerre, egymás szavába vágva olvassák és értelmezzék a középre kiterített működési tervet. Aminek egyetlen példánya létezik, és igen

könnyű átírnia bárkinek. Ráadásul egyes genetikai elemek („ugráló” tervlapok) könnyedén át tudnak jutni egyik sejtől a másikba, sőt, beépülnek az örökítőanyagba is, ezzel is gyorsítva az alkalmazkodást egy adott környezetbe. A bakteriális szerveződési forma nagyon gyorsan és hatékonyan szaporítja magát és alkalmazkodik új feladatokhoz (a gyárak erre nem képesek), s ez vezetett ahhoz, hogy – minden közkeletű hiedelemmel szemben – valójában négy milliárd éve töretlenül a baktériumok uralják bolygónkat.

Eukarióták hajnala

Úgy tűnik azonban, hogy a baktériumok réges-régen elérték a számukra rendelkezésre álló szerveződés lehetséges felső korlátját, és ennél tovább „önerőből” egyszer sem tudtak jutni. Vagyis anélkül, hogy összeállnának egy másik prokariótával. Mitokondrium, félig önálló energiatermelő sejtszervecske nélkül a prokarióták nem tudnak egy bizonyos méret fölé nőni. A dolog oka az energetikai membránok térfogattal történő skálázódásában rejlik, pontosabban abban, hogy mitokondriumokkal (sok kis „akkumulátorral”) sokkal könnyebb megfelelő mennyiségű energiát termelni nagy sejttérfogatban, mint sejtfelszíni membránokkal (ahogy a prokarióták teszik [11]). Ennek megfelelően még a nagyobb baktériumok is eltörpülnek egy hétköznapi eukariótához képest (kivéve egy-két szélsőséges példát, mint a centiméteres *Thiomargarita* [12]. És bár

léteznek többsejtű baktériumok, például a fonalas cianobaktériumok (régőbbi nevükön kékoszatok), azok össze sem hasonlíthatók összetettségükben mondjuk a növényekkel, ahol a sejtek különféle szövetekbe, szervekbe rendeződnek, és számos sejttípus létezik, amelyek különböző feladatokat látnak el.

De ami a legfontosabb, hogy még az egysejtű eukarióták belső szerkezete is lényegesen összetettebb, mint egy baktériumé, számos elkülönülő, belső membrán határolta rekesszel, amelyekben a specializált folyamatok nagy hatékonysággal zajlanak. A légzés és *fotoszintézis* például ilyen sejtszervecskékben, a mitokondriumban és a *plastiszban* (színtest) történik, a folyamatok pedig nem keverednek. És persze az eukarióták, ahogy a nevük is mutatja, valódi sejtmaggal rendelkeznek: örökítőanyaguk e sejtmagban elzárva, biztonságban csücsül a sejt közepén, amikor éppen nincs osztódás (nem pedig a sejtplazmában, mint a baktériumoknál). A DNS átírása a magban, de fehérjévé fordítása már egy másik membránrekeszben zajlik. Rendelkeznek aktív sejtvázzal, amely a molekulák, fehérjék, *vezikulumok* (membrán határolta gömbök a sejtplazmában) vagy akár sejtszervecskék célzott mozgatására alkalmas a sejten belül, és a sejthártya behajlításával más sejtek bekebelezésére is képesek (*fagocitózis*). Ezek (és még számos további) mind olyan vívmányok, amelyek szinte kizárólag csak az eukarióta sejtek tulajdonságai. Vagy legalábbis a közelmúltig így véltük.

Egyrészt a ma élő sejtmagvasok genomjainak tanulmányozásával megtudtuk, hogy minden ma élő eukarióta őse (az utolsó közös eukarióta ő: *Last Eukaryotic Common Ancestor, LECA*; lásd **3. ábra**) is rendelkezett szinte valamennyi újítással! Világos, hogy ezek az evolúciós vívmányok együtt tették lehetővé, hogy az eukarióta szerveződés átlépje a prokarióták méret- és összetettség-korlátját. Az újítások nyitották meg az utat a magasabb rendű szerveződés, például a valódi többsejtűség felé (onnan pedig tovább a szövetek, szervek, szervrendszerek kialakulásához).

Másrészről egyes, korábban kizárólagosan eukariótának vélt tulajdonságokról egyenesen az derült ki, hogy a prokarióták között megtalálhatók *homológiák*, vagyis olyan gének, fehérjék, funkciók, amelyek ugyanattól

a közös őstől származnak. Például ilyennek tűnik a Lokiban kimutatott *aktin* sejtváz is [1], és még számos további gén. Minél több ilyen eukariótával homológ tulajdonságot találunk az Asgardokban, annál biztosabbak lehetünk benne, hogy ezek a tulajdonságok az eukarióták és az Asgardok közös (archea) őseben is megjelentek, és leszármazással, nem pedig *horizontális transzferrel* (tulajdonképpen lopás a szomszédoktól) kerültek bele az első eukarióta közös ősbe (**3. ábra**).

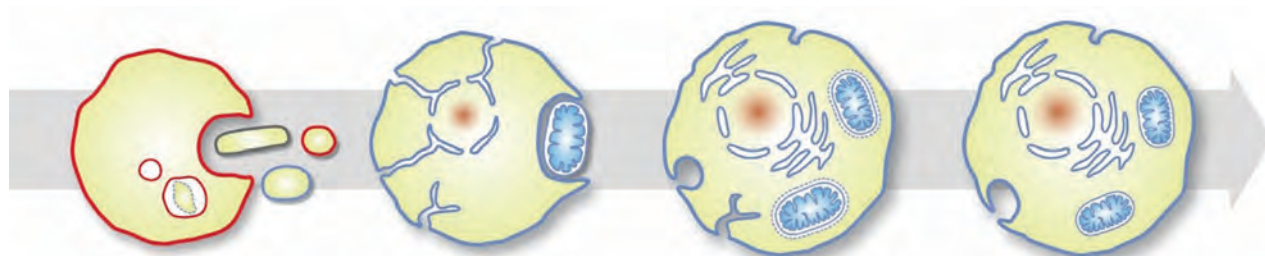
Sötét középkor

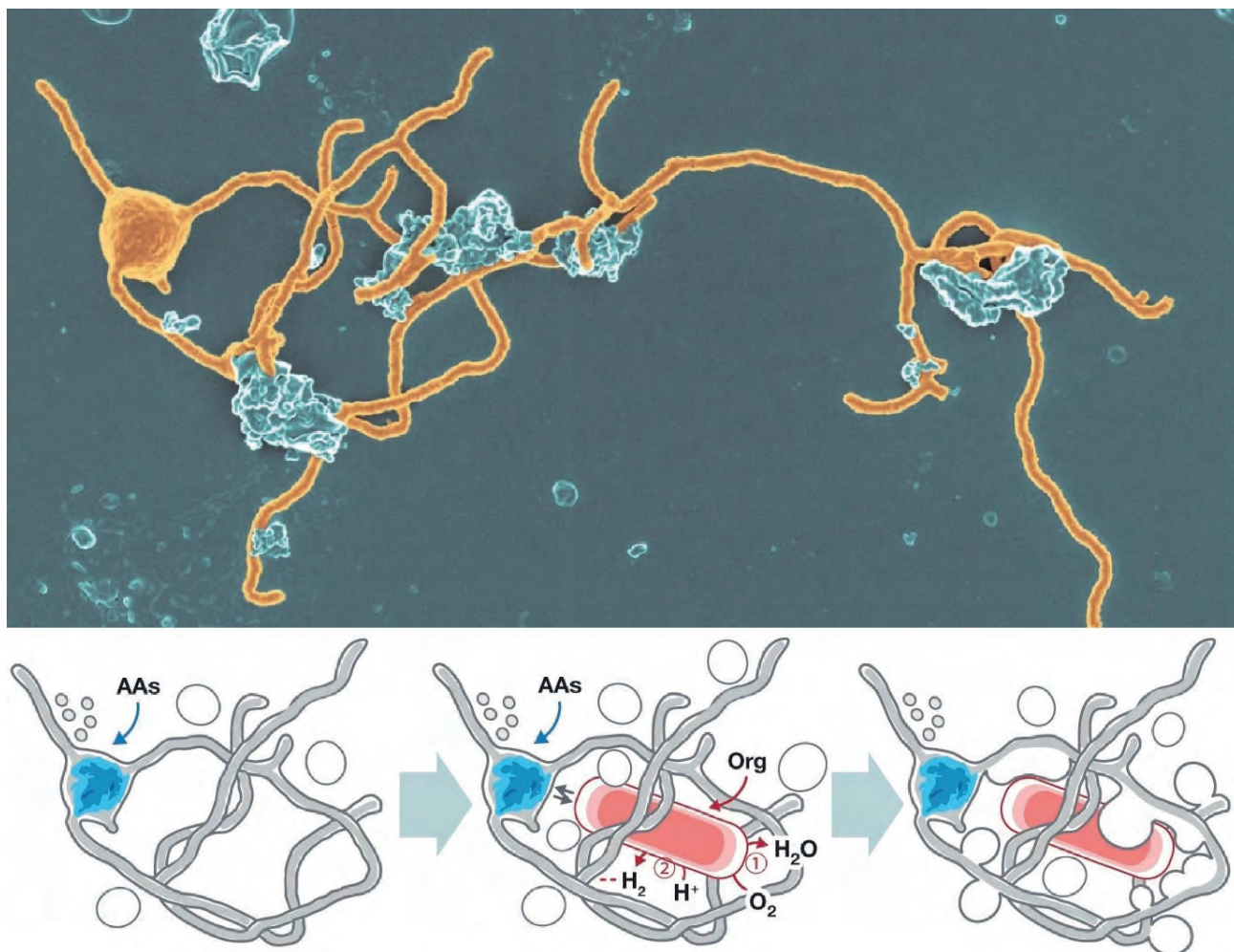
De akad itt egy kis gond. Hiába vetette meg a lábát az élet a Földön szinte azonnal, hogy a bolygó kihűlt, hiába terjedtek szét a prokarióták minden zugba – még mértéktartó becslés szerint is nagyjából további két milliárd évet kellett várni az eukarióták megjelenésére! Ráadásul még csak hasonló eseményről sem tudunk a mikrobiális világból. Adott tehát egy nagyon ritka és vélhetően nagyon nehéz evolúciós lépés, amelyből jelenleg csak egyvel vagyunk tisztában, de nem ismerjük sem a kiindulási állapotát, sem a köztes lépéseit. Valódi feladvány ez az evolúcióbíológusoknak, megtudni, mi történt az eukarióta „sötét középkorban”.

Az első eukarióták végső sikere elvitathatatlan tény: az egyik legsikeresebb többsejtű leszármazottjuk éppen azon dolgozik, hogy saját erejéből más bolygókat is megfertőzzön magával. De vajon melyik lehetett az őseukarióták újításai közül a kritikus tulajdonság, ami elindította őket ezen az úton? Vajon a sejtmag alakult-e ki előbb, és aztán jött a mitokondrium? Vagy fordítva? És a fagocitózis hol jött be a képbe? Lehetett valami különleges környezeti hatás (például emelkedő oxigénszint a légkörben), amely kiváltotta az átmenetet?

E kérdések (és még számos további) megválaszolására az elmúlt hatvan évben több mint 60 különböző elméletet dolgoztak már ki több-kevesebb részletességgel. Ezek közül számos már elbukott, de még így is bőven lehet miből válogatni [13]. Abban a legtöbb mai kutató egyetért, hogy az endoszimbiozis fontos, sőt talán esszenciális szerepet játszott az eukarióták létrejöttében. A gond az ilyen egysejtűeket érintő korai evolúciós eseményekkel az, hogy nem maradnak fenn róla fossziliák. Ráadásul ma nem ismerünk

4. ábra. Egy lehetséges út az eukarióták kialakulásához. Az archea ős (piros nagy sejt) ragadozó volt és többféle baktériumot is fogyasztott. Az, amelyik ellent tudott állni az emésztésnek (kék kicsi sejt) lassan megtelepedett a gazdában. Amint átvette a gazda energia-háztartását, már mitokondriumról beszélünk. A gazdában eközben (vagy már előtte) létrejött a sejtmag (belső membránnal határolt barna terület). (Forrás: Zachar & Szathmáry 2017)





5. ábra. Az eukariótává válás egy másik lehetséges útja. Felül a 2019-ben sikeresen kitenyésztett Prometeoarchaeum hamisszínes képe (narancs az archaea, kék jelöli a szerves törmeléket). Alul a spekulatív hipotézis: a kék színű ősi Prometeoarchaeum több baktériummal is anyagcsere-kapcsolatban élt, de az egyikkel (piros) szorosabbra fonta a viszonyát, és lassacskán a membránjáról lefűződő vezikulumokkal körbevette és magába olvasztotta azt, így hozva létre a mitokondrium őseit. (Forrás: Imachi et al., 2020)

olyan köztes egysejtű formákat, amelyek áthidalnák a modern eukarióták és például az Asgardok közötti szakadékot. Ha találnánk olyan formát, ami rendelkezik mitokondriummal, de nem rendelkezik sejtmaggal, akkor mindjárt okosabbak lennénk.

Nem ismerünk azonban olyan eukariótákat, amelyek eredendően nem rendelkeznek mitokondriummal, mint ahogy „sejtmagtalan” eukariótákat sem ismerünk (bár ez terminológiai paradoxon volna). Léteznek persze mitokondriumukat vesztett eukarióták, ahogy a csigák is elvesztették a házukat, de ezekről minden kétséget kizáróan bebizonyosodott, hogy eredetileg rendelkeztek mitokondriummal: a sejtszervecske génjei még kimutathatók a gazdasejt genomjából. Ennek érdekes hozadéka, hogy bár történetileg a sejtmag az „eukariótaság” meghatározó feltétele, *conditio sine qua non*-ja [15], ez ugyanígy igaz a mitokondriumra is. Nyilvánvalóan éltek átmeneti formák,

ezt igazolják az Asgardokban talált homológ gének is, de amíg nincs perdöntő bizonyítékunk, nem tudhatjuk, hogy a sejtmag vagy a mitokondrium lehetett előbb.

Az eukarióta eredet esetében különösen fájó a nyomok hiánya, mivel látszólag nagyon rövid idő alatt történt nagyon sok minden, és egyelőre nem sikerült kibogozni az események sorrendjét. Anthony Poole és Simonetta Gribaldo hasonlatával élve, az utolsó eukarióta közös őshöz vezető lépések sora az átmeneti formák hiánya miatt gyakorlatilag rejtve marad egy LECA-eseményhorizont mögött, ahová nem látunk be [16].

Az eukariogenezis-kutatás aranykora

Az utóbbi években azonban a különböző vizsgálati módszerek és technikák fejlődése, illetve új prokarióta taxonok, mint az Asgard archaeák és rokonaik felfedezése nyomán egyre jobban be tudunk kukkantani

az eseményhorizont mögé. A múltba visszatekintő filogenetikai módszereink egyre pontosabb képet adnak a baktériumok, ősbaktériumok és eukarióták lezármazási viszonyairól, akár egyes gének szintjén is [17][18]. Új, egyre tökéletesebb, időben és térben nagyobb felbontású laboratóriumi módszerek segítik a kutatókat a fajok gén- és fehérjefunkcióinak akár valós időben történő analizálásában [1][2]. A tudományos eredmények egyre közelebb juttatnak minket ahhoz, hogy megértsük, milyen lépések történtek a sejtmag kialakulása előtt és után, kik lehettek az ősi partnerek, és milyen lehetett a kapcsolatuk.

Az eukarióta eredet egyúttal az összetett élet, a valódi többsejtségség, euszocialitás és az ember eredetét is jelenti. A prokarióták sosem érték el azt a bonyolultságot, amit a sejtmagvasok. Ahogy egyre elérhetőbbnek tűnik a Földön kívüli életet potenciálisan hordozó égitestek célzott biológiai vizsgálata (a Mars, a Jupiter Európa vagy a Szaturnusz Enceladus holdja), felmerül a kérdés, hogy ha találunk is életet ezeken a sziklákon, az mennyire fog különbözni a földi baktériumoktól? Mennyiben tekinthetjük a földitől függetlennek a kialakulását és mennyiben várhatjuk, hogy összetettségében összemérhető lesz az egyelőre teljesen egyedi, egyetlen példából ismert, magasabb rendű sejtmagvas sejtekkel?

Bár még nincs konkluzív válaszunk akár a marsi életnyomokról, az eukarióta vívmányok sorrendiségéről és szerepéről, akár minden eukarióta első közös őseinek tulajdonságairól, bízhatunk abban, hogy a tudomány lassan, de biztosan közeledik oda, ahol választ tud adni. Talán olyat, amire nem is számítunk, talán pont azért, mert egyetlen példa áll a rendelkezésünkre arról is, hogyan jött létre az élet, és arról is, miként hozta létre a magasabb rendű szervezeteiket. Az egyedi földi példa tanulmányozásával megérthetjük, miért lehetett olyan különleges az eukarióták megjelenése és felemelkedése, hogy azóta sem készült belőle sem *sequel*, sem *remake* (csak rengeteg, még annál is sikeresebb *spinoff*).

Megjegyzem, nemcsak az ember könyvelheti el sikernek, ha eljut más bolygókra — minden rajta vagy benne élő parazitája és partnere is vele fog utazni. És végső soron a mitokondrium őse is elégedetten dörzsölhetné bakteriális szőreit, hogy lám, milyen jövedelmező kapcsolatra lépett annak idején a gazdájával, hiszen így lehetősége lesz egyszer majd benépesíteni a világegyetemet — emberrel vagy valamely más, utánunk következő eukariótával, ha mi nem járunk sikerrel a civilizációnk fenntartásában.

ZACHAR ISTVÁN

IRODALOM

- [1] T. Rodrigues-Oliveira, F. Wollweber, R. I. Ponce-Toledo, J. Xu, S. K.-M.R. Rittmann, A. Klingl, M. Pilhofer, and C. Schleper, Actin cytoskeleton and complex cell architecture in an Asgard archaeon, *Nature*, Dec. 2022.
- [2] H. Imachi, M.K. Nobu, N. Nakahara, Y. Morono, M. Ogawara, Y. Takaki, Y. Takano, K. Uematsu, T. Ikuta, M. Ito, Y. Matsui, M. Miyazaki, K. Murata, Y. Saito, S. Sakai, C. Song, E. Tasumi, Y. Yamanaka, T. Yamaguchi, Y. Kamagata, H. Tamaki, and K. Takai, Isolation of an archaeon at the prokaryote–eukaryote interface, *Nature*, vol. 577, Jan. 2020, pp. 519–525.
- [3] J. Maynard Smith and E. Szathmáry, *The major transitions in evolution*, Oxford: Oxford University Cambridge University Press, 1995.
- [4] K. Mereschowsky, Theorie der zwei Plasmaarten als Grundlage der Symbiogenese, einer neuen Lehre von der Entstehung der Organismen, *Biologisches Zentralblatt*, vol. 30, 1910, pp. 278–288.
- [5] L. Sagan, On the origin of mitosing cells, *Journal of Theoretical Biology*, vol. 14, 1967, pp. 225–274.
- [6] N. Lane and W. F. Martin, The energetics of genome complexity, *Nature*, vol. 467, 2010, pp. 929–934.
- [7] T. Cavalier-Smith, Origin of mitochondria by intracellular enslavement of a photosynthetic purple bacterium, *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, vol. 273, 2006, pp. 1943–1952.
- [8] R. Y. Stanier and C.B. van Niel, The concept of a bacterium, *Archiv für Mikrobiologie*, vol. 42, 1962, pp. 17–35.
- [9] M. J. Wiser, N. Ribick, and R. E. Lenski, Long-term dynamics of adaptation in asexual populations, *Science*, vol. 342, Dec. 2013, pp. 1364–1367.
- [10] M. Baym, T. D. Lieberman, E. D. Kelsic, R. Chait, R. Gross, I. Yelin, and R. Kishony, Spatiotemporal microbial evolution on antibiotic landscapes, *Science*, vol. 353, Sep. 2016, pp. 1147–1151.
- [11] I. Zachar, A földi élet megismételhetetlen ugrása: az eukarióták megjelenése, *Qubit*, Apr. 2023.
- [12] J.-M. Volland, S. Gonzalez-Rizzo, O. Gros, T. Tüml, N. Ivanova, F. Schulz, D. Goudeau, N. H. Elisabeth, N. Nath, D. Udway, R. R. Malmstrom, C. Guidi-Rontani, S. Bolte-Kluge, K. M. Davies, M.R. Jean, J.-L. Mansot, N. J. Mouncey, E. R. Angert, T. Woyke, and S. V. Date, A centimeter-long bacterium with DNA contained in metabolically active, membrane-bound organelles, *Science*, vol. 376, Jun. 2022, pp. 1453–1458.
- [13] I. Zachar and E. Szathmáry, Breath-giving cooperation: critical review of origin of mitochondria hypotheses, *Biology Direct*, vol. 12, Summer. 2017, p. 19.
- [14] T. M. Embley and R. P. Hirt, Early branching eukaryotes?, *Current Opinion in Genetic Development*, vol. 8, 1998, pp. 624–629.
- [15] M. W. Gray, Mosaic nature of the mitochondrial proteome: Implications for the origin and evolution of mitochondria, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 112, 2015, pp. 10133–10138.
- [16] A. M. Poole and S. Gribaldo, Eukaryotic origins: How and when was the mitochondrion acquired?, *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, vol. 6, 2014.
- [17] T. A. Williams, C. J. Cox, P.G. Foster, G. J. Szöllősi, and T. M. Embley, Phylogenomics provides robust support for a two-domains tree of life, *Nature Ecology & Evolution*, vol. 4, Dec. 2020, pp. 138–147.
- [18] S. A. Muñoz-Gómez, E. Susko, K. Williamson, L. Eme, C. H. Slamovits, D. Moreira, P. López-García, and A. J. Roger, Site-and-branch-heterogeneous analyses of an expanded dataset favour mitochondria as sister to known Alphaproteobacteria, *Nature Ecology & Evolution*, vol. 6, Mar. 2022, pp. 253–262.