

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította
A Matematikai és Fizikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

LXIII. évfolyam

7–8. szám

2013. július–augusztus

KEPLER-BOLYGÓK KAVALKÁDJA

Szabó Róbert¹, Szabó M. Gyula^{1,2}

¹MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont
Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézete

²ELTE Gothard Asztrofizikai Observatórium, Szombathely

Meghosszabbított küldetés

Napjainkban csendes forradalom zajlik, amiről a szakembereken és néhány lelkes tudományos emberen kívül keveseknek van tudomása. A NASA Kepler-űrtávcsöve – amelynek elsődleges feladata a Földhöz hasonló, lakható bolygók keresése Nap-szerű csillagok körül – ugyanis olyan hatalmas számú bolygójelöltet és bolygórendszert fedezett fel eddigi négyéves működése alatt, hogy abból már pontos statisztikai vizsgálatok végezhetőek, és szemünk előtt tárul fel Földünk és Naprendszerünk helye a többi bolygórendszer között. Ez a szerep azonban egyre kevésbé kitüntetett. A kopernikuszi forradalom egyenes folytatásaként is aposztrofálható folyamat úgy indult jó fél évezrede, hogy gondolkodásunkban a Földünk kikerült a Világmindenség középpontjából. Miután bebizonyosodott, hogy a bolygók a Nap körül keringenek, ugyanez történt központi csillagunkkal is. A folyamat annak felismerésével folytatódott, hogy Napunk is csak egy átlagos csillag galaxisunk peremvidékén, és hogy galaxisból is sok milliárdnyi van.

A Naprendszeren kívül Naphoz hasonló csillag körüli bolygókról azonban 1995-ig nem volt tudomásunk. Azóta sokféle módszerrel mintegy 900 megerősített exobolygóról (Naprendszeren kívüli planétáról) tud az emberiség. A NASA Kepler-űrtávcsövének 2009-es felbocsátása óta egymaga több mint 2700 bolygójelöltet talált, ráadásul ezek felét többes rendszerekben. Megkezdődhetett tehát a naprendszerek és annak a kérdésnek a vizsgálata, hogy milyen gyakoriak a Földek a különböző típusú csillagok körül. A forradalmi eszköz fotometriai módszerrel keresi a lakhatósági zónában keringő Föld-szerű exobolygókat. Apró elhalványodásokra vadászik a megfigyelt

mintegy 150 ezer csillag fényében, amelyeket bolygók elhaladása (tranzitja) okoz a csillag korongja előtt.

A sikeres működés fényében nem meglepő, hogy a NASA meghosszabbította a Kepler-űrtávcső működését. A Kepler már eddig is egyedülálló eredményeket szolgáltatott a bolygók gyakoriságáról, méret- és pályaeloszlásáról, valamint az exobolygórendszerek felépítéséről, különösképpen a Föld-méretű és annál kisebb, valamint a kettőscsillagok körül keringő planéták tekintetében. A Kepler által felfedezett, több fedési bolygót tartalmazó rendszerek teljes mértékben átfomálták tudásunkat ezen a területen. A meghosszabbított misszió alatt ugrásszerűen fog nőni a felfedezett Föld-szerű bolygók száma a hosszú keringési periódusú bolygók felfedezési lehetőségének és a folyamatosan megújított keresési módszereknek köszönhetően. Ez már önmagában is erős érv a program kiterjesztésére. Az indokláshoz nem felejtették el hozzátenni azt sem, hogy a Kepler a csillagok fényváltozásának vizsgálatát szintén forradalmasította, ami a csillagok működésének és belső szerkezetének jobb megértéséhez vezet. Példaként azt a váratlan eredményt említik, hogy csillagszeizmológiai módszerekkel megkülönböztethetőek a kívülről azonosnak tűnő, hidrogént egy mag körüli héjban égető, illetve a magjukban már héliumot égető vörös óriáscsillagok. Erre mai tudásunk szerint más módszer nem képes. De a hét-nyolc évet lefedő jövőbeli Kepler-fénygörbék utolérhetetlen potenciált jelentenek a kettőscsillagok fizikájának megértéséhez, a csillagok mágneses ciklusainak csillagszeizmológia révén történő tanulmányozásához, vagy éppen az RR Lyrae csillagok modulációja: az évszázados rejtélyt jelentő Blazskó-effektus megfejtéséhez is.

Ezenkívül valószínűleg az is hozzájárult a döntéshez, hogy a Nap típusú csillagokban megfigyelhető, főként a mágneses térrel összefüggő aktivitásból származó zaj nagyságát egyharmadával alábecsülték. Ez a kis zaj csak az ultrapontos Kepler-űrtávcsövel mérhe-

A magyar Kepler-csoport munkáját az MTA Lendület és Bolyai Ösztöndíj programja, az OTKA K83790, a MAG Zrt. HUMAN MB08C 81013 és a KTIA URKUT_10-1-2011-0019 sz. pályázatai támogatják.

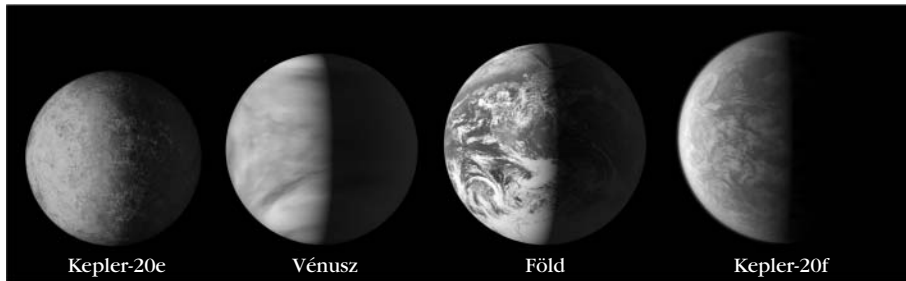
tő, de jelenléte fontos szerepet játszik a bolygók által okozott parányi elhalványodások kimutatásában. Ron Gilliland (Space Telescope Science Institute, Greenbelt, MD, USA) és munkatársai alaposan megvizsgálva a problémát paradox módon azt találták, hogy aktivitását tekintve Napunk nem egy átlagos, „Nap típusú” csillag (ebből indultak ki a Kepler tervezésekor), hanem a „csendes kisebbséghez” tartozik, míg a hasonló csillagok többsége átlagosan aktívabb a Napnál. Azért tehát, hogy az eredeti célkitűzés megvalósulhasson, vagyis a lakható földek gyakoriságát megbecsüljék, a fedési exobolygókat tartalmazó rendszerekben a tervezettnél több tranzitot kell megfigyelni, hogy a cél eléréséhez szükséges jel/zaj arány elérhető legyen.

Cikkünkben az exobolygókkal kapcsolatos fontosabb eredményekből válogattunk, amelyek a forradalmi űreszköz névleges, 3,5 éves működése során születtek, és amelyek küldetésének meghosszabbításához vezettek.

A méret a lényeg!

Minthogy a Kepler elsődleges célja a Föld típusú bolygók felfedezése a lakhatósági zónában, nagy lépés az ezer fényévre található Kepler-20 rendszer felfedezése. Az összesen öt ismert bolygót tartalmazó rendszerben, amelyben mind az öt mutat fedéseket, két olyan planéta is kering, amelyek méretben nagyon hasonlítanak a Földhöz (1. ábra). Az új égitestek valószínűleg kőzetbolygók. A Kepler-20e alig kisebb, mint a Vénusz, 0,87 földátmérő a mérete, míg a Kepler-20f valamivel nagyobb a Földnél, 1,03 földátmérőjű. A Kepler-20e 6,1 földi nap alatt, a Kepler-20f pedig 19,6 földi nap alatt kerüli meg a központi csillagot. A Kepler-20f felszínén 430 °C a hőmérséklet, a Kepler-20e-n pedig több mint 760 °C.

A Kepler-20 rendszerében három másik bolygó is található, amelyek nagyobbak a Földnél, de a Neptunusznál kisebbek. A Kepler-20b a legközelebbi bolygó, a Kepler-20c a harmadik, a Kepler-20d pedig az ötödik a sorban. Keringési idejük 3,7, 10,9 és 77,6 nap. A mi Naprendszerünkkel összehasonlítva mind az öt bolygó a Merkúr pályáján belül kering, vagyis ez egy dinamikailag teletített bolygórendszer (a hosszú távú stabilitás elvesztése nélkül nem lehet több bolygót behelyezni, vagy a megélőket közelebb vinni egy-



1. ábra. Fantáziakép a Kepler-20e és Kepler-20f arányairól a Föld és a Vénusz mellett (forrás: NASA/Ames/JPL-Caltech).

máshoz). A központi csillag csak kicsivel kisebb és hűvösebb, mint a Nap. Míg a Naprendszerben a kőzetbolygók a Naphoz közelebb keringenek, a nagyobb gázóriások pedig távolabb, addig a Kepler-20 bolygókonfigurációja a következő: nagy, kicsi, nagy, kicsi, nagy, ami minden bizonnyal sok fejtorést okoz még a bolygókeletkezési elméletekkel foglalkozó szakembereknek.

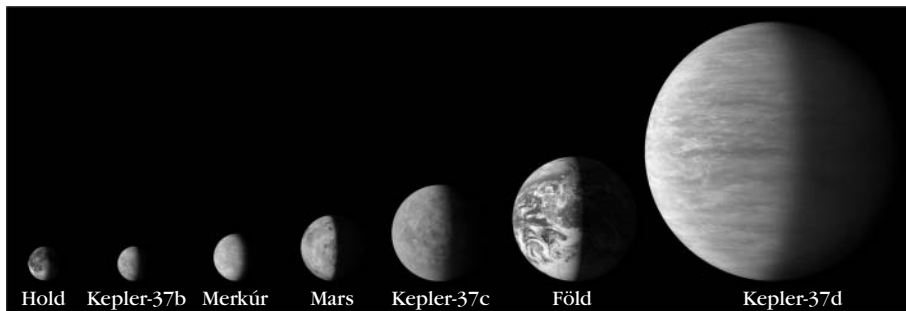
A Keplerrel tehát immár rutinszerűen fedezhetünk fel akár Földnél kisebb fedési bolygókat is. Nem zárható ki az sem, hogy a Kepler-20 rendszerben a csillagtól távolabb is keringenek bolygók, amelyeket – ha fednek – a Kepler-szonda mérési programjának 4-5 éves várható meghosszabbításával meg lehet figyelni. Hosszabb távon ugyancsak remélhető a csillaguktól távolabb keringő, nagyobb tömegű bolygók gravitációs perturbáló hatásának kimutatása.

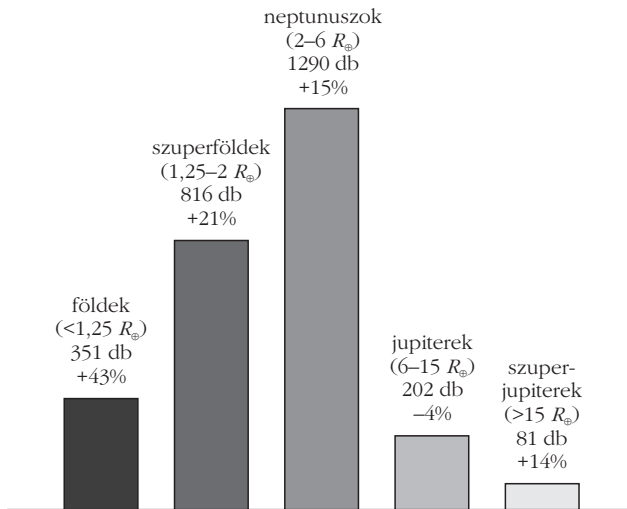
A Föld trónfosztása

A Kepler fontos célja – mint említettük – a Föld-méretű planéták megtalálása, de egy friss eredmény még a Kepler-20e megtalálásán is túltesz: a Kepler-adatokban olyan kisméretű bolygórendszert azonosítottak, amelynek legkisebb planétája kisebb a Merkúr bolygónál! A rendszer a Lyra (Lant) csillagképben található, távolsága körülbelül 210 fényév (2. ábra).

A Kepler-37 a Napnál valamivel kisebb méretű és hűvösebb csillag. Rendszerében három bolygót sikerült detektálni, mindegyik közelebb kering hozzá, mint a Merkúr-Nap távolság. A Kepler-37b nevű, a csillagához legközelebb keringő bolygó alig nagyobb

2. ábra. A Naprendszer és a Kepler-37 égitestjeinek méretarányos összehasonlítása. A Kepler-37b alig valamivel nagyobb a Holdnál, átmérője a Földének egyharmada. A Kepler-37c kicsit kisebb a Vénusznál, mérete a Földének háromnegyede, míg a legnagyobb, a Kepler-37d jelű kétszer akkora, mint a Föld (forrás: NASA/Ames/JPL-Caltech).



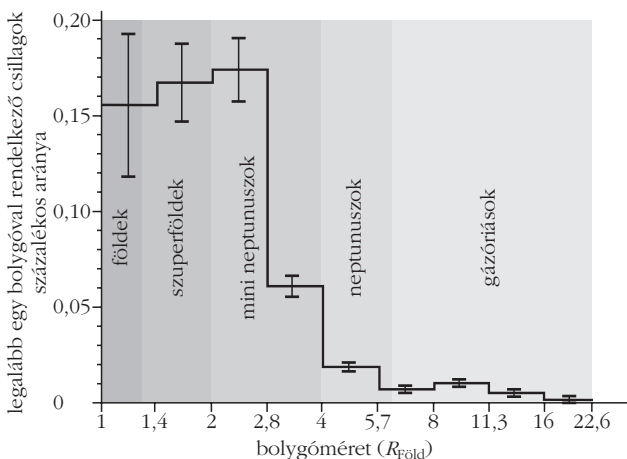


3. ábra. A Kepler-bolygók méreteloszlása. A növekmények a nemrég bejelentett 461 új jelölt hozzájárulásából származnak (forrás: NASA/Kepler).

a Holdnál, de kisebb, mint a Merkúr, így jelenleg az abszolút rekorder a méretversenyben. Tizenhárom nap alatt kerüli meg a csillagot, míg a c és d jelű planeták 21 és 40 nap alatt. Az előbbi valamivel kisebb, mint a Vénusz, míg az utóbbi átmérője a Földének kétszerese. A kicsiny Kepler-37b valószínűleg nem csak méretében hasonlít a Merkúrhoz: egy légkör nélküli, mintegy 500 °C felszíni hőmérsékletű kőzetbolygót kell elképzelnünk.

A kisméretű bolygók felfedezését a Kepler ultrapontos fotometriai adatsorai tették lehetővé, de mint-hogy a fedések mélységéből csak a bolygó és csillag méretarányára következtethetünk, a bolygó méretének meghatározásához a csillag átmérőjének ismerete is szükséges. Itt lép a képbe a csillagszeizmológia. A módszer lényege, hogy a belsejében terjedő akusztikus hullámok oszcillációra készítetik a csillagot, ami nagyon kis amplitúdójú, gyors fényváltozások formájában detektálható, feltéve, hogy a csillag elég fényes. Az eljárás hasonlít ahhoz, ahogyan a geofizikusok a Föld belső felépítését tanulmányozzák a földrengés-

4. ábra. A rövid (<85 nap) keringési idejű bolygófajták gyakorisága. A csillagok legalább 17%-ának van Föld méretű kísérője. Neptunusznál nagyobb közeli bolygók a csillagok néhány százaléka körül kering (forrás: F. Fressin és mtsai.).



hullámok segítségével. A csillagban megfigyelt egyedi rezgési módusok nemcsak a csillag szerkezetéről, de globális paramétereiről (tömeg, méret, kor) is egyedi lenyomatot hordoznak. Így meglepő, néhány százalékos pontosság érhető el a csillag méretének meghatározásában.

Ha a csillag nagyon aktív, akkor az általa produkált jelenségek (foltaktivitás, flarek stb.) okozta fényességváltozások elnyomhatják azokat a kicsiny ingadozásokat, amelyek alapján a méretére lehet következtetni. A Kepler kivételes pontosságának és a csillag inaktivitásának köszönhetően azonban a csillagunknál 25%-kal kisebb égitest átmérőjét 3% pontossággal sikerült megmérni, ami lehetővé tette, hogy bolygóinak méretét is hasonlóan kivételes pontossággal lehessen megadni. A Kepler-37 rendszer rávilágít arra, hogy a csillagokhoz nagyon közeli planeták kisebbek és sokkal nagyobbak is lehetnek, mint a Naprendszer bolygói, másrészt azt vetíti előre, hogy a bolygó méret csökkenésével az előfordulás várhatóan növekedni fog.

Százmilliárd bolygó

Ez a várakozás nem is bizonyult hiábavalónak. A 150 ezer csillag fényességében bolygóáthaladások nyomaira vadászó űrteleszkóp 22 hónap alatt gyűjtött adatmennyiségének átvizsgálása nyomán 2013 elején 461 új bolygójelöltet jelentettek be. Ezzel 2740-re emelkedett a Kepler felfedezéseinek száma. Ezek közül eddig száztizennégyet sikerült megerősíteni rádiális sebesség-méréssel vagy a többszörös bolygórendszerek planetáinak egymásra gyakorolt gravitációs hatásának kimutatásával. A legújabb kutatások azt mutatják, hogy Jupiter- és nagyobb méretű bolygókból viszonylag kevés van. Ezeket természetesen a legkönnyebb felfedezni. A kisebb méretű bolygók viszont jóval gyakoribbak; a Keplerrel a hosszabb periódusúak is kezdenek a látókörünkbe kerülni. Rádásul a detektálási algoritmusok érzékenységét is sikerült jelentős mértékben növelni. Ennek megfelelően a bejelentett többelhez elsősorban a Föld- és szuperföld (1,25-2,0 Föld-sugár) méretkategóriába eső égitestek járulnak hozzá. A mintában 365-ről 467-re emelkedett a több bolygót tartalmazó rendszerek száma (3. ábra).

François Fressin (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, USA) és kollégái a Kepler-mintán statisztikai számításokat végeztek. Azt vizsgálták, hogy milyen gyakori a bolygók jelenléte a különböző típusú csillagok körül. Ehhez háromféle effektust is figyelembe kellett venniük: (1) a legkisebb bolygókat nehezebb detektálni, erre korrigálni kell, (2) az esetlegesen nem bolygók, hanem más asztrofizikai konfigurációk okozta hamis jelek előfordulását újra megbecsülték, és mintegy 10%-ot kaptak, (3) a szerencsés geometriának köszönhetően tranzitot mutató bolygók alapján egyszerű megfontolásokkal megkapható a fedést nem okozó, tehát a Kepler számára észrevehetetlen bolygórendszerek száma is. Az eredmény megdöbbentő (4. ábra).

Eszerint minden hatodik csillagnak van 85 napos periódusnál (tehát a Merkúrnál) közelebb keringő, Föld-méretű bolygója. Galaxisunk 100 milliárd csillagból kiindulva mintegy 17 milliárd Föld-méretű bolygó lehet a Tejútrendszerben. Ne feledjük, hogy a hosszabb periódusú bolygók még hiányoznak a Kepler-planéták képzeletbeli fényképalbumából, tehát a bolygók valódi számát tekintve alsó becslésről van szó. Az is kiderült, hogy a korábbi feltételezésekkel ellentétben a kisméretű bolygók minden csillag körül gyakorta előfordulnak, és nem részesítik előnyben a kisebb csillagokat.

Ha a Kepler 400 napnál rövidebb keringési idejű planéta-jelöltjeinek populációját tekintjük, az adódik, hogy a csillagok legalább 70%-ának van valamilyen bolygója, míg a Naphoz hasonló csillagok szinte mindegyike körül kering egy vagy több bolygókísérő. Úgy tűnik tehát, hogy a bolygó nélküli csillagok számitanak kivételnek.

Lakható bolygók?

Föld-méretű és kisebb bolygókat tehát már találtunk. Vannak-e a Földhöz hasonló bolygók a lakhatósági zónákban is? A Kepler bolygójelöltjei közül 10 Föld-méretű keringhet ebben a tartományban, ami azt jelenti, hogy folyékony víz lehet a felszínén. (Ez persze csak durva közelítés, nem veszi figyelembe a légkör, az esetleges üvegházhatású gázok, óceánok jelenlétét, nem is szólva az élet alkalmazkodási képességéről és az olyan életformák élettérigényeiről, amelyekre ma nem is gondolunk, és akkor még nem is említettük az óriásbolygók körül keringő – mindmáig ki nem mutatott – holdakat, amelyek szintén hordozhatnak életet.) A szóba jövő planéták közül az egyik legérdekesebb a Kepler-22b nevű, amelynek átmérője mindössze 2,4-szerese a Földének, tömege azonban nem ismert pontosan, így egyelőre nem tudjuk, hogy összetétele a kőzetbolygókhoz vagy inkább a gázóriásokhoz hasonlít-e, esetleg az elméletileg megjósolt, egzotikus vízbolygók családjába tartozik. Távolsága mintegy 600 fényév. Központi csillagát – amely a Napunknál kicsit kisebb és hűvösebb – 289 nap alatt járja körbe (5. ábra). Egy bolygójelölt felfedezéséhez legalább három tranzit kimutatása szükséges. A kutatóknak nagy szerencséjük volt a Kepler-22b-vel, hiszen az első tranzitot mindössze három nappal a keresés megkezdése után észlelték 2009-ben, a harmadikat pedig 2010 végén, mindössze néhány nappal egy kéthetes kényszerű technikai szünetet megelőzően, vagyis csak a véletlenül múlt, hogy a bolygót egyáltalán felfedezték.

Egy másik figyelemre méltó jelölt a KOI-172.02 nevű objektum (KOI: Kepler Object of Interest), ami egy Nap-szerű csillag körül kering. Ha bebizonyosodik, hogy tényleg bolygóról van szó, akkor ez lesz a Földünkre mindaddig legjobban hasonlító planéta: átmérője másfélszerese a Földének, és a Nap-Föld távolság háromnegyedére kering csillagától, 242 napos pályán. Megjegyezzük, hogy a rendszer tagja még

egy a központi csillagot 14 nap alatt megkerülő, 2,2-szeres Föld-sugarú szuperföld is.

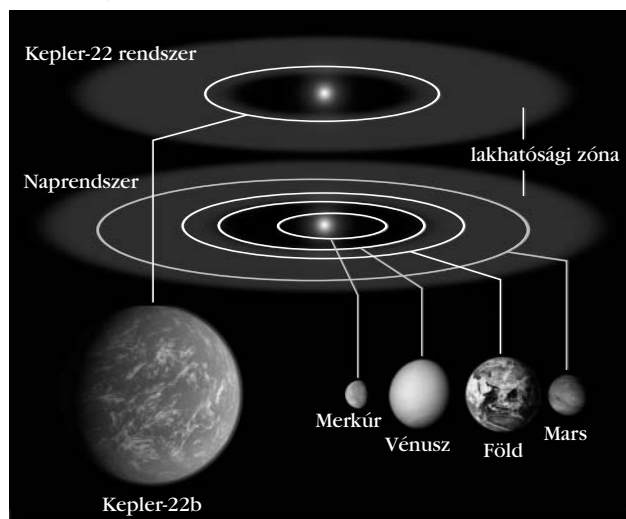
Összességében az űreszköz eredményei arra utalnak, hogy a Föld- és szuperföldméretű planéták gyakoriak galaxisunkban. Miután vannak Föld-méretű exobolygók, és találtunk planétát a lakhatósági tartományban is, valószínűleg hamarosan sikerül ötvözni a két tulajdonságot: az első lakható földek jelei talán már ott vannak a Kepler-bolygókat vizsgáló kutatócsoport számítógépeinek merevlemezein.

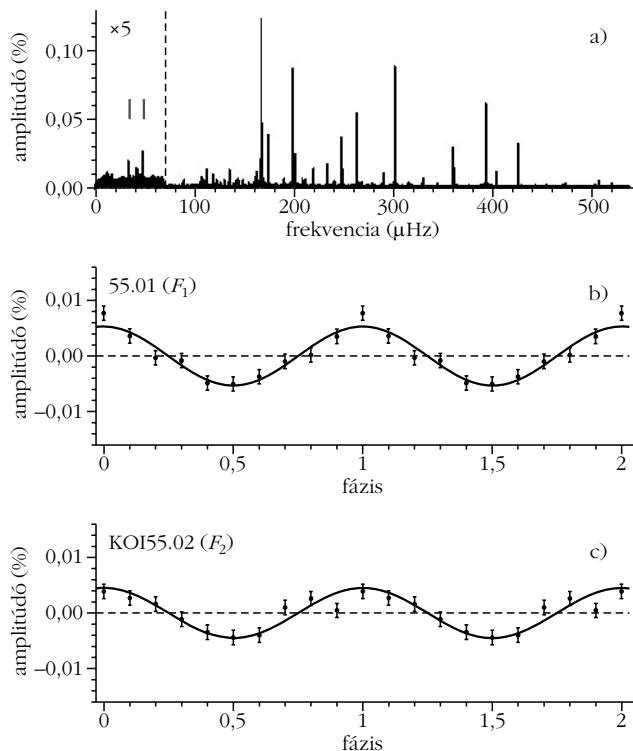
Pillantás a Naprendszer távoli jövőjébe

A csillagától kellemes távolságra keringő bolygók mellett újabb izgalmas bolygórendszer felfedezéséről adtak hírt a NASA Kepler-űrtávcsövével dolgozó csillagászok. A Földnél is kisebb két felfedezett bolygó egy egykori vörös óriáscsillag maradványa körül kering, Naprendszerünk jövőjébe engedve bepillantást. A Kepler által eddig talált fedési exobolygókkal ellentétben ezek létezését nem a csillaguk előtti elhaladásuk árulta el, hanem a róluk visszavert fény, ami a rendszer összfényességében szinte elképzelhetetlenül kicsiny, alig néhány milliomodrésnyi változást okoz. Ma egyedül a Kepler képes ezt a parányi modulációt kimutatni az optikai hullámhossztartományban. Az új bolygók egy vörös óriás fázison átesett csillag maradványa körül keringenek, és a KOI 55.01 és KOI 55.02 nevet kapták.

A halvány KIC 05807616 (KPD 1943+4058 vagy KOI 55) jelű csillag a Naphoz hasonló, idősebb csillag vörös óriás fázison is átesett forró maradványa, úgynevezett B szubtörpe. Felszíni hőmérséklete 28000 °C, fél Nap-tömegű, mérete mindössze egyötöde a Napénak. Ezek a csillagok gazdag pulzációs viselkedést mutatnak, ezért az objektumot a csillagszeizmológia szakértői vették alaposan górcső alá. Az elképzelés az volt, hogy a csillag rezgéseinek megfigyelésével a ku-

5. ábra. A Kepler-22 és a Naprendszer belső bolygóinak, valamint azok pályáinak méretarányos ábrázolása, a szürke gyűrű a lakhatósági zónát jelöli.





6. ábra. A KIC 05807616 fényességváltozásának frekvenciaspektruma. A két független szakasz (balra) a két bolygóra utaló frekvenciát jelöli. Közük sokkal gyengébben, egy hipotetikus 6,5 óra keringésű harmadik bolygóra utaló változás is látszik, ezt azonban a jelenleg rendelkezésre álló adatok alapján nem sikerült minden kétséget kizáróan igazolni. b–c) A KOI 55.01 és KOI 55.02 okozta fényességváltozás a keringésük időegységében ábrázolva. Figyeljük meg a mindössze néhány százvezredrésnyi változást (forrás: S. Charpinet és mtsai.)!

tatók pontosíthatják ezen csillagok szerkezetére és fejlődésére vonatkozó ismereteinket. Az eredeti cél mellett azonban megfigyelték, hogy a KIC 05807616 csillag 5,8 és 8,2 órás periódusokkal állandó és szabályos fényesedést-halványodást produkál (6. ábra).

Minden más eshetőség kizárásával egyetlen magyarázatként a bolygókísérők jelenléte kínálkozott. A két égitest nagyon közel, 750 ezer, illetve 1 millió km-re kering a csillagmaradványtól. Keringésük kötött, vagyis mindig azonos oldalukat fordítják a csillag felé. A Földről (pontosabban a Nap körül keringő Keplerről) nézve azonban kimutatható a megvilágított nappali oldal hozzájárulásának változása az összfényességhez. A számítások azt mutatták, hogy a két bolygó átmérője 0,76 és 0,87 Föld-átmérőnek felel meg, és minden bizonnyal kőzetbolygókról van szó. Felszínükön azonban kibírhatatlan, közel 8-9000 °C hőmérséklet uralkodik. A rendszer távolsága több mint 3800 fényév.

A különlegességek azonban itt nem érnek véget: a legérdekesebb az, hogy a csillag kiterjedt, vörös óriás állapotában a bolygók a csillag légkörén belül keringtek! Ez az állapot mintegy 18 millió évvel ezelőtt ért véget. Valószínű, hogy a planéták jóval távolabb, nagyobb méretű gázbolygóként kezdték pályafutásukat, majd beljebb sodródtak a csillag légkörével történt kölcsönhatás következtében. Amit most látunk, az a külső

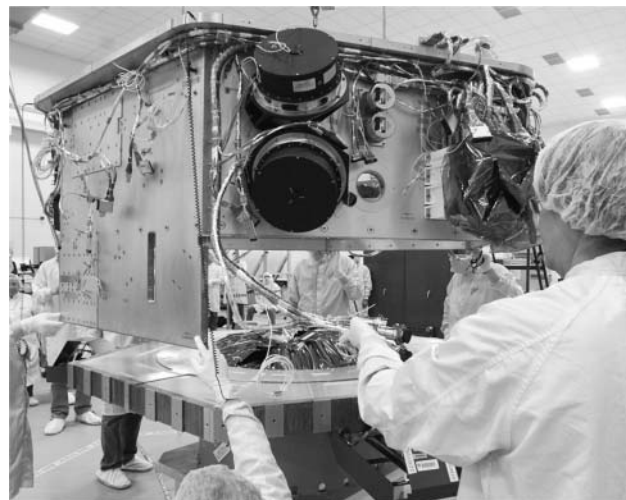
burkuk elpárolgása után előbukkant, lecsupaszított maradványuk, a gázbolygók mélyén szinte minden esetben megbújó kőzetmag. Ha ez igaz, akkor nem csak a planéták sýnylették meg a találkozást: a két bolygó a csillag burkának eltávolításában is hatékonyan segédkezett gravitációs hatásuk révén. A legtöbb B szubtörpe szoros kettőscsillag, és a csillagászok a csillagkísérőket okolták a felfúvódó csillagok tömege jelentős részének elszippantásáért. Azonban a KIC 05807616 esete azt mutatja, hogy a csillag közelébe jutó bolygók éppoly hatékony katalizátorok lehetnek a tömegvesztésben, mint a csillagok. Más elképzelések szerint a bolygók a vörös óriás fázist követően jöttek létre. Ha az előbbi forgatókönyv beigazolódik, akkor a felfedezés a bolygóknak a csillagok fejlődésére gyakorolt meglepően erős, közvetlen befolyását mutatja.

A különleges rendszer a Nap-Föld kapcsolatra nézve is új információval szolgál: mintegy 5 milliárd év múlva Napunk – fejlődése következtében – több százszorosára puffad, miközben bekebelezi a belső kőzetbolygókat, köztük valószínűleg a Földet is. Eddig azt gondoltuk, hogy ez a „kaland” a bolygók végétét jelenti. Most a „túlélő” KOI 55.01-02 bolygópáros példája nyomán újra kell gondolnunk ezt az elképzelést is. A Nap azonban kissé másképp fejlődik majd, nem utolsósorban azért, mert Naprendszerünkben a bolygók kis tömege nem befolyásolja a Nap tömegvesztését. Az eredmény szép példája annak, hogy milyen szoros kétirányú kapcsolat lehet egy csillag és bolygókísérői között, de arra is rávilágít, hogy a bolygók és a csillagok jobb megismerése csak egyszerre lehetséges, és ez a szimbiózis gyümölcsözően hat mindkét területre.



A Kepler eredetileg tervezett 3,5 éves működése 2012 novemberéig tartott. A hosszabbítás további négy évnnyi működés anyagi fedezetét tartalmazza. A távcső működése technikai szempontból többé-kevésbé zavartalan, a 42 digitális érzékelőből (CCD) eddig mindössze kettő vált használhatatlanná. A távcső pontos irányításához három giroszkóp szükséges (7. ábra).

7. ábra. A Kepler-űrtávcső összeszerelés közben, középen felül négy giroszkópjából kettő látható (forrás: NASA/Kepler).



A fedélzeten található négyből egy sajnos felmondta a szolgálatot 2012 nyarán, egy további pedig idén májusban hibásodott meg, így az űreszköz alkalmatlanná vált a nagy pontosságú fényességmérés folytatására. A NASA szakemberei többszöri kísérletet tesznek a hiba kijavítására, illetve alternatív megfigyelési stratégiák kidolgozása is folyamatban van.

A Kepler már eddigi eredményeivel is beírta magát a következő generációk tankönyveibe. Reméljük, hogy ez a folyamat a technikai problémák megoldása

után folytatódhat, a közérdeklődésre számot tartó eredményekről pedig időről időre a *Fizikai Szemle* hasábjain is beszámolunk.

Irodalom

NASA Science News 2011.12.20.

NASA Kepler News 2013.02.20.

S. Charpinet, G. Fontaine, P. Brassard és mtsai., *Nature* 480 (2011) 496–499.

F. Fressin, G. Torres, D. Charbonneau és mtsai., *Astrophysical Journal* 766 (2013) 81.

HIDROGÉNTARTALMÚ AMORF SZILÍCIUM/GERMÁNÍUM MULTIRÉTEG STRUKTURÁLIS STABILITÁSA – II. RÉSZ

Serényi Miklós – MTA TTK MFA

Csík Attila – MTA Atomki, Debrecen

Írásunk első részében röntgendiffrakciós kísérleti eredményekre alapozva ismertettük, hogyan befolyásolja a hidrogén a Si és Ge vékonyrétegekben a különböző atomok diffúziós viselkedését. A továbbiakban a hidrogéntartalom, valamint a H-Si és a H-Ge kötési állapotok meghatározására irányult mikroszkópos, ionszórásos és infravörös spektroszkópiai vizsgálataink eredményeit mutatjuk be.

Mikroszkópos vizsgálatok

A minták egyik csoportját tekintve (400 °C, H₂ = 0,8 és 1,5 ml/perc) megállapítottuk, hogy a hőkezelések során a minta felületén csak csekély mértékben figyelhetünk meg buborékképződést; a diffúziós keveredés kinetikája lassabb a hidrogénmentes mintákhoz viszonyítva. Magasabb hőmérsékleten történő hőkezelés hatására a multiréteg hidrogéntartalma felszabadul, felülete felhólyagosodik (mint a piskótatészta), a leválasztott réteg tönkremegy.

A növesztés, majd az azt követő hőkezelés paramétereit illetően határvonalat szükséges húznunk: a maximum 1,5 ml/perc hidrogéntartalmú plazmával katódporlasztott multirétegek 400 °C-ig hőkezelhetők úgy, hogy a szerkezet megőrzi termikus stabilitását. Azokon a mintákon, ahol a felület felhólyagosodása figyelhető meg, a diffrakciós vizsgálatokból kvalitatív következtetést nem tudunk levonni. Célszerűnek látszik a felület morfológiai változását (buborék-, illetve kráterképződés) AFM és TEM segítségével megvizsgálni.

Példaként néhány hőkezelt a-Si/Ge:H multiréteg 50×50 μm² felületéről készült AFM felvételt a 6. ábrán láthatunk.

Az AFM felvételek készítésére használt berendezés lehetővé tette a felvételeken látható jellegzetes alakzatok méreteinek statisztikus kiértékelését. Azt a megállapításunkat, hogy a felületi elváltozások – buborékok, kráterek – mértéke arányos a porlasztáshoz használt gázkeverékbe történő H₂ áramlás sebességével, a 7. ábrával illusztrálhatjuk. A 400 °C feletti hőmérsékleten hőkezelt minták degradált felülete a teljes felület több mint felét teszi ki, ha a H₂ beáramlás sebessége 6 ml/perc, azaz a plazma hidrogéntartalma meghaladja a 6%-ot. A jelentős mennyiségű hidrogén ellenére éles, sima határátmenetekkel rendelkező szerkezet növeszthető szobahőmérsékleti körülmények között. A nagy mennyiségű hidrogént tartalmazó rétegek AFM vizsgálata egy érdekes eredménnyel is szolgált: a felületi elváltozások – buborékok, kráterek – egységnyi területre eső száma (sűrűsége) független a hidrogén mennyiségétől, értéke 6–8·10⁵ cm⁻².

Érdeemes bemutatni a buborékok és egy kráter AFM szoftvere által analizált képét. A 8. ábra a 450 °C-on,

6. ábra. A hőkezelt multirétegekről készült AFM felvétel különböző hidrogén beáramlási sebesség, valamint hőkezelési hőmérséklet mellett: a) H₂ = 0,8 ml/perc és 350 °C; b) H₂ = 1,5 ml/perc és 400 °C; c) H₂ = 6 ml/perc és 450 °C. Az AFM felvételeken a felületi érdességet jellemző négyzetes középérték, az RMS van feltüntetve.

