

Csillagrezgések kutatása a *Kepler*-űrtávcsővel: a mikromagnitúdós forradalom
OTKA K-83790
2011. április 1. - 2015. március 31.

Zárójelentés

Bevezetés

Pályázatunk klasszikus pulzáló változócsillagok **nemlineáris dinamikai jelenségeinek tanulmányozását** célozta a **rendkívüli pontosságot és folyamatos megfigyelést** biztosító *Kepler-űrtávcső* fotometriai adataira alapozva. A korábban elérhetetlen, mikromagnitúdó pontosságú megfigyelések lényeges előrelépést jelentettek az évszázados megoldatlan problémák, többek között az RR Lyrae (RRL) csillagok amplitúdó- és fázismodulációjának, a Blazskó-effektusnak a megértésében, és lehetővé tették új dinamikai jelenségek kimutatását is. Ezenkívül kitűnő eszközt jelentenek a kettősség pulzációra gyakorolt hatásának vizsgálatára, valamint csillag-, illetve bolygókísérők felfedezésére is.

A pályázat futamideje alatt **69** impakt faktoros folyóiratcikket írtunk, **15** konferencia-kiadványt jelentettünk meg. Ezek kumulatív impakt faktora **392,183**. Kiemelendő a **Science**-ben megjelent felfedezésünk [11]. A kutatási programot minimális változtatásokkal, a tervezett személyi állománnyal és a kitűzött munkaterv szerint hajtottuk végre. A témakört kissé bővítettük a *Kepler*hez szervesen kapcsolódó, szakértelmünkre is támaszkodó egyéb kutatási területeken (asztroszeizmológia, aktív csillagok, naprendszeres vizsgálatok). Ez számos új hazai és nemzetközi együttműködést eredményezett, pozitívan befolyásolva a kutatócsoport munkáját.

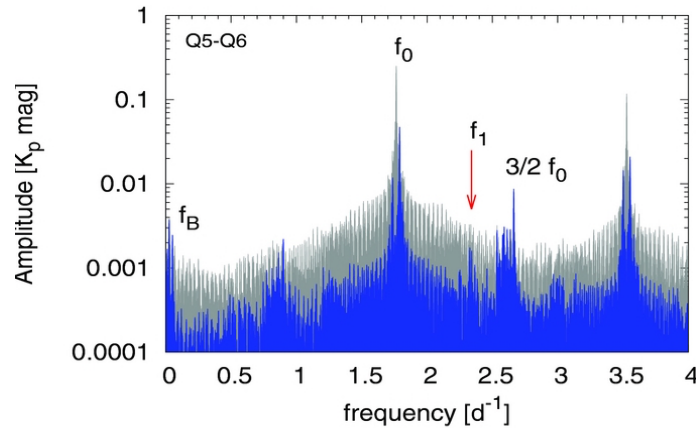
A *Kepler*-űrtávcső 2013 nyarán felfüggesztette a működését, mert a két elromlott lendkerékkel már nem tudta a pontos iránytartást biztosítani. Ezért a NASA a tudományos közösséghez fordult, akiktől új tudományos célkitűzéseket vártak. A K2-nek nevezett misszió tudományos kidolgozásában csoportunk is részt vett [44,24,16]. A K2 2014 nyarától ekliptikai területeket monitoroz 75-80 napig, az eredetinel kevésbé rosszabb pontossággal. Kutatócsoportunk idáig 17 elfogadott K2 távcsőidő-javaslatban működött közre, amiből 10-et tagjaink vezetnek. Elismertségünket az is mutatja, hogy a 600 tagból álló nemzetközi **Kepler Asztroszeizmológiai Tudományos Konzorcium** (KASC) 13 munkacsoportjából három vezetésével is minket bíztak meg: Kiss L. a WG#12 (Mira és félszabályos változók) csoportot, Szabó R. pedig a cefeida és az RR Lyrae munkacsoportokat vezeti. Ezt a munkát a K2 misszióban is folytattuk.

Tudományos eredmények

RR Lyrae csillagok

Vezető szerepet játszottunk a *Kepler* (és a CoRoT) által megfigyelt RRL csillagok adatainak feldolgozásában és értelmezésében. Korábban egy új dinamikai jelenséget: **perióduskettőződést** (PD) találtunk a Blazskó-modulált *Kepler* RRL csillagok felénél [18,41]. Ez volt az első ilyen jellegű megfigyelés ennél a csillagtípusnál. A Florida–Budapest (FB) kóddal reprodukáltuk a PD-bifurkációt nemlineáris RRL modellekben [19]. Ez lehetővé tette, hogy azonosítsuk a PD-t okozó mechanizmust, **ami az alaplómódus és a 9. (strange) felhang között létrejövő meglepően erős, magas rendű (9:2) rezonancia**. Fontos kapcsolatot találtunk a Blazskós csillagok és a PD között: a legtöbb Blazskós-csillag mutatja a jelenséget, de a nem-modulált csillagok közül egy sem

[41,28,45]. Azt is sikerült kimutatni, hogy a PD-t okozó rezonancia szabályos, sőt kaotikus Blazskó-modulációt is képes lehet előidézni [10]. Ha ez bizonyítást nyer, akkor elmondhatjuk, hogy áttörést értünk el az RRL csillagok modulációját övező évszázados rejtély megértésében.



1. ábra Az első felhang (f_1) jelenlétének felfedezése a névadó RR Lyrae fényváltozásában. Az eredeti frekvenciaspektrumot szürkével, az alaphang frekvenciájával (f_0) és annak harmonikusaival (nf_0) fehérített spektrumot pedig kékkel rajzoltuk. Látszanak még a Blazskó-modulációra (f_B) és a PD-re jellemző frekvenciák ($3/2 f_0$) [22].

Új matematikai leírást dolgoztunk ki, amely a korábbiaknál jóval kevesebb paraméter segítségével képes leírni a modulált fénygörbéket [5]. Modulálatlan Kepler RRL csillagok periódusváltozását és fémtartalom-amplitúdó összefüggését is vizsgáltuk [29]. Elvégeztük a Kepler-mezőbeli RRL csillagok spektroszkópiai analizisét, a csillagok fémtartalmát, radiális sebességét és légkörparamétereit származtattuk [30]. Egyedi Blazskós csillagok fénygörbéit is analizáltuk [15]. Részletesen megvizsgáltuk az összes felhangban pulzáló Kepler RRL csillagot (RRc-k), melyek mindegyike multiperiodikusnak mutatkozott [27]. Jellegzetes a 0,62 periódusarányú változás (valószínűleg nemradiális módus), amit kétmódusú (RRd) RRL-k és első felhangban rezgő cefeidák esetében is megfigyelhetünk. Ez a módus minden Kepler-csillagban PD-t is mutat, ami szintén új felfedezés.

Olyan eljárást fejlesztettünk ki, amely lehetővé teszi szaturált csillagok fényességének nagy pontosságú rekonstrukcióját [19]. Az így helyreállított adatokat elemezve felfedeztük, hogy az egyik legjobban vizsgált csillag, a névadó RR Lyrae nemcsak alaphangban rezeg, de nagyon kis amplitúdóval az első felhang is jelen van (1. ábra). Azonkívül, hogy ez az első ilyen jellegű megfigyelés, a F-B kóddal sikerült reprodukálnunk a jelenséget [23]. Egy kis távcsövekből álló megfigyelőrendszer (VTT) adatait történelmi észlelésekkel kombinálva megállapítottuk, hogy két, eltérő hosszúságú pulzációs periódussal jellemezhető állapot különíthető el ennél az objektumnál, amelyek 13-16 évente felcserélődnek [21].

Megkíséreltük alacsony dimenziójú káosz kimutatást Kepler-fénygörbékben. Módszert dolgoztunk ki a káosz detektálására alkalmas global flow reconstruction eljárás hatékonyságának növelésére instrumentális trendeket tartalmazó megfigyelések esetében [32]. Dinamikai szempontból megvizsgáltunk négy, különleges hidrodinamikai RRL modellt. Mind a négy esetében kaotikus pulzációt állapítottunk meg. Megvizsgáltuk az alpmódus és az első radiális felhang közötti lehetséges rezonanciák létrejöttét is, melyek közül a 6:8-as rezonancia a legfontosabb. Ezek a vizsgálatok megerősítik, hogy a kaotikus modellek vizsgálata hozzásegít az RRL csillagok komplex pulzációs dinamikájának megértéséhez. Megkíséreltük a káosz kimutatását a V783 Cyg nevű Blazskó-modulált csillag esetében, de azt találtuk, hogy a ciklushossz és az instrumentális hatások miatt még a 4 év hosszúságú, folyamatos adatsor sem elegendő annak megbízható detektálásához [33].

Elkészítettük 15 Blazskó-effektust mutató *Kepler* RRL csillag végleges, instrumentális hatásoktól megtisztított fénygörbéjét. **Adatbázisunk¹ a leghosszabb folytonos és a legpontosabb egyedi mérésekből álló adatsorokat tartalmazza, amelyeket valaha publikáltak.** Részletes Fourier-analízist végeztünk mind a fénygörbéken, mind az O–C diagramokon. Ezek alapján a mintánk 80%-a (12 csillag) többszörösen moduláltnak mutatkozott [6].

PD-re utaló jeleket találtunk **a CoRoT RRL csillagokban** is [46], valamint vizsgáltuk az RRL csillagokban jelentkező extra frekvenciák időbeli változásait. Ez az átfogó munka az eddigi legteljesebb: felöleli az összes ismert CoRoT RRL csillagot és új felfedezéseket is tartalmaz. Igazoltuk, hogy **az extra frekvenciák és azok időbeli változása a nem-modulált RRab csillagokon kívül minden altípusban előfordul** (Blazskós RRab, RRc, RRd csillagok) [4,46]. Kimutattuk a második radiális felhang frekvenciáját három olyan csillag esetében, amelyekre ez korábban nem volt ismeretes [6].

Cefeidák

Vizsgáltuk a *Kepler* látómezejébe eső egyetlen cefeida, a V1154 Cyg fényváltozását. A mikromagnitúdós szintig nem találtunk nemradiális vagy sztochasztikusan gerjesztett módusokra utaló jelet. Kimutattuk viszont, hogy a korábban konstansnak gondolt **pulzációs periódus** 0,02 napos szórással **szabálytalan változást** mutat, illetve a **fénygörbe alakja is változik** kismértékben [43,12]. A jelenség magyarázata egyelőre nem ismert, de vizsgálatát a kanadai MOST űrtávcsővel folytattuk: az első felhangban rezgő SZ Tau fénygörbéje instabilabbnak bizonyult, mint az alaplómódusban pulzáló RT Aur cefeidáé [13]. **Tizenegy cefeida** esetében mutattuk ki, hogy **spektroszkópiai kettős tagjai**, aminek elsősorban a kozmológiai távolságmérésben kulcsszerepet játszó periódus–luminositás összefüggés pontosabb kalibrálásában van jelentősége [37,38,39]. A **V473 Lyrae** jelű, második felhangban pulzáló, erős amplitúdómodulációt mutató cefeida viselkedését kutattuk. A csillag pulzációs amplitúdójában és fázisában is megjelenik a moduláció 1204 napos átlagos periódussal, de a ciklushossz és a jelenség erőssége is jelentős változásokat mutat. **A moduláció legtöbb tulajdonsága megfeleltethető a Blazskó-effektusnak.** A több mint 40 évet lefedő egyedülálló földi adatsorunk egy második, 14,5 éves modulációs periódus jelenlétének detektálását is lehetővé tette [24,26].

Exobolygók

Elsőként fedeztünk fel a *Keplerrel* aszimmetrikus fedési fénygörbét mutató exobolygót [40]. A Kepler-13b központi csillaga egy kettőscsillag fényesebb komponense. A csillag gyorsan forog, ezért a **gravitációs sötétedés miatt látszó korongja inhomogén fényességeloszlású.** A fényváltozás aszimmetriájának oka, hogy a kísérő a csillag forgástengelyéhez képest ferde pályán kering. Ezáltal lehetővé vált a pálya ferdeségének kimutatása a szokásos, spektroszkópiai mérésen alapuló Rossiter–McLaughlin-hatás nélkül, pusztán fotometriai adatokból. A fénygörbében detektáltuk a csillag forgását is 25,4 órás periódussal. A csillag lapultsága a pályaelemek változását okozza, amit a tranzithossz növekedése formájában sikerült kimutatnunk. Számításaink szerint a bolygó 75-100 év múlva már nem fog fedéseket mutatni a Földről nézve. Megállapítottuk, hogy a csillag forgása 5:3 rezonanciában áll a bolygó keringésével, amire nem volt ismert példa korábban [41].

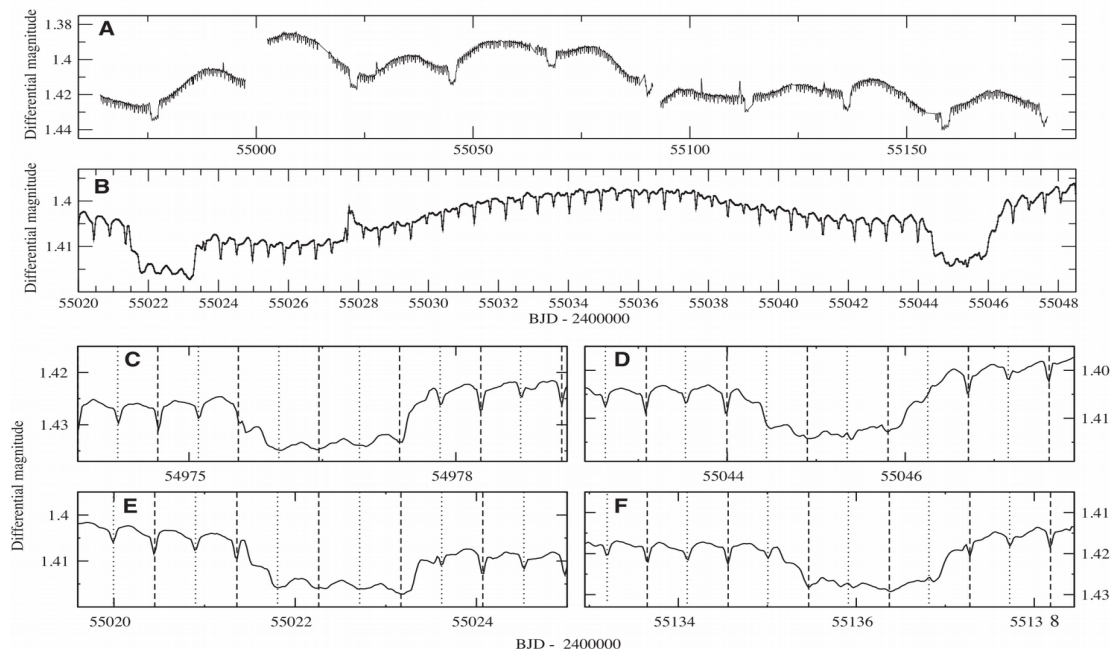
Kísérőket kerestünk a *Kepler*-minta bolygóval rendelkező csillagai körül. 160 forró Jupiter tranzitidőpontjainak változásait (TTV) vizsgáltuk, és periodikus vagy többszörösen periodikus jelölteket találtunk. Ez azért különös, mert a jelenlegi paradigma szerint a forró Jupiterek

1 <http://www.konkoly.hu/KIK/data.html>

magányosak, míg a *Kepler* által talált sok többszörös bolygórendszer között a legnagyobb planéták Neptunusz-méretűek. Amennyiben a TTV-jelek valódiak, azok háttérben dinamikai hatásokat kell feltételeznünk. Elsőként mutattunk rá, hogy **az egyenletes mintavételezés kölcsönhat a tranzitmeghatározási módszerrel, így stroboszkopikus – látszólagos – TTV-jelet kelthet.** Hasonlóképpen a csillagaktivitás és a csillag forgása is okozhat hamis jeleket. Végül a mintából minden lehetséges nem-dinamikai eredetűt kizárva három jó, periodikus tranzitidőpont-változást mutató jelölt maradt. Következtetésünk: ezek mozgását **exoholdak vagy további bolygókísérők perturbálhatják [44].**

Kapcsolódó témák

A HD 181068 az **első olyan hierarchikus hármas rendszer, amely két különböző típusú kölcsönös fedést is mutat (2. ábra).** A fő komponens egy magjában héliumot égető vörös óriáscsillag, a másik két csillag G, illetve K törpe. A rendszer egyedülálló abban a tekintetben, hogy a dinamikai fejlődés és az árapálysúrlódás emberi időskálán tanulmányozható. A *Kepler*rel történt felfedezésünkről a **Science 2011. április 8-i számában** számoltunk be [11].



2. ábra A HD 181068 egyedülálló hármas rendszer *Science*-ben publikált fényváltozása különböző időskálákon. A fő fedések 45,5 naponként következnek be, a szaggatott és a pontozott vonalak a 0,9 napos fedések fő- és mellékminimumait jelzik [11].

Új eljárást fejlesztettünk ki, mely a rendszer abszolút fizikai és pályaparamétereit minden korábbi mérésnél pontosabban szolgáltatja. Megállapítottuk, hogy a három csillag pontosan egy síkban és azonos irányban kering [7]. Elméleti úton vizsgáltuk a hierarchikus hármas rendszerekben megfigyelhető árapály keltette oszcillációkat. Jó egyezést találtunk a modellek előrejelzései és a *Kepler* szolgáltatta megfigyelések között: főként a két kisebb csillagból álló rendszer pályamérete változik jelentősen az elfejlődött központi vörös óriás körül, a változás mértéke pedig szoros kapcsolatban van a főkomponens csillagfejlődésével, illetve az ezen keresztül megvalósuló árapály-rezonanciákkal [14].

Részt vettünk a **fősorozaton található pulzáló változócsillagok** szisztematikus felmérésében [49,1]. A **hibrid csillagokban** mind p-, mind g-módusú pulzáció jelen van, ezáltal jóval több információhoz juthatunk belsejükről, mint más csillagok esetében. A-F (δ Sct/ γ Dor), és

B színképtípusú főszorozati csillagok (SPB/ β Cep) esetén is előfordul a jelenség. Mindkét esetben megállapítottuk, hogy a *Kepler*-mintában a hibrid pulzáció sokkal gyakoribb, mint azt a földi megfigyelések alapján gyanítottuk. Egyedi változók karakterizációjába is bekapcsolódtunk [9,28,2,8].

Feltételezve, hogy a **nyílthalmazok** csillagainak kora, távolsága és kezdeti kémiai összetétele megegyezik, erős megszorítások tehetők a csillagszerkezeti és -fejlődési modellekre. Ez az előny a csillagszeizmológia révén tovább fokozható. Ezért három nyílthalmaz **vörös óriáscsillagainak globális asztroszeizmológiai paramétereit** határoztuk meg a *Kepler* fotometriai adatsorainak alapján, illetve tömeget, sugarat és luminozitást származtattunk ezekre a csillagokra [35,17]. **Szeizmológiai módszerekkel először határoztuk meg közvetlenül nyílthalmazbeli vörös óriások tömegvesztését**, ami alapvető fontosságú többek között a Galaxis kémiai evolúciójának megértésében [22]. A vörös óriások Nap típusú oszcillációjának amplitúdójának vizsgálata lehetővé teszi, hogy megtaláljuk a feloldatlan kettősöket is, amik a halmazok kialakulási folyamatainak fontos nyomjelzői. Ráadásul a klasszikus módszereknél jobb hatásfokkal **szűrhetők ki** a halmazhoz nem tartozó **elő- és háttérobjektumok** is [36]. M színképtípusú **vörös óriások** folyamatos *Kepler*-méréseinek elemzését publikáltuk. Eredményeink alapján a rövid periódusoknál a Nap típusú csillagokra jellemző konvektív gerjesztésű oszcillációk dominálnak, míg a 10 napnál hosszabb ciklusokat feltehetően a κ -mechanizmus gerjeszti [3].

Gyorsan forgó késői csillagok négy évnvi *Kepler-fénygörbéjét* elemeztük. Idő–frekvencia analízis segítségével 300–900 nap hosszú **aktivitási ciklusra** és **differenciális rotációra** utaló jeleket találtunk. Az eredmények a rotáció– c iklushossz diagram eddig kevésbé tanulmányozott, a gyorsan forgó csillagokat tartalmazó részét egészítik ki [50].

Az ekliptikai K2 küldetés során a látómezőt nagyszámú kisbolygó fogja át- meg átszelni. Az első, 2014. februárjában történt kísérleti K2 megfigyelések alapján megvizsgáltuk a **kisbolygók jelenlétének a csillagfotometria pontosságára gyakorolt hatását**. Arra a következtetésre jutottunk, hogy a főövi kisbolygóknak a csillagok jelentős hányadánál számottevő hatása lesz a fotometriára [49]. Az űrtávcső egy másik, **innovatív felhasználási módjában** – egyedi mérési eljárással – **Neptunuszon túli kisbolygókat** vizsgáltunk. A folyamatos adatsor a *Keplerrel* valaha megfigyelt leghalványabb égitestek pontos forgási periódusát szolgáltatta [31].

A *Kepler*, K2, CoRoT és MOST adatainak elemzése mellett részt vettünk a jövő európai űrfotometriai misszióinak előkészítésében is, ahol hazánkat a legmagasabb szinten képviseljük (CHEOPS: Kiss L., PLATO: Szabó R.). **A PLATO, az ESA exobolygó-kereső űrtávcsőrendszere** az ultrapontos tranzitfotometria és kiegészítő mérések révén nagy számú exobolygó legfontosabb paramétereit fogja szolgáltatni. Ezáltal olyan alapvető kérdésekre kereshetjük majd a választ, hogy hogyan alakulnak ki és fejlődnek a bolygórendszerek, illetve milyen gyakoriak a Földhöz hasonló, lakható bolygók. Az eszköz 34 darab 10 cm átmérőjű távcsőből áll majd, melyek részben átfedő, nagy kiterjedésű égbolttérületeket fognak megfigyelni [34].

A pályázat egyéb eredményei

Csoportunk világszerte elismert, vezető műhellyé nőtte ki magát, amit pl. a **NASA** eredményeinket bemutató **sajtótájékoztatója** (2010)², a legrangosabb pulzációs konferencián **meghívott áttekintő előadás** (Wroclaw, 301. IAU Szimpózium [47]), egy megszerzett **PhD-fokozat** (Molnár L., 2014. *Dinamikai jelenségek RR Lyrae csillagokban*), egy hamarosan sorra kerülő **PhD-védés** (Plachy E., 2015. május 18., *Kaotikus dinamika vizsgálata változócsillagokban*), és az általunk szervezett **nemzetközi KASC-konferencia** (Balatonalmádi, 2012, 110 résztvevő) fémjeleznek. További meghívott előadásaink is voltak (Boulder, 4. KASC konferencia 2011; Balatonalmádi 5. KASC

² <http://www.nasa.gov/centers/ames/news/releases/2010/M10-91.html>

konferencia, 2012; Leuven, *Setting a new standard in the analysis of binary stars* konferencia, 2013, mindhárom: Derekas A.). Munkánkat számos egyéb elismerés is kísérte:

- Bolyai-ösztöndíj (Szabó R. 2011–2014, Derekas A. 2013–2016),
- MTA fiatal kutatói díj (Szabó R., 2011),
- Jedlik-ösztöndíj (Molnár L. 2012, Plachy E. 2013),
- l'Oreal-UNESCO Magyar Ösztöndíj a Nőkért és a Tudományért (Derekas A., 2011),
- International Research Collaboration Award (University of Sydney, Szabó R., 2012).

Az ismeretterjesztésre és a nagyközönséggel való kapcsolattartásra is nagy hangsúlyt fektettünk. Csak a *Keplerrel* kapcsolatos eredményekről **száznál több ismeretterjesztő cikket** írtunk³, és tucatnyi előadást tartottunk különféle fórumokon. A hallgatóság az akadémikusoktól az amatőr csillagászokig, a kisiskolásoktól a középiskolásokon és egyetemistákon keresztül a nyugdíjasokig terjedt. Az *OTKA* és az *Élet és Tudomány* ismeretterjesztő cikkpályázatán első helyezést értünk el 2011-ben⁴.

Irodalomjegyzék

- [1] Balona, L., Pigulski, A., De Cat, P. et al.: MNRAS, **413**, 2403, 2011
- [2] Balona L., Breger, M., Catanzaro, G., et al.: MNRAS, **424**, 118, 2012
- [3] Bányai, E., Kiss, L. L., Bedding, T. R., et al.: MNRAS, **436**, 1576, 2013
- [4] Benkő, J. M., Kolenberg, K., Szabó, R. et al.: MNRAS, **409**, 1585, 2010
- [5] Benkő, J. M., Szabó, R., Paparó, M.: MNRAS, **417**, 974, 2011
- [6] Benkő, J. M., Plachy, E., Szabó, R., Molnár, L., Kolláth, Z.: ApJS, **213**, 31, 2014
- [7] Borkovits, T., Derekas, A., Kiss, L., et al.: MNRAS, **428**, 1656, 2013
- [8] Borkovits, T., Derekas, A., Fuller, J. et al.: MNRAS, **443**, 3068, 2014
- [9] Breger, M., Balona, L., Lenz, P., et al.: MNRAS, **414**, 1721, 2011
- [10] Buchler, J. R., Kolláth, Z.: ApJ, **731**, 24, 2011
- [11] Derekas, A., Kiss, L. L., Borkovits, T., et al.: Science, **332**, 216, 2011
- [12] Derekas, A., Szabó, Gy. M., Berdnikov, L. et al.: MNRAS, **425**, 1312, 2012
- [13] Evans, N. R., Szabó, R., Derekas, A., et al.: MNRAS, **446**, 4008, 2015
- [14] Fuller, J., Derekas, A., Borkovits, T. et al.: MNRAS, **429**, 2425, 2013
- [15] Guggenberger, E., Kolenberg, K., Nemeč, J., et al.: MNRAS, **424**, 649, 2012
- [16] Guzik, J. A., Bradley, P. A., Szabó, R. et al.: Kepler White paper, 2013, arXiv:1310.0772
- [17] Hekker, S., Basu, S., Stello, D., et al.: A&A, **530**, A100, 2011
- [18] Kolenberg, K., Szabó, R., Kurtz, D. W., et al.: ApJL, **713**, L198, 2010
- [19] Kolenberg, K., Bryson, S., Szabó, R., et al.: MNRAS, **411**, 878, 2011
- [20] Kolláth, Z., Molnár, L., Szabó, R.: MNRAS, **414**, 1111, 2011
- [21] Le Borgne, J.-F., Poretti, E., Klotz, A., et al.: MNRAS, **441**, 1435, 2014
- [22] Miglio, A., Brogaard, K., Stello, D., et al.: MNRAS, **419**, 2077, 2012
- [23] Molnár, L., Kolláth, Z., Szabó, R. et al.: ApJL, **757**, L13, 2012
- [24] Molnár, L., Szabados, L., R. J. Dukes Jr., et al.: AN, **334**, 980, 2013
- [25] Molnár, L., Szabó, R., K. Kolenberg et al.: Kepler White paper, 2013, arXiv:1309.0740
- [26] Molnár, L., Szabados, L.: MNRAS, **442**, 3222, 2014
- [27] Moskalik, P., Smolec, R., Kolenberg, K., Molnár, L. et al.: MNRAS, **447**, 2348, 2015

3 <http://www.konkoly.hu/KIK/papers.html#pop>

4 Szabó, R.: Tudományos fantasztikumból fantasztikus tudomány - Magyar eredmények a Keplerrel, *Élet és Tudomány* 2011/50 1580. o.

- [28] Murphy, S. J., Pigulski, A., Kurtz, D. W. et al.: MNRAS, **432**, 2284, 2013
- [29] Nemeč, J. M., Smolec, R., Benkő, J. M., et al.: MNRAS, **417**, 1022, 2011
- [30] Nemeč, J. M., Cohen, J. G., Ripepi, V., et al.: ApJ, **773**, 181, 2013
- [31] Pál, A., Szabó, R., Szabó, Gy. M., et al.: ApJL, közlésre elfogadva, 2015, arXiv:1504.03671
- [32] Plachy, E., Kolláth, Z., Molnár, L.: MNRAS, **433**, 3590, 2013
- [33] Plachy, E., Benkő, J., Kolláth, Z. et al.: MNRAS, **445**, 2810, 2014
- [34] Rauer, H., Catala, C. Aerts, C., et al.: Experimental Astronomy, **38**, 249, 2014
- [35] Stello, D., Huber, D., Kallinger, T. et al.: ApJ, **737**, 10, 2011a
- [36] Stello, D., Meibom, S., Gilliland, R. L., et al.: ApJ, **739**, 13, 2011b
- [37] Szabados, L., Derekas, A., Kiss, Cs., et al.: MNRAS **426**, 3154, 2012
- [38] Szabados, L., Derekas, A., Kiss, L., et al.: MNRAS **430**, 2018, 2013a
- [39] Szabados, L., Anderson, R. I., Derekas, A., et al.: MNRAS **434**, 870, 2013b
- [40] Szabó, Gy. M., Szabó, R., Benkő, J. M., et al.: ApJL **736**, L4, 2011
- [41] Szabó, Gy. M., Simon, A. E., Kiss, L. L.: MNRAS, **437**, 1045, 2014
- [42] Szabó, R., Kolláth, Z., Molnár, L., et al.: MNRAS, **409**, 1244, 2010
- [43] Szabó, R., Szabados, L., Ngeow, C.-C., et al.: MNRAS, **413**, 2709, 2011
- [44] Szabó, R., Szabó, Gy. M., Dály, G., et al.: A&A, **553**, A17, 2013
- [45] Szabó, R., L. Molnár, Z. Kolaczowski et al.: Kepler White paper, 2013, arXiv:1309.0741
- [46] Szabó, R., Benkő, J. M., Páparó, M., et al.: A&A **570**, A100, 2014
- [47] Szabó, R.: IAUS, **301**, 241, 2014
- [48] Szabó, R., Sárneczky, K., Szabó, Gy. M., et al.: AJ, **149**, 112, 2015
- [49] Uytterhoeven, K., Moya, A., Grigahcene, A. et al.: A&A, **534**, A125, 2011
- [50] Vida, K., Oláh, K., Szabó, R.: MNRAS, **441**, 2174, 2014