

# **A Kepler-űrtávcső K2 küldetésének új eredményei – A kisbolygókat elnyelő fehér törpétől a naprendszerbeli égitesteken át a mega-Földekig**

**Futó Péter**

Debreceni Egyetem, Ásvány- és Földtani Tanszék

*A Kepler nagy pontosságú iránytartását biztosító giroszkópok közül kettő meghibásodott, aminek következtében a műszerrel tovább már nem lehetett folytatni az eredeti programot. Maga az űrtávcső azonban továbbra is kifogástalanul működött és a használatra benyújtott javaslatok egy részének elfogadásával 2014. március 8-án több szakaszban ismét megkezdte az adatgyűjtést, a korábbi várakozásokkal ellentétben meglepően jó pontossággal. A nulladik megfigyelési kampánytól (2014. március 8. – május 27.) kezdődően a program a 2016-os év végére a 11. kampány befejezéséig (december 8.) jutott, december 15-én megkezdve a 12. megfigyelési időszakot.*

A NASA Kepler-űrtávcsőve K2 küldetésének tudományos programja során, jelen sorok írásáig (2016. november elejéig) a kutatók több mint 73 exobolygót fedeztek fel vagy a már korábban is ismert bolygók csillaguk előtti átvonulását első ízben figyelték meg, a bolygójelöltek száma pedig 667. Az űrtávcső küldetésének alapvető tudományos céljait továbbra is az exobolygók detektálása és a csillagok asztrofizikai kutatása jelenti, nagyszerű kiegészítésként azonban lehetőség nyílt naprendszerbeli kisbolygók, üstökösmagok megfigyelésére is. A sztelláris asztrofizikai kutatásokhoz kapcsolódóan pedig a K2 programjában szerepet kapott többek között az ekliptika mentén található nyílthalmazok, nagy tömegű, forró (O és B színképtípusú) csillagok és cefeida változók megfigyelése is.

## **Kisbolygókat elnyelő fehér törpe**

Bolygók szinte minden csillagtípus körül megtalálhatók, s ide tartoznak a csillagok fejlődési végfázisait jelentő olyan objektumok is, mint például a neutroncsillagok vagy a fehér törpék. Előbbi csillagmaradványok környezetében a legnagyobb valószínűség szerint második generációs bolygóképződés keretében keletkezhetnek kísérők, míg a fehér törpék körüli planéták többnyire az eredeti bolygórendszernek az anyacsillag vörös óriás fázisát „túlél” tagjai lehetnek.

A WD 1145+017 jelű fehér törpét a Kepler-űrtávcsővel történt megfigyelést követően földi távcsövekkel is megvizsgálták. A vizsgá-

lat eredményeiből a kutatók arra következtettek, hogy akár több olyan, néhány száz kilométer átmérőjű kisbolygószerű objektum is kering a fehér törpéhez közeli pályán, melyek keringésük során törmelékfelhőt húznak maguk után [1]. Ezeknek a felhőknek az anyaga a kisbolygóknak a fehér törpe árapályhatásának következtében bekövetkező széteséséből származhat, s az így keletkezett törmelék idővel a csillagmaradványra hull. Az eredmények alapján a csillagászok azt találták, hogy a fehér törpék mintegy egyharmadának H/He légkörét beszennyező nehéz elemek a hozzájuk túl közel keringő szétesett bolygók anyagából származhatnak.



1. ábra: Fantáziarajz a WD 1145+017 jelű fehér törpe széttörédes kisbolygójáról. (Forrás: Harvard CfA)

### **Naprendszerbeli égitestek megfigyelése**

Az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpontjának kutatói vizsgálták a Kepler látómezejében áthaladó aszteroidák fotometriai pontosságot befolyásoló hatását. Mivel az űrtávcső a naprendszerbeli bolygók keringési síkjának irányában végez megfigyeléseket – amelybe a kisbolygók többségének a pályája is esik –, már előzetesen is az aszteroida-áthaladások meglehetősen nagy számára lehetett számítani. Az elgondolás a gyakorlatban is helytállónak bizonyult, majdnem minden második csillag környezetében kimutathatók voltak az áthaladó kis égitestek [2]. A program során első alkalommal került sor exobolygók kimutatására fejlesztett űrtávcsővel kisbolygók fényességméréseire. Az adatok elemzéséből származó eredmények a kisbolygók jellemzőinek pontosabb megismerése mel-

lett segíthetik a Naprendszer kialakulásának és fejlődésének jobb megértését is.

Szintén magyar kutatók vetették fel, hogy a Kepler még mindig elegendően nagy fotometriai pontossága kiválóan alkalmas főövbeli kisbolygók adott tulajdonságainak megismerésére is, az egyes objektumok optikai fénygörbéinek kiértékelése alapján. Ennek megfelelően naprendszerbeli kis égitestek ezreinek vizsgálata vált lehetővé, az űrtávcső új programjának különböző megfigyelési kampányai-ban, így például az M35 nyílthalmaz környezetében vagy a harmadik K2 mezőben. A Kepler pontos fotometriai adatai között a kisbolygók fényességváltozásaiban periodicitás mutatkozik, amiből a kis égitestek rotációjának jellegzetességeire lehet következtetni [3]. A Naptól több mint 40 csillagászati egységre lévő, a Neptunuszon túli térségben található (transzneptun) kisbolygók között akadnak rendkívül halvány égitestek is, melyek észlelése korántsem egyszerű feladat még olyan fotometriai pontosság mellett sem, amellyel a Kepler még jelenleg is rendelkezik. Ilyen halvány égitest a 2002 GV<sub>31</sub> jelű kisbolygó is, amelynek fényességváltozását a gyenge jel ellenére is sikerült kimérni. Ebből a tengelyforgás periódusidejére lehetett következtetni: az aszteroida lassúnak nevezhető tengelyforgási ideje 29,2 órának bizonyult [4].

A Kepler az egyes látómezőkben az adott időben megfigyelhető nagybolygók közül is megvizsgál néhányat. A mérési adatok alapján a vonatkozó modellszámítások elvégzésével lehetőség nyílik a Neptunusz belső felépítésének az eddigieknél pontosabb megismerésére. Ugyanis a csillagokhoz hasonlóan a gázbolygókban is terjednek hanghullámok, s ezek egész bolygótestre kiterjedő hatása annak nagyon kis mértékű periodikus méretváltozását eredményezi. Ez a folyamat egyben olyan mértékű fényességváltozást is előidéz, amely már az űrtávcsővel is mérhető, megfelelő adatokat szolgáltatva a bolygó behatóbb vizsgálatára irányuló kutatások számára.

A K2 tizedik megfigyelési kampánya alkalmával (2016. július 6-a és szeptember 20-a között) követő módon felvételeket készített a 67P/Csurjumov–Geraszimenko-üstökösről, amihez kapcsolódóan azt is fontos megjegyezni, hogy – az ESA Rosetta programjának keretében – első ízben szállt le üstökösmagra űreszköz (a Philae nevű leszállóegység után később a szondát is a mag felszínére irányították). A megfigyelés szeptember 7–20 közötti időszakában a Szűz csillagkép irányában látszó, a Mars és a Jupiter pályája közötti térségben tartózkodó üstököös 3,71 csillagászati egységről 3,78 CSE-re távolodott el a Naptól [5].

## Különböző bolygótípusok azonosítása

A NASA Discovery programjának keretében indított Kepler két küldetésének eddig összesen 7 esztendeje alatt 2404 (november 7-ei állapot szerint) létezésében megerősített exobolygó felfedezését köszönhetjük. A meghosszabbított küldetés a megfigyelési programok változatosságával kárpótolja a kutatókat az első megfigyelési időszak fotometriai pontosságának csökkenéséért. A két küldetésből származó megfigyelési adatok értelmezése útján kapott eredmények pedig megtalálhatók a NASA Exobolygó Archívumában (*NASA Exoplanet Archive* [6]).

A 2016. tavaszi kontrollt követő 9. kampány (K2C9) keretében a Tejútrendszer központjának irányába vetülő látómezőben a galaktikus dudor (galactic bulge) nagy csillagsűrűsége okán gravitációs mikrolencse jelenségek nagyszámú detektálását várták [7]. Amint arra már előzetesen a rövid időskálájú mikrolencse események mérései által következtetni lehetett, a K2C9 kampányban először adódott esély a szabadon vándorló bolygók (free-floating planets) hatalmas populációja tagjainak tömeg- és parallaxismérésére [8].

A kiterjesztett küldetésben a Keplerrel rendkívül izgalmas megfigyelésekre nyílt lehetőség, a csillagok, csillaghalmazok mellett a legkisebektől a legnagyobb méretű bolygótestekig. Így többek között a K2 keretében már néhány olyan, korábban felfedezett óriásbolygó csillaga előtti átvonulását is megfigyelték, melyek tömege és mérete hasonló a Jupiteréhez, átlagsűrűségük azonban kisebb a naprendszerbeli gázóriásénál (HAT-P-54b, HATS-9b, HATS-10b).

## Kis tömegű exoplanéták és szuper-Földek

Különösen érdekes multiplanetáris rendszer tagjait fedezték fel egy, a Vizöntő csillagkép irányában megfigyelhető C3 mezőben monitorozott M típusú főszorozati csillag, a K2-72 jelű vörös törpe körül, amelynek átmérője 23,2%-a, tömege pedig csupán 21,7%-a a Napénak. Négy ismert bolygója közül [9] kettő a lakhatósági zónában kering, alig több mint 15, illetve 24 napos periódussal. A két bolygó közül a csillaghoz közelebbi pályán mozgó K2-72c 0,86 földátmérőjű ( $R_{\oplus}$ ), míg a kissé távolabb keringő K2-72e jelű planéta mérete a földátmérő 80%-ának bizonyult. A vörös törpéhez legközelebb eső kis méretű K2-72b mérete ( $0,75 R_{\oplus}$ ) sem marad el sokkal a két legnagyobb planétaétól, míg a csillagtól számított második bolygónak, a K2-72d-nek van a legkisebb sugara ( $0,73 R_{\oplus}$ ). Viszonylag kis méretük alapján nagy valószínűséggel mind a négy bolygó Föld-típusú lehet.

A szintén Kepler-adatok értelmezéséhez kapcsolódó HEK (*Hunt for Exomoons with Kepler*) egy csillagászokból álló nemzetközi kutatócsoport által felépített megfigyelési projekt, melynek közreműködői

az ismert tranzitbolygó-jelöltek teljes listáját átvizsgálva keresik az adatsorokban az ígéretes exohold-jelölteket. Az exoholdak kimutatása ma még új kihívást jelent a kutatásban, idővel azonban a növekvő mennyiségű adatból nagyobb eséllyel olvashatók majd ki a bolygó-kísérők létezésének nyomai.

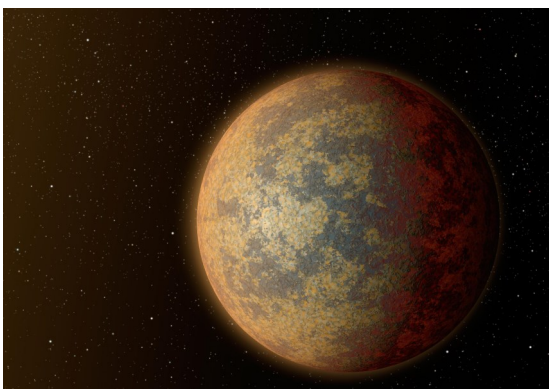
A felfedezések között szuper-Föld kategóriájú bolygók is szerepelnek, melyek döntő többsége nagyon közeli pályán kering a központi csillagához. Sok érdekes tulajdonság jellemzi a WASP-47 rendszert, melyben az előzőleg már ismert két Jupiter-szerű bolygó (az egyik jele b, tömege  $m=1,1447$  Jupiter-tömeg, pályájának fél nagytengelye  $a=0,05111$  CSE, a másik jele c,  $1,4789$  Jupiter-tömeggel és  $1,375$  CSE fél nagytengellyel) mellett egy Neptunusz-jellegű (jele d,  $m=15,7 M_{\oplus}$ , sugara  $R=3,619 R_{\oplus}$ ,  $a=0,08609$  CSE) és egy szuper-Föld (jele e,  $m=9,1 M_{\oplus}$ ,  $R=1,778 R_{\oplus}$ ,  $a=0,01688$  CSE) kategóriába tartozó bolygó is kering [10], utóbbi kettő csillaga előtti átvonulását a K2 program során figyelték meg először. A többféle bolygótípust is felvonultató WASP-47 rendszer egyik fő érdekessége, hogy a jelenleg ismert bolygórendszerek közül ez az egyetlen, melyben a forró Jupiter (b) pályáján belül még egy másik bolygó (e) is kering a központi csillag körül. Az alig több mint 24 nap periódusidejű, e katalógusjelű, a forró szuper-Földek családjába sorolható bolygónak az össztömeghez viszonyítva kissé nagyobb magja lehet, miután belseje feltehetően valamivel több fémeket tartalmazhat, mint amennyi egy Föld-szerű összetételből adódna.

## **Mega-Földek**

Az utóbbi évek felfedezései között szerepelnek olyan érdekes, a szuper-Földekénél nagyobb, a Neptunuszéval összemérhető tömegű bolygók is, melyek túl nagy átlagsűrűséggel rendelkeznek ahhoz, hogy klasszikus értelemben vett gázbolygók vagy jégóriások legyenek. Ezeket a Föld-típusú bolygókhoz sorolható planétákat mega-Föld néven említi az exoplanetológiával foglalkozó tudományos szakirodalom, illetve a témához kapcsolódó ismeretterjesztés. Keletkezési mechanizmusuk egyik lehetséges módja szerint a csillagukhoz nagyon közeli pályán keringő gázóriások fotoevaporáció révén elveszítetik gázburkuk jelentős részét vagy egészét. Mega-Földek keletkezhetnek olyan nagy tömegű protoplanetáris korongokban is, melyekben nem alakul ki Jupiter-szerű planéta, amely befelé történő vándorlása esetén akadályozhatná a Föld-típusú bolygók keletkezési zónájában a bolygócsírák óriás méretűvé hízását. (A Naprendszerben Batygin és munkatársai [11] szerint kezdetben akár szuper-Földek is kialakulhattak, csak a Naphoz túlságosan közel migráló Jupiter gravitációjának hatására elpusztultak a még formálódó óriás kőzetbolygók, a kifelé történő irányváltást követően pedig csupán

legfeljebb a Föld méretéhez közelítő bolygótestek jöhettek létre). Óriás kőzetbolygók azonban valószínűleg létrejöhetnek olyan rendszerekben is, melyekben az óriásbolygó befelé történő migrációjában időben bekövetkezik az irányváltás és a továbbiakban is lehetőség nyílik a bolygóembriók nagymértékű tömeggyarapodására [12].

Kozmokémiai megfontolások értelmében a mega-Földek lehetnek szén ( $C/O > 1$ ) és szén-szilikát ( $C/O = 0,8-1$ ) bolygók is. A szénben gazdag planéták köpenye főként szilícium-karbidból, illetve szén-szilikát bolygók esetében még szilikátokból és szilícium-oxikarbidokból épül fel. Magjukban a szén jellemzően vas-karbidok formájában fordulhat elő, atmoszférájukban pedig nagy valószínűséggel a metán a domináns légköra alkotó komponens [13].



2. ábra: A BD+20594b jelű mega-Föld kategóriájú bolygó művészi ábrázolásban  
(Forrás: JPL-Caltech / NASA)

A Bika csillagképben a Fiastyúk nyílthalmazhoz közeli égterületen található a BD+20594 katalógusjelű csillag, amelynek b jelű, 16,3 földtömegű és 2,23 földátmérőjű bolygója [14] az óriás kőzetbolygók prototípusának tekinthető. Valószínűleg nem teljesen szilikátokból épül fel, hanem vastag köpenye egy a bolygóhoz képest viszonylag kis méretű fémes magot övezhet [15].

A mérések azt mutatják, hogy az 1,546 földátmérőjű K2-38b a szuper-Föld kategóriájú bolygóknál nagyobb tömegű (12,01 földtömeg, NASA Exoplanet Archive), és így a viszonylag nagy átlagsűrűsége alapján potenciális mega-Föld. Átlagsűrűsége alapján arra is lehet következtetni, hogy belseje relative sok fémesszövetet tartalmazhat, így a bolygó meglehetősen nagy méretű fémes maggal rendelkezhet.

A Kepler K2 küldetésének keretében ismételten ideális lehetőség nyílt folytatni a csillaguktól nagyon kis távolságban keringő (ultra-short period, USP) bolygók keresését. A jelenleg ismert legkisebb keringési periódusú exoplanéta a C2 mezőben talált EPIC 203533312b, amely mindössze 4 óra 12 perc alatt járja körül csillagát. A mérési adatok szerint a bolygó átmérőjére 1,92  $R_{\oplus}$  adódott, tömege pedig a mérések szerint legalább 11,5  $M_{\oplus}$  [16], ami alapján valószínűleg egy nagy tömegű szilikátos bolygóról, mega-Földről lehet szó.

Hasonlóan érdekes a K2 második kampánya során felfedezett EPIC 204221263b (K2-38b) jelű, rövid periódusú (4,016 nap), 1,546 földtömegű exobolygó, amelynek tömegére a Keck/HIRES spektrométerrel végzett radiálissebesség-mérések alapján mintegy 12,01 földtömeg adódott (NASA Exoplanet Archive). Tömegéből adódóan ez a bolygó is már a mega-Földek kategóriájába tartozik, mérete alapján azonban a szuper-Földek általános átmérő-kategóriájába ( $1-2 R_{\oplus}$ ) sorolható. A mért adatokból számított átlagsűrűség ( $17,77 \text{ g/cm}^3$ ) alapján a bolygó magas arányban tartalmazhat fémes összetevőket, de akár egy egykori gázburkát elveszített óriásbolygó hosszú időre nagy átlagsűrűségű állapotban maradt magja is lehet.

Az eddig felfedezett exobolygórendszerek tanulmányozása már sokat segített a bolygók kialakulásának jobb megértésében, és az egyes bolygótípusok azonosításában, illetve azok tejútrendszerbeli gyakoriságának becslésében. Az új felfedezések azt sugallják, hogy a nagy tömegű teresztrikus bolygók gyakoribbak, mint azt a kutatók egy évtizeddel ezelőtt gondolták. Statisztikai vizsgálatok alapján tudjuk azt is, hogy az óriás gázbolygók jóval kisebb számban léteznek, mint kisebb tömegű társaik, a legtöbb bolygó az 5–10 földtömeg közötti tömegtartományba esik [17].

## **Összegzés**

A Kepler új megfigyelési időszaka szépen beváltotta a hozzá fűzött reményeket, hiszen a K2 program keretében szintén sok érdekes felfedezés történt. A közeljövőben üzembe állítandó James Webb-űrteleszkóppal pedig már részletesen vizsgálható lesz a viszonylag közeli, fényes csillagok körül keringő tranzitbolygók légkörének kémiai összetétele is, biomarker komponensek (metán, vízgőz, oxigén, ózon) nyomai után kutatva, melyek a bolygófelszínen uralkodó, esetlegesen kedvező fizikai viszonyok mellett szintén a lakhatóság alapvető feltételeink meglétére utalhatnak.

Az űrcsillagászati technikák érzékenységeinek további javulásával minden bizonnyal az egészen kis méretű, tranzitos exobolygók kimutatására is lehetőség nyílik a jövőben. Nagy valószínűség szerint a teljes tömegspektrumban minden kategóriában találunk majd bolygókat a közelebbi és távolabbi galaktikus környezetünkben. A bolygókeresés céljából fejlesztett űrcsillagászati eszközök alkalmazása – a Tejútrendszer feltérképezése mellett – néhány évtized múlva már akár a legközelebbi galaxisok vizsgálatára is kiterjedhet.

Irodalomjegyzék:

- [1] Bolygóit felfaló fehér törpe. Természet Világa, 147 (2), 81
- [2] Dályá G., Hanyecz O., Szabó R. (2015): Kisbolygóvadászat a Kepler-űrtávcsővel. Természet Világa, 146 (11), 515
- [3] Szabó R. et al. (2016): Uninterrupted optical light curves of main-belt asteroids from the K2 mission. Astronomy and Astrophysics, 596, A40
- [4] Sárneczky K. (2015): Túl minden határon: Neptunuszon túli kisbolygókat vizsgáltak magyar csillagászok a Keplerrel (www.csillagaszat.hu, 2015. 04. 15.)
- [5] Tóth I. (2016): A Kepler-űrtávcső is megfigyelte a Rosetta üstökösét (www.csillagaszat.hu, 2016. 10. 17.)
- [6] NASA Exoplanet Archive (<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>)
- [7] Kovács J. (2016): Gravitációs mikrolencsézéssel is keresi a Kepler a bolygókat (www.csillagaszat.hu, 2016. 05. 02.)
- [8] Penny M.T. et al. (2016): Predictions for the Detection and Characterization of a Population of Free-Floating Planets with K2 Campaign 9 (arXiv:1605.01059)
- [9] Crossfield I.J.M. et al. (2016): 197 Candidates and 104 Validated Planets in K2's First Five Fields. Astrophysical Journal Supplement Series, 226, 7
- [10] Almenara J.M. et al. (2016): Absolute densities, masses, and radii of the WASP-47 system determined dynamically. Astronomy and Astrophysics, 595, L5
- [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, 14
- [12] Futó P. (2016): Ősi bolygórendszerek és mega-Föld a Kepler-mezőben. Űrtan Évkönyv 2015, MANT, Budapest, pp. 75-81
- [13] Futó P. (2015): Újdonságok a kis tömegű exobolygók kutatása terén. Űrtan Évkönyv 2014, MANT, Budapest, pp. 108-114
- [14] Espinoza N. et al. (2016): Discovery and Validation of a High-Density sub-Neptune from the K2 Mission. Astrophysical Journal, 830, 43
- [15] Futó P. (2017): BD+20594b: A mega-Earth detected in the C4 field of the Kepler K2 mission. Lunar and Planetary Science Conference XLVIII, 1078, Houston
- [16] Adams E.R., Jackson B., Endl M. (2016): Ultra-short-period Planets in K2 SuPerPiG Results for Campaigns 0–5. Astronomical Journal, 152, 47
- [17] Regály Zs. (2015): Több, mint égen a csillag – 1. rész: Exobolygók felfedezése. Fizikai Szemle, 65 (7-8), 233