

# KERESSÜK A FÖLD ÉGI MÁSÁT!

Kiss L. László

HUN-REN CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet, Budapest

E-mail: kiss.laszlo@csfk.org

A legelső, Naphoz hasonló csillag körül keringő exobolygó, az 51 Pegasi b felfedezése óta [1] közel 30 év telt el. Azóta a Naprendszeren kívüli, azaz más csillagok körül keringő planeták kutatása hihetetlen fejlődésen ment keresztül. Az első két évtized egyértelműen a keresés és felfedezés jegyében telt el, amihez minden korábbinál pontosabb és érzékenyebb műszerek készültek földi óriásteleszkópokra és ilyen kutatásokat végző űrtávcsövekre. Az elmúlt kb. egy évtizedben egyre inkább át-helyeződött a hangsúly a jellemzésre, a felfedezett sok ezer exobolygó tulajdonságainak pontos meghatározására, amelyek ismeretében felrajzolhatjuk a keletkezés és fejlődés történetének legfontosabb állomásait.

A mindennek keretet adó nagy kérdés kezdettől fogva önmagunk keresése odakint, a csillagok világában. Egyedül vagyunk az Univerzumban? Van élet máshol? Létezik Földünk égi mása? Az utóbbi kérdés, a „Föld 2.0” megtalálása és az azon esetleg létező értelmes élet kimutatása, a kapcsolat felvétele talán a legizgalmasabb a nagyközönség számára is. A fény véges terjedési sebessége miatt óhatatlanul több évtizedes-évszázados múltat tanulmányozhatunk még a közelinek tekinthető csillagok bolygórendszereinek vizsgálatakor is. Ugyanakkor a sok esetben vágyvezérelt hipotéziseket felváltó empirikus tudás alapvető áttörés lenne még akkor is, ha a fényévek tucatjaira-százaira levő exobolygó(k) esetleges lakóival a kapcsolatfelvétel mai tudásunk szerint teljesen reménytelen.

Érdeemes ma, 2024-ben kicsit megállni és körbenézni az exobolygós tájon. Hova jutottunk a kezdeti szkepszist felváltó hirtelen lelkesedés és a valóság nehézségeivel történt szembenézés fázisai után? Tényleg a James Webb űrtávcső lesz az, amivel kutatók rámutathatnak egy exobolygóra mint valószínű életfolyamatok helyszínére? Immáron szenior kutatók is elmondhatják, hogy életük nagyobb felében már ismerték az exobolygók létezését, így a téma újdonságszerűsége elég régen elmúlt. Viszont a területre fordított hatalmas erőforrásoknak köszönhetően kis túlzással naponta jönnek a szenzáció-

ként tálalt felfedezések. Az ezekből összeálló általános képet néhány pontban elmesélve segíthetünk a kedves Olvasónak eligazodni a hírek áradatában és helyi értékén kezelni a szalagcímek mögött megbújó valóságot.

Először röviden összefoglaljuk, hogy miért is volt olyan nehéz felfedezni az első exobolygókat, utána pedig tíz fontos tényállításban áttekintjük az elmúlt években feltárt legfontosabb kutatási eredményeket.

## Felfedezni nehéz

A csillagok közötti hatalmas távolságok és a látható fény tartományában saját sugárzást nem kibocsátó exobolygók együttesen azt eredményezik, hogy a kisszámú közvetlen képalkotással történő bolygófelfedezés mellett a közvetett módszerek mindmáig a leghatékonyabbak. A bolygó csillag előtti átvonulása (tranzitja) során csökken a mérhető fényesség, és így jutunk a fedési exobolygók felfedezéséig. Míg egy Jupiterhez hasonló bolygó egy Naphoz hasonló csillag korongjának nagyjából 1%-át képes kitakarni, ezáltal 1%-os fényességcsökkenést előidézve, addig egy Föld méretű exobolygó a Naphoz hasonló központi csillaga előtt átvonulva mindössze 0,01%-os elhalványodást okoz. Ilyen pontosságú, hosszú időn keresztül folyamatosan fenntartott fényességmérés földi távcsövekkel a légköri hatások, felhők, nap- és éjszakák váltakozásai miatt nem kivitelezhető, ezért a Földhöz hasonló bolygókra vadászó programok szinte kivétel nélkül űrtávcsöves adatgyűjtésre alapoztak. E célból született meg a NASA 600 millió dolláros űrtávcsöve, a Kepler, ami 2009 és 2013 között egy adott égitületen lényegében megszakítás nélkül vizsgált több mint 150 ezer csillagot, körülöttük keringő exobolygók tranzitjaira vadászva. 2018 óta a szintén a NASA által elindított TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) folytatja a 200 fényévnél közelebbi csillagok fedési exobolygóinak felfedezésére irányuló megfigyeléseket, az Európai Űrügynökség pedig a 2020-as évek végén lép nagyot a PLATO exobolygókereső űrobszervatóriummal, ami 26 egyedi távcsővel hatalmas látómezőben lesz képes csillagok százazeirenek fényváltozását követni.

Ha a bolygó pályája tőlünk nézve térben nem halad el a központi csillag előtt, akkor is lehetséges a felfedezés, például a csillag periodikus sebességváltozásainak detektálásával. A rendszer tömegközéppontja körül nemcsak a bolygó, hanem maga a csillag is keringést végez, a csillag és a bolygó közötti távolságtól és a két égitest tömegének arányától függő mértékben. A csillag látóirányú (radiális) sebességét viszont a színképvonalak hul-



Kiss László Széchenyi- és Prima Primissima-díjas fizikus, diplomáját (1996) és PhD fokozatát (2000) a Szegeci Tudományegyetemen szerezte, majd 2007-ben lett az MTA doktora, 2013-tól az MTA levelező, 2019-től az MTA rendes tagja. 2009-ben az MTA Lendület Fiala Kutatói Program támogatásával tért haza hét évnyi ausztráliai kutatómunka után. Vezetésével csatlakozott Magyarországra az Európai Űrügynökség exobolygók-kal foglalkozó Cheops űrtávcsövének tudományos programjához. Jelenleg a HUN-REN Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont főigazgatója, a HUN-REN CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet kutatóprofesszora.

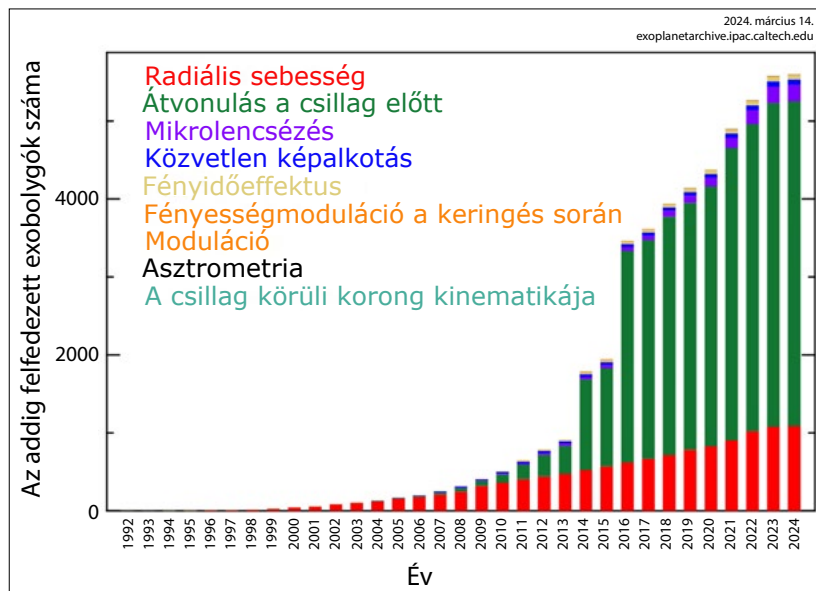
lámhossza elárulja. Az időben változó Doppler-effektus révén felfedezett exobolygókat szokás Doppler-bolygóknak hívni, s mindmáig ez a második legtöbb exobolygót eredményező módszer. Az, hogy a legelsőként felfedezett bolygók mind a csillagukhoz közel keringő (ezért magas felszíni hőmérsékletű) és Jupiterhez hasonló tömegű planéták volt, azaz mai kifejezéssel forró jupiterek, egyértelműen kiválasztási effektus: ezekre az égitestekre volt a legnagyobb a mérhető jel, azaz felfedezésük jelentette a legkisebb mérés technikai kihívást: jellemzően néhány napos periódusokkal több tíz, akár több száz m/s-os sebességváltozásokat kellett mérni. A Föld a Napot egy év periódussal kb. 10 cm/s sebességgel mozgatja meg – mindmáig nincsenek ilyen pontosságú csillagsebesség-mérő berendezéseinek; jelenleg inkább a 0,5–1 m/s a pontosság határa, ezért a Föld égi mását Doppler-bolygóként még egy ideig biztosan nem fogjuk megtalálni.

A megfigyelő csillagászok számos egyéb módszert kidolgoztak bolygó méretű testek kimutatására csillagok körül (a teljesség igénye nélkül: gravitációs mikrolencsézés, közvetlen képalkotás, asztrometriai imbolygás, másodlagos fényváltozás-modulációk), ám jelenleg a fedési és a Doppler-bolygók alkotják az ismert exobolygók túlnyomó részét. Arányait tekintve a helyzet a jövőben sem fog jelentősen megváltozni, mivel a tervezett földi és az űrből végrehajtandó keresőprogramok további fedési exobolygók tíz- és százazait fogják felfedezni a következő évtizedekben. A Gaia asztrometriai űrszonda várhatóan a központi csillagok bolygó általi imbolygását tízezres mintára képes lesz kimérni, ám ez még mindig el fog maradni a tranzitkereső programok produktivitásától. Egyes becslések szerint [2] 2050-re akár több tízmillió exobolygót felfedezhetünk, ami már egészen más dimenzióba fogja helyezni a terület kutatásait. Viszont a ma ismert exoplanéták alapján is meg lehet fogalmazni jó néhány általános kijelentést. Ezek közül válogattunk ki tízet a következő részben.

## Tíz fontos tény az exobolygók világából

### 1. Már több mint ötezer exobolygót ismerünk

Az interneten található, folyamatosan frissített exobolygó-katalógusok [3, 4] között vannak kisebb eltérések, ám abban összhang van, hogy 2024. március közepéig a csillagászok kb. 5600 exobolygót fedeztek fel. Ebből bő 4000 fedési, kicsit több mint 1000 Doppler-bolygó, és mindössze kevesebb mint 500 bolygót találtak más módszerekkel. A teljes mintát a Kepler dominálja, amely



1. ábra. Az exobolygó-felfedezések összesített darabszáma a felfedezési módszerek alapján [3]

a 2009 és 2013 közötti négy év szünetmentes adatgyűjtés után 2014 és 2018 között a K2 programmal 80 napos méréssorozatot folytatott az ekliptika mentén. Az utóbbi programmal is fedési exobolygók százait találta, de már csak a rövidebb keringési periódusú tartományból. A Kepler után a TESS vette át a felfedezésekben a vezető szerepet, és elsősorban ennek az űrtávcsőnek köszönhető, hogy a 2020-as években is 100–300 új fedési exobolygót találnak évente. Ehhez képest a bejelentett Doppler-bolygók száma kizárólag 2022-ben haladta meg az évenkénti százat, inkább csak 30–60 új felfedezést jelentenek be a kutatók egy-egy évben (1. ábra).

Összességében fontos üzenet, hogy ma már ténylegesen idegen világok ezreit lehet kutatni, ami az új vizsgálatok számára gyakorlatilag végtelen lehetőségek tárházát biztosítja.

### 2. A jelenleg ismert exobolygók nagyon különböznek a Naprendszer bolygótól

Ennek elsődleges oka az, hogy méréseink mindeddig a csillagukhoz közelebb keringő (tehát rövidebb keringési periódusú), nagyobb tömegű és csillagukhoz képest viszonylag nagyobb bolygókra voltak érzékenyek. A közeli és nagy tömegű bolygók a forró jupiterek, a közeli és kevésbé nagyobb méretű planéták – sűrűségük szerint – a szuperföldek és mini-neptunuszok (4–8 föld-sugár átmérőjűek); a csillagukhoz viszonyítva nagyobb méretű bolygók pedig lehetnek akár földméretűek is, cserébe a csillaguk nem a Naphoz hasonló, hanem akár tízszer kisebb átmérőjű vörös törpecsillag. Egyszóval a méréseinkhez kapcsolódó kiválasztási effektusok, különösen az adatgyűjtés teljes időtartama eleve a nem naprendszeri bolygókhoz hasonló planéták kimutatása felé terelik felfedezéseinket. Ettől függetlenül kijelenthető, hogy az exobolygók világa minden várakozást felülmú-

lóan változatosnak bizonyult, aminek fontos következménye, hogy a bolygókeletkezési elméletek csak akkor tekinthetők teljesnek, ha a Naprendszerünk kialakulásán túl képesek megmagyarázni ezt a végtelenül változatos bolygóvilágot is más csillagok körül.

### 3. Bolygók szinte minden csillag körül keringenek

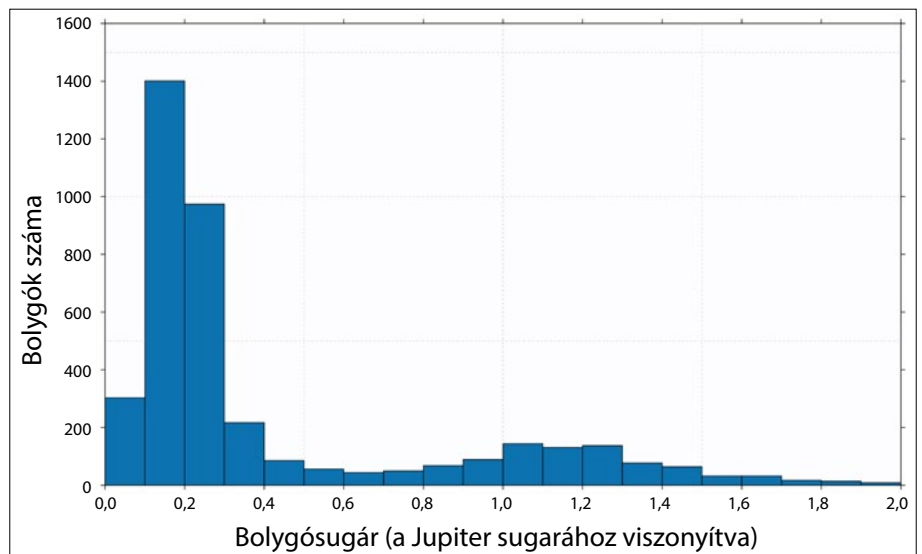
Elég pongyola kijelentés, mert a szakirodalomban (pl. [5, 6]) szokás különválasztani a bolygógyakoriságok vizsgálatát Naphoz hasonló csillagokra, általában törpecsillagokra, M színképtípusú vörös törpékre, magányos vagy többes, fémgazdag vagy fémszegény csillagokra stb. Viszont bárhogyan forgatjuk is az empirikus adatokat, a történet vége mindig az, hogy a már ismert exobolygók részletes statisztikai elemzése a különböző csillagokra 30% és 80% közötti bolygógyakoriságokra vezet, ami valójában tényleg igen magas arány. Az egyik első fontos Kepler-eredmény [7] szerint a 85 napnál rövidebb keringési idejű bolygókra szorítkozva a Földhöz hasonló méretűek abszolút gyakorisága 16%, az 1,25–2-szer nagyobb szuperföldeké 21%, a 2–4 földméretű mini-neptunuszoké pedig 20% a Naphoz hasonló csillagok körül.

Ugyanakkor a fiatal csillagok körüli protoplanetáris korongok, majd a későbbi fázisban a törmelékkorongok vizsgálatai mindenütt a bolygó kialakulás jeleit tárják fel. A kettőscsillagoknál előfordulhat, hogy a két csillag kölcsönös gravitációs terében a bolygókeletkezés ellehetetlenül [8], és azt is tudjuk, hogy az összes csillag kb. fele kettős vagy többes rendszer tagja. Ezért azt biztosan nem lehet kijelenteni, hogy *minden* csillag körül lennie kell bolygónak is, azt azonban igen, hogy a bolygókeletkezés a csillagkeletkezés természetes kísérőjének tűnik, ezért vélhetően a csillagok döntő többsége körül léteznek bolygókísérők, csak nem biztos, hogy a jelenlegi mérés technikáinkkal mindenképpen képesek lennénk kimutatni ezeket a rejtőzködő égitesteket.

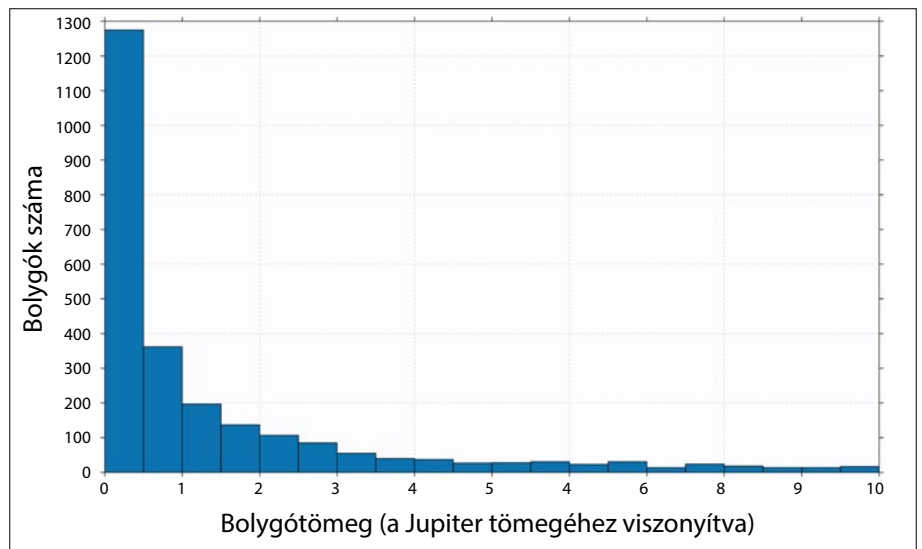
### 4. A kis méretű bolygókból több van

Ez egy nagyon sok diszkussziót nem igénylő kijelentés, ami következik a természetben előforduló fragmentációs folyamatok sajátosságaiból. Ahogy egy csillagkeletkezési régióban egy nagy molekulafelhő összezuhanásakor néhány nagy tömegű csillag mellett akár több száz kisebb csillag alakul ki, úgy a bolygókeletkezésnél is heurisztikusan várható, hogy minél kisebbek a planéták, annál több keletkezik belőlük.

Ezt egyébként legjobban a fedési exobolygók statisztikai mutatói mutatják, amelyek ma már a 100 napos keringési periódusú tartományban egészen torzításmentesnek tekinthetők (2. ábra). Teljesen egyértelműen legalább tízszer-tizenöt-ször több 0,1–0,4 jupitersugarú bolygót talált a Kepler és a TESS, mint 0,8 és 1,4 jupitersugarú között. A tömeg szerinti eloszlás pedig klasszikus hatványfüggvényt követ, 0,5 jupitertömeg alatt kb. ugyan-



2. ábra. Az ismert exobolygók gyakorisága a bolygósugár függvényében [4]



3. ábra. Az ismert exobolygók gyakorisága a bolygótömeg függvényében [4]

annyi bolygóval, mint 0,5 és 10 jupitertömeg között összesen (3. ábra).

Akár a tömeg, akár az átmérő szerint tekintjük az exobolygókat, a kisebb méretűek nagyobb gyakorisága egyértelműen a mérések további pontosításának szükségességét indokolja, hiszen az eddigi megfigyeléseink valójában még csak a jéghegy csúcsát kapargatták meg.

## 5. A Föld méretű kőzetbolygók igen gyakoriak

A bolygók átmérőjét lényegében kizárólag fedési rendszerekben ismerhetjük meg, ahol a csillagok valódi fizikai átmérőjét a sztelláris asztrofizika különböző mérési adatokból egészen pontosan kiszámíthatóvá teszi, a bolygó tranzitja által okozott fényességcsökkenés mértéke pedig a bolygó és a csillag átmérőarányának négyzetével arányos. Tehát ha ismerjük a csillag méretét kilométerben, akkor a bolygó átmérője is kiszámítható kilométerben.

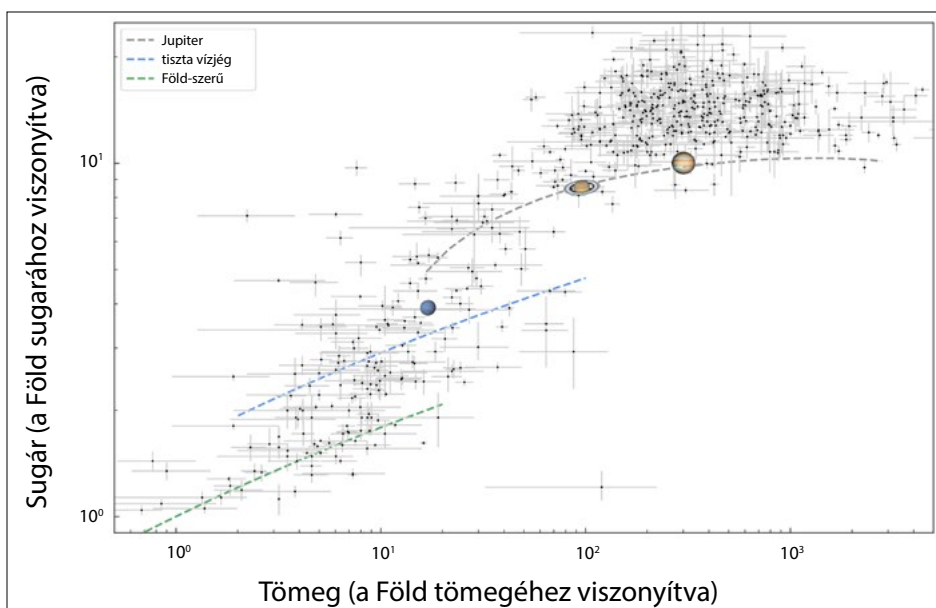
A másik fontos paraméter a bolygó tömege, aminek pontos értékéhez viszont úgy juthatunk, ha a fedési exobolygót Doppler-bolygóként is detektáljuk, azaz kimérjük a csillag sebességváltozásait a bolygóval alkotott rendszer tömegközéppontja körüli keringés során. Ha ismertté válik a tömeg és a sugár, akkor jutunk az exobolygó kutatás egyik legfontosabb diagnosztikai ábrájához, a tömeg–sugár–diagramhoz (4. ábra). Ez valójában nem más, mint a tömeg–sűrűség–diagramnak egy egyszerűbb és közvetlenül mért paraméterekkel történő ábrázolása, hiszen ha ismert a bolygó sugara, akkor kiszámítható a térfogata, a tömeg/térfogat arány pedig éppen a sűrűség. Ez  $1 \text{ g/cm}^3$  a Jupiterhez hasonló gázóriás esetén;  $5 \text{ g/cm}^3$  pedig Föld-típusú kőzetbolygóra.

Az egyszerűség kedvéért a planetológiai modelleket a tömeg–sugár diagramon szokás ábrázolni, amelyen az exobolygók egyértelműen feltüntethetők a megfelelő

adatok ismeretében. Mint az a 4. ábrán látható, a jelenleg jól karakterizált exobolygók között már most szép számmal találunk a Földhöz hasonló kőzetbolygókat. Az adatok viszonylagos ritkulása az ábra bal alsó sarkában egyértelműen a megfelelő pontossággal jellemzett kis méretű bolygók csekély számát tükrözi – ennek az adathiánynak a csökkentése egyébként a svájci vezetéssel megépült Cheops űrtávcső [9] egyik legfontosabb célja.

## 6. A forró Jupiterrek migrációval kerültek jelenlegi helyükre

Az 51 Pegasi b 2019-ben fizikai Nobel-díjjal jutalmazott felfedezése egyből egy óriási meglepetéssel indította az exobolygók kutatását. Bár pontosan értjük, hogy kiválasztási effektus segítette a két svájci kutatót, Michel Mayor-nak és Didier Queloz-nak, mégis, egy Merkúrnál ötször közelebb keringő jupitertömegű társ létezése mindenkit meglepett. Mára sok száz forró jupitert ismerünk, és a szakmai konszenzus szerint ezek a planéták eredetileg sokkal távolabb keletkeztek csillaguk körül, ám a bolygórendszer kialakulása után különböző instabilitások hatására bevándoroltak a csillagukhoz közeli, mai pályájukra. (Mayor és Queloz 1995-ben is pontosan ezt feltételezte az 51 Peg b létezésének magyarázataként, csak hiányzott az elméleti megalapozottság.) Egy népszerű modell szerint több nagyobb tömegű bolygó kialakulásakor előállhatnak olyan erős perturbációk a kölcsönös gravitációs vonzások révén, hogy bizonyos bolygók kido-bódhatnak teljesen a csillag rendszeréből, egy nagyobb pedig szinte bezuhan a csillag közelébe, és ma forró jupitertként láthatjuk [10]. Egy jupitertömegű bolygó bevándorlása egyébként jó eséllyel kiszórja a beljebb kialakult kisebb bolygókat, így az élet számára eredetileg esetleg jó feltételeket biztosító kőzetbolygók sorsa a csillag kö-



4. ábra. Exobolygók tömeg–sugár–diagramja elméleti modellekkel összehasonlítva (Didier Queloz, 2023, személyes közlés)

rül sokkal távolabbi pályára állás vagy akár a csillagba besodródás is lehet.

## 7. Meglepően szélsőséges tulajdonságú exobolygók léteznek

Érdekes legek az exobolygók világából [11]:

- A legközelebbi bolygórendszer egyből a Naphoz legközelebbi csillag, a Proxima Centauri körül található, mindössze 4,25 fényévre. A Proxima Cen b egyébként a vörös törpecsillag központi égitest lakhatósági zónájában kering (l. a 8. fontos tény leírásában), gyaníthatóan a Földnél hajszálnyival nagyobb kőzetbolygó. Izgalmas kérdés, hogy van-e légköre, milyen a felszíne, ezt azonban ma még nem tudjuk megvizsgálni, mert fedéseket nem mutat, csak Doppler-bolygóként ismerjük.
- A legtávolabbi bolygórendszer a Tejútrendszerben a SWEEPS (Sagittarius Window Eclipsing Extrasolar Planet Search) felmérés eredménye 2006-ból, egy forró jupiter, a SWEEPS-11b, ami közel 28 ezer fényévre található a Földtől. A szakirodalomban jelent meg egy-két vizsgálat extragalaktikus források vizsgálatáról, amelyekben a több millió fényévre lévő csillagok modulációit esetleg bolygókkal is meg lehetett magyarázni, ezeket azonban nem tekintjük egyértelmű bolygófeldezésnek más galaxisban.
- A Bakos Gáspár nevével fémjelzett HAT exobolygókereső-program felfedezése a HAT-P-67b, aminek közel 2,1 jupitersugarú mérete a legnagyobb pontosan kimért bolygósugar.
- Az átmérőskála másik végén a legkisebb bolygó a Kepler-37b, ami egy vörös törpecsillag körül kering, átmérője pedig a Hold és a Merkúr mérete közé esik, kb. 4000 km. (Ugyanitt található a szintén egészen apró Kepler-37c, ami a Mars és a Föld átmérője közé esik, kb. 10 ezer km átmérőjű.)
- A jelenleg ismert legforróbb exobolygó a KELT-9b, ami egy Naptól forróbb csillag körül szoros pályán keringő forró jupiter, átlagos felszíni hőmérséklete 4000 K, légköre pedig az óriási besugárzás hatására üstökösocsóvaként párolog el a bolygóról.
- A legnagyobb létszámú bolygót tartalmazó rendszer a Kepler-90, ahol összesen 8 fedési exobolygót sikerült kimérni a Kepler űrtávcső adataiban (5. ábra).
- A mindeddig legidősebb bolygórendszer a Kepler-444, amelynek korát a központi csillag részletes asztroszeizmológiai elemzésével sikerült meghatározni (az asztroszeizmológiával kapcsolatban l. Plachy Emese cikkét e cikkgyűjteményben). Az öt kőzetbolygóval övezett égitest 11 milliárd évesnek bizonyult, ami rendkívül idős kor a Naprendszer 4,6 milliárd éves korához képest, és ebből két nagyon fontos következmény azonnal adódik. Egyrészt a bolygókeletkezés nagyon korán beindult a 13,7 milliárd évvel ezelőtti ősrobbanás után, azaz a csillagok és bolygók együtt keletkeztek már az ősi univerzumban is. Másrészt arra is rávilágít a Kepler-444, hogy még ha találunk is életjeleket mutató kőzetbolygókat csillagaik lakhatósági zónájában, a velünk kommunikációra képes értelmes civilizációk kapcsán az egyidejűség kritériuma sokkal erősebb feltétel, mint azt első pillantásra gondolnánk. Lehet, hogy egy élet számára alkalmas exobolygó itt van tőlünk 10–20 fényévre, de lehet, hogy ugyanott az értelmes technikai civilizáció millió-milliárd évekre van tőlünk akár a múlt, akár a jövő irányában. Másiképpen megfogalmazva: nagyon sok élő bolygónak kell lennie a Tejútrendszerben, hogy akár csak egy is velünk kvázi egy időben létező, intersztelláris kommunikációra képes civilizáció otthona legyen.



5. ábra. A Kepler-90 bolygórendszere a Naprendszerrel összehasonlítva (NASA)

## 8. Ismerünk kőzetbolygókat a lakhatósági zónában

Az előző pont pesszimista kicsengésű lezárásától függetlenül fontos tény, hogy egyre nagyobb számban ismerünk kőzetbolygókat a csillaguk körül a lakhatósági zónának nevezett térrészben. Ezt a kifejezést a csillagászok a lehető legtágabb értelmezéssel azon távolságtartományra használják, amelyen belül egy adott bolygó felszínén (megfelelő összetételű és sűrűségű légkör feltételezésével) hosszú időn keresztül létezhet folyékony víz – a földi élethez nélkülözhetetlen biokémiai reakciók megfelelő oldószeres környezeteként. Természetesen semmi nem garantálja, hogy ha egy Föld méretű kőzetbolygó a megfelelő távolságban kering a csillaga körül, akkor ott ki is alakul(t) az élet, hiszen a felfedezéskori mérések egy exobolygóra megállnak a tömeg, sugár, esetleg a felszíni fényvisszaverő képesség, az albedó meghatározásánál. Az esetleges életjelek detektálásához a bolygólégkör részletes elemzése szükséges, ami a James Webb-űrteleszkóp 2021 végi indítása előtt lényegében elérhetetlen volt az extraszoláris kőzetbolygókra (a Hubble űrtávcsővel forró jupiterek légköri színeképek elemzése volt lehetséges). Az ilyen jellegű mérések mindenképpen fedési exobolygókat igényelnek, hiszen ezek azok, amelyeknél a csillag előtti átvonulás közben a bolygólégkörön átszűrődő csillagfény spektrumában megjelennek az atmoszférikus eredetű vonalak. A 2–10 mikronos hullámhossztartomány ideális a földihez hasonló légkörökben az oxigén, ózon, metán, szén-dioxid, szén-monoxid, nitrogén-szuboxid vonalainak kimutatására. Az ezekből levezethető összetételarányok földihez hasonlósága sugallhatja olyan biológiai aktivitás létezését, mint amilyen itt a Földön beállította az említett molekulák ma mérhető arányát.

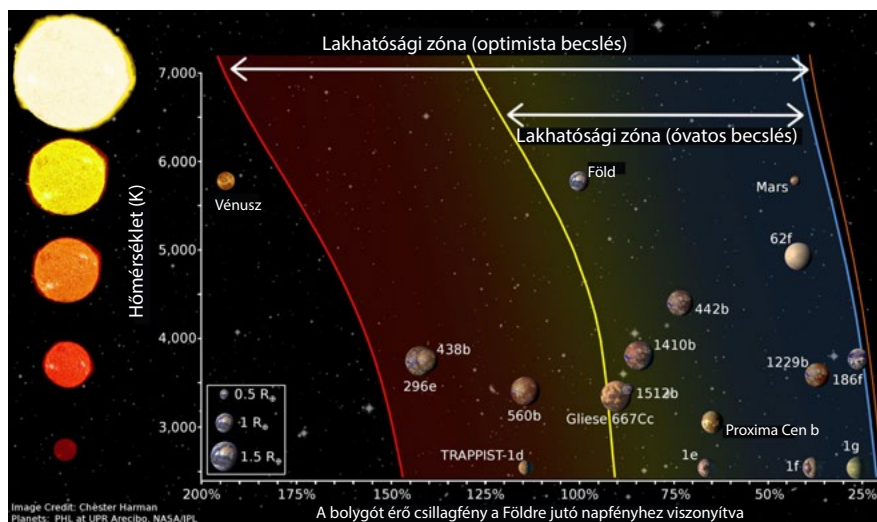
A 6. ábra mutatja, hogy miért komplikáltabb a valóság a szép elképzeléseknél. Az első pillantásra bonyolult diagram vízszintes tengelyén az exobolygók által a csil-

laguktól kapott külső besugárzást látjuk a Földéhez viszonyítva, a függőleges tengelyen pedig a csillag felszíni hőmérsékletét. Az 5800 K-es értéknél látjuk a Vénusz, Föld és Mars helyzetét a lakhatósági zóna kétféle definíciójára, amelyek alapján a Föld lakható bolygó (ha nem tesszük tönkre), és a Mars is az lehetett régen, a Vénusz viszont mindig is túl közel volt a Naphoz. A többi szimbólum exobolygókat mutat, a méretük a bolygók átmérőjével arányos. Jól látszik, hogy szinte mindegyik legalább 1,5–2-szer nagyobb a Földnél, illetve hogy mindegyik központi csillaga sokkal hidegebb, mint a Nap. A legígéretesebb, igazi exoföldekre hasonlító bolygók (pl. Proxima Cen b, TRAPPIST-1 e, f és g) mind 3000 fokos vagy hidegebb vörös törpe körül keringenek, amelyek nagyon különböznek a mi Napunktól. Tehát hiába tűnnek hasonlóknak a bolygók a Földhöz, csillaguk nagyon eltér a Naptól, azaz a hozzánk hasonló élet kialakulásának a lehetőségét nem biztos, hogy ki kell zárunk, de ha van is ott élet, mindenképpen más utat járt be, mint mi itt, a közel 6000 fokos Nap körül az elmúlt évmilliárdokban.

Jelenleg a James Webb az egyetlen műszer ezen kőzetbolygók légköri vizsgálatára, és bő másfél évvel a tudományos adatgyűjtés megkezdése után sem tudunk még áttörésről beszámolni. Vannak, akik szerint a Webb fénygyűjtő képessége is kevés, és még újabb, még hatékonyabb űrtávcső-projektek javasolnak [12], ám hogy ezek mikor valósulhatnak meg, egyelőre teljesen bizonytalan.

## 9. A Föld 2.0 felfedezése sok évnnyire a jövőbe került

A Kepler 2009-es indításakor a szakma nagyon optimista volt: már az első tíznapos tesztméréssorozat megmutatta, hogy a földméretű, lakható zónában keringő exobolygók felfedezésére optimalizált űrtávcső valódi pontossága megfelelt az előzetes várakozásoknak [13]. A tervek szerint egy exoföld Naphoz hasonló csillaga



6. ábra. Kőzetbolygók a lakhatósági zónában (Chester Harman)

előtti átvonulását 4 szigma szignifikanciával rögzítő űrtávcső képes lett volna a négy évre tervezett küldetés alatt az összes „Föld 2.0” exobolygót felfedezni a vizsgált égiterületen. Ezzel a címkével az 1 naptömegű csillagok körül 1 év alatt 1 csillagászati egység távolságban körbejáró 1 földtömegű és 1 földsugarú exobolygókat látjuk el, azaz a Föld és a Nap összes fontos paraméterét mérési hibán belül azonosan reprodukáló égitesteknél a bolygótársakat, azokat a planétákat, amelyek a legjobban hasonlítanak a mi bolygónkra.

A Kepler 2013-ig megbízhatóan szállította is a felfedezéseket, kezdetben a rövid idősorokból azonnal kipotyogó forró jupitereket, majd a nagyobb kőzetbolygókat, a több bolygót tartalmazó rendszereket, a földméretű kőzetbolygókat és az egészen kicsi planétákat. Közben egyre jobban megértettük a központi csillagok viselkedését is – a csillagrezgések elemzésén keresztül, illetve a csillagaktivitáshoz, csillagfoltokhoz kapcsolódó másodlagos fényesség-ingadozások vizsgálatával. Utóbbiak kapcsán kiderült, hogy a Nap nem tipikus szoláris csillag: a legtöbb hasonló csillag aktivitása sokkal erősebb, mint a Napé, központi csillagunk jelentősen nyugodtabb, mint galaktikus testvérei. Az is kiderült, hogy a szoláris csillagok nagyobb aktivitása a Kepler méréseiben erős hatásként jelenik meg; olyan asztrófizikai zajt okoz, ami a kis méretű kőzetbolygók fedéseinek beazonosítását nagyban megnehezíti.

Így aztán amikor 2012. novemberben véget ért a Kepler elsődleges küldetése, a csillagászok jelezték a NASA döntéshozói számára, hogy a Nap aktivitását felhasználó szimulációkkal ellentétben a valóságban 4 év folyamatos mérés nem elég az igazi exoföldek felfedezésére, viszont hat év már egészen ígéretes lenne. A NASA hozzá is járult a Kepler programjának meghosszabbításához, ám 2013 tavaszán lecsapott a technika ördöge: a Kepler pontos térbeli iránytartásáért felelős négy lendkerék közül a második is tönkrement, ezáltal lehetetlenné vált a Kepler eredeti látómezejében a szünetmentes adatgyűjtés. 2014 elején aztán újraindult a Kepler csökkentett üzemmódú programja, a K2, ami örömteli volt a tudományos kutatók számára, viszont drámai hatása volt a „Föld 2.0” exobolygók keresésére: azonnal legalább 20 évvel a jövőbe tolódott a valódi égi másunk felfedezése.

Tíz évvel később kijelenthetjük, hogy még most sincs a kezünkben olyan műszer, ami egy valódi Föld 2.0-t képes lenne detektálni. Ha egy jövőbeli fotometriai űrtávcsőre gondolunk (pl. PLATO), továbbra is igaz, hogy legalább hat évnnyi folyamatos adatgyűjtés nélkül lehetetlen az igazi exoföld-felfedezés, márpedig a PLATO terveiben nem szerepel ilyen hosszú mérésorozat.

A terület friss reménysugarát jelenti Kína, amelynek lendületesen fejlődő űrkutatási programjai között feltűnt az ET (Earth 2.0) fotometriai űrteleszkóp tervezete [14], amely 7 darab 30 cm-es űrtávcsővel fősorozati törpecsillagok fedési exobolygóira vadászna legalább 4 évig, olyan látóirányban gyűjtve az adatokat, amelybe az eredeti Kepler-látómező is beleesne. Ezzel lenne összesen

8 évnnyi adat arról a 150 ezer csillagról, amit a Kepler is mért, így a 2030-as évek elejére megvalósulhatna az eredeti Kepler-program is. A terv ambiciózus, csakis szurkolni lehet a sikeres megvalósításért.

## 10. Exoholdakat még nem találtunk

Az exobolygókutatás számos magyar vonatkozással bíró részterülete az exobolygók körül keringő holdak, röviden exoholdak kimutatása. Szabó M. Gyula, Simon Attila, Dobos Vera és társaik már 2007 óta végzik kutatásaikat a hihetetlenül kicsi jeleket generáló exoholdak lehetséges detektálása kapcsán – az elméleti háttér kidolgozásán túl valódi empirikus siker nélkül. Egyik újabb kutatásuk [15] meg is magyarázta, miért nem sikerült még senkinek a Kepler vagy a TESS adataiban exoholdak átvonulásai által okozott másodlagos fénygörbetorzulásokat kimutatni: egyszerűen a 100 napnál rövidebb keringésű idejű exobolygókra a holdak égi mechanikai szempontból instabilak a rendszerek teljes élettartama alatt, azaz leginkább a 100 napnál hosszabb periódusú fedési exobolygóknál lehet valódi esély a jelek kimérésére. Ezzel viszont a szükséges adatgyűjtés hossza elérheti a sok száz, akár ezer napot is, ami mindaddig a lehetetlen küldetés kategóriájába tartozik. Talán a jövő újabb űrtávcsövei (PLATO, ARIEL, ET, ...) ebben is elhozzák végre az áttörést.

## Zárszó

Remélhetőleg minden kedves Olvasót sikerült meggyőzni arról, hogy az exobolygókutatás terén tényleg robbanásszerű volt a fejlődés, ugyanakkor a Föld égi mása csalfa tüneményként még nem engedi, hogy rátaláljunk. Talán a természet is azt üzeni ezzel, hogy először saját házunk táján tegyünk rendet, és előbb őrizzük meg a Földet lakható bolygóként, hogy aztán gyermekeink megtalálják odakint azt, amit nekünk nem sikerült.

## Irodalom

1. Mayor M., Queloz D.: *Nature*, 378 (1995), 355
2. Heller R., Kiss L. L.: *arxiv.org* (2019), 1911.12114
3. NASA Exoplanet Archive, <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>
4. Encyclopaedia of Exoplanetary Systems, <https://exoplanet.eu/home/>
5. Dressing C. D., Charbonneau D.: *Astrophysical Journal*, 767 (2013), 95
6. Bryson S. et al.: *Astronomical Journal*, 161 (2021), 36
7. Fressin F. et al.: *Astrophysical Journal*, 766 (2013), 81
8. Moe M., Kratter K. M.: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 507 (2021), 3593
9. Benz W. et al.: *Experimental Astronomy*, 51 (2021), 109
10. TriAUD A.: *Nature*, 537 (2016), 496
11. List of exoplanet extremes, Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_exoplanet\\_extremes](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_exoplanet_extremes)
12. Apai D. et al., The Nautilus Array, <https://nautilus-array.space>
13. Borucki W. J. et al.: *Science*, 327 (2010), 977
14. Ge J. et al., ET White Paper: *arxiv.org* (2022) 2206.06693
15. Dobos V. et al.: *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 133 (2021), 094401