

Újdonságok a kis tömegű exobolygók kutatása terén

Futó Péter

Nyugat-magyarországi Egyetem,
Földrajz és Környezettudományi Intézet, Szombathely

Két évtized telt el az első, fősorozati csillag körül keringő exobolygó, az 51 Pegasi b felfedezése óta. Akkoriban az exoplanéták csillagukra gyakorolt fizikai hatásának megfigyelésére szolgáló műszerek érzékenysége még alkalmatlan volt a Földével összevethető méretű objektumok kimutatására. Napjaink technológiájával már lehetőség nyílik olyan viszonylag kisméretű planéták kimutatására is, mint bolygósomszédunk, a Mars. Erre a célra a legalkalmasabb módszer a csillagok előtti bolygóátvonulások (tranzitok) megfigyelése, amiből nemcsak a csillag/bolygó átmérőarányra következtethetünk, hanem a bolygópálya adott paramétereire is. Az ily módon felfedezett bolygók létének megerősítése a tömegük meghatározására irányuló módszerek alkalmazásával egészül ki.

A Kepler-űrtávcső küldetése mérőföldkőnek számít Galaxisunk részletesebb megismerése terén, s az exobolygó-kutatás minőségileg új korszakát nyitotta meg. Mérési eredményei alapján tömegével fedeznek fel Föld-típusú bolygókat is a Tejútrendszernek a Naphoz hasonló és a nála kisebb tömegű csillagai körül. A Kepler-misszió egyik vitathatatlan érdeme annak bebizonyítása, hogy az exobolygók világában jóval gyakoribbak a szuper-Föld kategóriájú és a még kisebb objektumok, mint a Jupiter-szerű óriásbolygók.

A változatosság erejével

A kis tömegű exobolygók kutatása nemcsak a Föld-szerű planéták keresése miatt izgalmas tudományterület, hanem azért is, mert a hozzávetőlegesen 10 földtömegnél kisebb tömegű bolygók adott szempontok alapján történő kategorizálása széles skálán mozoghat a különféle típusokba és altípusokba való besorolás terén. Általában összetételük és a csillagtól való távolságuk következtében kialakult fizikai tulajdonságaik figyelembevételével történik az osztályozás.

Az exobolygók érdekes populációját alkotják az anyacsillagtól 0–0,25 csillagászati egység (CSE) távolságtartományban, kis excentricitású pályákon keringő forró szuper-Földek és kisebb tömegű forró Föld-típusú bolygók. Valószínűleg speciális típusokat képviselnek a Kepler-70b és c katalógusjelű exobolygók, amelyek 0,759 (b) és 0,867 (c) földsugarúak, tömegük pedig a Földének 44 (b) illetve 66%-a (c). Egy lehetséges forgatókönyv szerint ezek eredetileg gázbolygók voltak, gázburkuk azonban elpárolgott, amikor anyacsilla-

guk kiterjedt légkörében keringtek a vörös óriás fázis idején. A folyamat végére a lecsupaszított közetmagok maradtak meg (Khthonoszi bolygók), teresztrikus típusú objektumokként [1].

A bolygókeletkezés folyamatát leíró elméletek szerint minden bizonnyal nagy számban léteznek olyan planéták, melyek tömegének jelentős részét egy, a fémes mag és szilikátos köpeny felett húzódó, vízből álló gömbhéj alkotja (ice-, icy planets). Valószínű, hogy az ilyen jellegű bolygók felfedezésére a vörös törpecsillagok környezetében lehet majd leginkább számítani. A csillaguk közelségébe vándorolt, ezen típusba tartozó planéták külső rétegét magasabb effektív hőmérsékletük miatt sűrű vízgőzlégkör alkothatja. A lakhatósági zónában keringő bolygókon megfelelő felszíni atmoszférikus feltételek teljesülése esetén pedig mély, összefüggő vízóceán boríthatja a teljes felületet.

Bolygók fémből és bolygók szénből

Az eddig felfedezett kis tömegű exobolygók között szép számban akadnak olyanok, amelyek átlagsűrűsége arra utal, hogy az össztömegükhöz képest viszonylag nagy tömegű fémes magjuk van. Az ilyen jellegű planéták kialakulásának magyarázatára több hipotézis is napvilágot látott. Ezek közül is csupán csak egy lehetséges forgatókönyv a fentiekben felvázolt folyamat a Kepler-70b és c esetében.

Adott esetekben megtörténhet az is, hogy egy bolygónak egy másikkal történő gigantikus ütközése során a köpenyanyag jelentős része (vagy egésze) leszakad (mantle-stripping event) az egyik planétáról (miközben a két objektum fémes magja egybeolvad, vagy az egyikük megsemmisül). A folyamat eredményeként pedig egy nagy részben (vagy teljes egészében) fémötvözetből álló bolygó jön létre. Hasonló folyamat játszódhatott le a Hold keletkezésében döntő szerepet játszó találkozás alkalmával is, amikor egy Mars méretű bolygóembrió (Theia) a fiatal Földnek ütközött. A katasztrofális ütközés során a Theia megsemmisült, fémes magja pedig vélhetően egybeolvadt bolygónkéval. A két égitest köpenyanyagából származó törmelék Föld körüli pályán keringő részének későbbi akkréciója által jött létre a Hold.

Ha a protoplanetáris korong anyagában a C/O arány magasabb mint 1, akkor a szén alapú ásványok (SiC, TiC) fognak dominálni a keletkező bolygók köpenyét felépítő ásványok között. Ha a C/O arány kisebb 0,8-nél, akkor a szilícium szilikátásványokban van jelen. Abban az esetben pedig, ha a bolygókeletkezés alapjául szolgáló koronganyagban a C/O arány 0,8–1 közötti, karbidok és szilikátok egyaránt magas arányban részt vesznek a kialakuló kis tömegű bolygók alsó köpenyének felépítésében (szén-szilikát bolygók). A

Föld-típusú bolygók köpenyében és alsó kérgében megtalálható szilikátásványaiban –szénben gazdag ásványi környezetben megfelelő hőmérsékleten és nyomáson – az oxigént helyettesítheti a szén. Az ily módon létrejövő ásványok az úgynevezett oxikarbidok (a következő képlettel írhatók fel: $\text{SiO}_x\text{C}_{4-x}$) [2]. A szén-szilikát bolygók köpenyének komplex szilikátásványaiban is létrejöhetett az oxigén szénnel történő szubsztitúciója, aminek eredményeként az oxikarbidok alkotó ásványként szerepelhetnek ezen típusú bolygók köpenyében és alsó kérgében. Magjuk néhány tömegszázaléknyi szenet tartalmazhat, ami főként vaskarbidok formájában van jelen. Légkörük felszínhez közeli rétegeiben pedig a metán dominánsabb összetevő, mint a vízgőz. Az ilyen égitestek tulajdonképpen Föld-típusú (teresztrikus) bolygók széngazdag összetétellel. Sugaruk kisebb átlagsűrűségük következtében – ugyanolyan tömeg és szerkezet esetén – néhány százalékkal nagyobb, mint egy tipikus kőzetbolygóé [3].

John Moriarty (Yale University, USA) és munkatársai modellje [4] szerint a szénben gazdag exobolygók jóval gyakoribbak lehetnek, mint azt korábban gondoltuk. Eredményeik alapján szénbolygók a 0,8-nél nagyobb C/O arány esetén nemcsak a csillag közelében alakulhatnak ki, hanem attól nagyobb távolságban is. Ráadásul a modell rávilágít arra is, hogy a protoplanetáris korongokban 0,65-nél kisebb C/O arány esetén is keletkezhetnek szénben gazdag planéták a csillag közelségében.

Föld-szerű világok felderítése

Az eddigi eredmények azt mutatják, hogy jó úton haladunk a Földhöz hasonló bolygók felderítése felé. A műszerek érzékenysége már jelenleg is lehetővé teszi a kisméretű, csillaguk lakhatósági zónájában keringő bolygók megtalálását. A jövőben tervezett korszerű űreszközök (például a Webb-űrtávcső) pedig már alkalmasak lesznek e világok légköri összetételének vizsgálatára is. Ettől azt reméljük, hogy majd sikerül kimutatni biomarker gázok jelenlétét kedvező paraméterekkel rendelkező planéták atmoszférájában. A Föld-szerű bolygók felderítése meglehetősen nehéz feladat, a kisméretű bolygók légköri analízise azonban egy határozottan nagy előrelépést fog jelenteni a cél irányába.

A legújabb kutatások rávilágítanak arra, hogy a komplex életformák keresését egy még szűkebb tömegtartományban érdemes végezni, mint ahogyan azt eddig gondoltuk. Helmut Lammer és kollégái eredményei szerint [5] a 0,5–1,5 földtömeg közötti kőzetmagok sokkal kisebb mennyiségű gázt (H_2 , H, He) tudnak csupán megtartani, aminek következtében az élet számára alkalmasabb légkörük lesz. A több mint 1,5 földtömegű kőzetmagok – nagyobb gravitációs hatásuk révén – sokkal több gázt vonzanak magukhoz, aminek

eredményeként mini-Neptunuszokká fejlődnek, sokkal vastagabb, sűrűbb, az élet számára valószínűleg kedvezőtlen atmoszférával.

A Kepler-űrtávcsővel végzett megfigyelések eredményei szerint az 1,5–5 földtömeg ($M_{\text{Föld}}$) közötti tömegkategóriába sorolható, vastag légkörrel rendelkező planéták nagyon gyakoriak lehetnek a Tejútrendszerben. Ugyanakkor az 1,5–5 $M_{\text{Föld}}$ tömegtartományba tartozó égitestek között a sűrű, vastag atmoszféra nélküli kőzetbolygók sem számítanak ritkaságnak, azonban úgy tűnik, ezek a csillagok közelségében jellemzőek a leginkább.

A 0 és 1 közötti számmal kifejezhető Föld-hasonlósági index (Earth Similarity Index, ESI) azt mutatja meg, hogy – meghatározott paramétereket figyelembe véve – egy adott exobolygó mennyire hasonlít a Földhöz. Az index meghatározásánál figyelembe veszik egy exobolygó alapvető fizikai paramétereit – átmérő, tömeg, átlagsűrűség – csakúgy, mint például a becsült felszíni hőmérsékletet vagy a légköri összetételt. Minél jobban közelít az ESI értéke az 1-hez, annál inkább hasonló a mi bolygónkhoz a vizsgált planéta. Viszonylag magas ESI értéknek számít a Kepler-62e (0,83) vagy a Gliese 667 C c jelű (0,84) exoplanéták indexe. 0,8 feletti Föld-hasonlósági index esetén a kutatók feltételezik az élet kialakulásához szükséges leg-alapvetőbb sajátosságokat: Föld-típusú összetétel, megfelelő sűrűségű légkör és hőmérséklet.



A Kepler-186f az első Föld-méretű exobolygó, amely csillaga lakhatósági zónájában kering. (Fantáziakép: NASA Ames / SETI Institute / JPL-Caltech)

A NASA a Kepler-űrtávcső adatai alapján olyan planéta felfedezését adta közre, amely méretét tekintve hasonlít a Földre, átmérője csupán 11 %-kal nagyobb a saját bolygónkénál. A Kepler-186f az elsőként megtalált olyan földméretű exobolygó, amely csillaga lakha-

tósági zónájában kering. Egy M színeképtípusú vörös törpecsillag, a Kepler-186 több ismert bolygót is tartalmazó rendszerében található, mintegy 493 fényévnyi távolságra, a Hattyú csillagképben [6]. Tömege még nem ismert, a Földéhez hasonló méretét tekintve azonban valószínű, hogy inkább kőzetbolygóról van szó, mintsem vastag gázburokkal rendelkező bolygóról. ESI indexe csupán 0,64, ami a valószínűsíthetően hűvös klímájának köszönhető.

Szuper-Földek Napunk galaktikus szomszédságában

Két bolygót is felfedeztek az egyik Napunkhoz legközelebbi csillag, a 12,76 fényévre levő Kapteyn-csillag (GJ 191, HD 33793) körül. A kutatók szerint a 0,281 naptömegű és 0,291 napátmérőjű, M1.0 színeképtípusú szubtörpe – a hozzánk legközelebb eső halo-csillag – egy törpegalaxisban keletkezett, amelyet később a Tejútrendszer bekebelezett [7] [8]. A 11,5 milliárd éves vörös törpe erősen elnyúlt pályán kering galaxisunk középpontja körül. A kutatók az egykori törpegalaxis magjának maradványaként pedig az ω Centauri gömbhalmazt azonosítják.

Az b jelű planéta keringési ideje 48,616 nap, átlagos keringési távolsága 0,168 CSE. Tömege mintegy 4,8-szerese a Földének. A c jelzéssel ellátott bolygó a sajátunkénál mintegy 7-szer nagyobb tömegű szuper-Föld, 0,311 CSE távolságra kering központi csillagától, keringési ideje 121,54 nap.

Ausztrál csillagászok a Daru csillagkép irányában megfigyelhető, mindössze 16 fényévre található Gliese-832 katalógusjelű vörös törpe [9] környezetében egy szuper-Föld jellegű bolygó felfedezését jelentették be. Ez központi csillagát 35,68 nap alatt járja körül, mintegy 0,162 CSE távolságban, kis excentricitású pályán, a lakhatósági zóna belső szélé közelében. A csillaghoz való közelség miatt fennáll a kötött keringés lehetősége. A radiálissebesség-mérés eredményei alapján tömege a Föld-tömeg 5,4-szeresének bizonyult. A rendszerben egy, a Jupiternél kisebb tömegű ($0,69 M_{\text{Jupiter}}$) gázbolygó (b) is kering, 3,6 CSE távolságban.

Bolygórendszerbeli helyzete és viszonylag nagy tömege alapján a Gliese-832c a kutatók szerint „szuper-Vénuszként” kategorizálható, s valószínűleg vastag légkörrel rendelkezik, amely a meglehetősen nagy csillagközelséggel együttesen a bolygó felszínén a Vénusznál is erőteljesebb üvegházhatást idéz elő. Felszíni vizsgálatok hiányában a planétán uralkodó fizikai viszonyok leírása nem lehetséges, az ismert adatok figyelembevételével azonban hozzávetőleges becslésként annyi elmondható, hogy egy ilyen jellegű bolygó felszínén a hőmérséklet akár az 1000 K-t is elérheti.

Bolygókereső űrtávcsövek

A jövőben ismét intenzíven folytatódik majd a precíz technikai apparátussal történő exobolygó-keresés, különböző űrtávcsöves megfigyelési programok keretében.

A Kepler-űrtávcső további hasznosítására (K2) vonatkozóan több érdekes javaslat látott napvilágot [10] [11]. A tervezeteket a megvalósíthatóság és egyéb szempontok figyelembevételével erősen szelektálták, s csak azok kerültek elfogadásra, amelyek kitűnően beleilleszkedtek a K2 program kínálta lehetőségekbe.

Az exobolygós keresőprogramok közül kétségtelenül az egyik legérdekesebbet dolgozták ki M. Kilic és kollégái az Oklahomai Egyetemről [12]. A javaslat szerint a fehér törpék körül keringő exobolygókat fősorozati csillagok körüli társaiknál könnyebben lehetne felfedezni a tranzit módszer alkalmazásával. A fehér törpe és bolygójának átmérőaránya ugyanis jóval kisebb lehet, mint a fősorozati csillagok és a körülöttük keringő planéták esetében.

A már ismert exobolygók központi csillagainak fényességét ultraprecíz fotometriával mérő CHEOPS (CHAracterizing ExOplanet Satellite) működtetése a 2018–2021 közötti időszakra tervezett üzemidőre korlátozódik. A CHEOPS esetében magyar szakemberek részéről az exoholdak detektálására kidolgozott módszer alkalmazása jelenti majd a fő kutatási témát.

A TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) várhatóan a 2017-es évtől a Föld körül fog keringeni magas pályán (HEO, High-Earth Orbit), és keringési ideje 2:1 arányú rezonanciában áll majd a Holdéval. Ez a pálya elég stabil környezetet biztosít az exobolygó-megfigyelések számára. Ennek eredményeképpen a műszer érzékenysége a legfényesebb csillagok esetében elérheti majd a 60 milliomodrész (ppm).

Összegzés

A viszonylag kis tömegű exobolygók típusainak és altípusainak tárháza meglehetősen gazdag. A Neptunuszhoz hasonló méretű planétáktól a mini-Neptunuszokon át az esetleg jelentős jégtömegfrakciót is tartalmazó kisebb tömegű kőzetbolygóig sokféle változat fordul elő Galaxisunkban.

Még megválaszolatlan kérdés, hogy mennyire gyakoriak az exoholdak az óriásbolygók, s főként a kőzetbolygók körül. A tranzitkereső űrtávcsövek következő generációjának mérésein alapuló vizsgálatok talán a problémakör megoldását jelenthetik majd a közeljövőben.

A Tejútrendszer dinamikai viszonyait, kémiai összetételét és az egyes objektumtípusok várható gyakoriságát figyelembe véve az élet utáni kutatás szempontjából azok a kis tömegű bolygókat tartalma-

zó rendszerek lesznek a különösen érdekesek, amelyek a Napéhoz hasonló távolságban keringenek a galaktikus centrum körül. A Kepler-űrtávcső méréseit követő vizsgálatok során pedig kiderült, hogy a Földhöz hasonló méretű bolygók keletkezése gyakoribb más csillagok körül, mint azt korábban feltételeztük. A kisméretű exobolygók kimutatása tehát izgalmas kihívást jelent, s a fő cél természetesen egy igazi Föld-analóg planéta megtalálása.

Irodalomjegyzék:

- [1] P. Futó (2014): Structural modeling for the low-mass transiting exoplanets: Kepler-70b and Kepler-70c. Lunar and Planetary Science Conference XLV, □ 1045, Houston
- [2] Sen S. et al. (2013): Carbon substitution for oxygen in silicates in planetary interiors. Proceedings of the National Academy of Sciences, 110, 15904
- [3] P. Futó (2014): A new planet-class: carbon-silicate planets. Lunar and Planetary Science Conference XLV, □ 1046, Houston
- [4] <http://www.csillagaszat.hu/exobolygok/20140602-gyemantbolygok-sokkal-gyakoribbak.html>
- [5] Lammer H. et al. (2014): Origin and loss of nebula-captured hydrogen envelopes from 'sub'- to 'super-Earths' in the habitable zone of Sun-like stars. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 439, 3225
- [6] <http://www.csillagaszat.hu/exobolygok/20140419-kepler-186f.html>
- [7] <http://www.csillagaszat.hu/exobolygok/20140605-kapteyn-csillag.html>
- [8] Anglada-Escudé G. et al. (2014): Two planets around Kapteyn's star: a cold and a temperate super-Earth orbiting the nearest halo red-dwarf. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Letters, 443, L89
- [9] <http://www.csillagaszat.hu/exobolygok/20140722-mi-teszi-alakhato-bolygot.html>
- [10] Dálya G., Hanyecz O., Szabó R. (2014): Új feladat vár a bolygó-vadászra. Természet Világa, 145, 161
- [11] Molnár L. (2014): Kepler: a kötéláncos űrtávcső. Fizikai Szemle, 64 (6), 182
- [12] Kilic M. et al. (2013): Habitable planets around white dwarfs: an alternate mission for the Kepler spacecraft. arXiv:1309.0009