

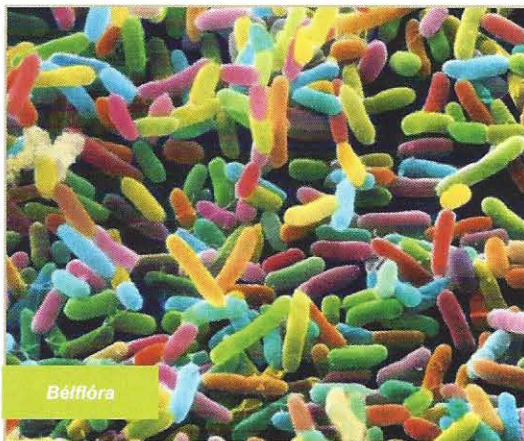
KOMMUNIKÁCIÓ, IQ, ÖSSZEOMLÁS

A baktériumokat a kutatók sokáig magányos sejteknek tekintették, melyek egyszerűen csak fogyasztják a környezet tápanyagait. Az utóbbi tíz-húsz évben terjedt el fokozatosan az a szemlélet, hogy a baktériumok társas lények, amelyek kémiai jelzések révén folyamatosan tartják egymással a kapcsolatot, és nagy közösségekben, egymással kooperálva használják ki a környezet erőforrásait.

A baktériumközösségek nagyon gyakoriak környezetünkben. Az ember is óriási számú baktériummal él együtt, a bőrön vagy az emésztőcsatornában is sok fajból álló összetett közösségek élnek, amelyek például megvédnek bennünket a kórokozóktól vagy – mint például a bélflóra – alapvető tápanyagokat is megtermelnek számunkra. De ilyenek a kérődzők jól ismert bendő-baktériumai is. Az utóbbi években vált nyilvánvalóvá, hogy a baktériumközösségek tevékenysége az élővilág anyagátalakító, metabolikus tevékenységének legfontosabb része, tehát a klíma alakulásában, a természet egyensúlyának fenntartásában is döntő szava lehet. A tengerfenéken országnyi baktériumszőnyeget találunk, az óceánok vizében fellelhető mikrobák tömege nagyobb, mint az élővilág többi szereplője együttesen. Az ember természetesen szeretné befolyásolni a baktériumközösségeket, a gyógyászatban és a környezetvédelemben egyaránt, és ehhez tisztában kell lennünk az alapelveikkel.

Egyes feladatokat a baktériumok csak közösen tudnak elvégezni. Például egy gazdaszervezet burkolórétegeinek áttöréséhez egyetlen sejt nem tud elegendő emésztőenzimet termelni, sok sejt együttműködésére van szükség. Az együttműködés során termelt enzimek a kooperáció eszközei, közjavak, az egész közösség érdekét szolgálják, általuk a közösség egésze aktivizálódik. Kis túlzással: a baktériumközösség mint egyetlen élőlény aktivizálja magát, önálló egységként lép fel. Tény,

hogy lehet bizonyos közösségi intelligenciáról beszélni, és ezen a kooperációs alapon már sikeres technológiákat is fejlesztenek. A sejtek koordináció nélkül, önmagukban nem termelhetnek folyamatosan enzimeket, ez nemcsak pazarlás lenne, hanem csúfos vereség: a sejtek egyszerűen éhen halnának. Ilyen nagy energiabefektetésnek csak akkor van értelme, ha elegendő számú baktérium van a gazdaszervezet közelében. Tehát kommunikációra (egymás érzékelésére) és kooperációra (környezetbe



Bélflóra

kibocsátott közjavak, például enzimek termelésére) van szükség. Természetesen a baktériumok sem anyagok, versengenek egymással a tápanyagokért és a helyért, és ezeknek a sokrétű interakcióknak az eredményeként alakulnak ki a baktériumközösségek.

Mit mutatnak a génvizsgálatok?

A gének katalogizálása csak nagyon közvetve segíti az együttműködés megértését. Ugyanis egy természetből vett minta baktériumainak döntő hányada ismeretlen faj, amely a jól ismert alap-

funkciók mellett 20-50 százalékban ismeretlen funkciójú, még soha sem látott géneket hordoz. Csak sejteni lehet, hogy nagy részük a sejtek által kibocsátott anyagok előállításával kapcsolatos, de hogy ezen belül pontosan mire valók, arról elképzelésünk sincs. Ráadásul egy egyszer észlelt baktériummal talán nem is fogunk többet találkozni. A bacik egy része ugyanis nem is tenyészthető, így laboratóriumban nem tudjuk vizsgálni. Marad tehát az úgynevezett metagenomikai megközelítés, amely-

lyel elsősorban a jelenlévő fajok számát, jobb esetben ismert funkciójú génjeiket térképezhetjük fel. Itt figyelték meg, hogy miközben egyes közösségek, például az emberi bélflóra baktérium-összetétele emberek között is különböző és időben viszonylag gyorsan változik, a teljes közösségben észlelhető funkciók szinte változatlanok. Vagyis úgy tűnik, mintha esetről esetre más baktérium-kombinációk hordoznák ugyanazokat a funkciókat. A közösség tehát úgy viselkedik, mint egyetlen soksejtű szervezet. Ez több mint népszerű

metafora, ha ugyanis két baktériumfaj két különböző antibiotikumra rezisztens, együttesen át tudnak haladni olyan környezeti zónákon, amelyek vagy az egyik, vagy a másik antibiotikumot tartalmazzák. Vagyis tudásuk összeadódhat. Mindennek látható eredménye, hogy bizonyos környezetben az egyik, bizonyos környezetben a másik sejtípus van többségben, a közösség tehát összetételének módosításával válaszol a környezeti hatásokra.

Másik érdekesség, hogy még ha pontosan nem is, de felépítésükből, szkeletárujokról nagyjából fel lehet ismerni



a kémiai érzékelés génjeit. Itt is nagyok a különbségek, egy-egy baktériumtípusnak jóval több mint száz ilyen rendszere van, másoknak csak 2-3. Ezt a számot a baktériumok IQ-jának is szokták nevezni, mert feltehetően köze van ahhoz, hogy a baktériumok sok vagy kevés környezettípushoz tudnak alkalmazkodni.

Segít a modell

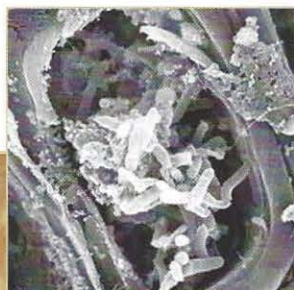
Mivel túlságosan bonyolultak a rendszerek, a génállomány alapján nem-hogy a komplex és változatos közösségek, de még az egyes sejtek viselkedésére sem tudunk pontos előrejelzéseket adni. Pedig nyilvánvaló, hogy az egymástól nagyon eltérő baktériumközösségek viselkedésében sok a közös elem: felépülnek, diverzifikálódnak, összetételük változásával alkalmazkodnak a környezethez, időnként összeomlanak. Ezeket a jelenségeket pedig csak modellkísérletekkel tudjuk pillanatnyilag vizsgálni, akár laboratóriumban, akár számítógépekkel.

Talán a legizgalmasabb a közösségek lényegét adó kommunikációs és kooperációs hálózatok modellezése. Ennek modelljei véletlenszerűen mozgó pontok, „ágensek”, amelyek fogyasztják a körülöttük lévő tápanyagot, és kibocsátott jelekkel tartják egymással a kapcsolatot. Ha a sejtek száma már elér egy határt, a jelek mennyisége is emelkedni fog, és ez beindítja a kooperációs anyagok termelését és kibocsátását. Ezek hatására a sejtek aktív, mozgékony állapotba kerülnek. Így a rendszer utánozza a baktériumok életmód-változását: az aktívabb állapotot a közösség csak együtt tudja fenntartani. Ha megszűnnek a jelek, például a kö-

zösség tagjait szét-szórjuk a környezetben, azok ismét visszasüllyednek az alapállapotba és várják az új közösségek létrejöttét.

Ha a sejtek kommunikációs készsége károsodik, de még kooperálnak, akkor részt tudnak venni a társadalmi munkamegosztásban. Elegendő, ha a társadalomnak csak egy kis há-

nyada kommunikál, a többi pedig követi az utasításokat és termeli a költséges kooperációs anyagokat. Ez olyan, mintha a társadalom többsége csak fizetné az adót, és követné a



Xylella fastidiosa elektron-mikroszkópos felvételen



Xylella fastidiosa okozta fertőzés az olajfán

felső rétegek utasításait. Sokkal veszélyesebb, ha megjelennek az olyan mutánsok, melyeket az irodalom csaloéknak nevez, amelyek se nem kooperálnak, se nem kommunikálnak. Kívül vannak a társadalmon, csak élvezik a közjavakat, amelyeket megtermelni képtelenek. Mivel nincs kommunikáció sem, ezek a sejtek végül is összedöntik a társadalmat, mert elveszik a működést fenntartó, közjavakat termelni képes sejtek életterét.

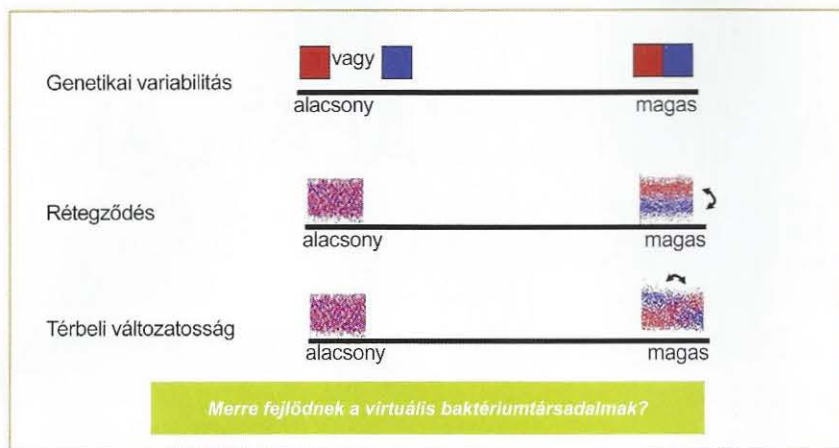
A külső jelekre való reagálásnak van egy természetes és jól ismert következménye: a sejtek képesek külső jeleket követni. Így például egy növény képes magához csalogatni olyan talajbaktériumokat, amelyek felismerik az általa kibocsátott jeleket. Márpedig ez fontos, mert egy növénynek létérdeke, hogy körülötte kialakuljon egy mikrofóra – ezt a kertben trágyázással szoktuk segíteni.

Közös nyelv

A baktériumok nagyon sokféle kémiai jelanyagot használnak, jelrendszereik megismerése egyebek között ezért is nehéz. Ugyanakkor feltűnő, hogy a baktériumfajok gyakran egymás jeleire is reagálnak, néha igen sok jeltípusra képesek válaszolni. A modellszámítások kimutatják, hogy a közös nyelvet használó fajok harmonikusan együtt tudnak élni, homogén közösségeket tudnak alkotni. Közös nyelv hiányában csak a versengés érvényesül, a sokféle jel megértése viszont alkalmassá tesz a komplex közösségekben való

részvételre.

Érdekes, hogy a baktériumok eltérő érzékenységgel reagálnak a „közös nyelv” jeleire. Ennek van egy logikus hozadéka: az a baktérium, amelyik magasabb jelszintnél kapcsol be, előnyt ad azoknak, amelyek már alacsonyabb jelszintnél is aktivizálták magukat. Így a két bacitípus egymás jelenlétében is stabilisan tud létezni, homogén közösséget alkotnak. A társadalomtudományokban ezt altruizmusnak, önzetlenségnek, önkont-



rollnak nevezik, a modellezésnél pedig egy egyszerű tény, amely antropomorf elnevezések nélkül is létrejön. A közös nyelvnek van egy másik következménye is: a baktériumok követni fogják azokat a társaikat, amelyek elegendő mennyiségű „közjavakat” termelnek maguk körül. Tehát ha egy baktériumfaj elindul egy növény felé, mert érzi a hívójelet, akkor olyanok is követni tudják, amelyek csak élőködnek az általa kibocsátott anyagokon. Ez oda vezet, hogy egy-két hívójelre nemcsak néhány, de sok baktériumtípus meg fog jelenni a gyökérzet körül, azaz rövid idő alatt is komplex talajflóra épülhet ki. De mi történik, ha egy patogén faj csinálja ezt? Erre is van példa. Az olajfa törzsének tumorszerű burjánzását okozó csomóbetegséget elvben egyetlen kórokozó bacifaj (a *Pseudomonas savastanoi*) képes létrehozni. De ha már létrehozta, akkor a növényen belül csatlakozik hozzá két másik és önmagában véve ártalmatlan bacifaj is, melyek ott élnek az olajfatorzs tápanyagcsatornáiban. Mikor csatlakoznak a támadóhoz, nagyban fokozzák a betegség súlyosságát. Ki lehetett mutatni, hogy a békés bacik a támadóval azonos kémiai nyelvet beszélnek, a támadó mintegy odahívja, „rekrutálja” őket a betegség helyére.

A változás okai

A baktériumközösségek elsősorban a környezethez alkalmazkodnak. Sokféle környezet és sokféle változás van, és sokféleképpen maguk a baktériumközösségek is. A kommunikáció és kooperáció mechanizmusai lehetővé teszik, hogy a baktériumok néhány változást a génjeikben kódolt módon követni tudjanak. Például egy rezisztens baktérium meg-

tud emésztetni egy bizonyos antibiotikumot, és így közvetlen környezetében más, nem-rezisztens baktériumtípusok is megélhetnek. Mindez csak bizonyos határig működhet, de jelzi, hogy a közösség egyes tagjainak aktivizálódásával is tud alkalmazkodni. Nagyobb változásoknál már persze ez sem segít, a közösség összeomlik, azaz egyes fajokat elveszít, megváltozik a térbeli struktúrája stb.

De alkalmazkodni kell és lehet az állandó környezethez is. Képzeljük el, hogy egy baktériumfaj a természetben sokféle környezetben képes megélni. Ezt rendszerint a kommunikáció és kooperáció genetikai mechanizmusai segítik. Ha például a baktérium meghódít egy védett életteret, ott már nincs szüksége ezekre a bonyolult mechanizmusokra, látszólag minden következmény nélkül elveszítheti ezeket a géneket, de ennek az az ára, hogy már nem lesz képes elhagyni a védett környezetet. Kicsit olyan ez, mint amikor a konkviztádorok egy gyarmatot akartak meghódítani: érteniük kellett a harcművészetekhez, a hajózáshoz, a fegyverek készítéséhez, az iránytűhöz és egy sor mesterséghez. Mihelyt azonban meghódították, ott már elég volt, ha az ezüstbányák felügyeletéhez értettek, és nem okvetlen maradt meg az anyaországból hozott technikai tudás, amellyel képesek lettek volna önálló hajóhadat kiállítani, hogy később máshová költözzenek. Úgy is fogalmazhatunk, hogy ha a közösség megszokja az állandóságot, óhatatlanul veszíti a nyílt természetben nélkülözhetetlen rugalmasságából.

Számítógépes modellek segítségével általánosabban is fogalmazhatunk: Néhány tipikus módja van annak, amikor egy közösség természetes, kompe-

titív viszonyokhoz alkalmazkodik, és mindezt a diverzifikáció szóval foglalhatjuk össze. Diverzifikálódhat térben: komplex struktúrák jelennek meg. A víz alatti felületeket borító baktériumrétegekben például csatornák alakulnak ki, ahol beáramlik a tápanyagokat hordozó külső közeg, és a különböző bacifajták elkülönült helyeken élnek. Ha új mutánsok jelennek meg, genetikailag diverzifikálódik a közösség. És végül társadalmi rétegződést is látunk, egyes típusok közelebb vannak a tápanyagokhoz, mások pedig alárendelt helyeken. Az így kialakuló komplex baktériumtársadalmak a maguk megszokott körülményei között stabilisnak látszanak. De nem tűrik a mesterséges beavatkozást. Ha csökkenteni akarjuk a genetikai változatosságot vagy meg akarjuk szüntetni a tápanyagok szerinti rétegződést vagy a térbeli elkülönüléseket, a közösség összedől. (Itt óhatatlanul eszünkbe kell jusszon, hogy az emberi társadalom esetében a XX. században voltak kísérletek a genetikai diverzitás és a társadalmi rétegződés csökkentésére – mindkét törekvés országok és földrészek társadalmait omlasztotta össze. Ma pedig szemtanúi vagyunk az eddig térben elkülönülten fejlődött kultúrák mesterséges összekeveredésének...)

Az összedőlés forgatókönyve egyébként nagyon hasonló a legtöbb biológiai rendszerben, sőt a technikai konstrukcióknál is. A rendszer először veszíti rugalmasságából, kezd lassabban reagálni a környezeti változásokra, és egyre nagyobbak a fluktuációk, azaz a normális állapottól mért eltérések. Ezt mikrobiális közösségekben kísérletesen is tapasztalni lehet, de itt egyúttal csökken a kommunikáció és megszakad a sejtek közötti kooperáció is. Ilyen hatás mesterségesen is előidézhető, elegendő egy kooperatív modell-társadalmat beoltani olyan mutánsokkal, amelyek nem kooperálnak, nem járulnak hozzá a közösség fenntartásához. Egy-két elszigetelt mutánssal szemben még csak-csak védekezik a populáció, de ha lassan reagál, és hagyja, hogy nagyobb göcpontok alakuljanak ki, akkor már mindenképpen bekövetkezik az összeomlás.

PONGOR SÁNDOR
JUHÁSZ JÁNOS
LIGETI BALÁZS