

Szabó Róbert

Pulzáló változócsillagok és exobolygók kutatásai a precíziós űrfotometria korában

Az MTA doktora cím megszerzéséért készített értekezés tézisei

Budapest 2016

1. A kutatások előzménye

A klasszikus pulzáló változócsillagok, így a cefeidák és az RR Lyrae csillagok tanulmányozása több szempontból is rendkívül fontos az asztrofizikában. Itt most csak három legalapvetőbb szerepüket emelem ki: **(1)** nagy és jól kalibrálható abszolút fényességüknél fogva galaktikus és extragalaktikus távolságindikátorok, elég csak a Hubble-űrtávcső egyik kulcsprogramjára gondolni, amely az Univerzum fejlődését leíró Hubble-állandó néhány százalékos pontosságú meghatározását célozta, és extragalaktikus cefeidák periódus-fényesség relációjára alapult. **(2)** E csillagok ugyanakkor a saját Tejútrendszerünk és galaxisszomszédaink szerkezetének megértésében is hasznos eszköznek bizonyultak, így a közeljövő nagy földfelszíni (pl. LSST) és űrbeli (pl. Gaia) égboltfelmérő programjainak szintén kulcsfontosságú objektumai lesznek. **(3)** Harmadsorban: a pulzáció dinamikájának nemlineáris jelenségeit éppen ezekben a nagy amplitúdójú csillagokban tanulmányozhatjuk legjobban. Nem véletlen tehát, hogy ez a kutatási terület mindig is a magyar csillagászat érdeklődésének homlokterében állt.

Elsősorban is az MTA CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézetének korábbi igazgatói: Detre László és Szeidl Béla munkásságát kell kiemelni, akik az RR Lyrae csillagok periódusváltozásának és rejtélyes modulációjának, a Blazskó-effektusnak a hosszú távú vizsgálatát célzó programokat indítottak, amelyekkel nemzetközi elismerést szereztek az intézetnek. Ehhez előbb fotografikus, majd fotoelektromos fotometriai metodikát honosítottak meg, és évtizedekig a csillagászati fényességmérést állították a kutatóintézeti obszervációs csillagászat fókuszpontjába.

Később a '80-as és '90-es években Kovács Géza¹ és Kolláth Zoltán² új dimenziót adtak a pulzáló változócsillagok vizsgálatának, bevezetve a radiatív és konvektív numerikus hidrodinamikai modellezést, nemlineáris dinamikai, káoszelméleti és egyéb elméleti vizsgálatokat. Nem mehetünk el szó nélkül Kovács Géza és Jurcsik Johanna alapműveknek számító, az RR Lyrae fénygörbealakja és fizikai paramétereinek rendkívül fontos összefüggéseit megállapító munkái, valamint a Jurcsik Johanna által kezdeményezett Konkoly Blazskó-felmérés, többszín-fotometria, illetve gömbhalmazbeli RR Lyrae csillagok CCD-vel végzett megfigyelései mellett³ sem. Paparó Margit a 2006-ban indított francia–európai CoRoT-űrtávcsőhöz és annak RR Lyrae munkacsoportjához való kapcsolódásával új csapásirányt jelölt ki, ami megalapozta e dolgozat fő témáját, s amelynek mentén a NASA Kepler programjában a klasszikus változócsillagokhoz kapcsolódó munkacsoport-vezetői tevékenységem kiteljesedhetett. Az űrfotometria, azaz a legmodernebb technológia bevezetése és térnyerése tehát szorosan illeszkedik az intézeti hagyományokhoz, nagyban szolgálta és szolgálja az intézet és a magyar csillagászat nemzetközi élvonalban tartását.

Fontos területei még a magyar csillagászatnak a vizuális hullámhossztartományon kívüli, infravörös űrtávcsöves fotometriai megfigyelések (ISO, Spitzer, Herschel), amivel kapcsolatban

¹ Kovács G.: Nemlináris csillagpulzáció 1993. Értekezés az MTA doktora cím megszerzéséért.

² Kolláth Z.: Dinamikai rendszerek, móduskölcsönhatás és időskálák a változócsillagokban 2003. Értekezés az MTA doktora cím megszerzéséért.

³ Jurcsik J.: Többmódusú csillagoszcillációk és fejlődési effektusok az 1-4 ciklus/nap frekvenciájú pulzáló változók körében 2005. Értekezés az MTA doktora cím megszerzéséért.

Ábrahám Péter és munkatársai tevékenységét említem, valamint Szabados László⁴ és csoportja részvételét a Gaia asztrometriai műhold megfigyeléseiben, ami a pontos pozíciók mellett fotometriai megfigyeléseket is végez, és amelynek a távolságskála pontosítására is irányuló tudományos programjában a pulzáló változócsillagok mérései kiemelt szerepet játszanak. Ha a Hubble-űrtávcső távolságmérési célzattal felvett extragalaktikus cefeida fénygörbéit nem számítjuk, akkor a klasszikus pulzáló változócsillagok űrfotometriájának közvetlen előzményeként a WIRE (Wide Field Infrared Explorer) infravörös csillagászati műhold optikai vezetőtávcsővével (Bruntt és mtsai, 2008), valamint a Coriolis-műhold SMEI (Solar Mass Ejection Imager) műszerével (Spreckley és Stevens, 2008) rögzített hosszabb űrfotometriai adatsorokat említhetjük, melyek a Polaris, a jól ismert cefeida optikai fényváltozását mutatják. Hasonlóképpen, a MOST űrtávcsővel egyetlen objektum releváns megfigyelései születtek a témakörben, ennek célpontja a kétmódusú RR Lyrae, az AQ Leo volt (Gruberbauer és mtsai, 2007). A kepleres vizsgálataim előfutáraként a CoRoT-val egyedi RR Lyrae csillagokról végzett munkáinkat említhetem (Chadid és mtsai, 2010; Poretti és mtsai, 2010; Guggenberger és mtsai, 2011), melyekhez kapcsolódó megfigyelések a Kepler-misszió előtt, feldolgozásuk és publikálásuk viszont már a Kepler-adatok analizálásával párhuzamosan történt.

Az exobolygók kutatása sem ismeretlen terület Magyarországon. Kezdve Bakos Gáspár és Kovács Géza HATNet-tel történő úttörő exobolygó-felfedezéseivel, folytathatjuk a sort az exobolygórendszerek égi mechanikai vizsgálataival, amit Érdi Bálint vezetésével az ELTE Csillagászati Tanszékén végeznek. Említést érdemelnek Szabó M. Gyula⁵ és Simon Attila exoholdak kimutatására irányuló élvonalbeli vizsgálatai is. Végül ide sorolandó Kiss László Exobolygók és Csillagszerkezet nevű Lendület-csoportja, aminek magam is tagja vagyok, s amelynek keretében sok egyéb mellett a Kepler-űrtávcső ultrapontos fotometriai adatait is használtuk exobolygók felfedezésére és karakterizálására, vörös pulzáló változócsillagok megfigyelésére és egy egyedülálló hierarchikus fedési hármas rendszer felfedezésére.

Az általam feldolgozott témák tehát szervesen illeszkednek a hazai kutatási témák közé, továbblépést és azok kiterjesztését hozták, valamint számos új, gyümölcsöző és szerteágazó együttműködést alapoztak meg az exobolygós vizsgálatok, fiatal csillagok, csillagaktivitás és naprendszeres kutatások témaköreiben is.

2. Célkitűzések

Az űrfotometria korában a pulzáló változócsillagok vizsgálata is új lendületet kapott, hiszen soha nem látott folytonosságú és a korábbinál nagyságrendekkel pontosabb adatok keletkeztek az exobolygókeresés melléktermékeként. Ezzel párhuzamosan, a numerikus hidrodinamikai modellek is olyan kiforrottságot értek le, hogy a két terület szinergiája jelentős előrelépést eredményezett az asztrofizika ezen ágában is.

Dolgozatomban először egy klasszikus problémát, a cefeidák fáziskésését vizsgáltam lineáris és nemlineáris modellekkel. A radiális sebesség-görbe és a fénygörbe maximuma közti

⁴ Szabados L.: Új aspektusok a klasszikus cefeidák időbeli változásának vizsgálatában 1997. Értekezés az MTA doktora cím megszerzéséért.

⁵ Szabó M. Gy.: Szubsztelláris égitestek naprendszerekben, 2012, Értekezés az MTA doktora cím megszerzéséért.

időbeli eltéréseken alapuló módszer a pulzációs módus meghatározását lehetővé tévő új módszerhez vezetett. A kiszámított cefeidamodellek nagy száma lehetővé tette, hogy a két radiális módusban rezgő cefeidákat egyedi és extragalaktikus fémtartalom-meghatározásra használjam, ez a munka alkotja második tézispontomat.

A lehető legpontosabb űrfotometriához ritkán juthatunk automatikus vagy a földi, látható hullámhossztartományban végzett fotometriánál megszokott eljárások révén. Az új problémák új algoritmusok kidolgozását és alkalmazását igényelték: új fotometriai apertúrák kijelölését, az egyedi pixelek vizsgálatát és a szaturált csillagokra kidolgozott egyedi fluxusrekonstrukciós módszereket. Ezeket a metódusokat a klasszikus pulzáló változócsillagok mellett a legkülönbébb Kepler-célpontok esetében alkalmaztam, így: aktív csillagok, vörös óriások, Nap-típusú csillagok oszcillációi, halmaz-szeizmológia, exobolygók, naprendszerbeli kisbolygók esetében is. A kidolgozott algoritmusok jelentősége túlmutat a már működő vagy befejeződött űrtávcsöves missziókon (MOST, CoRoT, Kepler, K2), és alkalmazható lesz a közeljövő hasonló európai és amerikai űrprojektjeiben is (TESS, PLATO), amelyek előkészítő munkáiba bekapcsolódtam, és sokat tettem hazai beágyazottságuk növelése érdekében.

A fotometriai pontosság új dinamikai jelenségek felfedezéséhez vezetett: ilyen volt az általam felfedezett perióduskettőződés jelensége RR Lyrae csillagokban, ami szorosan kapcsolódik a máig nem teljesen értett Blazskó- (amplitúdó- és fázis-) modulációhoz. A további, korábban nem látott, de az űrfotometriai adatsorokban gyakran megfigyelt kis amplitúdójú radiális, illetve nemradiális módusok, egyéb nemlineáris dinamikai jelenségek kapcsolatának feltárására is kísérletet tettem dolgozatomban. Ezáltal olyan jelenségek (móduskölcsönhatás, magas rendű rezonanciák, alacsony dimenziójú káosz stb.) váltak tanulmányozhatóvá, amelyek minden bizonnyal jelen vannak a pulzáló változócsillagok más csoportjainak dinamikájában is, de ott a kisebb amplitúdó miatt nem, vagy csak nehezen vizsgálhatóak. A Blazskó-effektus a pulzációelmélet évszázados megoldatlan problémája. Űrfotometriai vizsgálataim és az erre épülő elméleti eredmények a rejtély új magyarázatához vezettek (Buchler és Kolláth, 2011).

A lakható bolygók keresése révén exobolygók esetleges holdjai is célkeresztbe kerülnek. E sorok írásáig azonban nem sikerült exoholdat kimutatni, még az oly pontos Kepler-adatokban sem. Az elfogadott paradigma szerint a csillagukhoz közel keringő, Jupiterhez hasonló gázóriásoknak (forró jupiterek) legtöbbször nincsenek bolygósomszédai. Ennek kapcsán a fedések időpontjaiban mutatkozó eltéréseket (TTV-t) kerestem a Kepler óriásbolygó-mintájában, és három TTV-t mutató forró jupitert találtam. Ezek vagy távolabbi, fedést nem okozó bolygókra, vagy exoholdak jelenlétére utalnak. Ezek az eredmények a bolygórendszerek fejlődésének jobb megértését segítik elő. A munka publikálását követően a K2 misszió 2015 augusztusában felfedezte a WASP-47b nevű forró jupiter kísérőit, ami következtetéseim további bizonyítékát szolgáltatja. Fontos még, hogy először írtam le a tranzitidőpontokban jelentkező látszólagos változásokat okozó hatásokat. A módszert azóta is elterjedten alkalmazzák az exobolygók vizsgálatában.

3. Vizsgálati módszerek

Vizsgálataimhoz sok esetben űrtávcsövek (a kanadai MOST, a francia–európai CoRoT és az amerikai Kepler) extrém pontosságú fotometriai adatsorait használtam. Ezek egy részét elfogadott távcsövidő-program keretében exkluzív módon kaptam meg (MOST, Kepler Guest Observer program), egy része publikus adatbázisban volt fellelhető (CoRoT, Kepler), ismét más részét a

Kepler Asztroszeizmológiai Tudományos Konzorcium releváns munkacsoport-vezetőjeként a konzorcium tagjaival együtt kaptam vizsgálatra (később ez is publikus lett). Ez utóbbi esetekben (amire a dolgozatban említett eredmények nagy része épül) vezetésemmel végeztük a célpontválogatást és a földi kiegészítő méréseket. A fénygörbéket tartalmazó idősorok egy része készen elérhető volt, más részükénél saját adatfeldolgozási eljárások fejlesztése és alkalmazása volt szükséges, így a kontamináció és fluxusvesztesség minimalizálására az egyedi fotometriai pixelek vizsgálata, és új fotometriai apertúrák definiálása, instrumentális trendek levonása, hibás, kilógó pontok kiszűrése. A MOST-adatok esetében a MOST Team által kalibrált fénygörbéket, a CoRoT esetében az N2 feldolgozott, kalibrált idősorokat, a Kepler esetében pedig minden esetben az SAP (Simple Aperture Photometry) adatokat használtam, elkerülendő a fontos asztrofizikai jelek kiszűrését, amit a bolygótranszit-keresésre előkészített, automatikus fénygörbe-feldolgozó szoftverek szolgáltatva PDC (Presearch Data Conditioning) adatok esetében nem lehetett garantálni⁶. A Kepler pixeladatainak feldolgozásához több esetben a Kepler Guest Observer iroda által fejlesztett PyKE (Still & Barclay 2012) programcsomagot használtam. A téma folytatása a PLATO misszióban fog kiteljesedni, ahol a földi és fedélzeti fotometriai algoritmusok kidolgozását végző csoport *Detailed study of saturated stars* munkacsoportjának vezetésével bíztak meg.

A pulzáció numerikus modellezéséhez a Florida–Budapest kódot használtam. Ez a kód az egyik legfejlettebb, egydimenziós, turbulens konvekciót tartalmazó Fortran nyelven írt, radiális pulzációt modellező programcsomag. Lehetővé teszi egy sztatisztikus modell felépítését, ennek lineáris stabilitásvizsgálatát, valamint a teljes nemlineáris sugárzási hidrodinamikai egyenletrendszer megoldását implicit módon, Newton–Raphson-iteráció segítségével. A számításokhoz igénybe vettem a University of Florida High Performance Computing Center⁷ szuperszámítógépes kapacitását, ahol saját fejlesztésű szkriptekkel futtattam a programot.

Frekvenciaanalízishez sztenderd, elfogadott programokat használtam, így a Period04-et (Lenz & Breger, 2005) és az MTA CSFK Csillagászati Intézetében fejlesztett MuFrAn (Kolláth 1990), illetve TiFrAn⁸ programcsomagokat.

⁶ http://archive.stsci.edu/kepler/data_release.html

⁷ <http://www.hpc.ufl.edu/>

⁸ <http://www.konkoly.hu/tifran/index.html>

4. Új tudományos eredmények

1. Cefeidák fáziskésése – a módusmeghatározás új módszere

Pulzáló változócsillagok esetében a radiális sebesség-görbe és a fényváltozás menete közötti fáziskülönbséget nevezzük fáziskésésnek (phase lag).

- Radiális módusban pulzáló, klasszikus cefeida csillagok fáziskésését lineáris és nemlineáris modellekkel számolva megmutattam, hogyan használható e mennyiség a módus azonosítására. A módszer olyan esetekben is jól működik, amikor hagyományos (pl. a fénygörbe Fourier-paraméterein alapuló) metódusok nem használhatók, illetve alacsony amplitúdójú pulzáló csillagok esetében is eldönthető, hogy felhangbeli vagy az instabilitási sáv szélén tartózkodó alaplómódusú pulzátorról van-e szó. A módszert normál amplitúdójú, galaktikus cefeidákkal kalibráltam, jó egyezést kapva a megfigyelési adatokkal.
- A Magellán-felhőkre jellemző fémtartalommal számolt modellsorozatokkal megmutattam, hogy a fémtartalomnak viszonylag kis hatása van a fáziskésésre. A feltételezett tömeg-luminozitás összefüggés, illetve a turbulens konvektív paraméterek a móduskiválasztást és a periódust befolyásolják, ami leképeződik a periódus-fáziskésés diagramon is.
- A módszert felhasználtam űrfotometriai megfigyelések értelmezésében – a V1154 Cygni, a Kepler által a nominális misszió alatt megfigyelt egyetlen cefeida esetében –, amiről megállapítottam, hogy alaplómódusban pulzál.

A munkában a Florida–Budapest kódot használtam (Szabó és mtsai, 2004; Kolláth, és mtsai, 2002).

A tézisponthoz tartozó publikációk: [10], [12]

2. Kétmódusú cefeidák, a csillagok és galaxisok fémtartalom-meghatározásának új eszközei

Lineáris és nemlineáris hidrodinamikai modellek segítségével – elméleti úton – vizsgáltam az első két radiális módusban rezgő (kétmódusú, ún. 'beat') cefeidák periódusarány-függését a fémtartalomtól.

- Azt találtam, hogy a modellek helye a Petersen-diagramon szoros megkötést ad a fémtartalomra, így kiváló fémtartalom-meghatározó módszerhez jutottam.
- A módszer a héliumtartalomra és a feltételezett tömeg-luminozitás relációra kevésbé érzékeny. A csillag forgása szintén nem befolyásolja érdemi módon a pulzációs úton meghatározott fémtartalmat. Megállapítottam, hogy a legnagyobb bizonytalanság a nehezebb elemek relatív gyakoriságának bizonytalan ismeretéből adódik.
- Extragalaktikus környezetben egyértelmű előny, hogy spektroszkópia helyett fotometriai úton határozható meg az egyedi csillagok fémtartalma. Az eljárást ezért a Magellán-felhőkben található

kétmódusú cefeidákra is alkalmaztam, amihez az EROS-2 mikrolencse-kereső égboltfelmérő program egyedi csillagokra 800 – 1000 adatpontot tartalmazó adatbázisát használtam. A két galaxisra – más módszerektől függetlenül – $Z_{LMC} = 0,0045$ és $Z_{SMC} = 0,0018$ átlagos fémtartalom adódott. A munka nem mellesleg 31, illetve 110 százalékkal növelte a két galaxisban található ismert kétmódusú klasszikus cefeidák számát.

A tézisponthoz tartozó publikációk: [1], [6]

3. Klasszikus változócsillagok és más objektumok vizsgálata űrfotometriai módszerekkel

Az űrfotometriai adatok több esetben más kihívások elé állítják az asztrofizikusokat, mint a földi csillagászati megfigyelések. Az ezekre a nehézségekre válaszul kidolgozott módszerekből és azok alkalmazásából születtek az alábbi eredmények:

- Elsőként vizsgáltam klasszikus cefeidát a Kepler-űrtávcsővel. Megerősítettem a Kepler-mezőben található egyetlen cefeida, a V1154 Cyg klasszifikációját. Pixelszintű fotometria alkalmazásával a célpont fényét elkülönítettem egy a csillaghoz közeli, azzal összemért változócsillag fényétől, és megtisztítottam a fénygörbét az instrumentális fluxusváltozásoktól. A Kepler ultraprecíz, gyakorlatilag megszakításmentes fotometriai adatsorában a mikromagnitúdós szintig nem találtam nemradiális vagy sztochasztikusan gerjesztett módusokra utaló jeleket.
- A MOST kanadai fotometriai műholdat használva, egy nemzetközi kutatócsoporttal megfigyeltem az RT Aurigae alaplómódusú, illetve az SZ Tauri felhangban pulzáló cefeidát. A munka során az adatok analízisének vezetését vállaltam. A Kepler és MOST megfigyelései alapján kijelenthetjük, hogy a felhangbeli cefeidák fénygörbéjének mind az alakja, mind a periódusa kevésbé szabályos, mint az alaplómódusban rezgő társaiké. Mindez összhangban van a felhangban rezgő cefeidáknál talált karakterisztikus O–C változásokkal.
- Módszert dolgoztam ki a névadó RR Lyrae csillag Kepler-megfigyeléseinek rekonstruálására azokban az esetekben, ahol a nagy amplitúdó és a túlzottan kicsi, automatikusan hozzárendelt apertúra miatt fluxusvesztés lépett fel. Ez döntő jelentőségű lépés volt a valós amplitúdó helyreállítása és egyes újonnan talált jelenségek, pl. a perióduskettőződés valódiságának meggyőző bizonyítása szempontjából.
- Megmutattam, hogy a kisbolygó-megközelítések nagyon gyakoriak lesznek az ekliptikai K2 misszió során: a technikai demonstrációnak szánt K2-E2 mezőben mintegy 9 napig megfigyelt 1952 csillag közül egy 300 csillagot tartalmazó almintában azt találtam, hogy a csillagok felét érinti egy vagy több (akár hét) aszteroida-megközelítés, ami a fénygörbéjükön nyomot hagy. Az események átlagos időtartama lehetővé teszi a zajforrás azonosítását és kiküszöbölését. A probléma fokozottan releváns lesz a Keplerénél is nagyobb pixellekkel dolgozó közeljövőbeli űrfotometriai programokban, így a TESS-nél és a PLATO-nál is.

A tézisponthoz tartozó publikációk: [2], [3], [5], [9], [12], [15], [17]

4. Perióduskettőződés felfedezése RR Lyrae csillagokban

A kvázi-folytonos, ultraprecíz űrfotometriai adatsorok új dinamikai jelenségek felfedezésére adtak lehetőséget a korábban jól ismertnek gondolt, klasszikus pulzáló változócsillagok esetében is. Az új jelenségek az évszázados rejtély, a Blazskó-effektus kutatásában is áttörést jelentettek.

- Új dinamikai jelenséget: perióduskettőződést fedeztem fel a Kepler RRab csillagaiban, köztük a névadó RR Lyraeben is. Az alternáló maximumok időnként meglepően nagy amplitúdóval jelentkeznek: a prototípus RR Lyrae fénygörbéjének egyes szakaszain az egymást követő maximumok különbsége meghaladja a 0,1 magnitúdót. Az űrfotometriai adatokban annyira feltűnő jelenséget a nem folytonos, kisebb pontosságú földi mérésekben korábban többek között azért nem sikerült kimutatni, mert a fél naphoz közeli periódusú pulzáció a nappalok/éjszakák váltakozása miatt ezt gyakorlatilag lehetetlenné teszi egy adott megfigyelőhelyről.
- A perióduskettőződést sikerült függetlenül megerősítenem a CoRoT négy, modulációt mutató, alaplómódusban pulzáló RR Lyrae csillagában, köztük egy fényesebb csillaggal összemért, ezért mindössze alig néhány század magnitúdónyi változást mutató RR Lyraenél is.
- A perióduskettőződéssel fontos támpontot sikerült találni a Blazskó-moduláció évszázados rejtélyének megoldásához: egyértelműen megmutattam, hogy a perióduskettőződés szorosan összefügg a Blazskó-effektussal. A blazskós RR Lyrae csillagok többsége mutatja a jelenséget, míg a Kepler 25, illetve a CoRoT 4 alaposabban vizsgált nemmodulált RR Lyrae csillaga közül egy sem mutatott perióduskettőződést a CoRoT 120–150 napos és a Kepler 4 éves, szubmillimagnitúdós pontossággal végzett, folyamatos megfigyelései alatt. A perióduskettőződésre alapozva Buchler és Kolláth (2011) új fizikai magyarázatot adott a Blazskó-effektusra: a rezonanciaparadigma értelmében a perióduskettőződést létrehozó, az alaplómódus és a kilencedik radiális felhang közötti 9:2-es rezonancia képes lehet reguláris, sőt kaotikus moduláció létrehozására is.
- Rámutattam a perióduskettőződés időbeli változására: a jelenség erőssége és jelenléte szinte mindegyik csillagban változott időben. A legjobb jel/zaj viszsonnyal megfigyelt – például a névadó RR Lyrae csillagok fénygörbéjében azonban gyakorlatilag folyamatosan jelen vannak az alternáló pulzációs ciklusok. A perióduskettőződés erőssége ugyanakkor nem köthető egyértelműen a moduláció fázisához. Felvettem, hogy ennek az lehet az oka, hogy a csillag egy adott modulációs ciklus alatt – fizikai paramétereinek változása miatt – csak ideiglenesen tartózkodik a 9:2 rezonancia közelében: ekkor figyelhető meg a perióduskettőződés.

A tézisponthoz tartozó publikációk: [4], [7], [8], [11], [14], [15], [16]

5. Extra periodicitások RR Lyrae csillagokban

A Kepler és CoRoT űrtávcsövek folytonos és ultrapontos adatsorai lehetővé tették, hogy az RR Lyrae csillagok fényváltozásának frekvenciatartalmát a korábbinál sokkal alaposabban elemezzem. Az RR Lyrae csillagok pulzációjának dinamikája eredményeim tükrében sokkal bonyolultabbnak tűnik, mint azt akár csak néhány éve is gondoltuk.

- Az űrfotometriai vizsgálatok révén megállapítottam, hogy a domináns, radiális pulzációs perióduson és annak modulációján kívül az RR Lyrae csillagok gyakran mutatnak egyéb (extra) periodicitásokat is.
- Az extra frekvenciák szinte kivétel nélkül előfordulnak a Blazskó-modulált alaplómódusú (RRab) csillagokban, a felhangban rezgő RR Lyraekben (RRc) és a kétmódusú (RRab) csillagokban is. Érdekes módon azonban kivétel nélkül minden esetben hiányoznak a modulálatlan RRab csillagok frekvencia-spektrumából a Kepler és a CoRoT pontossága engedte detektálási határig.
- Az extra periodicitások egy része az első vagy második radiális felhanggal magyarázható, a többiért valószínűleg nemradiális pulzáció a felelős.
- A CoRoT és a Kepler által megfigyelt RR Lyrae csillagok extra frekvenciáinak amplitúdója időben mindig változik, 20 – 120 napos időskálán. Ez bonyolult dinamikai kölcsönhatások jelenlétét feltételezi, így például az RRc csillagokban egyes extra módusok perióduskettőződést mutatnak.

A tézispontozhoz tartozó publikációk: [7], [8], [15], [16]

6. Forró jupiterek vizsgálata a Kepler-űrtávcsővel

A csillagaikhoz közel található, 0,8 - 6,3 napos keringési idejű forró jupitereknek a bevett paradigma szerint nincsenek bolygókísérőik, ugyanis korábban nem találtak sem pályájukon kívül, sem belül keringő közeli, mozgásukat érdemben befolyásoló bolygókísérőt. Ezért is volt meglepő, hogy néhányuknál periodikusnak tűnő tranzitidőpont-változást (TTV) véltek kimutatni. A kérdés tisztázására megvizsgáltam a Kepler forrójupiter-jelöltjeinek rendelkezésre álló tranzitidőpontjait, illetve központi csillagaik fényváltozását elsősorban a legjobb, dinamikai változásokat mutató forró jupiterek további vizsgálata céljából, illetve olyan jelenségeket keresve, amelyek hamis TTV-jeleket okozhatnak. A kísérők hiánya vagy jelenléte a forró jupitereket tartalmazó rendszerekben alapvető jelentőséggel bír az azok létrejöttét leíró elméletekre nézve, hiszen döntő bizonyítékot szolgáltathat a csillag- és bolygókísérők által indukált nagy excentricitású migrációt és a protoplanetáris koronggal történő csendesebb migrációt preferáló elméletek versengésében.

- Elsőként mutattam rá a virtuális (stroboszkopikus) frekvenciák létrejöttének lehetőségére a TTV-jelekben, amik annak következményeképp lépnek fel, hogy a Kepler-adatok szabályos időközönként és ritkán mintavételezik a bolygótranzitokat. Emellett azt találtam, hogy a csillagok

forgása (ami a foltok jelenlétének következtében detektálható a Kepler-fénygörbékben) gyakran szintén TTV-változásokat indukál. Ezen nem-dinamikai TTV-jelek kiküszöbölése munkám folyamányaként ma már sztenderd eljárásnak számít az exobolygók tranzitidőpont-változásainak vizsgálatában.

- Harminchat rendszerben detektáltam szignifikáns, periodikus TTV-jelet, ezeknek fele többszörös periodicitást mutat. A többszörös periodicitások eredete jelenleg nem tisztázott, de nem magyarázhatók egyszerűen mintavételi vagy a csillag forgásából adódó hatásokkal. Tizenöt jelöltnél stroboszkopikus, vagyis nem dinamikai hatás mutatható ki. Más rendszereket a csillagaktivitás és/vagy -forgás okozta periodicitások, elégtelen számú tranzit, vagy éppen nem bolygó (false positive) státusza miatt zártam ki.
- Összességében a Kepler forrójupiter-mintájának ~2%-a mutat periodikus TTV-t, amit nem lehet sem a csillag forgásának, sem aktivitásának, vagy más instrumentális hatásnak tulajdonítani. Ez három forró jupitert jelent: KOI-186, 897, 977, ahol tehát a tranzitidőpont-változások legjobb magyarázata dinamikai: azaz exohold vagy bolygókísérő jelenléte. A munka publikálását követően a K2 misszió 2015 augusztusában felfedezte a WASP-47b forró jupiter kísérőit (WASP-47c: egy szuperföld a forró jupiternél rövidebb, WASP-47d: egy neptunusz a forró jupiternél hosszabb keringési idővel), ami a forró jupiterek lehetséges kísérőire vonatkozó következtetéseimet nagymértékben alátámasztja.

A tézispontokhoz tartozó publikáció: [13]

5. A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

1. Buchler, J. R., **Szabó, R.**: *Beat Cepheids as probes of stellar and galactic metallicity*, The Astrophysical Journal, **660**, 723, 2007
2. Evans, N. R., **Szabó, R.**, Derekas, A., Szabados, L., Cameron, C., 8 társszerző: *Observations of Cepheids with the MOST satellite: Contrast between Pulsation Modes*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **446**, 4008, 2015
3. Gilliland, R. L., Brown, T. M., Christensen-Dalsgaard, J., 17 társszerző, **Szabó R.**, és 14 társszerző: *Kepler Asteroseismology Program: Introduction and First Results*, Publication of the Astronomical Society of the Pacific, **122**, 131, 2010
4. Kolenberg, K., **Szabó, R.**, Kurtz, D. W., Gilliland, R. L., Christensen-Dalsgaard J., 19 társszerző: *First KEPLER Results on RR Lyrae Stars*, The Astrophysical Journal Letters, **713**, L198, 2010
5. Kolenberg, K., Bryson, S., **Szabó, R.**, Kurtz D. W., Smolec, R., 16 társszerző: *Kepler photometry of the prototypical Blazhko star RR Lyr: An old friend seen in a new light*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **411**, 878, 2011

6. Marquette, J. B., Beaulieu, J. P., Buchler, J. R., **Szabó, R.**, Tisserand, P., 34 társszerző: *The beat Cepheids in the Magellanic Clouds: an analysis from the EROS-2 database*, Astronomy and Astrophysics, **495**, 249, 2009
7. Moskalik, P., Smolec, R., Kolenberg, K., Molnár, L., Kurtz, D. W., **Szabó, R.**, 8 társszerző: *Kepler photometry of RRc stars: peculiar double-mode pulsations and period doubling*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **447**, 2348, 2015
8. Nemec, J. M., Smolec, R., Benkő, J. M., Moskalik, P., Kolenberg, K., **Szabó R.**, 19 társszerző: *Fourier analysis of non-Blazhko ab-type RR Lyr stars observed with the Kepler space telescope*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **417**, 1022, 2011
9. Rauer, H., Catala, C., Aerts, C., 16 társszerző, **Szabó, R.** és 140 társszerző: *The PLATO 2.0 Mission*, Experimental Astronomy, **38**, 249, 2014
10. **Szabó, R.**, Buchler, J. R., Bartee, J.: *The Cepheid phase lag revisited*, The Astrophysical Journal, **667**, 1150, 2007
11. **Szabó, R.**, Kolláth, Z., Molnár, L., Kolenberg, K., 14 társszerző: *Does Kepler unveil the mystery of the Blazhko effect? First detection of period doubling in Kepler Blazhko RR Lyrae stars*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **409**, 1244, 2010
12. **Szabó, R.**, Szabados, L., Ngeow, C. C., Smolec, R., Derekas, A., 33 társszerző: *Cepheid investigations using the Kepler space telescope*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **413**, 2709, 2011
13. **Szabó, R.**, Szabó, Gy. M., Dálya, D., Simon, A. E., Hodosán, G., Kiss, L. L.: *Multiple planets or exomoons in Kepler hot Jupiter systems with transit timing variations?* Astronomy and Astrophysics, **553**, A17, 2013
14. **Szabó, R.:** *Blazhko effect in Cepheids and RR Lyrae stars*, Conference proceedings of the IAU Symposium No. 301. "Precision Asteroseismology. Celebration of the Scientific Opus of Wojtek Dziembowski", p. 241, 19-23 August 2013, Wroclaw, Lengyelország, 2014, arXiv:1309.3969
15. **Szabó, R.**, Benkő, J. M., Paparó, M., Chapellier, E., Poretti, E., 5 társszerző: *Revisiting CoRoT RR Lyrae stars: detection of period doubling and temporal variation of additional frequencies*, Astronomy and Astrophysics, **570**, A100, 2014
16. **Szabó, R.**, Benkő, J. M., Paparó, M., Chapellier, E., Poretti, E., 5 társszerző: *The space photometry revolution and our understanding of RR Lyrae stars*, Proceedings of the CoRoT Symposium 3 / Kepler KASC-7 joint meeting, Toulouse, 6-11, July 2014. EPJ Web of Conferences, **101**, 01003, 2015
17. **Szabó, R.**, Sárneczky, K., Szabó, Gy. M., Pál, A., Kiss, Cs. P., 4 társszerző: *Main-belt Asteroids in the K2 Engineering Field of View*, Astronomical Journal, **149**, 112, 2015

6. Irodalmi hivatkozások listája

1. Bruntt, H., Evans, N. R., Stello, D., Penny, A. J., Eaton, J. A. és mtsai, ApJ, **683**, 433, 2008
2. Buchler, R. Kolláth, Z., ApJ, 731, 24, 2011
3. Chadid, M., Benkő, J. M., **Szabó, R.**, Paparó, M., Chapellier, E. és mtsai, A&A, **510**, 39, 2010
4. Gruberbauer, M., Kolenberg, K., Rowe, J. F., Huber, D., Matthews, J. M. és mtsai, MNRAS, **379**, 1498, 2007
5. Guggenberger, E., Kolenberg, K., Poretti, E., Chapellier, E., **Szabó, R.** és mtsai, MNRAS, **415**, 1577, 2011
6. Kolláth, Z., Occasional Technical Notes of the Konkoly Observatory, No. **1**. 1990
7. Kolláth, Z., Buchler, R., Szabó, R., Csubry, Z., A&A, **386**, 932, 2002
8. Lenz, P., Breger, M., CoAst, **146**, 53, 2005
9. Poretti E., Paparó, M., Deleuil, M., Chadid, M., Kolenberg, K., **Szabó, R.** és mtsai, A&A, **520**, 108, 2010
10. Spreckley, S. A., Stevens, I. R., MNRAS, **388**, 1239, 2008
11. Still, M., Barclay, T.: Astrophysics Source Code Library, record ascl:**1208.004**, 2012
12. Szabó, R., Kolláth, Z., Buchler, R., A&A, **425**, 627, 2004