

# ASZTROBIOLÓGIA – MODERN SZINTÉZIS A TERMÉSZETTUDOMÁNYOK KÖZÖTT

Kereszturi Ákos

PhD, Collegium Budapest, Mars Asztrobiológia Kutatócsoport,  
Magyar Csillagászati Egyesület, Nagy Károly Csillagászati Közhasznú Alapítvány  
akos@colbud.hu

Az asztrobiológia eredetileg a csillagászat és a biológia határterületén az elmúlt évtizedben született irányzat. Egyre népszerűbbé válva ma már a földtudományok, a fizika és a kémia több témakörét is tartalmazza, de a műszaki tudományokban is sokan dolgoznak ilyen kutatásokban.

Az asztrobiológia nem új tudományág, inkább olyan közös nyelv, amely lehetőséget és tartalmat ad a természettudományok eltérő területén dolgozó kutatók együttműködésére. A cél: a Földön kívüli élet lehetőségének vizsgálata és a világegyetemi élet helyének megértése. Ez mély szakértelmet kíván, amelynek egy-egy kutató csak valamely szűkebb területen van birtokában. A tudományágak közötti kapcsolódási pontok pedig új felfedezéseket eredményeznek.

A tanulmányban példák alapján igyekszem bemutatni, hogyan kapcsolódhatnak az egyes természettudományok egymáshoz az asztrobiológiai kutatások segítségével. Az anyagfejlődés szerint sorba rendezve azokat az eredményeket tekintjük át, amelyek az utóbbi két évben születtek. A korábbi eredményekről Kereszturi Ákos és Simon Tamás (2005) tanulmánya és a referenciákban felsorolt további irodalmak adnak áttekintést. Nem célunk a földönkívüli intelligencia le-

hetőségének és kutatásának bemutatása, amelyekről szintén részletesen olvashatunk magyar nyelven (Almár, 1999).

Az asztrobiológia témaköreit, azok kapcsolatát az asztrobiológiai mátrix (Mizser – Kereszturi, 2003) segítségével tekinthetjük át (*1. ábra*). A bal oszlopban főleg a planetológiához (bolygótudományhoz), jobbra tőle az asztrofizikához közeli témakörök szerepelnek. Függőlegesen lefelé a fizika, a kémia és a biológia területei következnek. Jobb oldalt pedig lefelé haladva az anyagszerveződés egyre magasabb szintjeit tüntettük fel az atomoktól kiindulva a molekulákon keresztül a sejtekig, majd ökoszisztémáig.

## *Elemek és molekulák keletkezése*

Az elemek kialakulásának fő színterei: az ősrobbanás utáni ősi nukleoszintézis (amikor 4-es tömegszámú héliumatomok születtek), a csillagok belseje (ahol legfeljebb a vasig keletkeznek atommagok) és a szupernóva-robbanások (amikor a legnehezebb, instabil magok is kialakulnak), valamint a csillagközi anyagban a kozmikus sugárzás hatására zajló reakciók (itt főleg lítium, berillium és bór keletkezik). Elképzelhető, hogy a gammavillanások heves folyamatai közepette is keletkeznek nehézelemek (cink, titán, réz, nikkal).

Az elemek szétszóródását csillagszelek és szupernóva-robbanások biztosítják, amelyek eltérő arányban bocsátanak ki különböző elemeket. A csillagközi térbe került összetevők mozgását a galaxisok centrumában lévő szuper-nagy tömegű fekete lyukak is befolyásolják: a közelükbe jutó anyag kisebb hányada nagy sebességgel kilökődik, és a galaxis távoli vidékeire is eljuthat.

Az atomok molekulákká kombinálódása már a csillagok külső rétegeiben megkezdődhet, ahol a sűrűség- és hőmérsékletgradiens révén változatos a környezet. Itt a forróság és a lökéshullámok generálta reakciók zajlanak, illetve alacsony hőmérsékletű kiválás/fagyás is lejajlik. Egyes szénben gazdag csillagok külső rétegeiben közel ötven eltérő molekulát azonosítottak már. Itt a szénatomok mellett a szilícium és különböző fémek is gyakran

alkotnak molekulákat. A planetáris ködök táguló és hűlő gázburkaiban is épülnek molekulák.

A csillagközi tér ezeknél is változatosabb környezet, ahol a hőmérséklet 10 és több 100 K között is lehet – még magasabb hőmérsékleten már nem jellemzők molekulák. A reakciók történhetnek gázfázisban, gáz és a szilárd határfelületeken és a szilárd szemcsék belsejében. A szemcsék felületéről az anyag a melegebből elszublimál, a hidegebb tartományokban kiválhat, tovább növelve a változatosabb környezetet.

A porszemcsék felületén megtapadó molekulák egymással reakcióba léphetnek. A H<sub>2</sub>O molekulákat is tartalmazó szemcséket érő ultraibolya sugárzás és a kozmikus sugárak nyomán összetett szerves molekulák is képződhetnek a hideg porszemcsékben. A fo-

	planetológia	asztrofizika		fejlődés	szerveződés
fizika		atommagok keletkezése, anyagok kibocsátása	csillagtömeg	abiogén	atom
		csillagközi anyag kémiai kémiája	galaktikus környezet		
kémia + fizika	szoláris köd kémiai kémiája	csillag- és bolygókeletkezés	szomszédok sugárzása	prebiotikus	molekula
	bolygók összeállása, kémiai átalakulás	ősnap aktivitása, exobolygók			
biológia + kémia + fizika	felszín és légkör korai fejlődése	becsapódások, bolygók közötti anyagcsere	napaktivitás változása, szomszédos csillagok, galaktikus árapálymező	élet keletkezése	sejt
	belső felszín és légkör fejlődése				
	bioszféra visszahatása az anyagkörforgásra és az éghajlatra				

*1. ábra* • Az asztrobiológiai mátrix, a fontosabb témakörök és a köztük fennálló kapcsolatok szemléltetésére

lyamatot laboratóriumi körülmények között is reprodukáltak. Ma már több mint százton különféle molekulát azonosítottak a csillagközi térben (például: glikoaldehid, metil-formiát, acetilsav, különféle sokgyűrűs aromás szénhidrogének), még a glicin aminosavat is.

A hatnál több atomot tartalmazó csillagközi molekulák mind szénalapúak, az eddig azonosított egyik igen összetett képviselőjük a tizenhárom atomot tartalmazó  $\text{HC}_{11}\text{N}$ . Laboratóriumi vizsgálatok alapján nemcsak az ionok (főleg a kozmikus sugaraktól keletkezett reakcióképes  $\text{H}_3^+$ ), hanem akár 10–20 K-en a semleges atomok között is bekövetkezhetnek olyan reakciók, amelyek újabb molekulákat eredményeznek.

#### Bolygók a Naprendszeren kívül

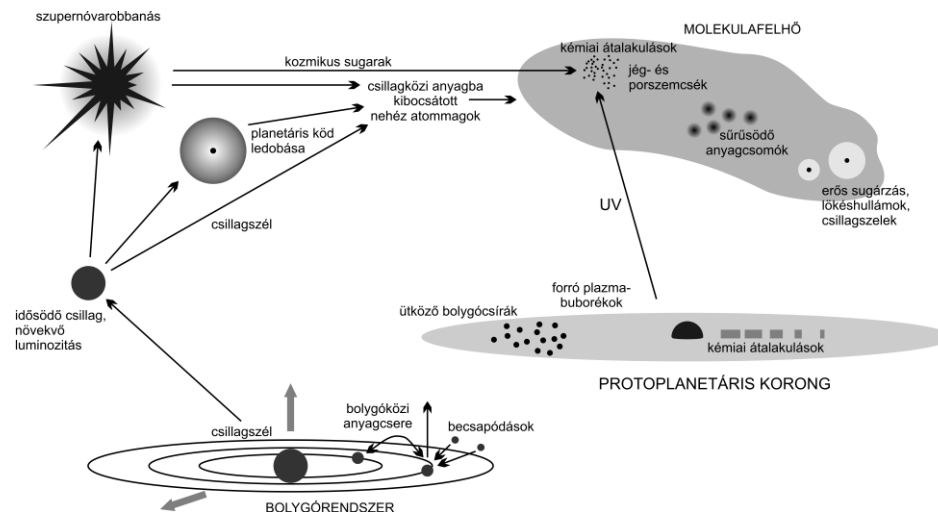
Az anyag további fejlődésére olyan környezetben nyílik lehetőség, ahol nagy a nehézelemek és a szerves molekulák koncentrációja (2. ábra). Energia van a molekulák kombinálásához, de nincs annyira meleg, hogy azok mind lebomljanak. Emellett hasznos valamilyen folyékony közeg is, amelyben a kérdéses molekulák könnyen mozoghatnak, egymással gyakran találkozhatnak. Minderre a bolygók az ideálisak, amelyek a csillagokkal együtt, a zsugorodó gázfelhőket övező, ún. protoplanetáris korongban születnek.

Ezekben a korongokban is zajlik kémiai átalakulás. A Spitzer-űrteleszkóppal például az egymillió évnél fiatalabb AA Tauri csillag körüli protoplanetáris korongban sok vízgőzt, hidrogén-cianidot, acetilént és szén-dioxidot azonosítottak. A megfigyelt koncentráció nagyobb volt, mint a környező csillagközi felhőben mértek alapján várható lett volna – eszerint a születő bolygórendszerekben is tovább folyik a molekulák felépülése. A korong-

ban összeálló nagyobb bolygócsírákban a radioaktív hőtermelés miatt sok molekula lebomlik. Az apró meteorikus testekben, kisbolygóknak és üstökösökben azonban fennmaradnak a molekulák, és a nagyobb planéták összeállásának végén azok felszínére hullva szállítanak oda sok szerves összetevőt. A születő Naprendszerben intenzíven keveredett az anyag, részben sugárirányban is mozgott az összetevők, talán az ősnapból kilövellt plazmabuborékok révén. A Deep Impact szonda megfigyelései alapján az üstökösök kialakulásának zónájába, az óriásbolygók térségébe is érkezett anyag például olivinkristályok formájában, a Naphoz közeli tartományból.

A bolygókeletkezés eredményét más csillagok körül megfigyelt exobolygók alapján tanulmányozhatjuk. Napjainkban több mint háromszázhetven, más csillaghoz tartozó bolygót ismerünk, amelyek többsége a csillagához igen közeli, ún. forró Jupiter típusú planéta. Ezek feltehetőleg a csillaguktól távolabb születtek, majd gravitációs zavarok nyomán jutottak mai helyükre. Ha az óriásbolygók gyakran vándorolnak csillagukhoz közel, eközben elpusztíthatják a Föld típusú bolygókat. Egyes modellek alapján elképzelhető, hogy ezért ritkák a Naprendszerben megfigyelthez hasonló felépítésű bolygórendszerek. Kiderült továbbá, hogy többszörös csillagok körül is keringhetnek exobolygók.

2009 elejéig négy olyan égitestet sikerült közvetlenül is megpillantani (Fomalhaut b, valamint a HR 8799 körül három exobolygó), amelyekről biztonsággal állítható, hogy tömegük alapján exobolygók. Az exobolygók felfedezése után részletes megismerésük a következő lépés. Az elmúlt időszakban sikerült kimutatni, hogy egyes kötött tengelyforgású exobolygókon az állandóan megvilágított és a folyamatos sötétségben lévő oldal között



2. ábra • Az anyagfejlődés asztrobiológiai szempontból fontos, egymással összekapcsolódó lépései

nagy, míg másokon csekély a hőmérsékletkülönbség. Utóbbi helyzetre erős szelek adnak magyarázatot. A távoli atmoszférákban szén-dioxidot, vízgőzt és metánt is azonosítottak.

Jelenleg egyetlen példát ismerünk az életre, a földit. Ez érthetően behatárolja a keresési stratégiánkat: víz és szén alapú életformákat, az ezeknek kedvező környezeteket, elsősorban Föld típusú exobolygókat keresünk. Ilyeneket feltehetőleg a műszereink korlátozott képességei miatt nem találtunk még – ugyanakkor néhány évtizeden belül a nyomukra akadhatunk.

Felmerült olyan egzotikus exobolygók lehetősége is, amelyek nem a Föld távoli megfelelői – de az élet szempontjából mégis érdekesek. Itt említhetők az ún. szuperföldek, a Jupiternél kisebb, de Földnél nagyobb tömegű objektumok, ám itt a tömeg alapján nem mindig lehet eldönteni, hogy az adott égitest az Uránuszhoz és Neptunuszhoz vagy inkább a Földhöz hasonló, azaz szilárd felszínű planéta. Emellett lehetnek „utólag szüle-

tett Földek”, amelyek egy óriásbolygó bevándorlását, és az eredetileg kialakult Föld típusú bolygók kiszórását követően, azok helyére lőkötött törmelékanyagból álltak össze. Fontosak lehetnek továbbá a csillagukhoz közeli pályára perturbálódott, az óriásbolygók körüli vagy azoktól elszabadult jégholdak.

#### Érdekes objektumok a Naprendszerben

A Naprendszerben asztrobiológiai szempontból a *Titan*, az *Europa* és a *Mars* érdekes a Földön kívül. A Szaturnusz legnagyobb holdja, a Titan sűrű nitrogénléggörében akár aminosavakat is eredményező szervesanyag-szintézis zajlik. Az égitesten több a szénhidrogén, mint a Földön, és a légköri elektromos jelenségek, a Nap ultraibolya sugárzása, a kozmikus sugárzás, valamint a felvillanó meteorok révén összetett kémiai reakciók zajlanak. Emellett a felszín alatti víz–ammónia óceán is érdekes helyszín, amelynek létezésére a Cassini-szonda megfigyelései adtak bizonyítékokat. Sikerült megfigyelni a külső jégpáncél előfordulását a belső és mélyebben lévő, na-

gyobb sűrűségű jég- és kőzetrétegek felett, amelyet egy folyékony óceán tett lehetővé.

A Jupiter Europa nevű holdjának 10–20 km vastag jégpáncélja alatt szintén folyékony, 50–100 km vastag óceán van. Részben az árapályhatástól repedések képződnek a jégpáncélon, a felszínre pedig a szomszédos Io hold vulkánjai által kipöfékelt kén, kén-dioxid hullik. Utóbbi a jégbe jutva kénsavat alkot, amely a jégpáncél átalakulásai révén a földi globális lemeztektonika működéséhez mérhető időskálán az óceán vizébe jut. A Jupiter magnetoszférájából a holdat érő részecskebombázás a  $H_2O$  molekulákat részben lebontja. Az így felszabaduló hidrogén elszökik, illetve aktív gyökök keletkeznek, amelyek további kémiai átalakulásokat okoznak a jégben.

Az óceán fenekén lévő vulkáni központokból feláramló meleg víz néhol megolvasztja a jégpáncélt, és összetört ún. káoszterületeket és kisebb sötét foltokat hoz létre. Itt a jég az óceánban oldott anyagokban, különféle hidratált ásványokban gazdagodik, és vöröses-barnás színt ölt. Mindent összevetve a felszín felől oxidált összetevők juthatnak az óceánba, amelynek az alján a vulkáni központok redukált anyagokat bocsátanak a vízbe.

Cseppfolyós  $H_2O$ -t egyre több helyen feltételeznek a Naprendszerben. Felszín alatti vízréteg a Ganymedes és a Callisto belsejében is lehetséges. Az Enceladusnál a gejzír jellegű kitörések, a Tritonnál az elméleti modellek utalnak hasonlóra. Az Enceladus déli sarkvidéki, a környező területnél melegebb töréseiből nemcsak vízgőz- és vízjégzemcsék, de szén-dioxid, szén-monoxid, metán, ammónia, továbbá feltehetőleg nátrium tartalmú sók is kilökődnek az űrbe. A Deep Impact szonda megfigyelése alapján pedig az üstökösökben is lehetnek vizes mállással keletkezett agyagok, amelyek a kométák élete

elején a belsejükben cirkulált folyékony víztől keletkeztek. Sok helyen történhetek tehát vizes kémiai átalakulások.

#### *A Mars asztrobiológiai potenciálja*

A Mars asztrobiológiai szempontból a legérdekesebb és a legkönnyebben vizsgálható célpont. Az alábbiakban a marsi meteoritokban talált esetleges életnyomok, a bolygó ősi környezeti paraméterei és a mai állapotok témakörében foglaljuk össze az elmúlt évek újdonságait.

Az ALH 84001 meteoritban azonosított összetevők és alakzatok együttes jelenlétét egyesek életfolyamatokkal magyarázzák – a kérdésben nincs egyetértés. Még bizonytalanabb az 1,3 milliárd éves Nakhla meteorit, amely 1911-ben hullott le Egyiptomban. Légkörünkben szétarabolódott, közel 40 töredékének összömege kb. 10 kg. Mikrométeres törések mentén barnás-fekete, széntartalmú anyagot találtak benne. A repedéseknél iddingsitet ( $MgO \cdot Fe_2O_3 \cdot 3SiO_2 \cdot 4H_2O$ ) is azonosítottak, amely a Földön olivin vizes mállásával keletkezik.

A földi óceánfenéken keletkezett, üveges szerkezetű bazaltok repedésében hasonló anyag található, amelyekben DNS-t azonosítottak. A földi anyag tehát biogén tevékenységgel kapcsolatban keletkezett, de ez a Nakhla meteoritban talált, hasonló széntartalmú anyagról egyelőre nem állítható. Az viszont biztos, hogy repedéseit egykor folyékony víz járta át.

#### *A víz nyomában a Marson*

A Mars felszínének vizsgálata az egykori klímára és a víz előfordulására is utal (Gyenyisz, 2008). Ma úgy fest, hogy a korai noachi időszakból (3,5 milliárd évvel ezelőttig) fennmaradt folyásnyomok mellett az egykori vízre

utaló agyagos mállástermékek is visszamaradtak. Az elmúlt évek eredményei alapján a kezdeti időszakot követően is megjelent a víz a felszínen, igaz, csak alkalmanként.

Újabb vizsgálatok alapján mintegy 3,5 milliárd évvel ezelőtt is folyt víz a Marson. Utóbbi folyásnyomok kialakulásához alkalmanként 10–100 ezer éves nedves időszakok szükségesek – akárcsak például a földi sivatagos és félsivatagos területeken. A Valles Marineris-árokrendszerhez közeli (de nem a benne található) világos üledékes kőzetekhez idős folyásnyomok kapcsolódnak. Utóbbi megfigyelések és a számítógépes modellek alapján itt 3,0–3,7 milliárd évvel ezelőtt is folyt még víz a felszínen, ezekből váltak ki a kérdéses anyagok.

Az egykori vizes állapotokra opálok is utalnak, amelyek szintén vízfolyásnyomokhoz kapcsolódnak. Ezek szilikátos anyagában 1–20 % közötti a víztartalom. Még kétmilliárd évvel ezelőtt is keletkeztek a bolygón, tehát ekkor is lehetett alkalmanként víz a felszínen. Gyakran a hűvös és savas vizekből kivált vas-szulfátokkal együtt figyelhetők meg. Opálhoz hasonló ásványokat a Spirit marsjáró is talált a Gusev-kráterben, ahol az talán utóvulkáni oldatokból válhatott ki.

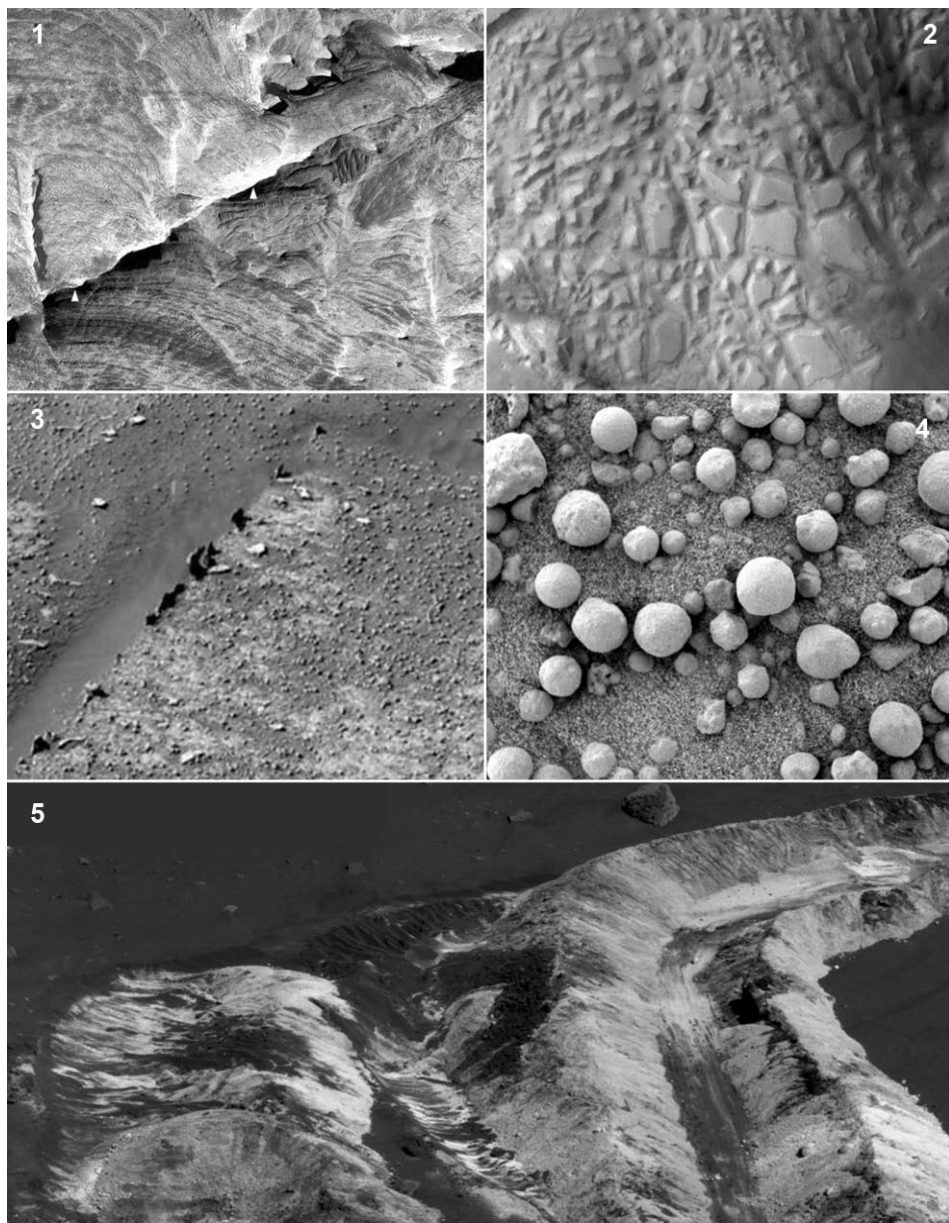
A Gusev-krátert az ősi tavi állapot után vulkáni lávafolyás borította be, amelyben egy ideig még forró vizes oldatok cirkuláltak, kialakítva a Spirit által véletlenül kiásott világos, szilícium-dioxidban gazdag anyagokat (3. ábra). A Meridiani-síkságot, az Opportunity szonda leszállóhelyét 200–800 m közötti vastagságban borítják szulfátos üledékek. A terület nem zárt medence, a rétegek talán az ősi északi óceán itt húzódo partján képződtek, a feltételezett partvonal mentén máshol azonban nem találunk hasonló üledékeket. Számítógépes szimulációk alapján az ősi Marson

4,5 milliárdtól 3,7 milliárd évvel ezelőttig terjedő időszakban az esőből avagy olvadó jégből beszivárgó felszín alatti vizek észak felé áramlottak, és a modell alapján a Meridiani-síkság térségében egykor sok forrás bukkant ki vasban gazdag, savas kémhatású vízzel a felszínre, ahol a víz elpárolgott, az oldott anyagok pedig kiváltak belőle. A Meridiani-síkság ekkor sós-homokos dűnékből és kisebb tócsákból, tavakból állt.

A felszín alatti víz fontos az asztrobiológiai kutatásokban (3. ábra), a Marson az elméleti modellek mellett megfigyelések is utalnak egykori jelenlétére. A Földön az élet keletkezése elképzelhető, hogy vulkanikusan fűtött kőzetek repedéseiben, vízzel átjárt környezetben történt. A víz itt vulkáni gázokban gazdagodott, sok anyagot oldott ki a kőzetekből, amit a belső hő is elősegített. Hasonló környezetek a vörös bolygón is lehettek.

Régóta elterjedt nézet, hogy a Mars az ősi légkörét alkotó  $CO_2$  és  $H_2O$  molekulák többségét a világűr felé elvesztette. A bolygó viszonylag csekély tömege és gyenge gravitációs tere miatt nem tudta megtartani a sűrű atmoszférát. Ebben működött közre a mágneses dinamo korai leállása is, amely nem védte a légkört a napszél erodáló hatásától. Emellett egyéb folyamatok, például kisbolygók és üstökösök becsapódásai is csökkenthetik az atmoszféra mennyiségét. A gázvesztés elgondolását támogatták a Phobos-2 szonda megfigyelései 1989-ben, és sok modellt igazítottak e mérésekhez. Az európai Mars Express szonda ASPERA-3 detektorának mérései alapján a bolygó jelenleg kb. 20 g gázt veszít másodpercenként, amely azonban csak közel 1 %-a a Phobos-2 mérései alapján becsült értéknek.

Ha a légkör vesztésének utóbbi mértéke a Mars teljes fejlődésére érvényes, akkor globális egyenértékként mindössze néhány



3. ábra • Felszín alatti víz nyomai a Marson. Fentről lefelé és balról jobbra: 1. a Candor Chasma üledékeit harántoló törés, benne vízből kivált, ellenálló ásványokkal – 2. vízfeltöréstől keletkezett káoszterület – 3. szintén repedésekben vízből kivált ásványok alkotta telérek centiméteres darabjai (Opportunity marsjáró) – 4. felszín alatti folyadékkal kapcsolatban keletkezett hematitkiválások (Opportunity) – 5. szilícium-dioxidban gazdag, utóvulkáni hévforrásból kivált világos anyag (Spirit)

centiméternyi vízborítást veszíthetett. A megszokott szén-dioxid mennyisége pedig 0,2 és 4 millibar közötti nyomást adó gázéval egyenértékű – eszerint az eredeti légkörnek ugyancsak töredékét, nagyságrendileg ezredét veszíthette el. Ha mindez igaz, hatalmas fagyott, és ásványokban kémiaileg kötött, felszín alatti  $H_2O$ - és  $CO_2$ -készletek lehetnek.  $CO_2$ -t kötő karbonátokra nem akadtak jelentős mennyiségben. Nemrég azonosították az első nagyobb karbonátos üledékes összletet, amely alapján szintén elképzelhető, hogy jelentős szén-dioxid-készlet tárolódik a felszín alatt.

Szerves anyagok annak ellenére nincsenek a felszínen, hogy a Marsra kb. évi száz tonna szerves anyag hullhat – a bolygóról származó meteoritokban ellenben előfordulnak. A Carnegie Intézet kutatói az észak-európai Spitzbergák területén vulkáni kőzeteket tanulmányoztak, amelyek kb. egymillió évvel ezelőtti kialakulásuk óta sarkvidéki hidegben voltak. Az itt talált szerves anyag a marsi ALH 84001 meteoritban megfigyelthez hasonló, mikroszkopikus gömbökben csoportosult, magnetit kristályokhoz kapcsolódva. A földi vulkáni kőzetek repedéseiben azok hűlésével párhuzamosan szén-dioxidot tartalmazó víz cirkulált. Ez a magnetit ásványokkal mint katalizátorokkal érintkezve részben egyszerű szerves anyagokká alakult. Ez kedvez annak az elgondolásnak, hogy a földi élet kialakulásához szükséges szerves építőkövekhez hasonló a Marson is megjelentek, de nem bizonyítja a marsi meteoritban talált szerves anyag biogén eredetét.

#### Kihívások az élet számára

A mai felszín alatti élet lehetőségét csak elméletileg vizsgálhatjuk. A vulkáni kalderák és lávafolyások kora alapján az elmúlt öt-ötvenmillió évben több helyen is lehetett vulkáni

tevékenység a bolygón. Elképzelhető, hogy a magmakamrák még adnak annyi meleget, hogy a környezetükben cseppfolyós maradjon a  $H_2O$ . Emellett a légköri metán is utalhat felszín alatti biogén tevékenységre – de biztos ismeretek itt még nincsenek.

A felszíni vagy ahhoz közeli élet lehetősége nehezen, de azért vizsgálható. Egy itt található élőlénynek az alábbi kihívásokkal kell szembenéznie napjainkban:

- **Erős ultraibolya sugárzás:** a hosszú hullámhosszú UV-komponens a földihez hasonló, de a rövidebb hullámhosszú (UVA- és UVB-) sugárzás sokkal intenzívebb. A légkör nem képes az élőlények által tolerálható szintre csökkenteni a sugárzást, bár porviharok idején lényegesen csökken a felszínre elérő fluxus. A felszíni szén-dioxid-jégből 2–4 méter, a vízjégből méter, a hó állapotú  $H_2O$ -ból centiméter vastag réteg ad elegendő védelmet. Kőzetanyagból pedig mindehhez 1–2 mm vékony réteg is elég, amely a fotoszintézishez szükséges fény mennyiségét még átengedi.
- **Agresszív kémiai környezet:** a felszínen az UV sugárzástól és a portölcésrégekben (mini tornádókban) fellépő elektromos erőtől oxidánsok (például hiperoxid) keletkeznek, melyek lebontják a szerves anyagot.

#### Vízzel kapcsolatos problémák:

**Száraz légkör:** az átlagos légköri vízgőztartalom 10 mikrométer egyenértékű, amely alkalmanként 100 mikrométer közelébe is felmehet, de 1 mikrométer alá is süllyedhet. Esetenként, főleg magas szélességen és éjszaka, a relatív nedvességtartalom telített, ekkor csapadék válik ki a felszínen.

**Elérhető  $H_2O$ :** egy élőlény számára elérhető  $H_2O$  mennyiséget a relatív nedvességtartalommal (vízaktivással,  $a_w$ ) jellemzik,

amely legfeljebb 1 (tiszta víz) lehet, majd a hőmérséklet csökkenésével, a víz sótartalmanak és a jég arányának növekedésével csökken, jégben  $-40$  °C-on például 0,67. Az ellenálló földi élőlényeknek minimálisan kb. 0,6 körüli vízakktivitás szükséges, ekkor főleg légköri vízpárából fedezik igényüket. A Marson sajnos (főleg nagy hidegben) elég magas az értéke.

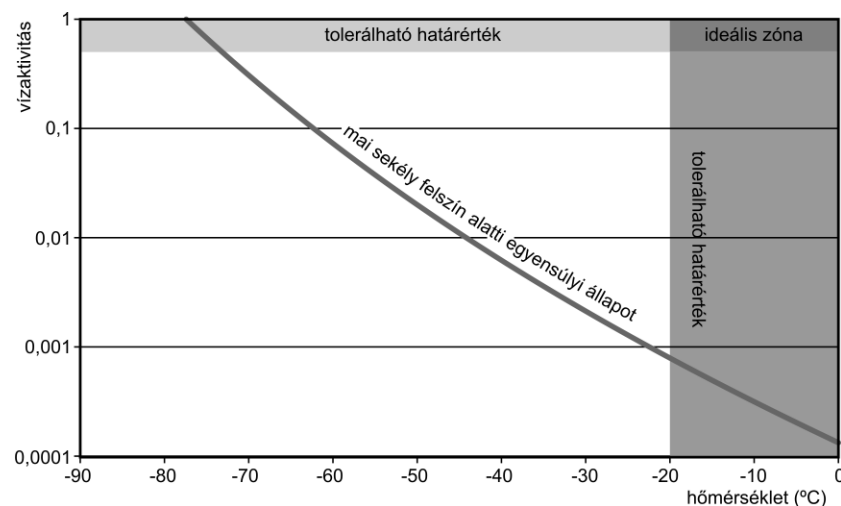
**$H_2O$  előfordulása:** a felszínen, illetve kis mélységben  $H_2O$ -t a jégsapkák kivül két alacsony szélességű foltban, az északi pólussapka körüli dűnemezőben, a sarkvidéken a jégsapka környezetében néhány cm-rel a felszín alatt, valamint néhány sziklagleccser belsejében sikerült eddig kimutatni.

**Kedvezőtlen viszonyok:** a fentiek együttesen nem kedveznek a víz megjelenésének. Bár a megolvadáshoz szükséges hőmérséklet előfordul a Marson, de a szárazság miatt a jég elszublimál az olvadáspont elérése

előtt. Kérdés, hogy vannak-e a Marson olyan helyszínek/viszonyok, amelyeknél elérhető  $H_2O$  és megfelelő hőmérséklet együttesen van jelen (4. ábra).

**Alacsony hőmérséklet** (Kuti, 2009): a földi élőlényeknek legalább  $-20$  °C kell a metabolizmushoz, amely alkalmanként előáll a Mars felszínén, de ennél alacsonyabb hőmérsékleten is már elszublimálhat a jég. Ezért a  $H_2O$  molekulákat erősen kötő anyagok szükségesek, amely akár egy képzeletbeli élőlény belseje is lehet. Ilyenek különböző erősen higroszkópos tulajdonságú anyagok, de a diffúziót lassító felszíni portakáró is korlátozhatja a vízmolekulák elszökését.

**Energiaforrások:** a felszínen a napsugárzás, a légköri fotokémiai termékek, a felszín alatt a kőzet-víz reakciók, főleg a felszabaduló hidrogén és a geotermikus hővel kapcsolatos reakciók jöhetnek szóba energiaforrásként.



4. ábra • A vízakktivitás és a hőmérséklet szempontjából ideális fázistér (jobbra fent) a Mars felszínén, az űrszondák által ma megfigyelhető méretskálán vizsgálva. A ferde vonaltól balra lefelé lévő viszonyok fordulnak elő ma a bolygón a jelenlegi mérések felbontásánál, a szürkével jelzett területek pedig az extrémofilek túróképességének határát jelzik

Elképzelhető, hogy az éghajlati változások (Kereszturi, 2007) nyomán átmenetileg a közelmúltban is megjelent a víz a felszínen. A tengelyferdeség változásával a sarki jégsapkák anyaga időnként alacsonyabb szélességre vándorol, majd visszatér a pólusokra. Eközben nemegyensúlyi állapotok lépnek fel, és a jég megolvadhat. Talán ezzel kapcsolatos, hogy a Phoenix szonda az északi sarkvidéken néhány centiméter mélyen karbonátokat, agyagásványokat és olyan sókat talált, amelyek folyékony vízből válhattak ki. Az elmúlt millió években több olyan időszak is lehetett, amikor itt vékony vízfilm boríthatta a regolit szemcséit, és kémiai változásokat generált. Egyes megfigyelések és elméleti modellek alapján az sem zárható ki, hogy mikroszkopikus méretskálán napjainkban is megjelenhet a víz (Möhlmann, 2004). A Mars tehát érdekes és a mai technológiával vizsgálható asztrobiológiai célpont.

#### Földi ősléves, kozmikus fűszerek

A földi élet keletkezését megelőző prebiotikus folyamatokat is befolyásolták kozmikus tényezők. Stanley Miller kísérlete óta tudjuk, hogy egyszerű szerves anyagok abiogén úton is keletkezhetnek villámoktól, ultraibolya sugárzástól. A fontos összetevők légköri keletkezésére a Titan mutat érdekes példát. A korai Földön is elképzelhető hasonló, az ultraibolya napsugárzástól képződött szmogréteg, ahol hosszú molekulaláncú, szén alapú anyagok keletkeztek. De szerves összetevők a kőzetek repedéseit átjáró forró vizes oldatoktól és a becsapódó testek keltette légköri lökeshullámok hatására is létrejönnek – mindezek felett pedig magukban a meteoritokban is érkeztek.

A kondrit meteoritok szülőégitestjeinek repedéseiben víz cirkulálhatott, kémiai reakciókat kiváltva. Ezek a meteoritok laza szerkezetük miatt a légkörben néha szétporladtak, és hamar lelassultak, aminosavakkal és építőkövekkel bombázva az ősi Földet. Az EET 92042 és GRA 095577 jelű meteoritban az aminosavak és a fehérjék koncentrációja a más meteoritoknál jellemző max. 15 ppm helyett 180, ill. 249 ppm volt. A szenes kondritok anyagának 1–3 %-a is lehet szén alapú összetevő, amelynek harmadát sokgyűrűs aromás szénhidrogének (PAH-ok) tehetik ki.

A Murchison-meteorit például közel hetvenféle aminosavat tartalmaz, közülük csak hatot használnak a földi élőlények – emellett az RNS egyik építőköve, egy nukleotidbázis is megtalálható az anyagában. A Tanzániában 1938-ban hullott Ivuna nevű, 705 grammos meteoritban pedig az aminosavak közül a prebiotikus fejlődésben fontos b-alanint és a glicint azonosították. Mindent összevetve, a becsapódások és a fent említett más folyamatok együttesen évente közel  $10^8$ – $10^{10}$  tonna szerves anyagot termeltek bolygónk első százmillió éve során. A becsapódó üstökösökben is jöhetett vízjég és szerves anyag, utóbbiak közül a glicint azonosították a Wild-2 üstökös magjában.

Ugyanakkor az ősi becsapódások kellemtelenek is lehetnek. A 300–400 km-es objektumok ütközései akár a teljes világtengert elpárologtatták. Ettől forró vízpáralégkör és erős üvegházhatás alakult ki, és maradt fent ezer évekig. Ilyen becsapódásokra legutóbb négy milliárd évvel ezelőtt kerülhetett sor.

**Extrém élőlények és földi analógiák**

Az extrém hidegben vagy melegben, sós, illetve savas, avagy lúgos környezetben, akár több km mélységig előforduló extrémofilek mint földi analógiák vizsgálata sok érdekes eredményt hozott. Tűrőhatáraikat többféle állá-

potban is vizsgálhatjuk: 1. amikor az élőlények szaporodni is képesek; 2. amikor csak anyagcserére képesek; 3. amikor tetszhalott állapotban inaktívak, de megfelelő viszonyok esetén még életképesek; és elkülöníthető, amikor már sosem lesznek életképesek (Gánti, 1971). A jelenleg ismert határokról és néhány példa taxonról az 1. táblázat nyújt áttekintést.

Fentiek alapján bolygónkon a forró vulkáni központokat és a leghidegebb területeket kivéve sok helyen megélnek egyes extrémofilek. A felszín alatt több km mélységig előfordulnak, amelyek kemoszintézissel, napfény nélkül élnek, és a kőzet-víz kölcsönhatásokkal keletkező hidrogént, hidrogénszulfidot, metánt és szénhidrogént használnak fel.

A tetszhalott állapot időtartamát az összetevők lebomlásának sebessége erősen befolyásolja. Az alacsony hőmérséklet a lassú kémiai reakciók miatt segít ebben, a felszín alatti helyzet pedig a kozmikus sugárzástól véd. Kiszáradt állapotban a sejt citoplazmájában lévő kevés vízmolekulából az ultraibolya sugárzástól kevesebb reakcióképes és roncsoló gyök keletkezik. A túléléshez ideális a sporá-

láció, amikor egy endospórát alkot a sejt, és ez extrém viszonyokat is túlél, majd megfelelő körülmények közé kerülve éled újra. A tetszhalott állapotban kibírt időszakra már sok éve elfogadják a két–négy milliárd éves, megbízhatónak tekintik a huszonöt–harminc milliárd éves *Bacillus sphaericus* példányainak újraéledését is (Cano – Borucki, 1995). Vita tárgyat képezi az eddigi rekorder, a 250 millió éves 2-9-3 jelű baktériumfaj, amely perm korú sókristályokból került elő, és egyes szakemberek szerint életképesnek bizonyult.

Az extrémofilek és élőhelyeik (sivatag, permafroszt, jégtakaró, magashegy, vulkáni környezet) tanulmányozása támpontot adhat a Földön kívüli élet kutatásához. Népszerűek például a vastartalomtól vöröses felszínű antarktisi szárazvölgyek, ahol a talaj felső rétegében alkalmanként sós oldatok mozognak, illetve válnak ki. Ugyanitt a Marson megfigyelhető sárfolyásokhoz hasonló alakzatok is vizsgálhatók. Az antarktisi völgyekben ritka a vízfolyás, de a kierodált mélyedés alatt, a szemcsék között tartósan áramlik az olvadásvíz. A kis völgyben mint domborzati csapdá-

ban dér és hó rakódhat le, amely alkalmanként megoldható.

Sivatagokban nedvességcsapdaként szolgál a kőzetek málladéktakarójának szemcséi közötti tér. Sivatagi máznak általában a legkülső, vékonyabb bevonatot nevezik, míg ez alatt több mm mélységig szintén lehetnek élőlények a mállási kéregben, amelyet kriptobiotikus kéregnek neveznek (Pócs, 2009). Az Atacama-sivatagból származó mázakban ATP-molekulák alapján baktériumokat mutattak ki a legszárazabb vidékeken is. A máz alatt található 2–4 mm vastag mállási kéreg a hőingástól, a kiszáradástól, az erős sugárzástól védi az élőlényeket – de a fotoszintézishez elég fényt enged be. A fény mennyiség 2–4 mm mélységig is elegendő az egyszerű élőlényeknek. Bolygónkon mesterségesen is teremthetünk olyan viszonyokat, amelyek a marsbéliekhez hasonlítanak. Az ún. Mars-szimulációs kamrákban alkalmanként meglepően ellenállóknak mutatkoztak egyes élőlények (Horváth et al., 2006).

#### A pánszpóra elmélet

A pánszpóra és pánspermia elméletek szerint élőlények a világűrbe is kijuthatnak, és ha tetszhalott állapotban túlélnek az ott uralkodó körülményeket, megfelelő viszonyok közé kerülve ismét életre kelhetnek, étellel „fertőzve meg” egy másik égitestet. Egy nagy becsapódás a felszínközeli kőzeteket úgy lövi ki, hogy bennük az ellenálló mikroba kevéssé roncsolódnak. Svante Arrhenius 1908-ban vetette fel, hogy a földi globális mágneses tér segítségével is kerülhetnek baktériumok az űrbe. Az egysejtűeket a felszínről zivatarok elektromos jelenségei és szelek juttathatják fel 10–50 km magasba. Itt szaporodnak, és alkalmazkodhatnak az erősebb sugárzáshoz, kisebb légnyomáshoz és hideghez.

Az egysejtűek felületén megtapadó töltések a mágneses térrel kölcsönhatnak, és ha a felfelé mutató erő meghaladja a gravitációs erőt, akár több 100 kilométeres magasságba is emelkedhetnek a baktériumok. Innen aztán a magnetoszféra segítségével, például az ún. magnetoszférikus buborékok erővonalaihoz tapadva távolodhatnak el bolygónktól.

Az egyszerű élőlények tetszhalott állapotban, rövid idő alatt nem feltétlenül szenvednek el akkora sugárterhelést az űrben, hogy többé már ne legyenek életképesek. Hosszabb időt pedig megfelelő sugárvédő réteg segítségével, pl. egy kőzet belsejében vésszelhetnek át. Ekkor viszont már a kődarab saját radioaktivitása a korlátozó tényező. Végül a légköri belépést és felizzást kell „túlélnie” az inaktív élőlénynek, amelyre szerencsés esetben van esély: a meteorikus testnek csak a külső rétege melegszik át, belül hűvös marad. A nagy sebességű becsapódás pedig a légkörben bekövetkező szétDarabolódás esetén kerülhető el.

Egy adott bolygórendszeren belül sokkal nagyobb az esély az élet ilyen vándorlására, mint hogy a kirepült test egy másik csillag körüli planétán landoljon. A Chicxulub becsapódás alkalmával például kb.  $10^9$ – $10^{10}$  t anyag repült ki a Földről, amelyből a hozzánk száz fényévnél közelebbi csillagok környezetébe csak gramm nagyságrendű mennyiség juthatott el. Jelenleg évente tonnányi nagyságrendű anyag hagyhatja el a Naprendszert.

#### Kozmikus hatások bolygónkra

A bolygórendszeren belüli hatások közül legfontosabbak a becsapódások. Ezek a krátert kialakító és ásványokat átalakító hatásuk (Mihályi et al., 2008); elfújhatják a légkört, megváltoztathatják az éghajlatot (például egyes földi kihalások esetében), és átmenetileg lokálisan megemelhetik a hőmérsékletet.

hőmérsékleti határok

-15 °C (*Cryptotendolithotrophs* baktériumok)  
+113 °C (*Pyrococcus furiosus*)

vízaktivitás

>~0,6, és vízgőz formájában is elegendő

(vízgőz parciális nyomás) határa

lúgosság–savasság határai

pH=13 (*Plectonema nostocorum*)  
pH=-0 (*Cyanidium caldarium*)

sóoldat maximális kibírt koncentrációja

telített sóoldat (*Dunaliella salina*)

sugárzás határa

emberre halálos sugárdózis kétezerszerese  
(*Deinococcus radiodurans*)

inaktív állapot túlélése

2,5 év a Holdon a Surveyor-3 belsejében  
(*Streptococcus mitis*), földi körülmények között sok millió év

1. táblázat

Szerves anyagokat juttathatnak a felszínre, és akár élőlények égítetek közötti vándorlásában is közreműködhetnek. A Naprendszer korai időszakában a Jupiter és a Szaturnusz sok apró égítetet szórt ki, enélkül sokkal több becsapódás történt volna a Földön is. Az árapályhatástól pedig változhat a belsőben felszabaduló energiamegnyiség, ami jeget olvaszthat (például Europa) vagy vulkáni aktivitást okozhat (például Io).

A légkört érő kozmikus sugárzás (nagyenergiájú atommagok) elősegítik az aeroszolok és a felhők képződését. Erős napaktivitáskor pedig az intenzívebb napszél kevesebb töltött részecskét enged a Föld légkörébe, ami-

től gyengülnie kellene a felhőképződésnek. Az elméletileg várható kapcsolatot azonban mérésekkel egyelőre nem sikerült kimutatni. A bolygók fejlődésére ható külső tényezőket az 5. ábra foglalja össze.

#### A lakhatóság fogalma

Az asztrobiológiában régóta használt, gyakran definiált fogalom a lakhatóság. Szűkebb értelemben azt jelenti, hogy egy adott környezet biztosítja-e a földihez hasonló élet kialakulásának és fennmaradásának lehetőségét. Utóbbit numerikusan jellemezni ma még nem lehet, ezért egyszerűbb közelítésére a lakhatósági zónákat használják. Ezek azon

térségek egy csillag körül, ahol egy Földhöz hasonló bolygó felszínén stabilan létezhet folyékony víz. Belső határán a  $H_2O$  a tropopauzán keresztül a felsőlégkörbe, onnan pedig az űrbe szökhet. Külső határát nagyjából a légköri szén-dioxid kifagyása jelenti. A lakhatóság szempontjából fontos még, hogy a csillag sugárzása stabil legyen. A sok flett produkáló égítetek időnként lenyomják a bolygólégkörökben az ionopauzát, amitől gyorsul a légkörvesztés.

Dinamikai szempontból elkülöníthetők a Naprendszerünkben megfigyelt, óriásbolygókon belüli lakhatósági zóna, a forró Jupiter típusú exobolygóknál az óriásbolygóknál távolabb lévő zóna, és amikor maga az óriásbolygó van a zónában – itt az égítetek holdjai lehetnek érdekesek. A lakhatósági zónákkal kapcsolatban probléma, hogy modelljeik kevés tényezőt vesznek figyelembe. Emellett nem ismert eléggé a szén-dioxid-felhők üvegházhatása, és a vulkáni aktivitás fűtőhatásával sem számolnak. Az élet kialakulásához nem biztos, hogy felszíni víz kell – a felszín alatt pedig a belső hő vagy árapályhatás sok helyen olvaszthatja meg a jeget a csillagtól távol is.

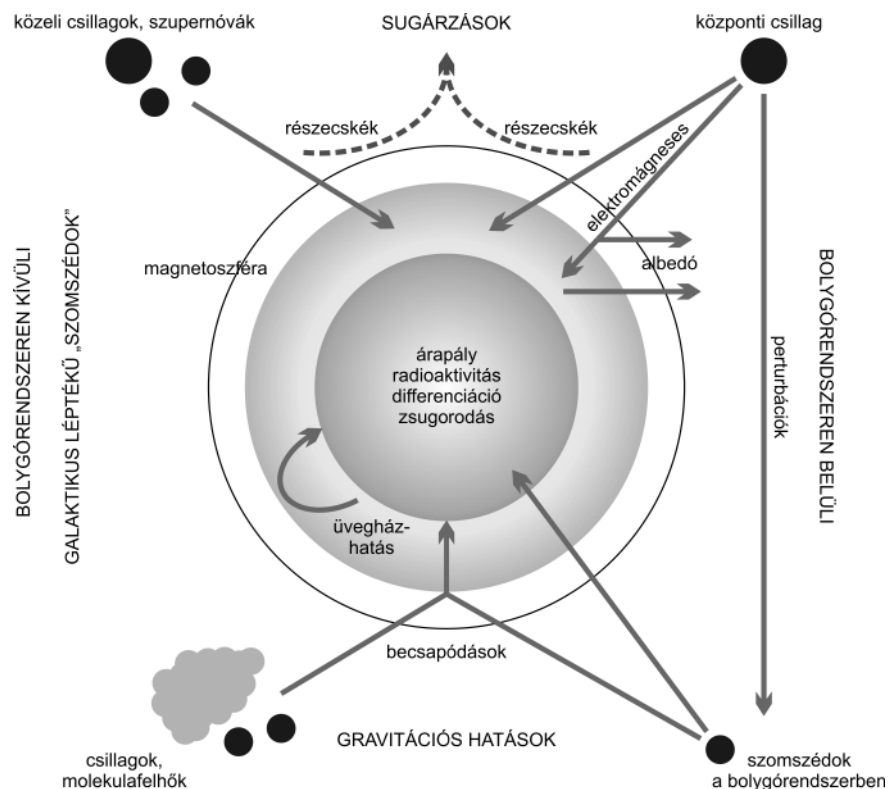
Elméletileg egy csillag galaktikus környezete is hat bolygóján az élet fejlődésére, de itt még bizonytalanabb a helyzet. A porban szegény csillagközi zónákban kevesebb szemcse juthat egy bolygórendszer belsejébe és a bolygók légkörébe, ami elméletileg csökkentheti a kondenzációs magvak számát és a felhőborítottságot.

A galaxisok központi fekete lyukainak környéke vagy a csillagkeletkezési régiókban bekövetkező gyakori szupernóva-robbanások sugárzásai is kellemedenek. A feltételezések alapján extrém nagy tömegű csillagok életének végén bekövetkező hipernóva-robbanások vagy összeolvadó neutroncsillagok kiváltotta

gammavillanások hatása is jelentős, amelyek fotokémiai szmogréteget hozhatnak létre. Megnövelik a légköri nitrogén-oxidok és csökkentik az ózon arányát. Az ezzel kapcsolatban fellépő savas esők a talajban növelik a nitrátok mennyiségét, aminek kedvező hatása is lehet. Mivel a csillagkeletkezés a spirálkarokban jellemző, ezért merült fel a korotációs zóna mint ideális térség lehetősége, ahol a Nap is megtalálható. Itt az égítetek keringési sebessége a spirálkarok körbefordulási sebességéhez közeli, azaz ritkán keresztezik azokat és az ott található csillagkeletkezési tartományokat.

#### Hazai kutatások

Az exobolygókkal kapcsolatos hazai kutatások közül kiemelkedik a Hungarian Automated Telescope (HATNet) amerikai–magyar távcsőhálózat (Bakos et al., 2004), amely 2009 februárjáig tizenegy fedési exobolygót talált. A magyar ötlet alapján készült távirányítású robotteleszkóp-rendszert itthon tervezte és építette Sári Pál, Papp István és Lázár József (Magyar Csillagászati Egyesület) Bakos Gáspár (korábban MTA KTM CSKI, ma Harvard-Smithsonian Asztrofizikai Központ) vezetésével. A bolygókeresés szoftveres oldalára Kovács Géza (MTA KTM CSKI) dolgozott ki hatékony módszereket. Exobolygókkal is kapcsolatos a Magyar Asztroszeizmológiai Csoport munkája, amelynek eredményeit a V391 Pegasi b jelű exobolygó felfedezéséhez használták fel. A Szegedi Tudományegyetem és a Szegedi Csillagvizsgáló munkatársai (Simon et al. 2007) az exobolygókkal és holdjaikkal kapcsolatos modellezésen dolgoznak. Az ELTE Csillagászati Tanszékén pedig a távoli planéták pályaelemeinek stabilitásával kapcsolatos számításokat végeznek Érdi Bálint vezetésével (Érdi – Sándor, 2005).



5. ábra • Egy bolygóra ható, asztrobiológiailag érdekes tényezők: fent a sugárzásos, lent a gravitációs hatások, jobbra a bolygórendszeren belüli, balra az azon kívüli hatások láthatók

A Collegium Budapest Institute for Advanced Study intézetben az Európai Űrügynökség és a Magyar Űrkutatási Iroda támogatásával működő Mars Asztrobiológia Kutatócsoport a Mars felszíni viszonyait, a víz időszakos megjelenési lehetőségét és potenciális földi analógiákat, extremofil szervezeteket vizsgál (Szathmáry et al., 2007). A szerves anyagok ultraibolya sugárzásra adott reakcióját tanulmányozzák az MTA–SE Biofizikai Kutatólaboratóriumában. *Rontó Györgyi* és *Bérczi Attila* vezetésével hazánk is részt vesz a világűrre kiterjedő vizsgálatokban, ahol a kozmikus sugárzás hatását tanulmányozzák, részben a pánszpóra-elmélet szempontjából.

Az asztrobiológiai ismeretek és módszerek az egyetemi oktatásban is hasznosak a téma érdekessége és az eltérő tudományterületek közötti kapcsolódási pontok miatt. Asztrobiológiai kurzusok hangzottak el az ELTE Csillagászati Tanszéke szervezésében *Almár Iván* és *Illés Erzsébet* vezetésével 1997-ben, később a Szegei Tudományegyetemen, és az ELTE Természetföldrajzi Tanszékén. A nagyközönséget célozza meg az Origo online *Origo asztro-*

*biológia kurzus* című cikksorozata, amelynek részeit alkalmanként 10–15 ezer olvasó böngészte (Simon – Kereszturi 2009).

Az eltérő tudományterületek és a műszaki szakemberek kooperációjára ideális keretet nyújt az asztrobiológia. A fejlesztés alatt álló űrteleszkópok tervezésénél geológusok, biológusok, meteorológusok és vegyészek mérnökökkel együtt dolgoznak, hogy a berendezések képesek legyenek a légköri összetétel meghatározásán túl felhőket, víztükroket, éghajlati jellemzőket kimutatni az exobolygókon. A színeképekben talán a szárazföldeket sokáig borító, baktériumokból álló bevonathoz hasonlót, esetleg klorofilt is azonosíthatnak. Eközben a Mars-szimulációs kamrából nyert eredményeket az antarktiszi McMurdo-szárazvölgyek megfigyeléseivel szintetizálva tervezik a következő Mars-szondákat, amelyek életnyomokat kereső műszereit az Atacama-sivatagban is tesztelik, szintén asztrobiológiai projektek keretében.

Kulcsszavak: *asztrobiológia, Földön kívüli élet, Mars, Europa, Titan*

## IRODALOM

- Almár Iván (1999): *A SETI szépsége*. Vince, Budapest
- Bakos Gáspár Á. – Noyes, R. W. – Kovács G. – Stanek, K. Z. – Sasselov, D. D. – Domsa I. (2004): Wide-field Millimagnitude Photometry with HAT: A Tool for Extra-Solar Planet Detection. Publications of the Astronomical Society of the Pacific –PASP. 116, 266–277. <http://www.journals.uchicago.edu/doi/pdf/10.1086/382735>
- Cano, Raul J. – Borucki, Monica K. (1995): Revival and Identification of Bacterial Spores in 25- to 40-million-year-old Dominican Amber. Science. 268, 5213, 1060–1064.
- Érdi Bálint – Sándor Zsolt (2005): Stability of Co-Orbital Motion in Exoplanetary Systems. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy. 92, 1–3, 113–121.
- Gánti Tibor (1971): *Az élet princípiuma*, Gondolat, Budapest

- Mihályi Krisztián – Gucsik A. – Szabó J. (2008): *Drainage Patterns of Terrestrial Complex Meteorite Craters: A Hydrogeological Overview*. 39<sup>th</sup> Lunar and Planetary Science Conference #1200.
- Gyenyizse Péter (2008): Planetomorfológia. In: Lóczy Dénes (szerk.): *Geomorfológia II*. Dialóg Campus, Budapest–Pécs, 305–362.
- Horváth András – Gánti T. – Bérczi Sz. – Pócs T. – Kereszturi Á. – Sik A. (2006): Marsi dűnefoltok: az élet lehetősége a Marson? Magyar Tudomány. 11, 1357–1375.
- Kereszturi Ákos (2007): Éghajlatváltozás a Marson I–II. Légkör. 52, 2, 12–17., 52, 3, 6–9.
- Kereszturi Ákos – Simon Tamás (2005): Asztrobiológia. In: Mizser Attila – Taracsák G. – Szabados L. (szerk.): *Meteor csillagászati évkönyv*. Magyar Csillagászati Egyesület, Budapest, 190–218.

- Kuti Adrienn (2009): *Thermal Behavior of Dokka Crater and Its Surroundings in the North Polar Region of Mars*. 40<sup>th</sup> Lunar and Planetary Science Conference #1006.
- Mizser Attila – Kereszturi Ákos (2003): *The Astrobiology Matrix and the “Drake Matrix” in Education*. 34<sup>th</sup> Lunar and Planetary Science Conference Abstract 1114.
- Möhlmann, Dietrich T. F. (2004): Water in the Upper Martian Surface at Mid- and Low-latitudes: Presence, State, and Consequences. Icarus. 168, 318–323.
- Pócs Tamás (2009): Cyanobacterial crust types, as strategies for survival in extreme habitats. Acta Botanica Hungarica. 51, 1–2, 147–178. [http://www.colbud.hu/esa/publications/Cyanobacterial\\_crust\\_types.pdf](http://www.colbud.hu/esa/publications/Cyanobacterial_crust_types.pdf)

- colbud.hu/esa/publications/Cyanobacterial\_crust\_types.pdf
- Simon Tamás – Kereszturi Ákos. (2009): *Online Astrobiology Course in Hungary*. 40<sup>th</sup> Lunar and Planetary Science Conference abstract 1048.
- Simon Attila – Szatmáry K. – Szabó Gy. M. (2007): Determination of the Size, Mass, and Density of “Exomoons” from Photometric Transit Timing Variations. Astronomy & Astrophysics. 470, 727–731.
- Szathmáry Eörs – Gánti T. – Pócs T. – Horváth A. – Kereszturi A. – Bérczi Sz. – Sik A. (2007): Life in the Dark Dune Spots of Mars: A Testable Hypothesis. In: Pudritz, Ralph – Higgs, P. – Stone, J. (eds.): *Planetary Systems and the Origin of Life*. Cambridge Astrobiology Series III., Cambridge University Press

