

LAKHATÓK-E A TRAPPIST-1 FÖLD-SZERŰ BOLYGÓI?

Dencs Zoltán

MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont

Az amerikai Űrhajózási Hivatal bejelentése szerint hét Föld típusú bolygót találtak a TRAPPIST-1 rendszerben. A nagy jelentőségű felfedezés vezető kutatói február 22-én a NASA TV élő közvetítésében foglalták össze eredményeiket, másnap pedig a *Nature* folyóiratban jelent meg *Michaël Gillon* és munkatársainak publikációja a bolygók felfedezéséről. A TRAPPIST-1 rendszert már az a tény is különlegessé teszi, hogy hét bolygó kering a központi csillag körül. A felfedezés valódi jelentőségét azonban az adja, hogy a rendszer bolygóinak mérete és tömege egytől-egyig a Földéhez hasonló.

A bolygórendszerek kialakulásának vizsgálatában, illetve a Földön kívüli élet kutatásában jelentős szerepet játszanak a Föld-szerű bolygók. A TRAPPIST-1 rendszerben három bolygó kering a csillag körüli lakható zónában, így ezeken kialakulhattak az élet bizonyos formái. Jelen cikkben a felfedezett bolygórendszer tulajdonságait mutatom be, majd ezek alapján megvizsgáljuk, milyen körülmények szükségesek az exobolygókon az élet megjelenéséhez, fennmaradásához és fejlődéséhez.

A TRAPPIST-1 bolygórendszer felfedezése

A bolygórendszer központjában található TRAPPIST-1, egy 2000-ben felfedezett M8 színképosztályú, hideg törpecsillag, amely a Naprendszerből 39 fényév távolságra található a Vízöntő csillagkép irányában. A 19 magnitúdós csillag 150 milliószor halványabb, mint az éjszakai égbolt legfényesebb csillaga, a Sirius, ezért szabad szemmel nem látható. Fotometriai és spektroszkópiai mérések alapján ismert a csillag tömege (0,08 naptömeg), sugara (0,117 napsugár) és a fotoszféra effektív hőmérséklete ($T = 2555$ K). A csillagot 2008-ban kezdték vizsgálni az Université de Liège kutatói a TRAnsiting Planets and PlanetesImals Small Telescope (TRAPPIST) program keretében, amelynek

A szerző köszönetet mond *Regály Zsolt*nak a gondolatok megformálásában nyújtott segítségéért, *Szabados László*nak a szöveg gondozásáért és *Maglóczy Zsófi*ának a biológiai részekkel kapcsolatos hasznos tanácsaiért.



Dencs Zoltán földtudományi kutatóként végzett 2014-ben az ELTE TTK-n, majd 2016-ban csillagász oklevelet szerzett szintén a TTK-n. Jelenleg az MTA CSFK Csillagászati Intézeténél dolgozik fiatal kutatóként, emellett az ELTE Fizika Doktori Iskola hallgatója. Fő kutatási területe a csillagkörüli törmeléköröngök modellezése. Érdeklődési körébe tartozik még a bolygókeletkezés és a lakhatóság vizsgálata. Továbbá 3D képkalkotási technikákkal is foglalkozik.

során fotometriai módszerekkel kutattak törpecsillagok körül keringő exobolygók után. A TRAPPIST-1 fényességében periodikus csökkenést mutattak ki. A fényességváltozást a csillag korongja előtt a látóirányra merőlegesen áthaladó bolygók okozzák, ezt az észlelt fénygörbe jellegzetes alakja is alátámasztotta. Gillon és munkatársai három bolygót detektáltak ezzel a módszerrel, és felfedezésüket 2016-ban publikálták a *Nature* folyóiratban. A felfedezett bolygók az exobolygók nevezéktana alapján a TRAPPIST-1*b*, *c*, valamint *d* nevet kapták.

A tranzitmódszer egyik előnye, hogy nincs szükség hatalmas távcsövekre, csupán hosszú expozíciós időre és hatékony fénygyűjtő képességre ahhoz, hogy detektálni tudják a csillag fényességváltozásait. Így lehetséges, hogy a csupán 60 cm-es főtükörátmérőjű TRAPPIST műszerekkel sikerült exobolygókat detektálni. A belga Université de Liège-ben található a két Ritchey–Chrétien-típusú teleszkópból álló rendszer vezérlőközpontja, a déli távcsövet Chilében, míg az északit Marokkóban szerelték fel. A tranzitmódszernek azonban van egy hátránya, a kiválasztási effektus, amely miatt a régebb óta zajló kutatások főleg a Jupiterhez hasonló méretű, de a csillagukhoz nagyon közel (néhány napos periódussal) keringő bolygókat (úgynevezett forró jupitereket) fedeztek fel. A kiválasztási effektust az okozza, hogy annál nagyobb valószínűséggel lehet detektálni egy bolygót, minél nagyobb az átmérője és minél közelebb kering csillagához.

Fotometriai méréseket nemcsak látható, hanem infravörös-tartományban is végeztek. A TRAPPIST-1 energiakisugárzási maximuma infravörös-tartományba esik, ugyanis a fotoszférája alacsonyabb hőmérsékletű, mint a Napé. Az infravörös tartományú méréseket a Spitzer-űrtávcsővel, valamint a United Kingdom Infrared Telescope (UKIRT) és a Very Large Telescope (VLT) földfelszíni távcsövekkel végezték el. A mérések alapján vált világossá, hogy a rendszer legkülső tagjának vélt, *d* jelű bolygón túl további bolygók keringhetnek a csillag körül. A fénygörbék alapos analízise során később még négy bolygót azonosítottak Gillon és munkatársai: a TRAPPIST-1*e*, *f*, *g* és *h* jelű kísérőket.

A bolygók tulajdonságai

A fénygörbék elemzésével az exobolygók és keringési pályáik számos tulajdonsága meghatározható: a bolygópálya fél nagytengelye, excentricitása, a bolygó keringési periódusa, átmérője, valamint – bizonyos esetekben – tömege is. A csillag körüli keringés periódusa a bolygóátvonulások közt eltelt idő alapján számítható. A periódus ismeretében, Kepler III. törvényét

1. táblázat

A TRAPPIST-1 hét bolygójának fontosabb tulajdonságai

bolygó	N_{tr}	P (nap)	a_{pl} (CSE)	R_{pl} (R_{\oplus})	M_{pl} (M_{\oplus})	ρ_{pl} (ρ_{\oplus})
<i>b</i>	37	1,51	0,0111	1,086	0,85	0,66
<i>c</i>	29	2,42	0,0152	1,056	1,38	1,17
<i>d</i>	9	4,05	0,0214	0,772	0,41	0,89
<i>e</i>	7	6,1	0,028	0,9188	0,62	0,8
<i>f</i>	4	9,21	0,037	1,045	0,68	0,6
<i>g</i>	5	12,35	0,045	1,127	1,34	0,94
<i>b</i>	1	~20	0,063	0,755	–	–

Jelmagyarázat: N_{tr} az észlelt tranzitok száma, P a periódusidő, a_{pl} a bolygópálya fél nagytengelye csillagászati egységben, R_{pl} a bolygó sugara földszugárregységekben, M_{pl} a bolygótömeg földtömegben kifejezve, valamint az utóbbi két paraméter alapján számított ρ_{pl} átlagos sűrűség a Föld sűrűségének hányadában [1].

felhasználva megadható a bolygópálya fél nagytengelye. A csillag korongja előtt átvonuló bolygó sugara a fedés időtartamából és a fényességcsökkenés mértékéből becsülhető. Általános esetben a kísérők tömege a csillag látóirány menti (radiális) sebességváltozásának mértéke alapján határozható meg, de ez spektroszkópiai vizsgálatokat igényel. A TRAPPIST-1 esetén azonban nem álltak rendelkezésre csillagspektrumok, így a tömegeket a fénygörbék alapos analizisével a Transit Time Variations (TTV) nevű jelenség vizsgálatával határozták meg.

Azon bolygók, amelyek magányosan keringenek egy csillag körül, periódusideje változatlan. Ezzel szemben azon rendszerekben, amelyekben több bolygó található, a keringési periódusok hossza változó, a bolygók ugyanis perturbálják egymás mozgását. Az egymással gravitációs kölcsönhatásban lévő bolygók között folyamatos impulzusmomentum-átadás zajlik, míg a rendszer teljes impulzusmomentuma állandó. Ez a bolygók mozgásának gyorsulását vagy lassulását okozza, így a fedések – a közepes keringési periódushoz képest – néha korábban, máskor később következnek be. Az egymással rezonanciában keringő bolygópárok (keringési periódusuk aránya egész szám) szignifikáns TTV-jeleket keltenek. A TTV-módszer további előnye, hogy vele a bolygópálya excentricitása is meghatározható.

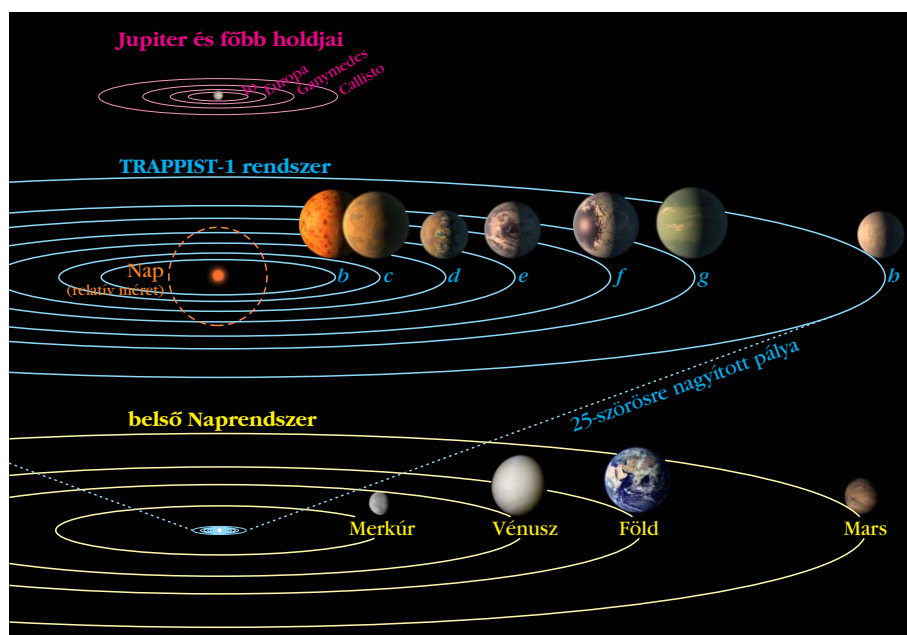
A hat belső bolygó átvonulását a központi csillag előtt többször is detektálták. Ezzel szemben a rendszer legkülső bolygója, a TRAPPIST-1*b* ese-

tén eddig csupán egy tranzitot sikerült megfigyelni. Így a *b* bolygó tömegét – periódusváltozás hiányában – nem lehetett meghatározni.

Gillon és munkatársai által a TRAPPIST-1 bolygónak a fentiek alapján kapott jellemzőit az 1. táblázatban mutatjuk be. Az adatokból jól látszik, hogy a TRAPPIST-1 bolygói méretük, tömegük és sűrűségük tekintetében a Földhöz hasonlítanak. Ebből arra következtethetünk, hogy a felfedezett égitestek lényegében vasból és szilikátokból felépülő kőzetbolygók, akár csak a Föld. Különlegesnek számít a Földnél is nagyobb sűrűségű TRAPPIST-1*c*, amelynek anomális sűrűsége azzal magyarázható, hogy a vasmagja nagyobb, mint a Földé. Az átlagos kőzetbolygók vasmagjának kialakulásához az olvadt bolygóbelső sűrűség szerinti kémiai osztályozódása vezet. *Nuth* elmélete szerint az anomálishan nagy vasmagú égitestek kialakulásakor az úgynevezett mágneses erózió jelensége megnöveli a vasmag méretét [2]. A protoplanetáris korongban (bolygókeletkezés helye) a gázfázisból kiváló vas és szilikát porszemcsék ütközése során mágneses kölcsönhatás lép fel a protocsillag mágneses tere és a ferromágneses vas között. Ez annyira megnöveli az ütközési sebességet, hogy a szilikátos részek leszakadnak a szemcsékről, és vasból álló tömbök jönnek létre. Ennek következtében a még nem differenciálódott kőzetbolygó az átlagosnál magasabb vastartalmú. *Hubbard* az anomálishan nagy vasmagú Merkúr keletkezését is ezzel az elmélettel próbálta magyarázni [3].

A TRAPPIST-1 rendszerben nem találtak óriásbolygót, mivel ki sem alakulhattak, ugyanis hideg törpecsillagok körül legfeljebb a Földéhez hasonló méretű és tömegű bolygók keletkezhetnek (1. ábra). Ennek több oka is van: 1) kis tömegű csillagok körül kis tömegű protoplanetáris korong alakul ki, amelyben nincs elég anyag az óriásbolygók létrejöttéhez; 2) ilyen csillagok körül egy

1. ábra. A TRAPPIST-1 rendszer bolygópályaméretei összehasonlítva Jupiter-holdak pályáival és a belső Naprendszerben található bolygópályákkal, valamint a bolygók méretarányos illusztrációja.



Föld tömegű bolygó gravitációs hatása is elegendő a bolygók építőköveinek (kis méretű planetezimálok) protoplanetáris korongból történő kiszórásához [4].

A galaxisunkban található csillagok nagy része legfeljebb negyed akkora tömegű, mint a Nap. Ez azt jelenti, hogy a törpecsillagok képviselik a legáltalánosabb csillagtípust. Mivel a törpecsillagok körül nagy valószínűséggel Föld tömegű bolygók keletkeznek, a Tejútrendszer leggyakoribb bolygótípusa a Földhöz hasonló. A Naphoz hasonló színképtípusú és tömegű csillagok körül azonban leginkább a Neptunuszéhoz hasonló tömegű óriások fordulnak elő. Tehát a Földhöz hasonló bolygók felfedezéséhez hideg törpecsillagokat érdemes vizsgálni.

Az élet kialakulásának feltételei

A Földön kívüli élet utáni kutatás számára kiváló lehetőséget nyújt a TRAPPIST-1 rendszer, amely nincs messze a Naprendszerőtől, így jól tanulmányozható. Ma azt gondoljuk, hogy leginkább a Földhöz hasonló bolygók kedveznek az élet kialakulásának. A Földön kívüli élet nyomainak detektálásához tisztában kell lennünk azzal, hogy a távoli bolygókon pontosan milyen jeleket keressünk, illetve mit tekintünk egyáltalán életformának.

Az „élet” meghatározása

Az élőlények élettelen környezettől való elkülönítésének egyik legáltalánosabb definícióját, a chemotonelméletet *Gánti Tibor* fogalmazta meg 1971-ben [5]. Gánti modellje szerint az élet egy különleges szerveződésű kémiai rendszer, amelynek alapegysége a chemoton. A modell földi környezetben, más bolygókon, de akár aszteroidákon is kielégítően definiálja az életet.

Az élet meghatározásához kiindulásként vizsgáljuk meg a földi élő rendszereket. Az élő rendszerekben az életfolyamatok többnyire oldatokban végbemenő kémiai reakciók. Ezen életfolyamatok olyan rendszerekben zajlanak, amelyekre teljesülnek az élet két fő csoportba sorolható kritériumai: I) az abszolút életkritériumok, amelyek szükségesek az egyedek életben maradásához, ezért minden élőlényben jelen vannak; II) a potenciális életkritériumok, amelyek nem az egyes egyedek, hanem az élővilág fenntartásáért felelősek. Az abszolút életkritériumok a következők:

1) Egy élő rendszernek egységesnek kell lennie, ha megbontanánk a rendszert, a részek alapján nem kapnánk képet az egész rendszerről.

2) Az élő rendszer a külvilágból anyagot és energiát vesz fel, ezeket a saját céljaira hasznosítja, a feleslegessé vált anyagoktól megszabadul (metabolizmus).

3) Az élő rendszer úgy szabályozza belső folyamatait, hogy belső állapota a külvilág változásainak ellenére is állandó maradjon.

4) Léteznek olyan alrendszerek, amelyek információval bírnak a teljes rendszerről, és ezt az információt más rendszerek képesek leolvasni, hasznosítani vagy lemásolni (RNS, DNS).

5) Az élő rendszerben végbemenő folyamatok szabályozottak.

A potenciális életkritériumok közé soroljuk 1) a növekedést, 2) a szaporodást, 3) az evolúció képességét, valamint 4) a halandóságot, amely lehetővé teszi a szerves anyag körforgását. Amikor csak az abszolút életkritériumok teljesülnek egy biológiai rendszerben, azt látens életnek nevezzük (például hibernáció alacsony hőmérsékleten). Az egyik leg egyszerűbb biológiai rendszer a sejt, amelyben kémiai úton mennek végbe a fenti folyamatok, ezáltal az biológiai aktivitást mutat. Ezt a rendszert nevezzük chemotonnak, amely egy anyagcsere-, egy határoló és egy vezérlő alrendszerből áll.

Csillagok körüli lakható környezetek

Az élő rendszerek kialakulásához számos környezeti feltételnek kell teljesülnie. Vizsgáljuk meg, hogy melyek ezek a feltételek, és közülük melyek adóttak a TRAPPIST-1 rendszerben.

Az élő szervezetek számára nélkülözhetetlen a cseppfolyós H_2O , azaz a víz. Egy kőzetbolygó felszínén víz akkor lehet jelen, ha a bolygó felszíni hőmérséklete ezt lehetővé teszi. A felszín hőmérsékletét elsősorban a központi csillagból származó energia befolyásolja. A csillag által időegység alatt kibocsátott összes energiát luminozitásnak nevezzük, amely mennyiség a csillagok egyik állapothatározója. A luminozitás ismeretében – a csillagtól adott távolságra – megadhatjuk egy bolygó felszíni hőmérsékletét. Ebből kiindulva kijelölhető egy csillag körüli, gyűrű alakú tartomány, amelynek határai között keringő bolygó felszínén cseppfolyós halmazállapotú lehet a víz, ha a bolygón egyáltalán van H_2O . A fenti meghatározás írja le a besugárzási, vagyis irradiációs lakható zónát (Irradiational Habitable Zone, IHZ), amelyet a hagyományos értelemben vett lakható zónának tekintünk. Az IHZ belső határánál közelebb a csillaghoz a bolygófelszín hőmérséklete olyan magas, hogy a H_2O gáz halmazállapotú, míg a külső határon túl nem elég magas a hőmérséklet a vízjég megolvadásához. Az IHZ méretének meghatározásához a Naprendszer szokás referenciaként használni (2. *ábra*). Az *ábra* függőleges tengelyén a csillagok M tömege szerepel az L luminozitás helyett, ugyanis ezen két mennyiség között – fősorozati törpe- és szubtrörpecsillagok esetén – felírható az $L \propto M^{3.5}$ arányosság.

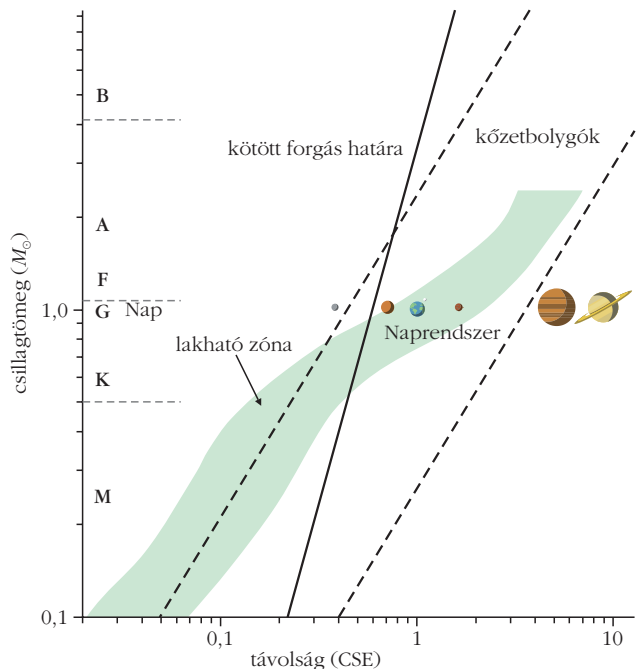
A TRAPPIST-1 luminozitása $5,24 \cdot 10^{-4} L_{\odot}$ (napluminozitás-egység), ez alapján meghatározható, hogy egy 0,024 CSE sugarú kör alkotja az IHZ belső és egy 0,049 CSE sugarú a külső határát. A rendszer három bolygójának keringési távolsága az IHZ határai közé esik. Azonban a bolygópályák excentricitását is figyelembe kell venni, ugyanis elegendően ellapult pálya esetén a pálya egyes szakaszai túlnyúlhatnak a zóna peremén. Ez esetben időszakosan megszűnhetnek a folyékony víz számára kedvező feltételek. Mivel a TTV-elemzés alapján a TRAPPIST-1 bolygóinak pályaeccentricitása nem haladja meg a 0,085 értéket, a há-

rom bolygó pályája teljes egészében az IHZ-gyűrűben helyezkedik el. Tehát a TRAPPIST-1e, f és g bolygók potenciálisan lakhatók. Az IHZ belső határán belül keringő b, c és d bolygók felszíne azonban olyan forró lehet, hogy valószínűsíthető légkörükben a H₂O csak gáz halmazállapotú lehet. A b bolygó pályája a külső határon kívül található, ahol a felszínen a H₂O csak jég formájában fordulhat elő.

Egy bolygó felszínén található H₂O halmazállapota adott hőmérsékleten nem csupán a hőmérséklet, hanem a bolygó légköri nyomásának függvénye is. Optimális nyomás esetén széles hőmérséklet-tartományban lehet cseppfolyós halmazállapotú a víz. A Földön a tengerszinten uralkodó légnyomás akkora, hogy 100 °C-ot átfogó tartományon lesz jelen folyékony víz. Ezzel szemben alacsonyabb légköri nyomás mellett (például az Andok csúcsain) a víz már ~80 °C-on felforr, így a cseppfolyós halmazállapot lehetősége hozzávetőlegesen 80 °C hőmérséklet-tartományra terjed ki.

Az élő rendszerek számára kedvező környezetekben a folyékony víz széles hőmérsékleti skálán kell, hogy jelen legyen. Magas nyomású légkör, kémiai összetételtől függően, megszabadó üvegházhatáshoz vezethet, aminek következtében a bolygó teljes vízkészlete elpárologhat. Annak ellenére, hogy a Vénusz a Naprendszer IHZ-jának belső peremén kering, a felszínén nincs folyékony víz. Ennek oka az, hogy bár a légköri nyomás 60-szorosa a földinek, a bolygó légkörét 96%-ban CO₂ alkotja, amely felelős a felszín magas (~400 °C) hőmérsékletéért. A Naprendszer lakható zónájának külső pereme közelében keringő Mars esetén a légköri nyomás 170-ed része a földinek, ezért folyékony víz csak 0 °C és ~2 °C közötti hőmérsékleten fordulhat elő. A Mars felszínén ma is látszanak vízmosságokra, folyóvölgyekre emlékeztető nyomok és üledékes kőzetek, amelyek kialakulásához folyékony vízre van szükség. Tehát a Marson egykor jelentős vízkészlet lehetett, azonban később – valószínűleg az erős mágneses védőpajzs hiányában – a légkör elvékonyodott, így a víz nagy része elpárologott. A kezdeti vízmennyiség töredéke jég formájában ma is megtalálható a poláris sapkákban, illetve a felszín borító porréteg alatt.

A Földön a H₂O háromféle halmazállapotban is előfordul, mivel a felszíni nyomás- és hőmérsékletviszonyok a víz hármaspontja közelében találhatók. Az átlagos hőmérséklet pedig 15 °C-kal magasabb a vízjég olvadáspontjánál. A Föld három fő víztározója (óceán, légkör, jégsapkák) között állandó a körforgás. A sarki jégsapkák folyamatosan szublimálódnak, és az óceánok is állandóan párolognak, így biztosítva a légkör vízgőztartalmát, amely telítődés esetén visszahull a felszínre. A Szaturnusz egyik holdján, a Titanon a légköri nyomás a földi másfélszerese. Azonban a Titan, amelynek légkörét túlnyomórészt szintén nitrogén alkotja, a Földnél tízszer távolabb van a Naptól, emiatt a hőmérséklete sokkal alacsonyabb (~–180 °C), épp a metán olvadáspontja közelében található. A Titanon a metán háromféle hal-



2. ábra. A lakható zóna (HZ) elhelyezkedését a különböző tömegű csillagok körül sáv jelöli. Folytonos vonallal van feltüntetve, hogy adott csillagtömeg mellett milyen távolságon belül válik kötötté egy kísérő keringése (a vonaltól balra lévő kötétek). A szaggatott vonalak a kőzetbolygók keletkezésének tartományát fogják közre. Az ábrán a Naprendszer bolygóinak helyzete is fel van tüntetve [6].

mazállapotban fordul elő. A vízjég alkotta felszínt szilárd metánjégtömbök borítják, a lehetséges felszín alatti folyékony víz olyan, mint a földkéreg alatti magma. A Huygens leszálló szonda mérései alapján a mélyedésekben metántavak verik vissza a polarizált fényt. A légkör 1,5%-át pedig metángáz alkotja. Elméletben elképzelhetők olyan biológiai rendszerek, amelyek kémiai reakciói vizes oldatok helyett metánoldatokban mennek végbe, csak hogy ilyen életformákra jelenleg nem ismerünk példát.

A víz eredete és az élet keletkezése

Annak dacára, hogy a bolygófelszíni körülmények kedveznek a víz cseppfolyós halmazállapotú megjelenésének, még nem biztos, hogy a bolygón van vízkészlet. Honnan származhat a kőzetbolygók felszíni vízkészlete?

A bolygókeletkezés kezdeti szakaszában a gázfázisban lévő elemek és vegyületek olvadáspontjuk hőmérsékletének függvényében a központi csillagtól egyre távolabb alkotnak szilárd fázist. A csillaghoz legközelebb kondenzálódnak a vas- és szilikátszemcsék, amelyek a kőzetbolygók alkotói, míg az illóanyagok – mint a víz – a hóhatáron túl alkotnak szilárd fázist. Ennek megfelelően a Föld száraz bolygóként jött létre. A Föld legősibb ásványai közé tartozik a cirkon, amelyből az eddig talált legkorábbi példány 4,375 milliárd éves. Mivel a cirkon kristályosodásához folyékony vizes környezetre van szükség, a Földön léteznie kellett egy elsődleges vízkészletnek, amelynek mennyisége és eredete ismeretlen.

3,8 milliárd évvel ezelőtt a naprendszerbeli óriásbolygók migrációjának hatására a messze keringő üstökösök és kisbolygók egy része beszóródott a belső Naprendszerbe (Late Heavy Bombardment, LHB). Az LHB-esemény során a magas víztartalmú égitestek nagy számban hullottak a Föld felszínére, hozzájárulva a mai óceánok létrejöttéhez. Azonban a Tempel 1 és a Churyumov–Gerasimenko üstökösök elemzéséből kiderült, hogy azok jegének deutérium/hidrogén (D/H) aránya hozzávetőlegesen négyszerese a földi óceánokban mérhető D/H aránynak. Viszont léteznek olyan kis égitestek, például a Jupiter-család kisbolygói és üstökösei, amelyeken a D/H arány megegyezik a földi értékkel, és ezek szintén szállíthattak vizet a belső Naprendszer bolygóira.

A bolygók atmoszférája fontos szerepet játszik a felszíni élet védelmében a központi csillagtól vagy kozmikus forrásokból származó nagy energiájú sugárzásokkal szemben. Az UV-, röntgen- és gamma-sugárzás károsítja az élő szervezetekben található fehérjék molekulaszervezetét, ezenkívül megbontja az örökítőanyag szekvenciáját.

A TRAPPIST-1 bolygóinak légköréről jelenleg nagyon keveset tudunk, de hamarosan spektroszkópiai módszerek segítségével megvizsgálják atmoszféráik összetételét. A méréseket bolygóátvonuláskor végzik el, ekkor ugyanis a csillag fénye a bolygókorong pereme mentén a bolygólégkörön át érkezik hozzánk. E fény spektroszkópiai elemzéséből képet kaphatunk a légkört alkotó gázok összetételéről.

Mindazok ellenére, hogy egy bolygó a lakható zónában kering és folyékony víz van rajta, még nem biztos, hogy van rajta élet. Az élet kialakulásához az eddig felsorolt feltételeken kívül elengedhetetlenek a biogén elemek, az élet „építőkövei” is. Az elsődleges biogén elemek – a szén, a hidrogén, az oxigén és a nitrogén – minden földi élő szervezetben megtalálható. Ezek az elemek jelen vannak a Naprendszer kőzetbolygóinak szilikátos felszínén vagy vízóceánjaiban. A biogén elemekből felépülő egyszerűbb molekulákból komplex szerves vegyületek, a sejtek alkotóelemei jöhetnek létre, ha a fenti lehetőségek egyszerre adottak egy bolygón. A folyamat első lépcsőfokát a Miller–Urey-kísérlettel sikerült reprodukálni. A TRAPPIST-1 három, IZH-ben keringő bolygóján szintén adottak lehetnek a körülmények az egyszerű vegyületekből építkező élet kialakulásához. Ugyanis ezek Földhöz hasonló sűrűsége arra enged következtetni, hogy összetételük is hasonló.

Az is elképzelhető azonban, hogy a legegyszerűbb életformák eredetileg nem azon a bolygón keletkeztek, ahol fejlődésnek indultak. A litospermia-elmélet szerint az élő szervezetek meteoritok, aszteroidák felszínén utazhatnak a világtérben, miközben csak az abszolút életkritériumok teljesülnek rájuk. Az életformák keletkezési helyén egy becsapódás a felszíni kőzetekkel együtt kirepítheti az élőlényeket a világtérbe, majd később egy másik bolygó felszínére érkezve elterjedhetnek az új környezetben is. Ehhez arra van szükség, hogy az új környezetben is kedvező létfelté-

telek legyenek, és a kezdetleges létformák túléljék a becsapódási eseményeket, valamint a világtérbeli utazást. Hasonló esemény történhetett az 1984-ben az Antarktiszon talált ALH84001 marsi eredetű meteorittal. A meteorit felületén baktériumokra emlékeztető szálas szerkezetű alakzatokat találtak, de nehéz bizonyítani, hogy ezek élő szervezetek nyomai lennének. Ha egy bolygórendszerben litospermia révén a bolygók „megfertőzhetik” egymást étellel, akkor annak lakható bolygóit közös bioszférába tartozó élőhelyeknek tekinthetjük.

Az IZH külső határán kívül is találhatunk az élet számára kedvező környezeteket, például a Jupiter Europa nevű holdján, ahol vízóceán lehet a több 10 km vastag jégkéreg alatt. Pályája alapján a TRAPPIST-1*b* is ilyen jeges felszíni bolygó lehet. Ha az Európán feltételezett folyékony vízréteghez hasonló felszín alatti óceán feneké közvetlenül érintkezik egy belső szilikátburokkal, az élet kialakulásához nélkülözhetetlen biogén elemek és az élőlények fejlődéséhez szükséges ásványi anyagok – hidrotermális nyílásokon, úgynevezett fekete füstölőkön (black smoker) keresztül – az óceánba kerülhetnek. A fekete füstölők működéséhez szükséges hő a központi csillag vagy a többi bolygó közelsége miatt fellépő árapályfűtés biztosíthatja. Egy ilyen bolygó esetén, légkör hiányában, a felszíni vastag jégburok biztosíthatja az élő rendszerek védelmét a roncsoló sugárzásokkal szemben. A felszín alatti óceánok meleg vizes kürtői környékén megjelenhetnek termofil életformák, amelyek metabolizmusuk során a kürtőkből kiáramló vegyületeket hasznosítják. Ilyenek a kemoszintetizáló baktériumok, amelyekről azt feltételezzük, hogy a földi élet legősibb formái. Amennyiben a TRAPPIST-1*b* bolygón ilyen környezetet találnánk, ott csupán egyszerű, fejletlen organizmusok jelenlétére számíthatunk.

Bolygópályák elhelyezkedésének szerepe

Tegyük fel, hogy olyan bolygót fedezünk fel, amelyen sikerül detektálni az általunk ismert élet számára fontos összes környezeti feltételt: a bolygón van megfelelő vízkészlet, ideálisak a hőmérséklet- és nyomásviyszonyok a folyékony víz jelenlétéhez, a sűrű légkör, ami megakadályozza a nagy energiájú sugárzás eljutását a felszínre, valamint az élő szervezetekbe beépíthető biogén elemek és ásványi anyagok megtalálhatóak az óceánokban és a szárazföldeken. Ha képesek vagyunk mindezeket kimutatni, akkor sem biztos, hogy életet találhatunk a vizsgált exobolygón, ugyanis a fenti környezeti feltételek csak a megfigyelés pillanatában érvényesek. Az élet kialakulása és fejlődése több milliárd évet is igénybe vehet, mialatt a környezeti körülmények csak szűk határok között változhatnak. Ezért arra vonatkozó becslést is kell végezni, hogy az élet számára kedvező környezeti állapot mióta áll fenn, és meddig maradhat meg változatlanul.

A központi csillag által biztosított luminositásnak évmilliárdokig közel állandónak kell lennie ahhoz, hogy az IZH határai ne módosuljanak. A nagy tömegű

O, B, A színképtípusú fősorozati csillagok néhány millió év alatt elhasználják hidrogénkészletüket, ezt követően energiatermelésük csökken. Az IZH ezalatt egyre közelebb kerül a csillaghoz. A kisebb tömegű fősorozati F, G, K színképtípusú csillagok (amelyek közé a Nap is tartozik) azonban energiatermelésük kezdetén aktívabbak, nagyobb a luminozitásuk, és nagy mennyiségű UV-, illetve röntgenfotonnal bombázzák környezetüket. Néhány százmillió év alatt ez az aktivitás lecsökken, majd egy ~10 milliárd éves állandó luminozitású periódus következik, amelynek során az IZH kiterjedése lényegesen nem változik. A legkisebb tömegű csillagok, az M színképtípusú törpék sugárzási környezete még ennél is hosszabb ideig marad állandó. Emiatt is érdemes a TRAPPIST-1-hez hasonló törpecsillagok körül keresni lakható exobolygókat.

A TRAPPIST-1 kora becslések szerint 0,5–1 milliárd év. Még kedvező körülmények esetén is nehéz megmondani, hogy mennyi idő telik el egy bolygó keletkezése és az élet meglepedése között. A Földön a legősibb biomarker (*Pilbara kraton*, Ausztrália, 2013) korát 3,475 milliárd évesre becsülik. Mivel a Föld kora körülbelül 4,5 milliárd év, így ebben az esetben az élet megjelenéséig csaknem egymilliárd év telt el. Az egyszerűbb kékbaktériumokból a sejtmaggal bíró eukarióták kialakulásához hozzávetőlegesen további másfél milliárd évnek kellett eltelnie. A szárazföldi élet első nyomai ~530 millió évesek, míg az első gerincesek csupán ~340 millió éve tették lábukat a szárazföldre. Ebből kiindulva a TRAPPIST-1 rendszerben még nem alakulhattak ki élő szervezetek, ha mégis, akkor azok nagyon fiatalok és kezdetlegesek. Azonban a földtörténet korai szakaszából származó ismereteink igen hiányosak. Az elmúlt évtizedek új felfedezései alapján egyre korábbi időpontokra datálták az élet megjelenését. A legfrissebb kutatások szerint egy Kanadában talált fosszília (hidrotermális kürtök közelében élt termofil) akár 3,77 milliárd éves is lehet [7], emiatt újra kell gondolnunk az élet keletkezésének számos aspektusát.

A csillag állandó sugárzásán kívül a bolygópálya stabilitása is fontos az élet szempontjából. Az élet egy kedvező időszakban megjelenhet, de ahhoz, hogy fenn is maradjon és továbbfejlődjön, a bolygópálynak évmilliárdokig az IZH-ben kell tartózkodnia. A pályastabilitást elsősorban a bolygók egymásra gyakorolt gravitációs hatása veszélyezteti. Impulzusmomentum-átadás révén megváltozik a bolygópályák fél nagytengelye, a szekuláris perturbáció miatt a pályasík és a pályaellipszis körbeforoghat, ezenkívül a bolygók forgástengelyének dőlésszöge is megváltozhat. Egy nagyobb tömegű bolygó pedig a kisebb tömegű bolygó pályájának excentricitását és inklinációját is megnövelheti. Ezek mind jelentősen befolyásolhatják egy bolygó éghajlatát. A stabil éghajlati viszonyok különösen a fejlett, esetleg intelligens életformák számára fontosak. A földkéreg mélyebb rétegeiben felfedezett primitív vasevő, illetve kénoxidáló baktériumok túlélése, fejlődése nem igényel oxigént és folyékony vizet.

A TRAPPIST-1 esetén a bolygópályák egymáshoz nagyon közel találhatók, így a bolygók erősen perturbálhatják egymás mozgását. Ennek ellenére egyetlen bolygó sem hagyja el a rendszert, és excentricitásuk sem növekszik. Ennek az a magyarázata, hogy a bolygók keringési periódusai kis egész számok hányadosával leírhatók, vagyis középmozgás-rezonanciában vannak egymással, ami stabilizálja keringésüket.

Az élet szempontjából további korlátozó tényező lehet a csillag által kifejtett árapályerő. Egy alacsony luminozitású, azaz kis tömegű csillag esetén a lakható zóna olyan közel lehet a csillaghoz, hogy az IZH a csillag úgynevezett Roche-sugarán belülré kerülhet. Viszont a Roche-határt átlépő bolygót az árapályerők szétszakíthatják, így ebben az esetben az IZH-ben nem keringhet más, csupán törmelék. A TRAPPIST-1 lakható zónája és a bolygópályák is a Roche-határon túl helyezkednek el, így azokat nem fenyegeti a szét hullás veszélye.

A TRAPPIST-1 bolygói nem csupán a csillagukhoz, de egymáshoz is közel keringenek, ezért az egymásra gyakorolt árapályhatásuk is jelentős lehet. Ez azonban nem elég erős ahhoz, hogy a kőzetfelszín szerkezeti integritását veszélyeztesse, de az árapály-súrlódás révén a bolygók belsejének felfűtéséhez elegendő lehet. Az árapályfűtésből származó hőtöbblet hatására pedig az IZH külső határára túl is lehetnének lakható bolygók. Ezért, bár a TRAPPIST-1b az IZH-n kívül kering, a feltételek talán mégis kedvezőek az élet számára.

Az árapályerők nem csupán a kőzetretegekre vannak hatással: jelentős felszíni vízkészlettel bíró bolygón dagályhullámokat keltenek az óceánokban. A bolygók konfigurációjától függően változó amplitúdójú hullámok szaladhatnak körbe egy adott bolygón. A szárazföldi, illetve a sekélytengeri élet kialakulását lehetetlenné tehetik az óriási szökőárhullámok (lásd: az *Interstellar* című tudományos-fantasztikus filmet, amelyben egy közeli fekete lyuk keltett gigantikus szökőárakat egy lakhatónak titulált, de halott bolygó óceánjában).

A központi csillag árapályereje által kifejtett forgatónyomaték lelassítja a bolygó forgását, amíg annak forgási és keringési periódusa meg fog egyezni (lásd a 2. ábrán a kötött keringés csillagtól mért távolságát a csillagtömeg függvényében). A lakható bolygó kötött keringése erősen korlátozza a komplex életformák kialakulását. Ebben az esetben ugyanis a bolygónak mindig ugyanaz a féltekéje fordul a csillag felé, amit állandóan ér a csillag sugárzása, míg az éjszakai félgömbön állandó sötétség van. A két félteke felszíni hőmérséklete jelentősen eltérhet (a Merkúron akár 320 °C is lehet a hőmérséklet-különbség a két félteke között). A nappali hemiszférán az intenzív párolgás miatt, az éjszakai fagyás miatt nem találunk folyékony vizet. Csupán a két félteke közötti terminátor mentén, egy keskeny gyűrűben lehet cseppfolyós halmazállapotú a H₂O. Így a kötött keringésű bolygón csak egy vékony sávban valószínűsíthető az élet kezdetleges formáinak megjelenése. Bár egy kellően

vastag légkör segíthet a hőmérséklet kiegyenlítésében, viszont ez könnyen okozhat megszabadó üveg-házhatást is, mint például a Vénusz esetén. A $0,08 M_{\odot}$ tömegű TRAPPIST-1 csillagtól hozzávetőleg $0,2$ CSE távolságon belül válik kötötté a keringés. Mivel a csillag mind a hét bolygója e tartományon belül található, ezért az összes kötött keringésű. Emiatt, ha az élet meg is vetette lábát a TRAPPIST-1 valamely lakható bolygóján, az legfeljebb csak egyszerűbb, extremofil élőlények formájában mutatkozik meg.

Van-e élet a rendszerben?

Azonos csillag körül keringő hét Föld típusú bolygó felfedezése szenzációs tudományos eredmény. Az elmúlt napokban Gillon csapata további két, Földhöz hasonló bolygót detektált a tőlünk mindössze $6,5$ parsekre található HD 219134 jelű törpecsillag körül. Minek köszönhetőek ezek a felfedezések, és miért érdemes a továbbiakban is a TRAPPIST-1-hez hasonló csillagok körül exobolygók után kutatni?

1) A kis luminozitású csillagok körül könnyebb kis méretű bolygókat találni, mint nagy luminozitású társaiknál, ugyanis egy Föld méretű bolygó átvonulása egy M törpecsillag előtt nagyobb fényességváltozást okoz, mint egy F, G vagy K csillag esetében.

2) A hideg M törpecsillagok a legáltalánosabb, legnagyobb számban előforduló csillagok galaxisunkban.

3) Egy M törpecsillag korongja előtti bolygóátvonulási esemény során egy kőzetbolygó légköre könnyebben megfigyelhető, mint nagyobb tömegű főszorozati csillagoknál. Az IZH-ben keringő bolygók esetén a lehetséges biomarkerek detektálása egyszerűbb.

4) A kis luminozitású M törpékhez közel található az IZH, így egy ebben keringő bolygó periódusideje olyan rövid lesz, hogy akár hetente figyelhetünk meg bolygóátvonulást.

Miután összegeztük az M színeképtípusú hideg törpecsillagok bolygó kutatás szempontjából előnyös tulajdonságait, most foglaljuk össze, hogy melyek a kedvező, illetve a kedvezőtlen körülmények az élet szempontjából. Elsőként tegyük fel, hogy a TRAPPIST-1e, f és g kőzetbolygókon megfelelő vízkészlet és légkör van. Ebben az esetben az élet kialakulása mellett szülő érvek a következők:

1) Lehet folyékony víz a bolygók felszínén.

2) Rendelkezésre állnak biogén elemek és ásványi anyagok az élet kialakulásához.

3) A csillag lassú fejlődése miatt a sugárzási környezet hosszú időn keresztül változatlan.

4) Stabil bolygópályák az erős középmozgás-rezonanciák miatt.

Ezzel szembeállíthatók az élet szempontjából kedvezőtlen körülmények:

1) A központi csillag és így a bolygórendszer túl fiatal.

2) Erős szökőárhullámok söpörhetnek végig a bolygók felszínén.



3. ábra. A James Webb űrtávcső szerelése a Johnson űrközpontban, 2017. május (NASA/Desiree Stover).

3) A bolygók keringési és forgási periódusa megegyezik.

Ezek alapján nem zárható ki, hogy élet keletkezhetett és fennmaradt a TRAPPIST-1 rendszerben, azonban a korlátozó tényezőket sem szabad figyelmen kívül hagyni. Ahhoz, hogy megbizonyosodjunk róla, van-e bármilyen életforma a rendszerben, újabb vizsgálatokra van szükség. Az M törpecsillagok fénygörbéinek méréséhez – Gillon vezetése alatt – már elkezdték építeni a négy teleszkópból álló Search for habitable Planets Eclipsing Ultra-cool Stars (SPECULOOS) nevű műszert. A tervek szerint 2017 decemberében helyezik üzembe az egyenként 1 m-es teleszkópokat. Amennyiben sikerül új exobolygót detektálni, annak megerősítéséhez és a légkörök összetételének vizsgálatához a James Webb űrtávcső (3. ábra) segítségét is igénybe fogják venni, amit várhatóan 2018-ban állítanak pályára.

Irodalom

- Gillon, M. és mtsai.: Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1. *Nature* 542 (2017) 456.
- Nath, J., A., III. és mtsai.: Magnetically enhanced coagulation of very small iron grains. *Icarus* 107 (1994) 155.
- Hubbard, A.: Explaining Mercury's density through magnetic erosion. *Icarus* 241 (2014) 329.
- Wyatt, M. és mtsai.: How to design a planetary system for different scattering outcomes. *MNRAS* 464 (2017) 3385.
- Gánti Tibor: *Az élet általános elmélete*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 2000.
- Cockell, C., S. és mtsai.: Planetary targets in the search for extraterrestrial oxygenic photosynthesis. *Plant Ecology & Diversity* 2 (2009) 207.
- Dodd, M., S. és mtsai.: Evidence for early life in Earth's oldest hydrothermal vent precipitates. *Nature* 543 (2017) 60.

Ajánlott irodalom

- Dobos, V. és mtsai.: The Effect of Multiple Heat Sources on Exomoon Habitable Zones. *Astron. & Astroph.* (2017) megjelenőben
- Kasting, J. F. és Calting, D.: Evolution of a habitable planet. *Annu. Rev. Astron. Astroph.* 41 (2003) 429.
- Lammer, H. és mtsai.: What makes a planet habitable? *Astron. & Astroph.* 17 (2009) 181.
- Regály, Zs.: Több, mint égen a csillag – I. Exobolygók felfedezése. *Fizikai Szemle* 65/7-8 (2015) 233.
- Regály, Zs.: Több, mint égen a csillag – II. Bolygók keletkezése. *Fizikai Szemle* 65/9 (2015/9) 306.