

nál nehezebb holdak létezését sem. Az Európai Űrügynökség tervezett új űrobzervatóriuma, a PLATO teljesítménye már elegendő lehet egy 0,4 Föld-méretű exohold kimutatására is – ebbe a mérettartományba pedig már beleesik a Naprendszer 2-3 legnagyobb holdja! Ha a projekt zöld utat kap, minden bizonnyal ki fogja deríteni, hogy mi újság más naprendszerek bolygói körül – főleg a forró jupiterek és forró szuperföldek kísérőire remélhető megbízható statisztika. A tervezett űrtávcsöves programban egyébként jelen cikk első szerzője vezeti az exohold-programot.

Irodalom

1. Szatmáry Károly: Exobolygók. *Magyar Tudomány* (2006/8) 968–979.
2. Szatmáry Károly: Mindentudás az iskolában – Bolygók mindenütt. *Fizikai Szemle* 57/12 (2007) 443.
3. Szabó Róbert: Bolygóaradat és asztroszeizmológia – Elindult a Kepler-űrtávcső. *Fizikai Szemle* 59/4 (2009) 121.
4. Futó Péter: A Kepler-forradalom. *Fizikai Szemle* 61/3 (2011) 87.
5. Szabó M. Gyula, Kiss L. László: A Short-period Censor of Sub-Jupiter Mass Exoplanets with Low Density. *Astrophysical Journal Letters* 727 (2011) 44.
6. Winn, Joshua N., Fabrycky, Daniel, Albrecht, Simon, Johnson, John Asher: Hot Stars with Hot Jupiters Have High Obliquities. *Astrophysical Journal* 718 (2010) 145.
7. Barnes, J. W.: Transit Lightcurves of Extrasolar Planets Orbiting Rapidly Rotating Stars. *Astrophys. J.* 705 (2009) 683.
8. Különleges csillagrendszert fedeztek fel magyar csillagászok. *Fizikai Szemle* 61/5 (2011) 180.
9. Szabó M. Gyula, Szabó Róbert, Benkő József, Holger Lehmann, Mező György, Simon Attila, Kővári Zsolt, Hodosán Gabriella, Regály Zsolt, Kiss L. László: Asymmetric transit curves as indication of orbital obliquity: clues from the late-type dwarf companion in KOI-13. *Astrophysical Journal Letters* 736 (2011) L4.
10. Williams, D. M., Knacke, R. F.: Looking for Planetary Moons in the Spectra of Distant Jupiters. *Astrobiology* 4 (2004) 400.
11. Simon Attila, Szatmáry Károly, Szabó M. Gyula: Determination of the size, mass, and density of “exomoons” from photometric transit timing variations. *Astronomy and Astrophysics* 470 (2007) 727.
12. Kipping, D. M., Fossey, S. J., Campanella, G.: On the detectability of habitable exomoons with Kepler-class photometry. *Monthly Notices of the Royal Astron. Soc.* 400 (2009) 398.

ASZTROSZEIZMOLÓGIA ÉS CSILLAGKAVALKÁD A KEPLER-ŰRTÁVCSŐ OPTIKÁJÁN KERESZTÜL

Szabó Róbert, Derekas Aliz

MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézet, Budapest

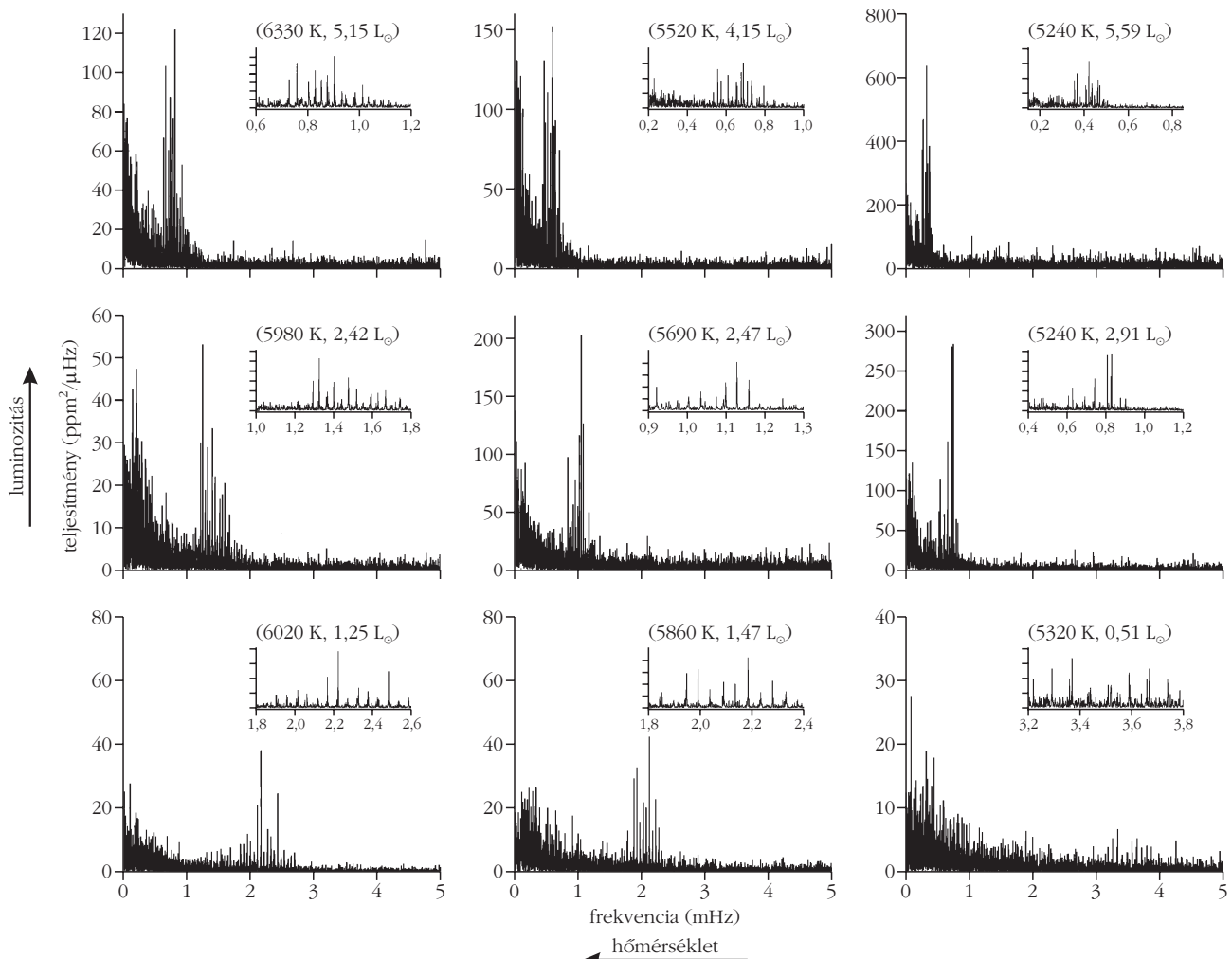
A Kepler-űrtávcső fő célja más csillagok körül található, Földhöz hasonló bolygók, valamint bolygórendszerek felfedezése [1]. Az űrtávcső immáron több mint két éve gyűjt fotometriai adatokat az ég egy bizonyos, 105 négyzetfokos területéről (a teljes égbolt körülbelül 40 000 négyzetfok), mintegy 160 000 csillagot monitorozva folyamatosan. Több mint 1200 bolygójelölt bejelentésével – amelyek meglepően nagy része több bolygót tartalmazó (nap)rendszerben található –, a Neptunusz és szuper-Föld méretű bolygók magas gyakoriságának megállapításával, a lakhatósági zónában keringő bolygók felfedezésével a Kepler alig két év alatt teljesen átformálta az exobolygókról szerzett ismereteinket. Azonban az utóbbi időben nemcsak a számos különleges exobolygó-felfedezés kötődik az űrtávcső nevéhez, hanem az asztrofizika egyéb területein is születtek jelentős áttörések. Ez nem meglepő, ha felidézünk, hogy a Kepler bolygókeresési stratégiája az úgynevezett tranzitmódszeren alapul, amely a távoli csillagok körül keringő bolygók csillaguk korongja előtti áthaladása által létrehozott fényességcsökkenés detektálását jelenti. (Fontos megjegyezni, hogy a csillag korongja a Keplerrel is felbonthatatlan,

a bolygó maga pedig láthatatlan, mindössze a fényesség csökkenése mérhető.) Minthogy a Nap körül keringő Kepler 2–3 nagyságrenddel pontosabb fényességmérést tesz lehetővé a földi műszerekhez képest, ráadásul szinte folyamatosan figyel nagyszámú csillagot, ami a Földről vagy Föld körüli pályáról csak korlátozottan valósítható meg, ezért szinte törvényszerű volt, hogy magukról a csillagokról szerzett tudásunkat is forradalmasítsa a NASA űreszköze. Ennek alapja az, hogy a legtöbb csillag különféle fényváltozásokat mutat, amelyek az esetek többségében a csillag szerkezetéről, a benne végbemenő folyamatokról (pulzáció, oszcilláció), gravitációsan kötött kísérőjéről (fedési kettősök), esetleg forgásáról, aktivitásáról, csillag körüli anyagról stb. hordoznak információt. A legfrissebb, csillagok fizikájával kapcsolatos eredményekből szemezgetünk, külön kitérve a magyar vonatkozású felfedezésekre.

Csillagrezgések bővületében

A csillagok rezgésével foglalkozó asztroszeizmológia segítségével bepillantást nyerhetünk a csillagok belső szerkezetébe is. Az első ismert pulzáló csillagok, a cefeidák rezgése meglehetősen egyszerű módja a pulzációnak, a csillag periodikusan kitágul és összehúzódik. A folyamatos rezgést az úgynevezett kappamechanizmus tartja fenn, amely a csillag bizonyos réte-

Szabó Róbertet a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj, Derekas Alizt a Magyary Zoltán Posztdoktori ösztöndíj, a KIK-csoport munkáját az MTA Lendület programja, az OTKA K83790 és MB08C 81013 számú pályázatai, valamint az Európai Közösség 7-es Keretprogramjának (FP7/2007–2013) 269194. számú szerződése támogatta.



1. ábra. Kilenc csillag oszcillációjának frekvenciaspektruma. Az oszcillációs frekvenciák Gauss-eloszlást mutatnak v_{\max} (belső kis ábrák) körül. A csillagokat fényesség és hőmérséklet szerint rendezve jól látható, hogy a kisebb luminozitású csillagok oszcillációja gyengébb, mint a nagyobb luminozitású társaiké.

geiben végbemenő ionizációval és az anyag ezzel járó opacitás-változásával (a sugárzás szempontjából vett átlátszóság-változással) kapcsolatos. Az elmúlt évtizedekben másfajta pulzáló csillagokat is felfedeztek, amelyek több frekvenciával – több rezgési módban – rezegnek. Ahogy a műszerezettség egyre jobb lett és egyre pontosabb méréseket tudtak végrehajtani, úgy nőtt a megfigyelhető, egyszerre gerjesztett módusok száma. Ez utóbbiban Napunk viszi el a pálmát: benne több mint egymillió oszcillációs módus együttes gerjesztettsége mutatható ki [2]. Az ezek által okozott fényességváltozás nagyon csekély, csak érzékeny műszerekkel mutatható ki. E rezgéseket egészen más mechanizmus váltja ki, mint a cefeidák esetében: a Nap felszíne alatti konvektív zónában levő anyag folyamatos mozgása berezgeti a csillagot, ami a saját módusaiban kezd el rezegni. Ezek a rezgések nem hosszú életűek, gerjesztés nélkül hamar lecsillapodnának, de a konvekció egyfolytában életben tartja őket. A más csillagokban előforduló ilyenfajta rezgéseket Nap típusú (szoláris) oszcillációnak hívjuk. Ezek a csillagok számos módban rezegnek, amelyek széles frekvenciatartományban oszlanak szét, de a rezgés-

seks amplitúdója meglehetősen kicsi. Minden egyes rezgési módus a csillag belső szerkezetéről szolgáltat információt, hasonlóan ahhoz, ahogy a Földön haladó szeizmikus hullámok a Föld belső szerkezetébe engednek betekintést. Mivel a különböző módusok a csillag más és más rétegeibe hatolnak be, ezért minél több módot sikerül kimutatni, annál pontosabban meg lehet határozni az adott csillag felépítését. Szerecsére a csillagok széles csoportjánál várhatók ilyen rezgések, ezek azok, amelyek felszínén vagy ahhoz közel konvekciós réteg található. 2011 tavaszán négy cikk is megjelent a tekintélyes *Science* és *Nature* folyóiratokban, amelyek a Keplerrel végzett megfigyeléseken alapulnak, és ezen csillagrezgések tanulmányozásában nyújtanak nagy előrelépést [3].

Ötszáz tagú csillagzenekar

William Chaplin és munkatársai [4] ilyen rezgéseket használtak fel arra, hogy 500, Naphoz hasonló, de különböző korú csillag sugarának és tömegének eloszlását tanulmányozzák. A konvektív réteg keltette

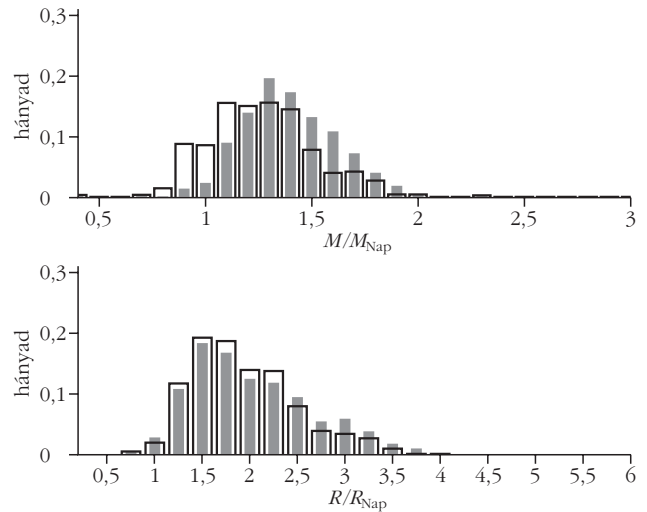
rezgések periódusa tipikusan néhány perc, amplitúdójuk pedig mindössze néhány milliód rész (ppm – part per million). Korábban mindössze 25 hasonló csillag esetében voltak tanulmányozhatók ezek az oszcillációk.

Amint az 1. ábrán látható, a Nap típusú oszcillációk gazdag, szabályosnak tűnő, fésűszerű eloszlást mutatnak. Az ábrán látható *frekvenciák* (amelyek egyes rezgési módusok felhangjainak felelnek meg) *közötti jellemző távolság* (az úgynevezett nagy szeparáció) a csillag átlagos sűrűségének négyzetgyökével arányos. A rezgések amplitúdója nagyjából Gauss-eloszlást követ. A *maximális amplitúdóhoz tartozó frekvencia* $g T_{\text{eff}}^{-1/2}$ -nel arányos, ahol $g \sim M/R^2$ a csillag felszíni gravitációs gyorsulása, T_{eff} pedig a csillag effektív hőmérséklete. A csillagok hőmérsékletét földi többszín-fotometriai mérésekből megállapítva a Keplerrel mérhető két mennyiség lehetővé tette a csillagok tömegének és sugarának meghatározását csillagfejlődési modellektől függetlenül.

A sugarak eloszlása az elméleti számításoknak megfelelő eloszlást mutatta, a tömegeloszlás viszont meglepetést okozott. A megfigyelt eloszlás szélesebb és maximuma eltolódott a kisebb tömegű csillagok felé a várt eloszláshoz képest (2. ábra). Ez utóbbi a Kepler által megfigyelt csillagmező csillagaira jellemző paraméterek eloszlását modellező, a csillagfejlődést is figyelembe vevő szimulációján (szaknyelven populációsintézésen) alapszik. Amennyiben az eloszlás nagyobb mintára is hasonló, akkor át kell gondolnunk a születő csillagok tömegeloszlására és keletkezési ütemére vonatkozó elképzeléseinket, valamint a tömeg-sugar relációkat is újra kell kalibrálni. Ezenkívül a konvekció leírásának pontatlansága és a mintában rejtőzködő kettőscsillagok is hozzájárulhatnak a megfigyelt különbséghez – bár valószínűleg kisebb mértékben.

Pillantás a vörös óriások belsejébe

Beck és munkatársai [5] szintén a Nap típusú oszcillációkat használták fel, amikor a KIC 6928997 jelű vörös óriás csillagban mutatták ki a g-módusú rezgések perióduskülönbségeit 320 napnyi Kepler-megfigyelés alapján. A g-módusú rezgések nevüket az őket fenntartó erőről, a gravitációról kapták, szemben a p-módusú rezgésekkel, melyekben a nyomásé (pressure) a fő szerep. A legtöbb Nap típusú oszcilláció p-módusú, ezek többnyire a csillag felsőbb részein haladnak, és nem jutnak el mélyen a magba. A g-módusú rezgések azonban keresztülhaladnak a vörös óriáscsillag magján, így olyan információkat hordoznak magukkal a csillag kémiai összetételéről, sugarirányú sűrűségeloszlásáról és impulzusmomentumáról, amelyekről semmilyen más technikával nem szerezhetünk információt. A Kepler-űrtávcső segítségével ráadásul olyan kevert módusokat sikerült megfigyelni, amelyek a csillag külső tartományaiban p-módusú, a magban pedig g-módusú rezgésekként viselkednek. Ezen módusok perióduskülönbségei az elméleti számítások szerint a mag és a

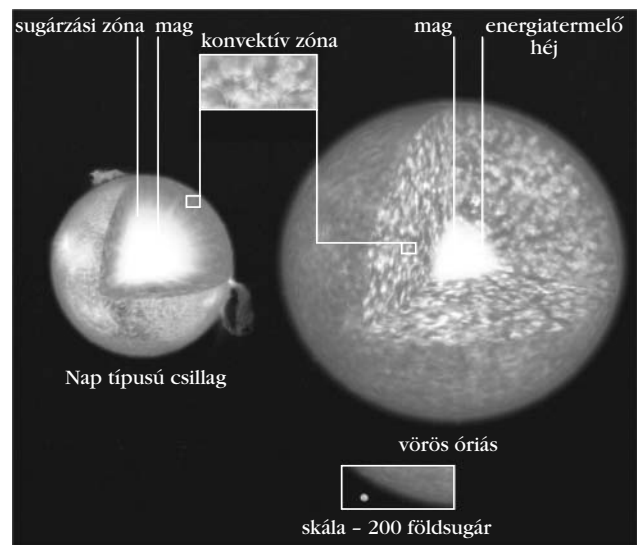


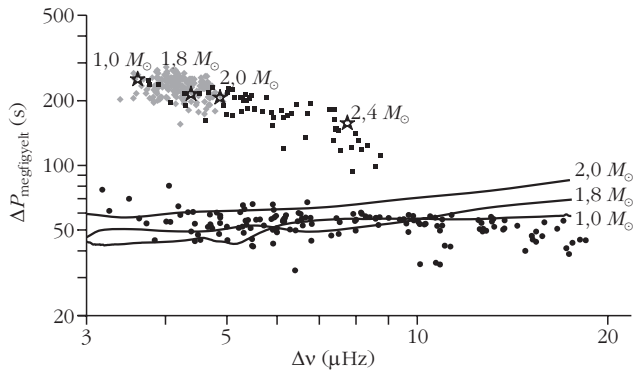
2. ábra. A fekete vonalak a Kepler-mintában vizsgált csillagok megfigyelt tömeg- (felső ábra) és sugáreloszlását (alsó ábra) mutatják, míg a szürkén sátozott eloszlások populációsintézési-modellezéssel készültek (és különböző megfigyelési effektusokra korrigáltak).

konvektív burok sűrűségkontrasztjára jellemzőek, így vizsgálatukkal sokkal jobban megérthetjük a vörös óriáscsillagok szerkezetét és fejlődését. A Kepler tehát elsőként engedett bepillantást a Nap távoli jövőjét megtestesítő csillag típus szerkezetébe (3. ábra).

A *Tim Bedding* vezette kutatócsoport ennél is tovább ment [6]. Szintén a vörös óriásokban megfigyelt kevert módusok felhasználásával egyértelműen sikerült elkülöníteniük a csillagfejlődés különböző fázisaiban levő objektumokat, amelyek a felszíni tulajdonságaikat tekintve egyébként nem térnek el egymástól. Miután egy Naphoz hasonló, fősorozati csillag belsejében kelőképpen lecsökken a hidrogén aránya, a fúziós energiatermelés áttevődik egy, a mag körüli héjba, miközben a csillag külső rétegei felfúvódnak, és a csillag vörös óriássá válik. A későbbi fejlődés során a hélium is begyullad a magban. E különbségnek azonban semmilyen kívülről megfigyelhető hatása nincs a csillag külső rétegeire, amelyek sok szempontból lecsatolódtak a

3. ábra. Egy Nap típusú csillag és egy vörös óriáscsillag szerkezete.





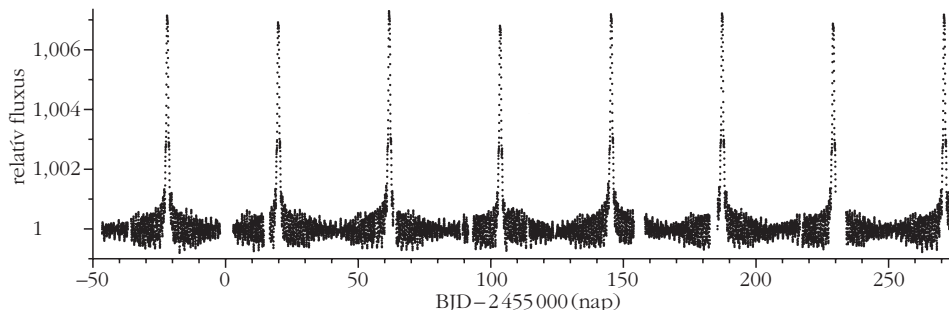
4. ábra. A kevert módusok perióduskülönbségei 400 csillagra. Az ábra egyértelműen mutatja a két elkülönülő populáció létét. A hidrogént héjban égető vörös óriások (fekete körök) és a magban héliumot égető vörös óriások (szürke gyémántok és fekete négyzetek, ez utóbbiaknál nem lehetett megbízhatóan kimérni a frekvenciakülönbséget) jól elkülönülnek. A fekete vonalak a héjbeli hidrogént-égető állapotra végzett modellszámítások eredményei.

magról, így eddig semmilyen megfigyelési információ nem volt a két eltérő fejlődési állapotú csillagcsoportról. Itt jön a képbe a Kepler és az asztroszeizmológia. Ahogy korábban említettük, ezek a g-módusok és a kevert módusok a csillag mélyebb rétegeiben lévő folyamatokról árulkodnak, így a kutatócsoport a vizsgált Kepler-fénygörbék elemzése során arra jutott, hogy – összhangban az elméleti számításokkal – a két csoport elkülöníthető a kevert módusok perióduskülönbségei alapján. A mag körüli héjban hidrogént égető csillagoknál ez a különbség nagyjából 50 másodpercnek, míg a magban héliumot égető vörös óriásoknál 100–300 másodpercnek adódott, tehát a két csoport egyértelműen elkülönült (4. ábra). Ezen eredmények segítségével lehetőség nyílik arra, hogy tanulmányozhassuk a különböző fejlődési szakaszokban levő vörös óriások arányát, és tesztelhesük a csillag- és galaxisfejlődésről alkotott modelljeinket.

Vad csillagtánc

A Kepler által megfigyelt legtöbb csillagról nagyon kevés információ állt rendelkezésre az űrmisszió előtt. Ilyen a tőlünk nagyjából 1000 fényévre fekvő HD 187091 jelű objektum is. Egy évszázadon keresztül annyit tudtunk róla, hogy mind tömege, mind mérete körülbelül kétszerese a Napénak. A Kepler azonban

5. ábra. A KOI-54 normált fényessége az idő (a Naprendszer tömegközéppontjára vonatkoztatott bariocentrikus Julian-napokban) függvényében.



¹ Ez az általános relativitás-elméleten alapuló jelenség jól ismert a csillagászatban, mikrolencsézésnek hívják. Az 1990-es években számos égboltfelmérés kereste a mikrolencsejelenségeket a Galaxisunkban előforduló sötét – csillagászati méretű – égitestek után kutatva.

² Az érdekes, például bolygójelöltet mutató csillagok (Kepler Object of Interest) kapnak ilyen sorszámat.

dramáian más képet festett róla mindössze néhány hét megfigyelés alapján. Szabályos időközönként (42 naponként) a csillag 1%-nyi mértékben felfényesedik, majd visszahalványodik, a közbenső időben pedig jóval kisebb amplitúdójú, de komplex fényváltozások jellemzik (5. ábra). William Welsh, a San Diego-i Egyetem vizsgálatot vezető professzora szerint az első hipotézis az volt, hogy egy rendkívül egzotikus égitesttel – egy fekete lyukkal – állunk szembe, ami periodikusan felerősíti a körülötte keringő csillagkísérő fényét.¹ Ekkor azonban röntgensugárzást is kellene detektálnunk a fekete lyuk környezetéből, amit a NASA Swift röntgenteleszkópjával sikerült kizárni.

A rejtélyt további spektroszkópai mérésekkel sikerült megoldani. Az időközben KOI-54 névre keresztelt csillagról² kiderült, hogy nem egy, hanem kettő, a Napnál kicsit nagyobb csillagot tartalmaz, amelyek nagyon elnyúlt elliptikus pályán keringenek egymás körül. Ennek eredményeként 42 naponként egészen közel viharzanak el egymás mellett, ami átmérőjük mindössze háromszorosát (120 millió km) jelenti. A felfényesedés azért következik be, mert a szoros megközelítés miatt a csillagok tojásdad alakúra formálódnak, miközben egymás felé forduló oldaluk jelentős mértékben felfűtődik. A legmeglepőbb azonban az a tény, hogy a felfényesedések alatt, illetve közben is az egyik (vagy mindkét) csillag olyan pulzációs frekvenciákat mutat, amelyek pontos többszörösei a keringési időnek, ami arra utal, hogy az ár-pály gerjesztette pulzációról van szó [7]. Ez a magyarázata tehát a fénymenetben megfigyelt oszcillációnak. Ezt a ritka jelenséget mindössze két másik alkalommal sikerült megfigyelni, de nem ilyen pontossággal és nem ilyen extrém pályaparaméterekkel bíró csillagpárosnál. A külső gerjesztés okozta pulzáció tálcán kínálja azt a lehetőséget, hogy a csillagok belsejét asztroszeizmológiai eszközökkel is vizsgáljuk, amire egyébként nem lenne módunk.

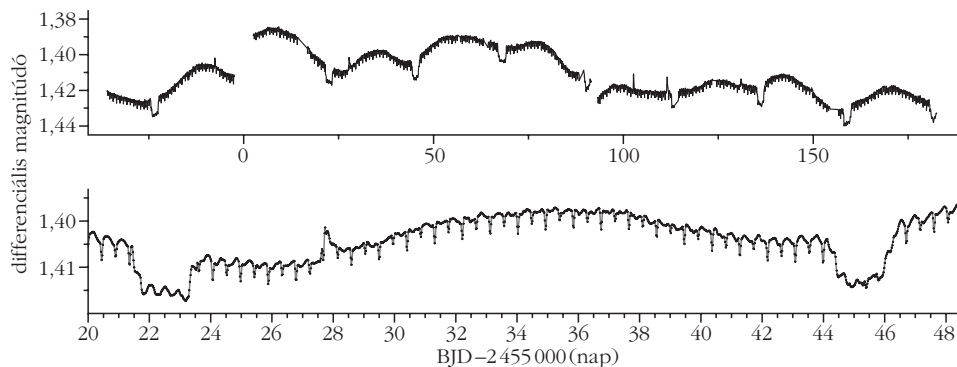
Magyar eredmények

Korábban már beszámoltunk a magyar vonatkozású eredményről, amelynek során *Derekas Aliz* (MTA KTM CsKI, korábban ELTE) és munkatársai egy egzotikus csillagrendszert fedeztek fel [8, 9]. A rendszer korábban szintén átlagosnak tűnt: mindössze két spektroszkópai

mérés létezett róla az irodalomban, ennek alapján a HD 181068 körül egy kísérőt is feltételeztek. A később Trinitynek elnevezett rendszer igazi arcát szintén a Kepler mutatta meg: eszerint három csillagból áll, egy vörös óriásból és két vörös törpéből. Különlegességüket a rendszer speciális geometriája adja: a közel egy síkban mozgó hármásra szerencsés módon olyan szögben látunk rá, hogy a vörös törpepár

45,5 naponta eltűnik a vörös óriás mögött, közben pedig kölcsönös fedéseket is mutat 0,9 napos periódussal (6. ábra). A felfedezés és az azt követő földi megerősítő (follow-up) mérések rámutatnak a csillagászat művelésének mai gyakorlatára, hiszen nagyon sok tudós és mérnök dolgozott a Kepler-űrtávcső tervezésén, megépítésén és az adatok feldolgozásán, majd magyar vezetéssel, de széles nemzetközi összefogással sikerült a rendszer konfigurációját meghatározni. Így például a vörös óriás főkomponens átmérőjét ausztrál kutatókkal együttműködve, amerikai távcsöveket használva, interferometriai mérésekkel közvetlenül sikerült megmérni, amelyről így kiderült, hogy 12-szer nagyobb Napunknál. Magyar műszereknek is jutott szerep a munkában, ugyanis nagy szögfelbontású felvételek születtek Pizskés-tetőn az 1 méteres RCC-távcsővel, amelyek kizárták optikai kísérők összeolvadó képét egészen a 0,5 ívmásodperces határig.

A csillag azonban még egy meglepetést tartogatott. Ha a KOI-54 esetében a keringés gerjesztette pulzációról beszéltünk, itt ennek éppen az ellenkezője történik. A CoRoT (európai fotometria űrszonda) és a Kepler méréseiből tudjuk, hogy a hozzá hasonló vörös óriáscsillagok mindegyike mutatja a Nap típusú oszcillációk jelenségét (több mint ezer csillag alapján), ezen csillag esetében azonban ennek semmi jelét nem sikerült kimutatni, azaz valamilyen mechanizmus elnyomja, de legalábbis lecsökkenti az amplitúdóját. Vannak viszont hosszabb periódusú fényváltozások, amelyeknek elgondolásunk szerint közülük lehet a vörös törpecsillag-pár keringéséhez, mivel ennek periódusa közel esik a talált rezgések periódusstartományához. A Nap típusú oszcilláció hiánya teljesen váratlan, a pontos mechanizmus megértése egyelőre várat magára. További vizsgálatokat folytatunk, és sikerült elérnünk, hogy a Kepler általánosan használt 30 perces mintavételét a Trinity esetében cserélje fel a fontos csillagokra és bolygórendszerek megfigyelésére fenntartott 1 perces mintavétellel, ami a fedések pontosabb megfigyelését és a rendszer pontosabb leírását eredményezi majd, de azt reméljük, hogy közelebb visz a Nap típusú oszcillációk rejtélyes hiányának megértéséhez is.



6. ábra. A HD 181068 Kepler-fénygörbéje az idő (a Naprendszer tömegközéppontjára vonatkoztatott baricentrikus Julian-napokban) függvényében. A felső panelen 218 napnyi mérés, míg az alsón 28 napnyi szegmens látható, amely két egymást követő hosszú periódusú, valamint a rövid periódusú fedések részleteit mutatja be.

A Kepler jövője

A sort még hosszan folytathatnánk az egyéb egzotikus csillag- (és bolygó-) rendszerekkel, befejezés-ként azonban csak kettőt említünk. A KIC 10195926 jelű, erős mágneses terű, A-típusú csillag olyan pulzációs módusokban rezeg, amelyek szimmetriatengelye nem esik egybe. Ráadásul torziós módusokat is mutat, amit úgy lehet legkönnyebben elképzelni, hogy hol a csillag északi, hol pedig a déli félgömbje forog gyorsabban [10]. A Kepler előtt egyik jelenséget sem sikerült megfigyelni. A másik a KOI-126, a Trinityhez hasonló, szintén hierarchikus hármass rendszer, ahol két kis tömegű (0,21 és 0,24 naptömegű) csillagból álló kettős kering egy nagyobb tömegű, főszorozati csillag körül. A keringési idők értéke 1,76 és 33,9 nap [11]. A rendszer fontossága abban rejlik, hogy az elméletek szerint mindkét kis tömegű csillag teljes mértékben konvektív, azaz bennük a Nap nagy részére jellemző sugárzási energiátanszport helyett a konvekció szállítja az energiát. Általában ezen (halvány) csillagok sugarát és tömegét csak nagy bizonytalansággal ismerjük. A fedési hármass rendszer elrendezése ebben az esetben viszont biztosítja, hogy e fontos csillagok alapvető paraméterei nagyon pontosan meghatározhatók.



Úgy hisszük, sikerült meggyőzően bemutatni, hogy a Kepler nemcsak a bolygók, de a csillagok vizsgálatában is forradalminak nevezhető áttörést produkált. A Kepler által felfedezett, figyelemre méltó bolygórendszerek, az exoplanéták megsokszorozott száma és nem utolsósorban a korábban soha nem látott furcsa és sokszor bizarr, magányos és többszörös csillagok minden bizonnyal oda fognak vezetni, hogy az eredetileg 3,5 évre tervezett programot még 2,5 évvel meghosszabbítják. Erről 2011 végén születik döntés. Ha valóban így lesz, akkor nemcsak a hosszabb keringési idejű (ezáltal nagyobb valószínűséggel lakható) bolygók lesznek felfedezhetők, hanem a fontos asztrofizikai mérföldköveknek tekinthető sztelláris objektumok felfedezése és vizsgálata is folytatódhat, és a magyar kutatókat is büszkeség

töltheti el, hogy hozzájárulhattak korunk egyik jelentős űrprogramjának sikeréhez.

A magyar Kepler-csoportról (KIK: Kepler Investigations at the Konkoly Observatory) annak honlapján <http://www.konkoly.hu/KIK/> található további bőséges információ.

Irodalom

1. Szabó Róbert: Bolygóáradat és asztroszeizmológia – Elindult a Kepler-űrtávcső. *Fizikai Szemle* 59/4 (2009) 121.
2. D. O. Gough, J. W. Leibacher, P. H. Scherrer, J. Toomre, *Science* 272 (1996) 1281.
3. M. H. Montgomery, *Science* 332 (2011) 180.

4. W. J. Chaplin, H. Kjeldsen, J. Christensen-Dalsgaard és mtsai, *Science* 332 (2011) 213.
5. P. G. Beck, T. R. Bedding, B. Mosser és mtsai, *Science* 332 (2011) 205.
6. T. R. Bedding, B. Mosser, D. Huber és mtsai, *Nature* 471 (2011) 608.
7. W. F. Welsh, J. A. Orosz, C. Aerts és mtsai, *Astrophysical Journal* (2011) beküldve, arXiv:1102.1730
8. A. Drekas, L. L. Kiss, T. Borkovits és mtsai, *Science* 332 (2011) 216.
9. *Fizikai Szemle* 61/5 (2011) 180.
10. D.W. Kurtz, M. S. Cunha, H. Saio és mtsai, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 414 (2011) 2550.
11. J. A. Carter, D. C. Fabrycky, D. Ragozzine és mtsai, *Science* 331 (2011) 562.

UTAZHATNAK-E ÉLŐLÉNYEK A BOLYGÓK KÖZÖTT?

Kereszturi Ákos

Collegium Budapest és Magyar Csillagászati Egyesület

Elméletileg nem kizárt, hogy élőlények a világűrbe is kijussanak, tetszhalott állapotban túléljék az ott uralkodó körülményeket, majd megfelelő viszonyok közé kerülve ismét életre keljenek. Ezeket a teóriákat pánspóra vagy pánspermia elméleteknek nevezik. Az elgondolás *Anaxagoraszt* követően, modern megközelítéssel elsőként *Berzelius* (1834), majd *Kelvin* (1871) és *Helmholtz* (1879) munkáiban olvasható. *Svante Arrhenius* 1903-ban közölt hasonló teóriát, ő meteoritok nélkül számolt azzal, hogy a baktériumok utazhatnak a világűrben.

Amikor egy élőlény egy kőzetdarabban utazik, a lehetőséget litopánspermiának nevezik. A fenti elméletek nem adnak magyarázatot az élet keletkezésére, eszerint az egyes égitestek egymást „fertőzik” meg az étellel. Mindehhez első lépésként egy élethordozó égitestet (például Föld) élőlények hagyják el, amelyek tetszhalott állapotba kerülnek. Ezt követően bizonyos ideig utaznak a világűrben, mozgásukat gravitációs és kis tömeg esetén sugárzási folyamatok erősen befolyásolják, majd véletlen folyamatok révén landolnak egy másik égitesten. Ha ott megfelelő körülmények közé kerülhetnek, ismét életképesekké válhatnak. Elkülöníthető Naprendszeren belüli és azon kívüli utazás.

Start egy bolygóról

Egy nagy becsapódás (1. táblázat) a felszínközeli kőzeteket úgy lövi ki, hogy bennük az ellenálló mikroorganizmusok kevéssé roncsolódnak, ha a start során fellépő nyomást és hőmérsékletet túléljük. Utóbbira egyrészt a jelenség gyors lezajlása miatt van lehetőség, de

Az alábbi írás az idén tavasszal megjelent *Asztrobiológia* című könyvből származó rövid fejezet. Célja, hogy példát mutasson a könyv témaköreiből és a tárgyalás szakmai mélységéről.

csak annál a testnél, amely a felszínhez közeli rétegben található, illetve nem a robbanás forró centrumában helyezkedik el.

A mélyebb rétegekben a kilökődés pillanatában nagy nyomás lép fel, amíg az anyag felgyorsul. Ellenben a felszínközeli réteg a kifelé haladó lökeshullámtól nem nyomódik össze ennyire, mivel felette nincs szilárd anyag, hanem kis nyomást átélve gyorsul a kritikus érték fölé (1. ábra).

A fenténél talán lassabb folyamat is juttathat apró élőlényeket a világűrbe. Ennek keretében a szelek 10–50 kilométeres magasságba szállítják az apró sejteteket. A viharfelhők szintje felett sok időt tölthetnek, miközben szaporodnak, illetve bizonyos mértékig alkalmazkodnak az ott uralkodó erősebb sugárzás-hoz, kisebb légnyomáshoz és alacsonyabb hőmérséklethez. Az apró testek a felületükön megtapadó töltések miatt a globális mágneses térrel kölcsönhatásba lépnek, ha pedig az ekkor ébredő erő meghaladhatja a gravitációs erőt, tovább emelkedhetnek. A magnetoszférában az ideális esetben töltéssel még mindig bíró testeket elsősorban az úgynevezett magnetoszférikus buborékok szállítják tovább. Utóbbiakban a mágneses tér olyan szerkezetet vesz fel, amelynek hatására a környező erővonalakkal kölcsönhatva

1. táblázat

Becsapódáskor kirepülő anyag jellemzői a Marsnál

becsapódó test átmérője (km)	keletkező kráter átmérője (km)	100 °C alatti hőmérsékleten kidobott anyag mennyisége (g)
100	800	$8,3 \times 10^{17}$
30	250	$2,2 \times 10^{16}$
20	175	$5,5 \times 10^{15}$