

kontinensek belsejében télen jellemző, erős hosszuhullámú kisugárzás miatt alakul ki. Ezen a télen gyakran előfordult, hogy a szibériai pólus nem hűlt le a szokásos mértékben, ugyanis a felhalmozódó hideg levegő átáramlott az északi sarkvidéken keresztül Kanadába (8. ábra). A szibériai hideg Kanadába történő átáramlásában jelentős szerep jutott a Csendes-óceán keleti partjainál, illetve Japán térségében kialakult hatalmas ciklonoknak. A ciklonok Ázsia keleti partvidékén vonultak északnyugati irányba és az áramlási rendszerük messze északra benyúlt Szibéria keleti területei fölé. A kanadai hideg mag így nemcsak a saját területeken történő kisugárzás, hanem a Szibériából jövő „hideg import” által is erősebb lett. Mindezt az Egyesült Államok és főként Kanada lakossága ugyancsak megtapasztalta a gyakori rendkívül zord, téli időjárás következtében. A kanadai hideg mag délkeleti oldalán, sarkvidéki és a meleg déli levegő közötti frontrendszeren gyorsan kialakultak a ciklonok, a hosszú frontrendszer mentén létrejövő összeáramlás pedig a délebbi óceáni területek meleg és nedves levegőjét is északra mozdítja. A kanadai hideget körülvevő frontrendszer fölött szinte egész télen folyamatosan fennmaradt a hidegmagot körüláramló jet stream. A fentiekből következően a szokatlanul megerősödő kanadai hidegmag és a melegebb Atlanti-óceán határán mindhárom ciklogenetikus hatás jele volt, így indulhatott be a több hónapra keresztül működő „ciklongyár”.

Hazánk időjárására közvetett hatással voltak az atlanti viharok: a ciklonok déli oldalán rendszerint enyhébb légtömegek áramlottak a térségünk fölé és hozzájárultak az egész Európában megfigyelhető szokatlanul enyhe télhez. A viharciklonok a viszonylag stabil mozgású és hosszan fennmaradó nagytérségű légköri hullámokhoz – planetáris hullámokhoz – képest kisebb objektumok. A gyors mozgású viharciklonok ráakodva a planetáris hullámokra tovább növelik a globális cirkuláció turbulenciáját, egyszersmint növelik a középtávú (5–10 napos) előrejelzések bizonytalanságát. ☞

## Irodalom

- J. Bjerknes and H. Solberg, 1921: Ont the life of cyclones and the polar front theory of Atmospheric Circulation. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 50, 468–473.
- Shapiro, M.A., Keyser, D., 1990: Fronts, jets streams and tropopause. In: *Extratropical Cyclones*. American Meteorological Society.
- Thorncroft, C.D. and Hoskins, B.J. 1990: Frontal cyclogenesis. *Journal of Atmos. Sci.*, Vol. 47
- R. S. Plant, 2004: The dynamics of a midlatitude cyclone with very strong latent-heat release. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* Vol. 130.

# SIPOS ORSOLYA

## Együttélő egysejtűek

### Baktériumközösségek a természetben és mikrocseppekben

#### A Doktorandusz cikkpályázatunk 2014 évi nyertesei

A Tudományos Ismeretterjesztő Társulat és a Doktoranduszok Országos Szövetsége által közösen meghirdetett Doktorandusz cikkpályázat Természet Világa kategóriájának nyertesei:

**I. díj.** Sipos Orsolya: Együttélő egysejtűek: Baktériumközösségek a természetben és mikrocseppekben című pályamunkája (Szegedi Tudományegyetem, Multidiszciplináris Orvostudományok Doktori Iskola, témavezető: Galajda Péter)

**II. díj.** Ungvári Zsuzsanna: A térképi generalizálás automatizálása című dolgozata. Hogyan készítsünk jó térképet? (ELTE TTK Földtudományi Doktori Iskola, témavezető: Márton Máttyás)

**III. díj.** Cserkés-Nagy Ágnes: Ösvízrajztól a paleoklimáig. Pleisztocén folyóvízi üledékek a Tisza alatt (ELTE TTK Földtudományi Doktori Iskola, témavezető: Sztanó Orsolya)

Az első három helyezett írást e számunkban olvashatják, a megjelenésre érdemes írásokat folyamatosan közreadjuk.

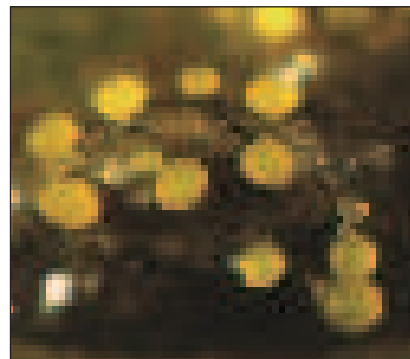
Földünk ökoszisztémájában igen fontos szerepet játszanak a baktériumok. Fotoszintetizáló egyedek részt vesznek legalapvetőbb energiaforrásunk, a napenergia hasznosításában, míg mások az elhullott élőlények lebontásában és újrahasznosításában játszanak fontos szerepet, folyamatosan segítve ezzel a földi bioszféra megújulását. Sőt azt is elmondhatjuk, hogy mikrobiális közösségek nélkül Földünk csodálatos biodiverzitása sem jöhetett volna létre.

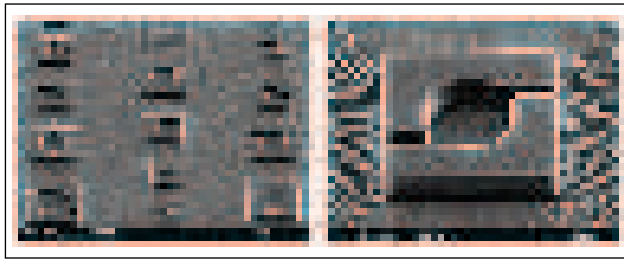
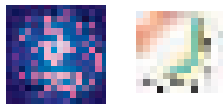
Körülbelül 3,8 milliárd évvel ezelőtt jelentek meg az első egysejtű élőlények a Földön, melyek a prokarióták, a baktériumok és az archeák, illetve az eukarióta (sejtmaggal rendelkező) szervezetek közös őseinek tekinthetők. Bolygónk 4,6 milliárd éves történetének túlnyomó részében, csupán mikroorganizmusok népesítették be a Földet. A cianobaktériumok körülbelül 3 milliárd éve jelentek meg a baktériumfajok színes palettáján. Egyik anyagcsere-melléktermékük a molekuláris oxigén volt, melynek kibocsátásával lehetővé tették az oxigén feldúsulását a Föld légkörében az évmilliárdok során. Ez feltétlenül szükséges volt ahhoz, hogy a ma is megfigyelhető, bonyolult életformák kialakulhassanak, melyek oxigént használnak fel anyagcserefolyamataik során. Földünk légkörének ma mérhető oxigénszintjét természetesen csak lassan voltak képesek a

cianobaktériumok kialakítani, körülbelül 500–800 millió évvel ezelőtt érthette el a ma is megfigyelhető kb. 21%-os szintet a légkör oxigéntartalma. A molekuláris oxigén megjelenésének másik mellékhatása az ózonréteg kialakulása volt a Föld légkörében, mely védelmet biztosított az UV-sugárzás DNS-t károsító hatásai ellen, és ezáltal lehetővé tette, hogy a bioszféra a szárazföldön is virágozni kezdhesen.

#### 1. ábra. Az egyes „fruiting body”-nak nevezett multicelluláris képződményeket több százezer *Myxococcus xanthus* sejt alkotja

(Forrás: Gross (2005) *Antisocial Behavior in Cooperative Bacteria (or, Why Can't Bacteria Just Get Along?)*. *PLoS Biol* 3(11): e398





**2. ábra. Baktériumközösségek vizsgálatára alkalmas mikrofluidikai kamrák pásztázó elektronmikroszkópos felvételei**

Jelenlegi ismereteink szerint hozzávetőlegesen  $2,5 \cdot 10^{30}$  baktérium él bolygónkon. Ahhoz, hogy elképzelhessük ezt a hihetetlenül nagy számot, gondoljunk a csillagos égre fölöttünk. A Tejútrendszerben a csillagok száma  $10^{11}$ – $10^{12}$ -re tehető, és ma már azt is tudjuk, hogy a világegyetem hozzávetőlegesen  $10^{11}$ – $10^{12}$  galaxist tartalmaz. Ebből (feltételezve, hogy az Univerzumban található galaxisok egyforma méretűek és egyforma csillagsűrűségűek) megbecsülhetjük, hogy az Univerzumban található csillagok száma közelítőleg  $10^{22}$ – $10^{24}$  között van. Természetesen ez csak nagyon durva közelítés, hiszen a galaxisok mérete és az azokat felépítő csillagok száma nagyban eltérhet egymástól, azonban most tekintsünk el ettől. Tehát, ha ezen becsléseket elfogadjuk, kiderül, hogy legalább néhány nagyságrenddel nagyobb a bolygónkat benépesítő baktériumok száma, mint ahány csillag található az egész Világegyetemben. A számok hihetetlennek tűnnek, de nem szabad elfelejtenünk az egyes baktériumok méretét. Egy mikroba 0,5–5 mikrométer körüli átlagos mérettel rendelkezik, mely azt jelenti, hogy  $1 \text{ mm}^2$  felületen akár 1 millió ( $10^6$ ) baktérium is elfér egymás mellett. Így már nem is olyan nehéz ekkora számban jelen lenni a bolygónkon.

Érdekes megemlíteni azt is, hogy az emberi testet körülbelül  $10^{13}$ – $10^{14}$  sejt építi fel, míg a testünkön és testünkben élő baktériumok száma közelítőleg  $10^{14}$ – $10^{15}$ , vagyis körülbelül tízszer annyi baktériumsejt él velünk szoros kölcsönhatásban, mint ahány „saját” sejt építi fel a testünket. Ezen egysejtűek nem patogének, nem okoznak megbetegedést, sőt többségük kifejezetten szükséges egészségünk fenntartásához. Ugyanakkor a kórokozók vizsgálata és a fertőzések lefolyásának mélyebb megértése tudományosan legalább olyan fontos, mint a barátságos mikrobák velünk és egymással való kölcsönhatásainak megismerése. A patogén baktériumok tanulmányozása, a baktériumközösségek közötti kapcsolatok megértése nagyban hozzájárult az utóbbi száz évben a fejlett országok egészségügyében bekövetkezett változásokhoz. Száz évvel ezelőtt a legtöbb halálesetet okozó megbetegedés még gyakran valamilyen bakteriális fertőzés volt, mint a

tüdőgyulladás vagy a tuberkulózis. Ma már az ilyen jellegű halálesetek száma jelentős mértékben csökkent, hála a mikrobiológiai kutatások eredményeinek klinikumban történő alkalmazásának.

A sejt az élet alapvető építőeleme, melyet egy féligáteresztő membrán határol el

környezetétől. Ez a határoló felület lehetővé teszi különböző anyagok felvételét és kibocsátását a környezetbe, illetve a sejtek és környezetük közötti kommunikációt kémiai jelzőmolekulákon keresztül. A baktériumok ennek megfelelően szoros, de egyben nagyon dinamikus kölcsönhatásban állnak az őket körülvevő környezettel ezen féligáteresztő membránon keresztül.

Bár hajlamosak vagyunk eme parányi egysejtűekre magányos, elszeparált élőlényekként tekinteni, a baktériumok kifejezetten társas lények. Tudnak kommunikálni egymással, együttműködni más egyedekkel, jeleskednek a munkamegosztásban, de akár arra is képesek, hogy megtévesszék egymást, vagy az őket hordozó gazdaszervezetet, ha a helyzet úgy kívánja. Mindezeket a komplex viselkedési formákat direkt sejt-sejt kapcsolatokon, illetve kibocsátott és érzékelt kémiai jelzőmolekulákon keresztül valósítják meg.

A hagyományos mikrobiológia és biokémia a múlt században hihetetlen mértékű sikereket ért el a sejtek élettani folyamatainak megértése terén. Az alkalmazott redukcionista szemléletmód nagyban leegyszerűsítette az információszerezés folyamatát, azonban ez a fajta hozzáállás sok szempontból korlátozott is a megszereshető tudás mennyiségét. A sejtbiológusok által kifejlesztett vizsgálati módszerek teljesen homogén környezetben tenyésztett monokultúrákat használtak. Ennek eredményeként, az egyes sejteket apró mechanisztikus biokémiai gyáraknak tekintve, a fehérjék és a gének működésének megismerése soha nem látott alapossággal vált lehetővé. Az utóbbi időben azonban kiderült, hogy a sejtek környezetükkel, illetve más szomszédos sejtekkel való kölcsönhatása alapvetően befolyásolja viselkedésüket. A természetben a baktériumok sosem

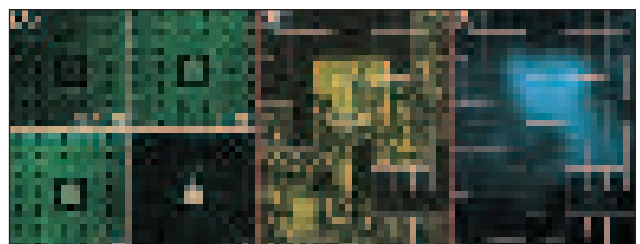
találkoznak homogén környezettel, mi több, a környezet struktúrája alapvetően befolyásolja egy mikrobiális közösség viselkedését.

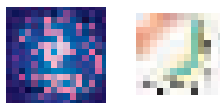
### **Kölcsönható mikroközösségek, bakteriális társulások a természetben**

A baktériumok világában nagyon sok példa vált ismertté komplex viselkedési formák tekintetében, úgymint az együttműködés, a munkamegosztás, vagy éppen egymás megtévessztése. Társas viselkedést természetesen a magasabb rendű élőlényeknél gyakran meg lehet figyelni, azonban ha figyelembe vesszük, hogy a baktériumok nem csak, hogy nem rendelkeznek idegrendszerrel, de csupán egyetlen sejtből állnak, ezek az összetett viselkedési mintázatok szinte hihetetlennek tűnnek. A következőkben néhány egytűtű mikrobiális sejtközösség érdekes kapcsolatrendszerébe pillantunk bele.

Az egyik igen fontos társas viselkedési forma az állatvilágban a közös búvóhely, odú kialakítása (termeszárak, hangyák alagútrendszere). Baktériumközösségek által ilyen mesterségesen kialakított élőhelyek a biofilmek. A biofilm a sejtek által kiválasztott fehérjékből, poliszacharidokból álló háromdimenziós extracelluláris mátrix, mely védelmet biztosít (pl. a környezeti erózió, a gazdaszervezet immunrendszere, antibiotikumok ellen) a benne élő mikrobák számára. Ezekben a biofilmekben az egyes sejtközösségek fizikailag közel, szoros kölcsönhatásban állnak egymással, ami lehetőséget nyújt diffúzió útján történő hatékonyabb kommunikációra, illetve megkönnyíti egyes szimbiózisban élő fajok együttműködését. A biofilmek tanulmányozása igen fontos az orvosi gyakorlatban is. A katéterek, transzplantátumok felületén kialakuló biofilmek védelmet nyújtanak az antibiotikumokkal szemben a bennük élő patogén

**3. ábra. (A) A fluoreszcensen megjelölt *Escherichia coli*-sejtek felhalmozódása mikrokamrában. A kamra mérete  $250 \times 250$  mikrométer. (B) Mikroszkópos felvétel a *Vibrio harveyi* sejtekről a labirintusban töltött 8 óra elteltével. (C) A *V. harveyi* sejtek lumineszcenciájának megjelenése a labirintus nagy sejtűrségű helyein. (A biolumineszcencia kibocsátása jelzi quorum érzékelés által koordinált folyamatok beindulását a sejtekben.) Forrás: Park et al. (2003) *Motion to Form a Quorum*, *Science*, 301(5630), 188–188**





baktériumok számára, amelyek így súlyos szövődeményekkel járó fertőzést okozhatnak.

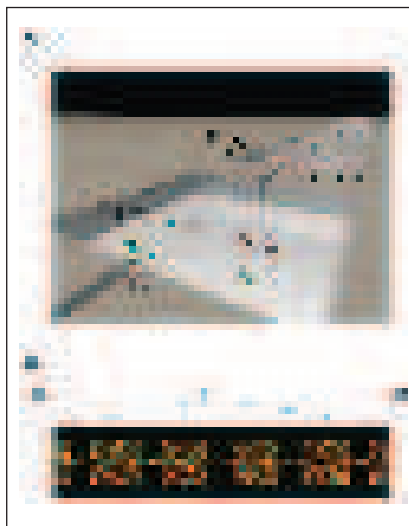
A természetes bélflóránkat alkotó mikrobiális közösségek alapvető fontosságúak egészségünk fenntartása érdekében. Laboratóriumi kísérletekben kimutatták, hogy egyes probiotikus hatást kifejtő baktériumok, mint a bifidobaktériumok vagy a laktobacilusok nemzetségébe tartozó fajok, az étlettérért és a tápanyagokért való versengésben megakadályozzák a patogén mikrobák bélfalhoz történő kitapadását. Így az emberi szervezetben a természetes mikroflóra baktériumai mintegy gátat képeznek a patogén betolakodók ellen, alapvető szerepet játszva ezzel a szervezet homeosztázisának fenntartásában.

Az együttélő mikrobiális közösségekben a sejtek nemcsak versengenek egymással a tápanyagokért, hanem gyakran tápanyagforrásnak is tekintik egymást. A *Mycococcus xanthus* tápanyaghiányos környezetben nagyszabású morfológiai változáson megy keresztül. Több mint százezer sejt néhány óra leforgása alatt, összehangolva mozgását és életfolyamatait, létrehoz egy „fruiting body”-nak nevezett multicelluláris képződményt (1. ábra), ahol a sejtek képesek differenciálódni. A közepén található egyedek spórákat alkotnak, így készülve fel az inséges időkre. Ez a „fruiting body” formáció ezzel együtt elősegíti a sejtek ragadozó viselkedését is. Az együtt mozgó, egy organizmusként viselkedő sejtek körbeveszik a kiszemelt prédát, az általuk termelt emésztőenzimek segítségével elpusztítják azt, majd felhasználják az így felszabadult fehérjedús táplálékot.

Természetesen vannak mindkét fél számára hasznos kapcsolatok is a baktériumok világában. Erre egy nagyon érdekes példa, hogy egy úszásra és kemotaxisra (kémiai jelek követésére) képes, de nem fotoszintetizáló bétaproteobaktérium szoros kölcsönhatásban él az öt folytonosan körülvevő zöld-kénbaktériumokkal. Egyfelől a kénbaktériumok számára hasznos e társulás, mikrokonzorcium mozgásra való képessége, mivel így képesek több kénhez hozzájutni. Másrészt a helyváltoztatás képességét biztosító proteobaktérium valószínűleg hozzáfér a kénbaktériumok által fotoszintézis segítségével termelt szénforrásokhoz. Az igazán érdekes jelenség azonban az, hogy az együttélő sejtek eddig fel nem térképezett jelátviteli útvonalakon keresztül képesek kommunikálni egymással. A bakteriális konzorcium csakis fényben mozog a kén irányába, amit viszont a kemotaxisra képes centrális sejt nem képes érzékelni.

#### Nanoforradalom az élettudományokban

A baktériumközösségek vizsgálata egészen az elmúlt évtizedekig jól megalapozott mikrobiológiai rutintechnikákon alapult, úgymint monokultúrák tenyésztése agarlemezen vagy folyamatosan rázott lombikban, esetleg kevert



**4. ábra. (A) A mikrofluidikai csip sematikus rajza. (B) A mikrokamrákat tartalmazó csip egyszerűsített vázlata, és fluoreszcencia mikroszkópos felvétel a mikrokamrákban stabilan együttélő kooperáló (zöld) és csaló (piros) *E. coli* sejtek. Forrás: Hol et al. (2013) *Spatial Structure Facilitates Cooperation in a Social Dilemma: Empirical Evidence from a Bacterial Community*. PLoS ONE 8(10): e77042**

komosztátokban. Azonban a fizikai környezet topológiája, a tápanyagok és a kémiai jelzőmolekulák egyenletlen eloszlása a természetben alapvetően befolyásolja a sejtek viselkedését, egymás közötti kapcsolatait. Ráadásul ez egy olyan fontos jelenség, hogy a legalapvetőbb biológiai szinten, a gének kifejeződése szintjén is megvalósul. Ezért ha mélyebben meg akarjuk érteni a mikrobiális közösségek viselkedését, legyen az akár biofilmképződés vagy antibiotikum-rezisztencia kialakulása, fontos, hogy a természetes körülményeket jól modellező mikro-környezetet hozzunk létre vizsgálataink során.

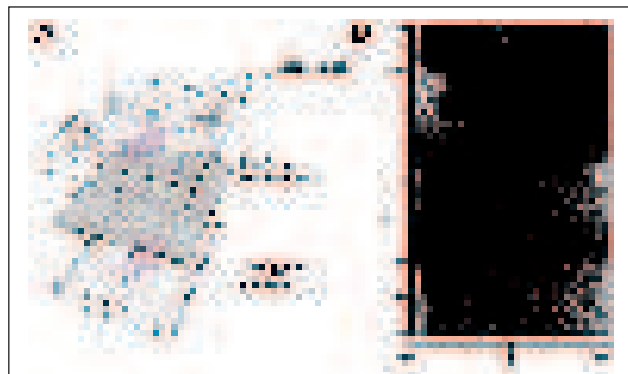
Az utóbbi években a mikro- és nanotechnológia megjelenése forradalmasította a mikrobiológiai kutatásokat. Olyan új biokompatibilis anyagokat dolgoztak ki, amelyek használatával baktérium-

(de akár állati, vagy éppen humán) sejtek tenyészthetők a természetben előforduló vagy fiziológiás körülményekhez nagyon hasonló, de teljes mértékben megtervezett és ellenőrzött környezetben (2. ábra).

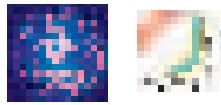
Mikrofabrikációs eljárások alkalmazásával többféle különböző anyagból kialakíthatóak ezek a mesterséges mikro-környezetek a baktériumközösségek számára. Készülhetnek szilíciumból, de szintén elterjedtek a műanyag, gél vagy esetleg fehérje alapú eszközök. A szilícium alapú mikrocseppekbe gyakran lézer-, vagy ion-sugár segítségével maratják bele a kívánt struktúrákat. Mikrofluidikai csipek gyártása során egy másik nagyon gyakran használt biokompatibilis anyag a dimetilpolisziloxán (PDMS), mely rugalmas, hőre szilárduló szilikon alapú szerves polimer. A rugalmas műanyag mikrocseppek előállítására fotolitográfiai eljárással készített öntőformák segítségével történik. Az öntőformák elkészítése után a mikrocseppek sokszorosíthatóak. A PDMS alapú mikrocseppek használatának számos előnye van, többek között az oxigént áteresztő képesség, a költséghatékony, megbízható reprodukálhatóság, illetve az, hogy a PDMS átlátszósága miatt ezek a csipek könnyedén vizsgálhatóak mikroszkópos képalkotó eljárásokkal.

Egy másik nagyon fontos biokompatibilis anyagcsoport a hidrogél-csoportja. Ezek hidrophil polimerekből épülnek fel. Segítségükkel képesek vagyunk litográfia alkalmazásával olyan polimerhálózatot létrehozni, melynek a rajta keresztüli anyagtranszportot leíró paraméterei jól meghatározottak. Ezek a porózus szerkezetek remek lehetőséget kínálnak

**5. ábra. (A) A mikrofluidikai csatorna sematikus rajza. (B) A mikrocseppek egy pontjában 5 percenként felvett fluoreszcencia mikroszkópos felvételeket egymás alá illesztve a sejtek mozgása nyomon követhető a csatornában. A sejtek az első 1,5 órában a tápanyagban gazdag kamra körül csoportosulnak (bal oldal). Ahogy a bal oldali kamrában a gyorsan felnövekvő baktériumpopuláció anyagszertermekei feldúsulnak, a középső csatorna sejtjei elhagyják a tápanyagban dúsabb életteret, a csatorna jobb oldalára úsznak. Forrás: Nagy et al. (2014) *Interaction of Bacterial Populations in Coupled Microchamber Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 28 (2) 225–231 (2014)**







nak kémiai gradiensek kialakítására, illetve bakteriális biofilmek modellezésére 3 dimenzióban. Fehérje alapú hidrogélek *in situ* polimerizációjával képesek vagyunk akár néhány sejtet is csapdába ejteni és azokat egyedszinten vizsgálni pikoliteres térfogatú kamrácskákban.

A fenti technológiák és biokompatibilis anyagok segítségével létrehozott mikroméretű csatornákkal, kamrákkal könnyedén kialakíthatunk kémiai gradienseket, fizikailag szeparálhatjuk, de kémiaileg össze is köthetjük a vizsgálni kívánt baktériumpopulációinkat. A világ számos mikrofabricációs laboratóriumában ma már olyan mikrofluidikai csipek készülnek, melyek jól modellezik például az emberi szervezet érhálózatának kapillárisait, vagy éppen egy baktériumközösség biofilmjét.

### Mesterséges megvilágításban Baktériumközösségek a mikroszkóp alatt

A mikrobák viselkedésének közösségi kontextusba helyezése és rendszer/populáció-szintű vizsgálata, illetve a legmodernebb technológiák (nanotechnológia, mikrofabricáció, mikrofluidika) ötvözése új távlatokat nyitott a bakteriális közösségek működésének megértése terén.

A bakteriális kommunikáció és együttműködés egyik igen érdekes példája a quorum érzékelés. Ez a jelenség azon alapul, hogy az egyes baktériumsejtek összehangoltan képesek megváltoztatni a génkifejeződési mintázatukat a jelenlevő sejtek létszámának megfelelően. Ez a jelenség szabályozza azokat a folyamatokat, amelyek hatékonyságához általában nagy sejtszám szükséges, mint a biofilmképzés, vagy virulencia-faktorok, antibiotikumok termelése. Ez az összehangolt sejtválasz úgy jöhet létre, hogy a sejtek kisebb jelzőmolekulák kibocsátásával és érzékelésével folyamatosan monitorozzák környezetüket, és ha a helyi sejtsűrűség meghalad egy kritikus értéket, minden sejt egyszerre ad választ a detektált környezeti feltételekre. A Princeton Egyetemen *Robert Austin* és kutatócsoportja mikroméretű kamrákat, illetve labirintusokat hozott létre mikrofluidikai csipeken, ahol képesek voltak a baktériumok mozgását nyomon követni és megfigyelni, hogy a sejtek viselkedése miként függ a létszámtól (**3. ábra**). Kiderült, hogy a sejtek megfelelően strukturált, szűk terek, kamrákat tartalmazó fizikai környezetben pozitív kemotaxis mutattak a saját maguk által kiválasztott anyagcsere-termékek iránt (pl. glicin), vagyis mozgásukkal a kémiai jeleket követték. Így aggregációkat, csoportosulásokat hoztak létre, melyekben kiemelkedően nagy számban fordulnak elő a sejtek. Ahogyan a sejtek felhalmozódtak szűk terekben, a termelt jelmolekulák koncent-

rációja megnövekedett. Úgy tűnik tehát, hogy a baktériumok aktívan is képesek befolyásolni az egész populációra kiterjedő összehangolt viselkedési mintázataikat.

A természetben számos példát láthatunk együttműködő sejtközösségekre. Hollandiában, a Delfti Műszaki Egyetemen *Juan Keymer* és *Cees Dekker* csoportja azt vizsgálta, hogyan hat a környezet topológiája az együttélő baktériumközösségekre (**4. ábra**), ha a populációban „csalók” is jelen vannak. A csalás fogalma jelen esetben azt a genetikai mutációt jelentette, mely nem engedi meg, hogy a sejtek stacionárius fázisba lépjenek és növekedésük lelassuljon, amikor a bakteriális közösség már felélte a környezetben megtalálható tápanyagok döntő hányadát. Kutatásaikból kiderült, hogy a kooperáló és a csaló egyedek csak abban az esetben voltak képesek stabilan fennmaradni, amikor a fizikai környezet jól strukturált volt.

A Szegedi Biológiai Kutatóközpont Biofizikai Intézetében kifejlesztettünk egy PDMS alapú mikroszipet, mely egyrészt alkalmas kémiai gradiensek kialakítására áramlásmentes környezetben, másrészt lehetőséget biztosít különböző baktériumpopulációk együttes tenyésztésére fizikailag szeparált, de kémiaileg összekapcsolt kamrákban (**5. ábra**). Így egyszerűen vizsgálható a mikrobiális közösségek egymásra gyakorolt hatása, együttélésre való képessége, dinamikus kapcsolatrendszere. Kísérleteinkben *E. coli* populációkat neveltünk egymás szoros környezetében, ahol az egyik populációnak könnyebb hozzáférést biztosítottunk a tápanyagok számára. A tápanyagokban gazdagabb kamrában élő sejtek populációja így jóval gyorsabban gyarapodott. 1,5 óra elteltével megfigyeltük, hogy a nagyobb populáció nem csupán a sejtek számában nötte túl a szomszédos kamra sejtközösségét, de az általuk kibocsátott metabolikus melléktermékek (pl. indol, acetát) felhalmozódása taszítólag hatott a kisebb sejtközösségre, kiszorítva azt a tápanyagban gazdag élettérrel.

Az említett példák jól illusztrálják, hogy a nanotechnológia és a hagyományos mikrobiológia összefonódásából született új vizsgálati módszerek eddig számunkra nem feltérképezhető jelenségek tanulmányozása felé nyitották meg az utat a baktériumok nem is annyira egyszerű világának megismerésében. A jövő kutatásai pedig remélhetőleg segítenek majd abban, hogy mélyebben megértsük a mikrobiális közösségek sokszínűségét, és felhasználhassuk ezen tudásunkat a biotechnológiában, az orvosi és mérnöki tudományokban. \*

### Kislexikon

**cianobaktérium:** ősi fotoszintetizáló baktériumtörzs, mely egyedeit korábban életmódjuk alapján kékoszatokként növényeknek tekintették

**poliszacharidok:** hosszú szénhidrátláncok, melyek glikozidos kötéssel kapcsolódó cukormolekulákból épülnek fel (pl. cellulóz, keményítő)

**chemotaxis:** az a jelenség, amikor a környezet kémiai összetétele egy sejt vagy organizmus aktív, mozgásban megnyilvánuló választ váltja ki (pozitív chemotaxisról beszélünk, ha a sejt vagy szervezet a nagyobb koncentrációjú hely felé mozdul el)

**proteobaktériumok:** a baktériumok egyik számos tagot tartalmazó törzse, mely különböző anyagcsereúttal rendelkező Gram-negatív baktériumfajokat foglal magába

**mikrofabricáció:** olyan anyagmegmunkálási eljárások összefoglaló neve, melyek során mikrométeres nagyságrendű struktúrákat alakítanak ki egy hordozó felületen

**mikrofluidika:** multidiszciplináris tudományterület, mely folyadékok mikroméretű skálán történő mozgatásának, csapdázásának, keverésének alkalmazásaival foglalkozik

**fotolitográfia:** olyan mikrofabricációs eljárás, mely során egy szubsztrátra vékony rétegben (1–100 mikrométer) felviszünk valamilyen fényérzékeny anyagot, majd azt egy maszkon keresztül UV-fénnyel megvilágítjuk. A megvilágított részekből további hő és kémiai kezelés után a maszknak megfelelő tetszőleges struktúrák alakíthatók ki a felületen.

**stacionárius fázis:** egy baktériumpopuláció növekedése során, ha a környezetben található tápanyagok nagyrészt felélte, az egyes sejtek a gyors, exponenciális növekedési fázist követően egy olyan életszakaszba lépnek, ahol a sejtosztódás úgynevezett növekedési faktorok segítségével genetikai szinten gátolt. Mindez annak érdekében történik, hogy a közösség a korlátolt tápanyaghozáférés esetén is fenn tudjon maradni.

### Irodalom

- Crespi, B. J. (2001) The evolution of social behavior in microorganisms. Trends in Ecology & Evolution, 16(4), 178–183.*  
*Little, A. E. F., Robinson, C. J., Peterson, S. B., Raffa, K. F., & Handelsman, J. (2008). Rules of Engagement: Interspecies Interactions that Regulate Microbial Communities. Annu. Rev. Microbiol., 62(1), 375–401.*  
*Wessel, A. K., Hmelo, L., Parsek, M. R., & Whiteley, M. (2013) Going local: technologies for exploring bacterial microenvironments. Nat. Rev. Microbiol., 11(5):337–48.*  
*Park et al. (2003) Motion to Form a Quorum. Science, 301(5630), 188–188.*  
*Hol et al. (2013) Spatial Structure Facilitates Cooperation in a Social Dilemma: Empirical Evidence from a Bacterial Community. PLoS ONE, 8(10): e77042.*