

A Kepler, a K2 és a TESS küldetések érdekes tranzitbolygói

Futó Péter

Debreceni Egyetem, Ásvány- és Földtani Tanszék

2019-ben épp 400 éve annak, hogy Johannes Kepler (1571–1630) a két bolygómozgási törvényének 1609-es közreadása után 1619-ben Harmonices Mundi (A világ harmóniája) című művében közölte a harmadik törvényszerűség leírását is, amelyet 1618. május 15-én alkotott meg. Négy évszázad múltán pedig már a neves tudósról elnevezett bolygókereső űrtávcső által végzett mérések vonatkozó eredményeit is analizálhatjuk Kepler harmadik törvényének fényében. A Kepler-űrtávcsővel végzett mérések, felfedezések egy évtizedes múltra tekintenek vissza, több ezer exobolygó megtalálását köszönhetjük ezeknek. Az exobolygók utáni kutatás kiegészült, illetve folytatódik a NASA 2018. április 18-án Föld körüli pályára állított új generációs tranzitkereső űrtávcsővel, a TESS-szel (Transiting Exoplanet Survey Satellite).

A közel öt évig, 2014 februárjától 2018 augusztusáig, 19 megfigyelési kampány keretében működtetett K2 küldetésnek több mint háromszáz, létezésében megerősített exobolygó felfedezését köszönhetjük. A Keplerrel végzett megfigyelések teljes időszakában pedig 2600-nál is több exobolygót azonosítottak.

A NASA legújabb, TESS elnevezésű fotometriai űrtávcsőve hivatalosan 2018. július 25-én kezdte meg működését. Elsődleges feladata az exobolygók tranzitmódszerrel történő keresése viszonylag közeli fényes csillagok körül. Az M típusú vörös törpecsillagok megfigyelésére több figyelem jut majd a TESS működése során, mint az előző bolygókereső programok során [1].

A tranzit barna törpétől a bolygóóriásokig

Az EPIC 201702477b jelű objektum egy rendszeres tranzitokat mutató, hosszú periódusú (40,737 nap), excentrikus pályán ($e=0,2281$) mozgó barna törpe, amelyet eredetileg a K2 1-es kampánya során figyeltek meg, mint bolygójelöltet. A későbbi, pontosabb radiálissebesség-mérések révén derült ki, hogy valóban egy a bolygóknál nagyobb tömegű égitestről van szó. A 66,9 Jupiter tömegű és 0,757 Jupiter átmérőjű objektum [2] az eddig talált legkisebb sugarú az ismert barna törpék között. Az ismert tranzitos barna törpék populációja tömegük alapján nagy

és kis tömegű barna törpékre osztható fel, aminek alapján az EPIC 201702477b a nagy tömegűek közé sorolható. A barna törpe talán legfőbb érdekessége, hogy átlagsűrűsége a legnagyobb az eddig ismert bolygók, szubsztelláris objektumok és fősorozati csillagok között.

Óriásbolygó-rendszerek

A felfedezett tranzitbolygós rendszerek között akadnak olyanok, melyekben több óriásbolygó is található, ezek az óriásbolygó-rendszerek (giant planet systems). Ebben a megközelítésben Naprendszerünk szintén az óriásbolygó-rendszerek közé tartozik, sőt a Jupiteren és a Szaturnuszon kívül még két jégóriás – az Uránusz és a Neptunusz – is megtalálható benne. Két szubszaturnusz méretű bolygót is ismerünk a Kepler-108 rendszerben. A b jelű bolygó átmérője 77,2%-a a Jupiterének [3], ami a Szaturnusz átmérőjének 94,78%-át jelenti. A c bolygó átmérője pedig 0,73 Jupiter-átmérő, ez a Szaturnusznak a 89,6%-a. A rendszer központi csillagának tömege a Napénak 87%-a, sugara pedig annak 2,192-szerese, valamint felszíni hőmérséklete hasonló a Napéhoz: 5854 K.

Felfúvódott óriás gázbolygók

A K2 11-edik kampánya során megfigyelt fiatal, mintegy 2,55 milliárd éves F-színképtípusú, EPIC 229426032 katalógusjelű csillagot mindössze alig több mint két és fél nap alatt, 0,037 csillagászati egység (CSE) távolságban körbejáró b jelű óriásbolygó tömege 1,6-szerese, sugara pedig 1,65-szorosa a Jupiterének [4]. Átlagsűrűsége 0,44 g/cm³, ami a Jupiter hasonló paraméterének csupán 35,6 százaléka. Ennek alapján az EPIC 229426032b egy ún. erősen felfúvódott gázbolygó (highly-inflated gaseous planet).

Szuperföld-rendszerek

A megfigyelési adatok tanúsága szerint a szuperföldek a leggyakoribb bolygótípust képviselik galaxisunkban, a Tejútrendszerben. Sok bolygórendszerben a különböző bolygótípusok mellett nem egy, hanem több, ebbe a bolygóosztályba tartozó planéta is található. Sőt vannak olyan multiplanetáris rendszerek is, melyek az eddig ismert tagok közül többségében vagy kizárólag szuperföldeket hordoznak, ezek az úgynevezett szuperföld-rendszerek (super-Earth-systems). Sok bolygórendszerben található szuperföld kategóriájú bolygótestek a központi csillag erős közelségében, ahol több esetben is egy napnál rövi-

debb periódusidővel keringenek. Ezek a forró szuperföldek (hot super-Earths), melyek kialakulására az elfogadott modellek között egy egészen egyszerű és valószínű forgatókönyv is szerepel. Ennek értelmében a forró kőzetbolygók (legalábbis egy részük) egykori, a csillaguk extrém közelségébe vándorolt óriásbolygók magjai lehetnek, melyek a közeli csillag árapályerőinek hatására veszítették el gázburkukat. A gázóriások migrációjuk során az ún. Roche-határon belülré kerülhettek, ahol a csillag gravitációjából eredő árapályerők nagyobbak, mint a bolygó saját gravitációs megtartó ereje. A gáztömegét elveszíti a bolygó, míg a kőzetmag árapályerőkkel szembeni ellenálló képessége nagyobb, így az marad vissza. A csupasz kőzetmag aztán idővel a Roche-határon kívülre vándorol a gáztömeg elvesztése miatt, s a folyamat során új típusú planétává átalakult égitest rövid periódusú, kör alakú pályán kering tovább a csillag körül [5].

A mintegy 99 fényévre lévő GJ 9827 (K2-135) katalógusjelű csillag bolygórendszere a legközelebbi a Kepler és K2 küldetések során eddig felfedezettek közül. A rendszer három ismert bolygójának mindegyike a szuperföldek tömegkategóriájába esik, közülük kettő lehet ténylegesen Föld-típusú (K2-135b és K2-135c) viszonylag kis átlagsűrűséggel, míg a harmadik inkább minineptunusz jellegű (K2-135d) [6]. A planéták tömege, sugara a Föld tömegének és sugarának egységében kifejezve, valamint az átlagsűrűsége a következő: 3,74 $M_{\oplus}$, 1,62 $R_{\oplus}$, 4,81 g/cm³ (K2-135b); 1,47 $M_{\oplus}$, 1,27 $R_{\oplus}$, 3,87 g/cm³ (K2-135c); 2,38 $M_{\oplus}$, 2,09 $R_{\oplus}$, 1,42 g/cm³ (K2-135d).

Az EPIC 220194953, vagy más jelöléssel K2-148 egy néhány napos periódusidejű tagokból álló multiplanetáris szuperföld-rendszer, melynek három ismert bolygója van. A K2-155 (EPIC 210897587) a K2 13-adik kampányában monitorozott fémszegény M-törpe, amely körül három ismert szuperföld méretkategóriájú, 1,55, 1,95 és 1,64 $R_{\oplus}$ sugarú bolygó kering 6,34, 13,854 illetve 40,68 napos periódussal [7].

Az EPIC 211964830 katalógusjelű M2-spektráltípusú törpecsillag családja szintén multiplanetáris rendszer, mivel legalább két ismert bolygót tartalmaz. Mindkét exobolygó (b: 2,231 $R_{\oplus}$, c: 2.668 $R_{\oplus}$) [8] úgynevezett meleg szubneptunusz kategóriájú (warm sub-Neptune), s összetételük alapján is valószínűleg átmeneti típust képviselhetnek a szuperföldek és a Neptunusz-jellegű bolygók között. A rendszer egyik érdekessége, hogy a Praesepe nyílt csillaghalmazban (M44) található, a Rák csillagkép irányában látszó égterületen, melyet a K2 küldetés 16-odik megfigyelési kampánya során monitorozott a Kepler-űrtávcső. A hal-

mazon belül, a sűrűbb elhelyezkedés következtében, a csillagok gravitációs kölcsönhatásaik révén égitestek kerülhetnek át egyik formálódó bolygórendszerből a másikba. Ilyen események történhetek akár Napunk és családja kialakulásának és fejlődésének korai fázisában is, mivel csillagunk szintén halmazban született.

A TESS űrtávcső első megerősített exobolygó felfedezése a π Men (HD 39091) c. Az 59,6 fényévre lévő, G0V színeképtípusú, a Napnál valamivel nagyobb tömegű és fiatalabb, közel három-milliárd éves anyacsillag rendszerének legbelső bolygója egy forró szuperföld, melynek keringési távolsága mindössze 0,06839 CSE. A szuperföldek kategóriájába sorolható bolygó tömege 4,82 földtömegnek adódott, míg átmérője 2,14-szerese bolygónkénak [9], amely paraméterek alapján valószínű, hogy vastag légköre van. A π Mensae rendszerében még egy ismert planéta (b), egy szuperjupiter (10,02 M_{Jupiter}) is található, mely távolabb a csillagtól, mintegy 3,1-szeres Nap-Föld távolságban kering. A TESS első felfedezései között szerepel egy fényes, közeli, K 4,5-színeképtípusú törpecsillag, a HD 21749 36 napos periódusidővel keringő szubneptunusz kategóriájú bolygója, melynek sugara 2,84-szerese, tömege pedig 23,2-szerese Földünkének [10].

Érdekes összefüggést találtak a Torontói Egyetem kutatói a szuperföldek és a külső óriásbolygók Nap-szerű csillagok körüli előfordulása között, mind földi bázisú radiálissebesség-mérések adatainak, mind pedig a Kepler-adatoknak a statisztikai vizsgálatakor. Eredményeik szerint az ún. hideg jupiterek háromszor gyakoribbak olyan rendszerekben, amelyek szuperföldre(ke)t is tartalmaznak, mint egyéb esetekben [11]. Az olyan bolygórendszerek pedig, mint a sajátunk is, ahol létezik hideg jupiter, azonban nincsenek szuperföldek, meglehetősen ritkának számítanak (~1%). Továbbgondolva ezt a tényt, ha adott feltételek mellett a lakhatósági zónában (habitable zone, HZ) keringő szuperföldek akár alkalmasabbak is lehetnek az élet hordozására, mint a Föld méretű HZ-bolygók, akkor a hideg jupiternek a belső bolygók esetében megnyilvánuló, életet „védelmező” szerepe még fokozottabban előtérbe kerül.

Föld méretű bolygók

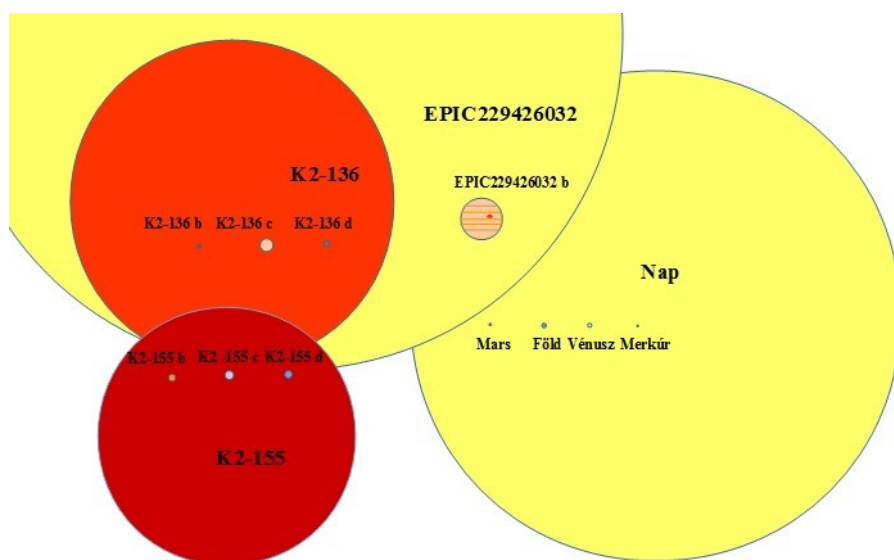
A szakirodalom a 0,8–1,25 földátmérő közötti exobolygókat sorolja a Föld méretű kategóriába. A Föld méretű planéták között vannak a sajátunkhoz tömegben is hasonló és vannak viszonylag nagy átlagsűrűségű, a szuperföldek tömegkategóriájába tartozó bolygók is.

A K2 fénygörbék analizisével, fiatal csillaghalmazokban és csillagkeletkezési régiókban történő keresés során, a 13. megfigyelési kampány (C13) keretében három tranzitbolygót is azonosítottak a Hyadok csillaghalmazban a fiatal, hozzávetőleg 800 millió éves, kései K-színképtípusú, EPIC 247589423 (K2-136) katalógusjelű csillag körül. A legbelső, egyben legkisebb, b jelű planéta sugara ($0.99 R_{\oplus}$) [12] közelít a Földéhez. A K2-136b az elsőként egy csillaghalmazban talált Föld méretű exobolygó, valamint egyike a néhány ismert fiatal, bolygónk sugarához közelítő méretű planétának.

A K2-137 egy a K2 tizedik kampánya során megfigyelt, 310 fényévre lévő vörös törpecsillag. A körülötte keringő K2-137b jelű, rendszeres tranzitokat mutató exobolygó periódusideje mindössze 4,3 óra, sugara pedig a Földének mintegy 89%-a [13].

A K2-229b jelű exobolygó sugara 1,165-szer, míg tömege 2,59-szor nagyobb, mint Földünké [14]. A bolygó extrém közelségben, 0,012 CSE távolságban, mindössze 14 óra alatt járja körbe K-színképtípusú, aktív csillagát, melynek intenzív csillagszele és flertevékenysége erodálhatja a bolygó légkörét. Átlagsűrűsége alapján ez a Föld méretű planéta valószínűleg nagy méretű fémes maggal és relatíve vékony szilikátköppennyel rendelkezik, s a felszínén uralkodó extrém körülmények, a nagy forróság miatt életre alkalmatlan lehet. Az anyacsillagnak további ismert kísérői is vannak, ám mindegyik nagyobb méretű és tömegű a legbelső tranzitbolygónál.

A Napnál idősebb, a Lant csillagkép irányában megfigyelhető Kepler-62 jelű csillag körül két olyan szuperföld is kering, melyek pályája a lakható zónába esik. Méretük ugyan 40 (Kepler-62f), illetve 60 (Kepler-62e) százalékkal haladja meg a Földét, és bár nem tudjuk biztosan, de adott esetben a szuperföldek még akár alkalmasabb feltételeket is biztosíthatnak az élet kifejlődéséhez és hosszú távú fennmaradásához, mint a Föld méretű kőzetbolygók. A kedvezőbb feltételek közé tartozik például a nagyobb tömeg következtében intenzívebb geodinamika és hosszabb távú geológiai aktivitás, valamint a jobb légkör-megtartó képesség. Ezeket a planetáris testeket „szuperhabitabilis” (superhabitable) jelzővel illetik a szak- és ismeretterjesztő irodalomban. A szuperhabitabilis jelző pedig természetesen nem csupán exobolygókra, hanem az adott esetben a kedvezőbb feltételeket biztosító exoholdakra is illeszthető.



1. ábra: A felfedezett exobolygók és csillagaik méreteinek összehasonlítása a Nappal és közetbolygóival

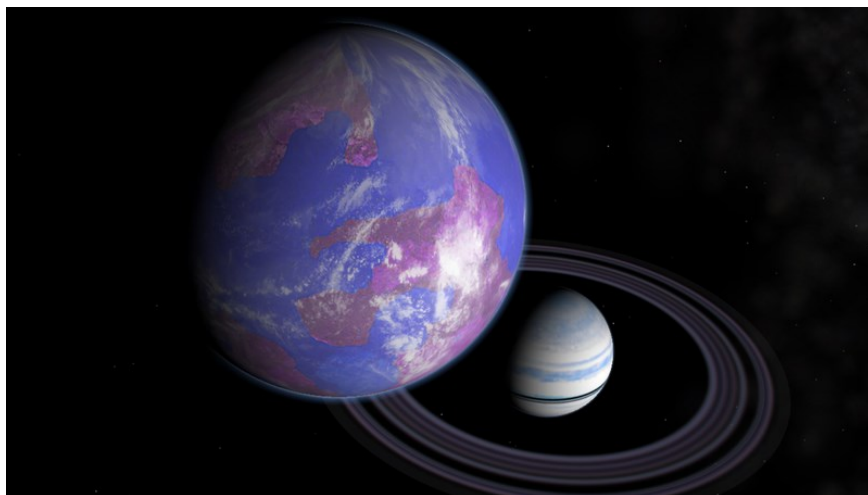
Exoholdak a lakhatósági zónában

A Kepler-űrtávcső adatai között eddig több mint száz olyan létezésében megerősített gázóriás szerepel, amely csillaga lakhatósági zónájában kering. Az élet utáni kutatás szempontjából ebben még nincs semmi különleges, hiszen az óriás gázbolygókön uralkodó körülmények nem teszik lehetővé az élet – legalábbis általunk ismert – formáinak kialakulását. Azonban ezeknek a HZ-gázóriásoknak lehetnek olyan holdjaik, amelyek már megfelelő potenciállal rendelkeznek az élet megszületéséhez és hosszú távú fennmaradásához [15]. Érdekességgéppen megjegyzendő, hogy a Kepler által talált HZ-óriásbolygók között tutatjával megtalálhatók a 6–12 Jupiter tömegű óriások [16], melyek körül már egy földtömeget elérő holdak is kialakulhattak. A Kepler által felfedezett cirkumbináris (kettőscsillag körül keringő) bolygók között gázóriások is találhatók, ezeknek is létezhetnek olyan nagy méretű holdjaik, melyek szintén alkalmasak az élet hordozására [17].

Sok különösen érdekes felfedezést tapasztalhattunk meg az űrtávcsöves fotometriai mérések révén, de a tudósokat még most is és ezután is érhetik meglepetések. Ugyan nem HZ-bolygó körül keringő exohold, de mindenképpen említésre méltó a Kepler-1625 jelű csillag bolygója körüli objektum esete. Egy, a bolygó

detektálását később követő megfigyelés során a Hubble-űrtávcsővel végzett mérés adatainak értékelésekor a kutatók nagy méretű kísérő jelenlétére utaló jelet találtak a többszörös Jupiter tömegű Kepler-1625b fénygörbéjén. Az adatok alapján végzett modellezés eredményei szerint az exohold-jelölt tömege és mérete a Neptunuszéhoz hasonló lehet [18].

A HZ-óriásbolygókat kísérő holdak adott esetben nagyon kedvező feltételeket biztosíthatnak az élet számára, ugyanis például nem csupán a csillagtól részesülhetnek energiabesugárzásban, hanem az óriásbolygóról visszaverődő sugárzás révén is. Geológiai aktivitásuk pedig még kisebb tömeg esetén is viszonylag hosszú ideig fennmaradhat az anyabolygó gravitációja általi, folyamatosan megvalósuló árapályfűtés mellett.



2. ábra: Elképzelt Föld-szerű exohold egy Szaturnusz-szerű exobolygó körül.
(Forrás: NASA Ames Kutatóközpont)

Összegzés

Az újonnan felfedezett szuperföld-rendszerek további megerősítést jelentenek abban a megfigyelésben, hogy a szuperföld kategóriájú égitestek képviselik a leggyakoribb típust az exobolygók világában. A temérdek adatot szolgáltatató tömeges felfedezések forradalmasították a csillagászatot és az exobolygó-kutatást, rendkívüli távlatokat nyitva meg a kutatók előtt. Ennek köszönhetően a Kepler-űrtávcső küldetése a tudományos célú űrkutatás egyik legeredményesebb vállalkozásának bizonyult. A folytatást jelentő TESS-szel végzett mérések összessége remélhetően szintén kiemelkedően sikeres program lesz az exobolygók felfedezése terén.

Irodalomjegyzék

- [1] Frey S. (2018): Kezdődhet az újabb bolygóvadászat (www.urvilag.hu, 2018.07.29.)
- [2] Bayliss D. et al. (2017): EPIC 201702477b: A Transiting Brown Dwarf from K2 in a 41 day Orbit. *Astronomical Journal*, 153, 15
- [3] NASA Exoplanet Archive (exoplanetarchive.ipac.caltech.edu)
- [4] Soto M.G. et al. (2018): EPIC229426032b and EPIC246067459b: discovery of a highly inflated and a 'regular' pair of transiting hot Jupiters from K2. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 478, 5356
- [5] Juhász Á. (2018): A pokoli lávavilág egykor forró Jupiter lehetett? (www.csillagaszat.hu, 2018. 02. 06.)
- [6] Prieto-Arranz J. et al. (2018): Mass determination of the 1:3:5 near-resonant planets transiting GJ 9827 (K2-135). *Astronomy and Astrophysics*, 618. A116
- [7] Hirano T. et al. (2018): K2-155: A Bright Metal-Poor M Dwarf with Three Transiting Super-Earths. *Astronomical Journal*, 155, 124
- [8] Livingston J.H. (2019): K2-264: a transiting multiplanet system in the Praesepe open cluster. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 484, 8
- [9] Huang C.X. et al. (2018): TESS Discovery of a Transiting Super-Earth in the Π Mensae System. *Astrophysical Journal Letters*, 868, L39
- [10] Dragomir D. et al. (2019): The longest period TESS planet yet: a sub-Neptune transiting a bright, nearby K dwarf star. ar-Xiv:1901.00051
- [11] Zhu W., Yu W. (2018): The Super Earth–Cold Jupiter Relations. *Astronomical Journal*, 156, 92
- [12] Mann A.W. et al. (2018): Zodiacal Exoplanets in Time (ZEIT). VI. A Three-planet System in the Hyades Cluster Including an Earth-sized Planet. *Astronomical Journal*, 155, 4
- [13] Smith A.M.S. et al. (2018): K2-137b: an Earth-sized planet in a 4.3-h orbit around an M-dwarf. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 474, 5523
- [14] Santerne A. et al. (2018): An Earth-sized exoplanet with a Mercury-like composition. *Nature Astronomy*, 2, 393
- [15] Szegedi-Elek E. (2018): 121 gázóriás lakható exoholdakkal? (www.urvilag.hu, 2018. 06. 14.)
- [16] Hill M.L. et al. (2018): Exploring Kepler Giant Planets in the Habitable Zone. *Astrophysical Journal*, 860, 67
- [17] Hamers A.S. et al. (2018): Stability of exomoons around the Kepler transiting circumbinary planets. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 480, 3800
- [18] Teachey A., Kipping D.M. (2018): Evidence for a large exomoon orbiting Kepler-1625b. *Science Advances*, 4, eaav1784