

Ősi bolygórendszerek és mega-Föld a Kepler-mezőben

Futó Péter

Nyugat-magyarországi Egyetem,
Földrajz és Környezettudományi Intézet, Szombathely

Az ultraprecíz fotometriai méréseket végző űrtávcsövek az exobolygók tömeges felfedezésére alkalmas technológiát jelentenek. A megfigyelések pontos adatainak ismeretében meghatározható a tranzitbolygók átmérője és pályaparaméterei. A csillag radiális sebességének (RV) mérésén alapuló módszer segítségével pedig jó közelítéssel megadható az egyes planéták tömege. E mérési stratégiák egymást kiegészítő alkalmazása olyan új bolygótípusok azonosítását is lehetővé tette, amelyek létezését a kutatók egy része korábban kétségbe vonta. Jelen írásban a világegyetem fejlődésének korai időszakában kialakult bolygók, köztük egy új, különleges bolygótípus felfedezéséről esik szó, amelyek egyrészt még a Kepler-űrtávcső küldetésének első szakaszában (K1) megfigyelt, eredeti Kepler-mezőben történtek.

2015-ben jelentették be a Naptól mintegy 117 fényévnire lévő Kepler-444 jelű csillag [1,2] körül egy 5 bolygóból álló, multi-planetáris rendszer felfedezését. A legtávolabbi planéta keringési távolsága a Nap–Merkúr távolság alig több mint egyötöde, míg a rendszer legbelső bolygója 9,26-szor közelebb kering csillagához, mint a Naphoz a Merkúr. A bolygók mindegyike kisebb méretű a Földnél, átmérőjük 0,403 (b), 0,497 (c), 0,53 (d), 0,546 (e) és 0,741 (f) földátmérő, keringési periódusuk pedig 3,6, 4,546, 6,189, 7,743 és 9,74 nap. Fizikai tulajdonságaikat illetően valószínűleg közetbolygók lehetnek. A K-színképtípusú központi csillag Napunknál mintegy 25%-kal kisebb tömegű és átmérőjű (0,752 napátmérő), hűvösebb (felszíni hőmérséklete 5046 K) és fémeiben szegényebb csillag. A csillag kora 11,23 milliárd év, így jelenleg ez az egyik legidősebb ismert bolygórendszer, amelyben Föld-típusú bolygók keringenek.

Takeda és mtsai (2007) [3] adatai szerint a HD 219134 katalógusjelű, K3V színképtípusú, 21,36 fényévnire lévő csillag még az említett Kepler-444 jelű törpecsillagnál is idősebb, ugyanis az előbbi kora 12,46 milliárd évnél adódott. A HD 219134 körül a hawaii-i Keck I teleszkópra szerelt HIRES spektrográf segítségével az eredetileg 4 ismert bolygót tartalmazó rendszerben további 2 bolygót is azonosítottak [4]. A mindössze 3 napos keringési idejű b jelű bolygó csillaga előtti átvonulását is sikerült megfigyelni a Spitzer-űrtávcsővel. E bolygó sugara 1,606-szorosa a Földének [5], tömege pedig 4,46 földtömeg – a forró szuper-Földek tipikus képviselője.

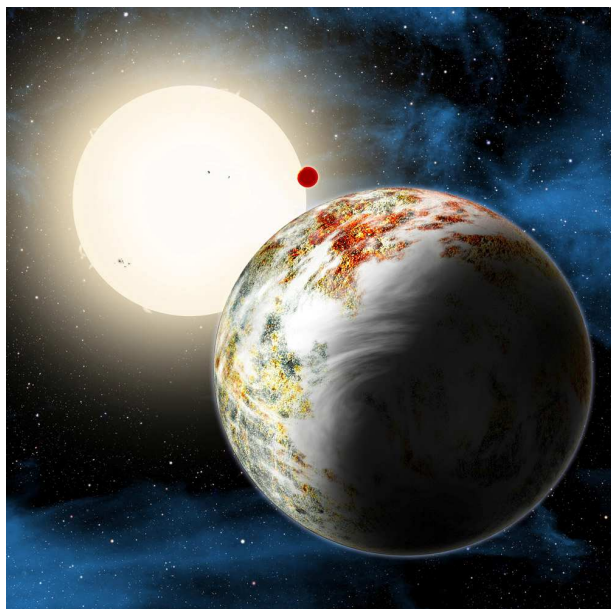
A NASA Kepler-űrtávcsővével fedezték fel a Kepler-10b és c katalógusjelű bolygókat is, amelyek közül a csillaghoz közelebb keringő (b) planéta egy forró szuper-Föld, míg a kissé távolabbi pályán keringő társa (c) egy Neptunusz-tömegű bolygó. A rendszer mintegy 10,6 milliárd éves [6], így a Kepler-10b és c 2,3-szer idősebbek a Földnél. A csillag és bolygói akkor alakultak ki, amikor a világegyetem kora még csupán 23%-a, mérete pedig alig a fele volt a jelenleginek.

Mega-Föld a Sárkány csillagképben

A Kepler-10c tömege (17,2 földtömeg, $M_{\oplus}$) közel azonos a Neptunuszéval (17,147 $M_{\oplus}$), átmérőjükben azonban jelentősen eltérnek egymástól: míg a naprendszerbeli óriásbolygó 3,88 földátmérőjű ($R_{\oplus}$), addig a Kepler-10c átmérője 2,35 $R_{\oplus}$ [7]. A bolygó átlagsűrűsége 7,1 g/cm³, azaz majdnem négy és félszerese a Neptunuszénak, amiből következik, hogy felépítésében domináns módon vesznek részt nagyobb sűrűségű anyagok, így főként szilikátokból állhat. A méréseket a bolygótömeg spektroszkópiai úton történő pontos meghatározására kifejlesztett HARPS-N (High Accuracy Radial velocity Planet Searcher-North) műszerrel végezték el, amely egy a La Palma szigetén található Galileo-teleszkópra (ESO) szerelt spektrográf. Az átlagsűrűséget figyelembe véve, a lehetséges belső felépítés meghatározását megcélzó modellszámítás eredménye szerint a Kepler-10c-nek lehet fémes magja, annak tömege azonban nagy valószínűség szerint nem haladja meg a teljes bolygótömeg egyötöd részét (a mag tömege 3 $M_{\oplus}$ körüli). Legkülső szilárd gömbhéját pedig főként a víz-jég nagy nyomású fázisai alkothatják, mely tömegfrakció a bolygótömeg hozzávetőlegesen 20%-át képezheti [8]. Felépítésében a legnagyobb arányban szilikátok vesznek részt, és mivel tömege jócskán 10 földtömeg feletti, a bolygó „mega-Föld” néven szerepel a szak- és ismeretterjesztő irodalomban.

A mega-Föld elnevezés tehát minden olyan 10 földtömegnél nagyobb bolygóhoz hozzárendelhető, amelyek tömegének jelentős hányadát szilikátok teszik ki. A mintegy 20%-nál nagyobb tömegarányban vizet és/vagy gázkomponenseket tartalmazó, tíz földtömegnél nagyobb objektumok már átmenetet képeznek a mega-Földek és a Neptunuszhoz hasonló bolygók között. 30% körüli jégtömeg-frakció és viszonylag vastag gázburok esetén pedig már Neptunusz-szerű planétákról beszélhetünk. A mega-Földek többsége nagy valószínűséggel 2–3 $R_{\oplus}$ közötti átmérőjű lehet (sub-Neptune-sized planets), de felépítésük függvényében létezhetnek ennél kisebb (kb. 1,7–2,0 $R_{\oplus}$) méretű képviselőik is. A legnagyobb méretű Föld-típusú bolygók átmérője valószínűleg meghaladja a 2,5 földátmérőt. Ez pe-

dig azt jelenti, hogy a mikrométeres nagyságú porszemcséktől a teljes bolygótest összeállásáig az óriás kőzetbolygók kialakulási folyamata során több mint 13 nagyságrendet átfogó méretnövekedés következik be!

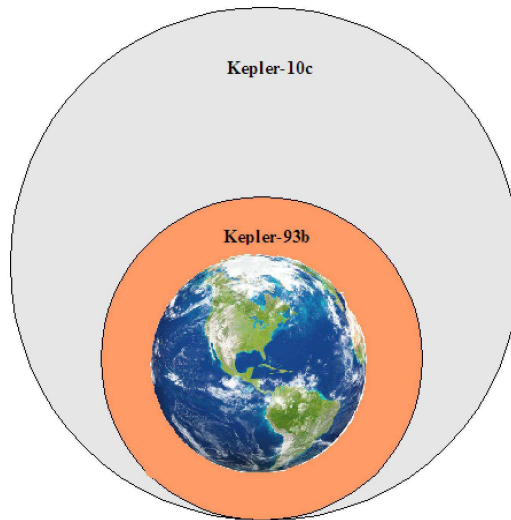


1. ábra: A Kepler-10 rendszer bolygói, előtérben a c jelű, 17,2 földtömegű mega-Földdel. (Fantáziakép: David A. Aguilar / Harvard CfA)

Az ősi nagy tömegű szilikátos bolygók léte azért is érdekes, mert amikor e bolygók keletkeztek és a világegyetem a fejlődésének még viszonylag korai fázisában volt, a nehéz elemek aránya még jóval kisebb kellett, hogy legyen, mint napjainkban. A Kepler-10 rendszer kora azonban azt jelzi számunkra, hogy nehéz elemek az univerzum evolúciójának már e kezdeti időszakában is már olyan arányban rendelkezésre álltak a bolygóképződéshez, amely gyakoriság esetén akár nagy tömegű szilikátos bolygók kialakulására is lehetőség nyílt.

Léteznek olyan 12,5–13 milliárd éves galaxisok, amelyekben a csillagkeletkezés üteme röviddel kialakulásuk után két vagy több nagyságrenddel is meghaladta a Tejútrendszerünkben jelenleg megfigyelhető ütemet, ennél fogva a nehéz elemek is viszonylag hamar feldúsultak az intersztelláris anyagban. A jelek szerint a hidrogénnél és a héliumnál nehezebb elemek aránya az első kozmikus struktúrák kialakulását követően már mintegy 1–2 milliárd éven belül megközelíthette a jelenlegi értéket. Az univerzum fejlődéstörténetének tehát nagy része alatt adottak voltak a Föld-típusú bolygók keletke-

zésének feltételei. Mindebből természetesen az is következik, hogy a körülmények már nagy valószínűséggel a világegyetem fejlődésének meglehetősen korai időszakában lehetővé tehetők az ősi élet megszületését is.



2. ábra: A Kepler-űrtávcsővel felfedezett planéták közül a HARPS spektrográf segítségével sikerült a majdnem másfélszeres földátmérőjű ($1,478 R_{\oplus}$) forró szuper-Föld, a Kepler-93b tömegét is pontosan meghatározni. Ez a 4,02 földtömegű bolygó méretük összehasonlítása céljából szerepel egy ábrán a Kepler-10c-vel és a Földdel.

Kepler-131b valószínűleg átmenetet képezhet a Neptunusz-szerű planéták és a mega-Földek között, átmérője 2,41-szorosa, tömege 16,13-szorosa a Földének [9]. A bolygó egy Napunkhoz hasonló csillag körül kering. Periódusideje 16,092 nap, keringési távolsága pedig egyharmada a Merkúr átlagos naptávolságának.

További lehetséges mega-Föld-jelölt a Kepler-113b, amely egy 1,82 földátmérőjű planéta, tömege pedig 11,7 földtömegnek [9] adódott. A 4,754 napos keringési idejű bolygó egy Napnál kisebb tömegű, K színeképosztályú főszorozati csillag körül kering 0,0491 csillagászati egység (CSE) távolságban.

A terasztrikus szuper-Földek geológiailag aktívabb égitestek, mint kisebb tömegű bolygótársaik [10]. A még náluk is nagyobb tömegű óriás kőzetbolygók, a mega-Földek magasabb hőmérsékletű belsejében pedig valószínűleg még intenzívebb geodinamikai folyamatok zajlanak, több réteges köpenycirkulációval.

Nagy tömegű Föld-típusú bolygók kialakulása

A magakkreciós modell alapján általánosan elfogadott nézet szerint az akár még 10 földtömegnél is nagyobb bolygómagok (planetary embryo) vastag burkot gyűjtenek maguk köré a protoplanetáris korong még rendelkezésre álló gázanyagából. A bolygómagok felépülését követően a fejlődés további kimenetelét még számos körülmény befolyásolhatja, így adott esetben az is előfordulhat, hogy elfogy a korong gázanyaga és leáll a tömeggyarapodás folyamata, még mielőtt a vastag gázburok kialakulhatna a jég-/kőzetmag körül. Az eredmény egy viszonylag vékony légkörű, szilárd felszínű bolygó lehet, melynek tömege meghaladhatja a Földének tízszeresét is. Az előbbieken felvázolt forgatókönyv nagyon is lehetséges folyamata a mega-Földek kialakulásának, azonban megfelelő feltételek esetén minden valószínűség szerint a Földhöz hasonló módon is létrejöhetnek a nagy tömegű kőzetbolygók.

Batygin és Laughlin [11] szerint a Naprendszer keletkezésének nagyon korai fázisában megszületett Jupiter a rendszer belső övezetei felé vándorolt, elpusztítva azoknak a már formálódó belső bolygóknak a csíráit, amelyek egyéb esetben szuper-Földekké fejlődhettek volna. Kialakulását követően a Szaturnusz hatására a Jupiter vándorlása terén irányváltás következett be, és a bolygó ismét kifelé kezdett vándorolni, míg el nem érte a dinamikailag stabil állapotot jelenlegi pályáján. Ennek következtében kisebb tömeggel ugyan, de létrejöhetnek a belső övezet kőzetbolygói, a bolygóképződés egy második generációs szakaszának keretében. A mega-Föld-jellegű bolygók leginkább az óriásbolygót nem tartalmazó rendszerekben jöhetnek létre. A fenti hipotézist tovább gondolva, nagy tömegű kőzetbolygók nagy valószínűséggel kialakulhatnak a Naprendszerhez hasonló jellegzetességeket mutató rendszerekben is, feltéve, hogy időben bekövetkezett a befelé vándorló óriásbolygó irányváltása egy elegendően nagy tömegű protoplanetáris korongban. Az új felfedezések tükrében hamar világossá válik, hogy a szilikátos bolygók keletkezését és evolúcióját leíró modellek némiképp revízióra szorulnak, s újra át kell gondolni azokat.

A kialakuló kőzetbolygók tömege a protoplanetáris korong tömege mellett többek között erőteljesen függ a planetezimálok kezdeti sűrűségétől is. A nagyobb planetezimálsűrűség kisebb számú és nagyobb tömegű kőzetbolygó keletkezéséhez vezet [12]. A fémgazdag csillagok körüli protoplanetáris korongban nagyobb mennyiségű szilárd anyag van [13], amiből amellet, hogy több bolygó keletkezhet, nagyobb tömegű szilikátos bolygótestek is kialakulhatnak a rendszerben, mint a fémben szegényebb csillagok esetében.

Nehéz elemekből álló viszonylag nagy méretű bolygómagok a Jupiter-szerű óriásbolygók esetében is előfordulnak, példaként említhetjük a HD 149026b jelű exobolygót. Jóllehet a bolygó nagy átlagsűrűségének alakulásaért jórészt a nagy közelség okán a csillag erős sugárzása miatt fellépő tömegvesztés lehet a felelős, a bolygómag önmagában is meglehetősen nagy tömegűnek számít. A Szaturnusz-kategóriájú exoplanéták között is megtalálhatók a nagy átlagsűrűségű csillagkísérők, amire jó példa a CoRoT-8b [14] katalógusjelű exobolygó.

A mega-Földek tekintélyes hányada valószínűleg a bolygórendszer csillagtól távolabbi régiójában alakult ki, és ezek egy része még azelőtt elnyerte végső formáját, mielőtt a Föld-típusú bolygók képződési zónájába vándorolt. A nagy tömegű bolygómagok kialakulásának modellezése jelentheti a kulcsot a mega-Földek egyik, a protoplanetáris korongokban a hóhatáron túl összeálló típusa keletkezésének pontosabb megértéséhez. Kialakulásuk behatóbb vizsgálatának jelentősége túlmutat csupán e bolygótípus jellemzőinek jobb megismerésén amiatt, hogy bővebb információt szolgáltathatnak a Neptunusz- és Jupiter-szerű bolygók magjainak összeállásáról is. Ezáltal stabilabb alapokra helyezheti a bolygórendszerek keletkezésére vonatkozó elméleteket. Az össztömeg több mint a háromnegyedét kitevő fém-szilikátos maggal rendelkező bolygók létezése rámutat arra is, hogy galaxisunkban előfordulhatnak a több tíz földtömegű szilárd felszínű bolygók is.

A létezésükben eddig megerősített Kepler-bolygók adatbázisában közzétett információk alapján arra következtethetünk, hogy még legalább egy fél tucat, a mega-Földek osztályába sorolható planéta paraméterei találhatók meg az adatsorok közt. Ebben azonban még nem lehetünk teljesen biztosak, ugyanis e sorok írásáig még nem jelentették be az érintett exobolygók tömegének RV-mérés útján történő pontosabb meghatározását, amelynek ismeretében azok is megfelelően kategorizálhatók volnának. Az adatbázis jelenleg még csupán a tömegük felső korlátjára vonatkozó értéket tartalmazza, ami a korábbi meghatározásban rejlő nagyfokú bizonytalanság következménye.

Bár a modellszámítások alapján az exobolygó-rendszerek gázóriáisait kivéve az exoholdak ritka jelenségnek számíthatnak, a mega-Földek körül is adott esetben fennállhat a nagy méretű holdak kialakulásának lehetősége. Ezen bolygóosztály képviselői ebből a szempontból azért mutatkozhatnak különösen érdekesnek, mert a Hold keletkezéséhez hasonló mechanizmus révén a kis tömegű kőzetbolygókkal ellentétben, esetükben nem zárható ki a Marsnál nagyobb tömegű kísérők megszületése sem. A 2024-ben indítani terve-

zett PLATO űrtávcső érzékenysége pedig már lehetővé teszi egy 0,4 földátmérőjű exohold kimutatását is [15].

Az extrém nagy tömegű, főként szilikátokból felépülő bolygók kialakulásának egyik alapvető előfeltétele a viszonylag nagy tömegű protoplanetáris korong, ami meglehetősen ritka. Emiatt, bár a Neptunuszhoz hasonló tömegű bolygók gyakoriak, ezek számának csupán töredéke lehet mega-Föld. Azonban az ilyen jellegű planéták valószínűleg még így is gyakoribbak lehetnek a Jupiternél nagyobb méretű óriásoknál, ezáltal Tejútrendszerünkben minden bizonnyal több mega-Föld létezhet, mint szuper-óriás gázbolygó (super-giant gaseous planet, $> 15 R_{\oplus}$).

Összegzés

A precíz űrfotometria jövőbeni alkalmazásával exobolygók további sorozatos detektálása várható. A minták alapján becsült gyakoriságot tekintve, a Nap galaktikus szomszédságában, mintegy 200 parsek sugarú térrészen belül nagy valószínűséggel majd sikerül azonosítani még további óriás közetbolygókat is, akár a K2 misszió keretében. Az űrtávcső programja számos nagyszerű eredménnyel – köztük új bolygótípusok azonosításával – büszkélkedhet, ezáltal a Kepler küldetése a NASA történetének egyik kiemelkedő sikere.

Irodalomjegyzék:

- [1] Campante T.L. et al. (2015): An Ancient Extrasolar System with Five Sub-Earth-Size Planets. *Astrophysical Journal*, 799, 170
- [2] <http://www.csillagaszat.hu/hirek/asztrofizika-hirek/af-exobolygok/ot-foldmeretu-bolygot-talaltak-egy-osi-csillag-korul/>
- [3] Takeda G. et al. (2007): Structure and Evolution of Nearby Stars with Planets II. Physical Properties of ~1000 Cool Stars from the SPOCS Catalog. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 168, 297
- [4] Vogt S.S. et al. (2015): Six Planets Orbiting HD 219134. *Astrophysical Journal*, 814, 12
- [5] Motalebi S. et al. (2015): The HARPS-N Rocky Planet Search I. HD219134b: A transiting rocky planet in a multi-planet system at 6.5 pc from the Sun. *Astronomy and Astrophysics*, 584, A72
- [6] Fogtman-Schulz A. et al. (2014): Accurate Parameters of the Oldest Known Rocky-exoplanet Hosting System: Kepler-10 Revisited. *Astrophysical Journal*, 781, 67
- [7] Dumusque X. et al. (2014): The Kepler-10 Planetary System Revisited by HARPS-N: A Hot Rocky World and a Solid Neptune-Mass Planet. *Astrophysical Journal*, 789, 154

- [8] Futó P. (2015): A transiting 'mega-Earth' in the Kepler-field: Kepler-10c. Lunar and Planetary Science Conference XLVI, 1024, Houston
- [9] Kepler honlap, <http://www.kepler.nasa.gov/Mission/discoveries/>
- [10] Futó P. (2010): Szuper-Földek. Természet Világa, 141 (11), 520
- [11] Batygin K., Laughlin G. (2015): Jupiter's decisive role in the inner Solar System's early evolution. Proceedings of the National Academy of Sciences, 112, 4214
- [12] Regály Zs. (2015): Több, mint égen a csillag – 2. rész: Bolygók keletkezése. Fizikai Szemle, 65 (9), 306
- [13] Regály Zs. (2015): Több, mint égen a csillag – 1. rész: Exobolygók felfedezése. Fizikai Szemle, 65 (7-8), 233
- [14] Bordé P. et al. (2010): Transiting exoplanets from the CoRoT space mission – XI. CoRoT-8b: a hot and dense sub-Saturn around a K1 dwarf. Astronomy and Astrophysics, 520, A66
- [15] Szabó M.Gy., Simon A., Szalai T. (2011): Újdonságok az exobolygók világából. Fizikai Szemle, 61 (7-8), 217