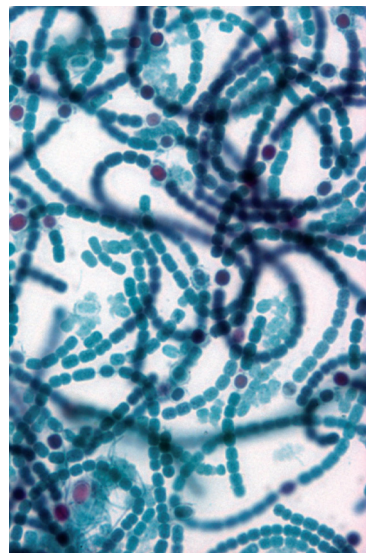


# AZ ÉLET TÖRZSFÁJA



**Az élővilág osztályozásának Linné munkásságát követő fejleményeivel és fontosabb alapelveivel előző cikkünkben foglalkoztunk. Eszerint klasszikus rendszertani tudásunkat mindenképpen felül kell vizsgálnunk a legújabb molekuláris és evolúciobiológiai eredmények tükrében. De hol tart ma a tudomány az élet törzsfájának megszerkesztésében és az erre épülő osztályozásban?**

**Egyelőre csupán a törzsfa legvastagabb ágainak bemutatására összpontosítunk...**

**4. rész**

Az élőlények fő csoportjainak elkülönítésében az egysejtűek alaposabb megismerése vezetett az újabb rendszertan, a *makrotaxonómia* forradalmához. Egy forrongó kutatási területről van szó, igen sok friss eredménnyel és sokszor csak részben vagy egyáltalán nem igazolt feltételezésekkel...

A hosszú úton az első előrelépés a *prokarióta* és az *eukarióta* szerveződési szint fokozatos felismerése volt. Maga a két fogalom a francia *E. Chatton* (1883–1947) munkásságában jelentkezett egyértelműen. A prokarióta (azaz bakteriális) sejtben nincs sejtmag, nincsenek sejt szervecskék, szemben az *eukarióta* sejtrel – hogy csak két fontos eltérést említsünk. Chatton szerint az élővilág felosztása alapvetően a sejtben belüli szerveződés kérdése.

Az amerikai *H. F. Copeland* (1902–1968) a prokariótákat lényegében véve azonosította a német *Haeckel Moneresével* (Lásd hátlapunk ábráját! – *A szerk.*), míg az *eukarióták*on belül megtartotta a *Protista* birodalmat – azaz a sejtmaggal bíró egysejtűeket – az állatok és a növények mellett. A szakmáját tekintve ökológus *R. H. Whittaker* (1920–1980) a növényekkel kapcsolatos tradicionális álláspontot vizsgálta felül 1969-ben, s az alapvető táplálkozási „szokások” alapján a „fotoszintetizálókat” (növények), az „emésztőket” (állatok) és a táplálékukat „abszorpcióval felvevőket” (a gombákat) külön birodalomnak tekintette. Ezzel újabb sok évszázados, sőt évezredek szemléletnek mondott elment, hiszen kiemelte a gombákat a növények közül.

A molekuláris elemzések – elsősorban a riboszomális RNS alapján nyert – eredményei csak ezután jelentek meg a rendszertanban, nem kis meglepetése-

ket okozva. *C. R. Woese* és *G. E. Fox* 1977-ben készült filogenetikai értékelése azzal hökkentette meg a tudományos világot, hogy kimutatta: a prokarióták (azaz a baktériumok) korántsem egységesegek, hanem két fő evolúciós irányt jelentenek az *eukarióták* mellett. Az egyik az úgynevezett *eubaktériumok*



**A Kriptoperidinium nevű páncélos ostoros, a benne lévő plasztisz valamikor önálló kovamoszat volt**

**Zöldalga (E. Hegewald felvétele)**

vonala, ahova igen sok ismert kórokozó tartozik, csakúgy, mint a régen kék-alga néven ismert cianobaktériumok.

A második vonal képviselői pedig arról nevezetesek, hogy számosan csak extrém körülmények között, például hőforrásokban és mély tengerekben fordulnak elő, viszont kórokozók nincsenek közöttük. Miután feltételezték, hogy az ilyen szélsőséges viszonyok megfelelnek a Föld sok milliárd évvel ezelőtti állapotának, ősbaktériumoknak (*Archebacteria*) nevezték el őket. A

nagyobb meglepetés azonban még hátra volt: kiderült az is, hogy ezek az „ősi” jellegű baktériumok genetikailag szinte olyan messze vannak az *eubaktériumoktól*, mint az *eukariótáktól*, és ráadásul a törzsfán az utóbbiakkal alkotnak monofiletikus csoportot! Egy következetes rendszertanos szerint emiatt az „ősbaktériumok” az *eukariótákkal* sorolandók egy taxonba – s ezt a javaslatot a *Neomura* név bevezetésével a brit *T. Cavalier-Smith* meg is tette nemrégiben. (A név „új fal”-at jelent, utalva az *eubakteriális* sejtfal szerkezetének megváltozására.)



**N**os, ez már bizonyosan sok a klaszszikus biológián nevelkedett Olvasónak – és amúgy is előreszaladtunk egy kicsit a fejlemények ismertetésében. Hogyan lehetséges az, hogy „annyi vizsontagság után” végül egy ilyen, *Neomura*-szerű, természetesnek egyáltalán nem tűnő kategóriához jusson el az élővilág klasszifikációja? Ennek megértéséhez az *eukarióták* evolúciójával, s főképpen az *endoszimbiogenezis* folyamatával kell megismerkednünk, amely majd sok részletét megvilágítja e mos-

tani cikkben bemutatott új törzsfának.

Az örökítő anyag, a DNS nemcsak szülőről utódra, hanem más módon, filogenetikailag, azaz a törzsejlődésben távol álló fajok egyedei között is átadódhat, jelentősen növelve ezzel a rekombinációs lehetőségek számát és alkalmanként döntő lökést adva az egyébként igencsak lassú evolúciós folyamatoknak. Közvetlenül a környezetből, sejtek érintkezésével vagy éppen bakteriofágok és más vírusok közvetítésével DNS-szakaszok jutottak át – és jutnak át – egyik fajból a másikba.

A gének átadása-átvittele mellett talán még jelentősebb volt teljes prokarióta sejtek átvétele. A bakteriális sejtfal eltűntével vagy gyengülésével ugyanis lehetségessé vált a fagocitózis, amelynek révén az egyik sejt bekebelezhetette a másikat. Ennek eredményeképpen a bekebelezett sejt rendszerint megemésztődött, de legalább részben feloldódott a másik sejten. Kivételes esetekben a két sejt együtt maradt – mind-

kettőjük számára előnyös együttélésben, szimbiózisban, amire a mai egysejtűek körében is találunk példákat. Ezek a ritka események vezettek végső soron az életnek a bakteriális állapotról jóval látványosabb és sikeresebb formáihoz, az eukarióta szervezetek kialakulásához. A szimbionta sejt ugyanis később integrálódott az anyasejtbe, funkcióinak és génjeinek egy részét elvesztette vagy „átadta” az anyasejtnak, és abban egy adott funkcióra specializálódott – vagyis sejtservecské lett belőle. Az endoszimbiozisz folyamatáról van szó, amelynek lehetőségére – többek között – az orosz K. S. Merezszkovszkij (1885–1921) és az amerikai I. E. Wallin (1883–1969) már a XX. század elején rámutatott, s akiknek elképzelései csak 1970 után, az amerikai L. Margulis szívós munkájának köszönhetően váltak teljesen elfogadottá a biológusok körében.

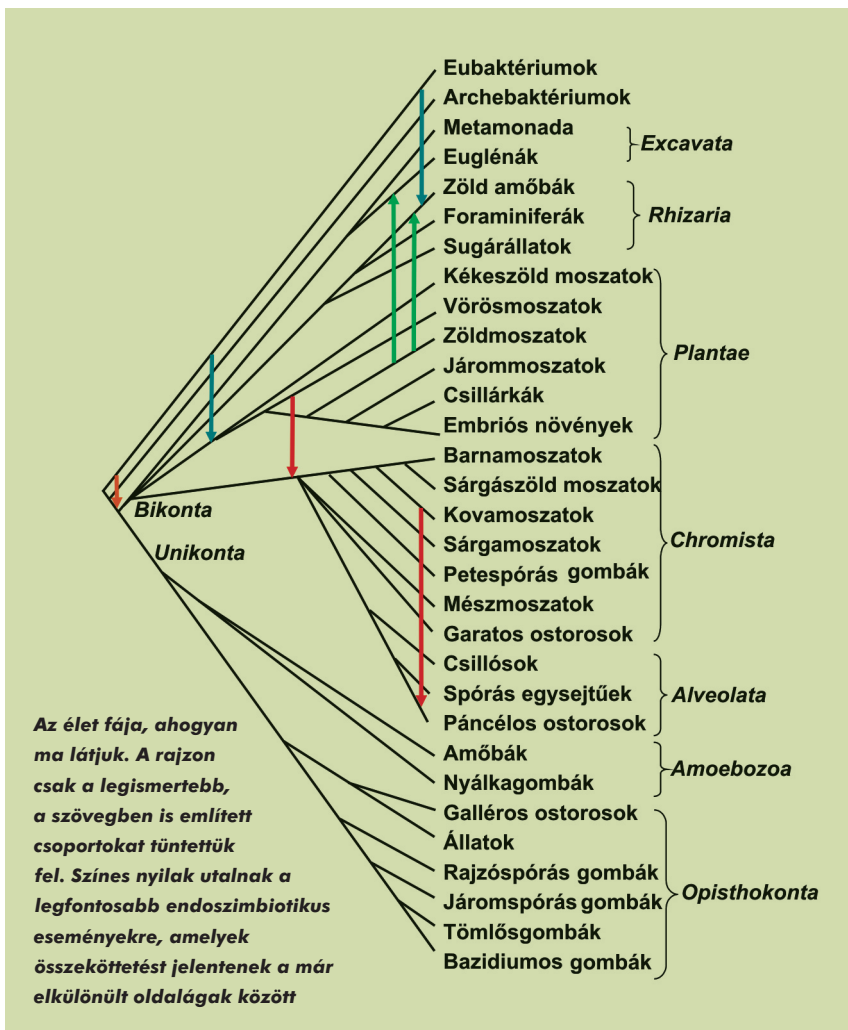
**A**z eukarióták kialakulásának döntő, talán első lépcsőfoka volt,

amikor oxigénmentes élőhelyeken előforduló archebaktérium-szerű ősök eubaktériumokat, mégpedig úgynevezett bíbor nem-kénbaktériumokat bekebeleztek be. Ez utóbbiak oxigén jelenlétében lélegeznek, s bekebelezésük folyamata vezetett az eukarióta sejtre oly jellemző organellum, az energiát szolgáltató *mitokondrium* kialakulására. Ez az esemény – mai tudásunk szerint – egyszer következett be az evolúció során, lehetővé téve az anyasejt fennmaradását oxidatív környezetben is.

Valójában tehát minden eukarióta sejt plazmájában egykori prokarióták leszármazottai nyüzsögnek, önállóságukat elveszítve kis rabszolgaként működnek benne. Genetikai állományuk részben megvan, s éppen úgy hasadással szaporodnak a sejt belsejében, mint szabadon élő bakteriális őseik és mai rokonaik. Az eukarióta csoport eszerint monofiletikus: az endoszimbiozisz folyamata magyarázza meg számunkra az archebaktériumok és az eukarióták relatív közelségét a törzsfán – vagyis azt, hogy a két csoport evolúciója egy közös ősből indulhatott ki.

Mai ismereteink alapján még nem tudunk mindent teljes bizonyossággal megállapítani az eukarióta evolúció kezdeteiről. Bizonyos feltételezések szerint a mitokondrium megjelenése után alakult ki a *sejtmag*, a *sejtközpont* (centriólum) és az eukarióta sejtre jellemző mozgásszervecske, az *ostor*. Vannak, akik ezek létrejöttében is endoszimbiontikus eredetet látnak – a sejtmag esetében például nagy, víruszerű (!) szimbiontákat –, de erre jóval kevesebb bizonyítékunk van, mint a mitokondrium bakteriális gyökereire.

Akárhogyan is volt, az ostorok száma, s ezzel párhuzamosan a centriólum szerkezete tűnik ma a legfontosabb vízválasztónak az eukariótákban belül, ami egyben megmagyarázhatja a törzsfa fő kettéválását is az ábránkon. A kérdést Cavalier-Smith elmélete a következőképpen világítja meg: az ősi eukariótáknak egyetlen ostoruk lehetett, és ez az állapot jellemzi az *Unikonta* ágat, ahova az állatok és a gombák is tartoznak. A másik fő vonalon, ahova a növényeket is besoroljuk, már két ostor és két sejtközpont van, s erre utal a *Bikonta* elnevezés. A két ág elválása körülbelül 850 millió évvel ezelőttre tehető. Az egy- és kétostorosság, persze, csupán az



ősi állapot megfelelője mindkét csoportban, hiszen az ostorok elvesztése vagy éppen többszöröződése az evolúció folyamán gyakori esemény volt, s ostor többnyire amúgy is csak az ivarsejteken figyelhető meg. Vannak azonban biokémiai bizonyítékok is a két fő ág elkülönülésére, ilyen például egy-egy enzim kizárólagos jelenléte valamelyik vonalon.

**M**int láttuk, Whittaker külön birodalomba osztotta a gombákat, az állatokat és a növényeket, de ma már tudjuk, hogy ennél messzebb is mehetünk régi ismereteink felülvizsgálatában. A gombák valójában az állatok és a galléros ostorosok legközelebbi rokonai, vagyis egymás testvércsoportjai az élet fájának Unikonta ágán. Az első megcáfolhatatlan bizonyítékokat erre – a riboszomális RNS és fehérjék szekvenciaadatai alapján – nem túl régen, 1993-ban közölték. Rokonságukat alaktani alapon egyetlen ostoruknak a sejt haladásával ellentétes irányultsága igazolja, innen az állatok és gombák közös ágának elnevezése: hátulsó ostorosok (*Opisthokonta*). Az állatok hímivarsejtjein ez jól megfigyelhető, de igen sok esetben, főleg a gombák később kialakult csoportjaiban, az ostor már teljesen hiányzik.

Ugyanakkor vannak az egyostorosok ágán olyan, hagyományosan a gombák közé sorolt élőlénycsoportok is, amelyek helyzetét ma már világosabban látjuk a nukleinsav-szekvenciáknak köszönhetően. A *nyálkagombákról* van szó, amelyek az Opisthokonta melletti ágán, az *Amoebozoa* rokonsági körbe kerültek, vagyis az amőbák (például a vérhast okozó *Entamoeba*) közeli rokonai. A nyálkagombák egyébként közismerten amőbaszerű szervezetek, de van egy soksejtes, spóratermő életszakaszuk is, és emiatt sorolták be őket régebben a gombák közé. A gombák osztályozását illetően azonban egyáltalán nem ez volt a legnagyobb „melléfogás”.

Az élet Unikonta ágán – a mitokondriumon kívül – nincs más, bizonyosan endoszimbiotikus eredetű organelum, s ennek pontos magyarázatát még nem ismerjük. Más a helyzet a kétostorosok körében, ahol az endoszimbiogenézis folyamata az élet egymástól látványosan különböző formáinak kialakulására vezetett. A német ökológus, A. F. W.

Schimper (1856–1901) – akinek egyébként az „esőerdő” fogalmát is köszönhetjük – már 1883-ban észrevette, hogy a növényi sejtekben található *színtestek* (plasztiszok) hasadással szaporodnak csakúgy, mint a kékalgák. Haeckel is felismerte a kékalgák és a kloroplaszti-

membránja között még az eubakteriális sejtfal is megtalálható. A vörösmoszatok (*Rhodophyta*) plasztiszában már nincs ilyen fal, de a színanyagok hasonlóak. A zöld növények (a zöldalgák és az összes szárazföldi növény a moháktól a zárvatermőkig, gyűjtőneveükön *Viri-*



A prokariótából levetített mitokondrium

szok közötti párhuzamosságot, és felvette a növényi sejt szimbiotikus eredetének lehetőségét. Merezskovszkij pedig a plasztiszokat egyenesen „a növényi sejt kis rabszolgáinak” nevezte.

Ma már biztosan tudjuk, hogy a növények plasztiszának megjelenése lényegében véve egyszerű evolúciós eseménynek köszönhető. Kiindulásként egy kétostoros, mitokondriummal már rendelkező eukarióta anyasejt kebelezett be valamilyen prokarióta sejtet, mégpedig – a sejtéseknek megfelelően – egy kékalgát. Ez utóbbi, amelyet 1974 óta az eukarióta algáktól való megkülönböztetésül és a baktériumrokonság hangsúlyozásaként *cianobaktériumnak* nevezünk, fokozatosan leegyszerűsödött, fotoszintézisre specializálódva színtestté alakult. Első ízben vált képessé ily módon az eukarióta sejt az autotróf életmódra, s ennek igen komoly következményei voltak a földi élet történetében.

Egy olyan evolúciós vonal kiindulásáról van szó, amely a növények birodalmának (*Plantae*) kialakulásához vezetett. A folyamat kezdetét egy kis algacsoport illusztrálja a legjobban: a kékeszöld moszatok (*Glaucochyta*) törzsében a színtestek belső szerkezete cianobaktériumokra emlékeztet, s a színtest két

*diplanteae* közös tulajdonsága a feltűnő színük. Ezt a klorofill-b nevű színanyagnak köszönhetik, amely – egyelőre vitatott módon – akár egy nagyon ősi cianobaktérium öröksége is lehet, de újonnan is megjelenhetett az evolúció során, például géntadás révén.

**A**z új törzsfa tanúsága szerint a növények köre viszonylag szűk, és sok olyan jól ismert csoport kimarad belőle, amelyeket hagyományosan a botanika tárgyal. Hiányolhatjuk az előbbi felsorolásból például az óceánok óriásait, a barnamoszatokat. Ezek tehát nem lennének növények? S a kovamoszatok sem?

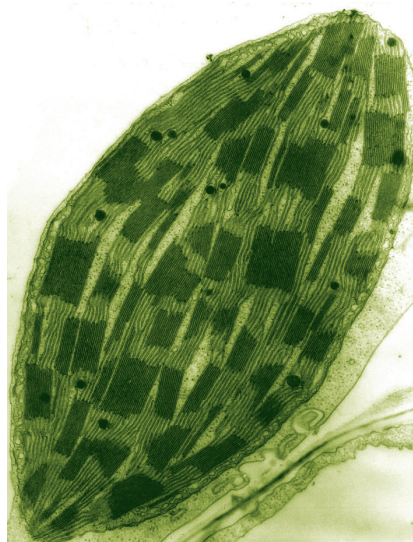
Valóban, a rendszertan ma már a növények definícióját a *Plantae* regnum tagjaira szűkíti le. Ennek magyarázata a plasztisz eredetében keresendő: növénynek azokat az élőlényeket tekintjük, amelyek színtestei közvetlenül egy cianobaktérium bekebelezéséből származnak, vagyis az úgynevezett *elsőleges endoszimbiogenézis* révén jöttek létre. A többi fotoszintézisre képes élőlény esetében más folyamatok vezettek a plasztisz kialakulására. A barnamoszatok, a kovamoszatok és még sok más algacsoport esetében a közös ős, az eukarióta anyasejt ugyanis nem cianobaktériumot, hanem egy másik,

színtesttel már rendelkező eukarióta sejtet – nevezetesen egy vörösalgát – fogadott be magába! Ennek legjobb bizonyítékát a garatos ostorosok (*Cryptophyta*) törzse szolgáltatja, hiszen plasztiszukban az egykori vörösalga sejtmagjának maradványai is megtalálhatók. A maradvány DNS-ének nukleotidszekvenciája pedig leginkább bizonyos vörösmoszatok magbéli DNS-ére hasonlít.

Ám nemcsak a klasszikus botanika egy-egy moszatja tartozik a *Chromista* néven elkülönített birodalomba (nevük a sokféle színanyagra utal), hanem egykor gombának tartott szervezetek is. Példaként a petespórás „gombák” (*Oomycota*) említhetők, amelyek legismertebb képviselője a peronoszpóra. Ezek az élőlények már távoli rokonságban sincsenek a valódi gombákkal: speciális parazita vagy szaprofita életmódúak, mivel elvesztették szintesteiket. A plasztisz egykori meglétét viszont molekuláris bizonyítékok igazolják: egy petespórás gomba sejtmagjában cianobaktérium-eredetű gént mutattak ki. Az nyilván egy korábbi plasztiszból került oda sejten belüli génátadás révén. Hasonló a helyzet az egysejtűek *Alveolata* néven elkülönített csoportjával, utóbbiak jelentős részében is eltűnt a szintest az évmilliók során. A spórás egysejtűek sok fájában, mint például a maláriáért felelős *Plasmodium* esetében viszont nemrégiben megtalálták a szintestek maradványait, amelyek – most már talán nem is annyira meglepő módon – a vörösalgák szintestjeit idézik. Nem is olyan régi tankönyvekben a spórás egysejtűek az állatok rendszerében foglaltak helyet, de ettől láthatólag már jó messze vagyunk...

**S** akkor még nem beszéltünk a *Chromista–Alveolata* ág legkülönösebb tagjairól, a páncélos ostorosokról (*Dinophyta* vagy *Dinoflagellata*). Náluk is megvan a vörösalga eredetű szintest, amelynek létrejötté a garatos ostorosok példáján már leírt, úgynevezett *másodlagos endoszimbiozisének* alapján magyarázható. A páncélos ostorosok azonban „nem elégedtek meg” ezzel, és egy további endoszimbiotikus folyamat révén újabb plasztisszal gazdagodtak. Köreikben a szimbiotikus folyamatok egész tárháza figyelhető meg, például

ul az, amikor az anyasejt egy kovamoszatot kebeleztet be s alakította át szintestté. Itt az endoszimbiozisének még magasabb, *harmadlagos szintjét* fedezhetjük fel (vagyis a plasztisz eredete: cianobaktérium – vörösalga → kovamoszat). A kovamoszatok mellett garatos ostorosok,



**A klorofill-b eredete a kloroplasztiszban még vitatott**

mészmoszatok és más algák is szerepeltek endoszimbionta partnerként egy-egy fajban. Ugyanakkor a páncélos ostorosok sokszor együtt élnek – valódi szimbioziséban – egyéb szervezetekkel, például korallokkal, férgekkel, puhatestűekkel, és más egysejtűek belsejében is megtalálhatók. A szimbiozisé sejten belüli és sejten kívüli változatait tekintve minden bizonnyal csúcstartók az élővilágban.

Vajon előfordul-e páncélos ostoros mint sejten belüli, de abba nem integrálódott szimbionta? Egy eddig még nem említett csoport, a *Rhizaria* (gyökérlábúak) birodalmába tartozó foraminiferák és sugárállatkák (amelyek nem állatok) élnek velük a legnagyobb békében. Egyetlen sejtjüket gyakran védi külső héj, és kétostoros állapotot csaknem mindegyiknél megfigyelhetünk valamely életszakaszukban. Különleges csoportjukat alkotják a zöld amóbbák (*Chlorarachniophyta*), amelyek színe a (másodlagos) endoszimbiotikus eredetű zöldalgáktól származik. A plasztiszban megtalálható az alga csöke-

vényes sejtmagja is – ebben tehát a garatos ostorosokhoz hasonlítanak (bár, mint láttuk, azoknak vörösalga eredetű a plasztisz). A fotoszintézisé mellett fagocitózisé útján is táplálkoznak, vagyis tipikusan mixotróf élőlények. Rokonsági körükbe tartozik az ugyancsak zöld *Paulinella chromatophora*, amelyről viszont csak nemrég derült ki, hogy két darab plasztisz közvetlenül egy cianobaktérium beolvadásából ered. Ez pedig arra utal, hogy az elsődleges endoszimbiozisének egy, a növényektől független másik megvalósulásáról beszélhetünk.

Az *Excavata* csoportba is egysejtűek tartoznak, két vagy több ostorral, vájatszerű sejtzájjal, ami megmagyarázza nevük eredetét. Legismertebb képviselőik az ostoros *Euglenák*. Ezek – bár növényi és állati módon is képesek táplálkozni –, nem tartoznak sem a növények, sem az állatok közé. Fotoszintézisére azok az *Euglena*-fajok képesek – és ezen a ponton a már edzett Olvasó biztosan nem fog meglepődni –, amelyeknek van plasztisz, s az náluk is egy zöldalga valamikori beolvadásából származik.

**L**áttuk tehát, hogy az endoszimbiotikus folyamatok több evolúciós vonalon, sokféle formában, egymástól függetlenül bekövetkeztek, döntő módon befolyásolva az élővilág sokféleségét. Az endoszimbiozisé alapján sok minden magyarázható az élet fájának főbb ágaiban. A mellékelt rajz, persze, nem „végleges”, csupán mai ismereteink egyszerű összesítése. Olyan törzsfát, amelynek minden részlete bizonyoság lenne, még senki sem közölt, és valószínűleg nem is fog egyhamar. Az újabb citológiai és molekuláris vizsgálatok pedig nagy meglepetésekkel is szolgálhatnak, különösen a ma még kevésbé ismert egysejtű szervezetek esetében. Ugyanakkor bőven maradt még „tisztázni”, különösen a közkedveltebb csoportokat, az állatokat és a zöld növényeket illetően – s erre a sorozat befejező részében kerítünk majd sort.

**PODANI JÁNOS**

(Következik két hét múlva: A „felsőbbrendűek”)

A hátlapon

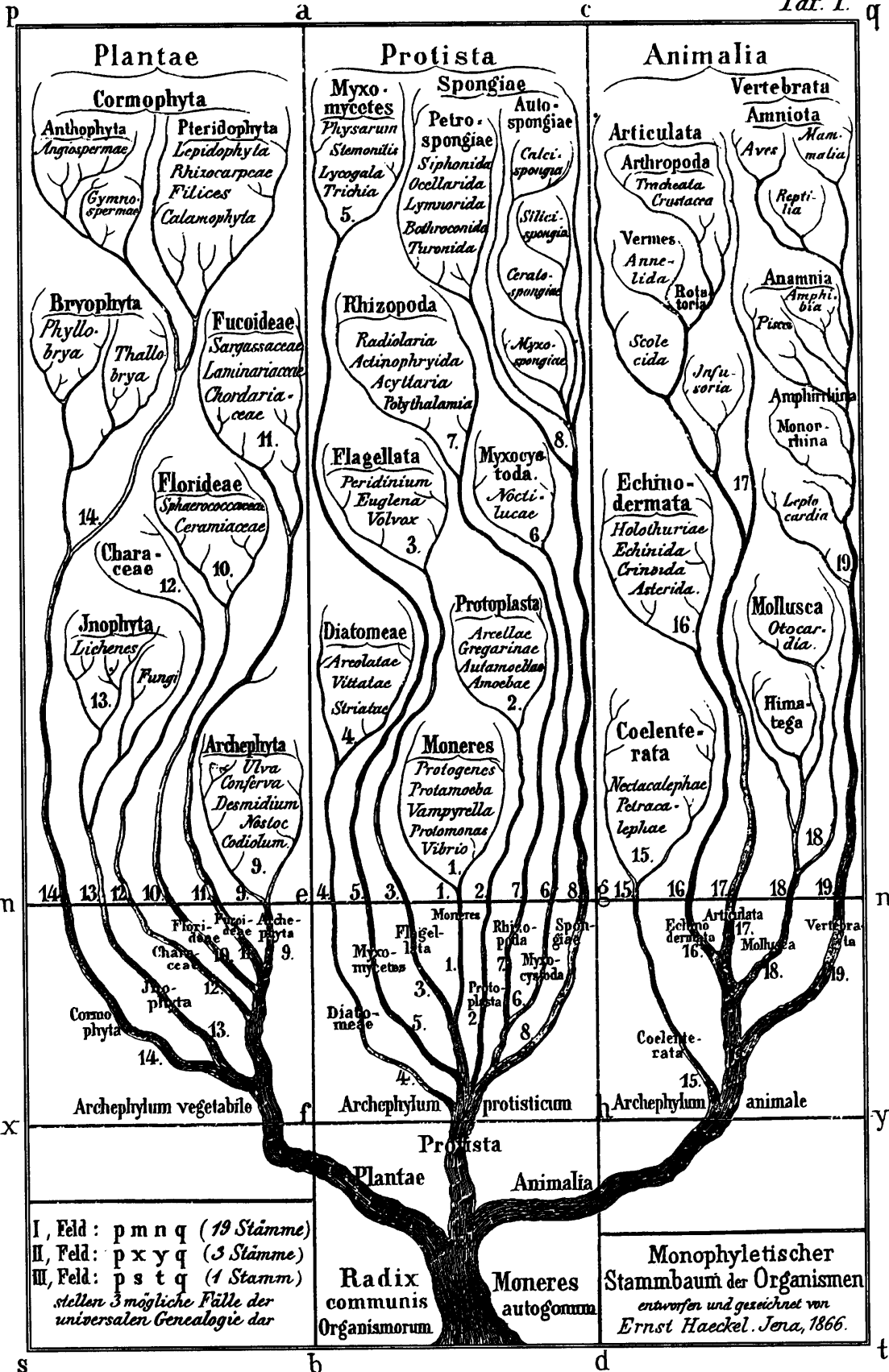
## **Növények, állatok és egysejtűek**

A híres biológus, a darwini eszmék avatott terjesztője, *Ernst Haeckel* (1834-1919) próbálkozott meg elsőként a biológia történetében azzal, hogy az addig ismert összes élő szervezet leszármazási viszonyait egyetlen törzsfában mutassa be. A hátlapunkon látható rajza – amely *Generelle Morphologie* című művében 1866-ban jelent meg – azonban nemcsak emiatt érdemel kitüntetett figyelmet. Haeckel szakított azzal a régi felfogással, hogy az élővilág két nagy csoportra, a növényekre és az állatokra osztható. Szemlélete szerint van még egy, velük egyenrangúan kezelhető nagy csoport, az egysejtűek (*Protista*), amelyeket a fa középső ágára helyezett. Ezzel a döntésével rendszertani változások olyan sorozatát indította el, amelynek eredményeképpen ma már egészen másféleképpen nézünk a növényekre, az állatokra és az egysejtűekre is.

Haeckel már tudott a sejtmag nélküli egysejtűekről, azokat a *Protista* ágon a *Moneres* csoportba sorolta. Meg is jegyezte, hogy a magvas és a magnélküli sejtek között akkora a különbség, mint a „*hidra és egy gerinces, vagy egy egyszerű alga és egy pálma között*”.

Az egysejtes állapotot korántsem tekintjük elsődlegesnek a rendszerezés szempontjából, csupán az élő anyag alapvető szerveződési szintjét látjuk benne. Tudjuk, hogy az egysejtűek világán belül jóval nagyobb citológiai, biokémiai és genetikai eltérések mutatkoznak, mint mondjuk az állatok és a növények között. Vannak egysejtűek, amelyeket teljes bizonyossággal a növények közé sorolhatunk, ugyanakkor az egysejtű állatnak tartott szervezetek jelentős része valójában távol esik az állatok országától.

**P. J.**



I, Feld: p m n q (19 Stämme)  
 II, Feld: p x y q (3 Stämme)  
 III, Feld: p s t q (1 Stamm)  
 stellen 3 mögliche Fälle der  
 universalen Genealogie dar

Radix  
 communis  
 Organismorum

Monophyletischer  
 Stammbaum der Organismen  
 entworfen und gezeichnet von  
 Ernst Haeckel. Jena, 1866.