

A Szathmáry-modell kísérleti megvalósítása: közlemény a Science hasábjain

3.3.2026 - | Magyar Tudományos Akadémia

A földi élet fejlődésének nagy evolúciós ugrásai jellemzően azon alapultak, hogy az élet kisebb részegységei valamiképp képesek voltak félretenni az egymás közti versengést, és az erőforrásokért folytatott versenyben már az általuk alkotott nagyobb egység vett részt (gondoljunk a többsejtű élőlények sejtjeire). A folyamatot elméletben John Maynard Smith és Szathmáry Eörs régen leírták „Az evolúció nagy lépései” című alapművükben, és most elérkezett az idő, hogy egy kutatócsoport kísérletileg is igazolja: valóban létezik olyan mechanizmus, amely megvalósítja ezt az elméletet. A Science hasábjain most közelről követhetjük, ahogy a laboratóriumban lezajlik az evolúció egy nagy lépése.

Körülbelül négy évtizeddel ezelőtt Szathmáry Eörs megfogalmazta azt az elképzelést, amely később „sztochasztikus korrektor” modellként vált ismertté: amikor sok önállóan szaporodó entitás (gének, plazmidok, „protogenomok”) osztozik egy közös „hordozón” (elősejt, sejt), akkor **két egymással versengő szelekciós szint** működhet egyszerre. A gyorsabban replikálódó komponensek **a hordozón belül** győzhetnek akkor is, ha ezzel rontják a hordozó egészének teljesítményét; miközben a hordozók **egymással** is versengenek, és azok lehetnek sikeresebbek, amelyekben a komponensek „jobb csapatot” alkotnak.

Az evolúció nagy lépései (*The Major Transitions in Evolution*; John Maynard Smith és Szathmáry Eörs munkája) gondolkörének egyik központi állítása, hogy a nagy evolúciós ugrásokhoz (gének → kromoszómák; sejtek → többsejtűek; egyedek → euszociális kolóniák) a belső konfliktusokat kezelő mechanizmusokra van szükség, különben a magasabb szintű egység (a hordozó) szétesik.

Miért ideális modellrendszer a plazmid?

A plazmidok a baktériumokban élő, kisméretű, kör alakú DNS-elemek, amelyek önállóan replikálódnak, és gyakran hordoznak hasznos géneket (például antibiotikum-rezisztenciát). Mivel egy sejten belül sok plazmidkópia lehet, természetes módon jön létre a többszintű szelekció:

- Sejten belüli szelekció: a plazmidváltozatok a sejt erőforrásaiért versenyeznek.
- Sejtek közötti szelekció: a baktériumsejtek szaporodásban és túlélésben versengenek, amit a plazmidok javíthatnak vagy ronthatnak.

A Rossine és munkatársai által bemutatott kísérleti áttörés lényege, hogy ezt a két szintet **külön mérhetővé és kombinálhatóvá** tették: a „nagy lépések” (major transitions) jellegű elméleti problémát valós időben követhető kísérletté alakították.

Mit csinált a Science-cikk (az ötlet kulcsa)?

A sejten belüli konfliktus vizsgálatának egyik nagy gondja, hogy a verseny „igazságos” indítása nehéz: egy új plazmidvariáns általában ritkán jelenik meg, és nehéz szétválasztani, mi történt sejten belül, illetve mi a sejtek közötti versengés következménye.

A szerzők ezt úgy oldották meg, hogy szintetikus plazmid-heterodimereket készítettek: két különböző plazmidot fizikailag összekötöttek, így kezdetben egy egységként kellett replikálódniuk. Ezután egy

indukálható, hőérzékeny enzimmel („Patagonian” FLP) tetszőleges időpontban ketté tudták vágni a dimert két monomerre, és így olyan sejtek tömegét hozták létre, amelyekben **ugyanannyi** kópia indult mindkét versenyzőből.

Ezután különböző tenyésztési elrendezésekkel hangolták, mennyire számítson a sejtszintű szelekció. A mikrofluidikai „anyagép” rendszerekben például nagyrészt elnyomható a sejtek közötti reprodukciós különbség, így a megfigyelt változások főként a sejten belüli dinamikát tükrözik.

Fő eredmény: a sejten belüli konfliktus meglepően lassú

Ha két plazmidváltozat ugyanabban a sejtben él, elsőre azt várnánk, hogy az utódsejtekbe való véletlen szegregáció hamar „kiszórja” az egyiket. Ehhez képest a versengés meglepően lassú és tartós volt: a kevert állapot („heteroplazmia”) kb. 22 sejtosztódásnyi felezési idővel csökkent, míg végül véletlenszerűen az egyik plazmid rögzült.

Ennek nagy jelentősége van: hosszú időablak nyílik arra, hogy a sejten belüli szelekció érdemben alakítsa a kimenetet, és közben kölcsönhatásba lépjen a sejtek közötti szelekcióval (például terjedés, antibiotikum-stressz, kolóniák növekedése során).

A feltárt molekuláris „sztochasztikus korrektor” mechanizmusa

A kezdeti modellek gyorsabb szegregációt jósoltak. Ahhoz, hogy a modell illeszkedjen az adatokhoz, be kellett vezetni egy „eclipsing” (átmeneti gátlás) periódust: miután egy plazmid lemásolta magát, egy ideig kisebb eséllyel indul újra replikáció.

A szerzők ezt közvetlenül tesztelték a plazmid egyfajta módosításával, ami az újraindítást kapuzza. Az „eclipse” lerövidítése felgyorsította a szegregációt, pontosan a jóslatnak megfelelően.

Vagyis: egy konkrét molekuláris szabályozási részlet képes **enyhíteni a belső versengést**, meghosszabbítva az együttélést és mérsékelve azt, mennyire tudnak a „önző” különbségek érvényesülni sejten belül – ez pedig nagyon szépen rímel arra, amit a „nagy lépések” kerete szerint a magasabb szintű egységek fennmaradásához várunk.

Amikor a „jó a sejtnek” rossz a plazmidnak (és fordítva)

A csapat ezután a többszintű szelekció klasszikus feszültségét vizsgálta: a hasznos gének aktivitása segítheti a **sejtet**, de költséget jelenthet a **replikálódó elemnek**.

Promoterek és riboszóma-kötőhelyek hangolásával olyan helyzeteket hoztak létre, amelyekben a **sejten belüli** és a **sejtek közötti** „rátermettség” ellentétes irányba húz.

A dinamikák erősen környezetfüggők voltak:

- Az „anyagépben” (minimalizált sejtszintű hatás) a sejten belüli folyamatok dominálnak.
- Jól kevert folyadékkultúrában a sejtszintű szelekció dominál.
- Szilárd felületen a két szint időben egymás után is hat, kétfázisú lefutást adva.

Miért tekinthető ez a „nagy lépések” logika kísérleti demonstrációjának?

A kommentár a plazmidokat „félautonóm replikátorként” mutatja be, amelyek egyfajta **átmenet előtti** állapotban élnek – pontosan ott, ahol a szelekciós szintek még nincsenek teljesen „összehangolva”.

Rossine és munkatársai tanulmánya kísérletileg megfoghatóvá teszi a „sztochasztikus korrektor / nagy lépések” képét:

1. A konfliktus egyszerre több szinten zajlik (plazmid vs. sejt).
2. Konfliktuscillapító mechanizmusok léteznek (az „eclipsing” lassítja a sejten belüli versenyt).
3. Az ökológiai környezet dönti el, melyik szint erősebb (struktúra, keveredés, térbeliség).
4. A kimenetek lehetnek ellentmondásosak, például a sejt számára „legjobb” plazmid is sérülékeny lehet „csaló” variánsokkal szemben bizonyos körülmények között.

Összességében ez ritka, tiszta kísérleti betekintés egy mély evolúciós alapelvbe: a nagy evolúciós lépésekhez a belső versengés kordában tartása szükséges – az a gondolat, amelyet Szathmáry már évtizedekkel ezelőtt megfogalmazott, és amelyet most egy precízen tervezett, számszerűsíthető biológiai rendszerben igazoltak.

Irodalom

Szathmáry Eörs – John Maynard Smith: *A földi élet regénye*. Budapest: Akadémiai Kiadó, 2012.

Rossine, F. – Sanchez, C. – Eaton, D. – Paulsson, J. – Baym, M.: Intracellular competition shapes plasmid population dynamics. *Science*, 2025. dec. 18.; 390(6779):eadx0665. doi: 10.1126/science.adx0665. Epub 2025 Dec 18. PMID: 41264676.

Campbell N. R. – Goyal, Y.: Revisiting the molecular workhorse: plasmids in evolutionary conflict. *Nature Reviews Genetics*, 2026. febr. 4. doi: 10.1038/s41576-026-00942-6. Epub ahead of print. PMID: 41639389.

https://mta.hu/mta_hirei/a-szathmary-modell-kiserleti-megvalositasa-kozlemeny-a-science-hasabjain-115195