

MTA CSILLAGÁSZATI ÉS FÖLDTUDOMÁNYI KUTATÓKÖZPONT
KONKOLY THEGE MIKLÓS CSILLAGÁSZATI INTÉZET

Pulzáló változócsillagok és exobolygók kutatásai a precíziós űrfotometria korában

ÉRTEKEZÉS AZ MTA DOKTORA CÍMÉRT

Szerző:
Dr. Szabó Róbert

Budapest, 2016



1. ábra. A Kepler-űrtávcső és az RR Lyrae csillagok művészi ábrázolása (Katrien Kolenberg).

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	7
1.1. Űrfotometria – a mikromagnitúdós forradalom	7
1.1.1. A csillagászati fotometria rövid története	8
1.1.2. MOST	10
1.1.3. CoRoT	11
1.1.4. A Kepler-űrprogram	13
1.1.5. K2	20
1.2. Pulzáló változócsillagok	22
1.2.1. Cefeidák	24
1.2.2. RR Lyrae csillagok	24
1.2.3. A Blazskó-effektus	26
2. Űrfotometriai módszerek	29
2.1. Bevezetés	29
2.2. Speciális Űrfotometriai problémák és kezelésük	32
2.2.1. Nagy amplitúdójú változók	37
2.2.2. Blending, kontamináció	45
2.2.3. Szaturáció, fényes csillagok fotometriája	47
2.2.4. Mozgó objektumok	50
2.3. Az eredmények hatása	54
3. Cefeidák	57
3.1. Cefeidák fáziskésése	57
3.1.1. Bevezetés	57
3.1.2. A fáziskésés numerikus modellezése	59
3.1.3. Eredmények	62
3.1.4. A cefeidák fáziskésésének alkalmazásai	68
3.2. Kétmódusú cefeidák	77
3.2.1. Két és több módusban pulzáló cefeidák	77
3.2.2. A kétmódusú cefeidák modellezése	78
3.2.3. A kétmódusú cefeidák fémtartalmának meghatározása	82

3.2.4. A módszer alkalmazásai	91
4. RR Lyrae csillagok	99
4.1. Perióduskettőződés RR Lyrae csillagokban	99
4.1.1. Bevezetés	99
4.1.2. Rövid történet	101
4.1.3. Perióduskettőződés	101
4.1.4. Elméleti magyarázat	117
4.1.5. A perióduskettőződés jelentősége	119
4.1.6. Az eredmények hatása	121
4.2. Extra frekvenciák RR Lyrae csillagokban	125
4.2.1. Bevezetés	125
4.2.2. Extra frekvenciák a CoRoT RR Lyrae csillagaiban	126
4.2.3. Extra frekvenciák a Kepler RR Lyrae csillagaiban	133
4.2.4. Az extra frekvenciák jellemzői és jelentőségük	137
4.2.5. Újabb eredmények	141
5. Forró jupiterek vizsgálata a Kepler-űrtávcsővel	147
5.1. Bevezetés	147
5.2. Módszerek és adatanalízis	149
5.3. Nem dinamikai eredetű periodikus TTV-jelek	151
5.3.1. Stroboszkopikus periódus	151
5.3.2. Csillagaktivitás	152
5.4. A legjobb jelöltek	153
5.5. Exoholdak vagy bolygókísérők?	157
5.6. Diskusszió	159
5.7. Az eredmények hatása	161
6. Kitekintés	165
Hivatkozások	171
Az értekezés tézisei	193

1. fejezet

Bevezetés

1.1. Űrfotometria – a mikromagnitúdós forradalom

These incredible achievements would have been unthinkable just a few years ago.

Charles Boldennek, a NASA igazgatójának videoüzenete, 2. Kepler Tudományos Konf., Moffett Field, CA, USA, 2013. november

Napjainkban az asztrofizika egyik legaktívabb területe és motorja a Naprendszeren kívüli bolygók és bolygórendszerek felfedezése, kialakulásuk és fejlődésük vizsgálata. A Földről végezhető, periodikus radiálissebesség-változásra épülő exobolygó-keresési módszer mellett a fotometriai, azaz a tranzitok kimutatásán alapuló módszer is egyre nagyobb szerephez jut, sőt 2015 végére immár kétszer annyi megerősített fedési exobolygót ismerünk, mint amennyit radiálissebesség-mérésekkel sikerült felfedezni¹.

A fedési exobolygókat kereső űrprogramok (CoRoT, Kepler) közös jellemzője, hogy az ultrapontos fényességmérés által támasztott szigorú követelményrendszer miatt a csillagok fényváltozásának tanulmányozására is kitűnően használhatóak.

Amint a paraméterter új régióit kezdjük el kutatni, elkerülhetetlenül új jelenségeket, objektumcsoportokat találunk. Így volt ez az űrfotometriával is, ami nemcsak a fotometriai pontosság terén javított két-három nagyságrendet a korábbi technikákhoz képest, de az adatok folyamatosságában is új dimenziót nyitott az időben változó jelenségek megfigyelésében. Ezáltal olyan jelenségeket és objektumokat találtunk, amikre korábban nem is gondoltunk, és esélyünk sem lett volna felfedezni azokat az űrfotometria alkalmazása nélkül.

A dolgozat gerincét annak bemutatása adja, hogy hogyan formálta át alapjaiban a klasszikus pulzáló változócsillagok vizsgálatát az űrfotometria mikromagnitúdós forradalma. Két

¹<http://exoplanet.eu/>

olyan cefeida csillagokkal kapcsolatos vizsgálatot is közlök, amelyek még a Kepler felbocsátása előtt születtek, de az egyik esetében a módszert már sikeresen alkalmaztam űrfotometriai mérések esetében (fáziskésés, 3.1. fejezet), a másik pedig a K2 és más jövőbeli programok kiteljesedésével válik relevánssá (fémtartalom meghatározása kétmódusú cefeidákkal, 3.2. fejezet). Az exobolygós és csillagfizikai témák szoros összefonódásának szellemében a dolgozatban áttekintést adok egy, a Keplerrel kapott, exobolygókkal (közelebbről forró jupiterekkel) foglalkozó eredményről is. Ezenkívül részletesen foglalkozom az ismertett tudományos eredmények elérése közben lépten-nyomon felmerülő, az űrfotometriával kapcsolatos gyakorlati kérdésekkel is, mint amilyen a szaturált csillagok fényességmérése, sűrű csillagmezőkben a célpont és összemért elő- vagy háttércsillagok elkülönítése vagy éppen a mozgó objektumok fotometriája.

1.1.1. A csillagászati fotometria rövid története

Röviden érdemes áttekinteni az optikai hullámhossztartományban végzett csillagászati fényességmérés fejlődését és történetét. Már a távcső feltalálása előtti korszakokban feltűnt az égboltot figyelmesen szemlélő őseinknek, hogy bizonyos csillagok változtatják a fényességüket (Algol, Mira stb.), és a szabadszemes vagy később a távcsővel segített vizuális fényességbecslés nagyon sokáig egyeduralkodó volt. Ennek pontossága 0,1 magnitúdóra tehető, és a sok amatőr csillagász által, évtizedeken át végzett fénybecslések még a modern korban is vezetnek izgalmas felfedezésekre (pl. Kolláth, 1990b; Kiss és Szatmáry, 2002).

A XX. század első felében a fotográfia vált meghatározóvá. Az üvegfelületre felvitt fotografikus emulziókkal már nagy területeket lehetett leképezni, igaz, korlátozott (legfeljebb 0,01 magnitúdó) pontossággal és sokszor hosszú expozíciók árán. A következő meghatározó ugrás a fotoelektromos fotometria elterjedésével köszöntött be, ami nagyságrendi javulást jelentett a pontosságban, de mindössze egy objektumra korlátozta az egyszerre mérhető csillagok számát. Az egyedi mérések pontossága általánosságban néhány millimagnitúdó körül mozgott. Ennek a technikának a képességeit jól szemlélteti az az erőfeszítés, amellyel 35 nap alatt 342 órányi megfigyelést gyűjtöttek össze kilenc obszervatórium összefogásával Indiától a Kanári-szigeteken át az Egyesült Államokig a HR 1217 gyorsan forgó Ap (roAp) csillagról (Kurtz és mtsai, 2005). A Whole Earth Telescope² (Nather és mtsai, 1990) néven ismert összefogás 0,6–2,1 méteres távcsöveket használt, és ezek mindegyike azonos gyártmányú fotoelektron-sokszorozóval volt felszerelve. A kampány minden addigit meghaladó fotometriai pontosságot produkált: a csillag fő pulzációs módjához tartozó frekvenciacsúcs amplitúdójának a pontossága 14 mikromagnitúdó (μmag), a zajszint 80 μmag környékén volt, tehát jóval a millimagnitúdós szint alatt.

A digitális forradalom, a csillagászati CCD-k használata a '80-as évektől kezdődően ismét előtérbe helyezte a panoramikus, nagy területekre kiterjedő optikai fotometria lehetőségét. Habár a pontosság nem növekedett drasztikusan, a nagy dinamikus tartományban végezhető megfigyelések és az azonnali, digitális formában megjelenő adatok, a reprodukálhatóság és könnyű archiválás lehetősége kétségtelenül előnyt jelentettek.

²<http://www.physics.udel.edu/gp/darc/wet/index.html>

A következő minőségi ugrás a távcsövek és CCD-detektorok űrbe helyezése, a földi atmoszféra zavaró hatásaitól való mentesítése volt. De mielőtt a dedikált űrfotometriai programok ismertetésére térnénk, érdemes egy pillantást vetnünk az előfutárakra. Ha egy-egy objektumról alkalmilag, néhány különböző időpontban felvett észlelést nem tekintünk idősoroknak, akkor az első komolyabb űrfotometriai idősort a Hipparcos asztrometriai mesterséges hold nevéhez köthetjük. Az alapvetően a csillagok pozícióit mérő műhold mintegy 120 000 fényes csillag fényességét is rögzítette 1989 és 1993 között (van Leeuwen és mtsai, 1997), mintegy 110 alkalommal. Az így kapott fénygörbék között tízezernél is több változó fényességű objektumot találtak a kutatók, amelyek több mint kétharmada korábban ismeretlen volt. A műhold fő tevékenysége mellett a Tycho-kísérletben több mint 2,5 millió csillagról készített kétszín-fotometriai idősort (Hog és mtsai, 1997). Ezek az eredmények a fénygörbék korlátozott pontossága miatt inkább csak jelzésértékűek voltak. Egyfelől megmutatták, hogy még a fényes, nagy amplitúdójú változócsillagok zöme sem volt korábban ismert, másrészt előrevetítették az idősoros űrfotometria lehetőségeit.

A jól ismert Hubble-űrtávcső egyik legfontosabb kulcsprogramja távolabbi galaxisokban található cefeida típusú változócsillagok fénygörbéinek felvétele és ezek segítségével a Hubble-állandó pontosítása volt (Freedman és mtsai, 2001). Noha ezek a mérések is fotometriai idősorok voltak, a halvány objektumokról készült, s a csillagonkénti mindössze tucatnyi mérési pont a kozmológiai vizsgálatokon kívüli, részletes analízis szempontjából kevésbé volt vonzó. Fontos megemlíteni, hogy a magával a Hubble-űrtávcsővel (Edmonds és Gilliland, 1996; Stello és Gilliland 2009) és az iránytartást segítő szenzoraival (Fine Guidance Sensors, FGS) is sikerült vörös óriás csillagokban Nap-típusú oszcillációt kimutatni (Kallinger és mtsai, 2005; Gilliland és mtsai 2011).

A valódi űrfotometriai kísérleteknek még egy érdekes előzményét említhetjük: ez pedig a WIRE (Wide Field Infrared Explorer). A műhold, ahogy neve is mutatja, eredetileg infravörös méréseket végzett volna, de a hűtésért felelős kriosztát a felbocsátás után nem sokkal meghibásodott, és a hűtőközeg elillant. Így az egész eszköz használhatatlanná vált, de egy zseniális ötlettel az űrtávcső navigálására szolgáló kis 5 cm-es segéd-távcsővel fényes csillagokról fotometriai idősorokat kezdtek el mérni. Az égen látható legfényesebb csillagok közül 240-et észlelt a WIRE 2000 és 2006 között, némelyeket 5 héten keresztül követett millimagnitúdós mérési pontossággal. Néhány érdekesebb az eredmények közül: Napunk szomszédján az α Centaurin (Fletcher és mtsai, 2006), az Arcturuson (α Boo, Retter és mtsai, 2003), a Procyonon (α CMi, Bruntt és mtsai, 2005) és tucatnyi vörös óriáscsillagon sikerült Nap-típusú oszcillációkat kimutatni. Kiderült, hogy az Altair (α Aql) is változócsillag: a legfényesebb ($V=0,8$ mag) ismert δ Scuti típusú változó legalább hét különböző periódussal pulzál (Buzasi és mtsai, 2005). A WIRE mérései fontos részét képezték annak a felfedezésnek is, hogy a Polaris (α UMi) – ami jelenleg nagyon kis fényváltozást mutató cefeida változócsillag – amplitúdója újra növekszik. Érdekességképpen megemlíthető, hogy az α UMi-t és néhány vörös óriáscsillagot is a Solar Mass Ejection Imager (SMEI) műszerrel a Coriolis műhold fedélzetén is megfigyelték (Tarrant és mtsai, 2007; 2008), amire szintén egy, az űrfotometria hajnalát jelentő űreszközként tekinthe-

tünk. A Polaris-szal kapcsolatos eredményeket részletesebben a 3.1. fejezetben tárgyalom.

Ismerkedjünk meg most a mikromagnitúdós forradalom zászlóshajójának számító amerikai Kepler-űrtávcsővel, aminek adataival a dolgozatomban tárgyalt eredmények jelentős részét elértem, és két közvetlen előfutárával, a kanadai MOST-tal és a francia–európai CoRoT-val, amiknek a méréseit szintén számos vizsgálatban felhasználtam, s melyek közül néhányat a dolgozatom későbbi fejezeteiben is említek.

1.1.2. MOST

The Little Telescope That Could

Jaymie Matthews, MOST PI

Kanada első csillagászati mesterséges égitestje úttörő volt azon működő űreszközök között, amiket kifejezetten idősorok mérésére terveztek. A MOST³ 2003. június 30-án állt Föld körüli pályára, és több mint 10 évig működött⁴. Az űreszköz céljai voltak a forró, nagy tömegű csillagok gyors változásainak vizsgálatai, csillagszeizmológiai kutatások, valamint csillagukhoz közel keringő bolygók (ún. forró jupiterek) visszavert fényének kimutatása. A tervezésnél a minél nagyobb megbízhatóságra és a minél kisebb költségre törekedtek. A kis méret (65x65x30 cm és 60 kg) és az egyszerű felépítés mindkét szempontból előnyös. A nagy megbízhatóságot szolgálta például, hogy az optikai rendszer semmilyen mozgó alkatrészt sem tartalmaz. A műhold fő műszere egy 15 cm átmérőjű Makszutov-teleszkóp, amihez két 1024x1024 pixeles chipet tartalmazó CCD-kamera csatlakozik. Az egyik chippel folyik a tudományos észlelés, míg a másik vezetőcsillagokat mér folyamatosan a pontos irányban tartáshoz. A kamera előtt egy széles sávú színszűrő található, ami a 350–700 nm közötti hullámhosszúságú, nagyjából az optikai tartományt lefedő fényt engedi át. A Föld egyenlítőjére majdnem merőleges pályasíkja, az ún. poláris pályája tette lehetővé, hogy egy adott területről akár 60 napig folyamatosan gyűjtse az adatokat.

A MOST összes eredményének összefoglalására nem vállalkozhatom, mindössze néhány érdekesebb eredményt emelek ki. A kanadai űrtávcső felfedezte az 55 Cnc e jelű szuperföld megjósolt fedéseit. Az exobolygó egy szabad szemmel is jól látható csillag bolygórendszeréhez tartozik, s mint ilyen, egészen egyedi (Winn és mtsai, 2011). Az űrtávcső kimérte továbbá a fiatal Naphoz hasonló csillagok (ϵ Eri, Fröchlich, 2007; κ^1 Cet, Walker és mtsai, 2007) differenciális rotációját, Nap-típusú oszcillációt mutatott ki egy vörös óriáscsillagon (ϵ Oph, Kallinger és mtsai, 2008), és megerősítette azok létét a Procyonon (Huber és mtsai, 2011). Jelen dolgozat szempontjából lényeges momentum, hogy a kanadai "bőröndteleszkóp" vizsgált először részletesen, hosszú ideig RR Lyrae csillagot az űrből, ráadásul rögtön egy viszonylag ritka fajtát: a kétmódusú AQ Leonist (Gruberbauer és mtsai, 2007). A csillaggal kapcsolatos eredményeket a 4.2. fejezetben érintem részletesebben.

³Microvariability & Oscillations of STars

⁴Mivel az űreszköz még működik, de a Kanadai Űrügynökség megszüntette a program támogatását, már csak olyan egyedi kutatócsoportokat szolgál ki az űrtávcső, akik ki tudják fizetni az üzemeltetés költségét.

A következőkben tárgyalt két űrmisszió minden szempontból teljesen más nagyságrendet képvisel, mint a gyakran csak nanosatellitaként emlegetett MOST.

1.1.3. CoRoT

We're entering a golden era for stellar physics, and this is a result of the launch of the French-led CoRoT, and NASA Kepler missions

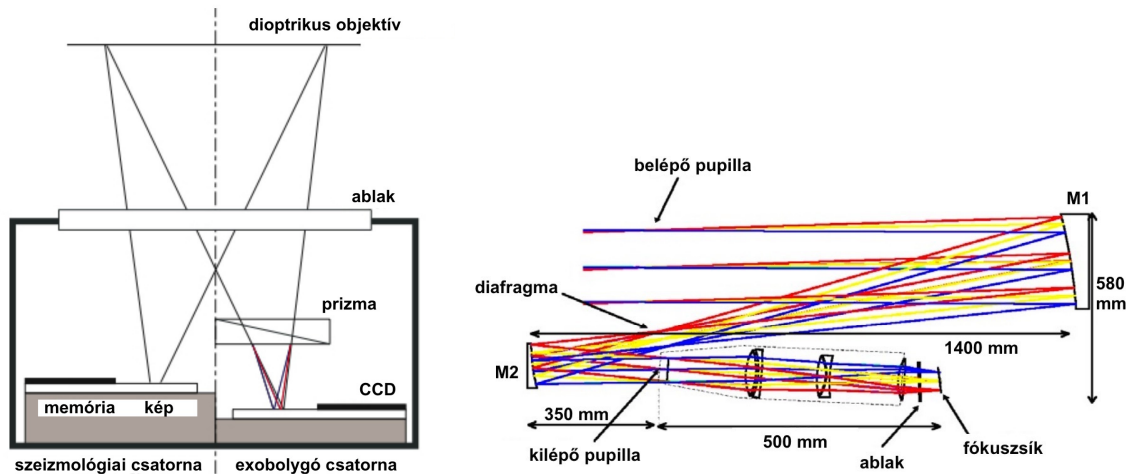
*William J. Chaplin és Andrea Miglio,
Annual Reviews of Astronomy and
Astrophysics, 2013, 353-392*

Bár korábban is voltak európai tervek kettős (exobolygó-kutató és csillagszeizmológiai) célzatú űrtávcsövek építésére (ilyen volt például a 2003-ban törölt Eddington misszió), 2006. december 27-ig kellett várni, amíg a CoRoT⁵ műhold egy Szojuz-rakéta csúcsán a magasba emelkedett. A francia űrügynökség, a CNES⁶ 2000-ben határozott a CoRoT megépítéséről, ami mintegy öt évet vett igénybe. Időközben a CoRoT misszió fokozatosan egyre inkább nemzetközivé vált. 2001-ben az Európai Űrügynökség (ESA) is bekapcsolódott a munkálatokba.

A MOST-éhoz hasonló poláris pálya lehetővé tette, hogy a CoRoT majdnem fél évig egy kiválasztott égi területet mérjen. Ehhez a távcsövet évente kétszer 180 fokkal elforgatták. A CoRoT így két, 10 fok sugarú kör által határolt területet tudott megfigyelni: egyik a galaktikus centrum, másik az anticentrum irányában esik. A CoRoT-űrtávcső trapéz alakú főtükre egy kb. 27 cm átmérőjű tükör fénygyűjtő képességének felelt meg. A távcső fókuszában négy, egyenként 2048x2048 pixelt tartalmazó CCD-chip foglalt helyet. A pixelek 13,5 mikrométeresek voltak, és az 1,2 m-es fókusz távolság mellett 2,32 ívmásodperc/pixeles felbontást eredményeztek, vagyis az égen egy-egy chip 1,4x1,4 fokos területet fedtek le. A négy chipből kettő-kettő szolgált az exobolygó-átvonulások megfigyelését, illetve az asztroszeizmológiát (1.1 ábra). A sáv szélesség nem tette lehetővé az egyedi CCD-képek Földre sugárzását, ezért a szeizmológiai területeken CCD-nként öt csillagot mért a távcső. Az expozíciós idő 32 másodperc volt, kivételes esetben lehetőség volt 1 másodperces mintavételezésre is. Az exobolygós terület CCD-chipje fölött pedig egy prizma helyezkedett el, ami minden egyes csillagról egy kis felbontású színeképet készített. A fényesebb csillagok esetén három színben mért fluxust képeztek (kék, zöld, vörös), míg a halványabb csillagokra a teljes fluxust összegezték. Az exponálási idő az exobolygós területen 32 másodperc volt. A mért értékekből a legtöbb csillag esetén 16-ot még az űreszköz fedélzetén összeadtak, így 512 másodperc lett a tényleges mintavételi idő. Az exobolygó-kereső területeken lévő összes objektum – a mért 11,5 és 16 mag közötti fényességtartományban átlagosan 12000 csillag – adatát lesugározta a műhold, sőt lehetőség volt mintegy 500 kiválasztott csillag esetében az eredeti 32 másodperccel mintavételezett adatsor vizsgálatára is (Baglin és mtsai, 2006).

⁵Convection Rotation and planetary Transits

⁶Centre National d'Études Spatiales



1.1. ábra. **Balra:** A CoRoT CCD-inek elrendezése. Figyeljük meg az eltérő helyzetet a fókusz-síkhoz képest, ami a defókuszálás révén fényesebb csillagok észlelését tette lehetővé a szeizmológiai csatornán. **Jobbra:** A CoRoT optikai (off-axis) elrendezése. M1 és M2 a fő- és segédtükörök jelölék (Auvergne és mtsai, 2009).

E sorok írásáig 32 exobolygó felfedezését jelentette be a CoRoT exobolygóvadász csoportja. A jelöltek száma ennél sokkal nagyobb, de további mérések szükségesek a megerősítésükre. A biztos CoRoT-bolygók túlnyomó többsége csillagához közel keringő gázóriás, azaz forró jupiter típusú, néhány Neptunusz-méretű, de még barna törpecsillag is van közöttük. A CoRoT-7b sugara azonban mindössze 1,58-szorosa a Földének, tömege pedig 4,8-szorosa, sűrűsége $5,6 \text{ g/cm}^3$, csillagától mindössze 0,0172 Cs.E.-re kering. Ez az egyik első felfedezett kőzetbolygó (Léger és mtsai, 2009). A CoRoT-9b-nek, ami amúgy szintén egy a gázóriások közül, 95 napos keringési ideje érdemel figyelmet. Ez felfedezésekor a leghosszabb keringési idő volt az összes fedési exobolygó között (Deeg és mtsai, 2010).

Az asztroszeizmológiai eredményekre térve: az egyik legnagyobb áttörés az volt, hogy vörös óriásoknál először sikerült minden kétséget kizáróan, több száz csillag esetében egyedi Nap-típusú oszcillációs módusokat azonosítani, és azok élettartamát is meghatározni (de Ridder és mtsai, 2009). Ezek alapján radiális és nemradiális módusok egyaránt jelen vannak ezekben a csillagokban, és a módusok több hétig-hónapig élnek, mielőtt lecsengenek. Hasonlóképpen, fősorozati és szubóriás csillagokban is részletesen lehetett vizsgálni a Nap-típusú oszcillációk paramétereit (Michel és mtsai, 2008; Appourchaux és mtsai, 2008). Szintén először tudtak nagy tömegű csillagokat szeizmológiai vizsgálatnak alávetni. A CoRoT által megfigyelt vörös óriásokat pedig galaxisszerkezeti vizsgálatokra is remekül fel lehetett használni (Miglio és mtsai, 2009). Ezenkívül δ Scuti csillagok nagyszámú pulzációs periódusát, egzotikus kettőscsillag-rendszereket és fiatal csillagok rezgéseit is segített megérteni az űreszköz. Mindez nagyszerű nyitánya volt a következő évek Kepler-eredményeinek.

Az űrtávcső 2009 márciusáig komolyabb hiba nélkül üzemelt, amikor is az egyik adatcsatornával (gyakorlatilag az egyik szeizmológiai és az egyik exobolygó-kereső CCD-vel) megszűnt a kapcsolat. A hibát többszöri kísérlet ellenére sem sikerült kijavítani. Az eredetileg 2,5 évre tervezett misszió 2012-ig üzemelt egy CCD-vel, amikor egy újabb hiba történt: 2012 novembe-

rében – valószínűleg a fedélzeti számítógép tápellátását végző egység hibája miatt – a kapcsolat megszűnt az űreszközzel. Többszöri sikertelen hibakeresési és újraindítási kísérlet után 2013 júniusában a CoRoT misszió hivatalosan is véget ért.

1.1.4. A Kepler-űrprogram

... to search for ... planets with a photometric system ... approximately 10^4 stars must be monitored continuously ... a moderate aperture (~ 1 m), wide field of view ($\sim 50^\circ$) telescope is required.

Borucki & Summers, 1984

Története

A NASA Kepler-űrtávcsöve 2009. március 7-én indult el a floridai Cape Canaveral űrközpontból. Érdemes röviden felidézni, hogy mi vezetett korunk legpontosabb, optikai tartományban működő űreszközének kifejlesztéséhez. Már 1971-ben felvetették a bolygóátvonulások (tranzitok) keresésének lehetőségét (Rosenblatt, 1971). William Borucki, a Kepler-program megálmodója és későbbi vezetője pontosította a számításokat és megmutatta, hogy nagyszámú csillag megfigyelésével esély van a Jupiterhez hasonló bolygók felfedezésére (Borucki és Summers, 1984). A számításokból az is kiderült, hogy Föld-méretű bolygók fedés útján történő kimutatása csak űreszközökkel lehetséges, hiszen míg a Jupiternek egy Naphoz hasonló csillag esetén kb. 1% fényességcsökkenést okoznak, addig egy Föld-analóg mindössze 1/10 000 résznyit. A teljesség kedvéért megemlíjük, hogy Otto Struve már 1952-ben leírta az exobolygó-keresés mindkét alapvető technikáját: a csillag radiálissebesség-változásán és az átvonuláson alapuló módszer lényegét is (Struve, 1952).

A '80-as években a program előkészületeként elkezdtek kísérletezni a nagy érzékenységsű fotoelektron-sokszorozókkal a NASA támogatásával. A legnagyobb problémát a használt optikai kábelek kiforratlansága miatti nagy zaj okozta. A Kepler-misszió elődjét – akkor még FRESIP (FRequency of Earth-Size Inner Planets, azaz Föld-méretű Belső Bolygók Gyakorisága) néven – először 1992-ben javasolták a NASA-nak. A döntőbizottság kiemelte a javaslat tudományos értékét, de feltétlenül bizonyítékot szeretett volna arra nézve, hogy a kívánt pontosságú fotometria megvalósítható. Ekkoriban már a misszió egyéb asztrofizikai „mellékhatásai” is nyilvánvalóvá váltak, melyek közé tartozott az asztroszeizmológia, a csillagok aktivitásának, forgásának vizsgálata, valamint gyakorlatilag mindenféle fényváltozást mutató objektum hihetetlenül pontos fényességmérésének ígérete. Ide tartoztak nemcsak a pulzáló változócsillagok, de a fedési kettősök, a kataklizmikus változók, de még a kvazárok és egyéb aktív galaxismagok is. 1994-ben újra felterjesztették a missziót, a maihoz hasonló méretű főtükörrel, és legfontosabb változásként a fotoelektron-sokszorozók helyére már CCD-kamerákat terveztek. A NASA ekkor a költségek mértékét a Hubble-űrteleszkópéhoz hasonlónak vélte, és mint túl költséges programot, nem támogatta.

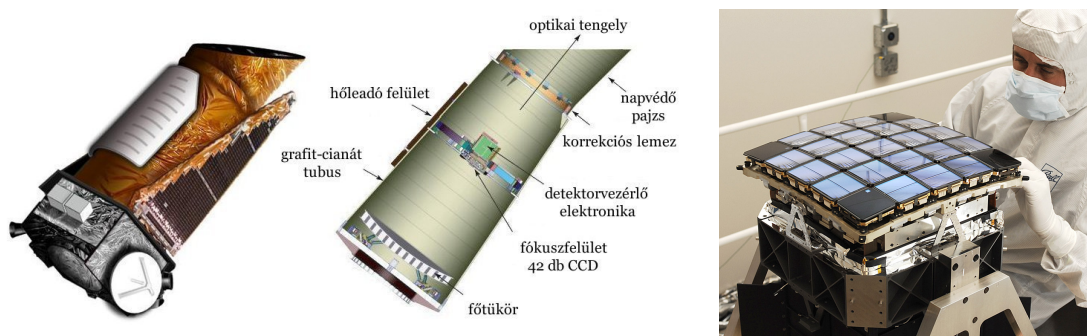
William Borucki csoportja nem adta fel a próbálkozást. A Lick Obszervatórium alagsorában tovább kísérleteztek a CCD-detektorokkal, és fantasztikus, 5×10^{-6} -os fotometriai pontosságot értek el. 1996-ban újra megpróbálták az akkor már Kepler névre keresztelt űrtávcső elfogadását keresztülvinni a NASA-nál. A költségeket jelentősen csökkentették, hogy beleférjenek a Discovery-osztályú missziókra biztosított keretbe. A javaslat támogatását ismét elutasították, most azzal az indokkal, hogy még soha senkinek nem sikerült demonstrálnia, hogy lehetséges több ezer csillag egyidejű, automatikus fotometriája. A bizottság azt javasolta, hogy építsenek egy ilyen fotométert földi körülmények között, bizonyítva ezzel, hogy a feladat kivitelezhető. A műszer el is készült a Lick Obszervatórium egy üresen álló kupolájában. A fotométert és a kupolát távolról, a NASA San Francisco melletti Ames Kutatóközpontjából vezérelték. 1998-ban egy látómezőben 6000 csillagról kaptak megfelelő minőségű fotometriai adatot. Még egy sikertelen pályázati forduló következett, ahol a bírálók nem látták alátámasztottnak, hogy a műszer az űrbeli körülmények között is hozni fogja a Föld típusú bolygók kimutatásához szükséges pontosságot. Ekkor egy újabb laboratóriumi műszer megépítése volt soron, ami az összes elképzelhető zajforrást is szimulálta. Ennek sikere és a 2000-ben felfedezett első fedési exobolygó végül meghozta a várva várt áttörést: a Kepler-misszió 2001 decemberében zöld utat kapott, és megkezdődhetett az űrtávcső kivitelezése.

A Kepler-űrtávcső jellemzői

Milyen lett végül a 30 éve megálmodott Kepler-űrtávcső, és melyek voltak azok a tudományos kíváncsalmak, amelyek meghatározták felépítését? A program elsődleges célja a lakhatósági zónában keringő, Földhöz hasonló, fedési exobolygók kimutatása. A program lényeges eleme – a CoRoT-hoz hasonlóan – a csillagok szeizmológiai vizsgálata. Ez – bár önmagában is érdekes – fontos pillére a talált exobolygók vizsgálatának: a csillag szeizmológiából meghatározott pontos sugara és kora alapvető információkat szolgáltat a bolygókról és a bolygórendszer fejlődéséről. Elég, ha arra gondolunk, hogy a fedésből a csillag és a bolygó sugarának aránya adódik, így ha a csillag tömegét ismerjük, a szeizmológia segítségével a bolygó átlagsűrűsége is számolható, ami a kémiai összetételére és jellegére (gáz- vagy kőzetbolygó) ad kézzelfogható adatot. A Kepler tudományos céljának megvalósításához egyrészt legalább 100 ezer csillag folyamatos megfigyelése kellett, másrészt extrém pontos és éveken keresztül stabil fényességmérésre volt szükség. A követelmény 20 ppm^7 fotometriai pontosság volt egy Föld-méretű planéta 12 magnitúdós, Naphoz hasonló csillag előtti, 6,5 óráig tartó átvonulása alatt. A műszernek (és az adatredukciós lépéseknek) képesnek kell lenniük az évenkénti egyetlen, 10^{-4} relatív fényességcsökkenést jelentő tranzit kimutatására is.

A fenti kritériumokat teljesítő rendszer felépítése a következő (1.2 ábra bal oldala): a műszer a pontos fotometria kivitelezésére épített egyetlen nagy fotométernek fogható fel. Optikáját tekintve egy 1,4 méter átmérőjű F/1-es nyílászviszonyú, 95 cm szabad apertúrájú Schmidt-teleszkóp. Főtükre 85%-kal könnyített, extrém alacsony hőtágulási együtthatójú üvegből készült. A fókuszában elhelyezett 42 db 2200×1024 pixeles CCD-chip (1.2 ábra jobb oldala) 105

⁷part per million, milliomodrász



1.2. ábra. **Balra:** a Kepler-űrtávcső sematikus rajza, keresztmetszete és főbb alkatrészei. **Jobbra:** a Kepler 42 db CCD-je a földi laboratóriumban. Figyeljük meg a görbült fókuszfelületre illeszkedő elrendezést. Forrás: NASA.

négyzetfokos terület egyidejű leképezését teszi lehetővé. Az észlelések fehér fényben, a 430–840 nm közötti hullámhossztartományban történnek. Sem színszűrők, sem a detektorokat védő zár (shutter) nincs az optikai útban. A Kepler eredeti programja során egyetlen területet észlelt folyamatosan, melynek középpontja a RA: $19^{\text{h}}22^{\text{m}}40^{\text{s}}$, DEC: $+44^{\circ}30'00''$ ($l=76,32^{\circ}$ $b=+13,5^{\circ}$) koordinátákkal jellemezhető, és a Cygnus–Lyra csillagképek irányába esik. A terület kiválasztását meghatározó feltételek egyrészt az elérhető fősorozati csillagok maximális száma, másrészt a csillagsűrűség elviselhető mértéke, harmadrészt a földi kiegészítő mérésekhez az északi féltekéről elérhető műszerek voltak. A fotometriai stabilitást és a terület állandó láthatóságát 372,5 nap keringési idejű, Nap körüli, Föld-követő, ún. Earth-trailing pálya garantálta, stabil termikus és sugárzási környezetet biztosítva az űreszköznek. A látómező beállítását úgy tervezték, hogy a legfényesebb csillagok a detektorok között lévő résekbe essenek.

A tudományos program tervezett időtartama 3,5 év volt, fenntartva a lehetőséget akár a több éves hosszabbításra is, amit a hardverek és a kisebb manőverekhez szükséges hajtóanyag lehetővé tettek. A folytonos energiaellátás érdekében körülbelül negyedévente 90 fokkal elforgatták a távcsövet tengelye körül, ezáltal a napelemek mindig a Nap irányába néztek. Ezek a forgatások határozták meg a megfigyelési negyedeket (quarterek, Q0–Q17). A Kepler bolygókereséshez és csillagszeizmológiához használt célpontjai a 9–16 magnitúdó fényességtartományba estek, kivételes esetben azonban ennél fényesebb objektumok fotometriájára is volt mód, ahogy azt a 2. fejezetben részletezem. A halvány objektumokat tekintve pedig elvileg akár 20 magnitúdós vagy halványabb objektumok mérése is megoldható volt. A CCD-k nagyméretű pixelei miatt a képskála kb. 4 ívmásodperc. A telítődés elkerülése érdekében 6 másodpercenként történt a kiolvasás, a fénygörbék közül néhány 1 perces (short cadence), a többség pedig 30 perces integrációs időnek (long cadence) megfelelő összegezéssel tárolódott. Az adatok letöltése, valamint a vezérléshez szükséges parancsok és az új célpontok feltöltése havonta egyszer történt. Mivel 30 napig az összes adatot nem tudták tárolni, ezért csak előre kiválasztott objektumok adatait (az összes pixel kb. 5%-a) tárolták, ezt tömörítették, majd töltötték le. Időnként, tesztelési céllal a teljes látómező minden pixelét eltárolták. A Kepler-programban tehát csak előre meghatározott célpontok voltak észlelhetők, ezeket előzetesen kellett kiválo-

gatni. Összesen mintegy 15 millió ismert forrás esik az eredeti Kepler-mező irányába.

A Kepler eredeti missziója során alapvetően három különböző kategóriába eső célpontot figyelt meg: a) bolygókeresésre használt, b) asztroszeizmológiai és c) Guest Observer ("vendégészlelő") célpontokat.

a) A fő program 150 000, főként késői (F-K színképtípusú) fősorozati csillag folyamatos megfigyelését jelentette. Az elsődleges cél a Földhöz hasonló, lakhatósági zónában keringő exobolygók átvonulásainak kimutatása volt, ezért ezeket a célpontokat a misszió teljes élettartama alatt folyamatosan megfigyelték. A komplex fényváltozást mutató, vagy óriáscsillagnak bizonyuló célpontok fokozatosan kikerültek a programból.

b) Az asztroszeizmológiai célpontok kettős célt szolgáltak. Egyrészt a – Kepler által felfedezett – bolygóval rendelkező csillagok fizikai tulajdonságainak pontosítását tették lehetővé, másrészt a Hertzsprung–Russell-diagram minden szegletében jelenlévő pulzáló változócsillagok jobb megértését is elősegítették. Mintegy 5000 ilyen csillagot figyelt meg a Kepler. Az ultrapontos Kepler-űradatok asztroszeizmológia kiaknázására jött létre a nemzetközi Kepler Asztroszeizmológiai Tudományos Konzorcium (KASC), amelynek több mint 600 kutató tagja. A különböző csillagtípusok vizsgálatára 13 munkacsoportot hoztak létre, ezek több alcsoportra tagolódnak, jellemzően a földi támogatás, adatfeldolgozás és modellezés szerint. A mirák és félszabályos változók vizsgálatát Kiss László (MTA CSFK CSI), míg az összevont RR Lyrae és cefeida munkacsoportot jelen sorok írója vezeti. Az asztroszeizmológiai célpontok kiválasztása, jelölése a KASC és a munkacsoportok vezetőinek feladata volt.

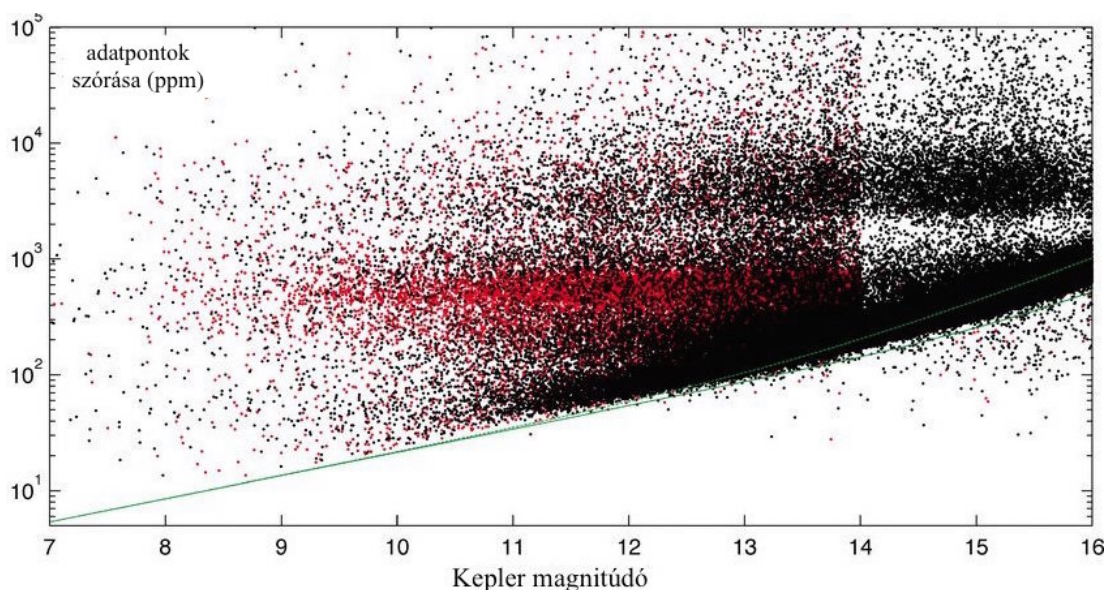
c) Az évente meghirdetett, más úreszközökön is megszokott, Guest Observer program a Kepler látómezejébe eső egyéb pontszerű és kiterjedt asztrofizikai objektumok (pl. aktív galaxismagok, nóvák, törpenóvák) nagy pontosságú fotometriai vizsgálatát célozta, amire bárki adhatott be tudományosan szempontból kellően alátámasztott pályázatot. A Guest Observer programban mintegy 3000 célpont észlelésére volt lehetőség. A GO programokban a KASC RR Lyrae és cefeida munkacsoport rendszeresen, eredménnyel szerepelt.

Az eredeti Kepler-látómező megfigyelésével született adatok többféle formában hozzáférhetők. A fénygörbéken kívül az egyedi pixelek idősorait tartalmazó fájlok (target pixel fájlok) éppúgy elérhetők, mint a nagyjából havonta egyszer készített teljes látómező képek⁸, és az egyéb, kiegészítő, adatokat (például fedélzeti hőmérséklet-adatokat, kalibrációs méréseket stb.) tartalmazó fájlok. Az adatok nagy része átlagosan egy év védett időtartam után vált nyilvánossá, a KASC munkacsoportjai természetesen megkapták az általuk kért adatokat, és szintén néhány hónap védettséget élveztek. Hasonló volt a helyzet a Guest Observer program során megfigyelt csillagokkal is. Ma már azonban minden, az eredeti Kepler-mezőben történt megfigyelési adat publikus, amik a MAST⁹ adatbázisból tölthetők le. A KASC konzorcium saját adatbázist is üzemeltet, ami regisztrálás után érhető el¹⁰. Itt az egyes munkacsoportok által feldolgozott adatok (korrigált fénygörbék, pulzációs frekvenciák, amplitúdók, földi kiegészítő

⁸Full Frame Images, FFI

⁹Mikulski Archive for Space Telescopes, <https://archive.stsci.edu/>

¹⁰Kepler Asteroseismic Science Operations Center, <http://kasoc.phys.au.dk/>



1.3. ábra. Fél órás (long cadence) adatpontok szórása milliomodrészben. Minden pont egy-egy csillagot jelöl, melyeket a Q1 negyedben mértek. A zöld vonal a mérési bizonytalanság alsó határát jelöli, amelyet a fénygörbe előállítására alkalmazott eljárásán keresztül számolva kaptak. A főszorozati csillagok feketék, míg az óriásokat vörös pontok jelölik. Jól láthatóan az óriások változékonnyabbak. A Kepler a fényesebb csillagok esetében akár 10 ppm pontosságot is képes volt elérni (Jenkins és mtsai, 2010).

mérések stb.) is megtalálhatók.

A Kepler négy év alatt több mint 10 milliárd 30 perces mintavételezésű adatpontot rögzített a közel 200 000 célpontjáról, ehhez jön még nagyjából 1 milliárd 1 perces mintavételezésű adatpont, összesen néhány ezer célpontból. Az 1.3 ábrán a Kepler fél órás (long cadence) adatpontjainak az egyedi pontossága látható a fényesség függvényében. A fekete pontok a főszorozati (törpe, $\log g > 4$), a vörösek az óriáscsillagokat ($\log g < 4$) jelölik. Jól látható, hogy az óriások változékonnyabbak, ahogy az várható. Az ábráról az is leolvasható, hogy a Kepler elérte az elméletileg számított fotometriai pontosságot, és a legfényesebb csillagok esetében néhány ppm hibával számolhatunk. Az adatpontokat természetesen a szisztematikus hibák kiszűrése után ábráztuk, melyekről bővebben a 2.2. fejezetben esik szó.

Az egyik modul (2 db CCD) egy év után meghibásodott, és nem szolgáltatott többet adatokat. Ez egyszerre csak a látómező 1/21-ed részét érintette, a távcső forgatása miatt pedig a látómezőnek kb. 19%-ában nem lettek folyamatosak a fénygörbék. A nominális misszió legvégén még egy modul elromlott, ez a Kepler utódmissziójában, a K2-ben (1.1.5. fejezet) megfigyelhető területek nagyságának további csökkenését eredményezi.

A Kepler legfontosabb bolygós eredményei

A NASA Kepler-missziójának elsődleges célpontjai a Naphoz hasonló csillagok körül, a lakhatósági zónában keringő – akár éves keringési periódusú – fedési (közvetlen) bolygók voltak. A tudományos célok megvalósításához egyrészt nagyszámú csillag folyamatos megfigyelését kellett biztosítani, másrészt extrém pontos és éveken keresztül stabil fényességmérésre volt szük-

ség. A Keplernek köszönhetjük a legtöbb megerősített exobolygót és bolygójelöltet. Ezenkívül olyan felfedezésekkel világítható meg úttörő tevékenysége, mint

- az első többszörös fedési rendszer, a Kepler-9 (Holman és mtsai, 2010), és ugyanebben a rendszerben az első tranzitidőpont-változás¹¹ detektálása a bolygók közötti gravitációs kölcsönhatás bizonyítékaként,

- sok többszörös exobolygós rendszer, köztül a hét fedési bolygót tartalmazó Kepler-90 felfedezése (Cabrera és mtsai, 2014; Schmitt és mtsai, 2014),

- kettőscsillagok körül keringő bolygó(k), pl. a Kepler-16 felfedezése (Doyle és mtsai, 2011).

A Kepler adataira alapuló közvetlen megfigyelési és az azokat felhasználó elméleti eredményeket nagyon hosszan lehetne sorolni, ehelyett azt érdemes kiemelni, hogy az űrprogram legfontosabb eredménye mégis a planéták előfordulási valószínűségének megmérése a Nap környezetében. A Kepler kezdeti, első két évnnyi adatainak alapján, a rövid periódusú (<85 napos keringési idejű) bolygók figyelembevételével azt találták, hogy a neptunuszok, szuperföldek és Föld-méretű bolygók nagyon gyakoriak. Az is megbecsülhető, hogy a csillagok 16%-ának van Föld-méretű bolygója. Figyelembe véve a Kepler detektálási bizonytalanságát a kisméretű planéták tartományában, a bolygórendszerek inklinációjának véletlenszerű eloszlását, és integrálva a teljes bolygóméret-eloszlásra, azt kapjuk, hogy a csillagok $68,9 \pm 4,7\%$ -ának van rövid keringési idejű bolygója (Fressin és mtsai, 2013). A valamivel hosszabb keringési idejű (max. 1–2 év) bolygók statisztikájának feldolgozására még várni kell a Kepler adatai alapján, az ennél is távolabb keringő bolygók gyakoriságát pedig más technikák alkalmazásával (pl. mikrolencsézés, közvetlen képalkotás) fogjuk tudni megbecsülni. A fentiek alapján is kitűnik azonban (jó egyezésben a radiálissebesség-felmérések eredményeivel), hogy a bolygókeletkezés természetes velejárója a csillagkeletkezésnek, és a bolygó nélküli csillagok lehetnek a kivételek.

2016 februárjáig a Kepler az eredeti látómezejében 4706 bolygójelöltet talált, amiből 1039 megerősített bolygó. A megerősítés (konfirmáció) kis részben származik a hagyományos, radiálissebesség-mérések útján történő tömegmérésből, a Kepler halvány jelöltjeihez illeszkedve több alternatív módszert is kidolgoztak. A megerősített planéták között 368 többszörös rendszer van, ahol a fedést okozó objektumok bolygó mivoltáról meggyőződni jóval könnyebb, hiszen annak a valószínűsége, hogy nem bolygórendszerről van, hanem például két, egy irányba látszó fedési kettőscsillagról, vagy hasonló elrendezésről, drasztikusan lecsökken. Az összes exobolygófedéshez hasonló jelet létrehozó asztrofizikai konfiguráció kizárását *validációnak* nevezzük (Fressin és mtsai, 2011). Ha a többszörös bolygórendszer planétáinak egymásra gyakorolt gravitációs hatása kimutatható a fedésidőpontok bekövetkezésének pontos periodicitástól való eltéréseiből, az szintén megerősíti, hogy többszörös bolygórendszerről van szó (Steffen és mtsai, 2013). Végül érdemes arra is kitérni, hogy a fenti mintában legalább tucatnyi, két Föld-sugárnál nem nagyobb méretű planéta¹² kering lakhatósági zónában.¹³

¹¹TTV, Transit Timing Variation

¹²<http://www.nasa.gov/kepler/discoveries>

¹³A lakhatósági zóna legegyszerűbb definíciója az, hogy a bolygó felszínén folyékony víz legyen, de ez a meghatározás nagyon sok egyéb paramétert nem vesz figyelembe (légkör, geológiai folyamatok stb.).

A Kepler csillagokkal kapcsolatos legfontosabb eredményei

Említettem, hogy az extrém pontosságú fényességmérés a csillagok foltjai, kísérői okozta parányi fényváltozások kimutatására éppúgy alkalmas, mint sztochasztikusan gerjesztett (Nap-típusú) rezgési módusok vizsgálatára, ez pedig a csillagok fizikai paramétereinek nagy pontosságú meghatározását teszi lehetővé. A Kepler-adatokból a csillagok globális paramétereit (sűrűségét, sugarát, tömegét, korát) is néhány százalékpontossággal határozhatjuk meg az asztroszeizmológia segítségével. Ily módon az exobolygó kutatás és a csillagok asztrofizikájának gyümölcsöző szimbiózisa valósult meg, amit olyan eredmények fémjeleznek, mint például

- a HAT-P-7 bolygós csillag sugarának a korábbi méréseknél egy nagyságrenddel pontosabb meghatározása asztroszeizmológiai módszerekkel (Christensen-Dalsgaard és mtsai, 2011),
- egy 11,2 milliárd éves bolygórendszer, a Kepler-444 felfedezése, ahol a központi égitest korát csillagszeizmológia segítségével állapították meg (Campante és mtsai, 2015),
- egy, a Merkúrnál is kisebb méretű exobolygó tranzitjainak kimutatása (Kepler-37b), ahol a központi égitest (így közvetve a planéta) paramétereinek meghatározásában is a csillagszeizmológia volt a kutatók segítségére (Barclay és mtsai, 2013),
- a központi csillag forgástengelyének és a hozzá tartozó bolygók pályája által bezárt szög meghatározása csillagszeizmológia révén (pl. Huber és mtsai, 2013),
- csillagfoltok tanulmányozása fedési bolygók segítségével (Sanchis-Ojeda és Winn, 2011; Béky és mtsai, 2014),
- különböző fejlődési állapotban lévő vörös óriáscsillagok energiatermelési folyamatainak (héliumégés a magban, illetve hidrogénhéjégés) meghatározása a csillag magjára jellemző, Nap-típusú oszcillációk vizsgálatával (Bedding és mtsai, 2011),
- korábban elméletileg megjósolt, excentrikus pályán keringő, erős árapályhatásokat mutató kettőscsillagok (ún. heart-beat csillagok) felfedezése és az árapály-szeizmológia megszületése (Welsh és mtsai, 2011; Thompson és mtsai, 2012),
- szupernóva-robbanások legkorábbi szakaszának folyamatos megfigyelése (Olling és mtsai, 2015).

A Nap-típusú oszcillációkat mutató csillagokon kívül a **klasszikus pulzáló változócsillagok** is új megvilágításba kerültek a Kepler ultraprecíz és megszakításoktól mentes adatsorai által. Az egyik ilyen meglepetés, hogy fősorozati, nemradiális módusokat mutató δ Scuti és γ Doradus pulzáló változócsillagok között meglepő számban találtunk hibrid, azaz mind p-mind pedig g-módusokat mutató objektumokat (Grigahcène és mtsai, 2010; Uytterhoeven és mtsai, 2011). Ezek a fősorozati pulzáló csillagok arra is alkalmasak, hogy a fény-idő effektus alapján, pusztán a fénygörbéjükből kísérőikre következtethessünk, és spektroszkópiai mérések nélkül tömeget számoljunk a másodkomponensekre (Shibahashi és Kurtz, 2012). Ez a módszer szintén elképzelhetetlen volt a pontos úrfotometriai adatok hozzáférése előtt. A γ Doradus csillagoknál sikerült a g-módusok egyenlő periódusközű szekvenciáit azonosítani, ami megteremtette ezen csillagok szeizmológiai analizésének lehetőségét (Bedding és mtsai, 2015).

A Kepler közel 3000 **fedési kettőscsillagot** figyelt meg, amelyek 80%-a új felfedezés. A

pontos adatok korábban nem alkalmazható módszerek elterjedéséhez, vagy felélesztéséhez is vezettek. Így például egy szoros, fehér törpét és B szubtörpét tartalmazó csillagrendszerben sikerült spektroszkópia nélkül, a relativisztikus Doppler-nyalábolás okozta periodikus fényesedés és halványodás révén radiális sebességet mérni (Bloemen és mtsai, 2011). Különösen alkalmas volt a fedési kettőscsillagokat tartalmazó minta további komponensek keresésére, és ezáltal a hármas csillagrendszerek dinamikájának vizsgálatára is (Borkovits és mtsai, 2016). Köztük egy egyedülálló, triplán fedő hármas csillagrendszert, a HD 181068-at is felfedeztünk. Kimutattuk, hogy a legfényesebb főkomponens egy vörös óriáscsillag, körülötte pedig egy vörös törpéből álló szoros kettőscsillag kering. A felfedezést az tette lehetővé, hogy a vörös törpépár 45,5 naponta eltűnik a vörös óriás mögött, közben pedig kölcsönös fedéseket is mutat 0,9 napos periódussal. A hasonló hierarchikus hármas rendszerek a csillagkeletkezés és -fejlődés fontos tesztobjektumai, az általunk talált objektum konfigurációja pedig emberi időskálán is mérhető változásokat okoz a csillagok pályaelemeiben (Derekas és mtsai, 2011).

A Kepler-mezőben négy **nyílthalmaz** is volt, ezek mindegyike fontos célpont. Az NGC 6791 a legidősebb, korát 10 milliárd évesre becsülik, paradox módon fémtartalmát tekintve a leggazdagabb halmaz a négy közül. Az NGC 6866 a legfiatalabb, nagyjából 400 millió éves, az NGC 6811 és az NGC 6819 pedig közepesen idős nyílthalmazok. Az elméleti modellek számára nemcsak a halmaztagok eddig is rendelkezésre álló közös kora, távolsága és kémiai összetétele jelent megkorlátot, hanem új elemként a megfigyelhető Nap-típusú oszcillációk is. Elsőként a halmazok elfejlődött óriáscsillagainál sikerült kimutatni a Nap-típusú oszcillációt (Gilliland és mtsai, 2010), és szeizmológiai módszerekkel többek között az egyedi csillagok halmaztagságát lehetett a korábbinál nagyobb biztonsággal meghatározni (Stello és mtsai, 2011). Az óriáságon végbemenő, rendkívül bizonytalanul mérhető tömegvesztés mértékét is pontosítani tudtuk a szeizmológia segítségével (Miglio és mtsai, 2012).

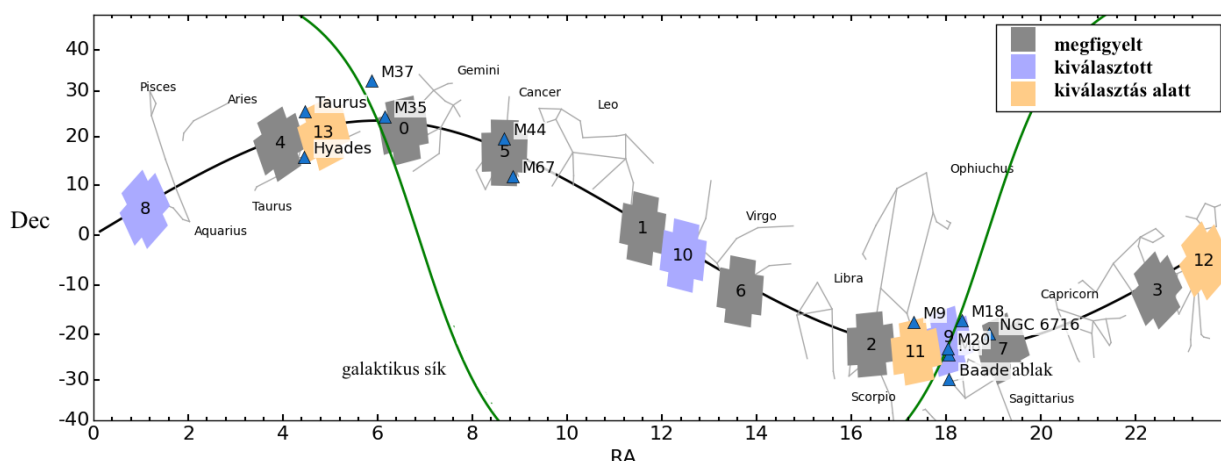
A hosszú és folyamatos idősorok a **csillagok foltjait és mágneses aktivitási ciklusait** is felfedik (Vida és mtsai, 2014), ezzel pedig egyedülálló információt szerezünk Napunk aktivitásának különleges, vagy éppen átlagos jellemzőiről (Gilliland és mtsai, 2011). Ezen túl, a Kepler-adatok folytonosságuk miatt ideális terepet biztosítottak a csillagok aktivitásához kapcsolódó flarek és kitörések megőrkítéséhez, például kiderült, hogy a Nap-típusú csillagokon a Napon megfigyelhetőnél több nagyságrenddel nagyobb energiájú szuperflarek is előfordulnak (Maehara és mtsai, 2012).

1.1.5. K2

K2, the story begins ...

Steve Howell (a K2 vezetője)
 2. Kepler Tudományos Konferencia
 Moffett Field, CA, USA, 2013. november

A precíz fotometria nagyon pontos iránytartást igényel. Ehhez a Kepler négy lendkerékkel volt felszerelve, amiből egyidejűleg háromra volt szükség a célirány mozdulatlanul tartásához. Azonban 2012 júliusában az egyik, majd 2013 májusában egy második lendkerék is felmondta



1.4. ábra. A K2 megfigyelt és tervezett ekliptikai területei a 2016 februári állapot szerint. Forrás: NASA/K2.

a szolgálatot, és minden próbálkozás hiábavalónak bizonyult a felélesztésükre. Ezért a Kepler-űrtávcső 2013 nyarán felfüggesztette a működését, és a NASA a tudományos közösséghez fordult, akiktől új tudományos célkitűzéseket vártak. A K2-nek nevezett misszió tudományos kidolgozásában csoportunk is részt vett (Szabó és mtsai, 2013b; Molnár és mtsai, 2013b; Guzik és mtsai, 2013). A legjobb ötleteket kiválogatva és egy okos mérnöki húzást követve a K2 2014 nyaratól ekliptikai területeket monitoroz 75–80 napig ("kampányok", 1.4 ábra), az eredetit megközelítő pontossággal. Két forgástengelyt a megmaradt lendkerekek képesek kontrollálni, a harmadik tengely körüli instabil helyzet miatt (amit a Nap sugárnyomása okoz) periodikusan korrigálni kell az űrtávcső helyzetét (2.3. fejezet; Howell és mtsai, 2014).

A K2 misszió abban is különbözik az eredeti Kepler-küldetéstől, hogy nincs központi kutatási program, csak a tudományos közösség által javasolt témákat és célpontokat figyeli meg az eszköz. Ennek biztosításához erős versenyben működő távcsőidő-pályázati rendszer üzemel. Kutatócsoportunk idáig 17 elfogadott K2 távcsőidő-pályázati javaslatban működött közre, amiből 10-et tagjaink vezetnek. A munkacsoport-vezetői munkát a K2 misszióban is folytatom.

Az exobolygók természetesen továbbra is fontos szerepet játszanak, de a kibővült lehetőségek fontos új felfedezéseket is lehetővé tesznek: így például vörös és fehér törpék körül is találtak már exobolygókat, és kiváló lehetőség a különböző galaktikus populációkban előforduló planéták és statisztikájuk tanulmányozása. Emellett a csillagszeizmológia lehetőségei is jelentősen kitágultak, hiszen például nagy, ismert nyílthalmazok (Plejádok, Hyadok, M67, M44, M35), valamint gömbhalmazok (M4, M80) is az ekliptikához közel fekszenek, és a hozzájuk tartozó csillagok alkalmasak szeizmológiai vizsgálatokra. Ezenkívül az űrtávcső az asztrofizika számos más ágában is hasznos munkát fog végezni, így szupernóvák keresésében és korai stádiumuk analízisében; mikrolencse-effektus megfigyelésében egy külön erre a célra fenntartott kampányban, ami az egyidejű földi monitorozást is lehetővé teszi, illetve központi csillaguktól nagy távolságban keringő bolygókísérők felfedezésével is kecsegtet; és kutatócsoportunk révén Naprendszerbeli objektumok (fővi és Neptunuszon túli kisbolygók, holdak) tanulmá-

nyozásában is. A központi program hiánya egyben azt is jelenti, hogy az adatok letöltés után rögtön publikussá válnak.

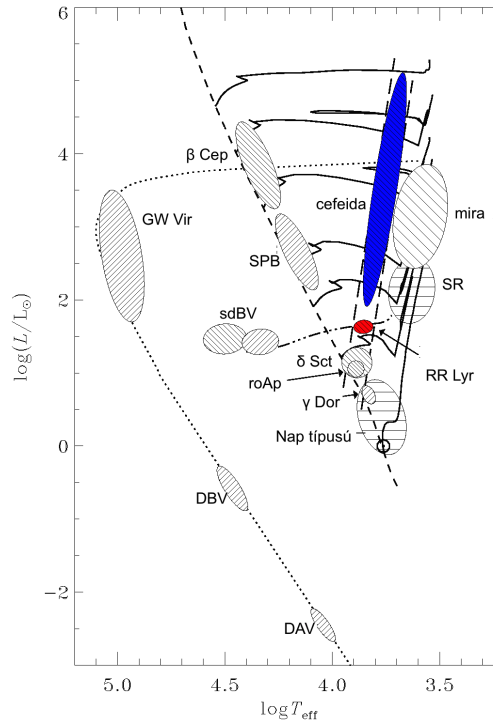
1.2. Pulzáló változócsillagok

A pulzáló változócsillagok szerepe rendkívül fontos a modern asztrofizikában. Az oszcilláció frekvenciája szorosan összefügg a csillagok felépítésével, ezáltal feltárul a Naphoz hasonló csillagok belső szerkezete, a csillagközi teret nehéz elemekkel beszennyező nagy tömegű csillagok magfizikai és energiatermelő folyamatai (Bedding és mtsai, 2011) és olyan jelenségeket is tanulmányozhatunk (diffúzió, konvekció, impulzusmomentum-transzport stb.), amiket kevésbé értünk és nehezen modellezhetők. A csillagok rezgéseit vizsgáló csillagszeizmológia pontosítja a csillagok méretét, tömegét – ezáltal az exobolygók paramétereit is – és független módszert szolgáltat a csillagok korára, amit más módszerekkel általában rendkívül nagy hibával tudunk csak becsülni. A pulzáló változócsillagok főbb típusait az 1.5 ábrán szemléltetem, a teljességre törekvés igénye nélkül. A klasszikus pulzáló változócsillagok¹⁴ régóta fontos szerepet játszanak a galaktikus és extragalaktikus távolságmérésben is. A cefeidák periódus-luminozitás összefüggése és az RR Lyrae csillagok jó közelítéssel állandó abszolút fényessége teszik őket alkalmassá a kozmikus távolságlétra első fokainak kalibrálására. Ehhez elengedhetetlen, hogy magát a pulzáció mechanizmusát kielégítően értsük, és minden szisztematikus zavaró tényezőt (moduláció, fő pulzációs periódus rövid és hosszú távú változásai, kis amplitúdójú változások, nemradiális pulzáció, rezonanciák, fémtartalom befolyása és populációs hatások és így tovább) kielégítően értsünk és kontrolláljunk.

A pulzáció eredetére három fő mechanizmust ismerünk, melyeknek további alesetei is lehetségesek. Az alapvető kategóriák a kappa-mechanizmus, a sztochasztikus oszcilláció és az árapály keltette rezgések. Ebben a dolgozatban kizárólag az első mechanizmussal pulzáló csillagokkal foglalkozom, de a teljesség kedvéért megemlítem a másik két fő folyamatot is, főként, hogy ezek asztrofizikai kiaknázásában szintén az úrfotometria játszott és játssza a meghatározó szerepet.

A **kappa-mechanizmus** gerjeszti a klasszikus pulzáló változócsillagok rezgéseit. Itt a kappa az opacitásra utal, hiszen ebben a folyamatban a csillag ionizációs zónájában az opacitás erősen függ a hőmérséklettől. Ekkor a kompressziós fázisban az opacitás nő az ionizáció miatt, így a kinetikus energia nő ezekben a zónákban a sugárzási energia rovására, majd az expanziós szakaszban disszipálódik ez az energia, önfenntartóvá téve a folyamatot. Más helyeken ellentétes folyamat játszódik le, és gerjesztés helyett csillapítás megy végbe. Egy adott rezgési módus egy pulzációs ciklusára kiszámítható a lokális körfolyamatok energiamérlege. A csillag adott pulzációs móddal szembeni stabilitását ez a teljes csillagra felösszegzett munkaintegrál határozza meg. A klasszikus instabilitás sávjában (1.5 ábrán a cefeidák és az RR Lyrae csillagok által kijelölt rész) ez a folyamat felelős a pulzációért. A cefeidák és az RR Lyrae csillagok esetében a

¹⁴Ide értem a klasszikus instabilitási sávba eső, nagy amplitúdójú, elsősorban radiálisan pulzáló változókat, így a cefeidákat és RR Lyrae csillagokat, egyes esetekben a nagy amplitúdójú δ Scutikat is. Ebben a dolgozatban az előbbi kettővel foglalkozom részletesen, és klasszikus pulzáló változócsillag alatt is ezeket értem.



1.5. ábra. A pulzáló változócsillagok főbb típusai a Hertzsprung–Russell-diagramon. A szaggatott vonal a nulla korú fősorozatot jelzi, a folytonos vonalak 1, 2, 3, 4, 7, 12, 20 naptömegű csillagok fejlődési útvonalai. Látható még a horizontális ág (...-...) és a fehér törpék fejlődési (hűlési) útvonala (...). A cefeida instabilitási sávot kék, az RR Lyrae csillagok helyét piros szín jelzi (Christensen-Dalsgaard, 2004).

hidrogén és hélium ionizációs zónái vesznek részt a gerjesztésben. Itt említhetem az *epszilon-mechanizmust* is, ami a radiatív luminozitás helyett a nukleáris reakcióráta modulációján alapszik, és mindig pozitív hozzájárulást (gerjesztést) eredményez, hiszen összenyomott állapotban a hőmérséklet növekedtével a nukleáris energiatermelés fokozódik. Ez a mechanizmus azonban csak a nagyon nagy tömegű ($M > 100M_{\odot}$) csillagok esetében működik hatékonyan. Megint más elven működik főorozati γ Doradus típusú változócsillagok g-módusainak gerjesztés: itt összenyomáskor a konvektív zóna alján az extra hőt nem tudja a konvekció elszállítani, mert a konvektív cellák mozgásának lokális időskálája összemérhető a pulzációs periódussal. Így ez a pulzáció gerjesztésére fordítódik, és a mechanizmus *konvektív blokkolás* néven ismert (Guzik és mtsai, 2000.)

Nap-típusú, más néven sztochasztikus gerjesztésű **oszcillációt** kiterjedt konvektív burokkal rendelkező csillagok esetében figyelhetünk meg, ilyenek a Naphoz hasonló tömegű főorozati csillagok és a vörös óriások. Ezekben a konvekció sztochasztikusan gerjeszti az egyébként lecsengő módusok tucatjait, vagy éppen ezreit. A Nap jellegzetes, 5 perc körüli periódusú oszcillációival a helioszeizmológia, míg a csillagokban előforduló megfelelőivel az asztroszeizmológia foglalkozik. A Kepler rutinszerűen észlelte a csillagok jellemzően kis amplitúdójú Nap-típusú rezgéseit (Chaplin és mtsai, 2011), ezzel új utat nyitott a csillagok asztrofizikájában.

A harmadik típus az **árapály keltette rezgések**, melyek csillagok szoros kettőscsillagokban, vagy excentrikus kettősök szoros megközelítésekor (mint például a már említett heart-beat csil-

lagoknál) alakulhatnak ki. Ezeknek a korábban elméleti úton megjósolt rezgéseknek a tanulmányozásában is a Kepler jeleskedett (Welsh és mtsai, 2011; Fuller és mtsai, 2013), olyan csillagok szeizmológiai vizsgálatára nyitva ablakot, amik egyébként a kedvező geometriai elrendeződés hiányában nem mutatnának rezgéseket.

1.2.1. Cefeidák

A klasszikus cefeidák fiatal, szuperóriás csillagok, melyek domináns módon az első néhány radiális módusban pulzálnak (alapmódus (F), első (O1) vagy második felhang (O2)). Ezek kombinációi is előfordulnak két- (F+O1, O1+O2, O1+O3), sőt hárommódusú (O1+O2+O3) cefeidákat is ismerünk. Amplitúdójuk 0,2–2,0 magnitúdó, pulzációs periódusuk 1 és 100 nap közé esik. Tömegük nagyjából másfél naptömegtől 9–10 naptömegig terjedhet, ami a korukat is behatárolja. Fejlődésük során többször keresztezhetik a klasszikus instabilitási sávot. Periódus–fényesség relációjuknak köszönhetően (Leavitt és Pickering, 1912) elsőrendű kozmikus távolságindikátorok, az extragalaktikus távolságskála lokális kalibrációjához előszeretettel alkalmazott objektumok. A cefeidák elsősorban a galaxisok korongját és spirálkarjait népesítik be, így a galaktikus szerkezet vizsgálatára is alkalmasak. A következő évtizedekben a James Webb űrteleszkóp, a WFIRST és Gaia asztrometriai űrszonda cefeidákkal kapcsolatos várható eredményeire alapozva a Hubble-állandó akár 1% pontosságú meghatározása is elképzelhető (Freedman és Madore, 2010).

Ugyanakkor a cefeidák a csillagszerkezet és -fejlődés kulcsobjektumai is egyben. Döntő szerepet játszottak a csillagplazma opacitásának revíziójában a '90-es évek elején (Moskalik és mtsai, 1992), de a pulzáció, a tömegvesztés, a konvekció és a forgás közötti, ma még kevésbé értett kapcsolat megfejtésében is szerepet kapnak (Neilson és mtsai 2012; Mundprecht és mtsai 2013; Anderson és mtsai 2014).

A kettes típusú cefeidák (BL Her és W Vir csillagok) ezzel ellentétben öregebb és kisebb tömegű csillagok. Fényváltozásuk a klasszikus cefeidákéhoz képest kevésbé szabályos, számos esetben rezonanciák, perióduskettőződés és akár káosz is felléphet (Kovács és Buchler, 1988b; Smolec és mtsai, 2012). A cefeidák egy harmadik altípusát is megkülönböztethetjük, ezek az anomális cefeidák. Ezen objektumok saját periódus–fényesség relációt határoznak meg, eredetük nem teljesen tisztázott, bár Neilson és mtsai (2015) vizsgálatai szerint csillagok összeolvadása is szerepet játszhat a nagy tömegű anomális cefeidák létrejöttében.

Dolgozatomban a továbbiakban kizárólag klasszikus, fiatal cefeidákkal kapcsolatos eredményeket taglalok.

1.2.2. RR Lyrae csillagok

Az RR Lyrae csillagok idős, kis tömegű, horizontális ági objektumok. Magjukban héliumot égetnek, és hidrogénégető héjuk is termel energiát. Pulzációs amplitúdójuk a néhány tized magnitúdótól akár 2 magnitúdóig is terjedhet. A fényváltozás periódusa 0,2 – 1,0 nap közé esik. Alapvetően radiálisan pulzálnak: az RRab csillagok alapmódusban, az RRc csillagok első felhangban, az RRd (kétmódusú) csillagok mindkettőben.

Az RR Lyrae csillagok megbízhatóan alkalmazhatók távolságmérésre. Egyedi távolságaik mérésére nagyszámú módszer áll rendelkezésre: a Baade–Wesselink-módszer különböző változatai, a vizuális fényesség és vastartalom között összefüggés, trigonometrikus és statisztikus parallaxis, optikai, közeli és közép-infravörös periódus-fényesség-fémartalom összefüggések és a vörösödésmentes periódus-Wesenheit-fémartalom relációk. Az utóbbi években az egyre pontosabb infravörös fényességméréseknek köszönhetően újabb lendületet kapott az RR Lyrae csillagok használata galaktikus és extragalaktikus távolságmérésre (Madore és mtsai, 2013; Klein és mtsai 2014; Neeley és mtsai 2015). Az RR Lyrae csillagok független tesztet biztosítanak a klasszikus cefeidák távolságmérésének ellenőrzéséhez a legközelebbi extragalaxisokban, így a Magellán-felhőkben és az M31-ben (Pritchett és van den Bergh, 1987; Storm, 2006), ugyanakkor másodlagos távolságindikátorok (pl. gömbhalmazok luminozitásfüggvényének) kalibrálásához is használatosak (Di Criscienzo és mtsai, 2006).

Az RR Lyrae csillagok a Galaxis legöregebb populációjához tartoznak, gömbhalmazokban és a Tejútrendszer halójában is gyakran találkozunk velük, kitűnően jelzik a galaktikus szerkezetet. A galaktikus halóbeli sűrűsödéseik hűen őrzik Galaxisunk viharos múltját (Ivezić és mtsai, 2012; Sesar és mtsai, 2013), valamint a beolvadó törpegalaxisok nyomait (Sagittarius törpegalaxis: Cseresnyes és mtsai, 2000; Virgo-sűrűsödés: Vivas és Zinn, 2006).

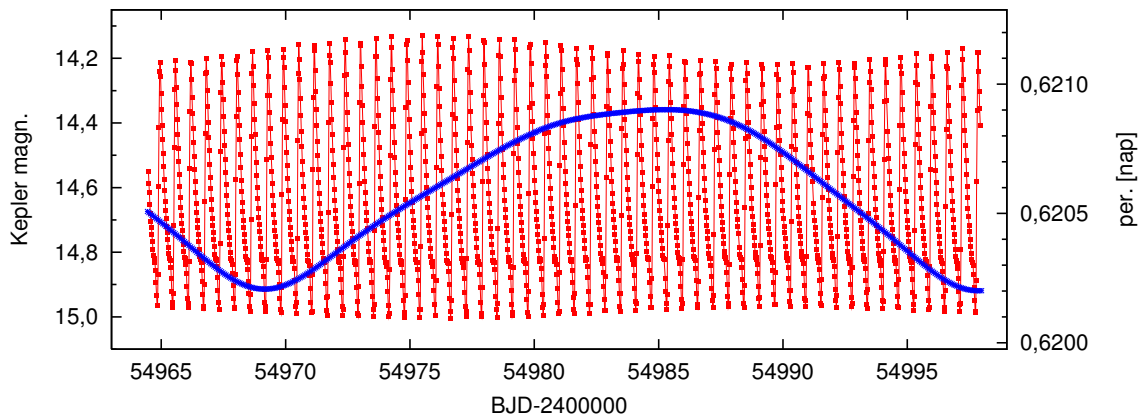
Martínez-Vázquez és mtsai (2015) a Sculptor törpe szferoidális galaxis kémiai elemeinek feldúsulási történetére következtetett 536 RR Lyrae csillag 24 évnyi megfigyelései alapján. Azt találták, hogy a galaxis belső régióit vörös horizontális ági csillagok és fémben gazdag RR Lyrae csillagok, míg a külső tartományokat kék horizontális ági csillagok és fémszegény RR Lyraek uralják. Az eredmények arra utalnak, hogy a galaxisban gyors kémiai fejlődés történt, és a radiális fémartalom-gradiens korán megjelent a galaxis fejlődésében.

Az OGLE¹⁵-felmérés által talált RR Lyrae csillagok számos asztrofizikai vizsgálatnál bizonyultak hasznosnak, így például a Magellán-felhők (Subramanian és Subramanian, 2009; Deb és mtsai, 2015) és a galaktikus dudor (Dékány és mtsai, 2013; Pietrukowicz és mtsai, 2015) szerkezetének feltérképezésénél, távolságmérésnél (Pietrukowicz és mtsai, 2012), a galaktikus vörösödés mérésénél (Haschke és mtsai, 2011; Nataf és mtsai, 2013), a Blazskó-effektus (Netzel és mtsai, 2015a, 2015c) és a kétmódusú RR Lyrae csillagok tanulmányozásánál (Smolec és mtsai, 2015a), változócsillagok automatikus klasszifikációjánál (Long és mtsai, 2012) és egy olyan új típusú változócsillag felfedezésénél, amelynek tagjai kettős rendszerben fejlődve áthaladnak az instabilitási sávon, de tömegük alig fele akkora, mint a megszokott, horizontális ági RR Lyrae csillagoké (Pietrzyński és mtsai, 2012, Smolec és mtsai, 2013).

A következő évtizedben a csatasorba álló LSST¹⁶ (Ivezić és mtsai, 2008) és a már működő Gaia (Perryman és mtsai, 2001) kombinációja minőségi ugrást fog jelenteni mind a megfigyelt RR Lyrae csillagok számában, mind galaktikus pozíciójukra és mozgásukra vonatkozó információgazdagság tekintetében. A két égboltfelmérés remekül ki fogja egészíteni egymást a halványabb objektumok régiójában, miközben soha nem látott pontossággal fogják feltérképezni

¹⁵Optical Gravitational Lensing Experiment

¹⁶Large Synoptic Survey Telescope



1.6. ábra. A V783 Cyg Blazskó-modulációt mutató RRab csillag Q1 30 perces mintavételezésű adatai a Kepler-adatbázisban. Késsel a modulációs ciklus alatti periódusváltozást mutatom, amit analitikus függvény módszerrel számoltam (Kolenberg és mtsai, 2010).

Galaxisunkat, annak peremvidékét és kozmikus történetét többek között RR Lyrae csillagok segítségével, akár 400 kpc távolságig (Ivezić és mtsai, 2012).

1.2.3. A Blazskó-effektus

Az RR Lyrae csillagokhoz kapcsolódik a pulzációelmélet egyik legrégebbi, megoldatlan problémája, a Blazskó-effektus rejtélye (Kovács, 2009). A jelenség szimultán amplitúdó- és fázismoduláció, melyet az RRab csillagok közel fele (Jurcsik és mtsai, 2009b; Benkő és mtsai, 2010, 2014), az RRc csillagok valamivel kisebb százaléka mutat (Kovács, 2009). Korábban külön amplitúdó- és fázismodulációt is látni véltek, de az űrfotometriai méréseink – legalábbis az RRab csillagok esetében – mindkét jelenség egyidejű fennállását mutatták minden esetben (1.6 ábra, Benkő és mtsai 2010, 2014; Szabó és mtsai, 2014). A fázismoduláció jelenségét Szergej Blazhko vette észre több mint egy évszázaddal ezelőtt (Blazhko, 1907), ugyanis nem tudta az RW Draconis periódusát konstans értékkel illeszteni. Néhány évvel később Harlow Shapley (Shapley, 1916) észrevette, hogy az RR Lyrae megfigyelt maximumai különböznek, felfedezve ezzel az amplitúdómoduláció jelenségét.

A moduláció korrekt matematikai leírását Szeidl és Jurcsik (2009) és Benkő és mtsai (2011) munkáiban találjuk. A moduláció a frekvenciaspektrumban mellékcsúcsokat okoz a domináns pulzációs módus és annak harmonikusai körül a moduláció periódusának megfelelő frekvenciakülönbséggel. Ez korábban a korlátozott fotometriai pontosság miatt rendkívül sokféle értelmezésnek adott helyet, attól függően, hogy az egyébként végtelen számú mellékcsúcsból hányat sikerült detektálni, és azok és a főcsúcs(ok) melyik oldalán látszottak (pl. Alcock és mtsai, 2003). Az űrből végzett fotometriai vizsgálatok egyértelműen igazolták az előre jelzett nagyszámú mellékcsúcs jelenlétét (Chadid és mtsai, 2010; Kolenberg és mtsai, 2011). Az űrfotometriai mérésekből az is kiderült, hogy a többszörös moduláció nagyon gyakori: a Kepler-csillagokban 80% felett van a kettő vagy többszörös moduláció aránya a modulált RRab csillagokban (Benkő és mtsai, 2014).

A legrövidebb Blazskó-periódust (5,309 nap) az SS Cnc-nél mérték (Jurcsik és mtsai, 2006),

a leghosszabb akár egy évtized is lehet (Soszyński és mtsai, 2011b). A legkisebb modulációs amplitúdójú csillagokat a Keplerrel találtuk, amivel millimagnitúdónál is kisebb, a modulációhoz tartozó csúcsokat is képesek vagyunk kimutatni (Nemec és mtsai, 2013; Benkő és Szabó, 2015). Ugyanakkor a legnagyobb amplitúdójú modulációt a V445 Lyraenél regisztráltuk (Guggenberger és mtsai, 2012), ahol a legkisebb és legnagyobb amplitúdó tízszeres eltérést mutat, és a fénygörbe alakja is teljesen megváltozik: míg a moduláció maximumakor klasszikus RRab-fénygörbét látunk, addig a moduláció minimumában dupla maximumú, atipikus RR Lyrae fényváltozást találunk. Fontos még megjegyezni, hogy az úrfotometriai mérések szerint a moduláció ciklushossza változik, sőt a burkoló alakja ciklusról ciklusra jelentősen eltérhet (Kolenberg és mtsai, 2011; Guggenberger és mtsai, 2012). Az elméleteknek természetesen ezekről a megfigyelési tényekről is számot kell adniuk.

A Blazskó-effektus magyarázatára sok elmélet született, ezek kidolgozottsági foka és plauzibilitása eltérő, de egyikük sem képes teljes mértékben megmagyarázni minden megfigyelési tényt. A **mágneses ferde rotátor modell** erős dipól mágneses tér (1 kG) létezését feltételezi, amely deformálja a radiális pulzációt. Ez $\ell = 2$ nemradiális komponens megjelenéséhez vezet, és a csillag forgása miatt változó amplitúdót látnánk (Detre és Szeidl, 1973). Ebben az elképzelésben a moduláció periódusa a forgásával egyezik meg, ami nehezen egyeztethető össze a megfigyelések mutatta gyorsan változó ciklushosszal. Még súlyosabb kifogás, hogy a megfigyelések kizárják az erős mágneses (dipól) tér jelenlétét az RR Lyrae csillagokban (Chadid és mtsai, 2004). Az ötlet differenciális rotáció feltételezésével lenne menthető, ez esetben esetleg **mágneses ciklusokkal és foltokkal** lehetne magyarázni az amplitúdóváltozást (Stellingwerf és mtsai, 2013), de erre vonatkozó konkrét bizonyítékok még szintén nem merültek fel.

Radiális és nemradiális módusok közötti 1:1 rezonancia. Ennek az elképzelésnek többféle változata előfordul, attól függően, hogy milyen nemradiális módust tételezünk fel. Az alapötletet az adja, hogy az elméleti számítások szerint a radiális sajátmódusok körül nagy számban lehetnek nem túlságosan csillapított nemradiális módusok, amik 1:1-es rezonanciával kapcsolódhatnak a domináns radiális módushoz (Nowakowski és Dziembowski, 2003). A legvalószínűbb ($\ell = 1, m = \pm 1$) esetben frekvenciaszinkronizáció is fellép, tehát nem látunk valódi modulációt, azt a forgás miatt lehetne csak detektálni. A csillag forgása itt is direkt kapcsolatban lenne a frekvenciaspektrumban detektálható frekvenciakülönbségekkel, illetve az elmélet szimmetrikus oldalcsúcsokat jelez, amit a megfigyelések nem igazolnak vissza (Kovács, 2009).

Ide kapcsolódik az a gondolat, amely szerint **nemrezonáns radiális és nemradiális módusok** együttes jelenléte okozná a Blazskó-modulációt (pl. Cox, 2013). Itt a legfontosabb kétség a gerjesztett nemradiális módus amplitúdójával kapcsolatban fogalmazódik meg, aminek bizonyos esetekben túlságosan nagyoknak kellene lennie ahhoz, hogy a megfigyelt modulációt képes legyen létrehozni (Kovács, 2016), ezenkívül ez az elgondolás a frekvenciaspektrumban megjelenő mellékcúscsúcsdőről nem vagy csak erőltetetten tud számot adni.

Stothers (2006) azt vetette fel, hogy egy feltételezett **mágneses dinamóciklus csatolódása a konvekcióhoz** amplitúdómodulációhoz vezethet. Ebben a képben a mágneses tér periodikus fel- és leépülése révén a turbulens konvekció erőssége modulálódik, ami a pulzáció amplitúdóját befolyásolja.

túdóját szabályozza, így hozva létre kváziperiodikus ciklusokat. Az ötlet kevésbé állt össze koherens elméletté, és mindenképpen háromdimenziós kódokkal való tesztelést igényel. Egydimenziós hidrodinamikai kódokkal végzett tesztek azt mutatják, hogy a mechanizmus ebben a formában valószínűleg nem működik (Smolec és mtsai, 2011; Molnár és mtsai, 2012c).

Az RR Lyrae csillagok atmoszférájában megjelenő **lökéshullámok által indukált periodikus energiadiSSIPációt** is felelőssé tették a moduláció kialakulásáért (Gillet, 2013). Nem valószínű azonban, hogy az egyes RRab csillagokban nagyon kis amplitúdóval gerjesztett első felhanghoz tartozhat kellő erősségű lökéshullám, és az képes lenne modulációt okozni.

A Kepler-űrtávcső a Blazskó-jelenség kutatásának területén is újat hozott: egyedülálló pontosságával és folyamatos adatsoraival új dinamikai jelenségeket fedeztem fel, amelyek szoros kapcsolatban állnak a Blazskó-modulációval. Ilyen a perióduskettőződés jelensége, amelyet a modulált RRab csillagok többsége mutat (4.1.3. fejezet), és a valószínűsíthetően nemradiális módusok univerzális jelenléte a modulált csillagokban, valamint azok egyöntetű hiánya a nemmodulált RRab csillagokban (4.2. fejezet). Ráadásul az RR Lyrae csillagokban a perióduskettőződés létrehozásáért felelős, az alapmódus és a kilencedik felhang közötti fennálló 9:2 rezonanciáról Buchler és Kolláth (2011) amplitúdóegyenletek segítségével azt is megmutatták, hogy az képes szabályos vagy akár kaotikus moduláció létrehozására is. Ez a Blazskó-effektust magyarázó, egyik legjobban kidolgozott elmélet (**rezonancia paradigma**) akkor válna teljessé, ha hidrodinamikai modellekben is sikerülne a modulációt reprodukálni. A témát bővebben a 4.1.6. fejezetben fejtem ki.

Az űrfotometria nyújtotta pontos és folyamatos adatsorok tehát remek lehetőséget jelentenek a mindmáig rejtélyes Blazskó-effektus tanulmányozására. A jelenség lényegét jelentő amplitúdó- és fázismoduláció előfordulási gyakorisága, a modulációs jellemzők és azok hosszú távú változásai – melyek mind-mind kitűnően vizsgálhatók a Keplerrel – fontos megfigyeléseket jelentenek a modellek számára.

Míg a klasszikus pulzáló változócsillagok pulzációjának alapmechanizmusa jól értett, addig a részletek, a dinamikai kölcsönhatások már kevésbé. Éppen ebben hozott újat az űrfotometria, és ezek az eredmények alkotják dolgozatomnak fajsúlyos fejezeteit, melyek új dinamikai jelenségek (perióduskettőződés, nemradiális módusok, kis amplitúdójú változások) felfedezéséről és vizsgálatáról szólnak. A dolgozatban a klasszikus változócsillagok űrfotometriájának technikai kérdéseit is tárgyalom. Ezenkívül a pulzációs módus meghatározásának klasszikus problémájára kidolgozott új módszeremet ismertetem. A kétmódusú cefeidák nemcsak az egyedi csillagok fémtartalom-meghatározására használhatók, de akár extragalaxisok fémtartalom-gradiensének mérésére is. Ennek a témának külön fejezetet szentelek. Végül pedig az űrfotometriai módszerek alkalmazását kiterjesztve exobolygók, pontosabban a Kepler által felfedezett forró jupiterek tranzitidőpont-változásainak vizsgálatából adódó eredményeimet ismertetem, ami rávilágít a csillagokkal és exobolygókkal kapcsolatos kutatások egymást kiegészítő jellegére is. A dolgozatot kitekintéssel zárom, melyben a klasszikus pulzáló változócsillagok vizsgálatának helyét vázolom a jövő űrfotometriai missziói által kijelölt lehetőségek tükrében, kitérve a magyar tudományos részvétel potenciális kapcsolódó pontjaira.

2. fejezet

Úrfotometriai módszerek

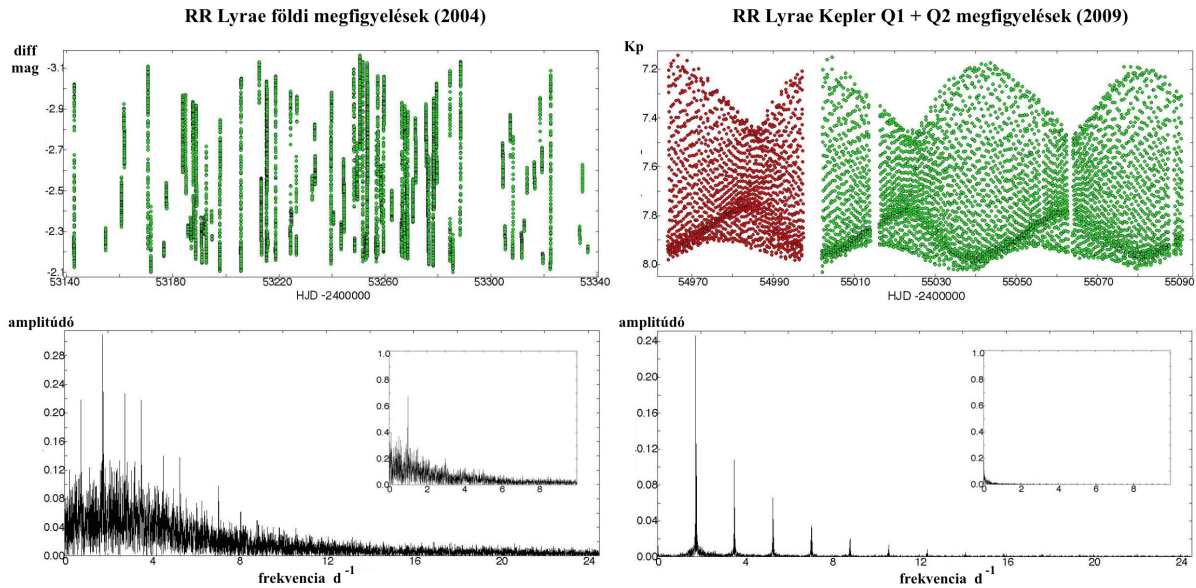
2.1. Bevezetés

[Before the space photometric era] ... we have been listening to the Music of Spheres with earplugs; we have been listening with distracting noise; we have been leaving the concert at regular intervals and missing some of the finest melodies. We need to hear the full symphony without interruption, without background noise, with clarity and purity never achieved before. We need observations from space ...

C. Aerts, J. Christensen-Dalsgaard, D. W. Kurtz, Asteroseismology, A&A Library, Springer, 2010, 670. oldal

Ebben a részben az úrfotometria sajátosságait tekintem át, elsősorban a technikai részletekre koncentrálni. Teszem ezt azért, hogy a dolgozat többi fejezetében ismertetett tudományos eredmények háttérét jobban megvilágítsam, és szembesítsem az olvasót a sokszor készpénznek vett és készen kapott, ultrapontos fotometriai adatsorokhoz kapcsolódó számos buktatóval és nehézséggel, amelyeket le kellett küzdenem, hogy a pulzáló változócsillagokkal kapcsolatos vizsgálataim eredményesek lehessenek. Azokat a kihívásokat ismertetem, amelyek speciálisan az úrfotometriához kapcsolódnak, és nem, vagy csak korlátozottan jelennek meg a földfelszínről végzett, csillagászati célú fényességmérési metódusok alkalmazásánál. Ez az áttekintés semmiképpen sem törekedhet teljességre, hiszen erről a témakörrel kapcsolatban lehetne megőszteni.

A szükségképpen szelektív és szubjektív áttekintés elsősorban a témához való saját hozzájárulásomhoz kötődik, és kimondottan Kepler-centrikus, hiszen eredményeim döntő többségét a NASA Nap körül keringő Kepler-űrtávcsövével értem el, de MOST- és CoRoT-adatok fel-



2.1. ábra. Balra: földi fotometriai megfigyelési kampány eredménye, hat obszervatórium részvételével az RR Lyrae (névadó) csillagról (Kolenberg és mtsai, 2006). Jobbra: a Kepler hasonló hosszúságú megfigyelései (Q1 és Q2 adatok) ugyanarról az objektumról. Alul az adatsorok Fourier-transzformáltjai láthatók. Figyeljük meg az adatok folyamatosságát és a modulációs ciklusokat. Az alsó betétpanelek az adatsorok ablakfüggvényeit mutatják (Kolenberg és mtsai, 2011).

dolgozására is mutatok példát, hiszen más és más problémákkal kellett szembenézni a Föld körül keringő, kisebb űrtávcsöveknél. Egy-egy probléma megoldására saját munkámból mutatok példákat, elsősorban is a klasszikus pulzáló változócsillagok témaköréből. Az űrfotometria potenciálját és várható eredményeit e tudományterületen több helyen is összefoglaltam (Gilliland és mtsai, 2010; Rauer és mtsai, 2014).

A részletek tárgyalása előtt azonban érdemes elgondolkodni a következő kérdésen: Vajon miért jó az űrből fotometriai megfigyeléseket végezni? A szokásos válasz a légkör zavaró hatásaitól mentes megfigyelés lehetősége. Három kulcsmomentumot kell mindenképpen hangsúlyoznunk: az első a **fotometriai pontosság** kérdése. A Kepler esetében nem véletlenül hangsúlyozzuk a mikromagnitúdós forradalom kifejezést, hiszen kettő (esetenként három) nagyságrenddel pontosabb megfigyelést tesz lehetővé, mint az átlagos, földi fotometriára elérhető távcsövek. A fényesebb célpontok esetében nem ritka a néhány mikromagnitúdó pontosság (relatív fényességváltozás esetén ppm-ről beszélhetünk) megfigyelési pontonként (pl. Kolenberg és mtsai, 2010).

A második kulcsmomentum a folyamatos, gyakorlatilag **megszakításmentes megfigyelés** megvalósítása. Ez a Földről az időjárás változásai, a nappalok-éjszakák váltakozása miatt kivitelezhetetlen. Még ha különböző földrajzi hosszúságok mentén elhelyezkedő obszervatóriumok (multisite) összefogásáról van is szó, mint amilyen pl. a bevezetőben említett WET, akkor is nehéz hosszú időn keresztül folyamatos megfigyeléseket biztosítani, nem is szólva a különböző műszerekkel kapott adatok inhomogenitása miatt fellépő nehézségekről.

A harmadik faktor pedig a **hosszú időn keresztül történő megfigyelés** lehetősége, ami a Kepler esetében azt jelentette, hogy négy éven keresztül ugyanazt a területet monitorozta, így a célpontok megfigyelésével töltött effektív idő a teljes megfigyelési időtartamhoz viszonyítva (idegen szóval duty cycle) még a kisebb-nagyobb kényszerű megszakításokkal együtt is bőven 90% felett van. A MOST, a CoRoT, a K2 és a jövőbeli fotometriai űrmissziók is legalább néhány hét-hónap folyamatos megfigyelési időt biztosítottak vagy fognak biztosítani.

Az említett előnyöket jól szemlélteti a 2.1 ábra, ami az RR Lyrae névadó csillag földi fotometriai, több helyszínről végzette, összehangolt (multisite) kampányának eredményét hasonlítja össze egy néhány évvel később készült, hasonló hosszúságú időszak alatt, de már a Keplerrel kapott adatsorral. Az ábrázolt időszak hossza miatt a kb. 40 napos moduláció jól látszik, az egyedi kb. 14 óra hosszúságú pulzációs ciklusok viszont kevésbé. A pontosság drasztikus növelése és a folyamatos megfigyelések hatása a Fourier-spektrumban is jól észrevehető a zajszint és a mintavételezés miatt fellépő hamis (alias) csúcsok eltűnése formájában. Az egyedi adatpontok pontossága mintegy három nagyságrenddel jobb a Kepler esetén (μmag^1), mint a földi megfigyeléseknél (mmag^2). Az egy láthatósági időszak alatt készült földi adatsort a Kepler további, közel négy évnyi adatsorral egészítette ki.

Az űrből végzett fotometria előnyére írhatjuk továbbá, hogy egyszerre, homogén módon, sok csillagot képes megfigyelni (ez a Keplernél egyszerre 160 ezernél is több, a teljes nominális misszió alatt közel 200 ezer csillagot jelentett). Hasonlóan fontos a fotometriai stabilitás kérdése, amit a Nap körüli pálya háborítatlan termikus és (általában) csendes sugárzási környezete biztosítottak. Végül megemlítem, hogy a pozitívumok listáját tovább gazdagítja, hogy dedikált eszközökről van szó, ami nem jelenti azt, hogy egy-egy célpont megfigyelésére irányuló kezdeményezésünknek ne kellett volna szigorú és kompetitív kiválasztási folyamaton végigmennie, de azt érdemes észben tartani, hogy a legjobb földi (multifunkcionális) csillagászati megfigyelési eszközöket nem lehet kizárólag egy objektum (vagy rendszerek) megfigyelésére fordítani, szemben az űrfotometriának szentelt távcsövekkel.

A pozitívumok mellett meg kell említeni a hátrányokat is, habár ez utóbbiak eltörpülnek az előnyök mellett, amint azt az eredmények is igazolják. A negatívumok egyike az űreszközök magas költsége, valamint a technikai nehézségek, és a javíthatatlan meghibásodások lehetősége, amikor egy meghibásodott alkatrész miatt az egyébként hibátlan, több száz millió dolláros vagy eurós űreszköz válik használhatatlanná. Az űrmissziók véges élettartamát is figyelembe kell venni ilyen tudományos programok kidolgozásakor. Utolsóként említem a limitált látómezőt és a legjobb célpontok egyes esetekben korlátozott elérhetőségét. Itt gondolhatunk a Kepler első négy éves működésére és az előre rögzített látómezőre. Ugyanakkor a K2, illetve a 6. fejezetben vázolt jövőbeli, teljes vagy majdnem teljes égboltot felmérő űrfotometriai programok ezt a korlátozó tényezőt is kiiktatják majd.

¹mikromagnitúdó

²millimagnitúdó

2.2. Speciális űrfotometriai problémák és kezelésük

A Kepler-adatok többféle formátumban érhetőek el. Elsődlegesen a fénygörbeadatokra koncentrálok, amelyek a fényesség időbeli változását írják le. A legegyszerűbb ezek közül az ún. SAP (Simple Aperture Photometry, vagy raw) formátum, ami az alapvető korrekciókon kívül nem tartalmaz más redukciós lépést. Ahogy a neve is mutatja, ez a kalibrált pixelekből a háttér levonásával kapott egyszerű apertúra-fotometriával kapott idősor. A pixelek kalibrációja viszont egy sor fontos lépést tartalmaz, amit itt az egyszerűség kedvéért most csak felsorolok: bias-korrekció, kozmikus beütések levonása, nemlinearitás-korrekció, sötétáram- és flatfield korrekció.

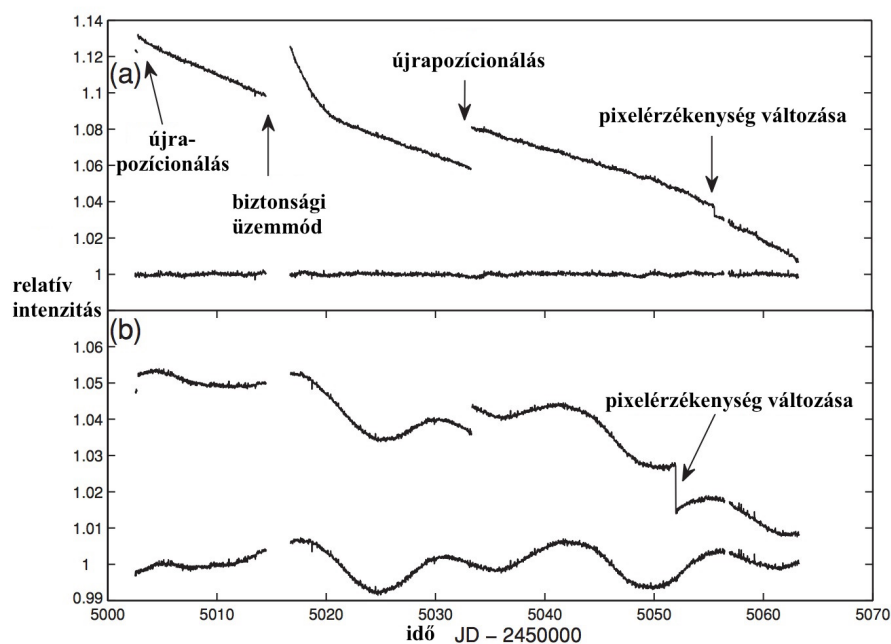
Egy fokkal továbbmegy a Kepler-fénygörbék előkészítésében a PDC³ néven elérhető adatsor. Ez az eljárás az egymáshoz fizikailag közel lévő csillagokban meglévő közös trendeket, szisztematikus változásokat hivatott kiküszöbölni, előkészítendő az adatsort az automatikus tranzitkereséshez. Ezen kívül az egyes pixelekhez tartozó fényességadatok önmagukban is elérhetőek, *target pixel fájlok* formájában.

Ha másként nem jelzem, az ebben a dolgozatban említett minden eredmény eléréséhez SAP vagy egyéni pixel-fotometrián alapuló adatokat használtam, aminek az az oka, hogy a PDC-t elsősorban bolygótranzitok fotometriájára optimalizálták, és kevésbé hatékony a nagy amplitúdójú változócsillagok fénygörbealakjának és hosszabb időskálán végbemenő változásainak megőrzésében. Másrészt a különböző PDC-variánsok időközben lettek publikusak. Ezek nem, vagy csak korlátozott mértékben álltak rendelkezésre az adott kutatási szakaszban, és tapasztalataim szerint kevésbé voltak alkalmasak az általam kitűzött célok eléréséhez, mint az azóta megjelent, frissített PDC-fotometriai adatok.

A Kepler nagy pixelei és az alkalmazott enyhe defókuszálás azt szolgálják, hogy a csillagokról jövő, Poisson-eloszlással érkező fotonok jel/zaj viszonyát maximalizálják. A fotometriai pontossággal kapcsolatban azonban legalább ilyen fontos a szisztematikus, instrumentális hibák jelenléte, és még inkább az, hogy milyen mértékben vagyunk képesek ezeket kiszűrni, és a fotonzajt megközelíteni. Az itt említett szisztematikus hibákból szemléltet egy csokorralalót a 2.2 ábra a Keplerrel kapcsolatban, amelyek közül a legfontosabbakat sorra veszem.

Az első feltűnő dolog mind a 2.1., mind a 2.2 ábra esetében az, hogy kisebb **űrök** előfordulnak **az adatsorban**. Ezek egy része tervezett, mint például az adatletöltések időszakai, ami a Kepler nominális küldetése alatt havonta egyszer történt nagyjából 6–8 órán keresztül, és ekkor a Föld felé kellett fordítani az űreszköz antennáját. Történtek azonban nem tervezett megszakítások is, amiket közös néven *safe mode* eseményeknek hívunk, amikor is a távcső **biztonsági üzemmódba kapcsol**, hogy megelőzzön bármiféle meghibásodást. Ez lehetett egy külső behatás eredménye, pl. túl erős kozmikus sugárzás, de belső ok is, pl. egy szokatlan válasz egy fedélzeti parancsra, vagy tűréshatáron túli érték előfordulása egy szenzorban. A biztonsági üzemmódban minden olyan alkatrész kikapcsol, ami nem elemi fontosságú, és a Naptól távoli irányba fordul az eszköz, úgy várja, hogy újból indítsák egy földi parancssorral. Az érdekes

³A Pre-search Data Conditioning modul rövidítése.



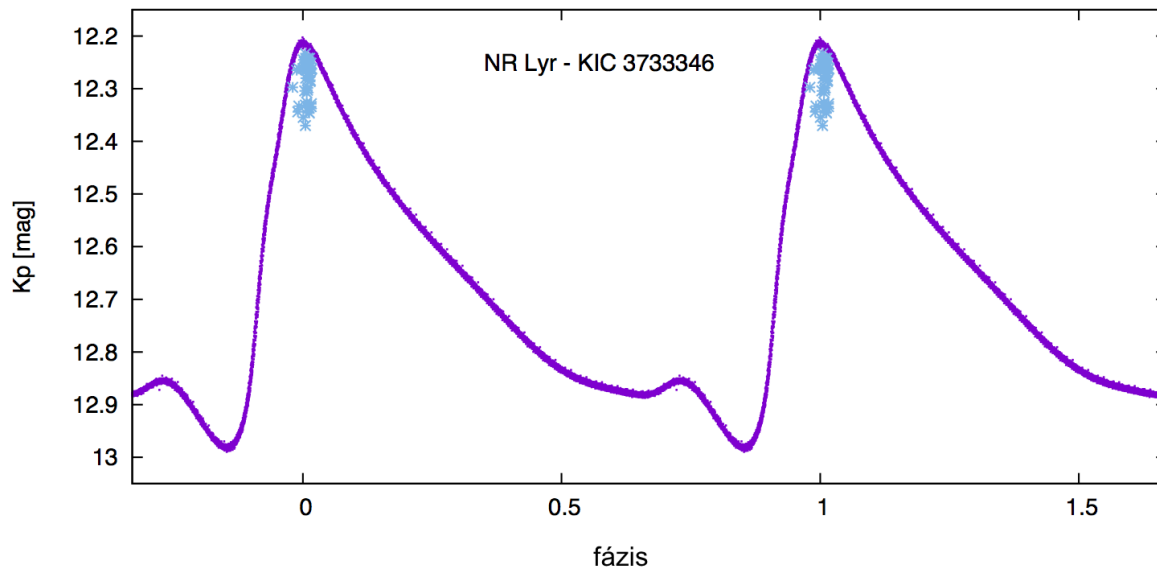
2.2. ábra. Nyers és korrigált fénygörbék két, Kepler által észlelt csillagra. A nyers fénygörbék szakadásokat mutatnak a távcső elmozdítása, biztonsági üzemmód okozta termális tranziensek, fókuszváltozások és a pixelérzékenység változásai miatt. Az a) panelen egy $K_p = 15,6$ magnitúdós, a b) panelen egy $K_p = 14,9$ magnitúdós törpe csillag fényessége látható. A felső görbe mindenhol a nyers, az alsó a PDC modulval korrigált változás. A PDC-korrektció hatásosan távolítja el a trendeket és diszkontinuitásokat (Jenkins és mtsai, 2010).

esetünkben az, hogy emiatt az eszköz termális egyensúlya is megbomlik, és az újratezdés szakaszában lassú trendeket figyelhetünk meg a fénygörbékben, ami a termális kiegyenlítődés és fókuszváltozás következménye.

A Kepler időnként olyan helyzetbe került, hogy **iránytartási képességének pontossága jelentősen lecsökkent**. Ilyen esemény történt, amikor a pontos iránytartást biztosító lendkerekeinek forgása szaturálódott, és csökkenteni kellett azok forgási sebességét, vagy kisebb manővereket kellett végrehajtania. Ilyenkor a fotometriai pontosság is jelentősen lecsökkent (legfeljebb 1%-os pontosságra), így ezeket az adatokat általában elveszettnek tekinthetjük.

Időről időre korrigálni kellett a távcső pozícióját, hogy a csillagok várt helyzete ne térjen el a ténylegestől 0,1 pixelnél jobban. Az **újrapozicionálásra** főleg a misszió elején volt szükség, utána a vezérlőszoftver tökéletesítésével ez a probléma nagyrészt megoldódott. A Kepler látómezeje már elég nagy ahhoz, hogy a látómező különböző területein eltérő mértékű **differenciális aberráció** (Differential Velocity Aberration, DVA) miatt nem lehetett minden csillagot elméletileg sem mindig pontosan a kijelölt apertúrában tartani, csak átlagos értelemben minimalizálni az elmozdulás mértékét az összes megfigyelt csillagra nézve (Van Cleve és Caldwell, 2009). Ezen kívül egy kozmikus részecske becsapódása után egy adott pixel hosszú ideig megváltozott érzékenységgel üzemel. Ezek a korrekciók és események mindig ugrásokat okoztak a fénygörbében, ahogy a 2.2 ábrán is látható.

A 2.2 ábrán kívül is vannak szisztematikus zajforrások a Kepler-adatsorokban. Alább eze-



2.3. ábra. Az R Rab csillagok felszálló ágán tapasztalható rendkívül gyors, nagy mértékű fényesedés miatti túlkompenzálás a Kepler korai szoftverében. Az ábra az NR Lyrae nemmodulált csillag fénygörbéjét mutatja (lila pontok), késsel a kilógó, hibásan korrigált pontokat mutatom.

ket veszem sorra: Az **argabrighteningnek** nevezett jelenség a Kepler látómezejének diffúz megvilágítása, ami néhány percig tart, rendszertelen időközökben fordul elő, és oka nem teljesen tisztázott. Az biztosnak tűnik, hogy ténylegesen bevillanó vagy becsillanó extra fényről lehet szó, és nem az elektronika hibájáról. A legvalószínűbb magyarázat szerint a távcső elé kerülő apró porszemek (mikrometeoritok) sík felületéről becsillanó fénytől eredhet a jelenség. Elnevezését Vic S. Argabright (Ball Aerospace & Technologies Corp.) mérnökről kapta.

Két modul (2db CCD-t tartalmazó egység) **hibásodott meg** elektromos hiba miatt a Kepler eddigi működése alatt a 21-ből. Az első a harmadik negyedben (Q3). Ez azt jelenti, hogy az odaeső célpontok fénygörbéje egy-egy negyedévnyi űrt tartalmaz évente, vagyis összesen a látómező mintegy ötöde érintett. A második modul a névleges misszió legvégén, Q17-ben romlott el. Ez a K2 misszióban az effektív látómező további kismértékű csökkenését okozza.

Fényes csillagok reflexiója és egyéb, különböző felületeken visszaverődő szellemképek is okoznak szisztematikus hibákat (Coughlin és mtsai, 2014). A Schmidt-szerelés miatt a korrekciós lemezen visszaverődő fény a látómező ellentétes oldalán, másik CCD-n hoz létre képet, ennek fényessége 0,04%-a az eredeti képnek, így csak fényesebb csillagok esetében lehet számottevő. Hasonlóképpen, a Kepler látómezejébe nem eső, de ahhoz közeli fedési kettőscsillagok is okoztak hamis pozitív bolygójelölteket. A szándékosan a Kepler CCD-i közé pozícionált nagyon fényes csillagok ($V < 6$ mag) fényének beszűrődése is megnöveli a közelükben a háttér fényességét.

A Kepler által mért RR Lyrae csillagok maxima környékén időnként rendellenes, halvány fényességhez tartozó pontok csoportja látszott az űrteleszkóp legkorábbi adataiban (Q0–Q3, 2.3 ábra). Nem minden pulzációs maximumban volt ilyen, de majdnem minden csillag mutatta a jelenséget. Az alaposabb nyomozás oda vezetett, hogy a Kepler fotometriai szoftvere tévesen **kozmikus sugárzás okozta beütésnek** vette a hirtelen felfényesedést, és **túlkomp-**

zálta a hatást. Az RRab csillagok ugyanis felszálló ági fénygörbeszakaszukon nagyon gyorsan és nagymértékben fényesednek: 1–2 óra alatt akár kétszeresére is növekedhet a fényességük. A Kepler 30 perces effektív expozíciós idejéhez mérten ez szinte pillanatszerű fényesedést jelent. Ezt a hibát bejelentésemre a Kepler szoftvermérnökei orvosolták.

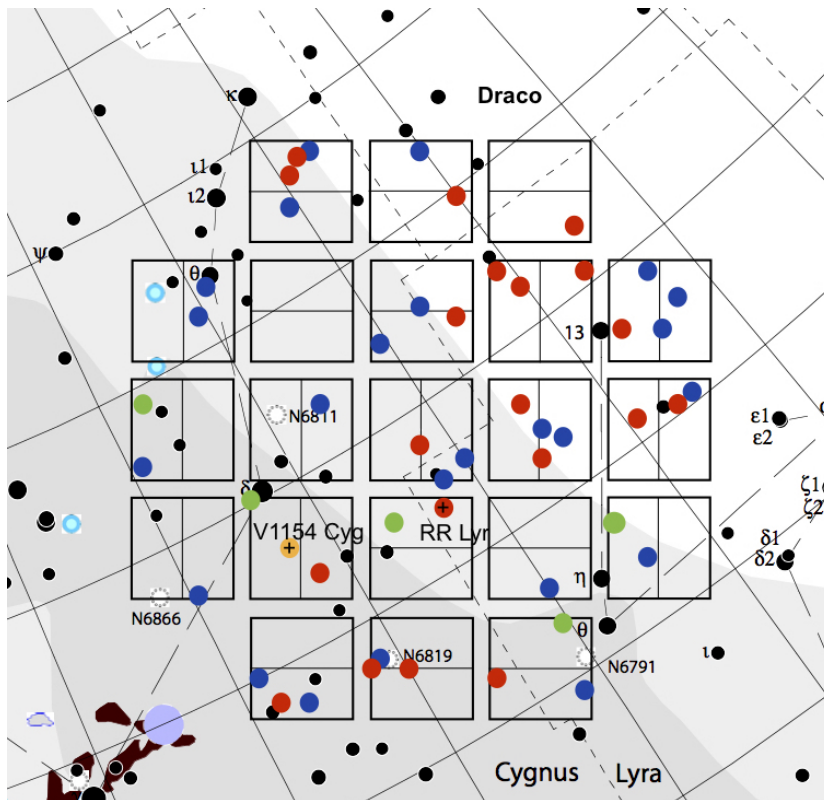
A Kepler 42 db CCD-je 21 modulba rendeződik. Minden modulnak 4 kiolvasási felülete (csatornája) van. A 84 csatorna mindegyike egy fél CCD-t olvas ki, és egy-egy modul jeleit továbbító kábelek párhuzamosan vannak kötegelve. A kötegelt kábelek között kiolvasásakor **elektromos áthallás** (crosstalk) keletkezhet, ami azt eredményezi, hogy egyes (fényesebb) csillagok jele megjelenhet más csillagok fénygörbéjében is. A jelenség erőssége és előfordulása negyedről negyedre és modulról modulra változik. Az áthallás eklatáns példája volt, amikor munkacsoportom halványabb csillagokban is megtalálta a névadó RR Lyrae jelét⁴. Ezek a mini RR Lyrae-k azonos pulzációs és modulációs periódussal, szinkronban pulzáltak a fényes és szaturált szülőcsillaggal, de jóval kisebb amplitúdóval változtak. A szinkronban történő változás egyértelműen elárulja a jel eredetét.

Több mint 300 M színképtípusú vörös óriás 3 évnyi folyamatos, hosszú mintavételezésű Kepler-méréssorozatának elemzése közben új, hosszú időskálájú, szisztematikus műszereffektust fedeztünk fel. A Kepler-űrtávcső Nap körüli keringési periódusa több mint 50 csillag esetében 0,1–0,001 magnitúdós amplitúdójú, szignifikáns, periodikus jelként kimutatható, méghozzá a távcső optikai tengelyétől való távolsággal korreláló fázisban (Bányai és mtsai, 2013). A jelenség legvalószínűbb oka, hogy az űrtávcső **fókuszváltozásai** különböző mértékben torzítják a csillagok alakját az optikai középponttól kifelé haladva, és az űreszköz Nap körüli keringésének megfelelő termális változások képeződnek le ily módon. Az effektus felfedezéséhez a hosszú távú változások vizsgálata vezetett.

A Kepler négy éves, nominális küldetésénél az űreszköz közel egy éves keringési periódusa alatt négy, forgástengelye körüli, 90 fokos forgatást alkalmaztak, azért, hogy a hűtőradiátor a Nappal ellentétes irányba, a napelemtáblák pedig a szoláris irányba nézzenek. Ez a forgatás definiálja a megfigyelési negyedeket (quarters, Q0–Q17); ugyanaz a célpont a különböző negyedek alatt más és más CCD-eszközökre esett, ez pedig a különböző pixelérzékenységek miatt mind a fluxus nullpontjában, mind az amplitúdó konzisztens illesztésénél – különösen a nagy amplitúdójú változócsillagok adatsoraiban – nehézségeket okozott (Çelik és mtsai, 2013). Mivel a korrekt, valódi fényváltozás nem ismert, a függőleges eltolást és nyújtást is feltételező korrekciós probléma – különösen hosszabb űrök vagy hiányzó teljes negyedek esetén – degenerált, rosszul definiált problémára vezet. A Kepler modulált RRab csillagainak végleges fénygörbемegoldásait Benkő és mtsai (2014) végezte el konzisztens módon.

A Földtől egyre távolodó Kepler adatletöltésre használható sáv szélességének szűkössege miatt közel 100 megapixelének csak mintegy 5–6%-át töltötte le minden negyedben. Ez a megfigyelési stratégia elkerülhetetlenné tette, hogy még az űreszköz működése előtt meghatározzuk a számunkra érdekes célpontokat. A **célpontválogatás**nak természetesen más volt a célja az exobolygókeresés esetén, hiszen ott lehetőleg Nap-típusú (F-K) fősorozati csillagok váloga-

⁴Pl. KIC 9583352 és KIC 9583406



2.4. ábra. A Kepler eredeti látómezeje RR Lyrae és cefeida csillagokkal. A nem-modulált RRab csillagokat kék, a Blazskó-moduláltakat piros, míg az RRc változókat zöld pöttyök jelölik. Az egyetlen klasszikus cefeidát narancs pont jelöli. Külön jelöltem a névadó RR Lyraet.

tása volt a feladat. A klasszikus pulzáló változócsillagoknál – ahol a célpontválogatást e sorok írója vezette – célként az összes ismert és feltételezett RR Lyrae és cefeida csillag összegyűjtését tűztük ki, a Kepler előre meghatározott látómezejének területén. Ehhez vezetéssel minden rendelkezésre álló változócsillag-katalógust átnéztünk. Itt a kihívást a földi megfigyelések bizonytalanságai, a katalógusok pontatlansága, hiányos volta és inhomogenitása jelentették, különösképpen a halványabb fényességtartományokban. Részletesebb ismertetés helyett a 2.4 ábrán öt RRc, 25 nem-modulált és 19 modulált RRab csillagot, valamint az eredeti Kepler-küldetés egyetlen klasszikus cefeidáját tüntettem fel. Jellemző, hogy a Kepler-küldetés előtt egyetlen Blazskó-modulált csillag sem volt ismert a területen, a Keplerrel az RRab csillagok mintegy felét moduláltnak találtuk (Benkő és mtsai, 2010).

Érdemes még röviden kitérni a CoRoT-nál tapasztalt speciális nehézségekre: a Föld körüli 101 perces keringési idő miatt a Fourier-spektrumban 14 c/d körüli frekvenciacsúcsok jelentkeznek. Hasonlóképpen a Föld körüli sugárzási öveken, nevezetesen a Dél-Atlanti Anomálián (SAA) való áthaladás során minden keringéskor nagy energiájú részecskezár érte a berendezéseket, ami általában nagyon zajos, pontos fotometriára használhatatlan minőségű adatot eredményezett az idő mintegy 7%-ában (Auvergne és mtsai, 2009). Az adatokkal együtt szállított minőséget jelző indikátor (quality flag) viszont egyszerűen lehetővé tette minden ehhez hasonló fotometriai anomália kiszűrését. A CoRoT-ra jellemző egyedi probléma volt a CCD-k öregedése: ez nagyjából évente 2% érzékenységsökkenéssel járt. Ezt a fokozatos fluxuscsök-

kenést a pontos mérések értelmezéséhez figyelembe kellett venni.

Az ugyancsak Föld körüli pályán keringő MOST-távcsővel tapasztalt nehézségek nagyban hasonlítanak a CoRoT-nál meglévőkre, azzal a különbséggel, hogy az adatok redukcióját és a kész fénygörbék előállítását a MOST-ot üzemeltető szakembergárda szinte teljesen magára vállalta. A fényváltozást analizáló tudósok válláról ezzel nagy terhet vettek le, de ez nem mentesít senkit attól, hogy a teleszkóp instrumentális jellemzőit alaposan tanulmányozza, ha értő módon szeretné a MOST-adatokat felhasználni.

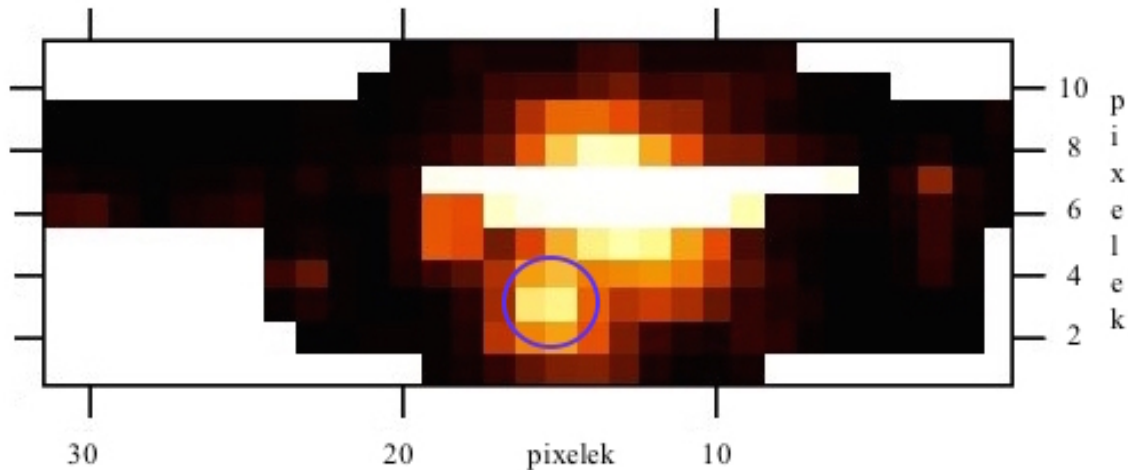
A következőkben olyan konkrét tudományos problémákat és eredményeket ismertetek, melyek mindegyike speciális űrfotometriai eljárásokat igényelt. A legtöbb vizsgálatot magam vezettem, ahol nem, ott a pixelvizsgálatok szintén minden esetben a saját hozzájárulásaim az eredményekhez. Elsőként a cefeidák úttörő űrfotometriai vizsgálatai kapcsán a **nagy amplitúdójú pulzáló változók** egyedi problémáját járom körbe. A Kepler esetében az automatikus, szoftveres (optimális) apertúrakiosztás történt (Brown és mtsai, 2011; Bryson és mtsai, 2010): a letöltendő pixeleket egyetlen időpontban mért fényességből, a KIC-katalógus alapján határozták meg. Ez a nagy amplitúdójú, erősen aszimmetrikus fénygörbék esetén nagy valószínűséggel okozza a tényleges (és maximális) fényesség K_p sávban történő alulbecslését (túl kicsi apertúrát rendeltek hozzá a csillagokhoz), ami fluxusvesztéshez és amplitúdócsökkenéshez vezet. Az RR Lyrae Kepler-fotometriája kapcsán a fényes, **erősen szaturált csillagok fotometriájának** nehézségeit ismertetem. A Kepler és CoRoT viszonylag nagy pixelmérete és a megfigyelt területek alacsony galaktikus szélessége miatt nagyon gyakran előfordul, hogy két vagy több objektumot mért össze az űreszköz. A **blendingnek** is nevezett effektus esetén a fluxus szétválasztása és a pusztán a célponthoz tartozó fluxus rekonstruálása mindig egyedi megfontolásokat igényel, és többször sikeresen működött. Nagyobb felbontású földi felvételek is sokat segíthetnek a probléma megoldásában. Végül egészen egyedi űrfotometriai alkalmazást, a **mozgó objektumok űrfotometriájának** egyes aspektusait tárgyalom. A téma művelésének magyar hegemoniája e sorok írásáig töretlen, amit a már megjelent és publikálás alatt lévő dolgozatok sora fémjelez (Szabó és mtsai, 2015b; Pál és mtsai, 2015; Kiss Cs. és mtsai, 2016; Pál és mtsai, 2016, beküldve).

2.2.1. Nagy amplitúdójú változók

Cefeidák űrfotometriája: Kepler

A Kepler eredeti látómezejében 40 cefeida-jelölt csillag volt, melyeket az űreszköz felbocsátása előtt vezetésemmel válogattunk ki megfigyelésre. Ennek nagy jelentősége volt, hiszen korábban a HST távolságmérési céllal felvett extragalaktikus cefeida fénygörbéin kívül (melyek általában rövid időtartamot fednek le, és kevés pontot tartalmaznak, pl. Macri és mtsai, 2001), csak a WIRE⁵ infravörös csillagászati műhold optikai vezetőtávcsövével, valamint a Coriolis-műhold SMEI (Solar Mass Ejection Imager) műszerével születtek hosszabb űrfotometriai adatsorok cefeidáról, mégpedig a jól ismert Polarisról. Így a cefeidák kis amplitúdójú változásairól

⁵Wide Field Infrared Explorer



2.5. ábra. A V1154 Cygni képe a Kepler érzékelőin. Jól látható a fényes célpont szaturációja, a kiolvasási oszlop mentén szétfolyó fluxus formájában. A jobb helykihasználás kedvéért a pixeloszlopokat vízszintesen ábrázoltam. A kék körrel jelölt objektum egy korábban ismeretlen, másik pulzáló változócsillag (Szabó és mtsai, 2011).

(nemradiális módusok, esetleges Nap-típusú oszcillációk, stb.) először a Keplertől kaptunk részletesebb képet vezetéssel, a MOST és a CoRoT hasonló vizsgálatait megelőzve.

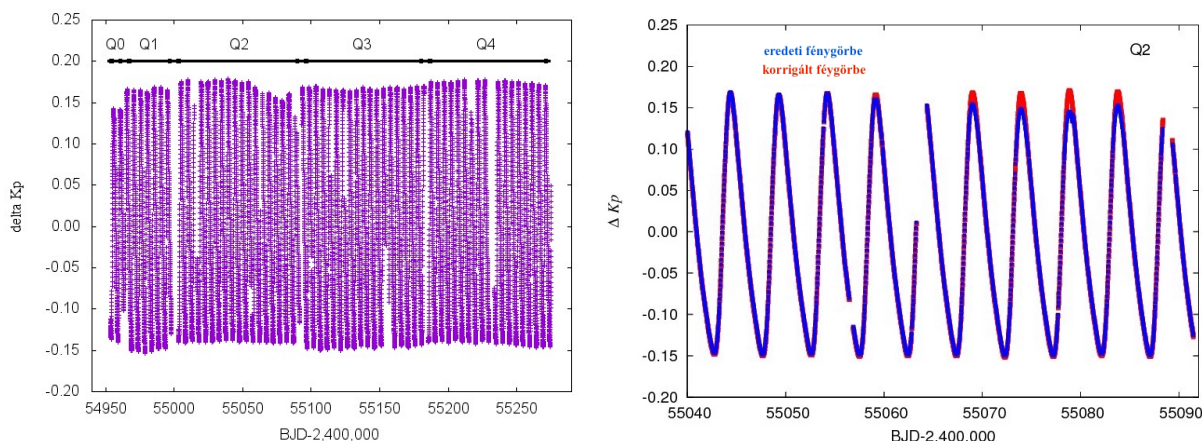
Két módszerrel kerestünk cefeidajelölteket. Először az ismert változócsillag-katalógusokból gyűjtöttük ki a megfelelő periódustartományban változást mutató csillagokat. Ehhez a Változócsillagok Általános Katalógusát, a GCVS-t (Samus és mtsai, 2004), az ASAS North (Pigulski és mtsai, 2009), a ROTSE (Akerlof és mtsai, 2000) és a Magyar Automata Távcsőhálózat (HAT-Net) katalógusait (Hartman és mtsai, 2004) használtuk. A csillagok infravörös színeit (Pojmanski és Maciejewski, 2004), és fénygörbealakjait is felhasználtuk a további szelekcióhoz. Azokat a csillagokat elvetettük, amelyekhez közeli fényes csillagok látszóttak. Ez az eljárás 26 csillagot eredményezett.

Megjegyzem, hogy a fent említett katalógusok nem fedték le egészen a teljes Kepler-mezőt, sem a releváns fényességtartományt. Így egy másik módszert is bevetettünk: a Kepler Bemenő Csillagkatalógusát (Kepler Input Catalog⁶, KIC, Brown és mtsai, 2011) is megvizsgáltuk, megfelelő effektív hőmérsékletű és felszíni nehézségi gyorsulás ($\log g$) értékű jelöltek után kutatva. Érdeemes megjegyezni, hogy a KIC-paramétereket elsősorban a fősorozati és elfejlődött csillagok elkülönítésére használt többszín-fotometriai módszerből származtatták fedési exobolygók keresésének céljából, ezért csak korlátozottan voltak használhatók céljainkra (Batalha és mtsai, 2010). A célpontválogatás időpontjában Pinsonneault és mtsai (2012) által kidolgozott, revideált hőmérsékletskála még nem állt rendelkezésünkre. A $K_p=16$ magnitúdónál halványabb és erősen kontaminált jelölteket itt sem tartottuk meg. A második eljárás 14 új jelöltet hozott, így összesen 40 cefeidajelöltet javasoltunk a Kepler számára, amiket el is fogadtak.

A Kepler mérései és földfelszíni kiegészítő mérések (pl. spektrumok) alapján alapos vizsgálatnak vettem alá a jelölteket. Egyetlen jelöltről, a V1154 Cygniről (KIC 7548061⁷) bizonyo-

⁶<http://tdc-www.harvard.edu/software/catalogs/kic.html>

⁷Kepler Input Catalog azonosítószám



2.6. ábra. **Balra:** A Kepler eredeti látómezejének egyetlen cefeidája, a V1154 Cyg eredeti fénygörbéje Q0-tól Q4-ig. A nem megfelelő apertúra miatt fluxusvesztést látunk (főleg a Q2 negyed végén), ami látszólagos amplitúdócsökkenéshez vezetett. **Jobbra:** A rekonstruált Q2 fénygörbe egy szakasza. Kékkel az eredeti fénygörbe, pirossal a nagyobb apertúra alkalmazásával kapott adatsor látható. Látszik, hogy a fluxusvesztést elkerülve az amplitúdót kielégítő mértékben tudtam rekonstruálni (Szabó és mtsai, 2011).

sodott be, hogy klasszikus cefeida változócsillag. Kimutattam, hogy a többi jelölt nem cefeida; a mintát fedési rendszerek, valamint foltos, fler- és egyéb változócsillagok érdekes egyvelege alkotja (Szabó és mtsai, 2011). Ez a tény földfelszíni változócsillag-katalógusokban rejlő nagyfokú bizonytalanságon kívül a precíz úrfotometria klasszifikálást elősegítő hatalmas helyzeti előnyét is jól demonstrálja.

Magánál a Kepler-cefeida vizsgálatánál több problémát is le kellett küzdeni. Az egyik ilyen, hogy a csillag relatíve fényes ($K_p=8,771$ mag), ezért a Kepler érzékelőin telítésbe ment (2.5 ábra). Tapasztalataim szerint a szaturáció önmagában nem okoz problémát (sőt a fényesebb objektumot pontosabban tudjuk fotometrálni, hiszen más hibaforrásoktól eltekintve a jel/zaj viszony a fotonszám négyzetgyökével skálázódik), ha a megfelelő számú pixellel fedjük le az objektumot. Ez nem mindig sikerült, hiszen a Kepler fotometriai maszkjainak kiosztásánál konstans fényességet tételeztek fel, ami nem veszi figyelembe a nagy amplitúdójú változócsillagok (így többek között az RR Lyraek és cefeidák) időszakos fényesebb és több pixelt igénylő állapotait. Ez ahhoz vezetett, hogy a csillag maximumainak környékén fluxusvesztés (és így látszólagos amplitúdóváltozás) lépett fel. Jól látszik ez a 2.6 ábra bal oldalán, főként a Q2 negyedben. Az, hogy a különböző megfigyelési negyedekben más és más formában lépett fel a fluxusvesztés, érthetővé válik, ha meggondoljuk, hogy az egyes negyedek között a távcső 90 fokos forgást hajtott végre saját tengelye körül, így a csillag képe más CCD-re (és más érzékenységgű pixelekre) esett, valamint a fotometriai maszk alakja is változott az egyes negyedek között. Az ábra egyébként 14485 egyedi long cadence adatpontot tartalmaz, és a Q0–Q4 negyedeket fedi le. A rövid hézagok az adatsorban váratlan biztonsági üzemmódba kapcsolások, a pontos pozíciótartás elvesztése, valamint tervezett adatletöltési intervallumok miatt keletkeztek.

Azért, hogy kiküszöböljem a fluxusvesztés okozta hibákat, nagyobb apertúrával mértem

ki a V1154 Cyg fényességét. Szerencsére ezt megtehettem, mert általában egy több pixel szélességű extra gyűrűt is letöltöttek minden célponthoz rendelt apertúra körül, és az ún. target pixel fájlokat is elérhetővé tették. A látszólagos amplitúdóváltozást sikeresen kiküszöböltem, a sikeres rekonstrukciót a 2.6 ábra jobb oldalán szemléltetem. Látszik, hogy a korrekciónak csak ott volt hatása, ahol a fluxus valóban hiányzott az említett okok miatt.

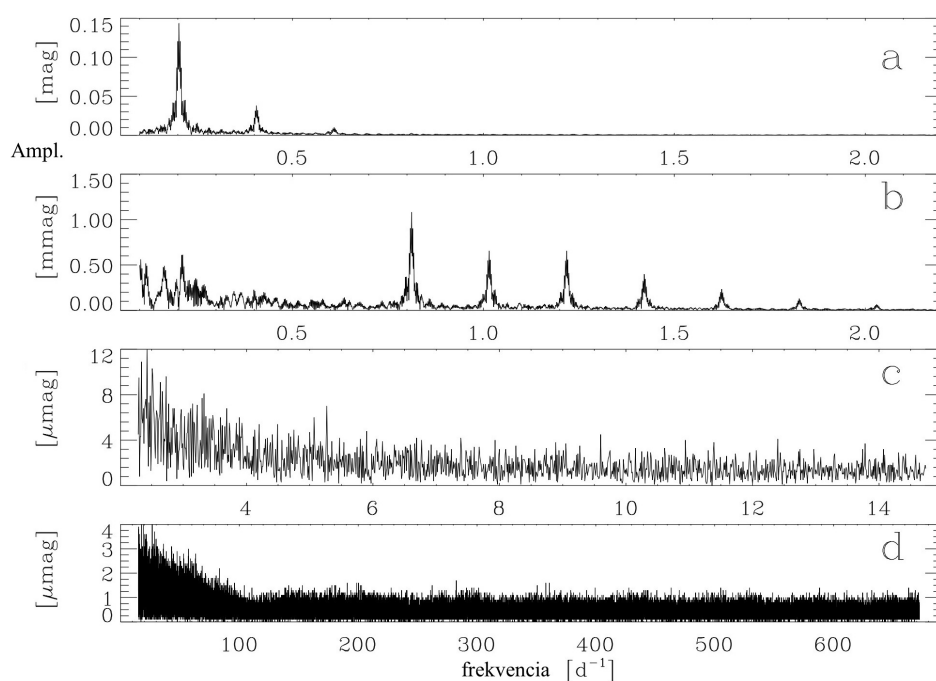
A következő probléma ott jelentkezett, hogy a nagyméretű pixelek és az alacsony galaktikus szélesség következtében előfordulhat, hogy a Kepler több csillagot is összemér. A Kepler eredeti fénygörbéje a V1154 Cygni esetében is tartalmazott egy halványabb csillagot (KIC 7548059). Ez a csillag ráadásul szintén változtatja a fényességét. A frekvenciaspektruma (a 2,0–3,0 ciklus/nap frekvenciatartományban több frekvenciacsúcs is jelen van) alapján pulzáló, valószínűleg gamma Doradus típusú változócsillagnak bizonyult (2.5 ábra). Az általam készített, újabb fénygörbében az ehhez a csillaghoz tartozó pixeleket kihagytam.

A Kepler-cefeida fényváltozásának frekvenciatartalmát sztenderd Fourier-analízis révén vizsgáltam. Az összehasonlíthatóság kedvéért több programcsomagot is használtam erre a célra: SIGSPEC (Reegen 2007), PERIOD04 (Lenz és Breger, 2005) és MUFRAN (Kolláth, 1990a). Ezek egymással konzisztens eredményre vezettek. A 2.7 ábra felső paneljein látható frekvenciaspektrum a fő pulzációs frekvenciát ($f_0 = 0,203 \text{ d}^{-1}$) és harmonikusait mutatja. A fő csúcsok levonása után további harmonikusok jelennek meg. Érdeemes megjegyezni, hogy ilyen pontossággal még soha nem sikerült cefeida fénygörbéjét megvizsgálni. Az alacsony frekvenciás részen megjelenő instrumentális trendeket jelző teljesítményen kívül a frekvenciaspektrum nem tartalmaz több szignifikáns csúcsot egészen a Nyquist-frekvenciáig.

A nagyfrekvenciás rész tanulmányozásához a Q5 negyedben született 1 perces mintavételezésű, kb. 95 nap hosszúságú, 49 ezer egyedi pontot tartalmazó fénygörbét használtam (2.7 ábra legalsó panelje). A zajt alkotó csúcsok teteje $5 \mu\text{mag}$, az átlag $2 \mu\text{mag}$ 50 d^{-1} frekvenciahatárig. Efölött a reziduál magassága $1,5 \mu\text{mag}$ -ra csökken, és 100 d^{-1} felett állandó marad. Az esetlegesen maradó, zajban elvesző csúcsok magassága $1 \mu\text{mag}$ alatt van ebben a tartományban. Az előzetes várakozásokkal szemben sem rövidebb periódusú nemradiális pulzációnak, sem a konvekciós zónához köthető Nap-típusú oszcillációnak nem találtam nyomát az eddigi legpontosabb cefeidamérésekben.

A több évtizedre visszamenő és rendelkezésre álló adatok alapján leszűrhettem, hogy a V1154 Cyg cefeida periódusa átlagosan állandó maradt az elmúlt negyven évben. Gorynya és mtsai (1996) a V1154 Cygni radiálissebesség-görbéjének változása alapján kettős rendszerre következtettek. Új radiálissebesség-méréseinket a régiekkel együtt felhasználva, a hosszabb időbázis segítségével megállapítottam, hogy azok nem mutatnak gravitációsan kötött kísérőre utaló jelet (Szabó és mtsai, 2011).

Összefoglalva: **elsőként vizsgáltam klasszikus cefeidát a Kepler-űrtávcsővel, több hónapnyi folyamatos adatsort felhasználva. Az ultraprecíz, gyakorlatilag megszakításmentes Kepler-fotometriai adatsor révén az eddigieket több nagyságrenddel meghaladó pontossággal vizsgálhattam a fénygörbe alakját és frekvenciatartalmát. A mikromagnitúdós szintig nem találtam nemradiális vagy sztochasztikusan gerjesztett módusokra utaló jeleket. A fá-**



2.7. ábra. A V1154 Cyg frekvenciaspektruma Q1–Q4 LC adatok alapján. **(a):** a fő pulzációs periódus és az első két felharmonikus. **(b):** miután fehérítettem az előző három frekvenciával, további felharmonikusok jelennek meg $10f_0$ -ig. A spektrum magasabb frekvenciákat mutató tartományát a jobb láthatóság kedvéért két részre bontottam: **(c)** a $2,4\text{--}15\text{ d}^{-1}$ és **(d)** a $15\text{--}700\text{ d}^{-1}$ frekvenciatartományt mutatja, mindkettőt a Q5 short cadence adatok alapján számoltam. Érdeemes felhívni a figyelmet az y tengelyek több nagyságrendet átfogó skálázására (Szabó és mtsai, 2011).

ziskésés módszerét alkalmazva megállapítottam, hogy a csillag alaplómódusban pulzál, 4,9 napos periódussal (erről a 3.1 fejezetben írok bővebben). A KASC cefeida munkacsoportja által gyűjtött új radiálissebesség-adatok konzisztensek a régebbi mérésekkel, és valószínűtlenné tesz egy hosszú periódusú másodkomponens jelenlétét.

A munka utóéletéeként a Derekas és mtsai (2012) munkában a V1154 Cygni cefeida 600 napos megfigyeléseit analizáltuk részletesen. Ez majdnem kétszer olyan hosszú adatsor, mint amelyen én végeztem az első vizsgálatokat (Szabó és mtsai, 2011). A legfontosabb felfedezés az, hogy jelentős, ciklusról ciklusra bekövetkező periódusfluktuációt mutattunk ki, a korábban pontos órakként számon tartott pulzáló változócsillagok egyik képviselőjében. A megfigyelt 120 ciklus alatt a ciklushossz 0,015–0,020 napos változásokat mutatott (period jitter). Ugyanakkor a Fourier-paraméterek változásai arra utalnak, hogy ez a változás kapcsolatban lehet a fénygörbealak megváltozásával is. Hosszú időskálán a fluktuáció ellenére a periódus állandónak tűnik. Az eredmények egyben azt is jelentik, hogy a fény-idő effektusra alapozott kísérőkeresési módszerek sokkal kevésbé lesznek érzékenyek a periódusfluktuációt mutató cefeidáknál.

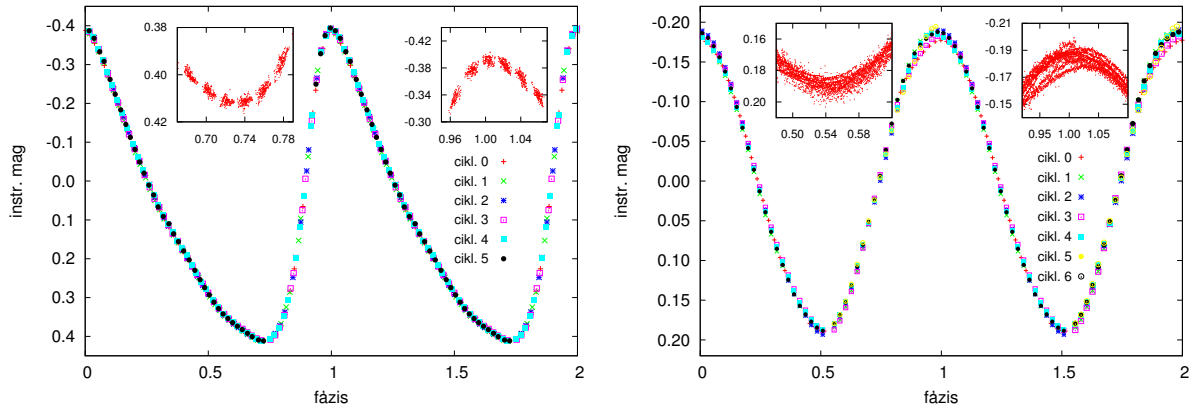
Cefeidák űrfotometriája: MOST

A V1154 Cygninél talált periódusváltozások és fénygörbealak-változások (Derekas és mtsai, 2012) megerősítésére és további vizsgálatára a MOST kanadai űrtávcsőre pályáztunk és nyertünk távcsőidőt. Az amerikai–magyar–kanadai együttműködésben az adatok feldolgozását és analízisét végeztem, emiatt ismertetem az eredményeket ebben a módszertani fejezetben. Hozzájárulásom hidrodinamikai modellek számolására is kiterjedt.

Az első felhangban pulzáló SZ Taurit 19 napig, 1 perces mintavétellel észlelte a MOST 2012 novemberében. Az alaplómódusú RT Aurigae megfigyelésére 2012 decemberében került sor. Ennek a csillagnak a megfigyelése technikai okok miatt úgy történt, hogy az idő felében egy másik csillagot figyelt meg az űrtávcső, oda-vissza váltogatva a célpontok között, ami szabályos időközönként űröket hagyott a fényességmenetben. Az adatredukció a sztenderd módon, a Rowe és mtsai (2006a, 2006b) cikkekben leírtak szerint történt. A MOST-adatokban időnként megjelenhet a Föld visszavert szórt fénye az űreszköz Föld körüli 101 perces keringésének megfelelően, ez a frekvenciaspektrumban többszörös csúcsok formájában jelentkezik 14 ciklus/nap környékén, csakúgy, ahogy a CoRoT-nál említettem. Esetemben ez a hatás az SZ Tau esetében volt erősebb, de kis mértékben a másik célpontonál is jelentkezett (Evans és mtsai, 2015).

Az RT Aur 3,7 napos periódussal pulzál, míg az SZ Tau vonatkozó adata 3,1 nap. A két csillag fénygörbéjének, Fourier-spektrumának és – korábbi megfigyeléseket is felhasználva – O–C görbéjének analízisével azt találtam, hogy a felhangbeli csillag pulzációja kevésbé stabil mind rövid, mind pedig hosszú távon. Míg az RT Aur fénygörbéje szabályosan ismétlődik, addig az SZ Tau pulzációja ciklusról ciklusra változik, még ha ez a változás kismértékű is (2.8 ábra). Legszembetűnőbb a különbség a maximumok környékén. Azt is ellenőriztem, hogy a változás nem írható műszeres effektusok számlájára.

Hasonló különbséget mutattunk ki a Fourier-paraméterekben: míg az RT Aur csillagnál az



2.8. ábra. Két fényes cefeida *MOST*-fénygörbéje, a periódus szerint fázisba rendezve. Balra az alapmódusban rezgő RT Aur, jobbra az első felhangban pulzáló SZ Tau. A kisebb betétek a maximum és a minimum környékét kinagyítva ábrázolják. Az adatokat 0,075 naponként átlagoltam. Az egymás utáni pulzációs ciklusokat különböző színekkel jelöltem. A két csillag összehasonlítása egyértelműen mutatja, hogy míg az alapmódusú RT Aur esetében a ciklusok viszonylag szabályosan ismétlődnek, addig a felhangbeli SZ Taurinál ciklusról ciklusra történő változások lépnek fel, különösen a maximum környékén (Evans és mtsai, 2015).

epochafüggetlen amplitúdók és fázisértékek⁸ jellemzően néhány százalékon belül maradnak, addig az SZ Tau-nál több tíz százalékot is változnak. Ez az eltérés a periódus hosszú távú viselkedésében is tetten érhető, amit legcélszerűbben az O–C diagrammal vizsgálhatunk. Az SZ Tau-nak jóval szeszélyesebb: alternálva felfelé és lefelé mozgó O–C értékei vannak, míg az RT Aur-nál kis fluktuációkat találunk csupán (Evans és mtsai, 2015). Megvizsgáltam 29 első felhangban rezgő cefeida O–C adatait, és azt találtam, hogy hétnél van tiszta parabolikus változás, ami csillagfejlődéssel kielégítően magyarázható, a minta fele nem mutat észrevehető változást (aminek oka a nem túl pontos, vagy nem elég hosszú adatsor is lehet a magyarázata), míg hét csillag az SZ Tau-hoz hasonló, szabálytalan változásokat mutat. Ennek oka valószínűleg ciklusról ciklusra történő periódusváltozás (jitter).

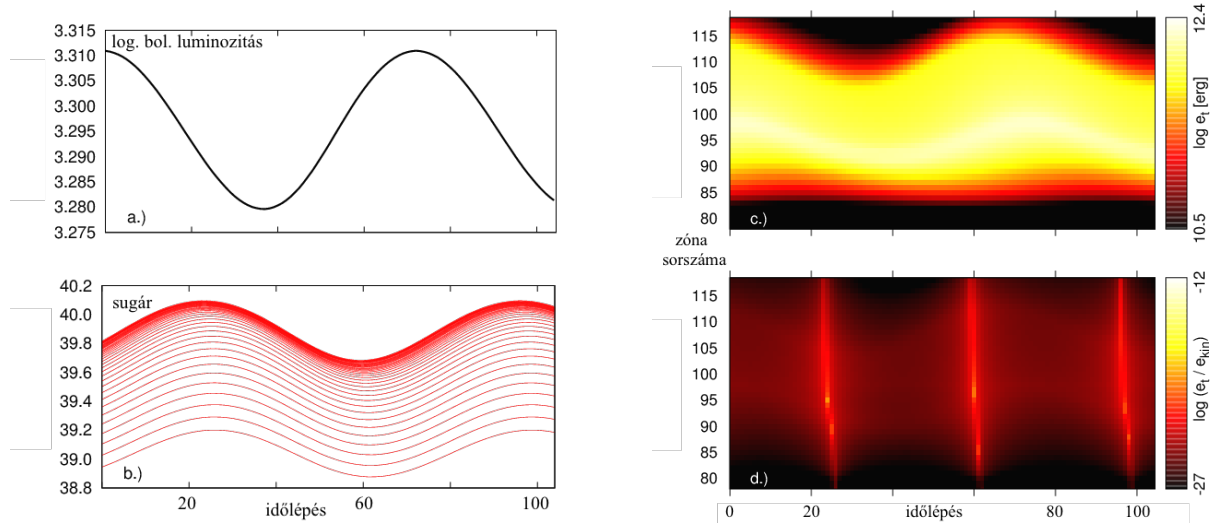
A talált periódusváltozásokra számos magyarázatot diszkutáltunk (Evans és mtsai, 2015):

- Számos esetben a **csillagfejlődés** állhat a háttérben. Ekkor azonban döntően egy irányba történő, parabola alakú változást várunk az O – C diagramon, szemben az általunk azonosított, sokkal gyorsabb, randomnak tűnő változással.

- A **fény-idő effektus** kettős rendszerek esetében ciklikus O – C változásokat okoz. A változásnak azonban szabályosnak kell lennie, szabálytalan változások nem magyarázhatók vele. Ezt a mechanizmust javasolták Turner és mtsai (2007) az RT Aur O – C reziduáljainak magyarázatára, de az újabb méréseink nem igazolták a feltételezést, a változások ± 1 km/s-on belül szórnak az átlag körül (Evans és mtsai, 2015).

- A következő magyarázat, hogy **csillagfoltok** okozhatják a talált változásokat. Neilson és Ignace (2014) feltételezték, hogy a V1154 Cyg-nél talált fénygörbeváltozásokat egy nagyméretű konvektív cellák okozta forró folt hozhatja létre. A két- és többdimenziós modellekre vár a

⁸Ezek definíciója: $R_{i1} = A_i/A_1$, $\phi_{i1} = \phi_i - i\phi_1$, ahol A_i és ϕ_i a Fourier-felbontás i -edik tagjának amplitúdója, illetve fázisa.



2.9. ábra. A Florida–Budapest kóddal számolt felhangban rezgő cefeida modell. **a)**: bolometrikus luminozitásváltozás, **b)**: a legfelső zónák sugárváltozása, **c)**: a turbulens energia az egyes zónákban **d)** a turbulens és kinetikus energia arányának logaritmusai az idő függvényében. A maximum értékek akkor következnek be, amikor a lokális sebesség minimumot ér el (Evans és mtsai, 2015).

feladat, hogy ezt a hipotézist megerősítsék vagy megcáfolják.

- A **tömegvesztés** szintén okozhat periódusváltozást, és habár ennek mechanizmusa nem ismert minden részletében, ez is a monoton változásokért tehető felelőssé elsősorban.

- A **turbulens konvekció** hatását elemeztem részletesebben hidrodinamikai modellszámítások segítségével. A fő kérdés az volt, hogy a részleges ionizációs zónában fellépő turbulens konvekció létrehozhat-e fénygörbeváltozásokat egyik pulzációs ciklusról a másikra. Ehhez a Florida–Budapest kódot használtam, a Szabó és mtsai (2007) munkában leírt módszerrel és paraméterekkel. Az SZ Tau-hoz legjobban hasonlító modellt próbáltam meghatározni, ezért felhangban pulzáló, 3,106 nap lineáris periódusú, a Napéhoz hasonló fémtartalmú modellt számoltam. Ennek paraméterei a következők voltak: tömege $5,25 M_{\odot}$, luminozitása $L = 1979 L_{\odot}$ effektív hőmérséklete $T_{\text{eff}} = 6075 \text{ K}$.

A 2.9 ábra bal oldala mutatja a bolometrikus luminozitást és modell legfelső zónáinak sugárváltozását az első felhanghoz tartozó pulzációs határciklusa alatt. A c) panelen a turbulens energia változását ábrázoltam színkóddal az idő és a zónák sorszámának függvényében (78-tól 121-ig). Ez a tartomány magában foglalja a hidrogén ionizációs zónáját, ahol a turbulens energia maximumát találjuk.

Számításaim azt mutatták, hogy a turbulens energia nagysága elhanyagolható a pulzáció teljes energiaháztartásához képest. A 2.9 ábra d) paneljén a turbulens és kinetikus energia hányadosának logaritmusát mutatom a zónákban az idő függvényében. A legnagyobb értékeket minden zónában a lokális sebességminimumok körül éri el a függvény. A két mennyiség közötti eltérés rendkívül nagy: 10–20 nagyságrenddel marad el a turbulens energia nagyságrendje a kinetikus energiához viszonyítva. Így – legalábbis az egydimenziós kódunk eredményeiből kiindulva – a turbulens konvekció sem tehető felelőssé a cefeidák fénygörbeváltozásaiért. A

következő logikus lépés a hasonló szimulációk kiterjesztése lesz több dimenzióba, mint például azt Mundprecht és mtsai (2013) munkája demonstrálta. Ezekből a modellekből természetes módon adódik akár nagyságrendekkel nagyobb turbulens energia és lokális turbulens fluxus is, szemben az általam alkalmazott egydimenziós modellel, ahol horizontális átlagokkal operálunk. Azonban még a többdimenziós modellek sem valószínű, hogy képesek a turbulens és a kinetikus energia nagyságrendje között talált hatalmas eltérés áthidalására.

– Számos ismeretlen tényező van még a **pulzáció összetett dinamikáját** tekintve is, elég, ha csak a V473 Lyr cefeida Blazskó-effektushoz hasonló viselkedését (Molnár és mtsai, 2013a), a valószínűleg nemradiális módusok jelenlétét (Moskalik és Kołaczowski, 2009), vagy a kétmódusú cefeidák amplitúdómodulációját (Moskalik és mtsai, 2006) említem. A pulzáció mechanizmusával kapcsolatos okokra utalhat az is, hogy a változások korrelálnak a pulzációs móddal: erősebb és szabálytalanabb változásokat tapasztalunk a felhangban rezgő cefeidáknál.

Konklúzióként leszűrhetjük, hogy minden valószínűség szerint egynél több hatás is szerepet játszik a cefeidák periódus- és fénygörbealak-változásának létrehozásában, de további kutatások szükségesek a pontos mechanizmus megértéséhez.

2.2.2. Blending, kontamináció

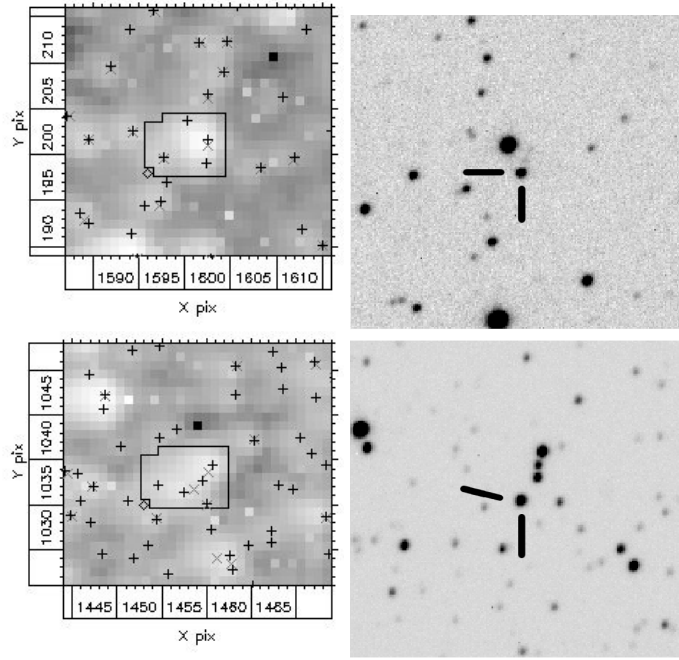
Úrfotometriai vizsgálatoknál fontos, hogy pontosan tudjuk, mit látunk. Paradox módon az úrfotometriára tervezett távcsövek felbontóképessége sokszor elmarad a földiekétől, mert a lényeg a pontos fotometria, ehhez pedig minél több fotont kell gyűjteni. Ezt pedig egyrészt nagy fizikai méretű pixelekkel érik el, másrészt sokszor a szaturáció elkerülése érdekében még enyhe defókuszálást is alkalmaznak.

CoRoT

A problémát kettő, a CoRoT-úrtávcső által észlelt RR Lyrae csillag esetében világítom meg (CoRoT 0100881648 és 0101503544, a továbbiakban 648 és 544). A két csillag jellemzőiről bővebben a 4.1.3 fejezetben számolok be.

A 2.10 ábra bal oldalán láthatók a csillagok képei, ahogy a CoRoT érzékelőire estek. A francia-európai úrtávcső pixeleinek fizikai mérete $13,5\ \mu\text{m} \times 13,5\ \mu\text{m}$, ami 2,32 ívmásodpercrek felel meg az égen. A jobb oldalon pedig a Pizkés-tetői Observatórium 1-méteres Ritchey–Chretien–Coudé (RCC) távcsövével készült képeket mutatom⁹, amik Johnson *V* szűrővel készültek 2008-09 folyamán. Az észleléshez a Princeton Instruments Versarray 1300B kameráját használtuk, ami egy EEV CCD36-40 1340×1300 érzékelővel volt felszerelve. Ez $6,6 \times 6,8$ látómezőt biztosított, $0,303$ pixel felbontással. A földi felvételek több szűrővel (*B*, *V*, *R_C*) készültek, a rekonstrukcióhoz általában a *V* képeket használtuk, amikhez 180 másodperces expozíciós időket alkalmaztunk. A képek redukciójához minden éjszaka bias, flat és dark képeket is készítettünk, a feladatot az IRAF/ccdred1 programcsomaggal végeztük. Az apertúrafotometriához

⁹Észlelő: Benkő József



2.10. ábra. **Balra:** Az 544-es (felül) és a 648-es (alul) CoRoT RR Lyrae csillag EXODAT-képe, a CoRoT által alkalmazott apertúrával. **Jobbra:** V-szűrővel készült képek a Piskéztetői 1 méteres RCC-távcsővel. A látómező mérete: $1' \times 1'$. A képeken észak van jobbra, és kelet lefelé. A változócsillagot két vonal között jelöltem. A földi felvételeket úgy transzformáltam, hogy megegyezzenek az EXODAT-képek skálájával (egy ~ 30 fokos forgatás kivételével). A felvétel a 648-ról pulzációs minimumban, az 544-ről maximumban készült (Szabó és mtsai, 2014).

szintén IRAF-et, a daophot/phot csomagot használtuk. Közele összehasonlító csillagokkal differenciális fotometriát végeztünk. Ezeket nagy körültekintéssel válogattuk: állandó fényűnek bizonyultak, fényességük és színindexeik hasonló volt a mérendő csillagéhoz. Az egyedi fényességmérések hibái 0,01–0,02 magnitúdó körül alakultak. Az ábrán látható, hogy a CoRoT több csillagot is összemért, ezt idegen szóval *blendingnek* nevezzük. A földi, jobb felbontással ezek a csillagok feloldhatók, így az is megállapítható, hogy pontosan melyik csillag a változó, és a fényváltozás amplitúdója is rekonstruálható.

Az 544-es számú csillag Blazskó-modulációt mutat. A CoRoT három színben mérte, az amplitúdó vörösben 0,02, zöldben 0,045 és kékben 0,052 magnitúdó volt, miközben ilyen kis amplitúdójú RR Lyrae csillagot nem ismerünk, és a fénygörbe alakja is arra utal, hogy minden bizonnyal normál amplitúdójú változóról van szó, és az amplitúdó csökkenése a többi csillaggal történt összemérés eredménye. Ezt támasztja alá a viszonylag nagy mértékű moduláció (0,028 mag a zöld sávban), valamint az, hogy a különböző színekben mért amplitúdók aránya megfelel a normál amplitúdójú RR Lyraeknél tapasztaltnak. A kontamináció¹⁰ mértékére az ExoDat katalógus¹¹ katalógus adata $0,13871 \pm 0,00663$, ami túl alacsonynak tűnik. A közelben lévő, és a csillagunkkal összemért objektum 2,0 magnitúdóval fényesebb a V hullámsávban az 544-nél. A piskéztetői képek alapján a kontamináló csillag fényességét állandónak feltételez-

¹⁰A kontamináció definíciója $1 - F_{target}/F_{total}$, ahol F_{target} a célpontcsillagtól származó fluxus, F_{total} pedig a teljes apertúrában mérhető fluxusa háttér levonása után. Az érték 0, ha csak a célponttól származik a mért fluxus.

¹¹<http://cesam.oamp.fr/>

ve kiszámítottam a változó valódi amplitúdóját, ami a V sávban 0,39 magnitúdónak felel meg Blazskó-maximumban és 0,23 magnitúdónak Blazskó-minimumban. **Az erőteljes blending el-
lenére sikerült perióduskétszereződést (4.1.3. fejezet) és extra frekvenciákat is kimutatnom
(4.2. fejezet) a csillagnál.**

A 648-as modulált RRab csillagot szintén összemérte a CoRoT négy halványabb csillaggal is, melyek Ny-ÉNy, illetve É-i irányban látszanak (2.10 ábra). A piszkás-tetői megfigyelések gond nélkül feloldották a csillagokat, és segítségükkel itt is megbecsülhettem a fényváltozás eredeti amplitúdóját. Ez 0,36 magnitúdónak adódott a moduláció maximumában és 0,30 magnitúdónak Blazskó-minimumban, ami egy kicsit kisebb érték, mint a többi normál blazskós RRab csillag esetén, a különbség valószínűleg a mérések és a Blazskó-fázis viszonylag nagy bizonytalanságából adódik. További földi mérésekkel lehetne pontosítani a rekonstrukciót. **Ennél a csillagnál nem találtam sem perióduskettőződést, sem további, extra periodicitásokat.**

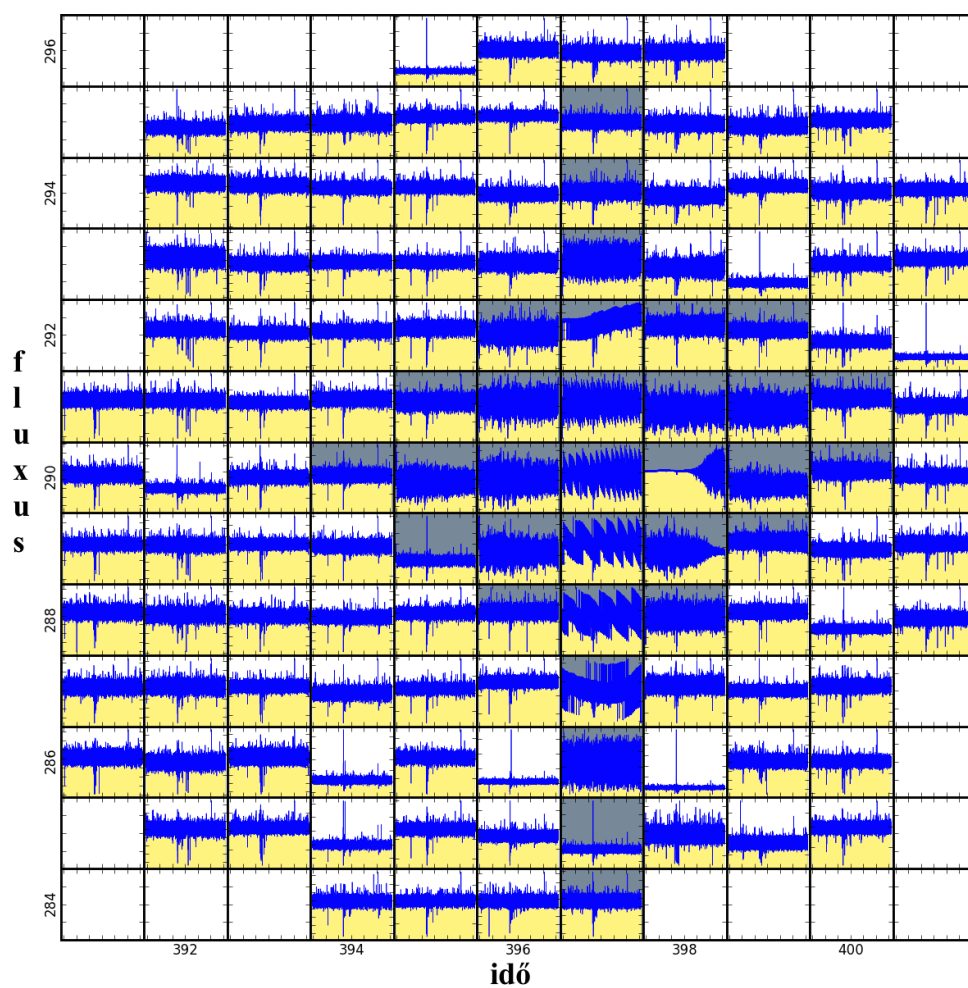
Kepler

A Kepler pixelskálája (3,96" / pixel) szintén azt eredményezi, hogy több csillagot is mérhetett egyszerre az űrteleszkóp, ezért szinte minden egyes vizsgálatnál ellenőrizni kellett, hogy tényleg egyetlen forrásból jön-e mindaz a fényváltozás, amelyet az adott célponthoz rendelt apertúrában látunk. Itt egy ilyen kutatást említek röviden, ahol hozzájárulásom a pixelek és a kontamináció vizsgálatára irányult.

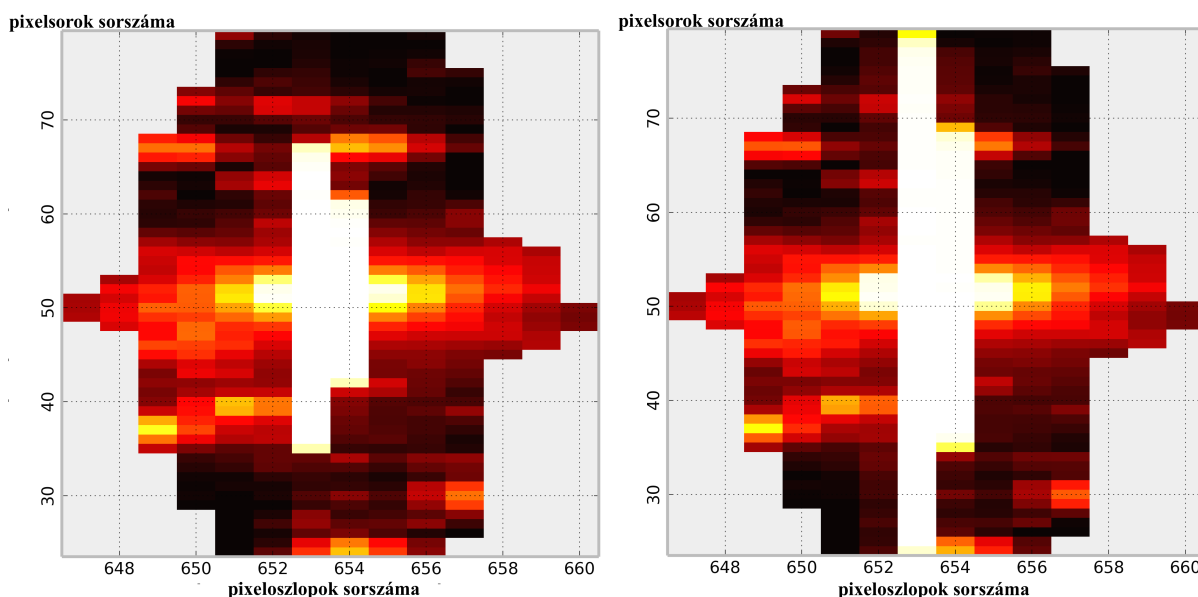
2012-ben megmutattuk, hogy a Kepler által megfigyelt KIC 4840675 jelű csillag három objektumból áll: egy gyorsan forgó A színképtípusú csillagból és két halványabb, Nap-típusú kísérőből. Az A csillag δ Scuti változó egy domináns és sok kis amplitúdójú módussal, valamint több kisfrekvenciás változással. A legnagyobb amplitúdójú kisfrekvenciás jel a csillag forgásával azonosítható. Azonban a rendszer legérdekesebb aspektusa három független frekvencia az 1,4–1,5 mHz frekvenciatartományban, amely messze a kívül esik a δ Scuti csillagok tipikus frekvenciaintervallumán. Három lehetséges magyarázatot adtunk a rejtélyes frekvenciák eredetére: Nap-típusú oszcillációk, a roAp csillag oszcillációja, egy láthatatlan, kompakt pulzáló kísérő, de a kérdés csak további megfigyelések révén dönthető el (Balona és mtsai, 2012). A vizsgálatban döntő jelentősége volt, hogy a pixelek egyenkénti vizsgálatával megmutattam (2.11 ábra), hogy ezek a változások tényleg a KIC 4840675 rendszerből jönnek, és nem a célponttal összemért elő- vagy háttérobjektumok jelét látjuk.

2.2.3. Szaturáció, fényes csillagok fotometriája

A Kepler pixeleire a szaturációs határ 11,5 és 12,0 magnitúdó között van, attól függően, hogy melyik CCD-re és a fókuszsík mely pontjára esik a célpont. A névadó RR Lyrae elég fényes a Kepler eredeti látómezejében megfigyelt csillagok között, így erősen szaturálódott. Fényessége eléri a 7 magnitúdót, azaz majdnem 100-szor akkora fluxusa van, mint a szaturációs határ. Nem meglepő, hogy itt is korrigálnom kellett a fluxusvesztést, amit az eredetileg szűkre szabott apertúra okozott. A cefeidákhoz hasonlóan az RR Lyrae csillagok is nagy amplitúdójúak, az RRab csillagok gyors felszálló ágának rövid időtartama (1–2 óra) alatt fényességüket akár



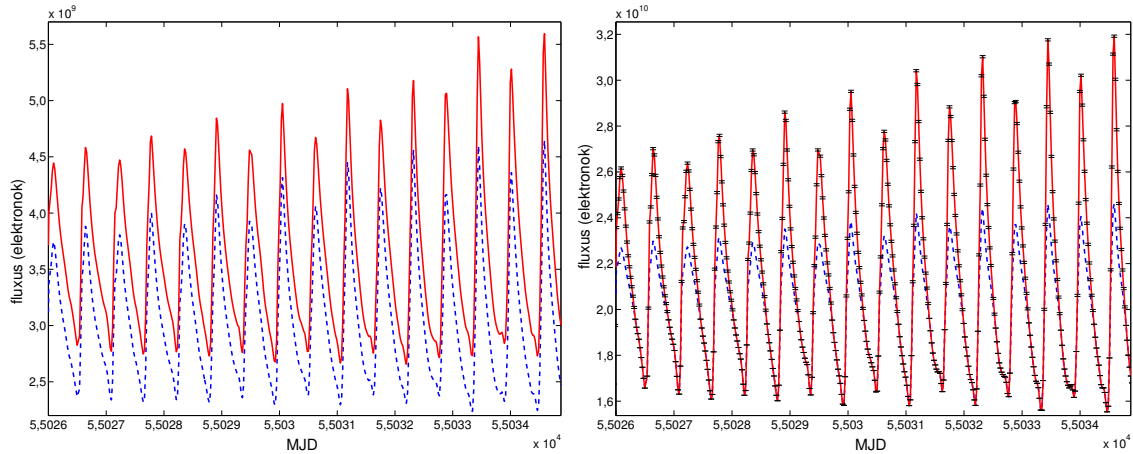
2.11. ábra. A KIC 4840675 objektum Q9 negyedben mért utolsó 1 hónapjának short cadence (1 perces mintavételezésű) Kepler-adatai pixelenként. A normalizálás az adott pixel maximum értékével történt. Az üres pixelek adatait nem töltötték le. A szürke háttérű pixelek alkotják az automatikusan hozzárendelt apertúra-pixelet. Látható, hogy ennél jóval több pixelt töltöttek le. A letöltött középső oszlopban szaturáció jelei látszanak (a csillag $K_p=9,67$ magnitúdó fényes).



2.12. ábra. A névadó RR Lyrae pixelei a Kepler Q2 negyedében. A szürke pixeleket nem töltötték le. Balra: a csillag minimuma körül, jobbra: maximuma környékén. Látható, hogy a csillag maximumában a telítésbe ment pixelek elérték az apertúra határát, így fluxusvesztés következett be.

meg is duplázhatják. Ez is hozzájárult ahhoz, hogy eredetileg túl kevés pixelből álló apertúrát rendeltek a csillaghoz, és a csillag maximumaiban gyakran elveszett a fluxus egy része. Ahogy a V1154 Cygni esetében szerencsés módon volt alkalmam a megszabott apertúrán túli letöltött pixelekkal dolgozni, itt sajnos a szaturáció okozta túlsordulás az összes letöltött pixel alkotta határt is meghaladta, amit egyszerű módszerekkel nem tudtam rekonstruálni (2.12 ábra). A kialakult helyzetet részben magyarázza, hogy az RR Lyrae eleve közel esett az egyik CCD fizikai határaihoz, tehát nem is lett volna mód elég nagy apertúra alkalmazására. Mégis mit lehet tenni ebben a helyzetben, amikor az egyik legértékesebb, ismert Kepler-célpont fényességváltozását szeretnénk rekonstruálni?

A szaturáció ellenére a fluxus nagy részben megőrződik, így ha valamilyen módszerrel meg tudjuk becsülni a fluxusvesztést, akkor továbbra is pontos fotometriai mérésünk lehet. A Szabó és mtsai (2010) és Kolenberg és mtsai (2011) munkákban erre tettem kísérletet a névadó RR Lyrae legkorábbi Kepler-megfigyeléseinek esetében. A korai negyedek közül a Q1-ben viszonylag kevés fluxusvesztés történt, míg a Q2-ben már jelentősebb volt a hatás. A központi, legjobban szaturálódott oszlop melletti oszlopok is tartalmaznak telítésbe ment pixeleket, de jóval kevesebbet (2.12 ábra). Szerencsére a Q1 és Q2 negyedekben ezen szomszédos oszlopok fluxusait teljes mértékben sikerült rögzíteni. Erre alapozva a következő módszert dolgoztam ki: azokban az időpontokban, amikor a csillag halványabb volt, és a központi oszlop jelentette teljes fluxus megőrződött, meghatároztam a középső, legtöbb fluxust tartalmazó oszlop és a szomszédos oszlopok teljes fluxusa alkotta arányt. Úgy találtam, hogy ezek jó közelítéssel függetlenek a csillag aktuális fényességétől, ezért használhatók azokban az esetekben, amikor a központi oszlop fluxusának egy része elveszett. Az így kalibrált aránnyal aztán rekonstruáltam



2.13. ábra. **Balra:** A névadó RR Lyrae Kepler-megfigyeléseiben az erősen szaturált oszlop melletti bal (kék szaggatott) és jobb (piros) oldali, nem szaturált oszlopok fluxusa. Ezekben az oszlopokban nem volt fluxusvesztés. **Jobbra:** Az RR Lyrae Kepler által automatikusan kinyert és elérhető fénygörbéje (kék szaggatott vonal), valamint a fluxusvesztésre korrigált fénygörbe (piros) a Q2 negyedben, $\pm 1\sigma$ hibahatárokkal. A fénygörbéken jól látható a perióduskettozódés (bővebben lásd a 4.1.3. fejezetben) (Szabó és mtsai, 2010).

a csillag fényességváltozását (2.13 ábra).

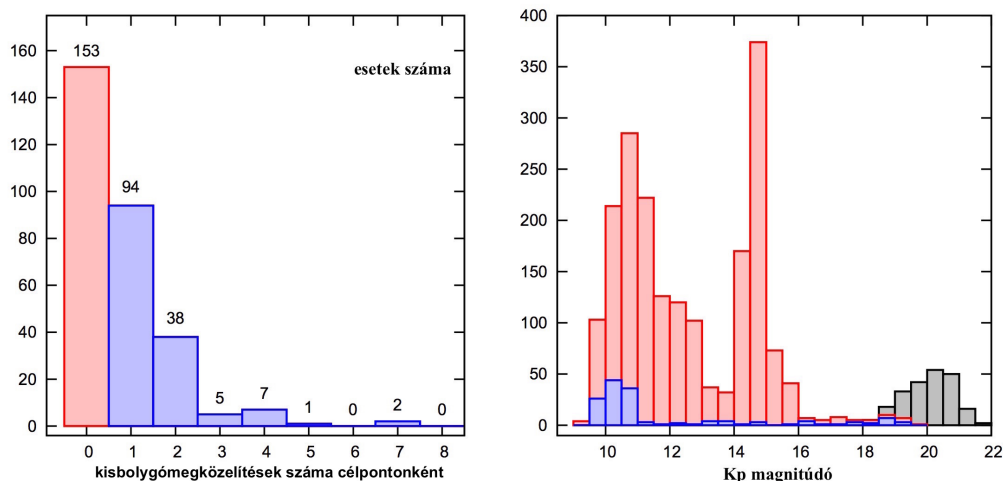
A Q1 negyedben csak mintegy 10%-nyi korrekciót igényelt a központi oszlop fluxusa, azt is csak a negyed elején. Ezzel szemben a Q2 negyedben minden pulzációs maximum környékén korrekciót kellett alkalmaznom, amelynek a mértéke 30–60% közé esett. Mivel az említett arányt minden egyes mérési pontban meghatároztam, így annak bizonytalanságát is tudtam becsülni. Ezzel a központi oszlop fluxusára alkalmazandó korrekció hibáját is meg tudtam határozni, a Q1-ben ez 0,45%-nak, Q2-ben 0,36%-nak adódott.

A központi szaturált oszlop korrigált fluxusának segítségével ezután meghatároztam a csillag fényességét. A Q1 negyedben a korrekció aránya a teljes fluxushoz mindössze 5% körül volt, míg a Q2-ben 15% és 35% között mozgott. Ezekben a negyedekben a fotometriai bizonytalanság 0,25% volt ott, ahol a korrekciót alkalmazni kellett, szemben a $8 \cdot 10^{-6}$ -os (long cadence) megfigyelési pontonkénti pontossággal ott, ahol a korrekció alkalmazására nem volt szükség. A korrigált fénygörbe azután számos további vizsgálat tárgya lett (Szabó és mtsai, 2010; Koltenberg és mtsai, 2011; Molnár és mtsai, 2012a), melyek közül a saját eredményeimet a 4.1.3. és 4.2. fejezetekben ismertetem.

2.2.4. Mozgó objektumok

A Kepler utódja, a K2 misszió ekliptikai mezőket pásztáz 70-85 napos időtartamokban (kampányok). Ezekben elkerülhetetlenül jelen van nagyszámú naprendszerbeli objektum is, főként főövbeli kisbolygók. Elsőként vizsgáltam meg azt a kérdést, hogy milyen hatással van az aszteroidák jelenléte a K2 nagy pontosságú fotometriai méréseire (Szabó és mtsai, 2015b).

A távcső 2014 februárjában egy tesztkampányt végzett (K2 Two-Wheel Concept Engineering Test, rövidítve: K2-E2), elsősorban a távcső teljesítőképessége és az iránytartás ellenőrzése céljából. Ehhez a Halak csillagkép $\alpha = 359^\circ$, $\delta = -2^\circ$ középpontú területét választották. A kam-



2.14. ábra. **Balra:** a kisbolygó-megközelítések száma csillagonként a 300-as mintában. A csillagok felét nem közelítette meg főövi aszteroida (piros oszlop), a többi célpontot viszont egy vagy akár több kisbolygó is. **Jobbra:** A teljes megfigyelt K2-E2 célpontlista fényességeloszlása (piros). Az általam vizsgált csillagokat a kék oszlopok mutatják, a szürke hisztogram a látómezőbe került kisbolygók fényességét mutatja (Szabó és mtsai, 2015b).

pány során 1952 long cadence célpontot és 17 short cadence csillagot mértek. A tesztüzem alatt a fluxusveszteség elkerülése érdekében 50x50 pixeles területeket töltöttek le minden csillag körül – sokkal nagyobbakat, mint a névleges Kepler-misszióban és a várható további K2 kampányokban. A tesztmegfigyelés 8,9 napig tartott. Ez alatt tisztán észrevehető egy nagyjából 1 pixeles elmozdulás a csillagok pozíciójában, illetve 2,3 nappal a kampány kezdete után egy több pixeles elmozdulás is, ami szándékos (tervezett) elmozdítás volt.

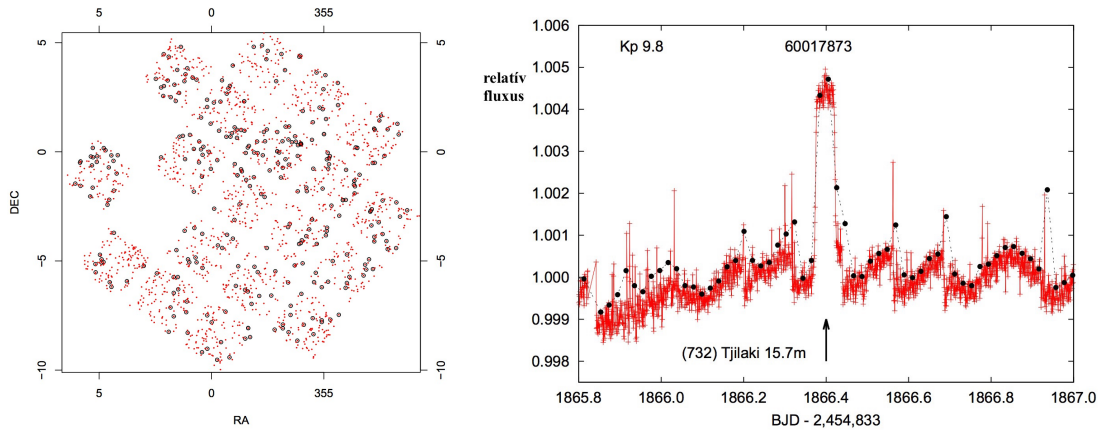
A következő kérdésekre kerestem a választ: hány kisbolygó szeli át a K2 látómezőket? Milyen hatást okoz, ha egy kisbolygó megközelít egy csillagot, és hogyan lehet ezt felismerni és figyelembe venni a fotometriai eljárásban? Azonosíthatjuk-e a talált kisbolygókat, és vannak-e köztük újak? A vizsgálatokhoz egy kisebb, 300 csillagot tartalmazó mintát választottam az eredetileg 2079 megfigyelni tervezett célpont közül¹². A kiválasztás véletlenszerűen történt. A megfigyelt csillagok ekliptikai szélessége $\beta = -8,6^\circ - +5,5^\circ$ között változott, ami jól reprezentálja a teljes K2-E2 területet. A minta a 2.15 ábra bal oldalán látható az összes megfigyelt csillaggal együtt.

Az elérhető adatokból rövid animációk készültek, majd ezek vizuális átvizsgálása következett, feljegyezve azokat az eseményeket, amikor egy kisbolygó átment, vagy érintette egy csillag képét (összeolvadt vele olyan mértékben, hogy a fotometriát zavarhatta). A csillag képéhez tartozónak tekintettem azokat a pixeleket, amik legalább 3σ értékkel kiemelkedtek a háttérből az esemény előtt és utána. Azt találtam, hogy minden 21 magnitúdónál fényesebb, előre jelzett naprendszerbeli objektumot megtaláltunk a képeken, és a 21,0–21,5 magnitúdótartományban is csak néhányat nem vettünk részre. Egy tipikus megközelítés 3 óráig tart.

A megfigyelések közel kilenc napja alatt 147 csillagnál történt kisbolygómegközelítés¹³, ami

¹²A 7-es modul meghibásodása miatt ténylegesen csak 1952 csillagot mért a K2.

¹³Megközelítésről beszélünk, hiszen tényleges fedésre (okkultációra) rendkívül csekély az esély, nem is láttunk



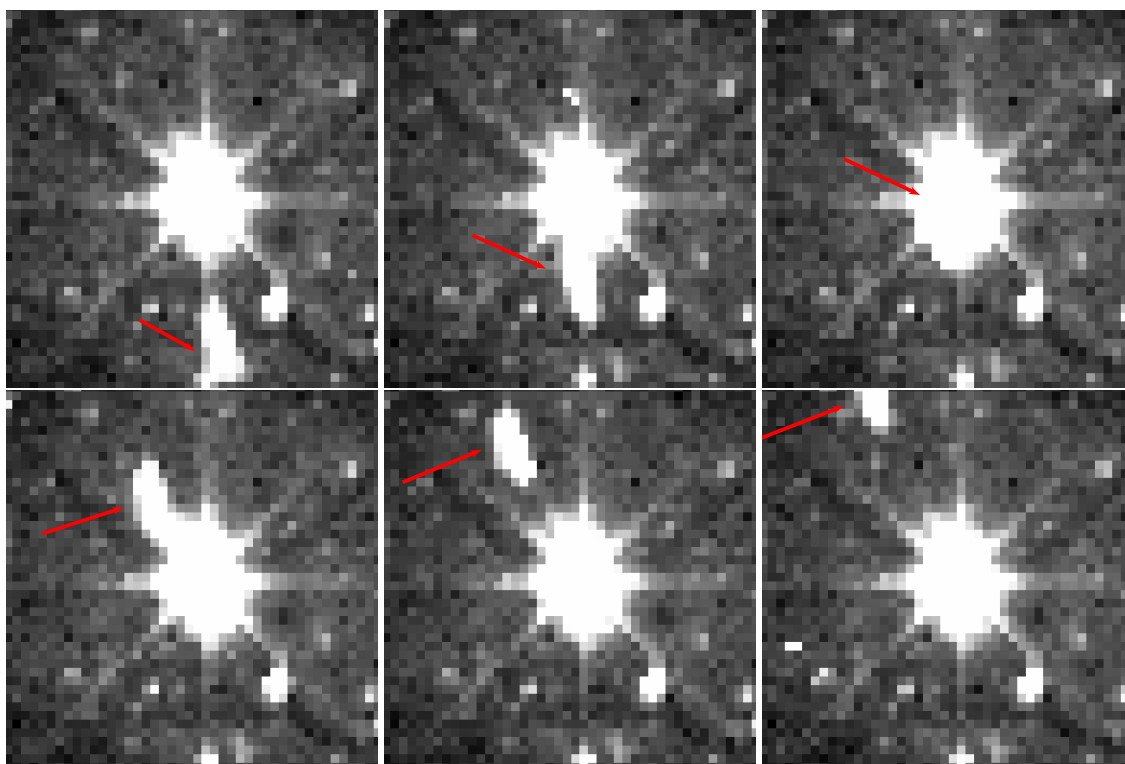
2.15. ábra. **Balra:** Az 1952 célpontcsillag (piros pontok) és az általam kiválasztott 300-as minta (fekete körök) elhelyezkedése a K2-E2 mezőben. **Jobbra:** Egy fényes csillag fénygörbéje a (732) Tjilaki kisbolygó megközelítése idején. A piros pontok a short cadence adatokat, a fekete pöttyök a long cadence adatokat mutatják. A short cadence adatokból a kilógó pontokat eltávolítottam. A kisbolygó megközelítésének időpontját nyíl mutatja (Szabó és mtsai, 2015b).

49%-ot jelent. Ennél kevesebb azon csillagoknak a száma, melyeknél jelentős hatás volt megfigyelhető, azaz fényes objektummal találkoztak. Azonban az összes megfigyelt esemény száma ennél jóval magasabb (232), ami azt jelenti, hogy több csillagot több különböző aszteroida is megközelített. A megközelítések szám szerinti eloszlását a 2.14 ábra bal oldala mutatja. Kilenccvennégy csillagnál egy, 38-nál két esemény történt, míg többszörös események is viszonylag gyakoriak voltak: két objektumot 7-7 kisbolygó közelített meg a rövid megfigyelési időszak alatt!

A K2-E2 területen megfigyelt összes long cadence üzemmódban mért csillag látszólagos fényességének eloszlását a 2.14 ábrán piros oszlopokkal ábrázoltam. A kisebb, kék oszlopok a 300-as kiválasztott mintám fényességhisztogramját mutatják. Mindkét minta lefedi a teljes ($K_p = 9-20$) fényességtartományt. Az eredeti mintában erős többlet látszik a ($K_p = 14-15$) tartományban, ami nem az adott irányba látszó csillagok valódi fényességeloszlását, sokkal inkább a megfigyelési célpontok kiválasztásai mechanizmusát tükrözi. A hisztogramon szürke oszlopok jelzik a talált kisbolygók fényességeloszlását. Mint az várható volt, igazán fényes kisbolygót keveset találtunk: mindössze 15-öt számoltunk össze a 15,5–18,5 magnitúdótartományban. A többi naprendszerbeli égitest ennél halványabb volt, erős csúccsal a 20-21 (V) magnitúdós tartományban. A leghalványabb azonosított főövbeli kisbolygó 21,7 magnitúdós volt.

A 2.15 ábrán a fényes ($K_p=9,8$) EPIC 60017873 jelű csillag fénygörbéjén látjuk a szintén viszonylag fényes (732) Tjilaki kisbolygó közelítését. Az esemény képei a 2.16 ábrán követhetők. A fotometriához olyan apertúrát választottam, ami valószínűleg tipikus lesz a K2-mezők észlelése során ilyen fényes csillagra. Ez a gyakorlatban 14x14 pixeles maszkot jelentett. A lokális háttérrel levontam. A short cadence idősor 13088 db pontot tartalmazott, amiből 64 szélsőségesen kilógó ($>10\sigma$), fényes pontot távolítottam el. Ezek a pontok a mintegy hat óránként bekövetkező vezetési korrekciókhoz köthetők. Egyéb korrekciót, vagy trendmentesítést nem végez-

ilyet a K2-E2 adatokban.



2.16. ábra. A 15,7 magnitúdós (732) Tjilaki kisbolygó megközelíti a fényes EPIC 60017873 ($K_p=9,8$ mag) csillagot a K2-E2 mezőben. A 30 perces expozíciós idő miatt az aszteroida képe elnyúlt (piros nyíl mutatja). A megfigyelés három órát fed le. Az idő balról jobbra és fentről lefelé telik. A 2.15 ábra ugyanezt az eseményt mutatja (Szabó és mtsai, 2015b).

tem. A csillagot azért választottam, mert short cadence adatok is rendelkezésre álltak, amit az ábrán piros pontok jelölnek. A kisbolygó okozta elmozduló többletfluxus tisztán látható. A 30 perces mintavételezésű fénygörbe szintén mutatja a jelenséget, és az esemény időtartama miatt el is különíthető például a kozmikus sugárzás keltette fényesebb pixelek hatásától, amelyek jellemzően sokkal rövidebb időtartamúak. Több különböző fényességű csillag és aszteroida kombinációt megvizsgálva általánosságban megállapítható, hogy még az 5-6 magnitúdóval halványabb kisbolygók is észrevehető felfényesedést okoznak, ha kellően megközelítenek egy célszillagot.

Azt is demonstráltuk, hogy maguknak a kisbolygóknak a pontos fényességmérése is kivitelezhető. Itt a K2 előnye a folyamatos megfigyelés lehetősége, hiszen a főívi kisbolygók átlagosan 2 napot töltenek a távcső látómezejében, és ha nagyobb összefüggő területek pixeleit is le-töltik (például csillaghalmazok környezetét), akkor egyedülálló lehetőség adódik a kisbolygók fényességváltozásának pontos optikai követésére. Példaként egy short cadence üzemmódban megfigyelt 20,5 magnitúdós kisbolygó 4,5 órás megfigyeléseit analizáltuk, és 0,12 magnitúdós pontosságot értünk el a képek ötösével történt összeadásával.

A K2-E2 mezőbeli kisbolygók azonosítására kidolgozott eljárásunk egyértelműen azonosított minden kisbolygót, újat nem találtunk. Mind a 232 kisbolygó ismert és sorszámozott volt, kivéve egy földközeli kisbolygót, nevezetesen a 2013 OE-t. Ezt nagy sebessége miatt csak két egymást követő képen találtuk meg. Fordítva is igaz: minden, a mezőben előrejelzett asz-

teroidát sikerült megtalálnunk 20 magnitúdós fényességhatárig. A tapasztalatok birtokában kijelenthetjük, hogy kevés új kisbolygóra számíthatunk a K2 misszió során, 20 magnitúdóig a fővi kisbolygók túlnyomó része már ismert.

Összefoglalva: megmutattam, hogy a kisbolygó-megközelítések nagyon gyakoriak lesznek az ekliptikai K2 misszió során: a technikai demonstrációnak szánt K2-E2 mezőben megfigyelt 1952 csillag közül egy 300 csillagot tartalmazó almintában azt találtam, hogy a rövid, kilenc napos megfigyelés alatt a csillagok felét érintette egy vagy több (akár hét) aszteroida-megközelítés, ami a fénygörbájukon nyomot hagy. Az események átlagos időtartama lehetővé teszi a zajforrás azonosítását és kiküszöbölését. Megmutattam, hogy lehetséges a kisbolygók pontos fotometriája is. A talált kisbolygók átlagos fényessége 18,0–21,5 magnitúdó között volt. Mindegyiket sikerült azonosítani, és minden előre jelzett naprendszerbeli égitestet megtaláltunk eddig a fényességhatárig. Az itt tárgyalt problémák mindegyike releváns lesz a közeljövő űrfotometriai misszióiban (NASA: TESS (Ricker és mtsai, 2015), ESA: PLATO (Rauer és mtsai, 2014), hiszen a Keplerénél is nagyobb pixelskála elkerülhetetlenné fogja tenni a kisbolygók (és más csillagok) által okozott zavaró hatások korrekt figyelembevételét a nagy pontosságú fotometriai méréseknél.

2.3. Az eredmények hatása

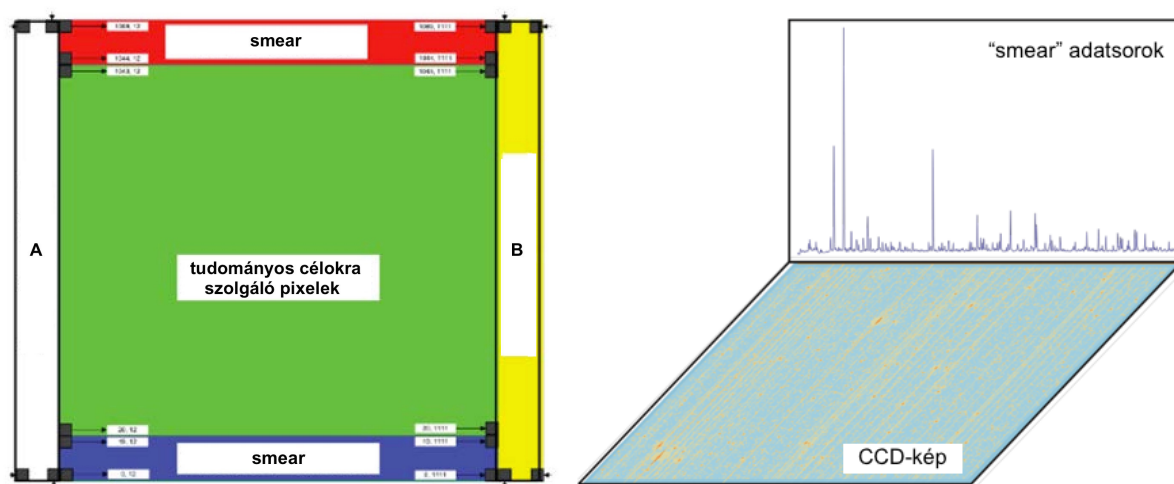
A Kepler-adatokon végzett pixel-szintű fotometria elterjedésének számos kutatás látta hasznát, ezek közül csak azokat említem, amelyekhez én is tevőlegesen járultam hozzá, vagy közvetlenül kapcsolódik az én munkámhoz. Itt vázolom fel röviden azokat az új lehetőségeket és eljárásokat is, amelyek a jövő űrfotometriai misszióiban is várhatóan fontosak lesznek.

A Kepler összes Blazskó-modulációt mutató R_{Rab} csillagát pixel-szintű fotometriával újraanalizáltuk. Ezáltal minimalizáltuk a nem megfelelő automatikus apertúra használatából adódó a fluxusvesztéseket, az egyes negyedek közötti érzékenységekülönbségeket és amplitúdóeltéréseket. A tisztított, végső fénygörbék alapján megállapítottuk, hogy a blazskós csillagok több mint 80 százaléka többszörös modulációt mutat (Benkő és mtsai, 2014)¹⁴.

Poretti és mtsai (2015) további **hét CoRoT-cefeida** megfigyeléséről, illetve felfedezésekről számoltak be. Közülük négy alapl módusú, kettő első felhangban pulzáló klasszikus cefeida, egy pedig kettes típusú cefeidának (W Vir) bizonyult. A CoRoT-fénygörbék analízise azt mutatta, hogy a Derekas és mtsai (2012) által felfedezett fénygörbealak- és periódusváltozások nagyon kis mértékben vannak jelen a CoRoT-cefeidákban, így megerősítésük további űrbeli méréseket igényel, amit várhatóan a K2, TESS és PLATO missziók fognak elvégezni a következő években-évtizedekben.

A Kepler-látómezőkben található telítésbe ment csillagok fotometriája megvalósításának egy ötletes technikai lehetőségét Kolodziejczak és Caldwell (2011) vázolták (2.17 ábra). A módszer azon alapszik, hogy a tudományos célokra fenntartott pixeleken túl néhány meg nem vi-

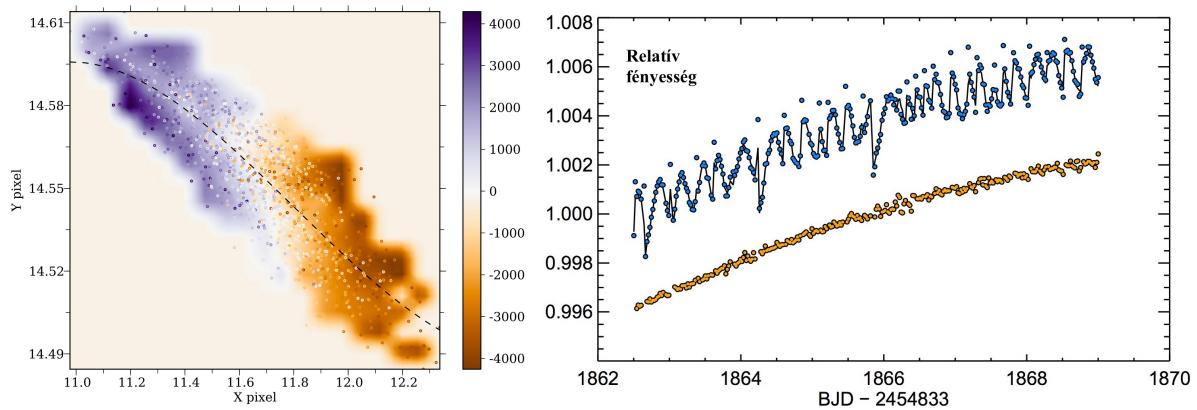
¹⁴Az említett cikk tisztított, "tankönyvi" fénygörbéi elérhetők a <http://www.konkoly.hu/KIK/data.html> honlapon.



2.17. ábra. A smear fotometria működési elve. Balra a Kepler CCD-k beosztása, amiből a zöld jelöli a tudományos célokra letölthető pixeleket, a kék és vörös pixelsorok pedig eredetileg csupán technikai célokra szolgáltak, de rövidebb effektív expozíciós idővel tartalmazzák az adott oszlopban rögzített bejövő fluxust, ami így felhasználható a fényes csillagok fényességének mérésére (jobbra) (Kolodziejczak és Caldwell, 2011; Pope és mtsai, 2016).

lágított pixelsorral töltötték le a Kepler minden expozíciójánál. Ezeket a pixeleket az űrtávcső technikai paramétereinek állandó monitorozására, és nem tudományos célokra töltötték le. Ezek a pixelek azokat a pixelértékeket tartalmazzák, amik a CCD-et eltakaró zár-szerkezet (shutter) hiánya révén a kiolvasás alatt is akkumulálódtak az adott oszlopokban. Így bár rövidebb effektív expozíciós idővel, de az adott oszlopban bejövő fluxust is rögzítették, ami így felhasználható a fényes csillagok fényességének mérésére. Az extra pixelsorokat smear-nek nevezik, az eljárás pedig a **smear fotometria** elnevezést kapta. A módszer gyakorlati megvalósítását Pope és mtsai (2016) írták le. Az eljárás előnye, hogy abban az esetben is működik, amikor nem töltötték le az adott csillaghoz tartozó normál pixeleket, vagyis melléktermékként az összes fényes csillagról utólag is nyerhető fotometria. Hátrányként a csillagokban sűrű terület esetén fellépő konfúziót említhetjük, és a dedikált pixelekhez viszonyított alacsonyabb jel/zaj arányt. A pixeltakarékos ötletnek a K2 és PLATO misszióknál is kiemelkedő jelentősége lesz.

A két lendkerékkel működő Kepler-űrtávcső speciális nehézségekkel néz szembe a K2-nek nevezett, ekliptikai területeket pásztázó üzemmódjában, ami a **K2 fénygörbék egyedi korrekcióját** teszi szükségessé. Mivel az eszköznek a Nap sugárnyomásából adódó forgatónyomatékkal szemben instabil egyensúlyi helyzetét a kisméretű fúvókák rendszeres, hozzávetőlegesen 6 óránkénti beindításával lehet kompenzálni, a csillagok képe ilyen időskálán elmozdul, és akár több pixelnyi utat is bejár. Ez viszont az eltérő pixelérzékenységek miatt jelentős szisztematikus hibát eredményez a fotometriában. Ennek kiküszöbölésére számos megoldás született (Vanderburg és Johnson, 2014; Aigrain és mtsai, 2015; Lund és mtsai, 2015; Huang és mtsai, 2015), amelyek 2-3-szoros faktoron belül, esetenként még jobban megközelítik a Kepler eredeti fotometriai pontosságát (2.18 ábra). A legtöbb módszer figyelembe veszi a pixelek eltérő érzékenységét, és dekorrelál a csillagok elmozdulásával (self flat-fielding). Ez utóbbi lépés



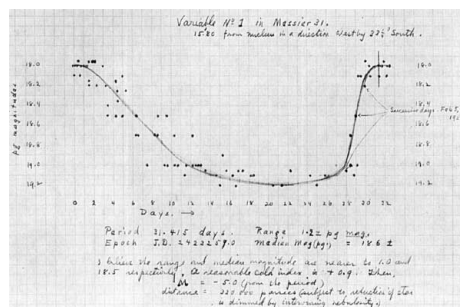
2.18. ábra. **Balra:** egy K2 célpont elmozdulása a C0 kampány alatt. Az elmozdulás következtében fellépő fluxusváltozást a színskála mutatja (Lund és mtsai, 2015). **Jobbra:** Egy tíz magnitúdós csillag eredeti (kék) és korrigált (narancs) fénygörbéje. Az alkalmazott dekorrelációs eljárásnak köszönhetően a szórás ötödére csökkent (Vanderburg és Johnson, 2014).

történhet egy dimenzióban (hiszen az elmozdulás legnagyobb része egy egyenes mentén történik), vagy két dimenzióban. Látható, hogy a pixelek egyedi és szisztematikus vizsgálata nélkül rendkívül sok információt (pl. sekély fedéseket) elvesztenénk az űrtávcső elmozdulásának hatására bekövetkező szisztematikus fluxusváltozások miatt.

Az ekliptikai K2 misszióval kapcsolatos új lehetőségek közül itt most csak a Naprendszer távoli objektumainak fotometriáját emelem ki. A már említett, gyorsan mozgó, fővi kisbolygókkal szemben lassan mozgó, a stacionárius pontjuk környékén lévő **transzneptun objektumok fotometriájára** pályáztunk és kaptunk lehetőséget a Kepler-űrtávcsővel (Pál és mtsai, 2015). A 22,5 magnitúdós 2002 GV₃₁ detektálása és forgási periódusának meghatározása (29,2 óra) igazi technikai bravúrnak számít. A 20,5 magnitúdós 2007 JJ₄₃ forgási periódusa 12,097 órának adódott. Az észlelések kivitelezését az objektumok koordinátáinak Keplerhez rögzített vonatkozási rendszerbe történő transzformálásán kívül 661 darab 1x11, illetve 1x13 pixeles, egészében bumeráng alakot formázó rész-apertúra biztosítása tette lehetővé. A stacionárius pont éppen két CCD közé esett, ami 20,9 napos űrt okozott a fénygörbében. Előtte és utána viszont 18,7 és 39,2 napos folyamatos megfigyelés történt. A megfigyelések feldolgozása különbségképek vizsgálatán alapult, ami a kb. 6 órás karakterisztikus idővel jelentkező elmozdulások okozta szisztematikus hibák kiküszöbölésében is sikeresnek bizonyult (Pál és mtsai, 2015).

3. fejezet

Cefeidák



3.1. ábra. "Here is the letter that has destroyed my universe" (Harlow Shapley). Részlet Edwin Hubble Shapley-nek küldött leveléből, ami az első, M31-ben talált cefeida változójának fénygörbéjét, és távolságbecslését is tartalmazta.

3.1. Cefeidák fáziskésése

3.1.1. Bevezetés

A cefeidák luminozitása és radiális sebessége közötti fáziseltérés magyarázata sokáig váratott magára. Mivel a pulzáció gyengén nemadiabatikus, ezért azt várnánk, hogy a maximális fényesség állapota a maximális kompresszióval, vagyis a minimális sugár állapotával esik egybe, holott a megfigyelések szerint mindez a maximális sebesség közelében történik¹. Így a luminozításgörbének ~ 90 fokos lemaradása van ahhoz képest, mintha a pulzáció adiabatikus volna.

Amint lehetségessé vált, hogy pontos lineáris és nemlineáris numerikus számításokat végezzünk a cefeidák teljes légkörére – különös tekintettel a semleges hidrogén zónájára –, a megfigyelések és a számítások összhangba kerültek. Castor (1968) volt az, aki először adott helyes

¹A félreértések elkerülése végett ebben a fejezetben csillagcentrikus koordináta-rendszerben értelmezzük a radiális sebességet, szemben a szokásos definícióval.

magyarázatot a fáziskésés lényegére. Rámutatott, hogy a tágulási szakaszban a hidrogén részleges ionizációs frontja kifelé mozog a csillagban, miközben energia nyelődik el rekombináció révén. Ez az ideiglenes energiatároló mechanizmus okozza, hogy a hidrogén aluláteresztő szűrőként (kondenzátorként) működik, 90 fokos fáziseltérést okozva. Azonban a fáziskésés pontos értéke nagymértékben függ a csillagmodell részleteitől, és csak részletes szimulációkkal származtatható. Minthogy a fáziskésés fizikája mind a lineáris, mind a nemlineáris folyamatokat érinti, így a probléma ideálissá teszi a létező hidrokódok megfigyelésekkel való összehasonlítására, illetve tesztelésére.

A cefeidák fénygörbéje gyakran kettős maximumot és egyéb pekularitásokat mutat, így a maximum időpontja, vagy a fénygörbe más, jól meghatározott pontja helyett célszerű a fényváltozás Fourier-felbontását venni:

$$f(t) = A_0 + \sum_{k=1}^n A_k \sin(k\omega t + \phi_k) \quad (3.1)$$

Az (elsőrendű) fáziskésést $\Delta\Phi_1 = (\phi_1^{V_r} - \phi_1^{mag})$, tehát a fény- és a radiális sebesség (V_r) görbéinek első Fourier-komponensei között mérhető fáziskülönbséggént definiáljuk. Magától értetődő, hogy a két idősornak azonos időpontra (epochára) kell vonatkoznia.

A galaktikus cefeidák egy részéről jó minőségű fotometriai megfigyelések állnak rendelkezésre, ugyanez nem mondható el a radiálissebesség-adatokról. A legátfogóbb megfigyelési mintát Ogloza és mtsai (2000) publikálták. Azt találták, hogy az alapmódusban pulzáló cefeidák fáziskésése nagymértékben független a periódustól, átlagosan $-0,28$, de az első felhangban pulzáló csillagok esetében a növekvő pulzációs periódussal a $\Delta\Phi_1$ értéke $-0,24$ és $-0,71$ között csökken.

Castor úttörő munkássága óta Simon és Davis (1983) vizsgálták behatóbban a kérdéskört, azonban az ő korai kódjuk revízióra szoruló opacitásokat és csak radiatív energiatranszportot tartalmazott. Továbbá csak korlátozott számú modellt tudtak futtatni, és mivel a korabeli megfigyelések sem voltak még megfelelő színvonalúak, ezért az azóta történt elméleti és obszervációs fejlődést látva mindenképpen érdemes volt a kérdést újból górcső alá venni. Munkámban e motivációktól vezérelve ismét megvizsgáltam a cefeida-fáziskésés problémáját, ehhez kiterjedt felmérést végeztem mind lineáris, mind nemlineáris (hidrodinamikai) cefeidamodellekkel. Numerikus számításaimhoz a Florida–Budapest hidrokódot használtam (Yecko és mtsai, 1998, Kolláth és mtsai, 1998, 2002), amely – a vizsgálat elvégzésének idején egyedülálló módon – turbulens konvekciót is tartalmazott.

A fáziskésés alkalmazásait is megvizsgáltam, hiszen a módszer egyedülálló lehetőséget jelent a cefeidák pulzációs módusának meghatározásában, periódus-amplitúdó összefüggéseik és fejlődési állapotuk jobb megértésében, valamint segíthet az ultrakicsi amplitúdójú (ULA²) cefeidák pulzációjának vizsgálatában is. A módszert alkalmaztam az első és egyetlen, Kepler által megfigyelt cefeida³, a V1154 Cygni analízisében is. Az űrfotometria kora a HST, a MOST

²Ultra Low Amplitude

³A Kepler-misszió folytatásában, a K2-ben kutatócsoportommal számos cefeida megfigyelését kezdeményeztük, és folytatjuk az ekliptika mentén.

és a WIRE műholdak sikereivel már jóval a CoRoT és a Kepler-missziók előtt elkezdődött. Így ez az altéma módszereiben, a vizsgálat tárgyában, időszerűségében és későbbi alkalmazhatóságát tekintve is mindenképpen az űrfotometriához sorolható.

3.1.2. A fáziskésés numerikus modellezése

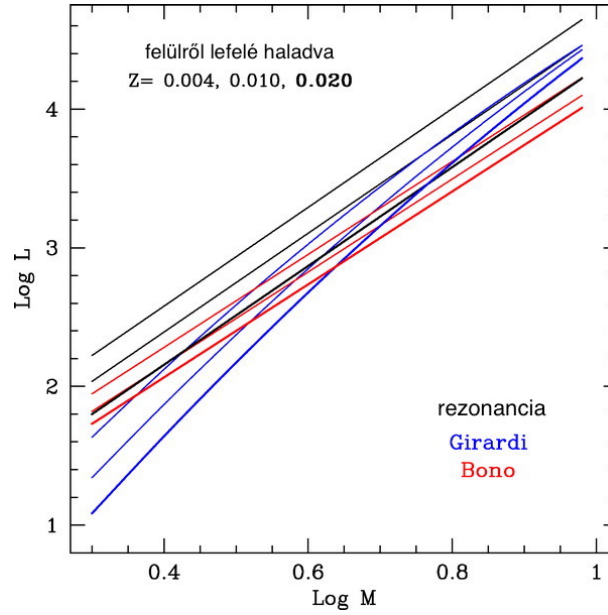
A szokásos plauzibilis feltevessel élünk: a csillagot kémiaiilag homogén légkörrel és egy merev, nem pulzáló maggal modellezzük. Ekkor egy adott kémiai összetételű cefeida három paraméterrel leírható. Ezek: az effektív hőmérséklet (T_{eff}), a luminozitás (L) és a tömeg (M). A kémiai összetételt az asztrofizika konvenciói szerint a hidrogéntartalommal (X , tömegarány), a fémtartalommal (Z) és a héliumtartalommal ($Y=1-X-Z$) írjuk le.

A klasszikus cefeidák jól meghatározott fejlődési utakon mozognak, és legtöbbjük másodszor halad át az instabilitási sávon, méghozzá a növekvő effektív hőmérsékletek felé haladva. Mivel a fejlődési utak jó közelítéssel vízszintesek a Hertzsprung–Russell-diagramon (konstans L), kényelmes ezeket egy M – L -összefüggéssel ($L = L(M; X, Z)$) jellemezni. Ezzel eggyel csökkenthető a paraméterek száma, ezáltal egy adott tömeg és kémiai összetétel esetén egy paraméter (T_{eff}) segítségével leírható modellseregeket számolhatunk. Azonban a választott M – L -összefüggés a fellépő pulzációs módusoktól kezdve, a tömeg-periódus reláción keresztül a fáziskésésekig, minden lényeges folyamatot és mennyiséget befolyásol.

Számításaimhoz három különböző M – L -relációt használtam. Az egyik lehetőség, hogy fejlődési modellekből határozzuk meg az összefüggést. A cefeidák fejlődésének modellezésével és a tömeg-luminozitás relációk származtatásával kapcsolatos nehézségeket kétmódusú cefeidákkal kapcsolatos cikkünkben tárgyaltuk (Buchler és Szabó, 2007). Túllövési (overshooting) paraméter nélküli (Bono és mtsai, 2000) és nemzéró túllövési paraméterrel számolt (Girardi és mtsai, 2000) fejlődési modelleket is használtunk. Egy másik lehetőség, hogy eltekintünk a fejlődési modellektől, és a megfigyelési adatokat kombináljuk a pulzációs modellekkel. Ezt a módszert használták Beaulieu és mtsai (2001) a Magellán-felhők cefeidáira. A megfigyelt fényességekből, színekből és periódusokból tömeget származtattak, de a vörösödés okozta hibák miatt az összefüggés túl nagy szórást mutatott. Egy további alternatíva, ha a második felhang és az alaphang között fennálló $P_2 : P_0 = 1 : 2$ rezonancia helyét lokalizáljuk a ϕ_{21} Fourier-fázis periódustól való függésének vizsgálatával, ezt követően pedig lineáris modelleket használva meghatározzuk az ezzel a megkötéssel kapott rezonancia M – L -összefüggést. A rezonancia M – L -reláció esetében lineáris összefüggést tételeztem fel a luminozitás és a tömeg logaritmusa között.

A három M – L -relációt a 3.2 ábrán láthatjuk. $Z=0,020$ fémtartalomra és kis tömegekre a rezonancia-összefüggés a Bono-féléhez közel halad, míg a Girardi-féle összefüggés sokkal alacsonyabb luminozitást prediktál. Nagyobb tömegekre ($M > 5,8M_{\odot}$) a rezonancia M – L -reláció a két másik között helyezkedik el. Ez utóbbi tulajdonság miatt, ha másként nem említem, ez utóbbi összefüggést használtam a következő vizsgálatoknál.

A modellezett tömegtartomány $2,0 M_{\odot}$ -tól indul és felső határát a fémtartalom és a megfigyelések szabta leghosszabb periódus határozza meg, ami a Galaxisra, a Nagy- és Kis-Magellán-



3.2. ábra. A cefeidák fáziskésés-modellezéséhez használt tömeg-luminozítás összefüggések (Szabó és mtsai, 2007, adaptálva).

3.1. táblázat. Turbulens konvektív paraméterek

Paraméterkészlet	α_d	α_c	α_s	α_ν	α_t	α_r	α_p	α_λ
A	2.177	0.4	0.4330	0.12	0.001	0.4	0.0	1.5
B	2.177	0.4082	0.4082	0.25	0.0	0.0	0.0	1.5

felhőkre a következőképpen alakul: $9,5M_\odot$, $7,5M_\odot$ és $6,5M_\odot$. A tömeget fél naptömeg-egységenként változtattam, a luminozitást az $M-L$ -összefüggés adja. A szimulált hőmérséklet-tartomány lefedi a klasszikus instabilitási sávot, és az egyes modell-sorozatok 100 K-ként követik egymást. A számításokat a Florida–Budapest hidrokóddal végeztem: először egyensúlyban lévő cefeidamodelleket számoltam, majd elvégeztem lineáris stabilitásvizsgálatukat, ezt követte a teljes hidrodinamikai szimuláció, amíg a modell a maximális amplitúdót (határciklust) el nem érte. A kód időfüggő keveredési-hossz-modellt alkalmaz a turbulens konvekció leírására (Yecko és mtsai, 1998). A G91 OPAL opacitásokat (Iglesias és Rogers, 1996; Grevesse és Anders, 1991), alacsony hőmérsékleteken az Alexander és Ferguson (1994) opacitástáblázat egészítette ki.

A turbulens konvektív (α) paraméterek befolyásolják a cefeidák kód által generált megfigyelhető tulajdonságait, úgymint az instabilitási sáv szélességét, a fény- és radiális sebesség-görbék alakját, az amplitúdókat, a rezonanciák helyzetét, az előforduló leghosszabb felhangbeli pulzációs periódust és így tovább. Nagyon különböző paraméterek hozhatnak létre hasonló tulajdonságú modelleket, ugyanakkor a paraméterek globális kalibrációja még várat magára, és a legújabb háromdimenziós hidrodinamikai pulzációs kódok fényében (Mundprecht és mtsai, 2013, 2015; Geroux és Deupree, 2011, 2015), valószínűleg nem is kivitelezhető korrekt és

konzisztens módon. Annak érdekében, hogy teszteljem a paraméterválasztás hatását, két paraméterkombinációt is kipróbáltam, ezeket a 3.1. táblázat tartalmazza. Ha a nyolc együtttható egységnyi, dimenziómentes és átskálázható (Kolláth és mtsai, 2002). A használt hidrodinamikai alapegyenletek az egydimenziós, gömbszimmetrikus esetre szintén a Kolláth és mtsai (2002) cikkben találhatók.

A paraméterek jelentése a következő: α_ν a konstans eddy-viszkozitás együttthatója, α_λ a keveredési hossz paraméter, α_c , α_s és α_t a konvektív fluxuserősséggel, a turbulens forráserősséggel és a turbulens fluxus erősségével állnak kapcsolatban. Az $\alpha_p = (\gamma_p - 1)$ paramétert nullának választottam, ez a turbulens eddy adiabatikus kompresszibilitási együttthatójával kapcsolatos, míg α_d – diffúzió hiányában – a turbulens energia növekedésének, illetve csökkenésének időskáláját szabályozza. A konvekció hatékonyságának csökkenését írja le az ún. Pécelet-korrektció (α_r), abban az esetben, ha a sugárzási veszteségek számottevőek. A turbulens paramétereket úgy választottam, hogy minél jobban visszkapjam a megfigyelt amplitúdókat és más említett paramétereket.

A módusszelekció

A lineáris kód kiszámítja a radiális kitérés, a sebesség, a hőmérséklet és a turbulens energia sajátfüggvényeit minden pulzációs módusra (a sugár függvényében), és interpolálja a fotoszférára. Ezekből kiszámíthatjuk a luminozítás-sajátfüggvényt és a fáziskésést ($\Delta\Phi_1$). Ebben a munkában csak a határciklusba konvergáló (alapmódus, első és második felhang) megoldásokkal foglalkoztam. Kétmódusú megoldásokat a 3.2 fejezetben vizsgálom, más szempontokból. A kétmódusú tartományok viszonylag keskenyek (maximum 100 K), ezért elhagyásuk nem járt lényeges következményekkel a fáziskésés vizsgálatára nézve.

Az egyensúlyi modelleket a sajátmódusokhoz tartozó sebesség-sajátvektorokkal perturbálva követtem végig hidrodinamikailag a maximális amplitúdójú, határciklus-megoldások elérését. Az a tartomány, ahol mind az alapmódus, mind az első felhang lineárisan instabil, a csillagparaméterektől függően két részre bomlik: egy hiszterézistartományra, ahol a kezdeti feltételektől függően vagy alapmódus, vagy első felhangbeli pulzáció fog beállni, ha elég sokáig integrálunk, illetve a másik lehetőség egy valódi kétmódusú tartomány. Ez a topológia megfelel a megfigyeléseknek (Szabó, 2004). Hasonló elrendeződést találunk az első két felhang között is. (Bizonyos tartományokban a móduskiválasztás okozta szerkezet még bonyolultabb lehet, lásd pl. Kolláth és mtsai, 2002). A kívánt fáziskéséseket ($\Delta\Phi_1$) a határciklusban kapott fényesség- és radiálissebesség-görbékhez illesztett nyolcadrendű Fourier-illesztésből kaptam (3.1. egyenlet). A hiszterézistartományokban mindkét módushoz tartozó fáziskésés-értékeket kiszámoltam és ábrázoltam.

A megfigyelésekhez illeszkedően itt csak az alapmódus (F) és az első két radiális felhang (O1, illetve O2) fáziskésését vizsgáltam. Az alapmódus lineárisan instabil tartománya egészen magas luminozítású régióig nyúlik a Hertzsprung–Russell-diagramon. Az O1-tartomány cu-korsüveg alakú, és átfed az alapmódusú régióval. Az O2 hasonló formájú, de még alacsonyabb luminozításnál találjuk, és átfed az O1 és az F tartományokkal is. A lineáris instabilitási tarto-

mányokról és a nemlineáris módusszelekciós folyamatokról bővebben a 3.2.2. fejezetben esik szó. Mivel az instabilitási sáv szélein a csillag infinitezimálisan kis amplitúdóval rezeg, ezért itt a lineáris és nemlineáris fáziskésések egybeesnek. Fordítva: ahol az amplitúdó úgy változik például módusváltás következtében, hogy véges értéket vesz fel, ott a lineáris és nemlineáris $\Delta\Phi_1$ értékek különbözni fognak. Ilyet figyelhetünk meg pl. a 3.3 ábrán a viszonylag alacsony tömegű ($3-5 M_\odot$) modellsorozatok kék szélénél (bal oldal), ahol az F és O1 módusok közötti módusváltás megy végbe csillagfejlődés következtében.

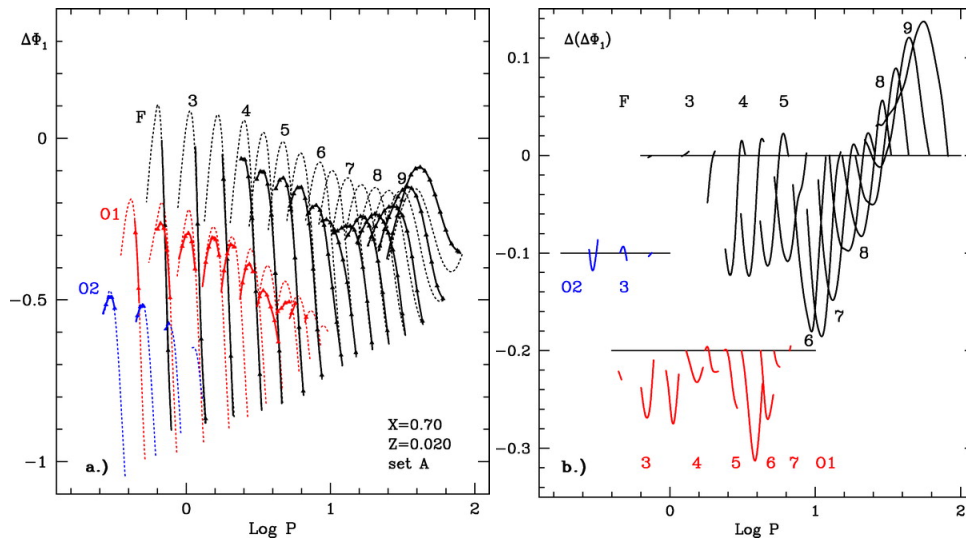
3.1.3. Eredmények

A lineáris és nemlineáris cefeida-fáziskésések áttekintését látjuk a 3.3a ábrán. Az eredményeket a rezonancia $M-L$ -relációval, az A jelű turbulens konvektív paraméterkombinációval (3.1. táblázat), galaktikus fémtartalomra ($Z=0,020$) számoltam. A $\Delta\Phi_1$ értékeket a szóban forgó módus-hoz tartozó periódus logaritmusának függvényében ábrázoltam. Ahogy említettem, a modellsorozatok egyparaméteres sokaságot alkotnak adott csillagtömegre, ahol a változó paraméter az effektív hőmérséklet. Az egymás melletti sorozatok között $0,5$ naptömegnyi különbség van, a legkisebb tömeg $2,5M_\odot$, míg a legnagyobb $9,5M_\odot$ volt. Az F, O1 és O2 módusokhoz tartozó szekvenciák ugyanakkora minimális tömeggel kezdődnek a rövid periódusú oldalon. A pontozott vonalak a lineáris, míg a folytonosak a nemlineáris, vagyis a határciklushoz tartozó fáziskéséseket jelölik.

A 3.3a ábrán a három különböző színnel jelölt csoport az F, O1 és O2 radiális módusokhoz tartozik. Nagy tömegekre a nemlineáris szekvenciák híven követik a lineárisakat. Egy bizonyos tömeg alatt megjelenik a felhangbeli pulzáció (O1), így a nemlineáris F-görbék megszakadnak, mielőtt elérnék az instabilitási régiójuk kék szélét, és az adott sorozat az O1 ágon folytatódik. Hasonló folyamat játszódik le az O1 és O2 módusok között, kisebb tömegértékeknél. Így az F és O1 sorozatok egyre kevésbé lesznek teljesek, ahogy a rövid periódusok felé haladunk.

Ahogy az várható, az alaphangban pulzáló csillagok foglalják el a legszélesebb tartományt, ha akár a periódust, akár a tömeget vagy éppen a fáziskésést nézzük. Megjegyzendő, hogy amikor a szimulációkat összevetjük a megfigyelésekkel, akkor az egyes modellsorozatok maximum környéke a legrelevánsabb a $\log P - \Delta\Phi_1$ síkon, hiszen a hosszú lábak a hosszú periódusú oldalon kis amplitúdójú modellekhez tartoznak, vagyis olyan csillagokhoz, amik közel esnek az instabilitási sáv vörös széléhez. Ez utóbbi a modellsorozatok alsó burkolója. A fáziskésés-értékek maximuma az instabilitási sáv közepét jelöli ki. Ez azt is jelenti, hogy a megfigyelt csillagok többsége normál, nagy amplitúdójú cefeida. Ezt várjuk is, hiszen ezeket könnyebb megfigyelni, másrészt a fejlődési modellek szerint a kis amplitúdójú állapotokon a csillag hamar végigszárgul. Harmadrészt Buchler és Kolláth (2002) megmutatták, hogy a nagyon kis amplitúdójú állapotok kimaradnak, hiszen az instabilitási sáv szélén a csillagok ug-rásszerű fejlődéssel váltanak véges amplitúdóra, így nem is várjuk felbukkanásukat egy ilyen kis mintában.

A maximum F fáziskésések nulla közelében szórnak, a modellek többsége a $-0,1$ és $-0,4$



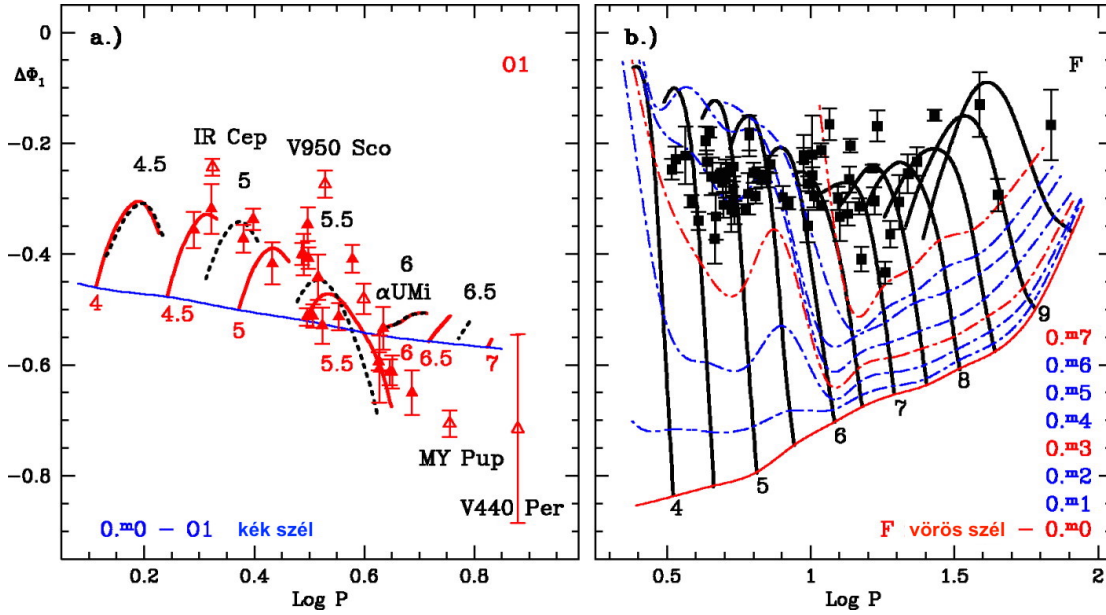
3.3. ábra. **(a)** Lineáris (szaggatott) és nemlineáris (folytonos) fáziskésések egyenlő tömegű galaktikus cefeida sorozatokra. A tömegértékeket felül jelöltem. A kis háromszögek 100 K effektív hőmérsékletbeli intervallumonkénti modelleket jelölnek. A számításokhoz a rezonancia $M-L$ -relációt használtam. **(b)** A lineáris és nemlineáris fáziskésés közötti különbség $\Delta[\Delta\Phi_1]$ a pulzációs periódus függvényében, ugyanazokra a modellsorozatokra. Az első (O1) és második felhangban (O2) rezgő modelleket lefelé toltam el $-0,2$ és $-0,1$ egységgel, a jobb átláthatóság kedvéért (Szabó és mtsai, 2007).

intervallumba esik. Az O1 és O2 módusokhoz tartozó modellsorozatok balra lent található az ábrán. A választott α paraméterekkel a maximális O1 periódus hozzávetőlegesen 7 napos, míg a maximális O2 periódus 1 nap körül adódik.

Korábbi elméleti vizsgálatok, melyek első (Antonello és Aikawa, 1995), illetve második felhangbeli (Antonello és Kanbur, 1997) cefeidákkal foglalkoztak, szintén diszkutálták a fáziskésés szerepét. Azonban ezek a vizsgálatok pusztán radiatív kódokra épültek, melyek a turbulens konvekciót teljes mértékben elhanyagolták, és csak az instabilitási sáv kék szélén adtak korrekt eredményt, ahol a konvekció szerepe elhanyagolható. Következésképpen, a számolt nagy F és O1 fáziskésések miatt Antonello és Aikawa (1995) arra a következtetésre jutottak, hogy a fáziskésés nem jó diszkriminátor a pulzációs módus tekintetében. A legfontosabb probléma, hogy a radiatív modellek amplitúdói túl nagyok, holott munkámban megmutattam (3.1.4. fejezet), hogy a nemlineáris fáziskésés érzékenyen függ az amplitúdótól. Ezért az amplitúdót szabályozó turbulens konvekció szerepe megkerülhetetlen ezekben a vizsgálatokban.

A rezonanciák szerepe

Jól ismert, hogy a pulzációs módusok között fellépő rezonanciákat tetten érhetjük, ha a Fourier-paraméterek változását vizsgáljuk a pulzációs periódus vagy más paraméter függvényében (pl. Buchler, 1993). Mivel a cefeidák széles tartományokat fognak át mind tömegben, luminozitásban és hőmérsékletben miközben áthaladnak az instabilitási sávon, szép számmal találunk rezonanciákat, ha pl. a ϕ_{21} , R_{21} , stb. Fourier-paramétereket vizsgáljuk (Buchler, 1997). A rezonanciáknak a fáziskésés vizsgálatánál is fontos szerepe van.



3.4. ábra. Nemlineáris fáziskésés-értékek ($\Delta\Phi_1$, folytonos vonalak), a rezonancia $M-L$ -összefüggéssel, az $A \alpha$ paraméterekkel és galaktikus fémtartalommal számítva. A tömegértékeket a modellsorozatok felett jelöltem. (a) Első felhangban pulzáló cefeidák; (b) alaphangban rezgő csillagok. A megfigyelt értékek Ogloza és mtsai (2000) cikkéből származnak. Az egyedi csillagok diszkussziója a szövegben található. A bal oldali panelen szaggatott vonallal a Girardi-féle $M-L$ -relációval számolt értékeket is feltüntettem (itt a csillagtömegeket felül jelöltem). A jobb oldali panelen az egyes V sávban mért amplitúdókhoz (0,0 és 0,7 magnitúdó között) tartozó vonalakat is berajzoltam a modellek alapján, ami jól mutatja a normál amplitúdójú cefeidák tartományát. Az alaphang vörös szélét (FRE) és az első felhang kék szélét is feltüntettem a két panelen (Szabó és mtsai, 2007).

Ahogy korábban említettem, a lineáris és nemlineáris fáziskésés közötti különbség eltűnik az instabilitási sáv szélein. Ezt a mennyiséget ($\Delta(\Delta\Phi_1)$) külön is ábrázoltam a jobb láthatóság kedvéért a jobb oldali panelen. Ez a konvergencia jól látható a 3.3a és 3.3b ábrákon, különösen az F és O1 szekvenciákra. A jobb oldalon ábrázolt $\Delta(\Delta\Phi_1)$ értékek abszolút értékben egészen kicsik az O2 pulzátorokra, melyek kis amplitúdójú pulzációt mutatnak. Általában azt várnánk, hogy a nagyobb amplitúdónál fordulnak elő nagyobb különbségek a lineáris és nemlineáris mennyiségek között. Ez az érvelés azonban érvényét veszti a rezonanciák közelében, ahol a fény- és radiális sebesség-görbék eltorzulnak. A legnagyobb különbség ($|\Delta(\Delta\Phi_1)|$) a 10 nap körüli periódussal, alpmódusban rezgő cefeidáknál található (3.3b ábra), és kimutattam, hogy ezt a jellegzetességet valóban a jól ismert $P_2 : P_0 = 1 : 2$ rezonancia okozza. Megjegyzendő, hogy az LMC és SMC⁴ cefeidáinál is hasonló jelenséget látunk a megfelelő rezonancia-periódusoknál. Hasonlóan, a meglepően nagy $|\Delta(\Delta\Phi_1)|$ értékek az első felhangban rezgő cefeidáknál $5,5 M_\odot$ környékén a $P_1 = 4,2$ nap környékén bekövetkező $P_4 : P_1 = 1 : 2$ rezonanciára⁵ vezethők vissza. A rezonanciák a pulzációs amplitúdó nagyságát is befolyásolják, ahogy azt később látni fogjuk.

⁴LMC: Large Magellanic Cloud, Nagy-Magellán-felhő, SMC: Small Magellanic Cloud, Kis-Magellán-felhő

⁵ P_1 az első felhang, míg P_4 a negyedik radiális felhang periódusát jelöli.

Alaphangban pulzáló cefeidák

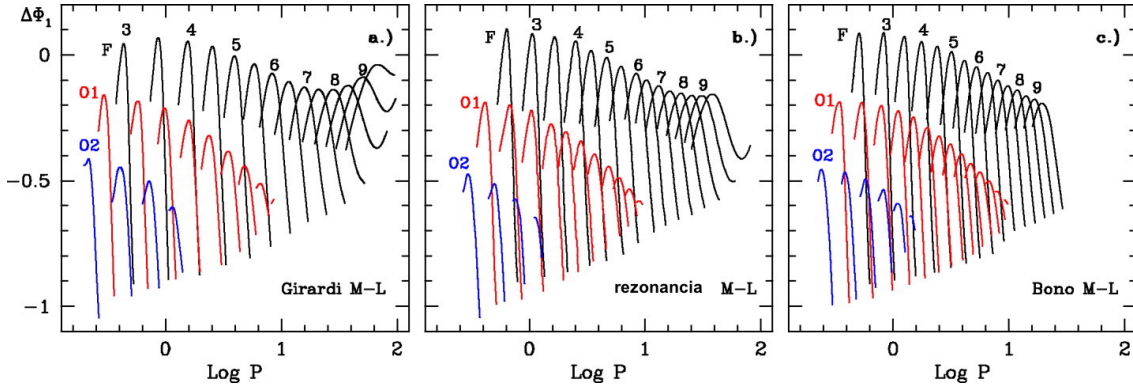
A vizsgálat elvégzésekor csak galaktikus cefeidákról álltak rendelkezésre megbízható fáziskésés-adatok (Ogłóza mtsai, 2000; Moskalik és Ogłóza, 2000), ezeket a 3.4 ábrán tüntettem fel. A megfigyelt F-cefeidákat négyzetek, az O1-cefeidákat háromszögek jelölik. A modellekből számított lineáris és nemlineáris fáziskéséseket is feltüntettem, ezeket az A jelű paraméterkombinációval, a rezonancia $M-L$ -relációval és galaktikus fémtartalommal ($Z = 0,020$) számoltam.

A modellek és a megfigyelésből származó fáziskésésértékek egyezése meggyőző. Ennek ellenére néhány kisebb, szisztematikus eltérés észrevehető. Például a megfigyelt F cefeidák fáziskésései kicsit a számítottak fölé esnek a közepes periódusértékek tartományában. A 3.6a és a 3.7 ábrák azt sugallják, hogy a fémtartalom csökkentésével az egyezés nagymértékben javítható lenne, különösen a Nap fémtartalom-eloszlásának Asplund és mtsai (2005) által javasolt revíziója fényében.

A 3.4b ábrán a vonalak az azonos amplitúdójú állapotokat jelölik a 0,0 magnitúdót jelentő vörös szélről 0,7 magnitúdóig. Megjegyezzük, hogy ezek a vonalak csak a vörös szél közelében, a $\Delta\Phi_1$ -görbék felszálló ágára érvényesek.⁶ Az ábra alapján egyértelmű, hogy a megfigyelt amplitúdóeloszlás alsó burkolója megfelel a 0,7 és a 0,3 magnitúdóval jellemzett vonalaknak a 10 napnál hosszabb, illetve rövidebb pulzációs periódusú csillagok esetén. Ez a kettősség és a 10 napnál megfigyelhető éles ugrás az izoamplitúdó-vonalakban szintén a már említett $P_2 : P_0 = 1 : 2$ rezonanciára vezethetők vissza.

Az első felhangban pulzáló cefeidák

A 3.4a ábrán a jobb láthatóság kedvéért külön ábrázoltam az első felhangban rezgő cefeidák fáziskéséseit. Öt egyedi csillagot külön is említek, ezeket üres szimbólumok jelölik. Az O1 tartományban a $P_4 : P_1 = 1 : 2$ rezonanciának jelentős hatása van az $M=5,5M_\odot$ és $M=6,0M_\odot$ sorozatok fáziskéséseire: a $\Delta\Phi_1$ értékek még a kék szélén felvett értékek alá is süllyedhetnek. A megfigyelt O1 pontok kismértékben a számított értékek fölé esnek. A fémtartalom csekély mértékű csökkentése segíthetne ezen az eltérésen. Az eltérés legnagyobb részéért három csillag felelős: kettőre (IR Cep és V950 Sco) $\Phi_1 > -0,3$, míg a hosszú periódusú V440 Per-nél a fáziskésés: $\Phi_1 < -0,7$. Az első kettő nagy bizonyossággal felhangban rezgő cefeida, de a 3.4a és a 3.6 ábrák alapján akár az F-szekvenciához is tartozhatnak. Hasonlóan nehéz az MY Puppis besorolása, ha csak a fáziskésés értékét nézzük. A megfigyelt O1 fáziskésések lineárisnak tűnnek a pulzációs periódus logaritmusának függvényében (Ogłóza és mtsai, 2000). Ha a három előbb említett, kilógó csillagot nem számítjuk, akkor viszont a megfigyelések ívelt szerkezetet mutatnak, és a kiszámolt eredmények is híven követik a megfigyeléseket. Megmutatható, hogy az íves szerkezet kialakításáért a $P_1 : P_0 = 2:3$ rezonancia a felelős. A Polarisnak és a V440 Perseinek külön fejezetet szenteltem.



3.5. ábra. Lineáris fáziskésések galaktikus fémtartalom ($Z = 0,020$) esetén, három különböző tömeg-luminositás összefüggés esetén (Szabó és mtsai, 2007).

A tömeg-luminositás relációk fontossága

A 3.5 ábrán a 3.1.2. fejezetben tárgyalt három különböző $M-L$ -relációval kapott lineáris $\Delta\Phi_1$ értékeket ábrázoltam.⁷ A legfontosabb különbség a nagy tömegértékeknél látszik. A Bono-reláció alacsonyabb luminositásértékeket jelent, ezért nagyobb tömegre ($> 10M_\odot$) lenne szükség, hogy elérjük a 100 napos alpmódusú periódusértéket. A rezonancia $M-L$ -összefüggéssel ehhez mindössze $9,5M_\odot$ -re van szükség. Az alacsony tömeg- és luminositásértékeknél a 1 napos F-periódust a három összefüggés rendre $3,50$ (Girardi), $3,00$ (rezonancia) és $3,25M_\odot$ értéknél (Bono) éri el, ahogy a 3.2 ábra alapján várjuk. Általánosságban az állítható, hogy a tömeg-luminositás összefüggések indirekt módon a tömeg-periódus relációkon keresztül befolyásolják a fáziskésések konkrét értékeit.

A konvektív paraméterek szerepe

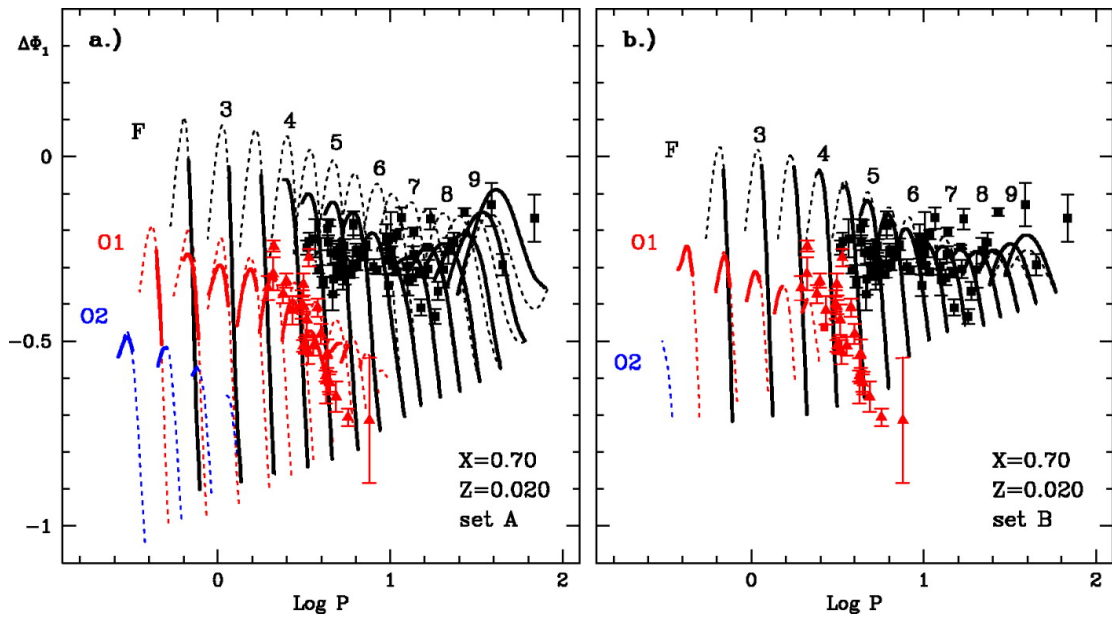
A két használt konvektív α paraméterkombinációt a 3.1. táblázat tartalmazza. A fő különbség közöttük, hogy a turbulens viszkozitás (α_ν) magasabb a B-jelű csoportra. Az A-val jelölt halmaz kismértékű konvektív túllövést (α_t) tartalmaz, valamint zérustól különböző Pécret-korrekcíót.

Paradox módon a turbulens viszkozitás kisebb az A esetben, mégis ezekre a modellekre fele akkor a luminositás és radiális sebesség-amplitúdja, mint a B modellekre. A kisebb α_ν értéket ugyanis a többi együtttható kompenzálja. Az A és B kombinációval számolt fáziskésések közötti különbséget a 3.6 ábra mutatja. Mindkét esetben a rezonancia $M-L$ -relációt és galaktikus fémtartalmat használtam. A görbék alakja hasonlít a két esetben, de a fáziskésések által lefedett tartomány jóval kisebb a B jelű kombinációval, ami a kisebb amplitúdó hatásának tulajdonítható. Ugyanezért a nemlineáris hatások is kisebbek, így a lineáris és nemlineáris fázisértékek közel esnek egymáshoz a b.) panelen.

A konvektív paraméterek érdekes módon a módusszelekcióra is hatással vannak. Fő törekvésem az volt, hogy a megfigyelt leghosszabb periódusú O1 módust (V440 Per: 7,57 nap)

⁶Az amplitúdó nem csak a periódus és a fáziskésés függvénye, ezért elméletileg több ilyen vonal lehetséges.

⁷A nemlineáris fáziskésés-értékek hasonló eltéréseket mutatnak, mint a rezonancia $M-L$ -reláció esetében a 3.3a ábrán, ezért ezeket a jobb láthatóság kedvéért nem rajzoltam fel.

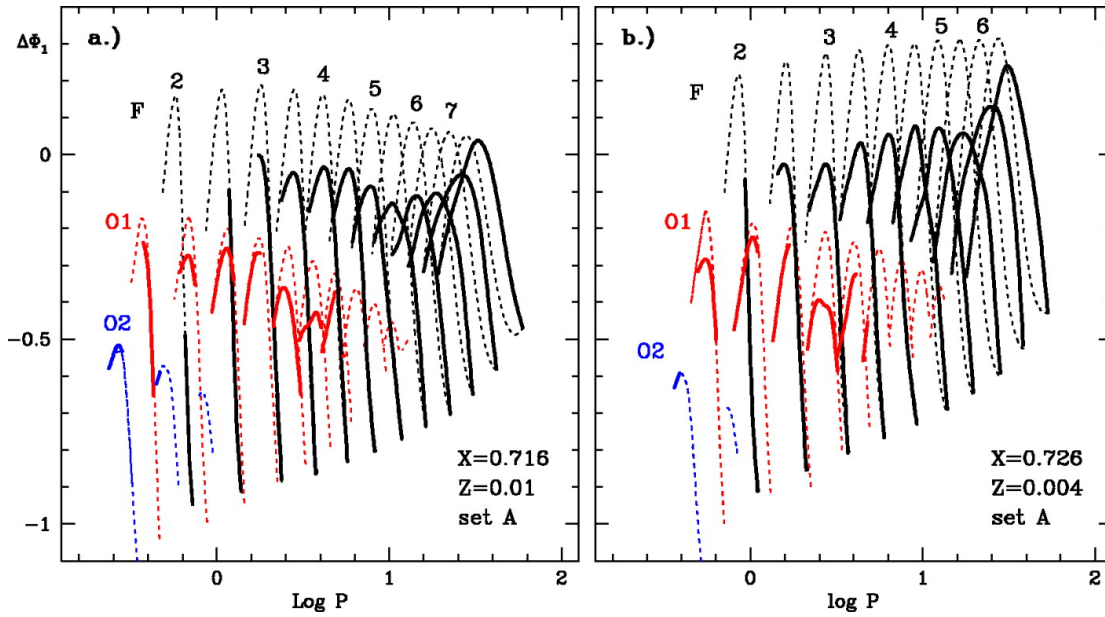


3.6. ábra. Lineáris és nemlineáris galaktikus fáziskésések két különböző α paraméterkombinációval (3.1. táblázat) számolva, a rezonancia $M-L$ -reláció alkalmazásával. Szaggatott vonalak: lineárisan instabil modellek; folytonos vonalak: nemlineáris (határciklusban számolt) fáziskésések. A fekete négyzetek megfigyelt alaphangú (F), a piros háromszögek első felhangban (O1) rezgő cefeidákat jelölnek, Ogłóza és mtsai (2000), valamint Moskalik & Ogłóza (2000) alapján (Szabó és mtsai, 2007).

visszakapjam. Ez lehetséges volt az A együttesel, de a B paraméteregyüttesel számolt leg-hosszabb O1 periódus csak 3 nap körül volt. Hasonló különbséget tapasztaltam a második felhang esetében is. Az A esetben $3,5 M_{\odot}$ alatt tapasztaltam pusztán O2 pulzációt, viszont a B esetben a nemlineáris modellek nem is mutattak második felhangbeli rezgést. Összességében azt mondhatjuk, hogy ha a választott konvektív paraméterek visszaadják a megfigyelt módus-szelekciós képet, akkor nincs számottevő hatásuk a fáziskésésre.

A fémtartalom és egyéb tényezők hatásai

A galaktikus, LMC- és SMC-beli cefeidákra rendre a következő kanonikus fémtartalomértékeket vettem: $(X, Z) = (0,700, 0,020), (0,716, 0,010), (0,726, 0,004)$. A 3.7 ábrán az LMC-re (a.) panel) és az SMC-re (b.) panel) vonatkozó ábrákat rajzoltam fel. Kis tömegértékekre nem találunk nagy eltérést, de hosszabb periódusokra (nagyobb tömegekre) az alacsonyabb fémtartalom felfelé téríti el az elméleti F fáziskéséseket. Kisebb mértékben ugyan, de hasonló tendencia figyelhető meg az O1 modellek esetén is. Megjegyzendő, hogy a már említett $P_2 : P_0 = 1 : 2$ és $P_4 : P_1 = 1 : 2$ rezonanciáknak hasonló hatása van, mint a galaktikus fémtartalom esetén. Sajnos nem állnak rendelkezésre megfelelő észlelések extragalaktikus cefeidákról, hogy tesztelhessem ezeket a modelleket. Ellenben a Magellán-felhőkben nagyszámú kétmódusú, az első és második felhangban pulzáló, illetve második felhangban rezgő cefeida található. Modelljeim jól visszaadják ezeket a pulzációs állapotokat is. Így például a modelljeim által jelzett maximális O2 periódus jó egyezésben van a megfigyelt LMC (Soszyński és mtsai, 2001), illetve



3.7. ábra. A fémtartalom hatása a fáziskésésre. (a): az LMC-re, (b): SMC-re jellemző fémtartalommal számolva, rezonancia $M-L$ -reláció és az A jelű α paraméterkombináció alkalmazásával (Szabó és mtsai, 2007).

SMC-beli értékekkel (Udalski és mtsai, 1999).

Eddig csak szoláris elemgyakorisággal számolt modelleket említettem. Grevesse és Anders (1991) alapján azonban módosított elemgyakoriságokat is teszteltem, ahol a vascsoport elemeit 25%-kal csökkentettem azonos Z esetén (Buchler és Szabó, 2007). Azt találtam, hogy a fáziskésés nagymértékben érzéketlen erre a változtatásra, a különbség nem éri el a 0,01-et, általában azonban még ennél is egy nagyságrenddel kisebb.

Azt is ellenőriztem, hogy a modellek numerikus felbontásának (zónák száma) a gyakorlatban elhanyagolható hatása van a fáziskésés értékeire. Ehhez a munkában használt 120 zóna helyett 80, illetve 300 zónás modelleket is kipróbáltam, a különbség minden esetben kisebb volt 0,02-nál. Utoljára a csillagok forgásának hatását teszteltem. Ehhez – mivel háromdimenziós kód nem állt rendelkezésemre – egy centrifugális erőt helyettesítő tagot ($F = \omega^2 r$) építettem a kódba (Buchler és Szabó, 2007). Azt találtam, hogy a forgás hatása még 20 km/s forgási sebességnél is elhanyagolható. Érdeemes megjegyezni, hogy a cefeidák forgási sebessége ($v_{rot} \sin i$) ennél általában kisebb (Nardetto és mtsai, 2006).

3.1.4. A cefeidák fáziskésésének alkalmazásai

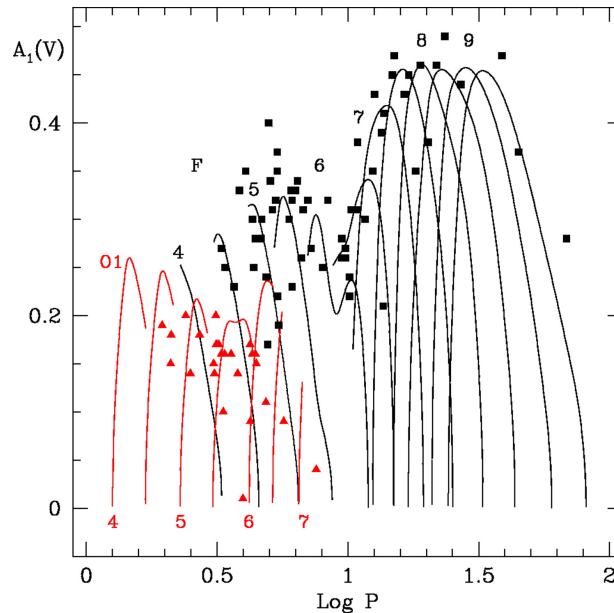
Munkám legfontosabb eredménye, hogy megerősítettem Simon (1984) és Ogloza és mtsai (2000) felvetését, miszerint a $\Delta\Phi_1$ mennyiség jó indikátora a pulzációs módusnak. A módszer kiegészíti a legtöbbször alkalmazott, epochafüggetlen Fourier-paraméterekre (R_{21} , Φ_{21} stb.) alapozott eljárásokat, és független azoktól. Bár a radiális sebesség és a fénygörbe alakját leíró Fourier-paraméterek pulzációs periódus függvényében történő progressziója általában elárulja a radiális pulzációs módus mibenlétét, bizonyos periódustartományokban nem jó indikátor. Ilyenkor jöhet segítségül a fáziskésés módszere. A módszer elméletben a második radiális fel-

hangban pulzáló csillagokra is működne, a megfigyelések gyér száma azonban mind ez ideig nem tette lehetővé a modelljeim konfrontálását a megfigyelésekkel. Az itt nyert eredményeket és a fáziskésés módusazonosításra történő alkalmazását sikeresen használtam űrtávcsöves megfigyelések kiegészítésére, így elsősorban a *Kepler* által megfigyelt V1154 Cyg esetében. Ez a fejezet ily módon szervesen kapcsolódik a dolgozat (űrfotometria) témaköréhez.

Nem mellékesen munkám komplett felmérését szolgáltatta a cefeidák instabilitási sávjának, aminek további kiaknázását a 3.2 fejezetben folytatom. Ehhez kapcsolódóan részletesen vizsgáltam a cefeidák amplitúdójának változását a csillagok instabilitási sávon belül elfoglalt helyzetének (fejlődési állapotának) megfelelően. Ezekről az alkalmazási lehetőségekről és a munkám publikálását követően eltelt idő alatt történt legfontosabb mozzanatokról az alábbiakban adok rövid összefoglalást.

A cefeidák pulzációs amplitúdója

Bár az régóta köztudott, hogy az instabilitási sáv szélén a pulzáció amplitúdója kicsi (lecsökken vagy éppen nőni kezd, függően a fejlődés irányától), elsőként számoltam numerikus modelleket ebben a témakörben, és modelleztem a jelenséget részletesen. Ez az eredmény számos alkalmazásra talált, a cefeidák periódus-amplitúdó relációinak vizsgálatában (Szabados és Klagyivik, 2012; Pejcha és Kochanek, 2012) éppúgy, mint módusazonosításkor (Klagyivik és Szabados, 2009). Nemradiálisan pulzáló csillagok esetében a helyzet tovább bonyolódik, de a radiálisan pulzáló, általam alaposan vizsgált eset jó kiindulási alapot jelent ezen csillagok elméleti vizsgálatához is (Eaton és mtsai, 2008).



3.8. ábra. Elméleti és megfigyelt V -sávban mért Fourier-amplitúdó (A_1) értékek. Az utóbbiakat a rezonancia $M-L$ -relációval és az A α -paraméter kombinációval számítottam. Az alaphangbeli modellek 4,0 és 9,5 $M_\odot$ között, a felhangban rezgő modellek (bal oldalon, piros színnel jelölve) pedig 4,0 és 7,0 $M_\odot$ közötti tömegtartományba esnek. A megfigyelt értékek Ogloza és mtsai (2000) mintájából származnak, a jelölések megegyeznek a 3.2 ábráéval (Szabó és mtsai, 2007).

Az amplitúdó tárgyalásakor érdemes megemlíteni, hogy az elméleti munka során bolometrikus fénygörbéket számoltam, míg a megfigyelt fáziskésések V -sávban mért adatokból származnak. Ez a különbség elvileg problémát okozhat, de a cefeidák hőmérséklete biztosítja, hogy a csillagok spektrális energiaeloszlásának maximuma a V -sáv közelébe esik. A V és I sávban mért ϕ_1^{mag} Fourier-fázisok például közel esnek egymáshoz (Ngeow és mtsai, 2003). Az összehasonlításhoz azonban V magnitúdóvá kell konvertálnunk az elméleti bolometrikus amplitúdókat: $M_V = M_{bol} + BC$. Ehhez Kovács (2000) formuláit használtam:

$$BC = 2,0727\Delta T - 8,0634(\Delta T)^2 \quad (3.2)$$

$$\Delta T = \text{Log } T_{\text{eff}} - 3,7720. \quad (3.3)$$

A fenti illesztési eredmények ugyan kétmódusú cefeidákból származnak, Bealieu és mtsai (2001) azonban szélesebb tömegtartományra nagyon hasonló eredményeket kaptak.

A 3.8 ábrán az Ogloza és mtsai (2000) által összeállított cefeida-minta A_1 Fourier-koefficienseit tüntettem fel, nemlineáris hidrodinamikai modellsorozataimmal együtt. Az F-cefeidákat négyzetek, a felhangbelieket háromszögek jelölik. A legkisebb amplitúdójú csillag a Polaris, aminek külön alfejezetet szentelek később. Az ábra a megfigyelések és a modellek közötti jó egyezéstről tanúskodik. Azt észre kell vennünk azonban, hogy a megfigyelt objektumok mind normál (nagy) pulzációs amplitúdóval bírnak, ami kiválasztási effektussal magyarázható. Az alaphang és a második felhang közötti $P_2 : P_0 = 1 : 2$ rezonancia – ami a jól ismert Hertzsprung-progresszióért is felelős – tisztán látható a 10 napos periódus és $M = 6,0$ naptömeg környékén. Következmenyeként az A_1 amplitúdók határozott lokális minimumot mutatnak, amit a modelljeink tisztán visszaadnak – a megfigyelésekkel teljes összhangban.

Hasonló jelentőségű rezonanciát találunk a felhangbeli pulzálóknál is, ami az első és a negyedik radiális felhang között áll fenn: $P_4 : P_1 = 1 : 2$, és a $P_1 = 3,5 - 4,0$ nap periódusok között jelentkezik, a 3.8 ábrán az $M=5,5M_{\odot}$ modellsorozatnál. Ez a rezonancia azonban annyiban más, mint az előző, hogy a radiális sebesség-görbékben könnyebb lokalizálni. Feuchtinger és mtsai (2000) azt találták, hogy ez a rezonancia 4,2 napos periódushoz esik (bár az enyémétől kissé eltérő $M-L$ -relációt használtak). Egyéb, lehetséges rezonanciáknak nem találtam a nyomát a $\log P - \Delta\Phi_1$ diagramon (Szabó és mtsai, 2007).

Kis amplitúdójú cefeidák fáziskésése

Buchler és mtsai (2005) újfajta, ultrakis amplitúdójú cefeidákat fedeztek fel a Nagy–Magellán-felhőben. Érdemes megjegyezni, hogy saját, a Hubble-űrtávcső archív mérésein alapuló publikálatlan vizsgálataim alapján legalább egy részükért egészen biztosan a magas kontamináció (egy közeli csillaggal történt összemérés, azaz blend) a felelős. Mindazonáltal, ha legalább egy részükről bebizonyosodik, hogy rendkívül kis amplitúdójuk annak köszönhető, hogy az instabilitási sáv szélén helyezkednek el, akkor a fáziskésés módszere segíthet azonosításukban. Az itt vázolt munkám megmutatta (3.4 ábra), hogy az instabilitási sáv vörös széléhez közeli ultrakis amplitúdójú F cefeidák negatív fáziskésést mutatnak, és a normál F cefeidák alatt, a

$[-0,2; -0,4]$ tartományon kívül kell azokat keresnünk a $\log P - \Delta\Phi_1$ diagramon. A rezonancia-centrumoktól távoli, kis amplitúdójú O1 cefeidák szintén az elméleti fáziskésés-eloszlás alsó burkolója között gyülekeznenek. Módszerem nemcsak kiegészíti a hagyományos, fénygörbe-alakon alapuló módusazonosítási módszereket, hanem a jóval kevésbé megfogható, ritka, kis amplitúdójú, második radiális felhangban pulzáló (O2) cefeidák azonosítását is lehetővé teszi.

Másik lehetőség, hogy az ultrakis amplitúdójú cefeidák az instabilitási sávon kívül, de ún. strange módusokban (magas radiális felhangban) pulzálnak (Buchler és Kolláth, 2001). Módszerem ekkor is célravezető lehet: a fáziskésés segíthet kizárni az alacsonyabb radiális felhangok jelenlétét. Sajnos a Magellán-felhőkbeli cefeidákra kapott pontos radiális sebesség-adatok – amik a fáziskésés módszerével megvilágíthatnák eme kis amplitúdójú, ritka cefeidák mibenlétét – még ma is jelentős megfigyelési kihívást jelentenek.

A V440 Per esete

Ennek a kis amplitúdójú ($A_1=0,095$ mag) és hosszú periódusú ($P=7,57$ nap) változónak a pulzációs módusát sok talány övezte. A csillag fénygörbét Antonello és Poretti (1986) elemezték. Antonello és mtsai (1990) a fotometriai ϕ_{21} értéken alapuló klasszifikációs sémája 5,5 napnál hosszabb pulzációs periódusra már nem diszkriminál a pulzációs módusok között. Kienzle és mtsai (1999) megjegyezték, hogy a radiális sebesség ϕ_{21} Fourier-fázisa inkább a felhangbeli pulzációt támasztja alá. Bár a fáziskésés módszerével is a felhangbeli szekvenciához tartozónak vélhetjük a csillagot (3.4 ábra), a hatalmas hibahatárral meghatározott fáziskésés értéke ($\Delta\Phi_1$) miatt eredményeink alapján hasonlóan plauzibilis kis amplitúdójú alaplómódusú csillagnak kategorizálni. Ez utóbbi vélekedést erősíti, hogy pulzációs periódusa viszonylag hosszú, ami a leghosszabb periódusú, felhangban pulzáló galaktikus cefeidává avatná, alaplómódusú cefeidák között viszont átlagos értéknek számítana.

Megjegyezzük, hogy a felhangban pulzáló MY Pup és bal oldalra eső közvetlen szomszédai a 3.4 ábrán pont a rezonanciarégió közepére esnek. Az alkalmazott $M-L$ -relációnak közvetlen hatása van a rezonancia helyére, ezáltal a $\Delta\Phi_1$ értékekre is. A 3.4a ábra fáziskésés-értékeinek összehasonlítása a Girardi-féle és a rezonancia $M-L$ -összefüggésekkel kapott értékekkel azt sugallja, hogy minden olyan $M-L$ -reláció esetén, amely az $5,5 - 6,0 M_\odot$ tömegtartományban magasabb luminozitást jósol, a $\Delta\Phi_1$ értékek jobbra tolódnak, és javítják a modellek és a megfigyelések egyezését $\log P_1 > 0,6$ periódusokra, és különösen az MY Pup esetében. Azonban egy ilyen jellegű változtatás sem javítaná lényegesen a kilógó V440 Per helyzetét. Ugyanakkor felvettem, hogy a 3.2 és a 3.4 ábrák megengedik azt a lehetőséget is, hogy esetlegesen egy kis amplitúdójú, az instabilitási sáv szélén elhelyezkedő, alaplómódusú cefeidával állunk szemben.

Baranowski és mtsai (2009) megfigyelései egyértelműen első radiális felhangbeli pulzáció mellett szólnak. Ehhez radiális sebesség-méréseket gyűjtöttek, amelyek elég pontosak voltak ahhoz, hogy a radiális sebesség-görbe szinusztól való eltérését is kimutathassák. Az A_2 Fourier-amplitúdó értékére 140 ± 15 m/s értéket kaptak, ami nagy biztonsággal első felhangbeli pulzációt jelez. Azonban Kovtyukh és mtsai 2012-ben az abszolút fényesség és a $\text{Fe II}/\text{Fe I}$ spektroszkópiai vonalmélység-arányok között megállapított összefüggések felhasználásával arra ju-

tottak, hogy a V440 Per alaplómódusban pulzál, valamint kis amplitúdójának oka az instabilitási sáv szélén való elhelyezkedése, a Szabó és mtsai (2007)-ben és e dolgozatban megfogalmazott elvek és feltevések alapján. Tehát bár a legerősebb érvek az első felhangbeli pulzációt erősítik (Baranowski és mtsai, 2009 mérései alapján), a kérdés még korántsem eldöntött.

A Polaris esete

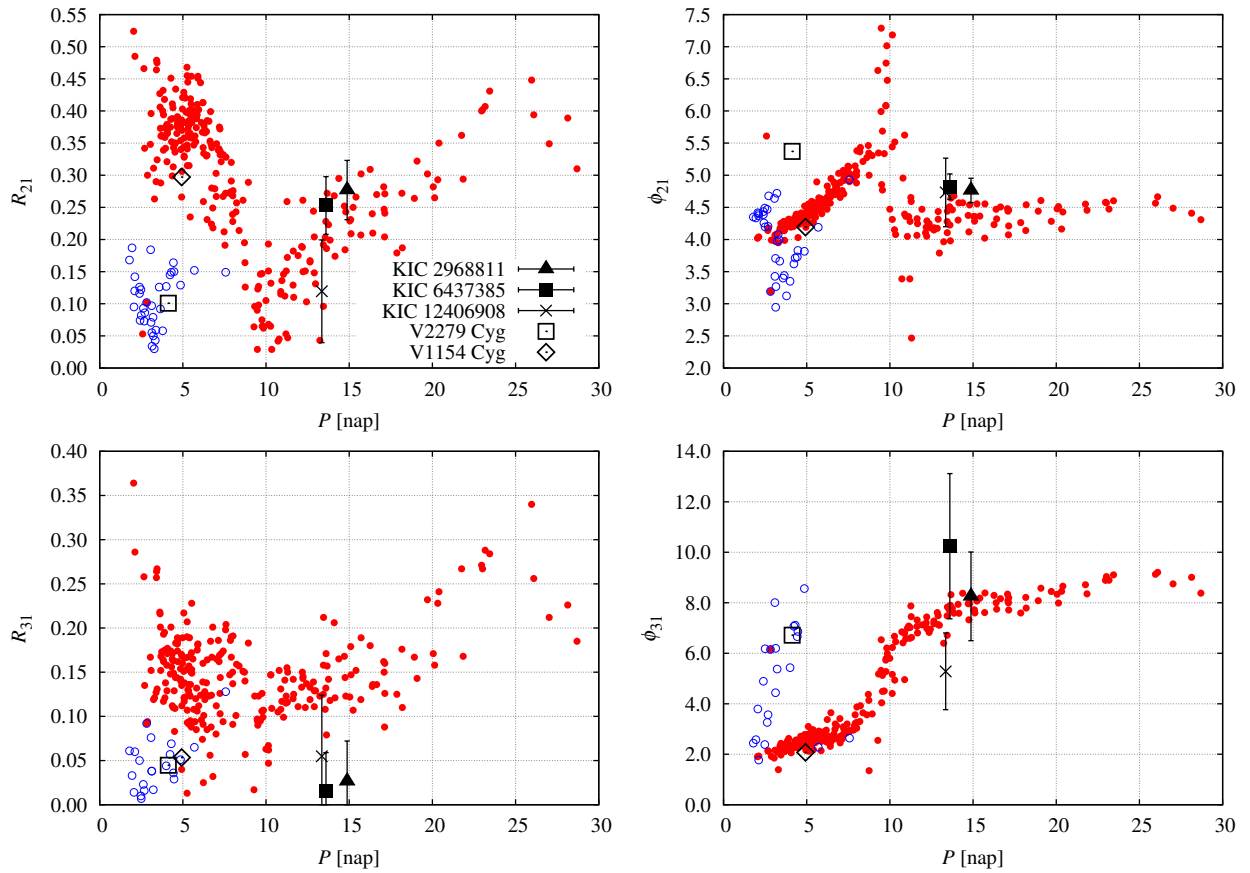
Szilárd vagyok, mint éjszakai csillaga,
Melyhez kimérten nyugvó szerkezetre
Hasonló nincs az égnek boltozatján.

W. Shakespeare, *Julius Caesar*, III. felvonás,
ford: Vörösmarty Mihály

A Polaris (más néven α UMi) az egyik legismertebb csillag az égen, az északi pólus közelében, ráadásul cefeida változócsillag. Annál meglepőbb, hogy fejlődési állapotáról és pulzációs viselkedéséről viszonylag keveset tudunk. Pulzációs periódusa 3,969 nap, ami hosszú távon folyamatos növekedést mutat (Ferne, 1966; Arellano Ferro, 1983; Dinshaw és mtsai, 1989). A periódusnövekedés mértékére adott becslések $\Pi = 4,5$ s/év (Turner és mtsai, 2005) és $\Pi = 4,9$ s/év (Spreckley és Stevens, 2008) között mozognak. Ezek az értékek több mint egy nagyságrenddel meghaladják a hasonló periódusú cefeidák periódusváltozásának átlagos mértékét. Ennek alapján Berdnikov és mtsai (1997) úgy gondolták, hogy a csillag az ún. *first crossing* állapotban van, vagyis először keresztezi az instabilitási sávot – ezt az állapotot a rapid fejlődés, és gyors periódusváltozás kíséri a csillagfejlődési modellek szerint. Neilson és mtsai (2012) és Neilson (2014), és Fadeyev (2015) szerint azonban a Polaris kék irányban éppen egy hurkot ír le a Hertzsprung–Russell-diagramon, azaz az ún. *blue loop* fejlődési állapotban megy keresztül, így nem először keresztezi a cefeida instabilitási zónát.

A Polaris szokatlanul kis amplitúdója évtizedekig tovább csökkent (0,12 és 0,030 V nagyság között), kérdéses volt, hogy vajon a csillag elhagyja-e az instabilitási sávot, végleg beszüntetve a pulzációt. Azonban Bruntt és mtsai (2008), valamint Spreckley és Stevens (2008) úrfotometriai módszerekkel azt találták, hogy a pulzációs amplitúdó csökkenése a 2000-es évek elején megfordult, és azóta növekedést mutat. A mérésekhez többek között a WIRE infravörös műholdat, valamint a Coriolis-műhold SMEI (Solar Mass Ejection Imager) műszerét használták.

Fadeyev (2014, 2015) ugyanazokat a konvektív paramétereket találta megfelelőnek a Polaris hidrodinamikai modellezéséhez, mint amelyeket én használtam a fáziskésés modellezéséhez (Szabó és mtsai 2007), valamint Kolláth és mtsai (2002), és Smolec és Moskalik (2008a). Azt találta, hogy a leghíresebb cefeida az instabilitási sáv alacsony hőmérsékletű szélének (vörös szél) közelében van, és alaplómódusban pulzál. Mások első felhangbeli pulzációval magyarázzák különös viselkedését: Feast és Catchpole (1997) megmutatták, hogy a Hipparcos asztrometriai műhold mérései konzisztensek a Polaris első felhangbeli pulzációjával. Ezt a konklúziót mások független módszerekkel (hidrodinamikai modellekkel) megerősítették (Bono és mtsai, 2001). Újabb fotometriai és spektroszkópiai parallaxis-mérések azonban az alaplómódusú



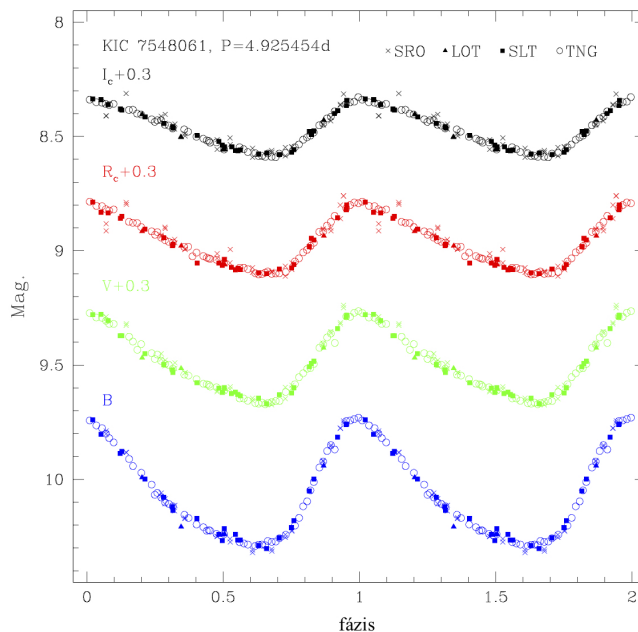
3.9. ábra. Alapmódusú (vörös körök) és első felhangban (kék korongok) rezgő galaktikus cefeidák Fourier-paramétereinek progressziója a Johnson V sávban (Szabó és mtsai, 2011). Az ábrán a V1154 Cyg és más Kepler cefeidajelölteket is feltüntettem földi Johnson V fénygörbéjüket felhasználva. A V1154 Cygnihez tartozó hibahatárok kisebbek a szimbólumoknál, így azokat nem jelöltem. A galaktikus cefeida minta az alábbi cikkekből származik: Moffett & Barnes (1985), Antonello & Poretti (1986), Antonello és mtsai (1990), Mantegazza & Poretti (1992), Poretti (1994), Antonello & Morelli (1996).

pulzáció mellett jelentenek újabb érveket (Turner és mtsai 2013).

A cefeidák fáziskésésére alapuló módszerem a felhangbeli pulzációt valószínűsíti, és csillagunk közel esik a felhangbeli pulzációhoz tartozó magas hőmérsékletű (kék) szélhez a $\log P - \Delta\Phi_1$ diagramra transzformálva. Ezt az egyezést azonban kisebb fenntartással kell fogadnunk, mert ha igaz a first crossing teória, akkor más $M-L$ -relációt kellett volna alkalmaznunk a számításoknál, és a csillag is máshová kerülhet a fáziskésés-diagramon. Összefoglalva: ebben a periódustartományban esnek legközelebb egymáshoz az alapmódust és az első felhangot jellemző szekvenciák (3.6 ábra). Saját, a cefeidák fáziskésésre alapuló számításaim a felhangbeli pulzációt valószínűsítik a Polaris esetében, de nem zárják ki teljesen az alapmódus lehetőségét sem.

A V1154 Cyg esete

A V1154 Cygni (KIC 7548061) az egyetlen klasszikus cefeida, amit a Kepler eredeti látómezejében sikerült megfigyelni (Szabó és mtsai, 2011, lásd még a 2. fejezetet). A csillag fényvál-

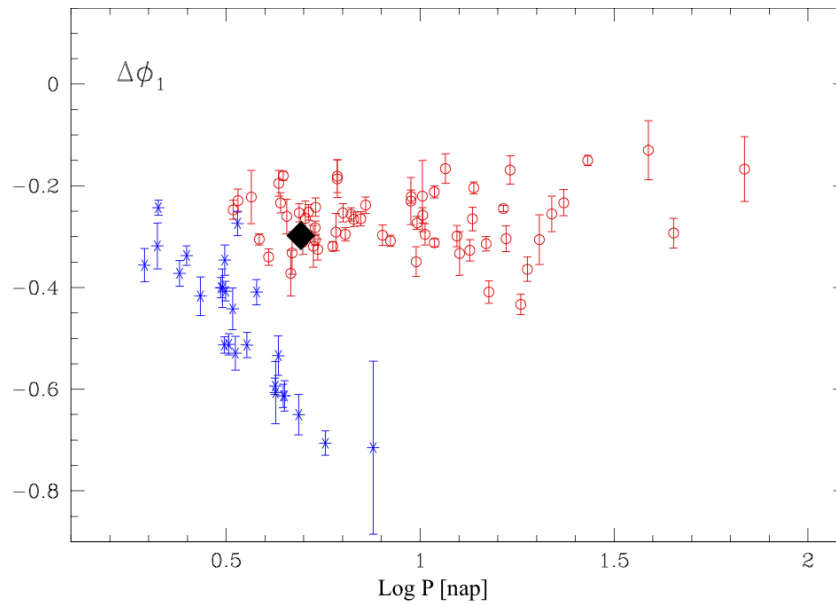


3.10. ábra. A V1154 Cygni Johnson–Cousins BVR_cI_c fázisba rendezett fénygörbéi a 2010-es megfigyelési szezonból. Az egyedi pontok tipikus hibája néhány millimagnitúdó. Az egyes megfigyelési pontok a következő obszervatóriumokból származnak: LOT: Lulin Obsz. 1-m Cassegrain távcső, Tajvan; LOT: Lulin Obsz. 0,4-m RC-teleszkóp; TNG: Tenagra II Obsz. 0,9-m RC-távcső, USA; SLT: Sonoita Research Obs., 0,35-m robottávcső, USA (Szabó és mtsai, 2011).

tozását Strohmeier, Knigge és Ott (1963) fedezték fel fotografikus úton. Az első megbízható fotoelektromos UBV megfigyeléseket Wachmann (1976) publikálta. További fotoelektromos és CCD-megfigyeléseket közöltek: Szabados (1977), Arellano Ferro és mtsai (1998), Ignatova és Vozyakova (2000), Berdnikov (2008) és Pigulski és mtsai (2009). Ez utóbbi publikáció a Kepler-mező dedikált fotometriai felmérését dolgozza fel. Az objektumról űrfotometriai adatok is elérhetők: egyrészt a Hipparcos asztrometriai műhold mérései (ESA 1997), másrészt az INTEGRAL-műhold OMC műszerének megfigyelései. Ezután a Kepler-űrtávcső észlelte négy éven keresztül, folyamatosan. Pulzációjának periódusa a Kepler-mérések alapján 4,92545 nap.

Ráadásul, a moszkvai CORAVEL csapat (Gorynya és mtsai, 1998) nagyszámú radiális sebesség-adatot gyűjtött a V1154 Cygniről. Molenda-Żakowicz és mtsai 2008-ban spektroszkópiai úton meghatározták célpontunk főbb paramétereit: $[\text{Fe}/\text{H}] = 0,06 \pm 0,07$, spektráltípus: G2Ib, $T_{\text{eff}} = 5370 \pm 118 \text{ K}$, $\log g = 1,49 \pm 0,34$, és $v \sin i = 12,3 \pm 1,6 \text{ km/s}$. Ezek a paraméterek konzisztensek a cefeida klasszifikációval. Luck és mtsai (2006) az előbb említett munkáktól függetlenül meghatározták a csillag fémtartalmát, amire $[\text{Fe}/\text{H}] = -0,10$ -et kaptak.

A Kepler Asztroszeizmológiai Tudományos Konzorcium (KASC) cefeida munkacsoportja vezetéssel friss spektroszkópiai megfigyeléseket is végzett. 2010 májusa és augusztusa között 14 észlelést végeztünk a tautenburgi 2 méteres távcső (Thüringer Landessternwarte, TLS) Coudé–Échelle-spektrográfiával. A spektrumok a 470–740 nm közé eső tartományt fedik le, a felbontás $R = 33\,000$ és minden esetben 30 percet exponáltunk. A spektrumokat a sztenderd MIDAS programcsomaggal redukáltuk. Az eljárás kozmikus beütések eliminálását, a bias és



3.11. ábra. Galaktikus cefeidák fáziskésése. Piros körök: alapmódusú, kék csillagok: első felhangban pulzáló csillagok. A V1154 Cygnit fekete rombusz jelöli (Szabó és mtsai, 2011).

a szórt fény levonását, flat-field korrekciót, az egyes rendek optimális meghatározását, Th-Ar lámpán alapuló hullámhossz-kalibrációt, a lokális kontinuum normalizációját és az egyes rendek illesztését foglalta magában. A további kismértékű instrumentális hullámhosszbeli eltolódásokat nagyszámú tellurikus O_2 vonal kalibrációjával orvosoltuk. Egy spektroszkópai megfigyelés az INAF – Osservatorio Astrofisico di Catania (INAF-OACT) M. G. Fracastoro állomásán (Serra La Nave, Mt. Etna) is történt, 2007. június 15-én, amihez a 91 cm-es távcsövet, és a FRESCO nevű, échelle-spektrográftot használtuk, ami $R = 21\,000$ -es spektrális felbontást és a 430–680 nm-es tartomány rögzítését tette lehetővé. A kapott radiálissebesség-adatokat a Szabó és mtsai (2011) 6. táblázata tartalmazza.

Miután földi spektroszkópai megfigyelések is rendelkezésre álltak, alkalmazhattuk a fáziskésés módszerét a pulzációs módus meghatározásához. A V1154 Cygnihez hasonló periódusú cefeidák pulzálhatnak alapmódusban és első felhangban is. Elkülönítésük általában a fénygörbe Fourier-paraméterei alapján történik, melyek jellegzetes progressziót mutatnak a pulzációs periódus függvényében. Azonban a radiálissebesség-görbék Fourier-paraméterei megkülönböztethetetlenek a két módusra 5 nap körüli periódusnál, lásd pl. Baranowski és mtsai (2009) 3. ábráját.

Hasonló a helyzet a fénygörbék Fourier-paramétereivel is. A 3.9 ábra alapján, ami a Fourier-paraméterek progresszióját mutatja a pulzációs periódus függvényében, az R_{21} és a ϕ_{31} paraméterek látszanak a legalkalmasabbnak a módusdiszkriminációra. Az is feltűnik azonban, hogy majdnem pontosan 2π különbség van az alapmódusú és a felhangban pulzáló 5 nap periódusú galaktikus cefeidák ϕ_{31} paraméterei között. Így a V1154 Cygninél ez utóbbi paraméter sem használható. Alapmódusú cefeidákra nagyobb R_{21} értékeket találunk, mint felhangbeliekre, de az értékek amplitúdófüggőek, és ha kis amplitúdójú alapmódusú cefeidánk van, akkor R_{21} szintén nullához tart. A V1154 Cyg normál amplitúdójú, és ez alapján az egyetlen paramé-

ter alapján alapmódusú cefeidának klasszifikálhatjuk. A pontos besoroláshoz azonban további vizsgálatok szükségesek. Itt segítségül hívhatjuk az általam vizsgált elsőrendű fáziskésést ($\Delta\Phi_1 = \phi_1^{V_r} - \phi_1^V$), amit a Johnson V fénygörbe és a radiális sebesség-görbe között mérhetünk, és ami ebben a periódustartományban is használható. A Kepler-adatok kiegészítésére a KASC által gyűjtött Johnson V (3.10 ábra) és radiális sebesség follow-up méréseinket felhasználva a fáziskésésre $\Delta\Phi_1 = -0,298 \pm 0,018$ értéket kapunk, ami egyértelműen a radiális alaphangban rezgő cefeidák közé sorolja csillagunkat (3.11 ábra). Ez a munka egy példája az elméleti vizsgálatok, az űrfotometriai mérések és a földi kiegészítő megfigyelések gyümölcsöző kölcsönhatásának.

3.2. Kétmódusú cefeidák

Star ticklers and the need for a galactic lighthouse ...

Learned és mtsai, 2008, 1. szakasz, fejezetcím

3.2.1. Két és több módusban pulzáló cefeidák

A cefeidák fiatal, fényes, közepes tömegű pulzáló változócsillagok. Magjukban héliumfúzió termeli az energiát, miközben a klasszikus instabilitási sávot keresztezik, akár többször is fejlődésük során. Ekkor a κ -mechanizmus révén külső rétegeik pulzációs szempontból instabillá válnak (Cox és Giuli, 1968), és rendszerint az első néhány radiális sajátmódusban rezegni kezdenek. Többségük egyetlen módusban (F, O1 vagy O2), kis részük azonban két vagy három radiális módusban pulzál egyszerre. Előbbieket kétmódusú vagy beat-cefeidáknak is nevezik, a két módus fénygörbében tapasztalható hatása miatt. Az első galaktikus kétmódusú cefeidákat több mint fél évszázada azonosították (U TrA és TU Cas, Oosterhoff 1957a,b). Ezek az alaphangban és az első radiális felhangban rezegnek és P_1/P_0 periódusarányuk 0,70–0,74 közé esik. Ezzel szemben az O1/O2 kétmódusú csillagok 0,80 körüli periódusarányról ismerhetők fel. Az ismert kétmódusú cefeidák túlnyomó része a Magellán-felhőkben található (számuk kb. 500-ra tehető), a Galaxisban ismert számuk 40 körül van (Moskalik 2013, 2014).

Nagyon hasznos eszköznek bizonyult a kétmódusú csillagok periódusarányának ábrázolása a hosszabb periódus függvényében, amit Petersen-diagramnak is nevezünk (Petersen, 1973). A tejútrendszerbeli és a környező galaxisok kétmódusú F/O1 cefeidái alapján régóta jól ismert, hogy a periódusarány érzékeny függvénye a fémtartalomnak. Emiatt számos esetben alkalmazták őket a csillagmodellek pontosítására (pl. Moskalik és mtsai, 1992; Christensen-Dalsgaard és Petersen, 1995; Morgan és Welch, 1997), de galaktikus távolságmérésre is (Kovács 2000; Beaulieu és mtsai, 2001).

Érdekességgéppen megemlíti, hogy Soszyński és mtsai (2008) olyan kétmódusú cefeidákat is találtak a Nagy-Magellán-felhőben, amik az első és a harmadik felhangban rezegnek (O1/O3). Ezek rendkívül ritkák, mindössze két képviselőjük ismert. Periódusarányuk $P_1/P_0 = 0,677$. A harmadik felhang amplitúdója nagyon kicsi, így lehetséges, hogy előfordulásuk gyakoribb, de nehezebb detektálni őket. Szintén fontosak és érdekesek azok a cefeidák, amik egyidejűleg három radiális módusban rezegnek (Moskalik és mtsai, 2004; Soszyński és mtsai, 2008,2010,2011a). Összesen 10 ilyen objektumot ismerünk, négy az első három radiális módusban pulzál (F/O1/O2), míg a többi az első három felhangban rezeg (O1/O2/O3).

Eddig csupán radiális (gömbszimmetrikus) módusokat említettem. Nemradiális módusok gerjesztésének lehetőségével Dziembowski (1977) és Osaki (1977) foglalkoztak, legújabbán pedig Mulet-Marquis és mtsai (2007) számoltak numerikus modelleket. A cefeidák pusztán radiálisan pulzáló voltának paradigmája a 21. század elején kezdett megdőlni, amikor Moskalik és Kołaczowski (2008, 2009) munkái konzisztens módon kezdtek a radiális spektrumba nem illő

periodicitásokat feltárni. A jobbára OGLE-II, azaz földi adatokon nyugvó megfigyelési pilléreket Poretti és mtsai (2014) űrfotometriai adatokkal egészítették ki, egy, a CoRoT-val megfigyelt hárommódusú cefeidában. Ez utóbbi csillag egy normál O1/O2 kétmódusú cefeida, de van egy kisebb amplitúdójú, hosszabb periódusú frekvencia is a Fourier-spektrumában, ami valószínűleg egy nemradiális módus. A felhangban rezgő, és az F/O1 kétmódusú cefeidák egy része egy másik különös jelenséget is mutat: jellegzetes, a felhang periódusával 0,60–0,64 körüli periódusarányt mutató, a Petersen-diagramon három párhuzamos szekvenciába rendeződő periodicitásokat. A pontosan nem értett frekvenciákra a legjobb magyarázatnak a nemradiális módusok jelenléte tűnik (Moskalik, 2014).

Munkámban a legszéleskörűbben alkalmazható, F/O1 (alaplómódusban és az első radiális felhangban szimultán pulzáló) kétmódusú csillagokkal foglalkoztam behatóbban. Egyrészt ezek periódusaránya sokkal érzékenyebb a fémtartalomra, mint az O1/O2 (első két radiális felhangban pulzáló, kétmódusú) társaiké, másrészt fényesebbek is, hiszen nagyobb tömegű csillagoknál lehetségesek F/O1 kétmódusú állapotok. Ez teszi őket alkalmassá akár extragalaktikus fémtartalom mérésre is. Nem utolsósorban: a két, nagy pontossággal megfigyelt periódus lehetővé teszi a csillag paramétereinek pontos behatárolását.

E rövid bevezetés után rátérek az általam a területen végzett kutatások ismertetésére.

3.2.2. A kétmódusú cefeidák modellezése

Lineáris kétmódusú modellek

Ahogy a 3.1.2. fejezetben tárgyaltam, a hidrodinamikai modelleket általában elég csak a cefeidák külső tartományaira futtatni. A magot magába foglaló, belső részen ($R = R_c$ tartományon belül), ami L_c luminozitással jellemezhető, az időbeli deriváltakat elhanyagolhatjuk. A cefeidák fáziskésésének modellezéséről ott leírtak nagyrészt itt is igazak, ezeket nem részletezem ismét. Itt is megemlítem, hogy az adott kémiai összetételhez tartozó szokásos három paraméter (L, M, T_{eff}) teljesen meghatározza a modellünket, de iteráció árán ezek más paraméterrel, például a sugárral $R_*(L, M, T_{\text{eff}})$, vagy valamelyik lineáris periódussal $P_k(L, M, T_{\text{eff}})$ (ahol $k=0,1, \dots$ a radiális módusokat jelölik), is helyettesíthetők. A modellezéshez OPAL GN 93 opacitásokat (Iglesias és Rogers, 1996) használtam, a Napra érvényes kémiai összetétel mellett (Grevesse és Noels, 1993), amit alacsony hőmérsékleten ($\log T < 3,95$) az Alexander és Ferguson (1994)-féle opacitások egészítették ki.

Meghatároztam az egyensúlyi modellek lineáris (nemadiabatikus) periódusait (P_k) és növekedési rátáit η_k ⁸. Ehhez a munkához első lépésben a lineáris periódusok is tökéletesen megfelelnek, hiszen a nemlineáris periódusoktól való eltérés nemlineáris modelljeim alapján csak a negyedik tizedesjegyben jelentkezik (lásd még Antonello és Aikawa, 1998). Lineáris kétmódusú tartományról beszélünk, ahol $\eta_0 > 0$ és $\eta_1 > 0$, azaz az alaplómódus és az első felhang is egyidejűleg gerjesztett.

A galaxisok nehezebb kémiai elemekben való feldúsulása (leegyszerűsítve) hidrogén és hé-

⁸ $\eta_k > 0$ esetén gerjesztett, ellenkező esetben csillapított módukról beszélünk.

liumégés formájában zajlik. Mivel a héliumtartalom (Y) korrelál a fémtartalommal (Z), ezért $X = X(Z)$ relációt tételeztem fel, az összefüggés pontos alakját pedig olyan parabolával illesztettem, ami átmegy a Galaxisra és a Magellán-felhőkre jellemző értékeken $[(Y, Z) = (0,280, 0,020), (0,276, 0,008), \text{ és } (0,270, 0,004)]$. A héliumfeldúsulási függvény fenti alakban való feltételezése tehát egyrészt kapcsolat teremt a Galaxis és a Magellán-felhők között, másrészt a kémiai összetételt jellemző három paramétert $[X(Z), Y(Z) = 1 - X(Z) - Z, \text{ és } Z]$ egyre redukálja $[Z]$.

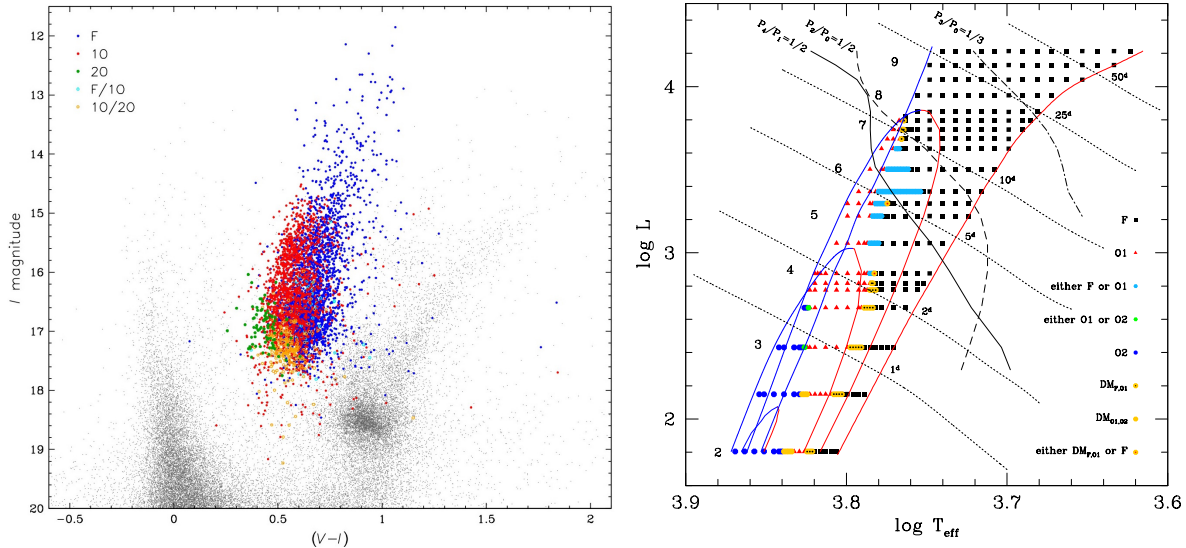
Nemlineáris kétmódusú modellek

A turbulens konvekció implementálása a nemlineáris pulzációs hidrokódokba sikeresen oldotta meg a kétmódusú pulzáció problematikáját (Kolláth és mtsai, 1998, 2002; Szabó és mtsai, 2004). A pusztán radiatív energiatranszfert tartalmazó kódok ugyanis nem voltak képesek kétmódusú radiális pulzáció modellezésére, mindez évtizedekig hátráltatta a kétmódusú csillagok elméleti vizsgálatát. Dinamikai értelemben vizsgálva a kérdést, az újabb (pl. a Florida–Budapest) hidrokódokban figyelembe vett turbulencia okozta többletviszkozitás megváltoztatja az alapmódus stabilitását, ami kétmódusú állapot(ok) kialakulásához vezethet (Kolláth és mtsai, 2002).

Az itt ismertetett munka tekintetében két fontos szempontot kell kiemelni a nemlineáris modellekkel kapcsolatban. Egyrészt a lineáris kétmódusú tartomány ($\eta_0 > 0$ és $\eta_1 > 0$) csak szükséges, de nem elégséges a nemlineáris kétmódusú tartomány létrejöttéhez: nemcsak kétmódusú, de hiszterézistartományok is előfordulnak (mind RR Lyrae csillagok (Szabó és mtsai 2004), mind cefeidák esetében), ahol a pulzációs módus a csillagfejlődés irányától függ. Tehát a módusszelekció nemlineáris mechanizmusait nem adják vissza a lineáris modellek (Kolláth és Buchler 2001; Kolláth és mtsai 2002). Ezzel szorosan összefügg a második szempont: tapasztalataim szerint a megfigyelésekkel egybevégtően a nemlineáris kétmódusú tartomány jóval keskenyebb a HRD-n, mint a lineáris tartomány, ez pedig a kétmódusú cefeidák fémtartalom-meghatározásának pontosságát javítaná. A konvektív paraméterek kalibrálásának nehézsége azonban a kétmódusú cefeidákra alapozott fémtartalom-meghatározási módszer ilyen irányú kiterjesztését megakadályozta, de az instabilitási sáv topológiájának feltérképezése miatt fontosnak tartom megemlíteni itt az ebben az irányban végzett kutatásaimat.

A kétmódusú tartományok feltérképezésére nemlineáris (teljes hidrodinamikai) modelleket számoltam a Florida–Budapest kóddal, a releváns részletek megtalálhatók Szabó és mtsai (2007) munkában, illetve a 3.1.2 fejezetben. Az ott leírtaknak megfelelően a rezonancia $M-L$ relációt alkalmaztam, valamint a kémiai összetételt galaktikusnak ($Z=0,020$) választottam. A számításokhoz OPAL-opacitásokat használtam (Iglesias és Rogers, 1996), melyet alacsony hőmérsékleten az Alexander és Ferguson (1994) előírás egészített ki. A programcsomagban a konvekciót időfüggő keveredéshossz-elmélet írja le, az alkalmazott konvekciós paraméterek megegyeznek a 3.1. táblázat A sorozatával.

A 3.12 ábrán bal oldalon a Kis-Magellán-felhő cefeidáit láthatjuk a $(V-I) - I$ szín-fényesség diagramon. Jól elkülöníthetők az egyetlen módusban rezgő és a többmódusú pulzátorok. A jobb oldalon az általam számolt nemlineáris modellsorozatokat ábrázoltam, ezúttal a $\log T_{\text{eff}} -$

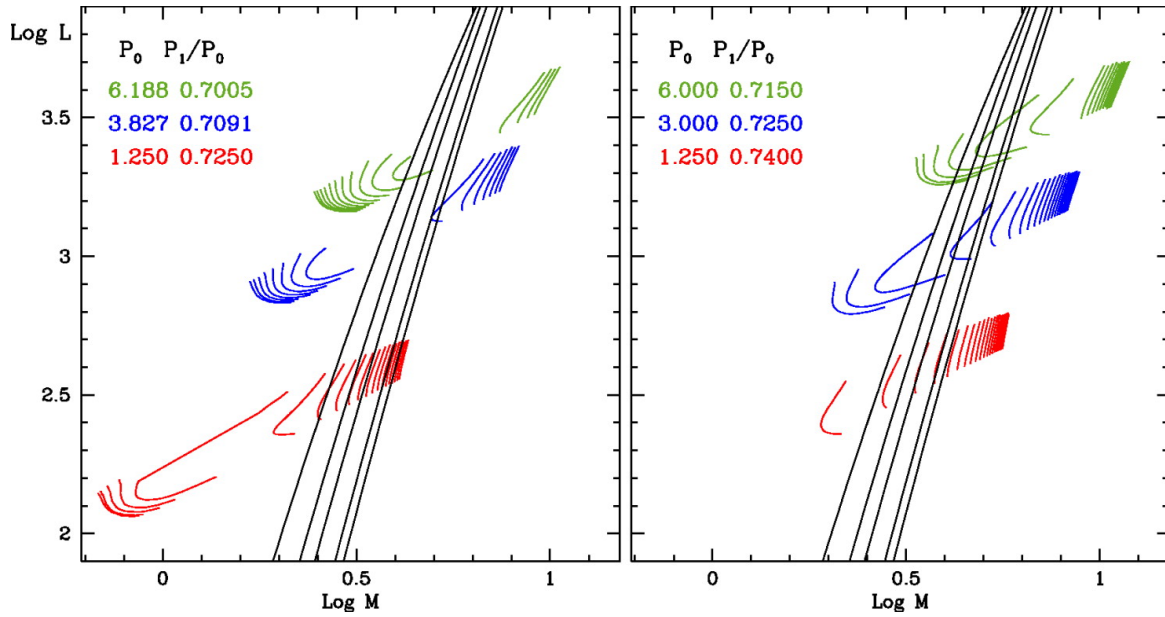


3.12. ábra. **Balra:** A Kis-Magellán-felhő cefeidái az OGLE megfigyelései alapján (Soszyński és mtsai, 2010). Szín-fényesség diagram, ahol a $V - I$ színindex az effektív hőmérséklettel, az I fényesség pedig a luminozitással arányos mennyiség, tekintve, hogy a minden objektum jó közelítéssel egyforma távolságra van tőlünk. A sötétkék pontok az F, a pirosak az O1, zöldek az O2, a világoskékek az F/O1, a narancssárgák az O1/O2 kétmódusú cefeidákat mutatják. **Jobbra:** A cefeida-instabilitási sáv numerikus hidrodinamikai modelljeim alapján (Buchler és Szabó, 2007). A pusztán alaplómódusban rezgő csillagokat (F) fekete négyzetek jelölik, a csak első radiális felhangban pulzálókat (O1) piros háromszögek, míg a csak második felhangot mutató cefeidákat (O2) kék körök. Az egyes radiális felhangok magas és alacsony hőmérsékletű határait kék, illetve piros vonalak határolják. Az egyidejűleg két módusban rezgő (kétmódusú) cefeidákat sárga szimbólumokkal jelöltem, a két fixpontot mutató modelleket (aplómódus és első felhang, illetve első és második felhang), melyek vagy az egyik, vagy a másik módusban rezgnek kék, illetve zöld pontok jelölik. A vízszintes modellsorozatok mellett feltüntetett számok a modellcsillagok tömegét mutatják naptömeg egységben. A ferde pontozott vonalak konstans aplómódusbeli periódust mutatnak, a jelölt rezonanciák meredekebb vonalait rajzoltam még be. Érdeemes megfigyelni a modellezett és megfigyelt cefeida-instabilitási sáv topológiájának nagymértékű hasonlóságát.

$\log L$ síkon. Az ábra világosan visszaadja a megfigyelt jellegzetességeket, az alaplómódusban, illetve felhangokban rezgő csillagok egyre alacsonyabb luminozitású és magasabb hőmérsékletű régiójától kezdve a kétmódusú csillagok elhelyezkedésén át, ez utóbbiak keskeny megfigyelt hőmérséklet-tartományáig, annak ellenére, hogy a modelleket galaktikus fémtartalommal számoltam (a Galaxisban ismert kétmódusú csillagok szerény száma miatt nem készíthető a bal oldalhoz hasonló ábra). A modellek egyúttal a periódusokat és a fontosabb rezonanciákat is megmutatják. A legfontosabb eredmény tehát, hogy a modellek megfigyeléssel pontosan egybeeső helyen és hőmérséklet-tartományban adnak kétmódusú eredményt RR Lyrae-kre (Szabó és mtsai, 2004) és cefeidákra is (3.12 ábra). Ezenkívül megállapíthatjuk, hogy a kétmódusú csillagok dinamikai vizsgálatára kidolgozott módszerek: amplitúdóegyenletek, fixpontok, a kétmódusú állapotok kialakulásának lehetséges dinamikai és módusszelekciós forgatókönyvek (Kolláth és mtsai, 1998, 2002; Kolláth és Buchler, 2001; Szabó és mtsai, 2004) rendkívüli mértékben gazdagították a tudományterületet.

Nem mehetünk el azonban szó nélkül Smolec és Moskalik (2008a, 2008b) munkái mellett. Állításuk szerint a konvektív forrásfüggvény szigorúan nemnegatívnak választása miatt erős turbulens energia lép fel a konvekció szempontjából stabilnak számító rétegekben, ami az alaplómódusra és az első felhangra különböző mértékben hatva módosítja a módusok stabilitását, kedvezve a kétmódusú állapotok kialakulásának. Abban azonban a kritikusok is egyetértenek, hogy a kétmódusú nemlineáris modelljeim egybeesése a megfigyelésekkel, és az a tény, hogy a stabil kétmódusú állapot létrehozásához a turbulens konvekció, vagy legalábbis valamilyen erős disszipáció elengedhetetlen, mégis relevánssá teszik a modelljeimet, hiszen a turbulens konvekción kívül jelenleg semmilyen más mechanizmus nem ismert, amely a pulzációs módusok stabilitását kétmódusú állapotok kialakulásának irányába tudná befolyásolni. A végső gondolat a modelljeim elleni érvelésre az, hogy az egydimenziós leírás túlzott leegyszerűsítése a valóságnak. Marconi és mtsainak (2003) például két különböző, ($l/H_p \approx 1,5$ és $2,0$) keveredéshosszt kellett egydimenziós RR Lyrae modelljeikben feltételezni ahhoz, hogy az M3 gömbhal-mazban megfigyelt RR Lyrae csillagok HRD-n elfoglalt helyének két szélét (azaz az instabilitási sávot) összhangba tudják hozni a megfigyelésekkel, de még így is maradtak megválaszolatlan kérdések.

Ezt az ellentmondást csak a többdimenziós hidrodinamikai modellek fogják tudni oldani. Ebben az irányban már több lépés is történt, így megemlítenédők Geroux és Deupree (2011, 2013, 2014, 2015) munkái, valamint Mundprecht és mtsai (2013, 2015) modelljei. Ez utóbbi két- és háromdimenziós modellek egyértelműen arra utalnak, hogy ha a konvekciót rögzített turbulens paraméterekkel próbáljuk leírni, abba a feloldhatatlan problémába ütközünk, hogy a pulzációs ciklus során és a csillag sugárparaméterének függvényében ezek a paraméterek nem állandóak (akár egy nagyságrendet(!) is változhatnak). Így eleve kudarcra ítélt próbálkozás lenne ezeket a modelleket kalibrálni (netán különböző paraméterű csillagokra), hiszen ez a kalibráció a háromdimenziós modellek függvényében irreleváns. Így ebből a szempontból bármelyik egydimenziós modell ugyanolyan rossz, vagy ha tetszik, mindegyik ugyanolyan jó. A kétmódusú pulzáció jobb megértésének útja tehát kétséget kizáróan a többdimenziós hidro-



3.13. ábra. Kétmódusú cefeidák lehetséges helye a $\text{Log } M - \text{Log } L$ diagramon a fémtartalom függvényében, lineáris modellek alapján. Az alapmódusú periódusokat és periódusarányokat ($P_0, P_1/P_0$) a bal felső sarokban tüntettem fel. Az egymást követő fémtartalomértékek (Z) 0,001-es osztással követik egymást. A közel függőleges vonalak a Pietrinferni és mtsai (2006) munkája alapján kapott $M-L$ -relációkat mutatják balról jobbra a következő Z értékekre: 0,001, 0,004, 0,008, 0,019 és 0,027 (Buchler és Szabó, 2007).

dinamikai pulzációs kódok további térnyerésétől remélhető.

A kétmódusú cefeidák fémtartalom-meghatározását célzó munkámban kizárólag lineáris modelleket használtam, ezért tehát ez a vita semmilyen mértékben nem befolyásolja az itt ismertetett eredményeket. Az egyetlen kivétel ez alól a 3.12 ábra, de mint ahogy említettem, a kétmódusú tartományok topológiája kísértetiesen hasonlít a megfigyelésekhez, így ez mindenképpen jobb egyezésnek tekinthető (ezáltal a szükséges erős disszipációt turbulens konvekcióval magyarázó, általunk és a többdimenziós hidrokódok által favorizált elmélet fizikailag megalapozottabb), mint ha csak véletlen egybeesésről lenne szó.

3.2.3. A kétmódusú cefeidák fémtartalmának meghatározása

Ahhoz, hogy modelljeim alapján behatároljam a kétmódusú régiókat, felhasználhattam a két megfigyelhető periódust $P_0(L, M, T_{\text{eff}}, X, Z)$, $P_1(L, M, T_{\text{eff}}, X, Z)$ és az effektív hőmérsékletet. Ez az eljárás adott kémiai összetételre egy egyparaméteres sokaságot ad, T_{eff} kontrollparaméterrel. Lineáris modelleket számolva tovább szűkíthettem a paraméterteret azokra a tartományokra, ahol mind az alapmódus, mind az első felhang instabil. Ez minden Z -re meghatározza a lineáris kétmódusú régiók helyét a tömeg-luminozitás diagramon. Ezt illusztrálандó a 3.13 ábrán hat hipotetikus kétmódusú cefeida kémiai összetételtől függő helye látható. Az ábrák bal sarkában megtalálhatók a periódus és periódusarány-értékek. Minden P_0 és P_{10} értékhez egy T_{eff} -sorozat (görbeszakasz) tartozik, az azonos színű görbesereg pedig a nehézelem-tartalom (Z) változtatásával áll elő. A bal oldalon a felső két görbeseregnél 0,003 és 0,017 között változik

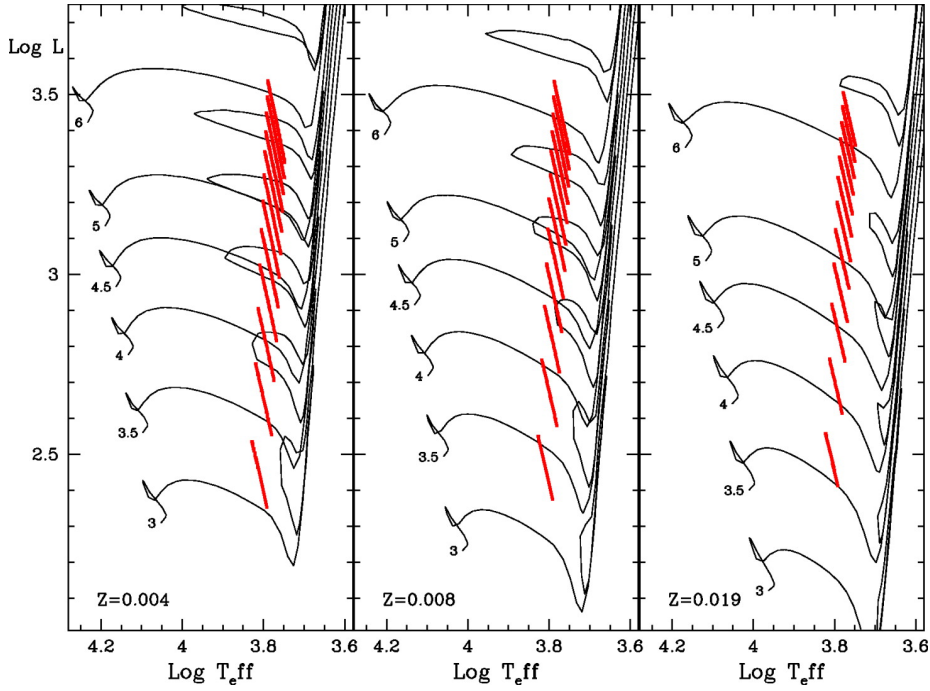
a fémtartalom, a többinél 0,001 és 0,020 közötti értékeket találunk.

Az ábrán Pietrinferni és mtsai (2006) munkájából származó $M-L$ -relációkat is feltüntettem, balról jobbra a $Z = 0,001, 0,004, 0,008, 0,019$, és $0,027$ értékekre. Az elfogadható kétmódusú modellek azok, amelyekhez tartozó Z -görbék metszik a megfelelő fémességhez tartozó tömeg-luminozitás összefüggést. Ahogy az ábrákból is látszik, a Z növelésével a görbék jobbra felfelé mozognak a diagramon, először lassan, majd egyre gyorsabban, ahogy áthaladnak az $M-L$ -vonalakon, végül ismét lelassulva, hogy végül megérkezzenek a bal felső sarokba. Ez a viselkedés teszi lehetővé a módszert alkalmazását, és a szóba jövő fémtartalom-értékek leszűkítését. Fontos megemlíteni, hogy az eljárás csak a megfigyelt periódusértékeket használja, de felhasználja a pulzációs modelleket is (bár azok lineáris volta miatt a módszer nem függ jelentősen azok részleteitől). A csillagfejlődés az $M-L$ -relációkon keresztül szól bele a fémességmeghatározásba.

Az ismertetett eljárás elég számításigényes, hiszen több Z -értékre is ki kell számolni a modellsorozatot csillagonként. Ezért a következő, módosított eljárást a gyakorlatban jobban használhatónak találtam: Petersen-diagramot konstruálunk ($P_{10}, P_0; Z$), ahol kiszámítjuk a lehetséges lineáris kétmódusú tartományokat. Egy adott kétmódusú csillag (P_{10} és P_0) esetén ez a módszer könnyen használható alsó és felső határokat ad a fémességre. A Petersen-diagramhoz először rögzítjük az alaplómódushoz tartozó periódust ($P_0(L, M, T_{\text{eff}}, Z)$) és az $M-L$ -relációt ($L = L(M, Z)$). Ezzel a két feltétellel egy adott Z értékre modellsorozatot számolhatunk (T_{eff} -et változtatva), ami különböző periódusarányokat ($P_{10}(M, L, T_{\text{eff}}, Z)$) fog eredményezni. Ezek közül azokat a modelleket tartjuk meg, ahol mind az F, mind az O1 módus lineárisan instabil. A P_0 értékeket 0,75 és 6,5 nap között, a fémtartalmat 0,001 és 0,026 között, $\Delta Z = 0,001$ lépésközzel változtattam.

A Hertzsprung–Russell-diagramon a cefeidák egy jól meghatározott, majdnem függőleges tartományban, a klasszikus instabilitási sávban találhatók. A 3.14 ábrán a kétmódusú, lineárisan instabil modelleket jelöltem pirossal, néhány fémtartalom esetére ($Z = 0,004, 0,008$ és $0,019$). A T_{eff} változtatásával kapott sorozatok nem vízszintesek, mert rögzített P_0 és P_{10} értékek mentén számoltam. Megjegyezzük, hogy a teljes instabilitási tartomány sokkal szélesebb T_{eff} -ben, hiszen jobbra és balra magában foglalja azokat a tartományokat, ahol csak az F vagy csak az O1 módus instabil. Említettem, hogy a lehetséges lineáris kétmódusú tartományok részhalmozán valósul meg ténylegesen kétmódusú pulzáció, aminek részben az az oka, hogy a lineáris feltétel szükséges, de nem elégséges, másrészt viszont – ahogy az az ábrán is látszik – a fejlődési utak nem mindenhol metszik a lehetséges tartományokat, vagyis a csillagfejlődés kizár bizonyos paramétertartományokat. Az ábrán a Girardi és mtsai (2000) csillagfejlődési görbéin alapuló $M-L$ -relációt használtam.

A 3.14 ábrán Girardi és mtsai (2000) csillagfejlődési görbéit is ábrázoltam $Z = 0,004, 0,008$ és $0,019$ fémességekre. Az irodalomban elérhető számos fejlődési modell közül azért esett a választás, mert a vizsgálatban szereplő teljes tömeg- és Z -tartományt lefedi. Ezenkívül a Girardi-féle fejlődési modellek mentén számolt pulzációs modellek jó egyezésben vannak az OGLE-adatokból a Kis- és Nagy-Magellán-felhők cefeidáira adódó rezonanciafeltételekkel



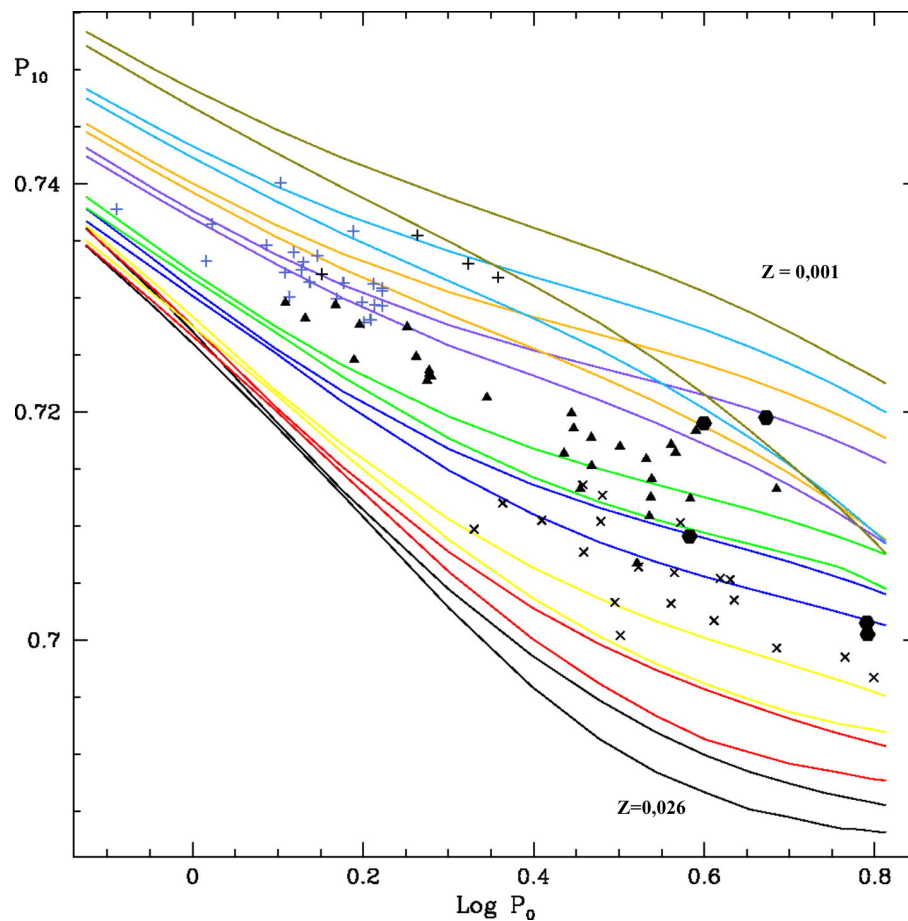
3.14. ábra. Lineáris cefeidamodellek, amelyek mind alpmódusban, mind első felhangban instabilnak bizonyultak (piros vonalak). A vonalak állandó periódusokhoz tartoznak 1,0-tól 6,5 napig, fél napos lépésközzel. Az ábrán Girardi és mtsai (2000) három különböző fémtartalomhoz ($Z = 0,004, 0,008$ és $0,019$) tartozó fejlődési görbéit is feltüntettem. A fejlődési utak melletti számértékek a modellcsillagok tömegét jelzik (Buchler és Szabó, 2007).

(Buchler és mtsai 2004).

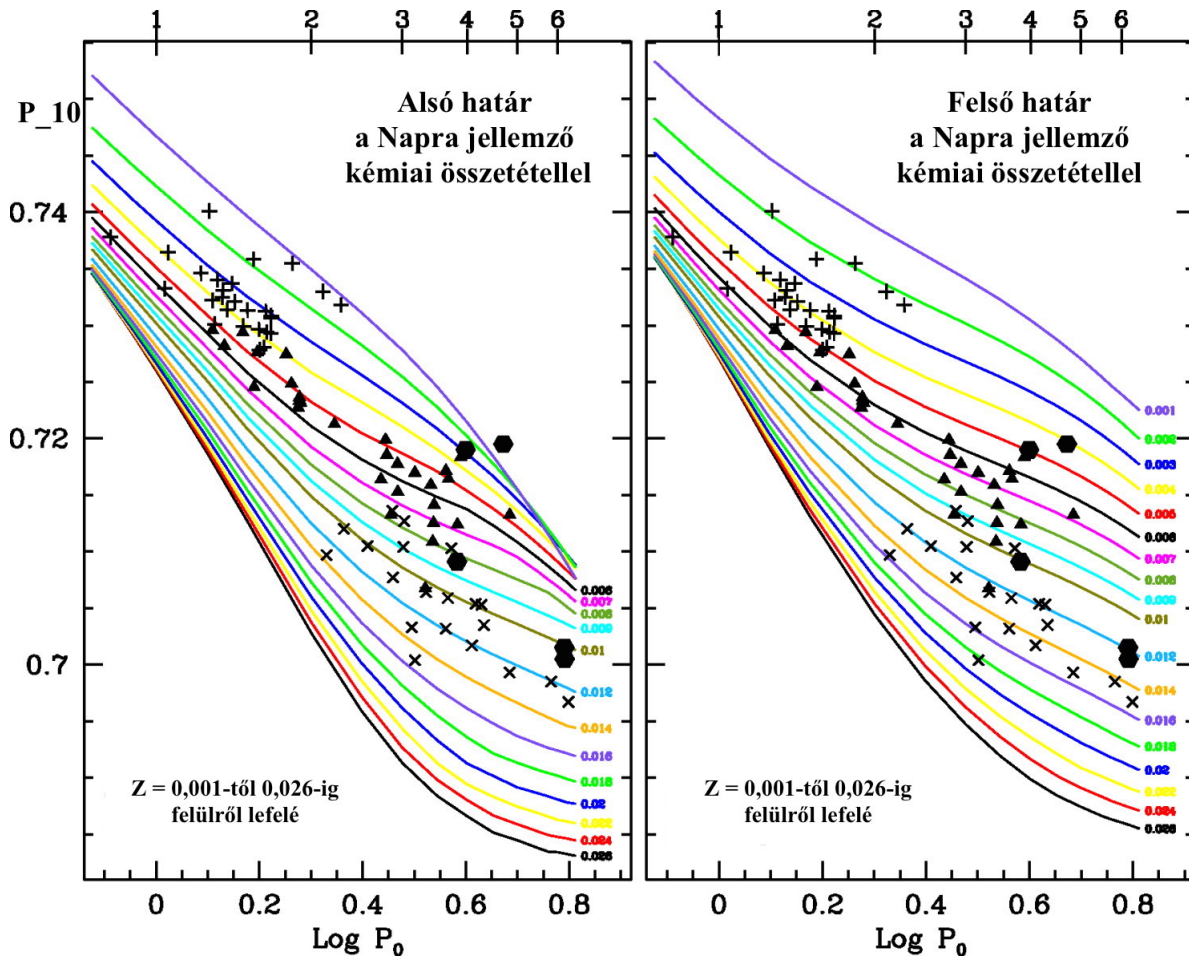
A felmérés fő eredményeit a 3.15 ábrán láthatjuk. Az azonos Z -értékekhez tartozó vonalak azokat a P_{10} -intervallumokat mutatják, ahol mind az F, mind az O1 módus lineárisan instabil. A fémtartalom lefelé nő, az alábbiak szerint: $Z = 0,001, 0,002, 0,003, 0,004, 0,008, 0,010, 0,016, 0,020, 0,026$. A zsúfoltság elkerülése végett a 3.16 ábrát két panelra osztva mutatom a periódusarányok alsó és felső határait, ami sokkal finomabb beosztást tesz lehetővé Z -ben. A fémtartalom $Z = 0,001$ -től $0,010$ -ig $0,001$ -es lépésekben lefelé növekszik, majd $Z = 0,010$ -től $0,026$ -ig $0,002$ -es lépésközzre vált. Referenciaként a galaktikus (keresztek), M33-beli (Beaulieu és mtsai 2006; hatszögek), LMC-hez (Alcock és mtsai 1995; Soszyński és mtsai 2000, háromszögek) és az SMC-hez tartozó kétmódusú cefeidákat (Beaulieu és mtsai, 1997; Udalski és mtsai 1999; plusz jelek) is feltüntettem.

Miután a 3.15 és 3.16 ábrák alapján meghatároztuk azt a fémtartalom-intervallumot, ahová a $(\log P_0, P_{10})$ koordinátákkal adott, megfigyelt csillagunk esik, kapjuk a $Z_{\min}$ és $Z_{\max}$ értékeket. A gyakorlatban interpolációval pontosíthatjuk a kapott $Z_{\min}$ és $Z_{\max}$ értékeket. Példaként tekintsük a legalacsonyabb P_{10} periódusaránnal szereplő M33-beli kétmódusú cefeidát (hatszöggel jelölve). A 3.16 ábra bal oldalán csillagunkat $Z = 0,010$ és $0,011$ vonalak, míg a jobb oldalon a $0,012 < Z < 0,013$ értékek között találjuk. Egyszerű interpoláció $0,0106 < Z < 0,0124$ értékeket ad, átlagként $Z = 0,0115$ -et kapunk.

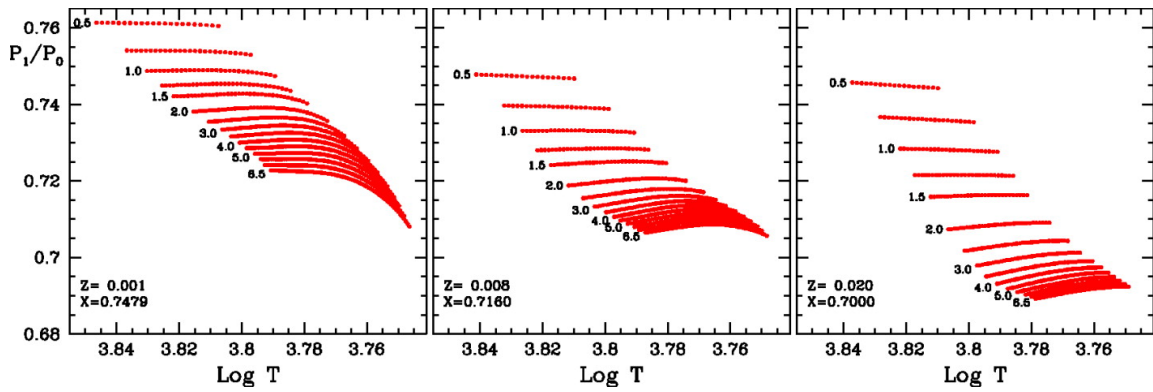
Az ismertetett módszerrel galaktikus kétmódusú F/O1 cefeidákra $Z = 0,0074 - 0,0182$ fémtartalmat kapunk, átlagértékben $Z = 0,0118$, ami egy kicsit alacsonynak tűnik, de a Magel-



3.15. ábra. $P_1/P_0 - \text{Log } P_0$ diagram. A különböző fémtartalomhoz tartozó vonalpárok azokat a tartományokat fogják közre, ahol mind az F, mind az O1 módusok lineárisan instabilak. A fémtartalom lefelé növekszik az alábbiak szerint: $Z = 0,001, 0,002, 0,003, 0,004, 0,008, 0,010, 0,016, 0,020, 0,026$. Az ábrán ismert kétmódusú cefeidákat is feltüntettem (Buchler és Szabó, 2007).



3.16. ábra. $\log P_0 - P_1/P_0$ (A felső vízszintes tengelyen P_0 értékeit jeleztem, napokban). A különböző fémtartalomhoz tartozó vonalpárok azokat a tartományokat fogják közre, ahol mind az F, mind az O1 módusok lineárisan instabilak (alsó határ: bal panel, felső határ: jobb panel). A fémtartalom lefelé csökken az ábrákon: $Z = 0,001$ -től (legfelső vonal) $0,010$ -ig $0,001$ -es lépésközzel, utána $0,010$ -től $0,026$ -ig (legalsó vonal) $0,002$ -es lépésközzel. Az ábrán ismert két-módusú cefeidákat is feltüntettem (Buchler és Szabó, 2007).



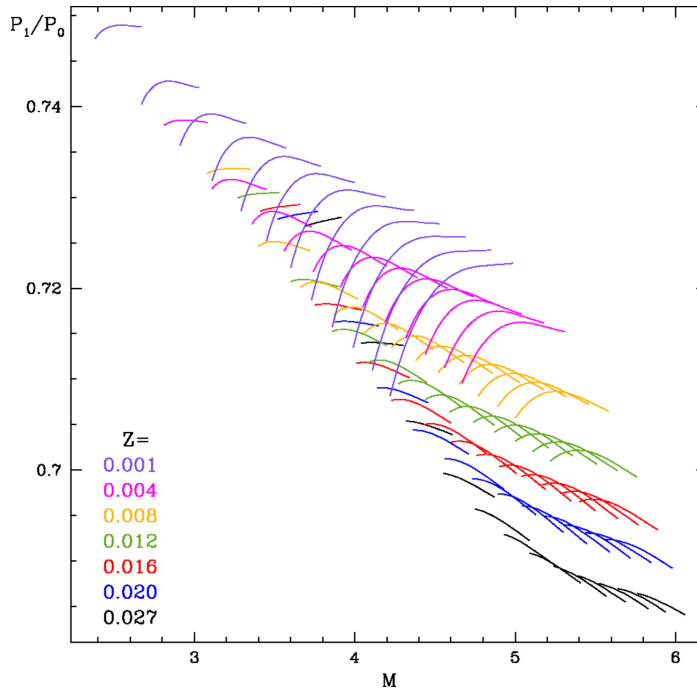
3.17. ábra. Periódusarány az effektív hőmérséklet függvényében három fémtartalom esetén, olyan modellekre, melyek mind az F, mind az O1 módusokra nézve instabilak. A vonalak állandó periódust jelentenek, melyek 0,5 és 6,5 nap között változnak (Buchler és Szabó, 2007).

lán-felhőkre és az M33-ra kapott értékek az általánosan elfogadott intervallumba esnek: 0,001 — 0,007, $Z_{\text{atl}} = 0,0037$ átlaggal az SMC-re; 0,0035 — 0,012, $Z_{\text{atl}} = 0,0062$ az LMC-re; és 0,0075 — 0,0124, $Z_{\text{atl}} = 0,0075$ az M33-ra.

A 3.15 ábra bal felső sarkában a különböző Z értékekhez tartozó görbék nem fednek át, ami azt jelenti, hogy a Petersen-diagramon elfoglalt pozíció nagyon keskeny Z -tartományt enged meg adott P_0 -ra és P_{10} -ra. Ezzel szemben a jobb felső sarokban a megengedett Z tartomány valamivel szélesebb, de még így is $\pm 0,001$ -re szűkíti le a fémtartalom lehetséges értékeit. Általában véve, a diagramon lefelé haladva is egyre kevesebb az átfedés a görbék között.

A 3.16 ábra nem ad információt arról, hogy a hőmérséklet és a tömeg hogyan változik az alsó és felső határok között, mondjuk rögzített P_0 -ra. Ezért a 3.17 ábrán a P_{10} periódusarány viselkedését ábrázoltam a T_{eff} függvényében. Minden sorozatot rögzített P_0 -ra számoltam. Azt vehetjük észre, hogy magas fémtartalom esetén (jobb oldali panel) a maximális P_{10} értékek magasabb hőmérsékleteknél vannak a rövidebb periódusú modellekre, hosszú periódusúakra pedig ennek az ellentéte igaz. Alacsony Z esetén pedig (bal oldali panel) P_{10} nem is monoton módon változik T_{eff} függvényében. Látható tehát, hogy a 3.15 ábrán T_{eff} viselkedése a két határ között (függőlegesen, rögzített P_0 -nál) lehet növekvő, csökkenő, sőt akár nemmonoton módon is változhat. A 3.18 ábra bal oldali panelje hasonló nemmonoton viselkedést mutat P_{10} -ra nézve, ezúttal a tömeg függvényében.

Érdemes összefoglalni, hogy a pusztán megfigyelt periódusokra alapuló módszerünk miért is működik ilyen hatékonyan és pontosan. Először is a cefeidák nagyjából vízszintes fejlődési utakat járnak be a HRD-n, így $L = L(M, Z)$ formában M - L -relációkat tételezhetünk fel. Másodszer, a kétmódusú cefeidák nagyon keskeny sávot foglalnak el a cefeidák instabilitási sávján belül (Kolláth és mtsai 1998, 2002). Így adott tömeg és fémtartalom esetén az effektív hőmérséklet rendkívül szűk sávra korlátozódik: $T_{\text{eff}} \approx T_{\text{eff}}(M, L, Z)$. Ez a két megszorítás, illetve a nagy pontossággal megfigyelhető két periódus összességében teljesen meghatározza a négy paraméterrel (L, M, T_{eff}, Z) jellemezhető cefeida állapotban található csillagot. Összehasonlításképpen: az RR Lyrae csillagokra, ahol nem áll fenn szoros M - L -reláció, sőt a horizontális ágról elfejlődött RR Lyrae csillagoknak jelentősen megnőhet a luminozitása, a fémtartalom és



3.18. ábra. Lineáris modellekből származó kétmódusú cefeidák periódusaránya P_{10} a tömeg függvényében, különböző fémtartalommal. A periódusok 1,0-től 6,5-ig változnak, mégpedig úgy, hogy a nagyobb tömeg hosszabb periódust jelent (Buchler és Szabó, 2007).

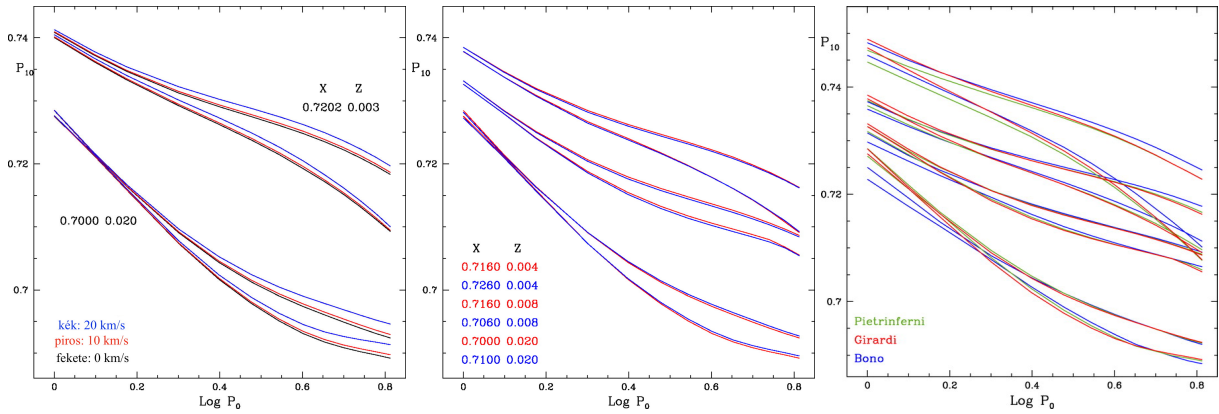
a tömeg közötti degeneráció megnehezíti a módszer alkalmazását (Popielski és mtsai, 2000; Kovács, 2001).

A kétmódusú cefeidák fémtartalmának meghatározását befolyásoló tényezők

A következőkben azt vizsgálom, hogy milyen fizikai tényezők befolyásolják a fémtartalom meghatározását. A nemlineáris modellek jelentőségét már említettem, itt most a héliumtartalom (Y), a tömeg-luminozitás összefüggések, a kémiai összetétel, a modellek pontos felépítésének és a csillag forgásának hatására térek ki röviden.

Suárez és mtsai (2006) kimutatták, hogy a δ Scuti csillagok forgása jelentős mértékben befolyásolja ezen csillagok radiális módusainak $P_{10} = P_1/P_0$ arányát, így ezt is figyelembe kell venni, ha a Petersen-diagramot fémtartalom-meghatározás céljára kívánjuk használni. A cefeidák fáziskésésénél alkalmazott módszerrel kimutattam, hogy ezzel ellentétben, esetünkben a cefeida csillagok forgására 20 km/s-ig gyakorlatilag nem érzékeny a módszer (3.19 ábra, bal oldali panel). Nardetto és mtsai (2006), valamint Sziládi és mtsai (2007) megfigyelései megerősítik, hogy a cefeidák és azon belül a kétmódusúak lassan forognak. Megjegyzendő még, hogy az alkalmazott módszer a héliumtartalomra is igen kevésbé érzékeny (3.19 ábra, középső panel).

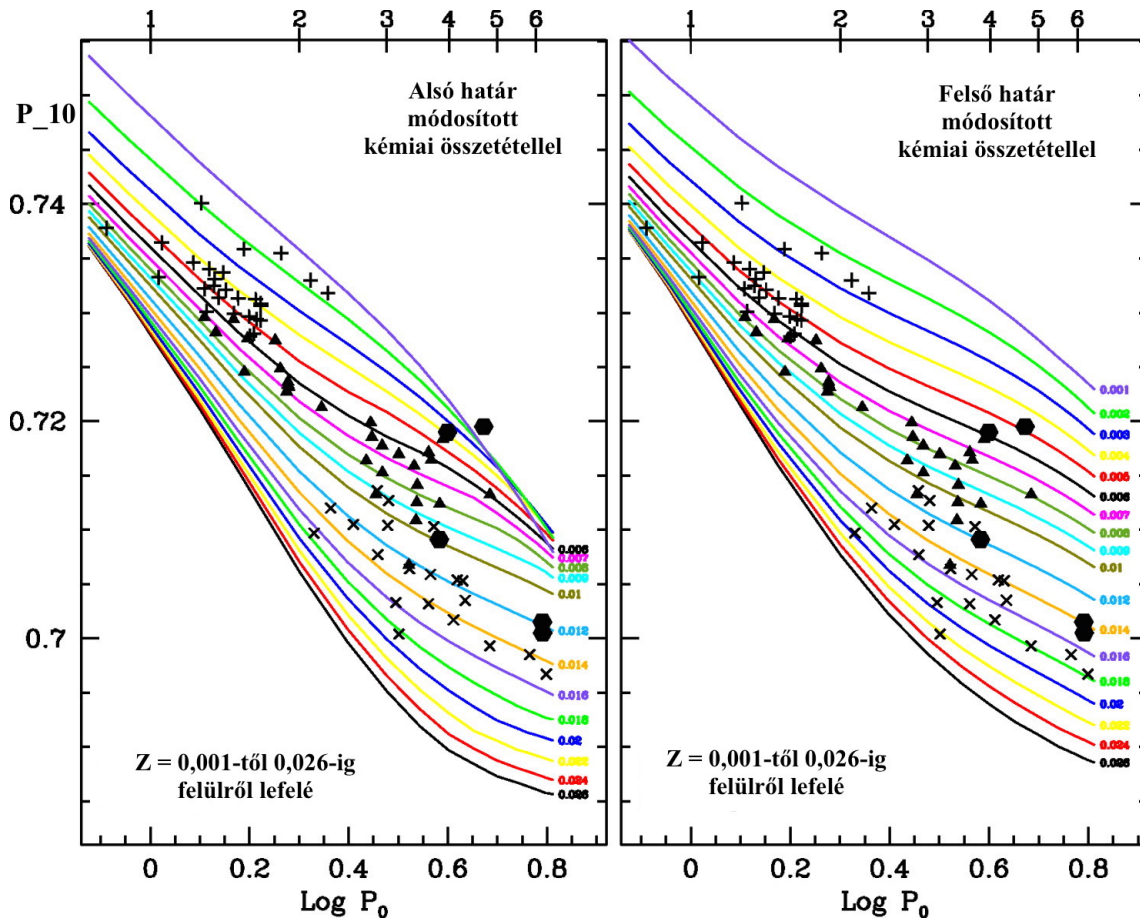
Adott tömegű cefeidák fejlődésük során akár háromszor is átmehetnek az instabilitási sávon, ahogy az látszik is pl. a 3.14 ábrán. Az első áthaladás nagyon gyors (Kelvin–Helmholtz-időskálán történik), és statisztikusan nagyon kevés csillagot láthatunk ebben az állapotában. A legtöbb cefeidát a kék irányba (balra) tartó lassú fejlődési útján várjuk (ami a magbéli hélium-



3.19. ábra. Különböző fizikai folyamatok hatása a $P_1/P_0 - \text{Log } P_0$ diagramra. A vonalpárok azokat a tartományokat határolják, ahol a lineáris modellek alapján mind az F, mind O1 módusokra nézve instabil modelleket kapunk. **Balra:** a csillag forgásának hatása. A görbék $v_{\text{rot}} = 0, 10$ és 20 km/s forgási sebességet jelölnek. A forgás hatását a közelítő számítás minden valószínűség szerint túlbecsli. **Középen:** A héliumtartalom $Y (=1-X-Z)$ változtatásának hatása rögzített Z esetén. **Jobbra:** különböző fejlődési görbékre alapozott $M-L$ -relációk hatása: Bono és mtsai (2000) – kék, Pietrinferni és mtsai (2006) – zöld, Girardi és mtsai (2000) – piros. Az ábrázolt fémességek felülről lefelé: $Z = 0,001, 0,004, 0,008$, és $0,020$. (Buchler és Szabó, 2007).

égés beindulásával függ össze), és valamivel kevesebbet az ellentétes irányba tartó fejlődés közben. A 3.14 ábrán látható csillagfejlődési görbék rámutatnak egy súlyos problémára, amit itt csak röviden említek: nevezetesen, hogy a magasabb hőmérsékletek felé kinyúló kék hurkok (blue loop-ok) egyre kisebbek lesznek a fémtartalom növekedésével, és mire elérnénk a Galaxisra jellemző Z -értéket, gyakorlatilag nem is metszik a lineáris kétmódusú tartományunkat, ami nyilvánvalóan ellentmond a megfigyeléseknek. Ez egyébként minden korábban publikált cefeidafejlődési számításra igaz, nem csak az általam használt Girardi és mtsai (2000) munka sajátja. Cordier (2000) jó áttekintést ad a fejlődési görbék cefeidákat érintő problémáiról. Az egyik javasolt megoldás a módosított, a Napétól eltérő C,N,O-gyakoriság lehet (Cordier és mtsai, 2002).

Ezekről a problémáktól eltekintve az $M-L$ -reláció használata maga is csak egy közelítés, hiszen csak az instabilitási sávon történő második áthaladásra szorítkozunk, és a fejlődési görbék sem teljesen vízszintesek a $L - T_{\text{eff}}$ síkon. Mindezek szerencsére kevésbé befolyásolják a kétmódusú cefeidákra alapozott fémtartalom-meghatározás eredményeit, mert ez csak kevésbé függ a választott $M-L$ -relációtól. Ez jól látható 3.19 ábra jobb oldai paneljén, ahol a Bono és mtsai (2000), Pietrinferni és mtsai (2006), illetve Girardi és mtsai (2000) által publikált fejlődési modellekből $\log M$ -ben és $\log Z$ -ben bikvadratikus illesztéssel kapott $M-L$ -relációk közötti különbségeket ábrázoltam a Petersen-diagramon. Cordier és mtsai (2002) azt találták, hogy a fejlődési modellek jobb egyezést mutatnak a megfigyelésekkel, ha konvektív túllövést (overshooting) alkalmaznak, és különösen igaz ez a cefeidák tekintetében. Míg a Girardi és mtsai (2000), és a Pietrinferni és mtsai (2006) csillagfejlődési számításai tartalmaznak konvektív túllövést, addig Bono és mtsai (2000) görbéi nem. Ahogy a 3.1. fejezetben tárgyaltam, a Bono-féle előírás alapján magasabb tömegek lennének szükségesek ugyanannak a pulzációs periódus-



3.20. ábra. Az elemgyakoriság változtatásának hatása a $P_1/P_0 - \text{Log } P_0$ diagramra. Ezekben a modellekben negyedével csökkentettem a nehezebb elemek arányát, ami nagyobb periódusarányt indukál. Érdekes összehasonlítani a 3.16 ábrával (Buchler és Szabó, 2007).

nak az eléréséhez, mint a másik két esetben. A 3.19 ábrán az $M-L$ -relációk okozta különbségek ellenére – legkisebb tömegek kivételével – a fémtartalom-meghatározáshoz használt tartományok meglepően közel esnek egymáshoz, ami megnyugtató a módszer alkalmazhatóságának szempontjából.

Eddig OPAL opacitásokat (Iglesias és Rogers, 1996) és Grevesse és Noels (1993) sztenderd, a Napra jellemző kémiai elemösszetételét használtam (3.16 ábra). Felmerülhet a kérdés, hogy a Petersen-diagramon elfoglalt pozíció a teljes Z -től függ-e, vagy a nehezebb elemek, pl. a Fe-csoport tagjainak relatív hozzájárulásától, hiszen ezek járuléka a döntő az opacitásban. Ennek tesztelésére a 3.20 ábrán a domináns nehéz elemek (Fe, Ca, Ar, S, Si, és Mg) relatív számsűrűségét önkényesen 25 %-kal csökkentettem, miközben X , Y , és Z rögzítettek voltak. Ez közvetlenül összehasonlítható a 3.16 ábra eredményeivel. Első közelítésben csak egy kis eltolás látszik, azonban a vonalak enyhén deformálódnak is, pl. az eredeti $Z = 0,022$ vonal a $Z = 0,026$ -nak felel meg a 3.20 ábrán, míg a $Z = 0,005$ vonal a 0,006-os értékhez van közel.

A módosított kémiai összetétellel a galaktikus kétmódusú cefeidák esetében $Z = 0,0089 - 0,0221$ fémtartalomértékeket kapunk, $\bar{Z} = 0,0141$ átlaggal, ami közelebb van az elfogadott értékhez, mint a sztenderd kémiai összetétellel kapott 0,0118, de még mindig kicsit alacsony.

A Kis-Magellán-felhőre $Z = 0,0015 - 0,0100$ értékek adódnak (átlag: 0,0047), míg a Nagy-Magellán-felhő esetén a számok 0,0047 – 0,0148 között alakulnak (átlag: 0,0076). Az M33-ra $Z = 0,0013 - 0,0146$ intervallumot kapunk, $\bar{Z} = 0,009$ átlaggal. Ezek az eredmények arra mutatnak, hogy a módosított kémiai összetétel jobban egyezik az irodalomban elérhető fémtartalommérésekkel, mint a sztenderd, Napra elfogadott értékek. Az elemgyakoriság tehát nem elhanyagolható módon befolyásolja a Petersen-diagramon elfoglalt pozíciót. Különösen igaz ez a rövid periódusú kétmódusú pulzátorok esetében. A vascsoport elemeinek csökkentése konstans Z -t feltételezve első közelítésben olyan hatást eredményez a Petersen-diagramon, mintha magát a Z -t csökkentettük volna. Ezt várjuk is, hiszen a periódusarány elsősorban az opacitásra érzékeny, amit a vascsoport elemeinek dominanciája jellemez.

Buchler (2008) később tovább vizsgálta ezt a kérdést. A Napra jellemző kémiai összetételt Asplund és mtsai (2005, AGS) jelentős mértékben revideálták. A legfontosabb változás a 11-nél kisebb rendszámú elemek járulékanak csökkenése a nehezebb elemek javára. Ez utóbbiak közül a vasnak van a legnagyobb hatása az opacitásra. Buchler (2008) ennek a változtatásnak a hatását elemezte a Petersen-diagramra, a kétmódusú cefeidák fémtartalom mérésre történő használatának szemszögéből. Az új kémiai elemösszetétel kisebb fémtartalmakat jelez ugyanarra a csillagra, különösen igaz ez a rövid periódusokra. Ez azonban várható is, hiszen az AGS-összetétel a Napra is kisebb fémtartalmat határoz meg: $Z_{\odot} = 0,0122$, míg korábban 0,020 volt a kanonikus érték.

Buchler (2008) vizsgálatából az is kiderült, hogy a legmagasabb fémtartalomra és a legrövidebb periódusokra a periódusarányok érzékenyek a modellben arra, hogy hol és milyen hőmérsékletnél választjuk meg a pulzáló atmoszféra határát, ahonnan a pulzációt már elhanyagoljuk a csillag belseje felé. Ez azonban a Magellán-felhők esetében és a későbbi alkalmazásoknál esetünkben nem okozott bizonytalanságot, kivéve a Kis-Magellán-felhő legrövidebb periódusú ($P_0 < 1,0$ nap) cefeidáinál.

3.2.4. A módszer alkalmazásai

Ebben a fejezetben a módszer közvetlen felhasználására térek ki, melyet a Lokális Csoport galaxisaiban található cefeidákra alkalmaztak független kutatócsoportok, illetve a Magellán-felhők esetében az EROS-csoporttal együttműködve én magam is. Emellett azonban a vizsgálatok fontos érvet szolgáltatottak a Nap kémiai elemrevíziójának kérdésében (Basu és Antia, 2008), számításaim hasznosnak bizonyultak felhangban pulzáló cefeidák vizsgálatában (Luck és mtsai, 2008), a V371 Persei, rövid periódusú kétmódusú, a Galaxis vastag korongjához tartozó cefeida fémtartalmának, tömegének és fejlődési állapotának meghatározásában (Wils és mtsai, 2010; Schmidt, 2011), valamint a CoRoT 0223989566 hárommódusú galaktikus cefeida pulzációs tulajdonságainak értelmezésében is (Poretti és mtsai, 2014). Megemlítjük, hogy Pietrukowicz és mtsai (2013, 11. ábra) az itt bemutatotthoz hasonló, és azon alapuló módszert fejlesztettek ki és alkalmaztak galaktikus δ Scuti csillagokra.

A Magellán-felhők kétmódusú cefeidái az EROS égboltfelmérő program alapján

A '90-es években több mikrolencse-program indult, melyek célja az volt, hogy a sötét anyagot masszív halóobjektumok (azaz fekete lyuk, neutroncsillag, fehér törpe) formájában keressék. Bár a kutatásokból az derült ki, hogy ilyen formában a sötét anyag elenyésző része fordulhat elő, ezen égboltfelmérő programok hatása a csillagfizikai kutatásokra szinte felbecsülhetetlen. Homogén módon, rendszeresen fotózva a galaktikus dudor (bulge), a Kis- és Nagy-Magellán-felhők területeit, hatalmas mennyiségű változócsillagról, többek között cefeidákról jutottunk korábban elérhetetlennek gondolt fotometriai információhoz. A több ezer cefeida közül 2009-ig az EROS⁹ (Beaulieu és mtsai, 1997) egy kétmódusú cefeidát talált az LMC-ben és 11-et az SMC-ben, a MACHO¹⁰ (Alcock és mtsai, 1995, 1999) 45-öt az LMC-ben, az OGLE¹¹ (Udalski és mtsai, 1999; Soszyński és mtsai, 2000) 93-at az SMC-ben és 76-ot az LMC-ben.

Az itt felhasznált EROS-2 kampány 1996 júliusától 2003 márciusáig tartott, egy 1 méteres távcsövet működtetett Chilében, és két széles sávú hullámhossztartományban észlelt (az egyszerűség kedvéért: kékben és vörösben). A mérések tipikusan 800–1000 adatpontot eredményeztek minden csillag esetében. A kétmódusú cefeidákat mintegy 80000 változócsillag halmazából kellett kiválogatni, amihez a leggyakrabban alkalmazott Fourier-felbontásos technikát alkalmaztuk. Miután a legnagyobb amplitúdójú jelet és harmonikusait levontuk, a további periodicitást tartalmazó kétmódusú csillagok könnyen kereshetőkké váltak. Ily módon az LMC-ben 74 F/O1 és 173 O1/O2, míg az SMC-ben 41 F/O1 és 129 O1/O2 kétmódusú cefeidát fedeztünk fel. Ezek közül 185 új felfedezés. Ez azt jelenti, hogy az EROS 2009-ben az LMC-ben 31%-kal, az SMC-ben 110%-kal növelte az ismert kétmódusú cefeidák számát (Marquette és mtsai, 2009).

A felfedezések üteme a Marquette és mtsai (2009) munka óta sem csökkent: ma majdnem 700 kétmódusú cefeidát ismerünk, a legutóbbi növekményt főleg az OGLE-nek köszönhetjük (Soszyński és mtsai, 2008). A legnagyobb ismert populációt az LMC-ben találjuk: 90 F/O1, 256 O1/O2 és 2 O1/O3 beat cefeida, ezt követi az SMC (Soszyński és mtsai, 2010) 59 F/O1 és 215 O1/O2 csillaggal. Összehasonlításképpen: saját Galaxisunkban mindössze 24 F/O1 és 19 O1/O2 kétmódusú cefeida ismert (Moskalik, 2013, 2014).

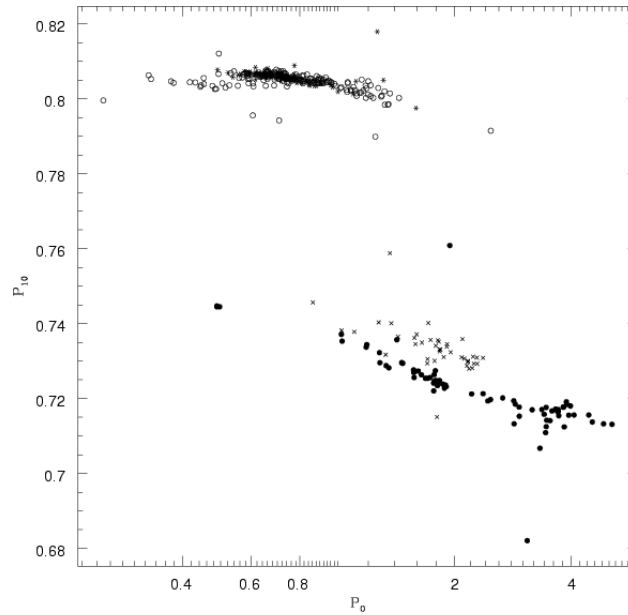
A Magellán-felhők kétmódusú EROS-cefeidáinak fémtartalma

Az általunk felfedezett kétmódusú cefeidákkal rögtön adódott a lehetőség, hogy fémtartalom-meghatározásra használjuk őket. Ez annál is inkább fontos, mivel a Magellán-felhők fémtartalom-eloszlása és annak kialakulása finoman fogalmazva is ellentmondásos és sok kérdőjellel terhelt (Idiart és mtsai, 2007). A tisztán látást nehezíti, hogy a Magellán-felhők fémtartalmára nagyon különböző értékeket kapunk, attól függően, hogy milyen korú és elhelyezkedésű objektumokat használunk (pl. Carrera és mtsai (2007, 2008) vörös óriásokat, Leisy & Dennefeld (2006) planetáris ködöket vizsgálva határozta meg ezen objektumok nehézelem-tartalmát). Az

⁹Expérience pour la Recherche d'Objets Sombres

¹⁰Massive Astrophysical Compact Halo Object

¹¹Optical Gravitational Lensing Experiment

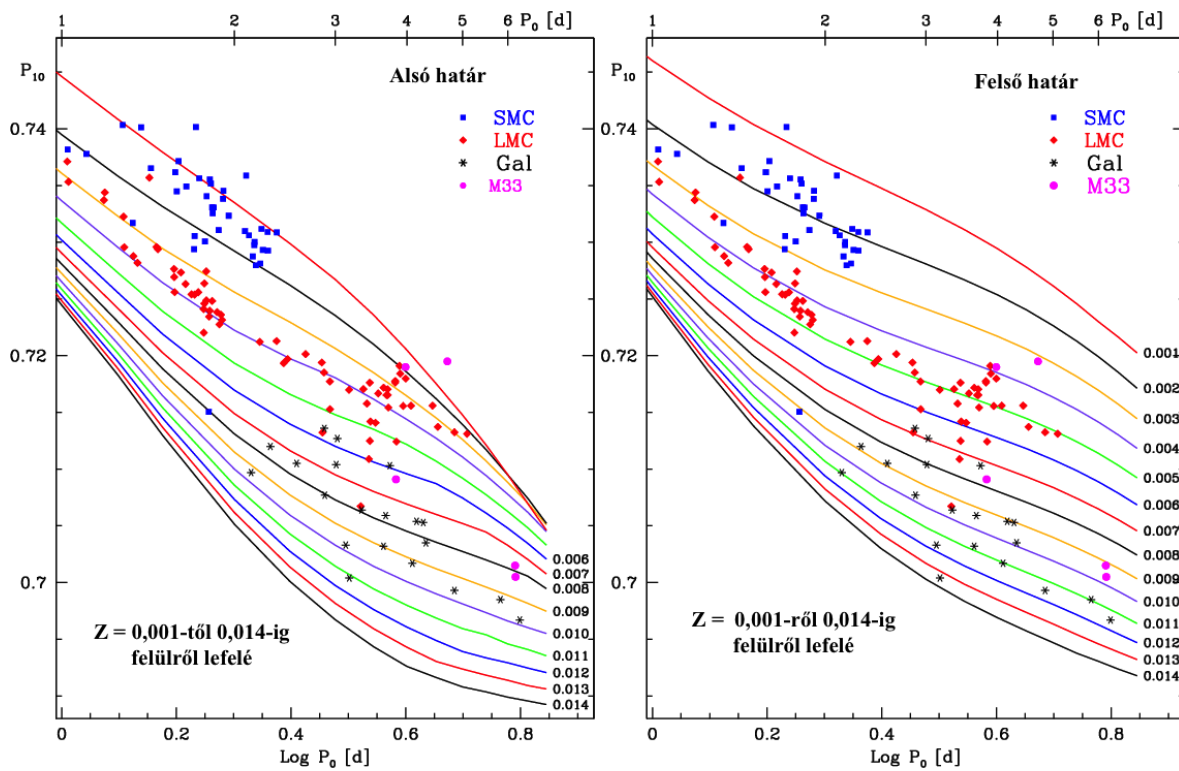


3.21. ábra. Az EROS-2 kétmódusú cefeidáinak Petersen-diagramja. Alul F/O1 csillagok, teli körök: LMC, keresztek: SMC, felül O1/O2 cefeidák, üres körökkel az LMC-, míg csillagokkal az SMC-beli objektumokat jelöltem (Marquette és mtsai, 2009).

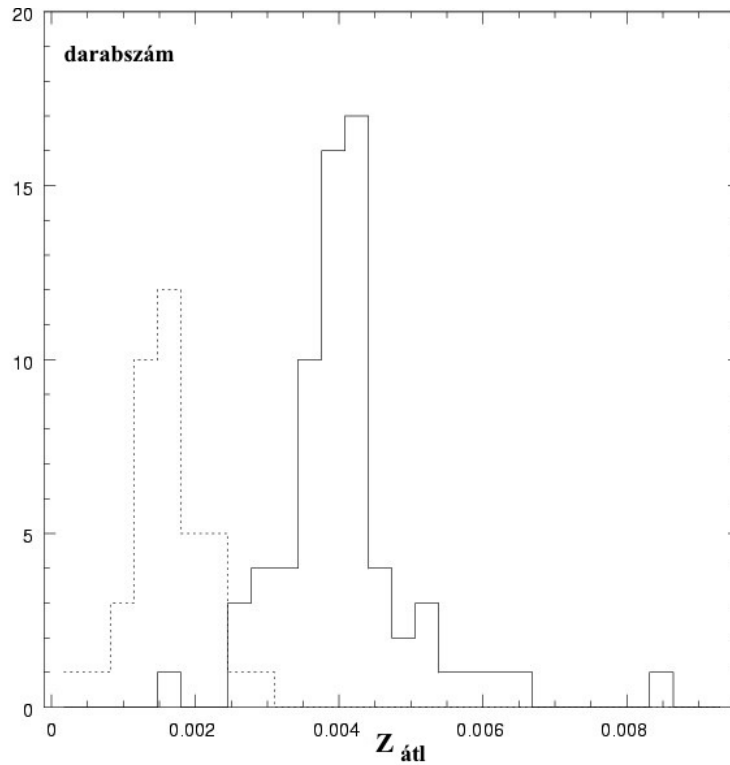
egyik lehetőség, hogy általános fémtartalom helyett az egyedi elemek eloszlását, feldúsulását vizsgáljuk nagyfelbontású spektroszkópiával (Pompéia és mtsai, 2008), a másik lehetőség, hogy kihasználjuk a beat cefeidák nyújtotta független fémtartalom-meghatározási lehetőséget. Itt ez utóbbi utat mutatom be eredményeink alapján.

Az általunk felfedezett kétmódusú cefeidák térbeli eloszlása jól követi a normál cefeidákét mindkét kísérőgalaxisunkban. A periódusarányokat a 3.21 ábrán láthatjuk. Amíg a két galaxis O1/O2 cefeidái hasonló helyet foglalnak el a diagramon, az LMC és SMC F/O1 kétmódusú csillagai elkülönülnek. A különbségre korábban Beaulieu és mtsai (1997) elméleti munkája mutatott rá, miszerint a megfigyelt F/O1 periódusarány két ellentétes hatás eredményeképpen jön létre: (1) minél alacsonyabb a fémtartalom, annál kisebb az opacitásmaximum (bump), ami a pulzáció gerjesztésében vesz részt, és befolyásolja azt, (2) az alacsony fémtartalom miatt a csillag szerkezete is megváltozik: azonos tömeg esetén nő a luminozitás, így az F/O1 periódusarány csökken. Ehhez adódik az a hatás is, hogy a cefeidák fejlődése során fontos szerepet játszó kék fejlődési hurok (blue loop) pozíciója is különböző a két Magellán-felhő esetén. Ennek következményeként az SMC-ben rövidebb, az LMC-ben hosszabb periódusú csillagokat látunk. Ezt az összefüggést a saját modelljeim is megerősítik.

Lineáris modelljeim alapján számolt alsó és felső fémtartalomhatárokat látunk a 3.22 ábrán, amelyen feltüntettem az LMC-ben és az SMC-ben az EROS-2 felmérésben általunk talált kétmódusú cefeidákat is. Érdekes megjegyezni, hogy a megfigyelt pontok inkább az azonos fémtartalomhoz tartozó görbéket követik, mintsem lineáris relációt a $\log P_0 - P_1/P_0$ diagramon. A gyakorlatban a vonalak között interpolálunk, átlagos $\bar{Z}$, minimális $Z_{\min}$ és maximális $Z_{\max}$ értékeket származtatva az egyedi csillagokra. A $\bar{Z}$ átlagértékek bizonytalansága $5,2 \times 10^{-4}$ az LMC-ben és $2,3 \times 10^{-4}$ az SMC-ben. A 3.23 ábra a fémtartalom eloszlását mutatja az egyedi



3.22. ábra. Az EROS-2 kétmódusú cefeidáinak Petersen-diagramja a modelleimmel számolt alsó és felső határokkal (Marquette és mtsai, 2009). A piros rombuszok jelölik az EROS-2 által az LMC-ben, kék négyzetek az SMC-ben talált beat cefeidákat, a fekete csillagok pedig a galaktikus (Samus és mtsai 2004) kétmódusú csillagokat. Rózsaszín körökkel az M33 kétmódusú cefeidáit mutatjuk (Beaulieu és mtsai 2006).

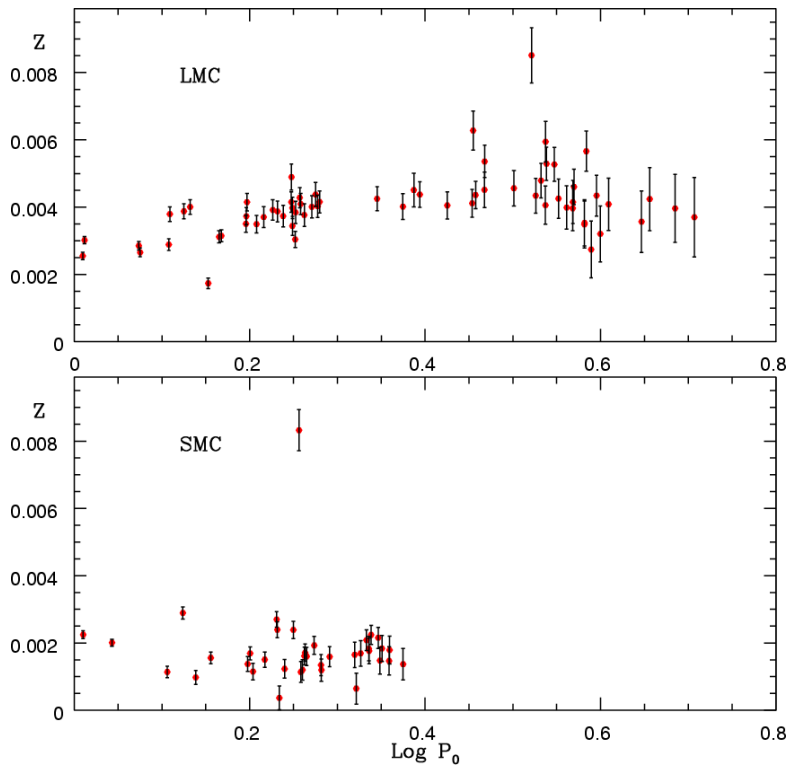


3.23. ábra. Az LMC és SMC kétmódusú cefeidáinak fémtartalom-eloszlása az EROS-2 felmérés alapján. A folytonos vonal az LMC-re, a szaggatott az SMC-re vonatkozik (Marquette és mtsai, 2009).

F/O1 csillagokra. A hisztogram beosztását $3,25 \times 10^{-4}$ -nek választottam, ami a $\bar{Z}$ bizonytalanságának felel meg. A hisztogram alapján a két galaxis fémtartalmára 0,0045 (LMC), illetve 0,0018 (SMC) értékek adódnak.

A 3.24 ábrán a csillagok egyedi fémtartalmát tüntettem fel a hibahatárokkal együtt. A 3.22 ábrán az azonos fémtartalmat jelölő vonalak lefutása miatt a 3.24 ábrán a bizonytalanság jól láthatóan a hosszabb periódus felé nő. Ugyancsak bizonytalanságot okoz a lineáris modellek használata. Számításaim szerint a sokkal számításigényesebb nemlineáris modellek nagyjából ötödére csökkentenék a kétmódusú tartomány szélességét, így bizonytalanságát is, azonban ezek kalibrációjának nehézsége miatt nem vállalkoztam ennek végigvitelére. A nagy numerikus bizonytalanság miatt csak sejthető, hogy a nemlineáris modellek adta fémtartalmak egy kicsit nagyobbak lesznek a lineárisokhoz képest. Ahhoz azonban, hogy erről minden kétséget kizáróan megbizonyosodhassunk, meg kell várnunk a háromdimenziós kódok megjelenését és pontos kalibrálását. További bizonytalanságot okozhat a nem Naphoz hasonló elemgyakoriság (Asplund és mtsai, 2005; Buchler, 2008), valamint a sztatikus mag – pulzáló burok közelítés (Buchler, 2008) a rövid periódusú kétmódusú csillagoknál. Ezeket a bizonytalanságokat nehéz becsülni, de átlagosan nem lehetnek sokkal nagyobbak a 3.23 ábrán feltüntetett hibáknál.

Dziembowski és Smolec (2009) az O1/O2 kétmódusú cefeidákat vizsgálták a Nagy-Magellán-felhőben. Azt találták, hogy az LMC-ben az O1/O2 és az F/O1 kétmódusú cefeidák számaránya 3,2 az OGLE-III mérései alapján, míg mi az EROS-2 survey alapján 1,8-es arányt mérünk. A különbség legvalószínűbb oka az, hogy az O1/O2 cefeidák amplitúdója kisebb F/O1



3.24. ábra. Az LMC és SMC kétmódusú cefeidáinak fémtartalma az alapmódusú periódus logaritmusának függvényében (Marquette és mtsai, 2009).

társaikénál, és az OGLE-III felmérés kisebb amplitúdójú jeleket is képes volt detektálni. Azt is megvizsgálták, hogy a P_{O1}/P_{O2} periódusarány jóval érzékenyebb a fémtartalomra, mint az F/O1 csillagok periódusaránya. Az általunk az LMC-re kapott fémtartalomértékeket O1/O2 csillagok és a saját, független hidrodinamikai modellszámításaik révén (kissé eltérő kémiai elemösszetételt és opacitásokat alkalmazva) megerősítették.

Az M33 spirálgalaxis fémtartalom-gradiense

A várakozásoknak megfelelően a spirálgalaxisok fémtartalom-eloszlása a centrum felé növekszik. Ez az M31-en és az M33-on kívül jól látható az M81 (Kudritzki és mtsai, 2012), az NGC 300 (Stasińska és mtsai, 2013), NGC 3621 (Kudritzki és mtsai, 2014) és az NGC 5668 esetében (Marino és mtsai, 2012), valamint nagyobb galaxisminták egyedein is (Pilyugin és mtsai, 2014; Sánchez és mtsai, 2014). Saját Tejútrendszerünk fém- (és ezen belül vas-)eloszlása hasonló a többi galaxiséhoz (Luck és Lambert, 2011). A közepes és nagy tömegű csillagok fontos szerepet játszanak az intersztelláris anyag feldúsulásában, így eme gradiens létrehozásában is, ugyanakkor a fémtartalom-eloszlás feltérképezésére is kitűnően használhatók. Nem véletlen, hogy ebben a kontextusban éppen a cefeidák iránt is jelentős érdeklődés mutatkozik (Genovali és mtsai, 2015).

Beaulieu és mtsai (2006) öt új, az alapmódusban és az első felhangban pulzáló cefeidát fedeztek fel az M33 jelű, Lokális Csoportba tartozó spirálgalaxisban. A munkához a Canada-Francia-Hawaii teleszkóp (CFHT) M33-at célzó változócsillag-felmérését használták fel. Ez a

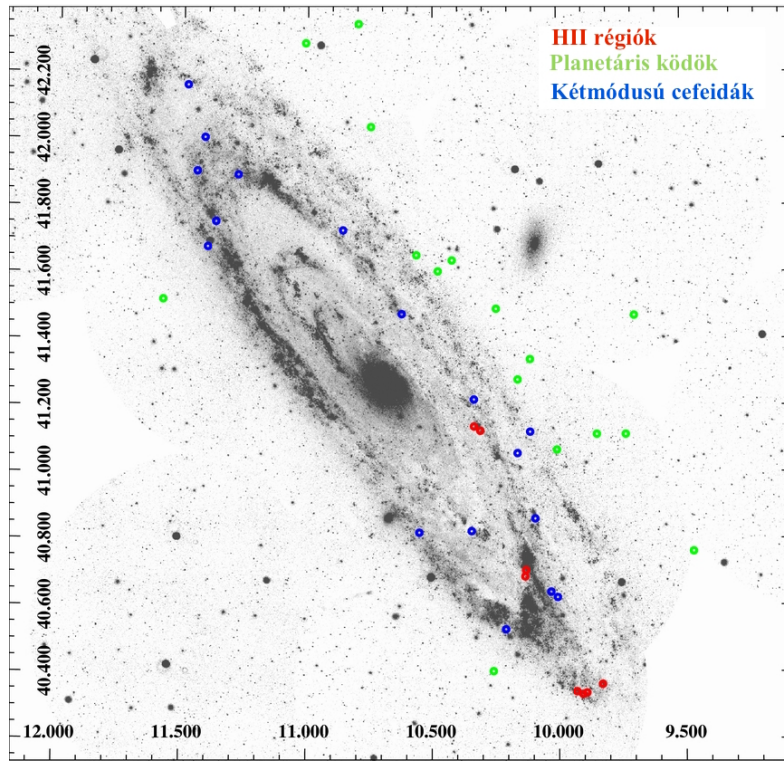
program több mint 80000 csillagot figyelt meg az M33-ban 2 év alatt. Ezek között 3000 cefeidát találtak, amiből öt bizonyult kétmódusúnak. Minden csillagról mindössze 33 mérési pont állt rendelkezésre, a Sloan-féle g' , r' , i' színszűrőkkel. Ezek alapján elmondhatjuk, hogy a minta nem teljes, de további kétmódusú cefeidák felfedezéséhez jóval több adatra lenne szükség. Erre az öt új objektumra azonban a kutatócsoportnak módszeremmel sikerült egyedi fémtartalom-értékeket meghatároznia, a csillagok eloszlásából pedig a galaxis fémtartalom-gradiensét más módszerektől függetlenül megmérni a galaktocentrikus távolság függvényében. Az objektumok deprojektált galaktocentrikus távolsága 1,0 és 3,5 kpc között szóródik.

Korábbi mérések szerint a késői spirálgalaxis elég meredek fémtartalom-gradienst mutat. Vilchez és mtsai (1988) korai úttörő munkája óta több csoport megmérte az M33 [O/H]-eloszlását H II-területek felhasználásával. Garnett és mtsai (1997) $-0,11$ dex/kpc értéket kaptak az [O/H] gradiensre. Az első, B-típusú szuperóriások spektroszkópiájára építő eredmény $-0,16 \pm 0,06$ volt (Monteverde és mtsai 1997), egy még újabb becslés (Urbaneja és mtsai 2005) $-0,06 \pm 0,02$ -t adott. Ez utóbbi egybevág a vörösóriás-ág vizsgálatára alapozott eredménnyel (Tiede és mtsai, 2004). Planetáris ködök alapján Magrini és mtsai (2004) $-0,14$ fémtartalom-gradienst származtattak. Egy újabb kutatásban Crockett és mtsai (2006) revideálták az [O/H]-gradienst $-0,012 \pm 0,011$ dex/kpc értékre, ami sokkal kevésbé meredek, mint a korábbi meghatározások. Mindezeket a fejleményeket annak a tudatában kell szemlélünk, hogy a fémtartalom-eloszlás leírására használt egyetlen (egydimenziós) gradiens minden bizonnyal túlzott leegyszerűsítése a valóságnak.

A kétmódusú cefeidák a többitől független módszert kínáltak a közeli galaxisok fémtartalom-eloszlásának vizsgálatára. Módszeremmel, a csillagpulzáció elméletéből – csillagfejlődési modellek felhasználásával – meghatározható az M33-beli kétmódusú cefeidák fémtartalma. Beaulieu és mtsai (2006) kismértékben eltérő módszert használtak: az öt kétmódusú cefeida alaplómódusú periódusát és periódusarányát reprodukáló modellsorozatokot számoltak, és azt vizsgálták, hogy ezek milyen fémtartalomnál metszik a választott $M-L$ -relációkat. A Beaulieu és mtsai (2006) által a galaxis fémtartalom-gradiensére kapott $d \log Z / dR = -0,2$ dex/kpc érték (ami $-0,16$ dex/kpc [O/H]-gradiensre váltható át) kitűnő egyezésben van a sztenderd spektroszkópiával származtatott fémtartalom-gradiensekkel, amiket a fent említett szerzők H II-régiók, korai B-szuperóriások és planetáris ködök vizsgálatával kaptak, és nem igazolja az újabb, Crockett és mtsai (2006) által favorizált alacsony gradiensértéket.

Az M31 (Androméda-galaxis) fémtartalom-gradiense

Lee és mtsai (2013) direkt módon alkalmazták módszeremet az Androméda-galaxis (M31) kétmódusú cefeidáira, amiket a Pan-STARRS 1 PAndroméda kampány során azonosítottak. Három évnnyi adat átvizsgálása után 17 kétmódusú csillagot találtak, melyek 10–16 kpc galaktocentrikus távolságban helyezkednek el a galaxis középpontjától (lásd a 3.25 ábrát). A kétmódusú cefeidákon alapuló módszer szubszoláris fémtartalom-értékeket szolgáltatott 15 kpc-en belül, ami hasonló a H II régiókból különböző spektroszkópiái módszerekkel nyerhető fémtartalom-becslésekhez. A M31 galaxis korongjára fémtartalom-gradienst is képesek voltak becsül-



3.25. ábra. Az M31 galaxis fémtartalom-gradienséhez használt objektumok eloszlása (Lee és mtsai, 2013) munkája alapján: HII-régiók (Zurita és Bresolin, 2012), planetáris ködök (Kwitter és mtsai, 2012) és kétmódusú F/O1 cefeidák (Lee és mtsai, 2013). A felvétel a GALEX-űrtávcső közeli-ultraibolya képei alapján készült (Gil de Paz és mtsai, 2007).

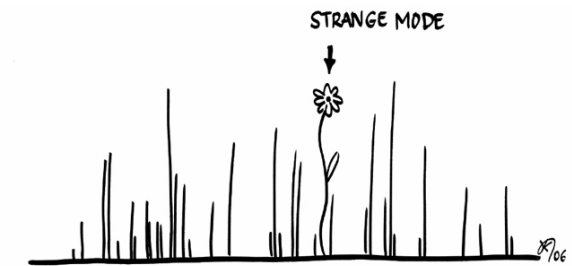
ni. Ez az érték azonban közelebb esett a planetáris ködökön alapuló módszer által szolgáltatotthoz, mint a HII régiókra alapozó módszer eredménye.

Összefoglalás

Az alpmódusban és első felhangban pulzáló cefeidák fémtartalmára kidolgozott és itt ismertett módszer az egyedi csillagok fémességének becslésén túl a közeli extragalaxisok fémtartalom-eloszlásának meghatározására is alkalmas, a spektroszkópiai mérésekre alapuló többi, gyakran alkalmazott metódustól független módszert jelent. Ahogy bemutattam, ennek alkalmazása elkezdődött a Lokális Csoport galaxisaira. Várható, hogy nagyobb határfényességű földi (LSST) és űrtávcsöves (HST, K2, JWST) megfigyelések az F/O1 kétmódusú cefeidák alkalmazhatóságának határát tovább fogják bővíteni mind térben, mind a bevonható objektumok számát tekintve.

4. fejezet

RR Lyrae csillagok



4.1. ábra. A strange módus – művészi elképzelés (Katrien Kolenberg).

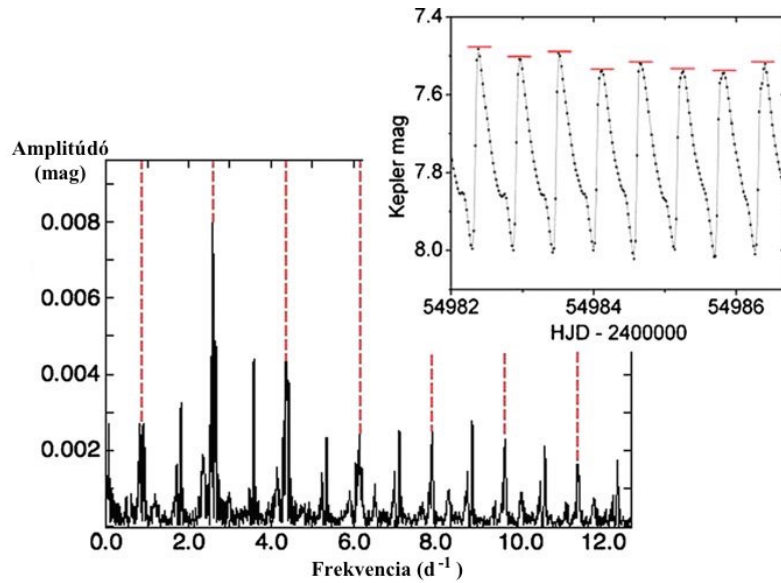
4.1. Perióduskettőződés RR Lyrae csillagokban

How did we miss [period doubling]? ...
First, we are on the wrong planet ... In a way, our night and the pulsation period of many RR Lyrae stars are too well-matched!

Doug Welch, <http://www.aavso.org>
The (Now) Less Mysterious Blazhko Effect in RR Lyrae Variables, 2011

4.1.1. Bevezetés

Az űrfotometria nem idegen az RR Lyrae csillagok világától: a Hubble-űrtávcsővel már a felbocsátásától kezdve különböző extragalaktikus populációkat vizsgálnak, és ez a munka e sorok írásakor is zajlik. RR Lyraeket nemcsak a Lokális Csoportban (M31, Jeffery és mtsai, 2011), de távolabbi galaxiscsoportokban (Sculptor: da Costa és mtsai, 2010) is rendszeresen detektálnak.



4.2. ábra. A perióduskettőződés első jelei a névadó RR Lyrae csillagban a Kepler első 33,5 nap hosszúságú (Q1) adatai alapján. A domináns módussal (alaphang), annak harmonikusaival és a modulációra jellemző triplet-csúcsokkal fehérítettem. A Fourier-spektrumban a fél-egész frekvenciák és a magasabb rendű modulációs oldalfrekvenciák kivehetők. Az inzertben az alternáló magasságú maximumokat figyelhetjük meg (Kolenberg és mtsai, 2010).

Ezek a vizsgálatok legfőképpen a horizontális ági, radiálisan pulzáló változócsillagok távolságmérésre való alkalmazását, és a különböző populációk, alpopulációk elkülönítését, fémtartalmának meghatározását, az egyes populációk időbeli fejlődését és egymásra hatását célozták. Az egyedi RR Lyrae csillagok beható vizsgálata csak néhány évvel ezelőtt kezdődött, és az AQ Leo kétmódusú (RRd) csillagnak a kanadai MOST-űrtávcsővel történt vizsgálatától eredeztethető (Gruberbauer és mtsai, 2007). Ezután gyorsan követték egymást a CoRoT (Chadid és mtsai, 2010) és a Kepler (Gilliland és mtsai, 2010; Kolenberg és mtsai, 2010) RR Lyrae csillagokkal foglalkozó első eredményei, amely munkákban e sorok írója is tevékenyen részt vett, a CoRoT RR Lyrae csoport tagjaként, és a Kepler RR Lyrae csoport társ-vezetőjeként: mind a célpontkiválasztásban, az adatok feldolgozásában és értelmezésében vezető szerepet játszottam.

Amikor a paraméterter új, addig nem vizsgált szegleteit tanulmányozzuk (mint ahogyan a Kepler az adatok folyamatosságában és pontosságában is több nagyságrendnyi javulást ért el), akkor általában jó esélyünk van új jelenségek felfedezésére. Így történt ez az RR Lyrae csillagokkal is, ahol új dinamikai jelenséget, a perióduskétszereződést sikerült vezetésemmel felfedezni. Ez a jól ismert jelenség – ahogy a neve is mutatja –, a periódus megkétszereződésével jár, azaz váltakozva magasabb és alacsonyabb maximumú pulzációs ciklusokat fogunk látni, ezzel párhuzamosan pedig a frekvenciaspektrumban a domináns módus frekvenciája és harmonikusai között fél-egész frekvenciák¹ $((2n + 1)/2 \cdot f_0$, ahol n pozitív egész) jelennek meg. A jelenség első jeleit már a Kepler legkorábbi adataiban láttuk (Kolenberg és mtsai, 2010, 4.2 ábra), de átfogó vizsgálatát és értelmezését külön publikációban tettem közzé (Szabó és mtsai, 2010).

¹half-integer frequencies, HIFs

4.1.2. Rövid történet

A hidrodinamikai modellek megmutatták, hogy az alacsony rendű rezonanciák fontos szerepet játszanak a klasszikus pulzáló változócsillagok dinamikájában. A bump cefeidák jól ismert Hertzsprung-progresszióját az alapmódus és a második felhang közötti $P_0/P_2=2$ rezonanciára sikerült visszavezetni (Buchler és mtsai, 1990). Feuchtinger és mtsai (2000) bizonyították, hogy az első felhangban rezgő cefeidák fénygörbéjét leíró Fourier-paramétereinek éles változásait az első és negyedik radiális felhang közötti $P_1/P_4 = 2$ rezonancia okozza.

Évtizedek óta jól ismert, hogy a nagy luminozitású RV Tauri csillagok alternáló mély és sekély minimumokat mutatnak fény- és radiálissebesség-görbéikben. Buchler és Kovács (1987), valamint Kovács és Buchler (1988b) végeztek először szisztematikus vizsgálatot irreguláris változások keresésére II. populációs (W Virginis) modellekben, erősen disszipatív és pusztán radiatív hidrodinamikai pulzációs kóddal. A fenti szerzők először demonstrálták, hogy ezek a modellek a kontrollparaméterek (pl. effektív hőmérséklet) változtatásával Feigenbaum-kaszádokon mennek keresztül, ami perióduskétszerező bifurkációkon keresztül zajlik. Az instabilitás a szigorúan periodikus pulzációból először 2-periódusú, 4-periódusú stb. lesz, ami végül alacsony dimenziójú káosszá alakul.

Moskalik és Buchler (1990, 1991) és Buchler és Moskalik (1992) tisztán radiatív cefeida és BL Herculis modellsorozatokban is talált perióduskétszerező bifurkációt. Ezekben a gyengén disszipatív modellekben T_{eff} változtatásával először perióduskettőződés mutatkozott, majd visszaállt a szigorúan monoperiodikus viselkedés.

Stabil nemlineáris periodikus pulzáció (határciklus) esetében úgy következhet be a perióduskettőződés, hogy az egyik módus (általában valamelyik alacsony radiális módus) destabilizálódik. Moskalik és Buchler (1990) kimutatták, hogy az alapmódus (0 index-szel jelöljük) és valamelyik alacsony (k -adik) radiális felhang közötti $(2n + 1) f_0 \approx 2f_k$ rezonancia lép működésbe, ahol n egész szám (tipikusan 1 vagy 2), f pedig a frekvenciát jelöli. Habár az RR Lyrae csillagoknál nagyobb luminozitású, a klasszikus instabilitási sávban tartózkodó pulzáló változócsillagoknál találtak, vagy előre jeleztek perióduskettőződést, maguknál az RR Lyraeknél nem, aminek oka az ilyen alacsony rendű fél-egész rezonanciák hiánya. Éppen ezért volt meglepetés a felfedezés, amit vezetésemmel tettünk, és amit a következőkben ismertetek részleteSEN.

4.1.3. Perióduskettőződés

A perióduskettőződés felfedezését és első alapos vizsgálatát a Kepler Q1 és Q2 adataival, összesen 127 nap (kvázi)folytonos RR Lyrae-fénygörbéken végeztem. Három csillag mutatta egyértelműen a perióduskettőződést: így a névadó RR Lyr (KIC 7198959, fényessége 7,9 a Kepler fotometriai rendszerében (K_p)), a V808 Cyg (KIC 4484128) és a V355 Lyr (KIC 7505345). Ez utóbbiak jóval halványabbak ($K_p = 15,4$ és $14,1$). Ezenkívül négy további Kepler-csillag is mutatta a perióduskettőződés jeleit. Mindannyiuk közös jellemzője, hogy kivétel nélkül Blazskó-modulált R Rab csillagok. Később más Kepler csillagnál is megtaláltuk az új dinamikai jelenség

jeleit, valamint a CoRoT által megfigyelt blazskós RRab-csillagokban is sikerült kimutatnom a perióduskettőződést.

Kepler-adatok feldolgozása, tesztek

Mint minden, a Kepler által megfigyelt RR Lyrae csillagot, ezeket is a KASC² RR Lyrae munkacsoportjában (WG13) vezetéssel válogattuk a Kepler indítása előtt. A fénygörbéken rövid szünetek láthatók, ezek biztonsági üzemmódba kapcsolás³, a pontos iránytartásban bekövetkező zavar⁴ és adatletöltési időszakok miatt következtek be. Ezeket az eseményeket leszámítva az ehhez az analízishez használt long cadence (30 perces mintavételezésű) adatpontokból a Q1 szegmens 1626, a Q2 pedig 4097 pontot tartalmazott. Ezekhez a rövid szakaszokhoz – bár teszteltem – trendszűrés nem volt szükséges, sem nagyobb ugrást (diszkontinuitást) nem kellett korrigálni. Bár az űrfotometriai módszerekről részletesen írtam a 2. fejezetben, itt is szükséges röviden kitérni rájuk, mivel megvilágítják, hogy miért lehettem benne biztos, hogy valódi dinamikai folyamatokat látok a fényváltozásban, és nem instrumentális eredetű változásokat.

Ez különösen azért fontos, mert a Kepler CCD-i nagyjából 11,5 (Kp) magnitúdónál szaturálódnak. Ez azt jelenti, hogy a keletkezett elektronok jelentős mértékben szétterjednek az oszlopok (kiolvasási irány) mentén, de szerencsére a rögzített fluxus nagyon pontosan megőrződik. Ez teszi lehetővé, hogy akár az olyan fényes célpontokról, mint maga az RR Lyrae is extrém pontosságú fotometriai adatsorhoz jussunk. Az RR Lyr esetében a Q1 és Q2 negyedekben az alkalmazott apertúra túl kicsinek bizonyult, mert nem vették figyelembe, hogy nagy amplitúdójú változócsillagról van szó. Így különös gonddal jártam el annak bizonyításában, hogy nem az esetlegesen elvesztett fluxus miatt látunk alternáló maximumokat. A 2.2.3. fejezetben részletesen ismertetett eljárás keretében a Q1 fluxusokat mintegy 5 százalékkal, a Q2-ben viszont nagyobb mértékben, 15-35 %-kal kellett korrigálni, ahol fluxusvesztés történt. Így az egyedi pontok relatív hibája 0,25% lett, szemben a 8×10^{-6} extrém pontossággal ott, ahol a korrekciót nem kellett alkalmazni. Az összehasonlítás kedvéért a másik két perióduskettőződést mutató csillagnál a pontosság $3 - 7 \times 10^{-4}$ (V808 Cyg) és $1,5 - 3,1 \times 10^{-4}$ (V355 Lyr). Ezeknél – mivel jóval halványabbak – nem kellett az említett korrekciót alkalmazni.

Hogy megbizonyosodjam a perióduskettőződés valódiságáról, a következő teszteket és ellenőrzéseket hajtottam végre:

- A perióduskettőződés nemcsak a teljes fluxusban látszik, de az egyedi pixelek fluxus-idősorában is, és minden egyes oszlopban, amelyik szignifikáns mértékben tartalmaz fluxust a célobjektumból. Az egyedi pixelekben a perióduskettőződéshez köthető jel sokkal nagyobb, mint a fotonzaj.
- A szaturált pixelek jele megjelenik a közelben lévő csillagok fényváltozásában is (cross-talk). Ez a fantomjel megegyezik a rekonstruált fénygörbével, ami arra mutat, hogy a rekonstrukció sikeres volt.

²Kepler Asteroseismic Science Consortium

³safe mode event

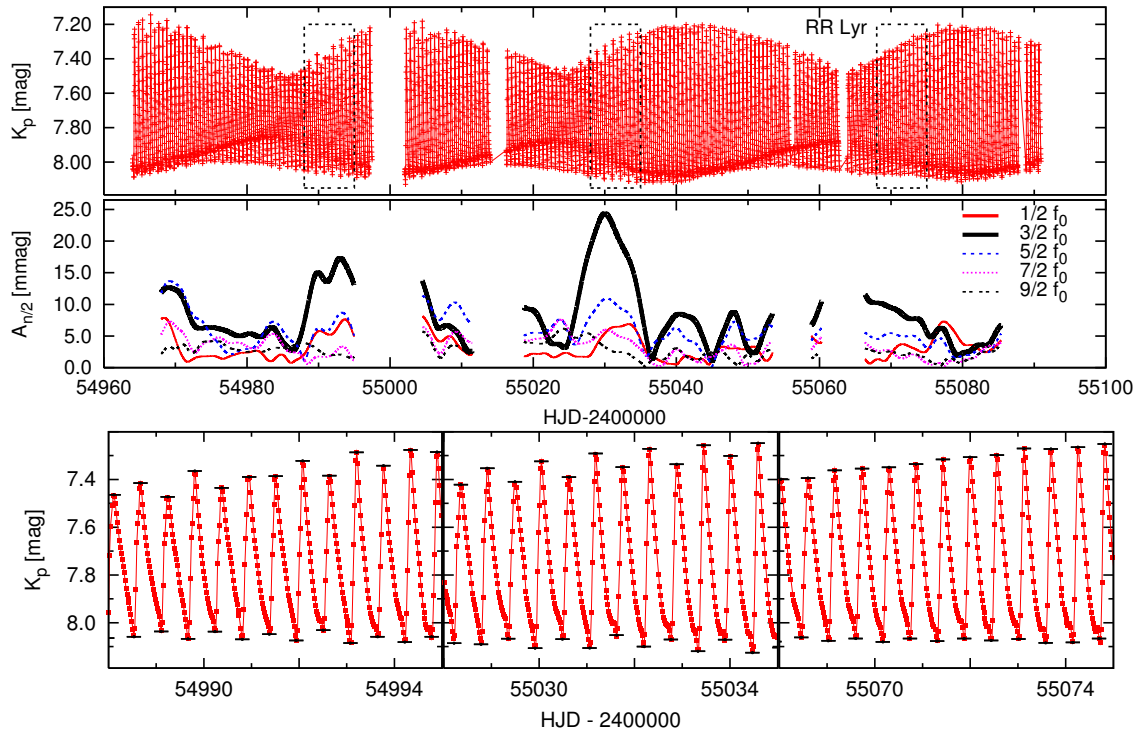
⁴loss of fine point

- A Kepler fénygörbéinek előállításához olyan és annyi pixelt rendeltek egy-egy objektumhoz, amennyivel maximalizálták a jel/zaj viszonyt (Bryson és mtsai, 2010). Az optimális apertúrát alkotó pixeleknél azonban általában valamivel többet töltöttek le, általában egy 1-pixel széles halót hagyva körülötte (Haas és mtsai, 2010). Szerencsére az RR Lyr Q1 és Q2 adatainak esetében még ennél is jóval több pixelt töltöttek le, lehetővé téve, hogy az összes pixelt felhasználva megerősítsem a perióduskettőződés létezését az adatokban. Ez a teszt is arra az eredményre vezetett, hogy az alternáló maximumokat nem a fluxusvesztés okozta.
- Tovább erősíti a bizonyítékok sorát, hogy a jelenség nemcsak a fényes RR Lyrae-ben látszik, de sokkal halványabb csillagok is mutatják. Ez arra mutat, hogy a jelenség nem függ a CCD dinamikai tartományától sem, ráadásul a három legmeggyőzőbb csillag a Kepler különböző CCD-moduljaira esett, tovább csökkentve annak az esélyét, hogy valamilyen instrumentális eredetű hatásról lenne szó.
- Talán a legerősebb bizonyíték a perióduskettőződés valódiságára a Q1 adatok azon szakasza, ahol annyi pixelt töltöttek le, hogy nincs fluxusvesztés, és mégis erőteljes perióduskettőződés látható.
- Ahogy később bemutatom, független – földi és űrfotometriai – megfigyelésekkel is sikerült a jelenséget megtalálni modulált RR Lyrae csillagokban, a dinamikai jelenség valódiságához ezért további kétség nem férhet.

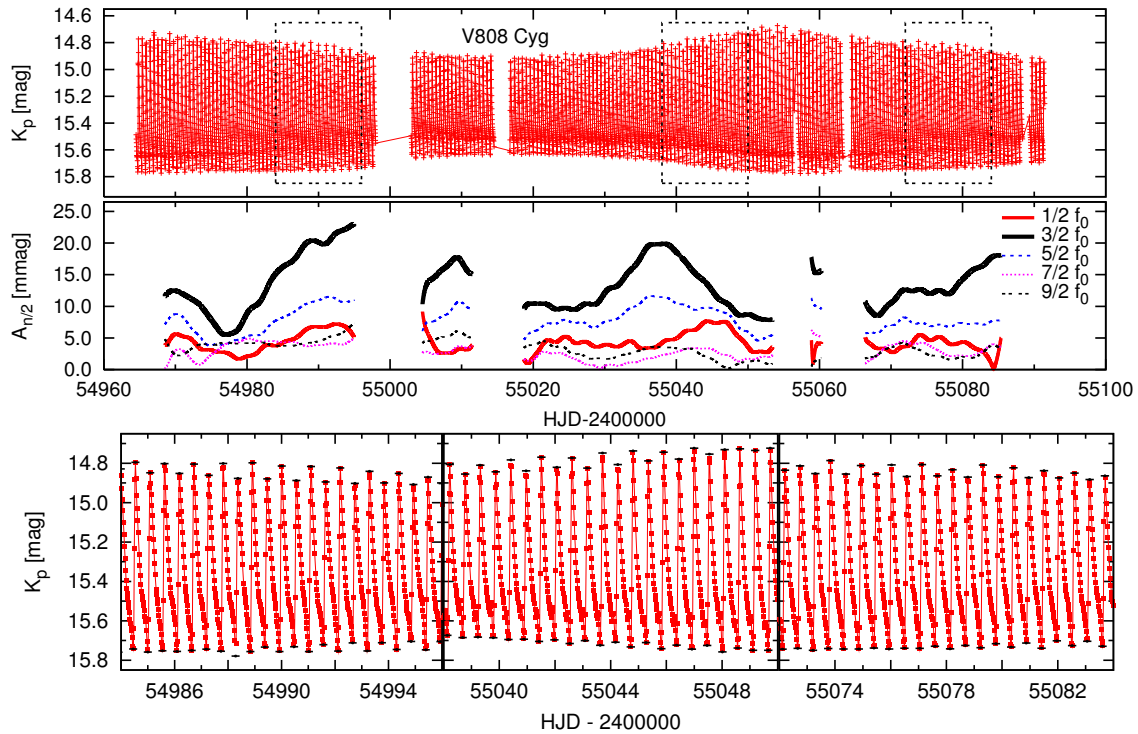
Perióduskettőződés a Kepler blazskós R Rab csillagaiban

A 4.3 ábra felső panelje a névadó RR Lyr Q1 és Q2 Kepler-fénygörbét mutatja a Kp sávban. Az egyedi maximumokat és minimumokat kilencedrendű polinommal illeszttem, hogy teszteljem a long cadence (29,4 perces) mintavételezés hatását a maximumok környékén gyorsan változó fénygörbékre. Nem találtam az alul-mintavételezésből származó komolyabb problémát. A fénygörbe bizonyos szakaszait téglalapokkal jelöltem, és az alsó paneleken kinagyítottam, hogy az egyedi pulzációs ciklusok és az alternáló maximumok/minimumok jól láthatók legyenek. Az illesztett maximum- és minimumértékeket rövid vízszintes szakasz mutatja. Az RR Lyr esetében 0,1 magnitúdós különbség is előfordul az egymást követő maximumok között. A V808 Cygninél ez mindössze néhány század magnitúdó. A hasonló 4.4 ábra a V808 Cyg fénygörbét mutatja.

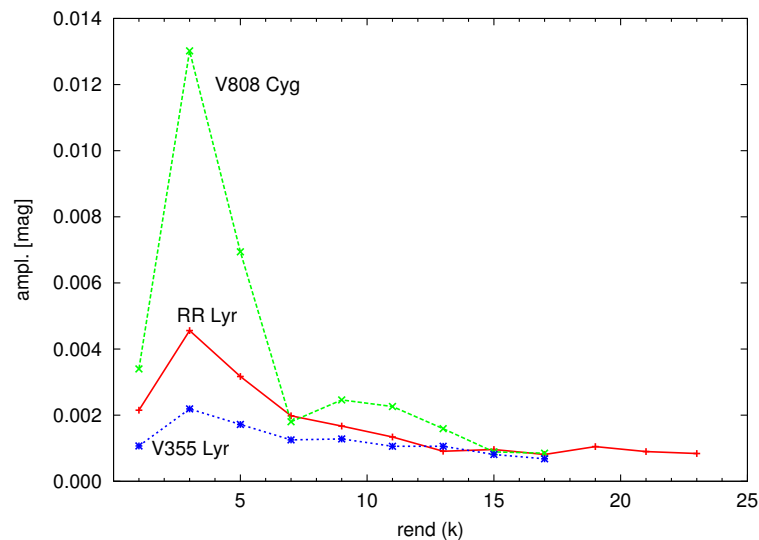
Az alternáló maximumok és minimumok a fénygörbében, valamint a fél-egész frekvenciák ($k/2 \cdot f_0$, ahol $k = 1, 3, 5, \dots$) a frekvenciaspektrumban tipikus jelei a perióduskétszerező bifurkációnak. A frekvenciaanalízishez a SIGSPEC csomagot (Reegen, 2007) használtam. Ahol lehetett, a Q1 és Q2 adatsorokat együtt vizsgáltam. Ahol a spektrális szignifikancia elérte a konzervatív 5,0-ös értéket, ott megálltam a frekvenciák meghatározásában, bár a fél-egész frekvenciák egészen a Nyquist-frekvenciáig (24,5 c/d) jelen vannak a spektrumban. Az eredményeket ellenőriztem a Period04 programmal (Lenz és Breger, 2005), és csak minimális eltéréseket



4.3. ábra. **Felül:** Az RR Lyrae Q1+Q2 Kepler-fénygörbéje. Az egyedi pulzációs ciklusok alig láthatók, a 39,6 napos modulációs periódus viszont tisztán kivehető. A három pontozott vonallal keretezett rész a legalsó panelen kinagyítva is látható. **Középen:** a fél-egész frekvenciák amplitúdóinak időbeli változása. **Alul:** Hétnapos fénygörbeszakaszok, azonos Blazskó-fázisnál. Az első kettő tisztán mutatja a perióduskettőződést, míg a harmadiknál nem látszik ennek jele. A maximumokat és a minimumokat kilencedrendű polinommal illesztettem, és az extrémumokat kis horizontális vonallal jelöltem a jobb láthatóság kedvéért (Szabó és mtsai, 2010).



4.4. ábra. Megegyezik a 4.3 ábrával, csak itt a V808 Cyg jelű Kepler-csillagot ábrázoltam (Szabó és mtsai, 2010).

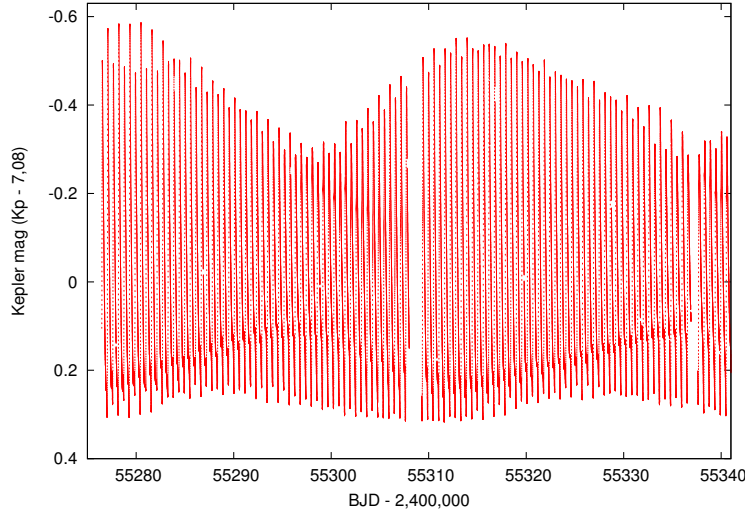


4.5. ábra. A fél-egész frekvenciákhoz tartozó amplitúdók három Kepler blazskós csillagban k függvényében, ahol k a $k/2 \cdot f_0$ frekvenciát jelenti. Mindhárom változócsillag perióduskettőződést is mutat. A V808 Cygni $k = 9$ környékén jelentős lokális maximum jelentkezik (Szabó és mtsai, 2010).

találtam. Harmadik csillagomnál, a V355 Lyraenél a perióduskettőződés jelen van, de jóval gyengébben. A $3/2f_0$ frekvencia amplitúdója 5 mmag, míg az előbb említett két objektumnál 25 mmag. Az egymást követő maximumok közötti különbség néhány század magnitúdó, az amplitúdómoduláció is viszonylag szerény mértékű (Szabó és mtsai, 2010).

További négy modulált Kepler-csillagot találtam, amik jó jelöltek a perióduskettőződés jelenségére, ezek: a V2178 Cyg (KIC 3864443), a V354 Lyr (KIC 6183128), a V445 Lyr (KIC 6186029) és a V360 Lyr (KIC 9697825) (Guggenberger és mtsai, 2012; Szabó és mtsai, 2010; Benkő és mtsai, 2010), ugyanis a frekvenciaspektrumukban a domináns alapl módus és harmonikusainak frekvenciája között, a fél-egész frekvenciák előre jelzett helye környékén csúcsokat találtam. Ezeknek a csillagoknak a frekvenciaspektruma azonban jóval komplexebb, további csúcsok is láthatók bennük, amikkel a következő fejezetben foglalkozom. További vizsgálatokkal (Benkő és mtsai, 2014; Szabó, 2014; Benkő és Szabó, 2015) kiderítettük, hogy 18 Kepler blazskós R Rab csillag közül 10 mutat egyértelműen perióduskettőződésre utaló jeleket a frekvenciaspektrumában. Figyelembe véve azonban, hogy a perióduskettőződés időlegesen jelentkezik a biztosan azonosított csillagokban is, előfordulhat, hogy a modulált R Rab csillagok túlnyomó részében időnként megjelenik a perióduskettőződés.

Visszatérve az első három biztos Kepler-felfedezésre, a 4.5 ábrán a fél-egész frekvenciákhoz tartozó amplitúdók átlagértékeit tüntettem fel. Érdekes, hogy mindhárom esetben a $3/2f_0$ frekvenciához tartozik a maximális amplitúdó, ezt követi az $5/2f_0$, majd az $1/2f_0$. Az 5. fél-egész frekvenciánál ($k = 9$) egy lokális maximum figyelhető meg, ez a perióduskettőződés eredetével van összefüggésben, ahogy az elméleti magyarázatnál részletesen kifejttem. A perióduskettőződés okozta magasabb frekvenciájú fél-egész csúcsok amplitúdója k értékének növekedésével többé-kevésbé monoton módon csökken. Ezeket a megállapításokat a CoRoT blazskós csillagok vizsgálata is megerősíti (4.8. és 4.9 ábrák), így általános tulajdonságnak tűnnek.



4.6. ábra. A prototípus RR Lyrae egyperces mintavételezésű (short cadence) Kepler-megfigyelései a Q5 negyedből. A fluxust magnitúdóskálára transzformáltam. A perióduskettőződés végig megfigyelhető a 2 hónapos, másfél modulációs ciklust lefedő szakasz alatt. Érdekes megfigyelni a bemutatott fénygörbeszakasz elején az egymást követő maximumok hatalmas eltérését. Az ábra több mint 91000 egyedi adatpontot tartalmaz (Szabó, 2014).

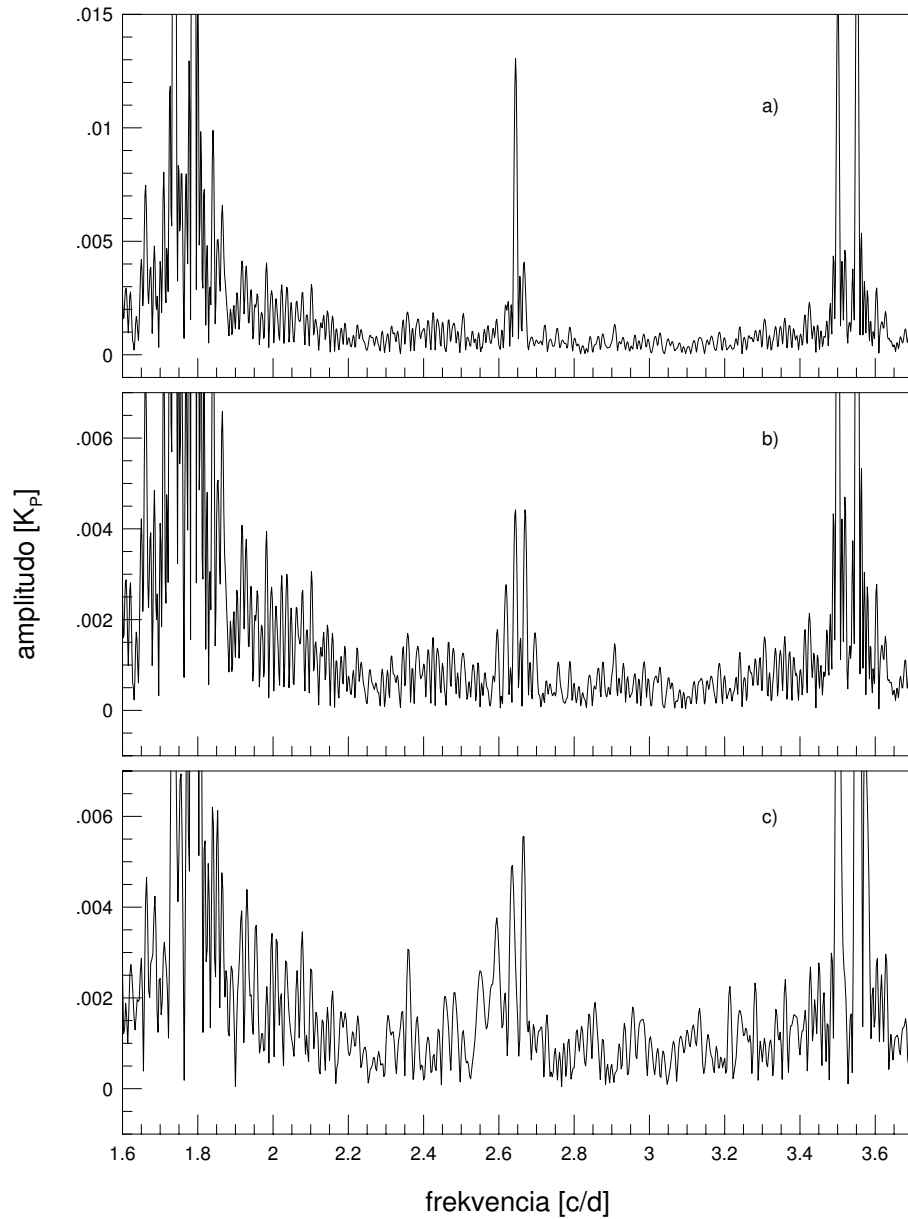
A perióduskettőződés időbeli viselkedése

A fél-egész frekvenciák időátlagolt viselkedésének tárgyalása után most rátérek az időbeli viselkedésükre. A 4.3. és 4.4 ábrák középső paneljei ezen frekvenciák amplitúdójának időbeli viselkedését mutatják. Ezeket analitikus függvény módszerével számoltam (Kolláth és mtsai, 2002), ami az időfüggő jelek hatékony analizisét teszi lehetővé. Megmutatható, hogy a módszer jobban teljesít a hagyományos időfüggő Fourier-módszerekénél, de az adatsorban meglévő ürök környezetében megbízhatatlan értékeket ad, így ezeket a részeket kivágtam.

Az ábrákból nyilvánvaló, hogy a perióduskettőződés jelenségének erőssége (az egymást követő maximumok eltérése és a fél-egész frekvenciák amplitúdója) időben nem állandó. A prototípus RR Lyraenél az első két modulációs ciklusban a Blazskó-moduláció felszálló ágán a legerősebb, de ugyanezen a helyen a harmadik modulációs ciklusban már nem vagy alig látszik. Az egymást követő maximumok több mint 0,1 magnitúdós eltérést is mutathatnak⁵. A fénygörbében és a frekvenciaspektrumban látható jelek erőteljesen korrelálnak egymással: ahol a fél-egész frekvenciák amplitúdója a legnagyobb, ott a legszembetűnőbb az egymást követő pulzációs ciklusok eltérése is. Ez minden megvizsgált csillagunkra igaz. A fényes RR Lyr csillagban a fél-egész frekvenciák sosem tűnnek el, a jelenség mindig jelen van. A perióduskettőződés állandó jelenléte még jobban látszik a 4.6 ábrán, ami a névadó RR Lyrae Kepler Q5 short cadence (1 perces mintavételezésű) adatait mutatja. Praktikusan a teljes megfigyelt, másfél Blazskó-ciklus alatt jelen van a perióduskettőződés.

A V808 Cyg esetében a perióduskettőződés szintén jelen van a teljes megfigyelési intervallumban. A fél-egész frekvenciák amplitúdója a Blazskó-burkoló fel- és leszálló ágán éri el

⁵Ez 10%-ot meghaladó eltérést jelent fluxusban kifejezve.



4.7. ábra. **a)** Szintetikus RR Lyrae-frekvenciaspektrum az f_0 és $2f_0$ frekvenciák között. A szimulációban f_0 -t, annak harmonikusait és a $k/2f_0$ ($k = 1, 3, 5, \dots$) fél-egész frekvenciákat vettük figyelembe. Minden frekvenciára ugyanazt a modulációt alkalmaztuk. A szimuláció szépen mutatja a $3/2 f_0$ frekvenciacsúcsot. **b)** Azonos a fentivel, de itt a fél-egész frekvenciákat ki- és bekapcsoltuk – amint azt a megfigyelt fénygörbék mutatják. Ennek eredményeként egy sor frekvencia jön létre. **c)** A névadó RR Lyr eredeti *Kepler*-fénygörbéje (Q2 adatok) az f_0 és $2f_0$ frekvenciák között. Szembeötlő a szimulált frekvenciaerdő hasonlósága a megfigyelésekkel (Szabó és mtsai, 2010).

maximumát. A fél-egész frekvenciák amplitúdójának minimuma nagyobb, mint az RR Lyr esetében, de a maximális amplitúdó hasonló. Az a következtetés vonható le tehát, hogy a jelenség változik ugyan a Blazskó-ciklus alatt, de valójában végig jelen van a csillagban.

A $(2n + 1)/2f_0$ frekvenciák környezetében egészen sok további frekvenciacsúcs is látszik (4.7 ábra c) panel). Feltételezésem szerint ennek oka a Blazskó-moduláció és a fél-egész frekvenciák amplitúdóváltozásában keresendő. Ennek a hipotézisnek a tesztelésére a következő szimulációt végeztük el: mesterséges fénygörbét generáltunk az eredeti időpontokban. Az RR Lyr alaplómódusú frekvenciájának és 16 harmonikusának vettük az amplitúdóit és fázisait, és amplitúdó- és fázismodulációt alkalmaztunk, melyeket 2-, illetve 5-tagú Fourier-összeggel állítottunk elő. Az előálló fénygörbe nagyon hasonlít a megfigyeltre, de megjegyzendő, hogy nem a megfigyelt fényváltozás reprodukálása volt a cél, csupán a fél-egész frekvenciák körüli csúcsok magyarázata. Ezután hozzáadtuk a $1/2f_0$, $3/2f_0$, $5/2f_0$, stb. frekvenciákat, és ezekre is alkalmaztuk az előzőekben leírt modulációt. A szimulációhoz $f_0 = 1,762989 \text{ c/d}$ frekvenciát alkalmaztunk, a frekvenciaanalízishez a MUFRAN programot használtuk (Kolláth, 1990a).

Az alaplómódus és harmonikusaival való fehérités után a frekvenciaspektrum f_0 és $2f_0$ között a 4.7 ábra felső paneljén tekinthető meg. A középső panel ábráját hasonlóképpen kaptuk, de itt a fél-egész frekvenciákat periodikusan ki- és bekapcsoltuk. Ez az egyszerű modell meglepően jó egyezést hozott a megfigyelésekkel (az ábra legalsó panelje): több frekvencia megjelent, és megjelenésük, eloszlásuk is egészen hasonló a megfigyelésekhez.

Alternatív magyarázatként felmerülhet további, nemradiális módusok jelenléte is, de ennek a hipotézisnek a fizikai részletei kevésbé kidolgozottak, több előfeltételezéssel kell élnünk, és nem világos, hogy minden csillag esetében működne-e, így továbbra is valószínűbbnek tartom, hogy a moduláció okozta periódusváltozás és a fél-egész frekvenciák időleges jelenlétéből adódó hatások manifesztációját látjuk a frekvenciaspektrumban.

Érdekességként említem, hogy Kolláth (2016) rezonáns amplitúdóegyenleteken alapuló vizsgálatai alapján a perióduskettőződésből adódó fél-egész frekvenciáknak elméletileg sem kell pontosan a $0,5f_0$, $1,5f_0$ stb. frekvenciákhoz esniük. A perióduskettőződéshez tartozó ritka, kaotikus attraktor viselkedése a pontosan fél-egész frekvenciáktól való kis eltérést és széles frekvenciacsúcs-erdőt jelez előre, teljes összhangban a megfigyelésekkel.

Összefoglalásként a 4.2. táblázatban sorolom fel a Keplerrel eddig megfigyelt perióduskettőződést mutató blazskós R Rab csillagokat.

4.1. táblázat. A Blazskó-effektust mutató Kepler RRab csillagok listája. Az oszlopok a következő adatokat tartalmazzák: (1): azonosító, (2): gyakran használt név, (3) rektaszcenzió, (4): deklináció, (5): fényesség, (6): pulzációs periódus, (7): Blazskó-periódus, (8): látszik-e perióduskettőződés? A többszörös Blazskó-periódussal jellemezhető csillagoknál az elsődleges periódust tüntettem fel. A csillaggal jelölt objektumok blendek. A felhasznált források: Benkő és mtsai (2010, 2014); Szabó és mtsai (2010); Benkő és Szabó (2015); Szabó (2016) előkészületben.

Név	GCVS név	R.A. (2000) h m s	Dec. (2000) ° ' "	<i>Kp</i> [mag]	Pulz. per. [nap]	Bl-per. [nap]	p. k. +/-
KIC 3864443	V2178 Cyg	19 40 06,96	+38 58 20,35	15,59	0,4869470	213	+
KIC 4484128	V808 Cyg	19 45 39,02	+39 30 53,42	15,36	0,5478635	92,16	+
KIC 5559631	V783 Cyg	19 52 52,74	+40 47 35,45	14,64	0,6207001	27,67	-
KIC 6183128	V354 Lyr	18 52 50,36	+41 33 49,46	16,26	0,5616892	849	+
KIC 6186029	V445 Lyr	18 58 25,69	+41 35 49,45	17,40	0,5130907	54,83	+
KIC 7021124		19 10 26,68	+42 33 37,00	13,55	0,6224805	> 1000	-
KIC 7198959	RR Lyr	19 25 27,91	+42 47 03,73	7,86	0,5668420	39,6	+
KIC 7295372*		19 42 25,44	+42 48 22,80	17,50	0,535744	45	-
KIC 7505345	V355 Lyr	18 53 25,90	+43 09 16,45	14,08	0,473696	31,3	+
KIC 7671081	V450 Lyr	19 09 36,63	+43 21 49,97	16,65	0,5046198	123,8	-
KIC 8164812*		19 25 49,86	+44 02 41,93	18,11	0,5615680	93	+
KIC 9001926	V353 Lyr	18 52 01,80	+45 18 31,61	16,91	0,5567997	71,8	-
KIC 9508655	V350 Lyr	18 49 08,37	+46 11 54,96	15,70	0,5942427	28,7	-
KIC 9578833	V366 Lyr	19 09 40,64	+46 17 18,17	16,54	0,5270284	62,84	-
KIC 9697825	V360 Lyr	19 01 58,63	+46 26 45,74	16,00	0,5575755	52,03	+
KIC 10063343		19 05 50,48	+47 00 21,00	13,16	0,332764	181	-
KIC 11125706		19 00 58,77	+48 44 42,29	11,37	0,6132200	40,21	-
KIC 12155928	V1104 Cyg	19 18 00,49	+50 45 17,93	15,03	0,4363851	52,02	-

A perióduskettőződés CoRoT-csillagokban

A perióduskettőződést nemcsak a Kepler, de a CoRoT Blazskó-modulált RRab csillagaiban is sikerült kimutatnom (Szabó és mtsai, 2014). Itt röviden ezeket az eredményeket ismertetem.

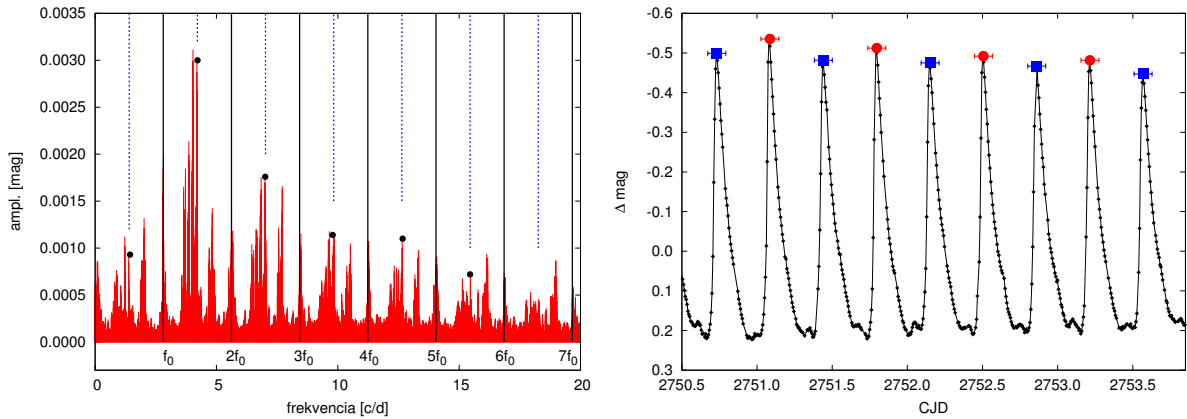
A Szabó és mtsai (2014) munkámban feldolgoztam a CoRoT által megfigyelt összes RR Lyrae csillagot, melyeket az űrtávcső az LRc04 mezővel⁶ bezáróan megfigyelt. Ehhez ellenőriztem az összes olyan csillagot, amelyeket ezekben a mezőkben az automatikus klasszifikálási algoritmus (Debusscher és mtsai, 2009) zérustól különböző valószínűséggel határozott meg RR Lyrae csillagnak. Összesen négy nemmodulált RRab-t, hat Blazskó-modulációt mutató RRab csillagot, kettő RRc csillagot és egy RRd csillagot (Chadid, 2012) vizsgáltam, többet közülük először publikáltam. Egy új, a CoRoT csillagok forgását vizsgáló munka során talált RR Lyrae jelöltet is megerősítettem (Affer és mtsai, 2012; Szabó és mtsai, 2014). Az így vizsgált minta csillagai az LRc01, LRc02 és LRc04 mezőkben voltak, melyeket a CoRoT rendre 158, 150 és 88 napig figyelt meg. A CoRoT fénygörbéknél az időt CoRoT Julián Dátumban adom meg, ebből a Heliocentrikus Julián Dátum így kapható: $HJD = CJD + 2451545,0$.

N2-szintű, feldolgozott CoRoT-fénygörbékkel dolgoztam. A maradék trendektől és a fénygörbékben jelenlévő diszkontinuitásoktól a Chadid és mtsai (2010) munkában részletezett eljárásokkal szabadultam meg. A CoRoT egy prizma segítségével 3 hullámhossztartományban is képes volt mérni, de csak a fényesebb célpontokat. Mivel az RR Lyrae csillagok általában halványak, legtöbbször csak monokromatikus fluxusok álltak rendelkezésemre (kivéve a 544 és 818⁷ csillagokat, ahol a jobb jel/zaj viszony kedvéért szintén az integrált fluxusokkal dolgoztam). A mintavételi idő egységesen 512 másodperc volt, leszámítva az előbb említett két objektumot, ahol a mérések elejét kivéve sűrűbb: 32 másodperc a különbség két egymást követő adatpont között.

A CoRoT-fénygörbék általában rövidebbek a Keplerhez viszonyítva, és azonos fényesség esetén kevésbé pontosak, ami a teleszkópok fénygyűjtő képességének különbségéből adódik. Egy 16 magnitúdós, tipikus RR Lyrae csillag egyedi adatponjainak pontossága 0,006 – 0,012 magnitúdó a CoRoT esetén, míg a Kepler esetében 0,0008 – 0,003 mag között van. A perióduskettőződés jeleit mind a fénygörbében (alternáló ciklusok), mind a frekvenciaspektrumban (fél-egész frekvenciák) kerestem. Ez utóbbihoz a MuFrAn (Kolláth, 1990a) és Period04 (Lenz és Breger, 2005) programokat használtam. A perióduskettőződés (fél-egész frekvenciák) detektálásához a frekvenciaspektrumban 3σ limitet használtam. A Fourier-spektrumban jelen lévő zaj meghatározásához az alapl módus és a első felharmonikusai közötti frekvenciaintervallumot használtam, miután az alapl módussal, a harmonikusaival és a modulációs oldalcsúcsokkal fehérítettem. Az $[f_0; 2f_0]$ intervallum a legérdekesebb, mivel minden perióduskettőződést mutató csillagnál találtam $3/2f_0$ frekvenciát (Szabó és mtsai, 2010, 2014). A pulzációs ciklusok alternálásának kimutatását az segítette, hogy heted- vagy kilencedrendű polinommal illesztettem

⁶LR: Long Run (SR: short run, IR: initial run), c: galaktikus centrum iránya (a: galaktikus anticentrum iránya), 04: sorszám. Így LRc04 a galaktikus centrum iránya felé, hosszú időn keresztül (156 nap) megfigyelt negyedik látómezőt jelenti.

⁷Az egyszerűség kedvéért a csillagokra azonosítójuk utolsó három számjegyével hivatkozom a dolgozatban, az objektumok koordinátái és más jellemzői megtalálhatók a Szabó és mtsai (2014) munkában.



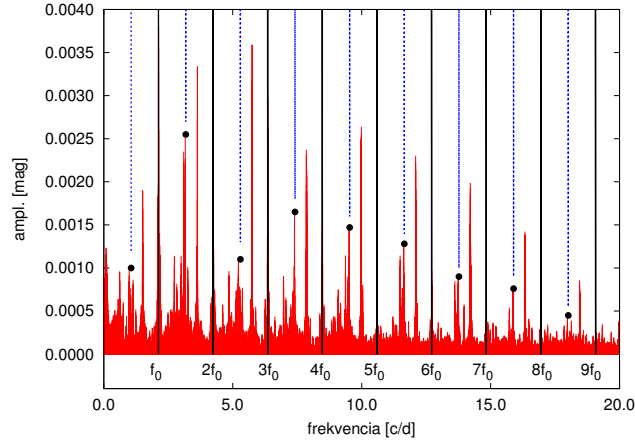
4.8. ábra. **Balra:** A 962-es jelű blazskós R Rab frekvenciaspektruma. A domináns pulzációs frekvenciával (f_0), annak harmonikusaival és a moduláció okozta tripletekkel már fehérítetttem. Fekete függőleges vonalak mutatják az alaphang (f_0) és harmonikusainak frekvenciáját, míg a kék pontozott vonalak a perióduskettőződésből adódó fél-egész frekvenciákat (HIF). Az utóbbiak amplitúdóját fekete pöttyök jelölik. **Jobbra:** Ugyanezen csillag fénygörbéjének részlete, az alternáló maximumokkal, a perióduskettőződés nyilvánvaló jeleként. A jobb láthatóság kedvéért feltüntettem a maximumok illesztett értékeit (Szabó és mtsai, 2014).

a maximumokat (Chadid és mtsai, 2010), ezáltal megszabadulva az esetlegesen hiányzó adatpontok, illetve a más csillaggal összemért blazskós RR Lyrae csillagoknál tapasztalható nagy szórás okozta problémáktól.

RRab csillagok

A 962 jelű csillag V1127 Aql néven is ismert. Fénygörbéje erősen modulált, és erőteljes fázis-modulációt is mutat (4.20 ábra). A moduláció nem szinuszos (Benkő és mtsai, 2011). Az első részletes vizsgálatot a csillagról a Chadid és mtsai (2010) munkában közzétették. Az előzőekben részletesen bemutatott analízis révén egyértelműen sikerült azonosítanom a perióduskettőződés jelenlétét a csillagban (lásd a fénygörbe releváns szakaszát a 4.8 ábra jobb oldalán). Hasonlóképpen, az alaphang harmonikusai között a fél-egész frekvenciák jelenléte is egyértelmű (3σ szinten szignifikáns) egészen $11/2f_0$ -ig (4.8 ábra bal oldala). A Kepler-csillagokhoz hasonlóan a fél-egész frekvenciák körül itt is egy kiterjedt csúcserdőt találunk. A fél-egész frekvenciák amplitúdóinak eloszlása szintén hasonló a korábban talált esetekéhez: a legmagasabb csúcs $3/2f_0$ -nál van, ezután monoton csökkenést látunk, de $9/2f_0$ -nél lokális maximum található (ennél a csillagnál legalábbis nem csökken az amplitúdó), ami a 9:2-es rezonancia jelenlétével magyarázható (Kolláth és mtsai, 2011). Az alternáló ciklusok és a fél-egész frekvenciák jelenléte egyértelművé teszi a perióduskettőződés megjelenését csillagunkban. Az is megfigyelhető, hogy a jelenség nem mindig lép fel a 142 nap hosszúságú CoRoT-időszakban, csak rövid időszakokra jelenik meg.

A 793-as számú CoRoT R Rab csillaghoz 18,66 napos periódusú Blazskó-moduláció tartozik (4.20 ábra). Ez az RR Lyrae mutatja az egyik legkisebb mértékű amplitúdómodulációt (Jurcsik és mtsai 2006; Skarka 2014). Poretti és mtsai (2010) tanulmányozták először a csillagot részletesen. További vizsgálataim során azonban ennél a csillagnál is egyértelműen kimutattam



4.9. ábra. Hasonló a 4.8 ábrához, ezúttal a szintén Blazskós 793 esetében. A domináns pulzációs frekvenciát (f_0), annak harmonikusait, a Blazskó-frekvenciát (f_B) és annak kétszeresét ($2f_B$) levontam. A fél-egész frekvenciák $17/2f_0$ -ig szignifikánsak (Szabó és mtsai, 2014).

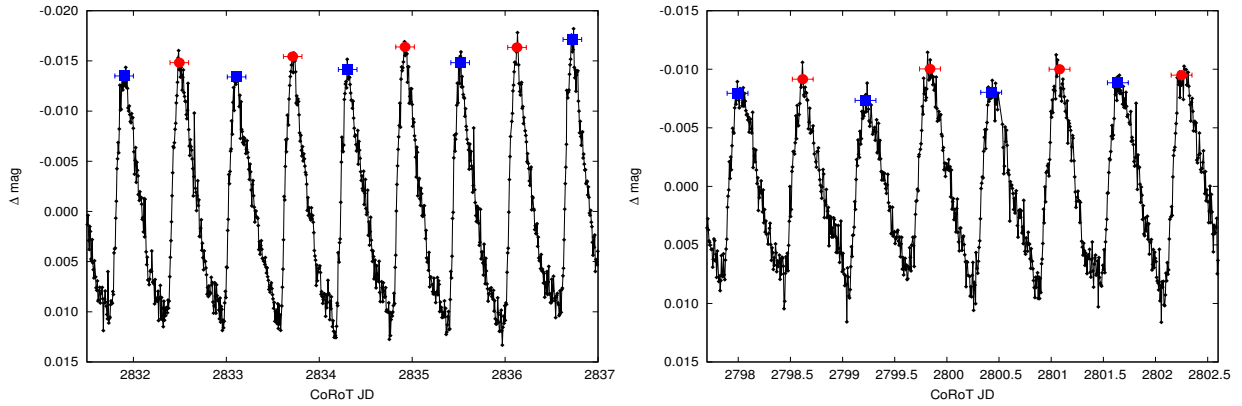
a perióduskettőződésre utaló fél-egész frekvenciákat az alapmódus és harmonikusai közötti felezőpont környékén (lásd a 4.9 ábrán, illetve a Szabó és mtsai, 2014 publikációt). Poretti és mtsai (2010) az $f_2 = 3,159 \text{ d}^{-1}$ és az $f_0 + f_2 = 5,279 \text{ d}^{-1}$ frekvenciákat⁸ kombinációs frekvenciákként értelmezték, de a perióduskettőződés felfedezésével a fél-egész frekvencia értelmezés plauzibilisebbnek tűnik, tekintve, hogy $1/2f_0$ és $17/2f_0$ között végig láthatóak, és az említett frekvenciák eltérése a $3/2f_0 = 3,178 \text{ d}^{-1}$ és az $5/2f_0 = 5,297 \text{ d}^{-1}$ fél-egész frekvenciáktól kisebb mint 1%.

A 648-as jelű CoRoT blazskós csillag tipikus aszimmetrikus fénygörbét mutat 0,607186 napos pulzációs és 59,77 napos modulációs periódussal (Szabó és mtsai 2009). A moduláció szimmetrikus és szinuszos (4.20 ábra). A CoRoT a csillag fényességének mérésekor a közeli, nyugat – északnyugati irányban található három csillagból álló láncot is belemérte a fluxusba, de a piszkás-tetői 1-méteres RCC távcsővel készült felvételünkön⁹ tisztán elkülöníthető a változócsillag, és a fényességváltozás valódi paraméterei (pl. amplitúdó) is rekonstruálhatóak voltak (lásd a 2.2.2. fejezetet). A frekvenciaspektrumban az alapmódus $f_0 = 1,64694 \text{ d}^{-1}$ -es frekvenciájának 10 harmonikusát tudtam megfigyelni, valamint tisztán látszik az f_0 és $2f_0$ frekvenciák moduláció okozta hármasszerkezete. A jobb oldali frekvenciacsúcsok sokkal magasabbak a bal oldalon találhatóaknál, és minden harmonikus körül látszanak. Perióduskettőződésnek azonban nem találtam nyomát a csillagban.

Az 544-es jelű CoRoT RRab csillag is blazskós, pulzációs periódusa 0,605087 nap, és a 4.20 ábrán 25,60 napos moduláció is tisztán kivehető. A csillag fényváltozása mindössze néhány század magnitúdó, ugyanakkor a fényváltozás alakja meglehetősen tipikus. Emiatt biztosra vettem, hogy ismét egy összemért (blend) csillagról lehet szó, amit hazai, földi, nagyobb felbontású megfigyelésekkel ebben az esetben is sikerült igazolni. A csillagot néhány napnyi normál (8 perces) időközű megfigyelés után 32 másodpercenkénti megfigyelési módra állították

⁸Itt kivételesen megtartottam Poretti és mtsai (2010) f_1 és f_2 jelölését, ami itt most nem a radiális felhangokhoz tartozó frekvenciákat jelöli.

⁹Megfigyelő: Benkő József



4.10. ábra. Az 544-es összemért (blend) CoRoT R Rab csillag fénygörbéjének részletei, ahol a perióduskettőződés mutatkozik. A páros és páratlan maximumokat különböző színekkel jelöltem, az eredeti adatpontokat fekete pontok mutatják (Szabó és mtsai, 2014).

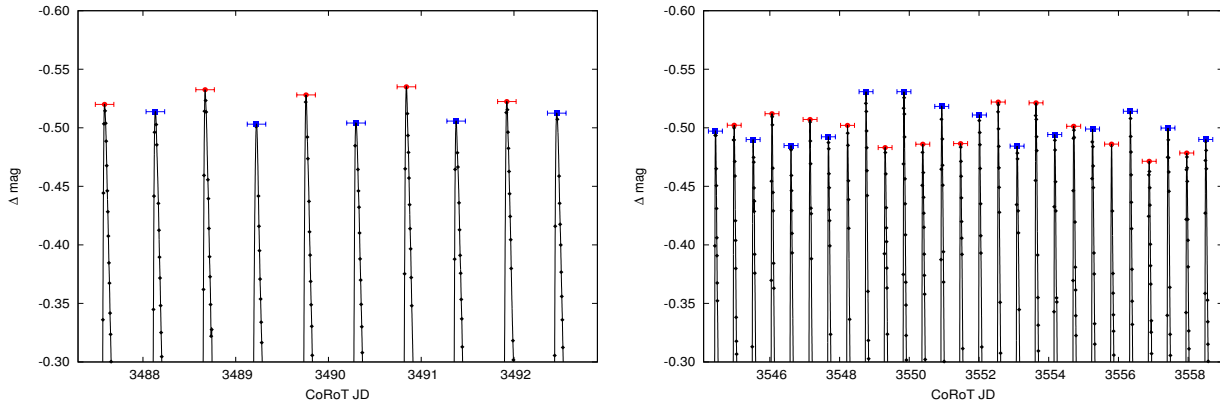
át, ezenkívül a különböző hullámsávokban regisztrált fénygörbe is rendelkezésre állt. Ehhez a vizsgálathoz az adatok könnyebb kezelhetősége érdekében az adatokat újrabinnelem a 8 percnél megfelelő időközzel, és a fluxusokat összeadva csak a fehér fényben mért fluxust tartottam meg. Külön ellenőriztem, hogy ez nem befolyásolta a frekvenciaspektrum alacsony frekvenciájú – ebben a vizsgálatban releváns – tartományát.

A frekvenciaspektrum nem mutatta jelét a perióduskettőződésnek, ami nem meglepő, tekintve, hogy célpontunkat jóval fényesebb csillaggal mérték össze. Azonban a fénygörbét megvizsgálva, tisztán láthatók olyan szakaszok, ahol alternáló maximumok fordulnak elő (4.10 ábra). Ellenőriztem, hogy egyéb periodicitások nem okozhatták ezt a jelenséget, így arra a következtetésre jutottam, hogy a CoRoT segítségével még ennél a jelentősen fényesebb csillaggal összemért objektumnál is megállapítható a perióduskettőződés (időleges) jelenléte.

A 363-as jelzésű R Rab csillag erős Blazskó-effektust mutat, aminek a periódusa 35,06 nap. Az összetekert fénygörbét a 4.20 ábra jobb alsó panelje mutatja. Ennek a csillagnak a modulációja ciklusról ciklusra változik. Guggenberger és mtsai (2011) részletes vizsgálatát követve, és az adatokat újraanalizálva ennél a csillagnál nem találtam perióduskettőződést, sem a frekvenciaspektrumban, sem a fénygörbében 0,35 mmag határamplitúdóig.

A 434-es jelzésű (egyébként V922 Oph néven is ismert) modulált R Rab csillag CoRoT-adatainak részletes vizsgálata még nem jelent meg. Periódusa 0,5413828 nap, Blazskó-ciklusa 54,5 nap, így a CoRoT LRc04 megfigyelései két ciklust fednek le. Bár a frekvenciaspektrumban nem látszanak fél-egész frekvenciák, a fénygörbében vannak perióduskettőződésre utaló jelek. A 4.11 ábra mutatja, hogy 6–10 egymást követő pulzációs ciklus is mutat alternáló maximumokat. Ilyen szabályos ismétlődés nem mutatható ki más, perióduskettőződést nem mutató csillagnál, és annak a valószínűsége is rendkívül csekély, hogy véletlenül álljon elő ilyen mintázat. A jelenlévő extra periodicitások amplitúdója sem teszi lehetővé, hogy a megfigyelt szerkezet létrejöjjön, így azt a lehetőséget fogadtam el, hogy itt is időszakosan perióduskettőződést mutató modulált R Rab csillaggal állunk szemben.

A 4.11 ábrán észrevehető, hogy a páros és páratlan maximumok időnként felcserélődnek.



4.11. ábra. A 4.10 ábrához hasonló, de itt a 434-es CoRoT csillagot mutatom. A páros és páratlan maximumok jobb oldali panelen látható felcserélődései komplex dinamikai viselkedésre utalnak (Szabó és mtsai, 2014).

4.2. táblázat. A CoRoT által megfigyelt, Blazskó-modulációt mutató R Rab csillagok alapvető jellemzői. A modulációs és pulzációs periódus mellett az utolsó oszlopban a perióduskettőződés megfigyelését (+) vagy hiányát (-) is jelöltem. A szövegben a csillagok azonosítójának utolsó három számjegyét használom, ami egyértelmű jelöléshez vezet.

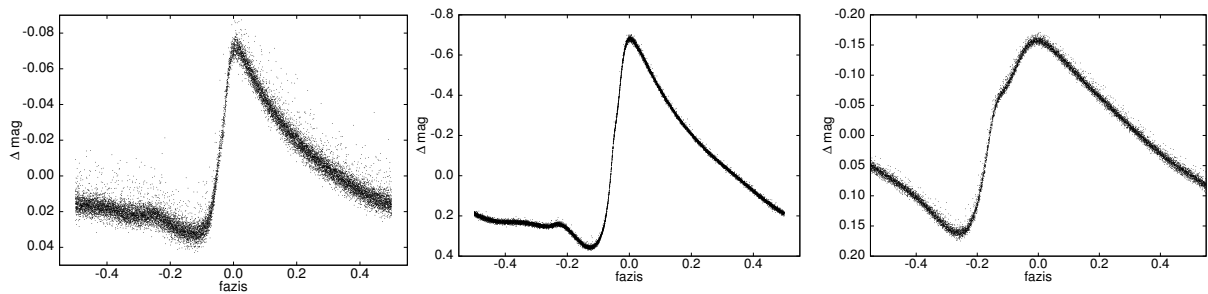
Név	R.A. (2000) h m s	Dec. (2000) ° ' "	fényesség V [mag]	kampány	Bl. per. [nap]	Pulz. per. [nap]	per. ket. +/-
0100689962	19 24 00,10	+1 41 48,70	14,96	LRc01	26,88	0,3559966	+
0101128793	19 26 37,32	+1 13 34,90	15,93	LRc01	17,86	0,4719296	+
0100881648	19 25 05,43	+1 39 23,83	16,16	LRc01	59,77	0,607186	-
0101503544	19 29 10,12	+0 43 47,14	14,79	LRc01	25,60	0,605087	+
0105288363	18 39 30,86	+7 26 53,95	15,32	LRc02	35,6	0,5674412	-
0103922434	18 32 08,55	+8 32 40,78	15,84	LRc04	54,5	0,5413828	+

Ez a jellegzetesség komplex dinamikai viselkedésre – a perióduskettőződésen túl valamilyen további rezonanciára (Molnár és mtsai, 2012a) vagy alacsony dimenziójú káoszra (Plachy és mtsai, 2013) – utalhat.

A 4.2. táblázat összefoglalóan mutatja azokat az eseteket, amikor modulált CoRoT-R Rab csillagokban detektáltam perióduskettőződést, illetve amikor ez nem sikerült.

RRd csillagok

Míg az eredeti Kepler-mező nem tartalmazott klasszikus kétmódusú (RRd) csillagot, addig a CoRoT LRc01 mezejében észlelt 812-es jelű RR Lyrae kétmódusúnak bizonyult, és az első vizsgálatokat Chadid (2012) végezte. Az alaplómódus periódusa 0,4880408 nap, a felhangé 0,3636016 nap. A periódusarány 0,7450, a két módus amplitúdóaránya pedig $A_1/A_0 = 2,7055$, tehát a felhang a domináns. Ez egy tipikus, klasszikus RRd csillag paramétereinek felel meg (lásd pl. Jurcsik és mtsai, 2014). Megjegyezzük, hogy magának az RR Lyraenek – alaplómódusú, Blazskó-modulált csillag – a frekvenciaspektrumában is megtalálható az első felhang frekvenciája (Molnár és mtsai, 2012a), de mindössze néhány millimagnitúdós amplitúdóval, így maga a névadó csillag nem tekinthető klasszikus RRd-nek, habár mindkét radiális módus jelen van.



4.12. ábra. Trendszürt, korrigált, fázisba rendezett nem-modulált R Rab fénygörbék a CoRoT adatbázisban. **Balra:** az új felfedezésű RR Lyrae (488). A kis amplitúdó és a viszonylag nagy szórás blendre utal. **Középen:** szintén új, modulálatlan R Rab (818). Mivel több mint 177000 adatpont állt rendelkezésre, csak minden tizediket ábrázoltam. **Jobbra:** Új felfedezésű modulálatlan R Rab csillag (804) (Szabó és mtsai, 2014).

Érdemes megvizsgálni, hogy vajon a klasszikus kétmódusú csillagok mutatnak-e perióduskettőződést. Erre az RRd-k Kepler-mezőbeli hiánya miatt szintén elsőként nyílt alkalmam a CoRoT jó minőségű űrfotometriai adatainak birtokában. A CoRoT-adatok alapján a 812-es csillag frekvenciaspektrumában nem láthatóak fél-egész frekvenciák egészen 0,07 millimagnitúdóig. Hozzáteesszük, hogy a MOST-űrtávcső által vizsgált klasszikus RRd, az AQ Leo sem mutatott perióduskettőződésre utaló jeleket (Gruberbauer és mtsai, 2007).

A modulálatlan csillagok fényváltozásának frekvenciatartalma

Munkám során megállapítottam, hogy a blazskós R Rab csillagok többsége mutatja a perióduskettőződést. Érdekes kérdés volt megvizsgálni, hogy vajon a modulálatlan csillagok közül bármelyik mutatja-e a jelenséget. A CoRoT és a Kepler-minták alapján a válasz egyértelműen: nem. Ezekben semmilyen extra frekvencia nincs a Kepler és a CoRoT pontossága által megszabott hibahatárig, tehát az új dinamikai jelenség kizárólag a modulált csillagok sajátja.

A Szabó és mtsai (2014) munkában négy nem-modulált csillagot vizsgáltam meg¹⁰: a 131 jelű csillagnál 0,3 mmag felső korlátot állapítottam meg a fél-egész frekvenciákra. A következő három nem-modulált CoRoT R Rab csillag fázisba rendezett fénygörbéje a 4.12 ábrán látható. A 488 egy összemért, kis amplitúdójú, újonnan talált változócsillag, itt 0,1 mmag felső határig nem találtam perióduskettőződésre (vagy más periodicitásra) utaló frekvenciát. A 818 jelű csillagot szintén én írtam le először, itt is a 0,1 millimagnitúdós határig nincs jelen extra frekvencia. Hasonlóképpen, újonnan publikált CoRoT R Rab változócsillag a 804-os jelű, ahol 0,3 mmag-ig kizárható a fél-egész frekvenciák jelenléte.

A Nemec és mtsai (2011) cikkben 19 modulálatlan R Rab csillagot vizsgáltunk. Ezeket a munka elvégzéséig a Kepler a Q0 és Q5 negyedek között mérte, vagyis a legtöbb csillagra kicsit több mint egy évnyi folyamatos megfigyelés állt rendelkezésre, ami több mint 18000 egyedi long cadence adatpontot eredményezett csillagonként. A csillagok egyike sem mutatott fél-egész frekvenciát a frekvenciaspektrumában, a detektálási határ 0,1 – 1,0 mmag között mozgott.

¹⁰A pontos azonosítók és koordináták megtalálhatók az idézett cikkben, illetve a Paparó és mtsai (2009) munkában.

Miért nem láttuk korábban a perióduskettőződést RR Lyrae csillagokban?

Az RR Lyrae több mint 100 éve ismert, és az egyik legalaposabban megfigyelt pulzáló változócsillag. Felmerülhet a kérdés, hogy ennek tükrében miért nem sikerült az űrfotometriai adatok megszületéséig felfedezni egy olyan feltűnő jelenséget, amely ennél a csillagnál eléri akár a 0,1 magnitúdókülönbséget is az egymást követő maximumok esetében? Ez pedig már a néhány évtizeddel ezelőtti megfigyelési technikával is jóval a megfigyelhetőség határán belül kellett hogy legyen.

A kérdésre többféle válasz adható. Először is az '50-es – '70-es években, évtizedekben elsősorban is az RR Lyrae csillagok felszálló ágát és a fényességmaximum környékét fényképezték, rögzítették, mégpedig abból a célból, hogy maximumok pontos időpontjának bekövetkezésében jelenlévő változásokat (az ún. O–C értékeket¹¹) csillagfejlődési hatások kimutatására használják. Ily módon a folyamatos fénygörbék lehetősége fel sem merült. Még ha sejthető volt is, hogy esetleg különböznek az egymást követő ciklusok, a különböző éjszakákon, különböző horizont feletti magasságnál, vagy különböző műszerekkel felvett fénygörbék közötti nullponti és más szisztematikus hibák miatt a bizonyítás nehézkes lett volna. Még a dedikált, egy (Jurcsik és mtsai, 2009b) vagy több földi obszervatóriumot összefogó (Kolenberg és mtsai, 2006), kifejezetten RR Lyrae csillagokat célzó fotometriai kampányok sem szolgáltatottak kellő lefedettséget ennek a kihívásnak a leküzdéséhez. A folytonos követést még a nagy égboltfelmérő programok (MACHO, OGLE, EROS) sem oldották meg. Annak ellenére, hogy ezek akár évekig-évtizedekig is megfigyelnek egy-egy objektumot, éjszakánként legfeljebb csak néhány mérési pontot rögzítenek.

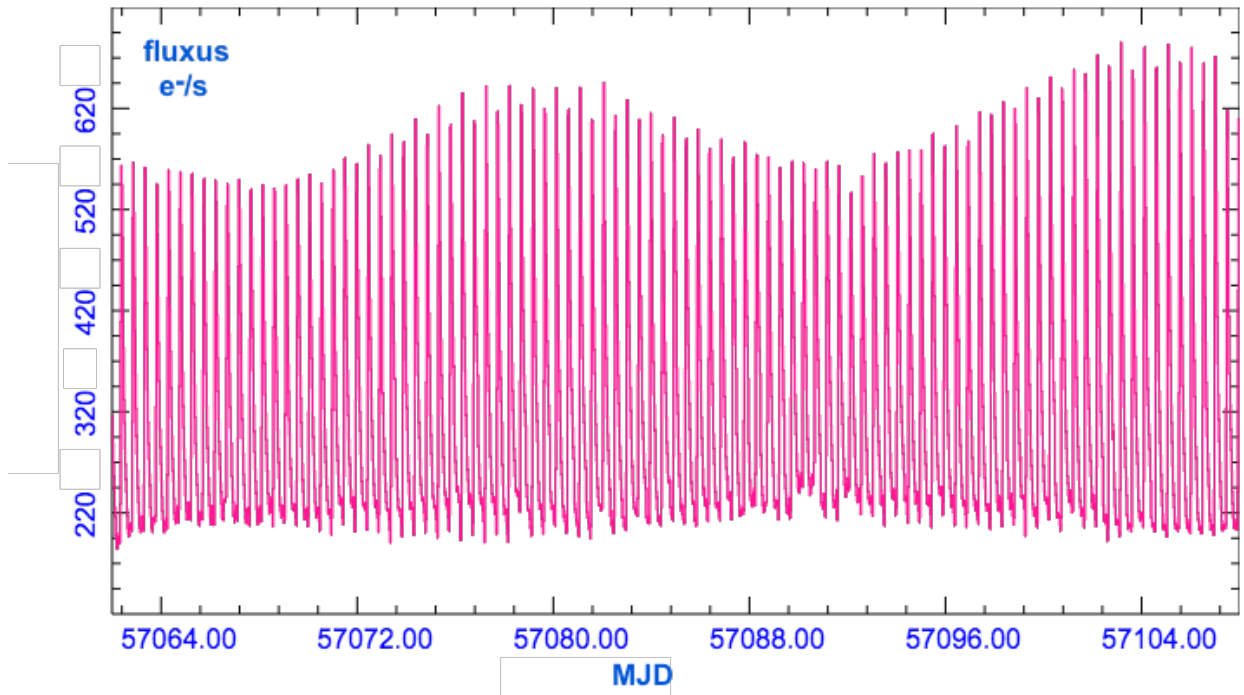
A második fontos ok, hogy időszakos jelenségről van szó, ami a folyamatos űrfotometriai adatsorokban is sokszor csak néhány (jellemzően 8–10) napig látható. Ráadásul a perióduskettőződés okozta alternáló maximumok közötti különbség sokszor kis amplitúdóval van jelen (az RR Lyr maga kiemelkedik ebben a tekintetben). A $3/2 f_0$ frekvencia amplitúdója még így is csak 26 mmag az RR Lyr Fourier-spektrumában, amikor a jelenség a legerősebb. Ez azt jelenti, hogy valójában csak jó minőségű és folytonos adatsorok esetén van remény a megfigyelésre.

De a legfontosabb tényező, hogy az RR Lyrae csillagok jellemzően fél napos periódusa szinte lehetetlenné teszi a földi megfigyelők számára, hogy két, egymást követő maximumot végigkövessenek. Ahogy Doug Welch kolléga szellemesen megjegyezte, rossz bolygóra születünk, a földi nappalok és éjszakák váltakozása nehezíti meg a perióduskettőződés megfigyelését plánetánkról¹².

Annak demonstrálására, hogy kellően hosszú és elegendően pontos eszközzel mérve könnyen feltáruhnak ezek az eddig rejtett dinamikai folyamatok, egy, a K2 misszió által mért modulált RRab-csillag előzetes, feldolgozás alatt levő fénygörbéjét mutatom a 4.13 ábrán. Az objektum fénygörbéjében tisztán feltűnik a perióduskettőződés jelensége.

¹¹Observed – Calculated, megfigyelt mínusz számolt

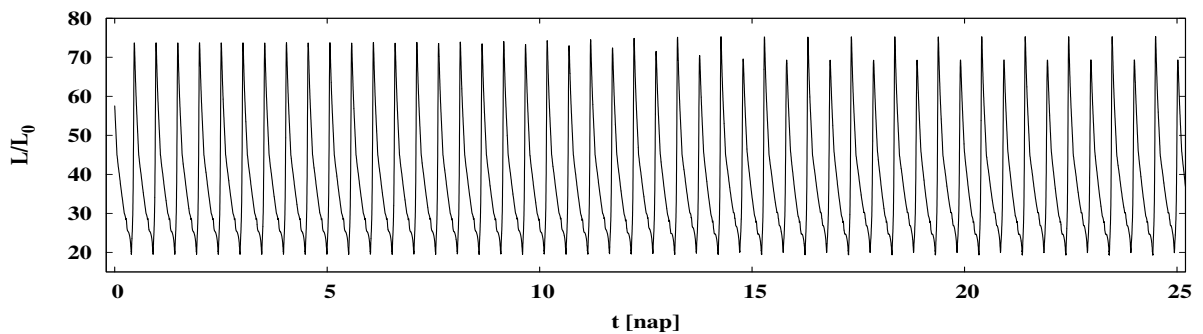
¹²"How did we miss [period doubling]? ... First, we are on the wrong planet ... In a way, our night and the pulsation period of many RR Lyrae stars are too well- matched!"



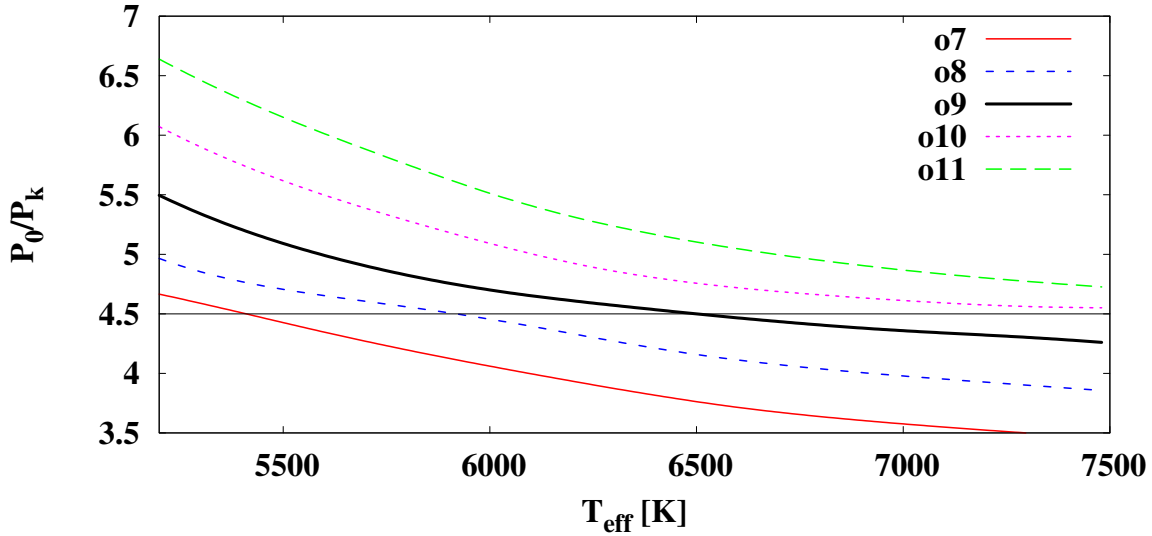
4.13. ábra. Az EPIC 220115915 Blazskó-modulált, perióduskettőződést mutató RR Lyrae a K2 negyedik kampányából (Szabó és mtsai, előkészületben).

4.1.4. Elméleti magyarázat

Ahogy utaltam rá a bevezetésben, az alacsony rendű rezonanciák fontos szerepet játszanak a radiálisan pulzáló változócsillagok fizikájában. Azonban a korábbi vizsgálatokban legfeljebb a negyedik felhangot vették számításba, minthogy a magasabb felhangok hatását elhanyagolták, miután azok rendszerint erősen csillapítottak. RR Lyrae csillagokban a cefeidáknál említett rezonanciákat nem várjuk, a részt vevő periódusok eltérő arányai miatt. Ennek ellenére, néhány RR Lyrae modellsorozatban perióduskettőződést találtunk, ami arra utal, hogy mégis léteznie kell olyan mechanizmusnak, amely destabilizálja az alaphangot. Hogy kiderítsük, milyen mechanizmus lehet felelős a perióduskettőződésért, RR Lyrae hidrodinamikai modellek



4.14. ábra. RR Lyrae csillag luminozitásváltozását mutató hidrodinamikai szimuláció, mely a kezdeti egyperiódusú határciklus viselkedésből kifejlődő perióduskettőződést szemlélteti (Szabó és mtsai, 2010).



4.15. ábra. Lineáris periódusarányok az alaphang és a magas rendű radiális felhangok között. A 9:2-es rezonanciát vízszintes vonal mutatja (Szabó és mtsai, 2010).

szisztematikus vizsgálatába kezdtünk. A számításokhoz a Florida–Budapest kódot (Kolláth és mtsai, 2002) használtuk. A fő modellparaméterek az alábbiak voltak: tömeg: $M = 0,578 M_{\odot}$, luminozitás: $L = 38,45 L_{\odot}$, effektív hőmérséklet $T_{\text{eff}} = 6500 K$, és fémtartalom: $Z=0,0001$.

Azon modellek szokványos integrálása, melyek perióduskettőződést mutatnak, a perióduskettőződött megoldásokhoz konvergál, ezért az alapmódus határciklusa nem vizsgálható ezen a módon. A relaxációs módszer (Kovács és Buchler, 1988a) azonban lehetővé teszi, hogy a határciklus stabilitási jellemzőit meghatározzuk. Ez a vizsgálat arra mutatott, hogy az alapmódusú határciklus instabil a modellparaméterek széles tartományában. A Floquet-exponensek viszonylag nagy értéke ($\lambda_k \approx 0,5$) szintén a határciklus perturbációinak gyors növekedését jelzik. Ez támasztja alá a 4.14 ábrán látható, Florida–Budapest kóddal végzett hidrodinamikai szimuláció is, ami a határciklus viselkedésből a kétperiódusú állapotba történő gyors átmenetet mutatja. Az ábrán látható minőségi változás eléréséhez kezdeti perturbációként az eddy viszkozitás 1%-os növekedésével operáltunk, de megjegyezzük, hogy a modell direkt perturbáció nélkül, pusztán a numerikus zaj hatására is átbillen a perióduskettőződött állapotba, valamivel hosszabb időskálán. Megjegyzendő, hogy ez a modellünk a perióduskettőződött állapot megjelenésének és eltűnésének időskáláját a megfigyelésekkel összhangban írja le.

A modell numerikus integrálása egyértelműen mutatja a perióduskettőződés tényét, de nem adja meg közvetlenül az alapmódus destabilizálódásának fizikai mechanizmusát. A perióduskétszerező bifurkáció ugyanis történhet termális vagy rezgési módus destabilizálásán keresztül. A második lehetőséget Moskalik és Buchler (1990) részletesen taglalta, ebben a fél egész rezonanciák jelentőségét fejtik ki a bifurkáció létrehozásában. Nem várunk rezonanciát az alacsony rendű módusok között, de a lineáris stabilitási vizsgálat azt mutatja, hogy a magasabb (8.–10.) radiális felhangok gerjesztettek lehetnek bizonyos hőmérséklet-tartományokban. A lineáris modellek ezen jellegzetessége mutatja, hogy egy ilyen, ún. strange módus is ger-

jesztett a normál rezgési módusokkal együtt, és ez a strange módus felelős lehet az alaphang destabilizációjáért. A strange módus nagyrészt a felszín közelében koncentrálódik, és pozitív növekedési rátája van (Buchler és mtsai, 1997; Buchler és Kolláth 2001).

A 4.15 ábrán a P_0/P_k periódusarányokat ábrázoltam a magas rendű radiális felhangokra, a hőmérséklet függvényében. A periódusarány-görbéken észrevehetőek az elkerült keresztezés¹³ jelenség jelei, ami Buchler és Kolláth (2001) szerint a strange módus jelenlétével függ össze. Később ezen a vonalon elindulva szisztematikus munkával feltérképeztük a lehetséges rezonanciákat numerikus hidrodinamikai RR Lyrae modellekkel (Kolláth és mtsai, 2011). Moskalik és Buchler (1990) munkáira építve, akik megmutatták, hogy fél-egész rezonanciák perióduskettőződéshez vezethetnek, **sikerült kimutatni, hogy minden kétséget kizáróan a 9:2-es rezonancia játszik szerepet az RR Lyrae csillagokban, méghozzá az alaphang és a 9. radiális (strange) felhang között.**¹⁴ A szóban forgó rezonancia keskeny tartományban jön létre a log $L - \log T_{\text{eff}}$ diagramon, és nem várt, erős hatása van az alaphang destabilizációjára.

4.1.5. A perióduskettőződés jelentősége

Összefoglalva az ebben a fejezetben leírtakat: elsőként sikerült egy új, váratlan dinamikai jelenséget felfedeznem a Kepler-űrtávcsővel a Blazskó-modulációt mutató RRab csillagok fénygörbéjében. A jelenség egyes csillagokban időszakosan van jelen, hosszabb-rövidebb időszakokra, azonban az egyik legjobban megfigyelt csillagnál, a névadó RR Lyraenél gyakorlatilag folyamatosan kimutatható. Ugyancsak elsőként sikerült megerősíteni a felfedezést a CoRoT-űrtávcső által megfigyelt, modulációt mutató RRab csillagok újbóli átvizsgálásával. Ennek során 6 esetből négy csillagnál találtam perióduskettőződésre utaló jeleket, így alternáló pulzációs ciklusokat és fél-egész frekvenciákat a frekvenciaspektrumban. Ezek között olyan csillag is van, ahol egy másik, közeli objektum is volt a fotometriai apertúrában, így a kimutatható jelek erősen csillapítottak voltak. A perióduskettőződés nem köthető specifikusan a Blazskó-moduláció bizonyos fázisához, erőssége is változik csillagról csillagra, mind a Kepler-, mind a CoRoT-mintában.

Megerősítettem, hogy csak a Blazskó-modulált csillagok mutatják a perióduskettőződést, nem-modulált csillagok egyetlen esetben sem a Kepler, illetve a CoRoT engedte fotometriai pontosságáig. A perióduskettőződés előfordulási gyakoriságának becsléséhez elengedhetetlenek az űrfotometria precíz és folyamatos, hosszú adatsorai. A CoRoT és a Kepler több hónapos (60–150 nap), illetve négy évnnyi hosszúságú adatsorai kiválóak erre a célra. A legújabb, Benkő és mtsai (2014), Szabó (2014), Benkő és Szabó (2015) munkákat is alapul véve, 18 modulált Kepler-RRab csillagból kilenc mutatja a perióduskettőződést, amihez hozzászámítva magát az RR Lyraet (Szabó és mtsai, 2010), több mint 50%-os arányt kapunk. Ezt tökéletesen alátámasztja a CoRoT-val talált négy eset a hat modulált csillagból. Ha az adatsorok véges hosszúságát és a jelenség időszakos előfordulását is figyelembe vesszük, akkor valószínűleg ennél is magasabb lehet az előfordulás gyakorisága. Ha ezt a gondolatmenetet a végletekig sarkítjuk, akkor

¹³avoided crossing

¹⁴Az természetesen véletlen egybeesés, hogy a 9:2-es rezonanciában a kilencedik felhang vesz részt.

előfordulhat, hogy minden Blazskó-modulált RRab csillag mutatja a perióduskettőződés jelenségét, ha elég hosszan és megfelelő pontosságú műszerrel vizsgáljuk. Érdekes, hogy maradék nyolc modulált, de perióduskettőződést nem mutató Kepler RRab csillag modulációs amplitúdója a legkisebb a mintában, ami azt sugallja, hogy a moduláció erősségével lehet kapcsolatban az újonnan felfedezett dinamikai jelenség előfordulása.

A perióduskettőződés és az egy évszázada ismert, de teljesen máig sem értett Blazskó-moduláció kapcsolata nyilvánvaló az űrfotometriai vizsgálataim alapján. A jelenség magas előfordulási aránya a modulált RRab csillagok között aláhúzza a fizikai kapcsolatot közöttük. Az, hogy milyen oksági kapcsolat van a két jelenség között, a felfedezés pillanatában még kérdéses volt. Mindenesetre a moduláció dinamikai hátterének jobb megértéséhez feltétlenül hozzájárul az új dinamikai jelenség. A lehetséges válaszra nem is kellett sokáig várni: Buchler és Kolláth (2011) megmutatta, hogy a perióduskettőződést létrehozó 9:2-es rezonancia az alapmódus és a 9. felhang között lehet a felelős magáért a Blazskó-effektusért is. Ennek jelentőségét a következő alfejezetben ismertetem részletesebben.

A perióduskettőződésnek az alapmódus és a kilencedik felhang 9:2-es rezonanciájával történő egyértelműen igazolt magyarázata (Szabó és mtsai, 2010; Kolláth és mtsai, 2011) a pulzációelmélet új dimenzióit nyitotta meg: korábban nem feltételezték, hogy ilyen magas rendű rezonanciának bármilyen szerepe lehet a klasszikus pulzáló változók dinamikájában. Ezen túl, a Buchler és mtsai (1997) által megjósolt strange módus jelenléte is egyértelműen bebizonyosodott számításaink és a Kepler-megfigyelések révén. Az alapmódus és a strange módus erős kölcsönhatása azt is előrevetíti, hogy az utóbbinak jelentős további hatása is lehet, pl. hárommódusú rezonancia (Molnár és mtsai, 2012a) képében, ahol az alapmódus és a kilencedik radiális felhang mellett az első vagy második felhang is megjelenik. Modelljeink alapján a hárommódus jelenléte már rendkívül komplikált dinamikai jelenségek (pl. alacsony dimenziójú káosz) kialakulását teszi lehetővé (Molnár és mtsai, 2012b; Plachy és mtsai, 2013). A perióduskettőződés által lehetővé és (vizsgálhatóvá) tett jelenségek sorát bővíti a nemradiális módusok részvétele a komplex dinamikai folyamatokban (rezonanciák, Blazskó-effektus stb., pl. Benkő és mtsai, 2010). Ennek az izgalmas lehetőségnek a kiaknázása további vizsgálatokat igényel.

Az, hogy a perióduskettőződés jelensége időnként (erősebben) fordul elő a Blazskó-ciklusok alatt, magyarázható azzal a feltevéssel, hogy Stothers (2006) szerint a modulációs ciklus alatt a csillag turbulens/konvektív szerkezete változik. Minthogy a modelljeink alapvetően érzékenyek a turbulens jellemzőkre, kézenfekvő lehet, hogy a ciklus során csak időnként következnek be kedvező feltételek, más szavakkal: a rezonancia csak időlegesen áll fenn az alapmódus és a kilencedik felhang között, és ekkor figyelhető meg a perióduskettőződés (Szabó és mtsai, 2010). Még ha az Stothers-féle elgondolásnak vannak is nehézségei (Smolec és mtsai, 2011; Molnár és mtsai, 2012b), Jurcsik és mtsai (2009a) vizsgálatai alátámasztják az RR Lyrae csillagok fizikai paramétereinek (luminozitás, sugár, effektív hőmérséklet) ciklikus változását a Blazskó-moduláció függvényében. A modellek említett érzékenysége, a $(P_0 : P_k = 9 : 2)$ rezonancia viszonylag keskeny paramétertartományban való bekövetkezésével kombinálva jó eszközt ad a kezünkbe, hogy további vizsgálatokkal pontosabban megértsük magát a Blazskó-effektust,

kapcsolatát a perióduskettőződésel, mindezek előfordulását és a nemradiális módusok esetleges szerepét a pulzációelmélet korábban lezártak hitt, de felfedezéssel főnixmadárként új életre kelt ágában.

A témakör jelentőségét mutatja, hogy a perióduskettőződésről 2011-ben meghívott szemináriumok keretében beszéltem a Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (Cambridge, MA, USA) és a Massachusetts Institute of Technology (MIT) intézetekben. Santa Barbarában (CA, USA) a *The Impact of Asteroseismology across Stellar Astrophysics* konferencián, Granadában (Spanyolország) a 20., kétévente megrendezett legrangosabb pulzációs konferencián (*Impact of new instrumentation & new insights in stellar pulsations*) mutattam be az eredményeimet, és végül Wroclawban (Lengyelország), 2013-ban a Nemzetközi Csillagászati Unió 301. szimpóziumán, meghívott review előadóként is hasonló megtiszteltetés ért.

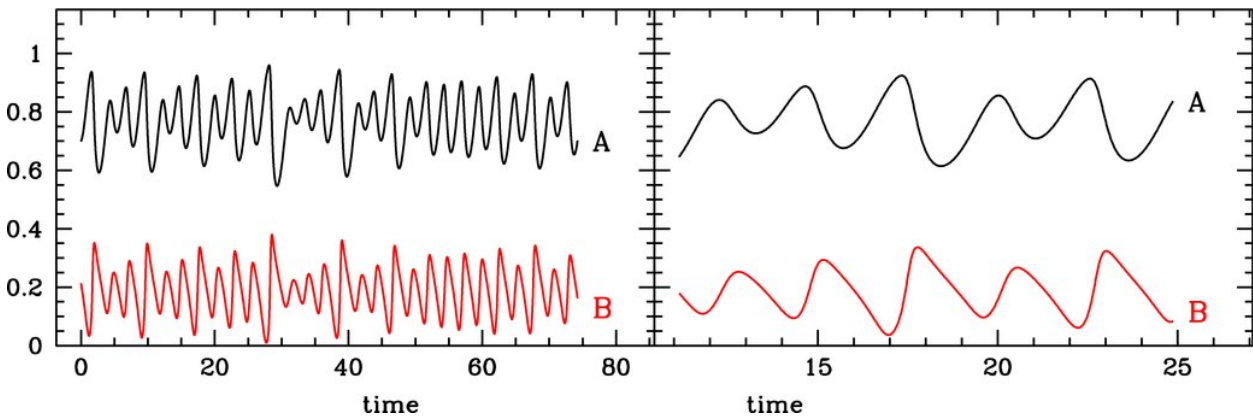
4.1.6. Az eredmények hatása

Jurcsik és mtsai (2015) perióduskettőződésel magyarázták az M3 gömbhalmaz két RR Lyrae-jében tapasztalt frekvenciákat: a V166 jelű, alpmódusban pulzáló csillagnál $7f_F/2$ -t, a V13-nál három módusban (F/O1/O2) pulzáló RR Lyrae csillagnál a kis amplitúdójú második felhang perióduskettőződését figyelték meg ($3f_{O2}/2$). A V166 esete független megerősítése annak a tézisemnek, hogy perióduskettőződés csak blazskós RRab csillagoknál figyelhető meg. Hasonlóképpen, földi megfigyelésekből mutatták ki a V759 Cygni és a CZ Lacertae blazskós RRab csillagokban a fél-egész frekvenciák jelenlétét (Jurcsik és mtsai, 2013).

A rezonancia paradigma

A perióduskettőződés felfedezése új elméleti vizsgálatokat ösztönzött (Szabó, 2014). A perióduskettőződésért felelős, az alpmódus és a kilencedik radiális felhang között létrejövő, az alaphangot destabilizáló 9:2-es rezonanciát vizsgálta Buchler és Kolláth (2011) az amplitúdó-egyenletek módszerével. Amint a 9:2-es rezonancia esetében is, ha a felszín közelében koncentráló pulzációs módus dinamikai hatását kell vizsgálnunk, abba a problémába ütközünk, hogy a hidrodinamikai szimulációk rendkívül érzékenyek lesznek a felszínen vett határfeltételekre, a zónázás geometriájára, a keveredési hosszra és így tovább. Ezért rendkívül nehéz megbízható és robusztus modelleket futtatni, és ezért van nagy jelentősége az amplitúdó-egyenletekre alapozott analitikus megközelítésnek. Ugyanezért az sem világos, hogy az egydimenziós közelítésben az amplitúdó-egyenleteket követve megvalósítható-e olyan RR Lyrae modell, amelyben fellép a moduláció is.

Az amplitúdó-egyenlet-formalizmust a 80-as években dolgozták ki, hogy a csillagpulzáció jellegzetességeit végig lehessen követni analitikusan a Hertzsprung–Russell-diagramon keresztül (Buchler, 1993). A módszer alkalmazhatósága és hatásossága azon alapszik, hogy a gyengén adiabatikus esetekben – mint amilyen az RR Lyrae csillagok vagy a cefeidák pulzációja – a gyors pulzációs időskálán történő események lecsatolhatók a sokkal lassabb amplitúdó- és fázisváltozásokat leíró egyenletekről. Így tehát az amplitúdó-egyenletek kiegészítik a hidrodinamikai szimulációkat, és bepillantást engednek a csillagpulzáció dinamikájába.



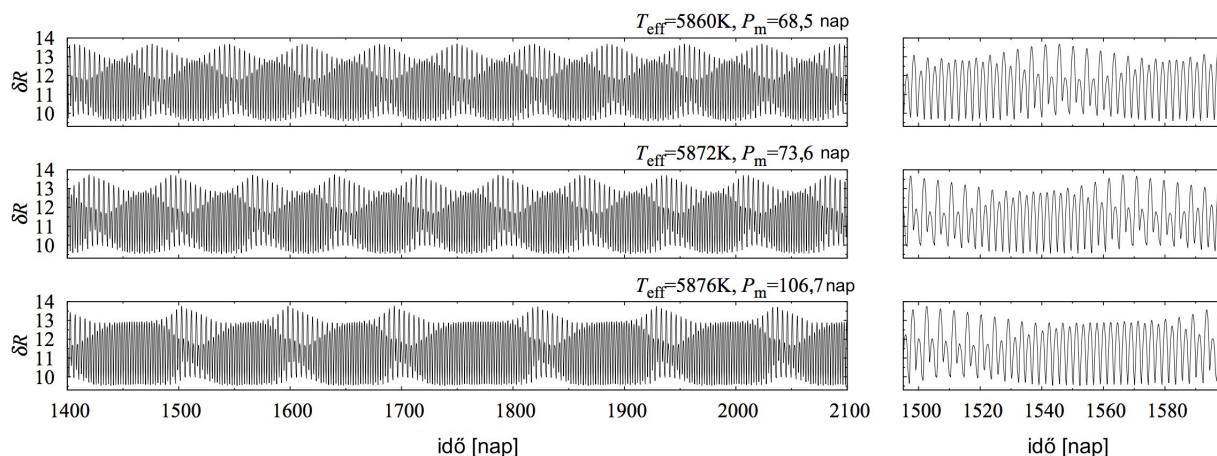
4.16. ábra. A két módusnak megfelelő amplitúdók Blazskó-effektusra hasonlító irreguláris modulációja perióduskettőződött állapotban, amplitúdóegyenletek vizsgálata alapján. A: alapl módus, B: 9. (strange) felhang. A megfigyelt 9:2-es rezonancia akár az évszázados Blazskó-rejtély megoldása is lehet (Buchler és Kolláth, 2011).

Buchler és Kolláth (2011) az alapl módus és a kilencedik felhang közötti 9:2-es rezonáns esetre felírt amplitúdóegyenleteket (közönséges differenciálegyenletrendszer) vizsgálva kimutatták, hogy nemcsak az alapl módus megy át perióduskettőző bifurkáción, de ugyanennek a rezonanciának a hatására mindkét résztvevő módus amplitúdója is modulálódhat. Ráadásul, ez a moduláció a paraméterek széles tartományában irreguláris, amint azt az űrfotometriai (Chadid és mtsai, 2010; Kolenberg és mtsai, 2011; Guggenberger és mtsai, 2012; Benkő és mtsai, 2014) és földi (Sódor és mtsai, 2011) megfigyelések is mutatják. Az így létrejövő moduláció lehet szabályos, irreguláris és kaotikus is, amit a nemlineáris dinamika strange attraktora biztosít (4.16 ábra).

A 9:2 rezonancia magyarázat a Blazskó-moduláció létrejöttére ma az egyik leginkább sikerrel kecsegtető modell, aminek alappillére volt a perióduskétszerezés felfedezése a Kepler (és később más) RRLyrae csillagokban. Ha az említett nehézségek ellenére hidrodinamikai modellekkel is sikerülne megerősíteni az analitikus módon már belátott tézist, akkor végre pont kerülhetne az évszázados Blazskó-rejtély megoldását célzó kutatások végére.

Perióduskettőződés és moduláció II. típusú cefeidákban

Ha RRLyrae csillagokra még nem is sikerült modulált hidrodinamikai modelleket létrehozni fél-egész rezonanciával, a Smolec és Moskalik (2012) szerzőpáros sikerrel járt BLHerculis csillagok esetén. A BLHerculis csillagok a II-es típusú cefeidák rövid (1–4 nap) periódusú alcsoportja. Főként idős csillagpopulációkban találhatók, így gömbhalmazokban és a galaktikus halóban. Alacsony tömegű csillagok, amik a nulla körű horizontális ágától (ZAHB) az aszimptotikus óriáság (AGB) felé fejlődnek, miközben keresztezik a klasszikus instabilitási sávot (Strom és mtsai, 1970). A II. típusú cefeidák, beleértve a BLHer csillagokat is, jól meghatározott periódus-luminozitás összefüggést követnek (Soszyński és mtsai, 2011a), és távolságmérésre is használhatók. A BLHer csoportba tartozó csillagok karakterisztikus másodmaximumokat mutatnak a fényváltozásukban, analóg módon a klasszikus cefeidáknál megfigyelt Hertzsprung-

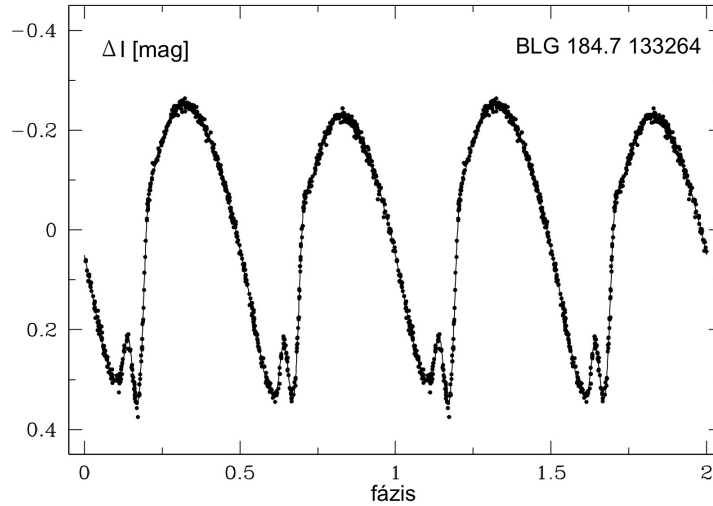


4.17. ábra. Perióduskétszerezést és modulációt egyidejűleg mutató egydimenziós hidrodinamikai BL Herculis modellek sugárváltozásai. Jobbra a változások egy-egy részlete látható kinagyítva (Smolec és Moskalik, 2012).

progresszióval, ami hasonlóképpen az alapmódus és a második felhang közötti rezonancia hatásaként értelmezhető (Hodson és mtsai, 1982). Ezek az objektumok tehát sok szempontból (pl. tömeg, kémiai összetétel) hasonlóak az RR Lyrae csillagokhoz, de két-háromszor nagyobb luminozitásúak.

Smolec és Moskalik (2012) és Smolec (2016) II. típusú cefeidák hidrodinamikai modelljeit vizsgálták, melyek 3:2-es rezonanciát mutatnak az alapmódus és az első felhang között. Ez a mechanizmus egyéb tekintetben hasonlít a 9:2-es rezonanciához. A hidrodinamikai modellek, valamint amplitúdóegyenletek alkalmazásával azt találták, hogy a szóban forgó rezonancia nemcsak szabályos, de irreguláris és kaotikus modulációt is képes előállítani, ami még hasonlóbbá teszi az RR Lyrae csillagoknál megfigyelt, időben változó modulációs ciklusokhoz. Ilyen modulációt viszont a BL Herculis csillagoknál egyelőre nem figyeltek meg. A 3:2-es rezonancia – hasonlóan az RR Lyrae csillagokhoz, legalábbis a rezonancia paradigma keretein belül – nemcsak modulációt okoz, hanem perióduskétszerezést is a BL Her csillagokban. A perióduskétszerezést mutató paramétertartomány egy részhalmazán sikerült a modulációt mutató modelleket lokalizálni (4.17 ábra). Hasonlóképpen, a 9 napnál hosszabb periódustartományban is megjelent a perióduskettőződés. Ebben a régióban a magas luminozitású pulzáló csillagokat találjuk. Bár sejtését minden kétséget kizáróan nem tudta igazolni, Smolec (2016) itt a második felhang és az alaphang közötti 5:2 rezonanciát valószínűsíti a perióduskettőződés okaként. Érdekeség, hogy az RR Lyraeknél általunk talált 9. felhanghoz hasonlóan ezen modellek egy része is mutatott a felszínhez közeli, befogott (strange) módust, jelesül a negyedik radiális felhangot.

Az eredmények ékes demonstrációját adják annak, hogy az általunk talált dinamikai jelenségek más pulzáló változócsillag-típusban is megtalálhatók, valamint, hogy a rezonancia paradigma valóban működik. Az egyetlen hátramaradó kérdés, hogy milyen fizikai feltételek között, milyen paramétertartományban működhet a folyamat az RR Lyrae csillagokban. Vagy ha nem működik, akkor valamilyen összetevő hiányzik vagy hibás a csillagok fizikai leírása-



4.18. ábra. Az OGLE által a galaktikus dudorban talált, perióduskettőződést mutató BL Her csillag fénygörbéje fázisba tekerve (Smolec és mtsai, 2012).

ban. A kettő- és háromdimenziós pulzációs hidrodinamikai kódok minden bizonnyal ezen a területen is áttörést hozhatnak: megerősíthetik vagy elvethetik a 9:2-es rezonanciát, mint a Blazskó-effektus lehetséges magyarázatát.

Az elméleti modelleknek különös aktualitást ad, hogy Smolec és mtsai (2012) és Soszyński és mtsai (2011) két BL Her csillagban is perióduskettőződést figyeltek meg (4.18 ábra). Mindkét objektum a galaktikus dudor irányában látszik.

Végezetül elmondható tehát, hogy az RR Lyrae csillagokban megfigyelt váratlan felfedezés új lendületet adott a dinamikai jelenségei tanulmányozásának a klasszikus pulzáló változócsillagokban, mind megfigyelési, mind elméleti oldalról.

4.2. Extra frekvenciák RR Lyrae csillagokban

At first sight it would seem that the deep interior of the Sun and stars is less accessible to scientific investigation than any other region of the universe. Our telescopes may probe farther and farther into the depths of space; but how can we ever obtain certain knowledge of that which is hidden behind substantial barriers? What appliance can pierce through the outer layers of a star and test the conditions within?

Sir Arthur Eddington, The Internal Constitution of the Stars (1926)

4.2.1. Bevezetés

Az RR Lyrae csillagokat évtizedeken keresztül a pusztán radiális módusokban (nagy amplitúdóval) rezgő csillagok prototípusainak tekintették. Az egyre pontosabb földi, és különösképpen az űrtávcsöves adatok térnyerésével azonban ez a kép megdőlni látszik. Kiderült, hogy az első radiális felhangban rezgő (RRc) csillagok nagy többsége extra frekvenciákat is mutat, főként, ha űrfotometriai vizsgálatnak vetjük őket alá. Ezek közül is figyelemre méltó az a csoport, amelyik $P_x/P_1 \approx 0,61$ periódusarányt mutat, ahol P_x az ismeretlen eredetű változás periódusa, P_1 pedig az első felhangé. Ilyen extra periódust RRd, azaz két radiális módban rezgő RR Lyrae csillagoknál is találtunk.

Az első ilyen csillagot a MOST-űrtávcső fedezte fel (Gruberbauer és mtsai, 2007). Az AQ Leo klasszikus kétmódusú RR Lyrae csillagot 34,4 napig észlelte a MOST, de frekvenciaspektruma két extra frekvenciát is mutat a radiális módusokon és lineáris kombinációikon kívül ($f_i = 1,96 \text{ d}^{-1}$ és $f_{ii} = 3,92 \text{ d}^{-1}$). A szerzők szerint f_{ii} -t a harmadik radiális felhanggal lehet azonosítani, ekkor pedig f_i nemradiális módus lehet, 2:1-es rezonanciában a harmadik radiális felhanggal. f_i és az első felhang aránya 0,6211. Mint később látni fogjuk, az általunk preferált magyarázat szerint f_{ii} perióduskettőződést mutató nemradiális módus. Ezt követően földi megfigyelések alapján Jurcsik és mtsai (2008) mutattak ki extra frekvenciákat az MW Lyr nevű, erősen Blazskó-modulált RRab fénygörbéjében, a $k f_0 + 12,5 f_m$ helyeken, ahol f_0 az alaphatódus frekvenciája, f_m a moduláció frekvenciája, k pedig pozitív egész szám. Láthatóan az extra periodicitások nem illeszkednek a radiális sajátmódusok spektrumába, sem pedig a matematikailag jól leírható (Szeidl és Jurcsik, 2009; Benkő és mtsai, 2011) moduláció okozta mellékcúcsrendszerbe, így gyanítható, hogy nemradiális módus(ok)ról lehet szó. Ezután – még mindig a földi észleléseknél maradva – az ω Centauri gömbhalmaz RR Lyrae csillagai között sikerült az AQ Leonishoz hasonló frekvenciaarányú csillagokat kimutatni (Olech és Moskalik, 2009). A lengyel szerzők 6 ilyen RRc-t találtak, a periódusarányok 0,608–0,622 közé esnek. Soszyński és mtsai (2009) az OGLE LMC-adataiban, míg Süveges és mtsai (2012) az SDSS adatbázis át-

fésülésével járt sikerrel: összesen négy további, 0,61-es periódusarányt mutató RRc csillagot találtak. Közös jellemzőjük, hogy az extra frekvencia jóval alacsonyabb amplitúdójú, mint a radiális módus(ok).

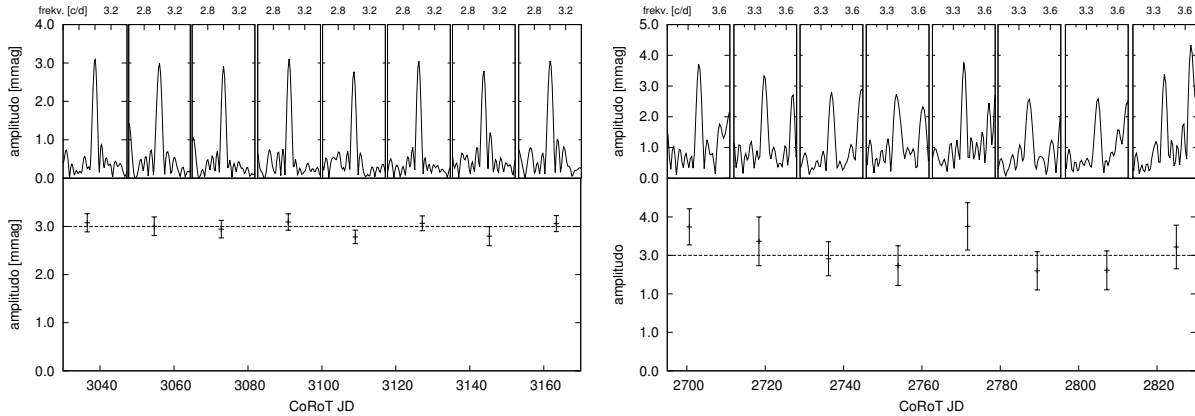
Érdemes megemlíteni, hogy a felhangban pulzáló cefeidák között is szép számmal találunk az említett periódusarányt mutató, extra frekvenciával rezgő csillagokat (Moskalik és Kołaczowski, 2009). A mai napig több mint 200 ilyen cefeida ismeretes (Moskalik, 2014), melyek periódusaránya szintén 0,60–0,65 közé esik. Ezek a cefeidák három jól elkülönülő szekvenciát alkotnak a Petersen-diagramon. Mivel a radiális sajátmódusok spektrumára szorítkozva nem magyarázhatók ezek a periodicitások, a legvalószínűbb, hogy nemradiális módusokkal van dolgunk.

Természetesen egyéb lehetséges magyarázatok is felmerülnek, például ha a felszínen inhomogenitások, foltok vannak, akkor a forgás révén ezek okozhatnának periodicitást a csillagok fényváltozásában. Azonban az RR Lyrae (és a cefeida) csillagok nem forognak igazán gyorsan, a megfigyelt periódusok legalább egy nagyságrenddel rövidebbek, mint a csillagok forgása, így ez a magyarázat kizárható. Mágneses aktivitás vagy kettősség szintén szóba jön, de kevés erre utaló jel vagy mérés született a mai napig, ráadásul egyes csillagoknál ezek egyértelműen kizárhatók. Így legvalószínűbb magyarázatként a nemradiális pulzációs módusok jelenlétét fogadjuk el. Ennek megerősítéséhez (és a többi magyarázat részleges vagy teljes kizárásához) érzékeny, nagy felbontású spektroszkópai mérések kellenének.

Elméleti oldalról Dziembowski (2012) kísérelte meg az első plauzibilis elméleti magyarázatát és azonosítását adni ezeknek az extra módusoknak az első felhangbeli cefeidáknál, és azt találta, hogy a magas ℓ -hez tartozó ($\ell = 42, 46, 50$) f -módusok jelenthetik az egyetlen lehetséges magyarázatot a cefeidákban található rejtélyes módusokra. Legújabban Dziembowski (2016) az $\ell = 7, 8, 9$ f -módusokat jelölte meg az RR Lyrae csillagok 0,61 körüli frekvenciacsúcsainak magyarázataként. Ennek a forgatókönyvnek is megvannak azonban a maga nehézségei. Elsősorban a túl magas rendek és ezzel összefüggésben a szükséges túl nagy amplitúdó jelentik az Achilles-sarkát ennek az elképzelésnek. Látható, hogy a cefeidák és RR Lyrae csillagokban is előforduló, nagyon hasonló periódusarányú extra frekvenciák előfordulása ellenére kevésbé értjük ezen periodicitások eredetét.

4.2.2. Extra frekvenciák a CoRoT RR Lyrae csillagaiban

A radiális pulzációs móduson és annak harmonikusain kívül tehát további szignifikáns csúcsok is megjelennek az RR Lyrae csillagok frekvenciaspektrumában. Ezek tanulmányozásához és jobb megértéséhez ideális lehetőséget kínáltak az űrfotometriai missziók. Először a CoRoT által megfigyelt RR Lyrae csillagok extra frekvenciáit és azok időfüggését vizsgáltam (Szabó és mtsai, 2014), még a hosszabb Kepler-adatsorokra alapuló eredmények publikálása előtt. Korábban hasonló vizsgálat nem jelent meg a témában. Eredményeim alapján ezen periodicitások erőssége (amplitúdója) erős időfüggést mutat. Először a vizsgálatok módszertanát ismertetem.



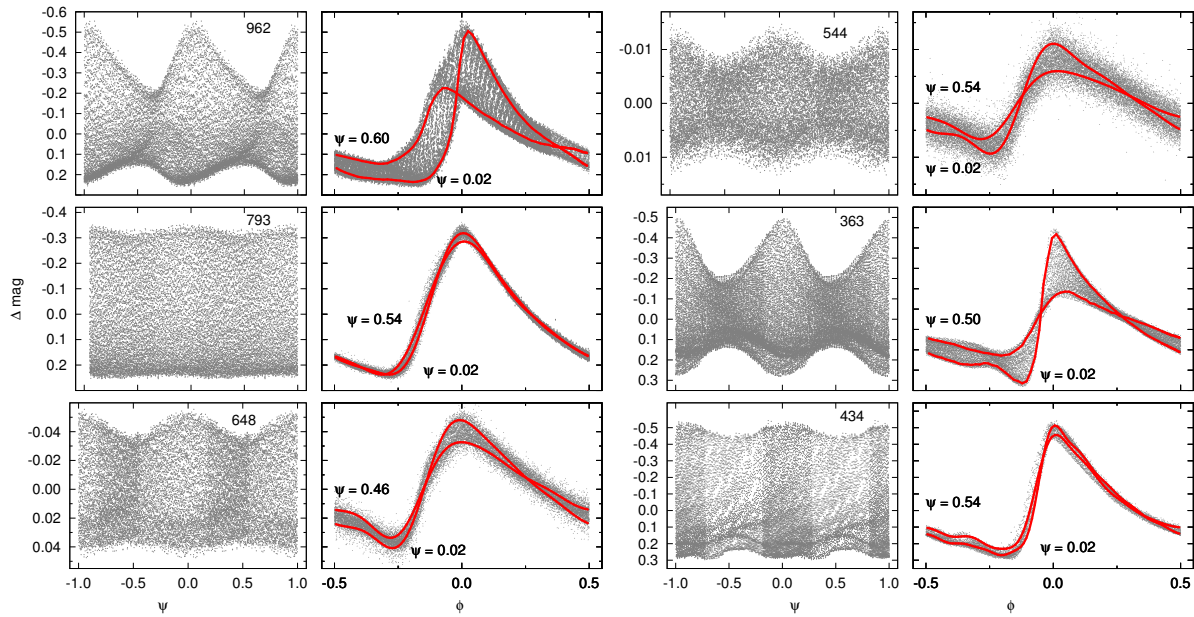
4.19. ábra. Kis amplitúdójú jelek időfüggésének tesztelése. **Bal oldal:** Három millimagnitúdó amplitúdóval, $f_{\text{test}} = 3.0 \text{ d}^{-1}$ frekvenciájú jelet adtam a 241 jelű CoRoT RRc csillag fényváltozásához, majd ezt rekonstruáltam. **Jobb oldal:** Bonyolultabb frekvenciaspektrum. Itt az erős Blazskó-modulációt mutató, 962 jelű RRab csillag fényváltozásához kevertem konstans, 3 mmag amplitúdójú szinuszos változást. Frekvenciának $f_{\text{test}} = 3.4 \text{ d}^{-1}$ -et választottam. A horizontális vonal mindkét esetben a bevitt jel amplitúdóját mutatja, a pontokat és hibáikat a szövegben tárgyalt módszerből kaptam. A felső panel a rekonstruált frekvencia környezetét mutatja a 8 részre osztásból adódó időszakaszokban (Szabó és mtsai, 2014).

Az extra frekvenciák vizsgálatának módszerei

A frekvenciák időfüggésének vizsgálatához az adatsorokat egyenlő hosszúságú részekre daraboltam, és a frekvenciatartalmukat, a csúcsok amplitúdóit és bizonytalanságait a `Period04` programmal határoztam meg. A legtöbb esetben 8 egyforma időszellett dolgoztam, ami jó kompromisszumnak bizonyult a frekvenciafelbontás, a jel/zaj viszony és az időfelbontás között. A domináns pulzációs módust, annak harmonikusait és a modulációs oldalcsúcsokat minden esetben levontam, mielőtt a kérdéses extra frekvenciák jellemzőit megvizsgáltam volna.

Először azt teszteltem, hogy a fehérítés, az erős Blazskó-moduláció és az időtől függő frekvenciák jelenléte mennyiben befolyásolják a módszerem érzékenységét az időfüggő, alacsony amplitúdójú jelek detektálhatóságának tekintetében. Kezdetnek a 241-es RRc csillag fényváltozásához adtam hozzá egy konstans 3,0 mmag amplitúdójú, szinuszos jelet, aminek a frekvenciája $3,0 \text{ d}^{-1}$ volt. Ennek a csillagnak a frekvenciaspektruma csak zajt tartalmaz a $3,0 \text{ d}^{-1}$ frekvencia környezetében. Ezután a tesztfénygörbét a többi csillagnál alkalmazott módszernek vettem alá. Ahogy az a 4.19 ábra bal oldalán látható, a konstans amplitúdójú jelet visszakaptam, az amplitúdó hibája mindössze néhány százalék, és sehol sem haladja meg a 10%-ot. Ez a teszt azt mutatta, hogy a nem túl zsúfolt frekvenciaspektrumok esetén jó esélyem van a kis amplitúdójú, időben változó jelek vizsgálatára.

A 4.19 ábra jobb oldali panelje egy komplexebb Fourier-spektrumot mutat. Itt a 962-es jelű, erős Blazskó-modulációt mutató csillagot vettem alapul, aminek a spektruma több extra frekvenciát is mutat (Chadid és mtsai, 2010), ami komplikálja az analízist. Ebben az esetben $f_{\text{test}} = 3,4 \text{ d}^{-1}$ frekvenciájú, 3 mmag amplitúdójú jelet injektáltam. Ahogy várható volt, itt nagyobb



4.20. ábra. Fázisba rendezett CoRoT blazskós fénygörbék. **Balra:** a moduláció periódusával, **jobbra:** a pulzáció periódusával feltekerve. Reprezentatív átlagolt fénygörbék láthatók a jobb oldali paneleken, a moduláció két szélső helyzetében, pirossal jelölve. Ψ : a modulációs (Blazskó-) fázis ϕ : a pulzációs fázis. A szürke pontok az egyedi fényességméréseket mutatják (Szabó és mtsai, 2014).

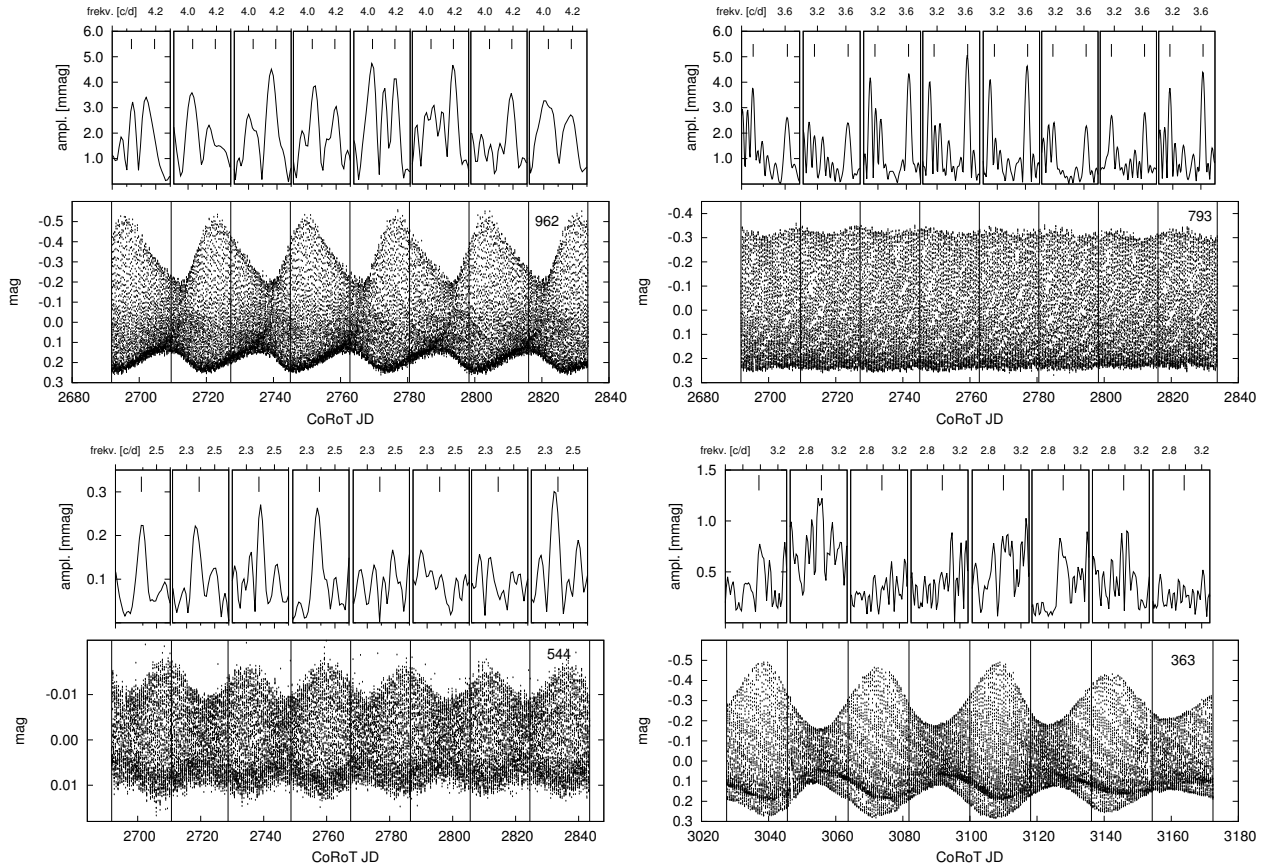
szórással kaptam vissza az állandó amplitúdójú jelet. Nem volt ritka a 10 százaléknyi eltérés, egyes esetekben pedig még ennél is nagyobb különbség mutatkozott a beadott és a visszakapott jel amplitúdója között. A formális hibahatárok egészen jól visszaadják a tapasztalt bizonytalanságot, és a frekvenciacsúcs alakja sem torzul mindaddig, amíg a vizsgált frekvencia közvetlen közelében nincsenek további frekvenciacsúcsok. Mindenesetre a teszt megmutatta, hogy a frekvenciacsúcsokban gazdag spektrumok esetében – így a Blazskó-effektust és a perióduskettőződést mutató csillagoknál –, különös figyelmet kell fordítani az időbeli vizsgálatok értelmezésére.

Az R Rab csillagok

A CoRoT által észlelt blazskós R Rab csillagok pulzáció és moduláció szerint fázisba rendezett fénygörbéje a 4.20 ábrán látható.

A 962 blazskós CoRoT-csillag frekvenciaspektrumában található egy független csúcs $f' = 4,03265 \text{ d}^{-1}$ frekvenciánál (Chadid és mtsai, 2010). Ez elég közel esik a $3/2f_0$ frekvenciaértékhez, ami megnehezíti ezen frekvenciák időbeli vizsgálatát. Ennek ellenére a 4.21 ábra bal felső paneljén jól látszik, hogy mind a fél-egész frekvencia, mind pedig f' időben jelentős változásokat mutat.

A CoRoT 793-es blazskós R Rab csillagában azonosítható egy $f' = 3,63088 \text{ d}^{-1}$ frekvencia, ami az alaplómódussal vett frekvenciaarányából ítélve akár a második radiális felhang is lehet (Poretti és mtsai, 2010). Az alaplómódussal és annak harmonikusaival vett kombinációi ($f' + kf_0$,



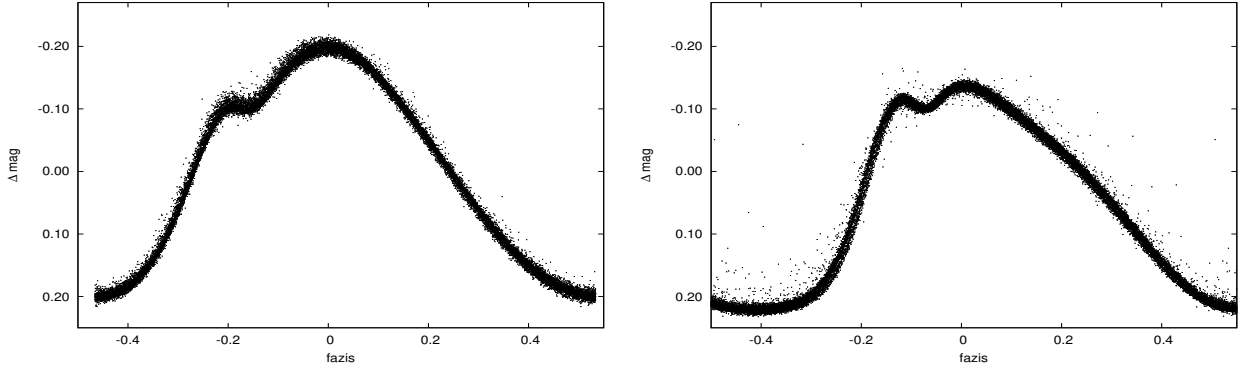
4.21. ábra. A CoRoT Blazskó-csillagaiban talált extra frekvenciák időbeli változása. A fénygörbék adatsorait nyolc egyenlő részre vágtam, a domináns pulzációs frekvenciát, annak harmonikusait és a moduláció okozta oldalcsúcsokat levontam. Az extra frekvenciák (ezek pontos helyét rövid, függőleges vonalak jelölik) környezete és annak változásai a Fourier-spektrumban a felső sorban láthatóak. Az alsó panelek mindenhol magát az időben nyolc egyenlő részre osztott fényváltozást mutatják. **Balra fent:** A $3/2f_0 = 4,1916 \text{ d}^{-1}$ fél-egész és a $f' = 4,03265 \text{ d}^{-1}$ extra frekvencia időbeli változása a 962-es jelű csillagban. **Jobbra fent:** Ugyanez, a 793 jelű blazskós R Rab esetében. A frekvenciák: $3/2f_0 = 3,159 \text{ d}^{-1}$ és $f' = 3,63088 \text{ d}^{-1}$. **Balra lent:** A blendben látszó 544 blazskós RR Lyrae $f' = 2,389287 \text{ d}^{-1}$ extra frekvenciájának időbeli változása. **Jobbra lent:** Ugyanez a blazskós 363 csillagra, ahol $f' = 2,98400 \text{ d}^{-1}$.

$k = 0, 1, 2, \dots$) jól azonosíthatóak a 4.9 ábrán a harmonikusok és a fél-egész frekvenciák között. Ahogy a 962-es számú csillagnál is, mind a $3/2f_0$, mind pedig az f' időbeli változásokat mutat (4.21 ábra, jobb felső panel).

A 648-as jelű blazskós R Rab csillagban nem találtam extra frekvenciát a 3σ detektálási határig. Ennek egyik oka az lehet, hogy a csillagot a CoRoT összemérte számos halványabb objektummal, ami miatt a megfigyelhető amplitúdók jelentősen csökkentek (bővebben lásd a 2.2.2. fejezetet).

Az 544-es blazskós csillag szintén egy összemért csillag, ezért változásainak amplitúdója igen jelentős mértékben csökkentve jelenik meg a CoRoT megfigyeléseiben. Ennek ellenére találtam extra periodicitásokat a frekvenciaspektrumában, többek között $f' = 2,389287 \text{ d}^{-1}$ frekvenciánál. A 4.21 ábra bal alsó része kiválóan mutatja az f' időbeli változásait.

A 363-as jelű modulált R Rab csillag spektrumában látszik egy független frekvenciacsúcs,



4.22. ábra. CoRoT RRc csillagok fázisba rendezett fénygörbéi. **Balra:** 241, **jobbra:** 652 (Szabó és mtsai, 2014).

$f' = 2,98400 \text{ d}^{-1}$ -nél. Ennek az alaplómódussal vett periódusaránya 0,591, ami megfelel a második radiális felhangnál várt aránynak. A csillag meglehetősen zsúfolt frekvenciaspektruma ellenére megpróbálkoztam ennek a csúcsnak az időbeli viselkedését megragadni (4.21 ábra, bal alsó panel). Bár vannak a változásra utaló jelek, ezt nem sikerült minden kétséget kizáróan bizonyítani. Ráadásul felmerült a lehetőség, hogy ez a periodicitás egy közeli, a csillagtól független forrásból származik (Guggenberger és mtsai, 2011). Guggenberger és mtsai (2012) szerint a csillagban további periodicitások is jelen vannak, egy az első felhang mellett ($f_1 = 2,3793 \text{ d}^{-1}$, periódusaránya 0,741), és egy valószínű nemradiális módus ($f_{nr} = 2,4422 \text{ d}^{-1}$, $f_0/f_{nr} = 0,722$). Ezen extra frekvenciák amplitúdója azonban túl kicsinek bizonyult a részletes időbeli analízishez.

A 434-es jelű blazskós RRab csillagban a legerősebb extra frekvencia ($f' = 2,612196 \text{ d}^{-1}$) időbeli viselkedését vizsgáltam. Az eredményt a 4.23 ábra bal felső paneljén mutatom. Az ábra az alaplómódus (f_0), annak harmonikusai és a modulációs oldalcsúcsok levonása után készült. A periodicitás amplitúdója egyértelműen változott a megfigyelés időtartama alatt. Ennek a frekvenciának az alaplómódussal vett nagyszámú kombinációja ($kf_0 + nf'$) is megjelenik a spektrumban, ami megerősíti, hogy a változás a csillagból ered, és nem külső forrásból. A frekvenciaarány $f_0/f' = 0,707091$, ami – ha pulzációs módustról van szó – kizárja a radiális eredetet, és nemradiális módust valószínűsít.

Az RRc csillagok

Először vizsgáltam RRc csillagokat a CoRoT-űrtávcsővel. A két megfigyelt, dominánsan első felhangbeli pulzációt mutató csillag fázisba rendezett fénygörbéjét a 4.22 ábrán mutatom be.

Ezek egyike a 241 rövidített jelzéssel illetett csillag. Az első felhang ($f_1 = 2,68153 \text{ d}^{-1}$) frekvenciáján és annak harmonikusain túl ez a csillag $f_1/f_X = 0,613$ frekvenciaarányú periodicitást is mutat, ahol $f_X = 4,37783 \text{ d}^{-1}$. Ez a frekvenciaarány meglepően sokszor fordul elő első felhangban pulzáló RR Lyrae és cefeida csillagokban (lásd pl. Moskalik 2013, 2014; Moskalik és mtsai, 2015). Csillagunk egy további reprezentánsa ennek az újonnan felismert csoportnak. Mivel f_X nem illeszkedik az RR Lyrae csillagok megfigyelt és elméleti sajátmódusainak sorába,

legvalószínűbb, hogy nemradiális módussal állunk szemben.

A frekvenciaspektrumban a domináns első felhang és harmonikusai eltávolítása után az f_X -en kívül is találunk alacsony amplitúdójú frekvenciákat, a legmagasabb közülük $f'' = 2,345174 \text{ d}^{-1}$, aminek 0,57 mmag az amplitúdója. Azonban hogy elkerüljem az adatok túlintertetését, megálltam a további fehérítéssel. A maradék spektrum átlagos szórása mindössze 0,09 millimagnitúdó.

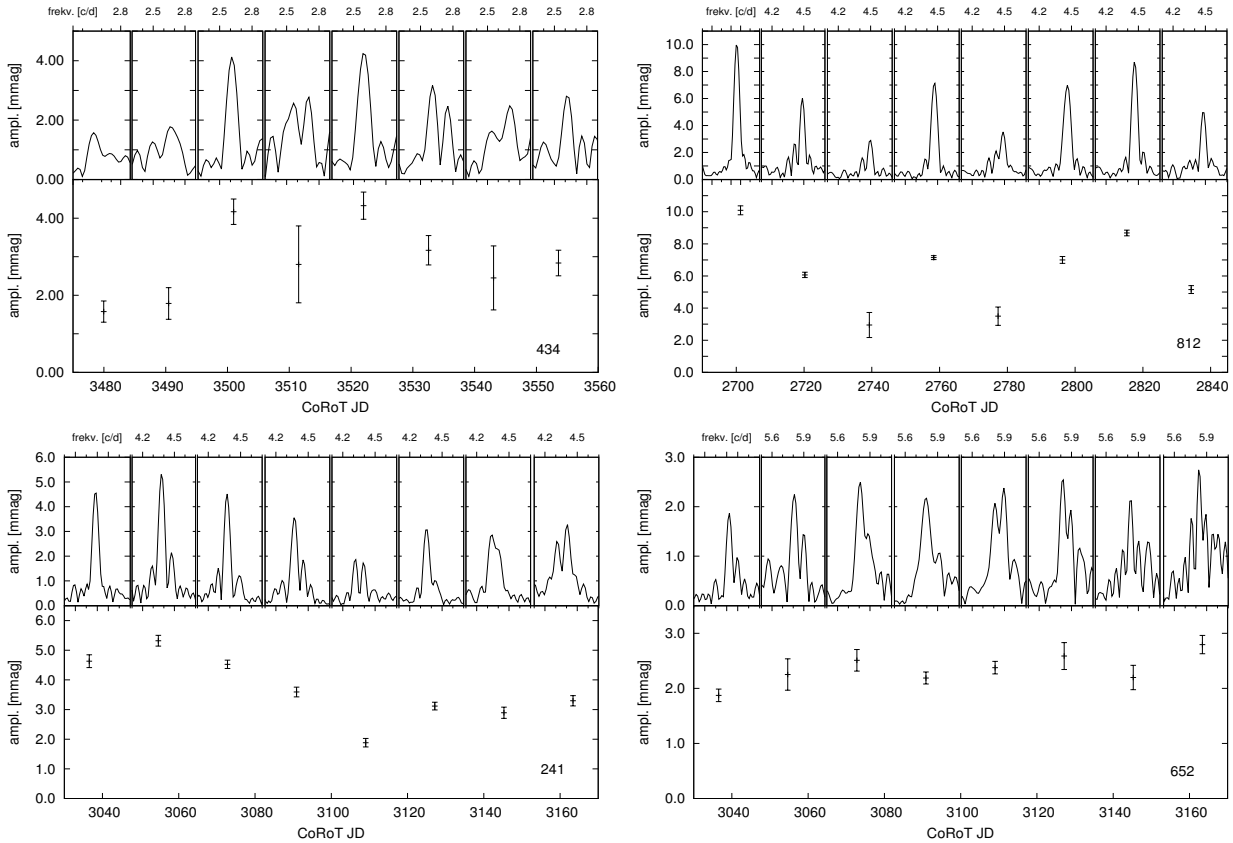
A 4.23 ábra bal alsó panelje mutatja a 241-es csillag f_X frekvenciacsúcsának időbeli változását. Egyértelmű hullámszerű változást látunk az amplitúdóban (alsó rész). Az ábra felső részén a frekvenciacsúcs közvetlen környezetének kinagyított részletét ábrázoltam. A felül ábrázolt szakaszok megfelelnek azoknak az időintervallumoknak, amikben az alsó panelen mutatott amplitúdót számoltam. Szembetűnő a frekvenciacsúcs alakjának változása is. A csúcs időnként két alcsúcsra bomlik, ami vagy egy közeli, független frekvencia jelenlétére utal, de okozhatja a frekvenciacsúcs amplitúdójának (és/vagy frekvenciájának) változása is. Megjegyzendő, hogy a Kepler-adatok ismeretében ez utóbbi magyarázat a valószínűbb (4.2.3. fejezet). A változás mindenesetre meggyőzően látható a 145 napos megfigyelési időszak alatt. Megjegyzendő még, hogy a Fourier-spektrumban megjelennek az f_X változásával kapcsolatos mellékcsúcsok is (Szabó és mtsai, 2014).

A 652-es CoRoT RRc-csillag sok szempontból hasonlít az előbb taglalt objektumhoz. Fázis szerint rendezett fénygörbéje a 4.22 ábra jobb oldalán látható. Mindkét csillagnál jellegzetes a maximum előtt bekövetkező másodlagos maximum (púp). Ahogy sok RRc-nél, itt is megtalálható az extra frekvencia, melynek az első felhanggal vett aránya: $f_1/f_X = 0,615$. Az f_X frekvencia időbeli változását a 4.23 ábra jobb alsó paneljén szemléltetem. A frekvencia struktúrája nagyon hasonló változásokat mutat, mint a társáé, a fentebb említett 241 csillagé, habár az amplitúdó nem változik olyan drasztikusan.

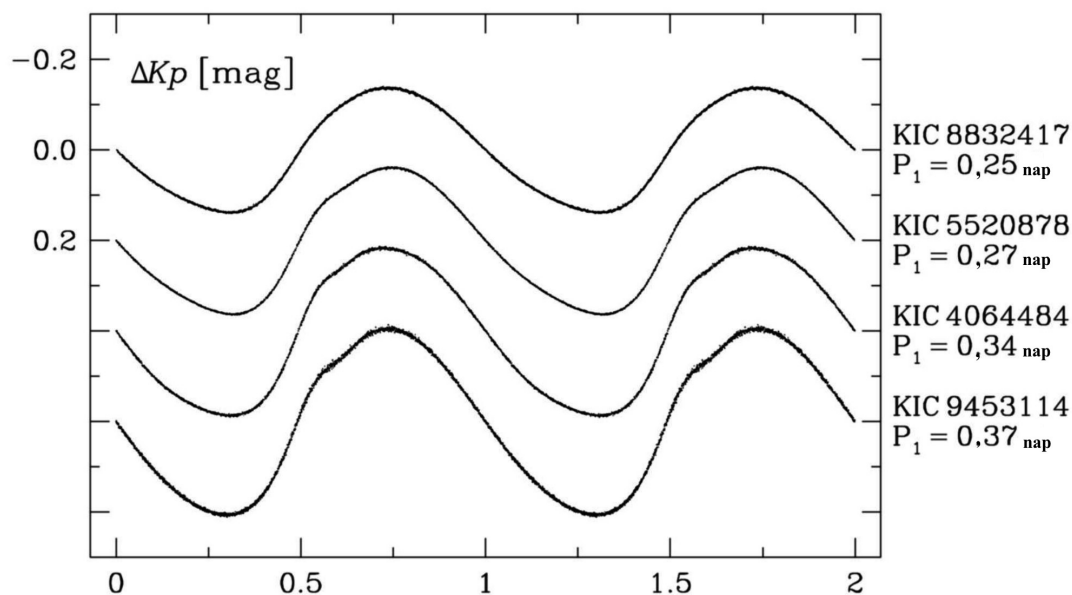
Az RRd csillagok

Megvizsgáltam a 812 jelű RRd csillagban talált extra frekvencia ($f_X = 4,4786159 \text{ d}^{-1}$, Chadid, 2012) időfüggését¹⁵. Az eredmények a 4.23 ábra jobb felső paneljén láthatók. Ebben az esetben mind az alapmódus (f_0), mind az első felhang (f_1) frekvenciáival és harmonikusaival, valamint ezek lineáris kombinációival is fehérítettem a frekvenciaspektrumot. Az f_X periodicitás itt is időbeli változást mutat. Azt is ellenőriztem, hogy ez a változás az eredeti frekvenciaspektrumban is jelen van (fehérítés nélkül), tehát nem a frekvenciák levonásának melléktermékeként jelentkezett. Megmutattam, hogy a változás nem az f_0 és f_1 (alap és első felhang) módusok változásaiból adódik, sem pedig az adateloszlás (spektrálablak) jellegzetességei nem hozhatják létre. Így tehát minden valószínűség szerint valódi, jelentős amplitúdóváltozást látunk ennek a periodicitásnak az esetében is.

¹⁵A Chadid (2012) cikk jelölésében: f_2 .



4.23. ábra. RRab, RRd és RRC csillagok extra frekvenciáinak időbeli változása. **Balra fent:** A CoRoT 434 jelű Blazskó-modulációt mutató RR Lyrae csillagában az $f' = 2,61219586 \text{ d}^{-1}$ frekvenciacsúcs változásai. Az alpmódus frekvenciáját, annak harmonikusait, a moduláció okozta mellékcsúcsokat és a moduláció frekvenciáját levontam. Felső panelek: az f' csúcs környezete a frekvenciaspektrumban, alsó panelek: a csúcs amplitúdójának változásai. **Jobbra fent:** Ugyanaz, a 812-es RRd csillag $f_X = 4,4786159 \text{ d}^{-1}$ frekvenciájának időbeli változására. Az első felhang és harmonikusainak frekvenciáit levontam. **Balra lent:** A CoRoT 241-es RRC csillaga által mutatott $f_X = 4,37783 \text{ d}^{-1}$ frekvencia időbeli változása. Az első felhang és az alpmódus, valamint harmonikusaik frekvenciáit itt is levontam. **Jobbra lent:** Ugyanez a 652-es RRC-re. Ebben a csillagban kisebb az amplitúdó, de az $f_X = 5,82484 \text{ d}^{-1}$ csúcs szerkezete sok tekintetben hasonló változásokat mutat, mint amit az előző csillagban látunk (Szabó és mtsai, 2014).

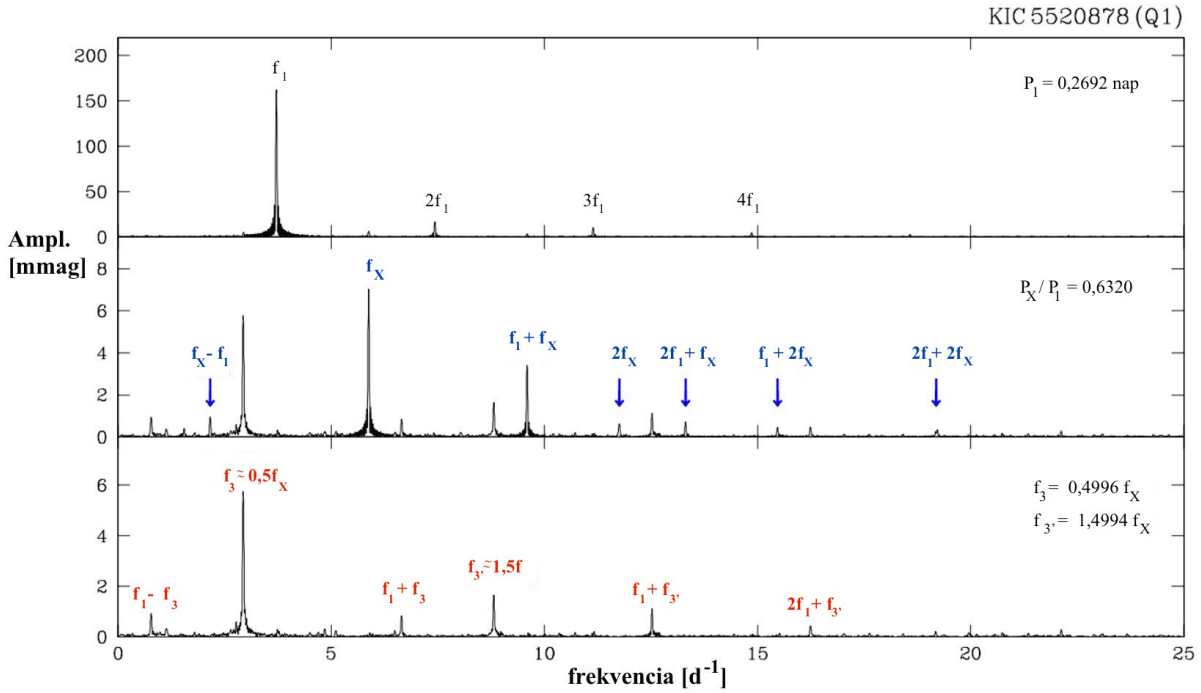


4.24. ábra. A Kepler által megfigyelt RRc csillagok domináns, radiális első felhangbeli pulzációjának alakja. Az x tengelyen a fázis, az y tengelyen a Kepler fotometriai sávjában mért fényesség (K_p) található normalizálva és a jobb láthatóság kedvéért önkényes konstanssal eltolva. A periódus szerint sorba rendezett, feltekert fénygörbék illesztett Fourier-paraméterek alapján készültek (Moskalik és mtsai, 2015).

4.2.3. Extra frekvenciák a Kepler RR Lyrae csillagaiban

Ahogy említettem, az egyre pontosabb űrfotometria lehetővé tette, hogy a radiális módusoknál jóval kisebb amplitúdójú, feltehetően nemradiális módusok jelenlétét is kimutassuk az RR Lyrae csillagokban. Ebben az alfejezetben a témával kapcsolatos, Kepler-űrtávcsővel talált eredményeinket mutatom be. A Kepler a hosszabb megfigyelési időtartama révén még pontosabb betekintést engedett az RR Lyrae csillagok extra frekvenciáinak viselkedésébe.

Már az első néhány hónapnyi Kepler-adat átvizsgálása után feltűnt, hogy az addig pusztán radiális alapmódusban pulzálónak hitt (modulált) RRab csillagok frekvenciaspektruma gyakran mutat frekvenciacsúcsokat az első és második radiális felhang elméleti frekvenciaértéke közelében (Benkő és mtsai, 2010), később a szisztematikus vizsgálatok (Molnár és mtsai, 2012a; Benkő és mtsai, 2014; Benkő és Szabó, 2015) feltárták, hogy gyakori jelenségről van szó (lásd még a 4.29 ábrát). Két csillagnál találtunk az első felhang közelében felbukkanó frekvenciacsúcsot: V360 Lyr és az RR Lyr. Ez utóbbi különösen érdekes, hiszen a típus névadójáról, az egyik legjobban tanulmányozott pulzáló változócsillagról derült ki, hogy több módusban pulzálhat. A második felhang környékén frekvenciacsúcsot mutató Kepler RRab csillagok listája: V2178 Cyg, V354 Lyr, V350 Lyr, KIC 7021124. Érdekes, hogy V445 Lyr-nek mind az első, mind a második felhang körül vannak extra frekvenciacsúcsai. Az alábbi csillagok viszont nem mutatnak extra frekvenciát a radiális felhangok közelében: V808 Cyg, V783 Cyg, V349 Lyr, V355 Lyr, V450 Lyr, V353 Lyr, V366 Lyr, KIC 11125706, V1104 Cyg. Azt is érdemes megjegyezni, hogy a nem-modulált RRab csillagok egyáltalán nem mutatnak ilyen frekvenciákat (Nemec és mtsai, 2011).

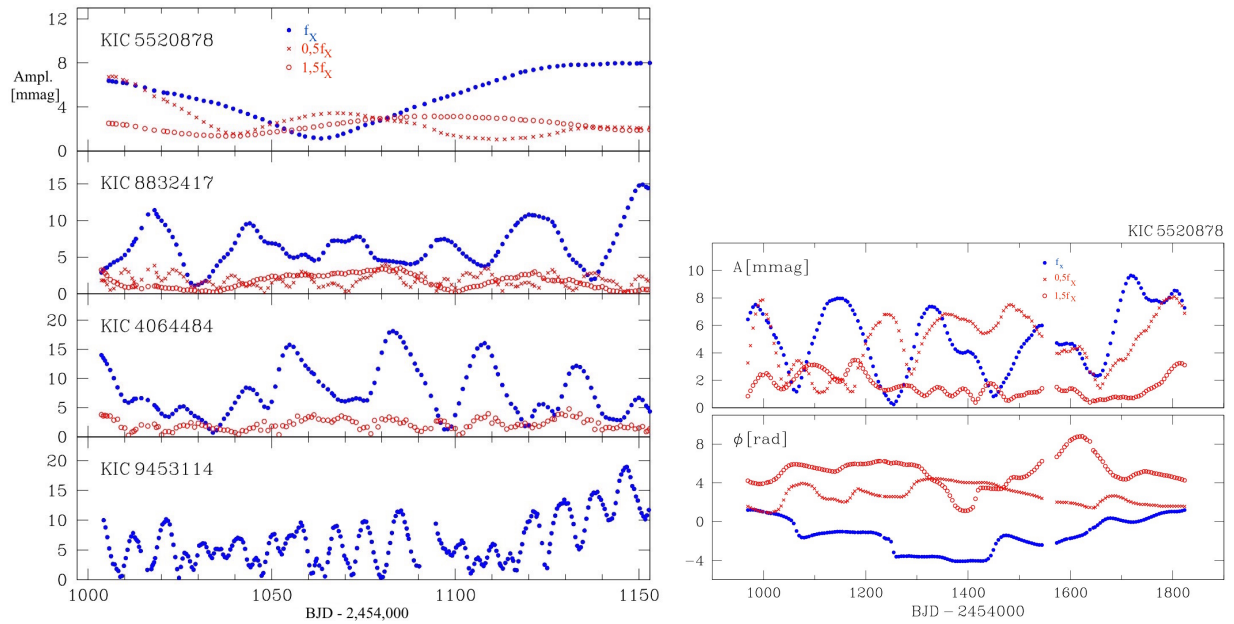


4.25. ábra. A KIC 5520878 jelű RRC csillag eredeti frekvenciaspektruma (felül), majd a domináns módus (középen), illetve az f_X és kombinációs frekvenciáinak levonása után (alul), a Kepler Q1 negyedben gyűjtött adatai alapján (Moskalik és mtsai, 2015).

Az itt említett extra frekvenciák oka – amennyiben pulzációs eredetűek – lehet maga az első vagy második felhanggal azonosítható radiális módus, de az elméletek szerint a radiális felhangok közelében könnyebben gerjesztődő nemradiális módusok is (Dziembowski 1977; Van Hoolst és mtsai, 1998). Legalább egy esetben, magánál az RR Lyrae-nél (Molnár és mtsai, 2012a) konkrét hidrodinamikai modellszámításokkal sikerült igazolni, hogy valóban a radiális első felhang gerjesztődik a csillagban. A prototípus RR Lyrae azért is különleges, mert a perióduskettőződésnél tárgyalt modellek szerint nemcsak az első két radiális módusban rezeg, hanem a kilencedik felhang is gerjesztett, ami a perióduskettőződésért felelős. A modellek és a fénygörbe összehasonlítása arra utal, hogy az első felhang és az alapmódus közötti 3:4 periódusarányjal jellemezhető rezonanciának is lehet szerepe a pulzáció bonyolult dinamikájában. Ugyanakkor a jelenleg alaposabban tesztelt egydimenziós hidrodinamikai pulzációs modellekkel nem sikerült a második radiális felhang jelenlétét megerősíteni RR Lyrae-modellekben.

A Moskalik és mtsai (2015) munkában négy felhangban pulzáló (RRC) csillag 2,5 év hosszú Kepler-adatsorát vizsgáltunk meg részletesen (4.24 ábra). Mind a négy csillag multiperiodikusnak mutatkozott. A legnagyobb amplitúdóval jelentkező másodlagos módusok mind a $P_X/P_1 = 0,612 - 0,632$ periódusarány-tartományba esnek, ami alapján kizárhatjuk radiális pulzációs eredetüket. Amplitúdójuk jellemzően 20–45-ször kisebb, mint a radiális felhangé.

A csillagaink frekvenciaspektrumának általános jellemzőit a 4.25 ábrán szereplő példával mutatom meg. A domináns módus levonása után előtűnik a jóval kisebb amplitúdójú f_X csúcs. Ami még érdekesebb, hogy ennek a csúcsnak a szubharmonikusait is megtaláljuk a frekven-

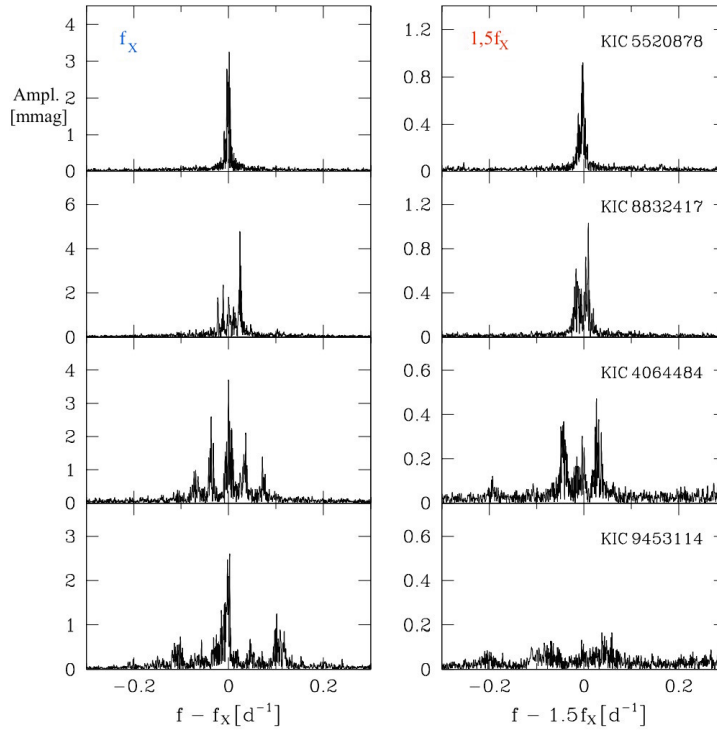


4.26. ábra. **Balra:** A Kepler RRc csillagaiban talált f_X extra módusok és az ezekhez tartozó fél-egész frekvenciák amplitúdóváltozásai egy rövid időintervallumban. A jobb láthatóság kedvéért a KIC 8832417 (KIC 4064484) csillagokhoz tartozó amplitúdókat 1,5 (2,0) szorzófaktorokkal megnöveltük. A KIC 9453114 jelű csillag esetében a szubharmonikusok amplitúdója túl kicsi, nem szignifikáns. **Jobbra:** ugyanez a KIC 5520878 csillagra, de hosszabb, 600 napos viselkedését ábrázolva, alatta a frekvenciacsúcsok fázisainak változásával (Moskalik és mtsai, 2015).

ciaspektrumban, az $1/2f_X$ és a $3/2f_X$ frekvenciák közelében, mégpedig négyből három csillag esetében. Ez perióduskettőződésre utal, de a mechanizmus pontos okáról csak találgatni tudunk, megfelelő modellek és elméleti számítások hiányában.

Ugyanebben a munkában megmutattuk, hogy az extra módusok amplitúdója és fázisa (vagy frekvenciája) 10–100 napos időskálán változnak (4.26 ábra) minden esetben. Ezzel együtt a csúcs megfigyelhető szerkezete is változik a Fourier-spektrumban, amit a 4.27 ábra demonstrál. Ezt Netzel és mtsai (2015c) is alátámasztotta galaktikus dudorbeli csillagokkal. Ők 20–120 napos változásokat kaptak az RRc csillagok 0,60–0,64 periódusarányú extra frekvenciák változékonyságára, 40–60 napos tipikus időskálákkal. Érdekes, hogy a fő radiális módus is mutat változást ezen az időskálán, de jóval kisebb amplitúdóval. Minden esetben erős amplitúdóváltozásokat figyelhettünk meg, amik ráadásul szabálytalanok. Ez és a Kepler hosszú adatsorai-ból következő jó frekvenciafelbontás erős indikáció arra nézve, hogy nem két közeli frekvencia (módus) lebegéséről van szó.

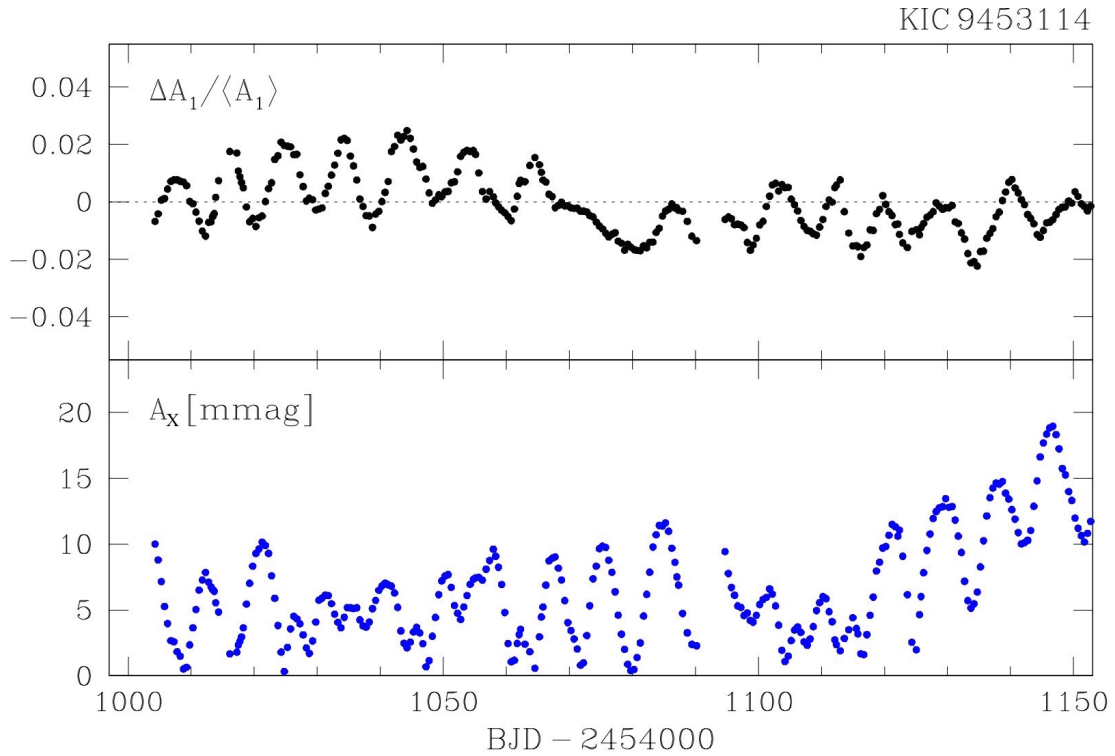
Míg a KIC 5520878 esetében az f_X frekvencia kiszélesedett, addig a másik három csillag esetében több, többé-kevésbé egyenlő frekvenciaközű komponensre bomlik. Ez akár azt is jelenthetné, hogy f_X egy $\ell = 2$ -höz tartozó, nemradiális módus multipletjével azonosítható. Azonban nem ez az egyetlen lehetséges magyarázat: a multipletszerkezet egyes tagjai maguk is kiszélesedettek, amit egyrészt forgási felhasadással lehetne magyarázni (azonos ℓ , különböző m értékek feltételezésével), de az is elképzelhető, hogy ugyanazon módus kváziperiodikus modulációjáról van szó, hiszen ez esetben megjelennek a moduláció periódusához tartozó ol-



4.27. ábra. A Kepler RRc csillagainak a domináns radiális módussal fehérített frekvenciaspektruma f_X és annak másfélszerese közelében a Q0–Q10 negyedek adataiból számolva. Szembetűnő a csúcsok összetettsége (Moskalik és mtsai, 2015).

dalcsúcsok (Benkő és mtsai, 2011). Ha nem teljesen szabályos (szinuszos) modulációval állunk szemben, akkor ez okozhatja a komponensek megfigyelt kiszélesedését. Mivel a radiális f_1 első felhangbeli módusnál is azonos időskálákon figyelhetünk meg modulációt (Moskalik és mtsai, 2015) és felhasadást, így az a magyarázat tűnik a legvalószínűbbnek, hogy a felhasadást és kiszélesedést valamilyen moduláció okozza, hiszen a radiális módus nem hasadhat fel a rotáció hatására. Ekkor azonban a két módusnak csatolódnia kell egymáshoz, és amplitúdóváltozásaiknak antikorreláltaknak kell lenniük. A Kepler-adatokból úgy tűnik, hogy ezt az antikorrelációt figyelhetjük meg ténylegesen (4.28 ábra). Megjegyezzük, hogy ezenkívül a radiális módus amplitúdójában és fázisában hosszabb távú, lassabb változások is megfigyelhetők. Ez utóbbi változások oka nem ismert, de a fejlődés miatt várt változásoknál több nagyságrenddel gyorsabb időskálán zajlanak le, így nem magyarázhatók fejlődési effektusokkal.

A Kepler RRc csillagaiban számos kis amplitúdójú, független frekvencia található. Ezek közül három RRc csillagnál (KIC 9453114, KIC 4064484, KIC 8832417) olyan, millimagnitúdónál is kisebb amplitúdóval jelentkező periodicitást is kimutattunk, melynek periódusa hosszabb, mint az első radiális felhangé, sőt az alaphangnál is (Moskalik és mtsai, 2015). Ez is nemradiális módus lehet, de feltehetően más ℓ és n kvantumszámokkal írható le, mint az eddig P_X -szel jelölt 0,61 periódusarányt szorosan követő, az RRc és RRd csillagok között nagyon elterjedt nemradiális módus. Ilyen hosszú periódusú nemradiális módusok gerjesztése egyáltalán nem elképzelhetetlen (Dziembowski és Cassisi, 1999), de ezek a módusok nem lehetnek tisztán p-



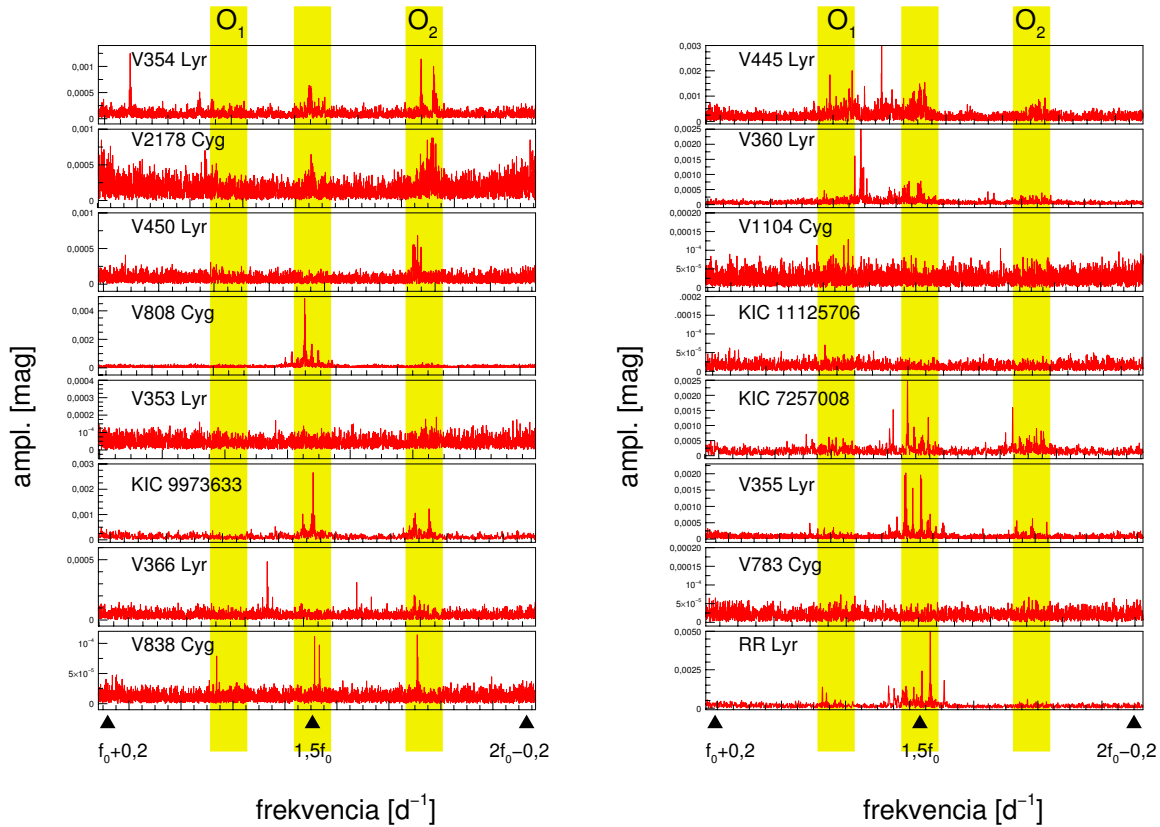
4.28. ábra. A KIC 9453114 RRc csillag esetén a radiális f_1 és a valószínűleg nemradiális f_X frekvenciacsúcsok amplitúdóinak antikorrelációja (Moskalik és mtsai, 2015).

módusok: g-módusoknak vagy kevert (mixed) módusoknak kell lenniük¹⁶. A legegyszerűbb nemradiális módus, a dipól módus ($\ell = 1, m = 1$) jöhet szóba, de egyelőre elméleti oldalról nem világos, hogy a megfelelő amplitúdót elérhetik-e ezek a módusok, sőt az sem, hogy maguk a módusok egyáltalán gerjesztettek-e. Jurcsik és mtsai (2015) spektroszkópiai megfigyelései alapján is kizárhatónak tűnik ez a hipotézis.

4.2.4. Az extra frekvenciák jellemzői és jelentőségük

A CoRoT és a Kepler modulált RRab csillagainak vizsgálatait összegezve megállapítható, hogy a 21 csillagból négy mutat frekvenciát az első, hét pedig a második radiális felhang körül körül (van olyan is, ami mindkettő körül), tíz pedig egyiknél sem. Ezek szerint a modulált RRab-k ötöde mutat jelet az első felhang körül, harmada a második felhang körül, és fele nem mutat ilyen frekvenciát. Megállapíthatjuk tehát, hogy a modulált RRab csillagok fele mutat a radiális felhangokhoz köthető pulzációs módusokat. Ezt legjobban a 4.29 ábra demonstrálja, ahol a Kepler modulált RRab csillagainak normalizált frekvenciaspektruma látható az f_0 és $2f_0$ frekvenciák között. Sárgával jelöltem a perióduskettőződés miatt fellépő, $1,5f_0$ fél-egész frekvencia környékén jelentkező frekvenciák sávját, illetve az elméleti számítások szerint az első (O_1) és második (O_2) radiális felhang várható tartományait. Jól látható, hogy minden blazskós csillag mutat extra frekvenciákat, vagy a perióduskettőződés miatt, vagy a radiális felhangok körül, de azoktól távol is. A 4.30 ábra bal oldala a CoRoT csillagaira mutatja ugyanezt a tendenciát.

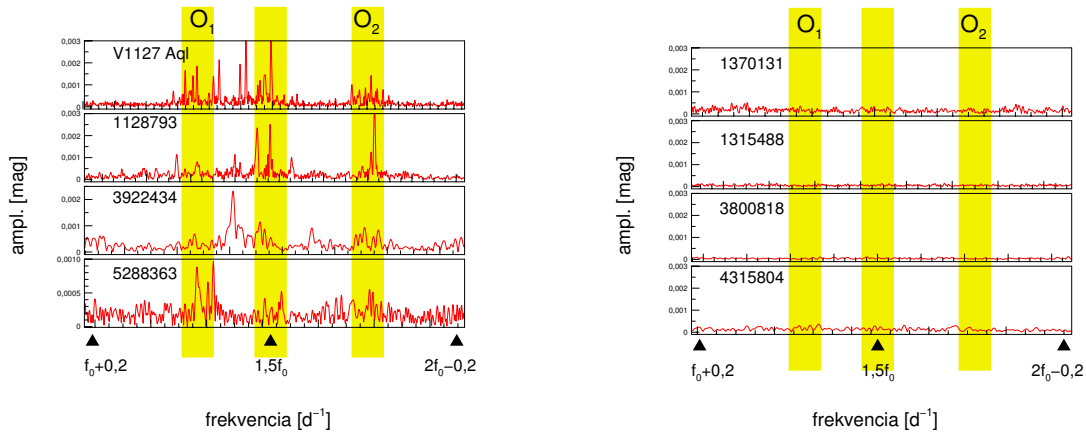
¹⁶Ezek a módusok a csillag belsejében g-módusként, a csillag külső részében pedig p-módusként viselkednek.



4.29. ábra. Extra frekvenciák a Kepler blazskós R Rab csillagaiban (Kolenberg és mtsai, 2011; Benkő és mtsai, 2014). Az ábrán az alapl módus és annak kétszerese közötti frekvenciatartomány látható. Balról jobbra az első radiális felhang, a perióduskettőződés miatti fél-egész frekvenciák ($3/2f_0$) és a második radiális felhang elméletileg várt helyét mutatják a sárga sávok. A V808 Cyg csillagnál a második felhang körüli csúcsok alig láthatók a $3/2f_0$ nagy amplitúdója miatt (Szabó és mtsai, 2015a).

Érdekes, hogy a hasonlóan nagy mintán megvizsgálva **a nemmodulált R Rab csillagok egyike sem mutat extra frekvenciákat** sem a radiális felhangok körül, sem azoktól távol (Nemec és mtsai, 2011; Szabó és mtsai, 2014), ez a CoRoT csillagok esetében a 4.30 ábra jobb oldalán különösen szembeszökő. A CoRoT-csillagok alaposabban vizsgált mintáján láttuk, hogy radiális felhangok környezetén kívül is szép számmal találunk extra frekvenciákat, amelyek nagy valószínűséggel szintén nemradiális módusok. Mindezeket összevetve megállapítható, hogy **csaknem mindegyik modulált (blazskós) R Rab csillag mutat a radiális módusokon kívüli periodicitásokat is**. Érdekes összefüggés, hogy a Blazskó-moduláció, a perióduskettőződés és az extra frekvenciák jelenléte között egyértelmű kapcsolat van, aminek oka azonban nem teljesen tisztázott. Mindenesetre mindhárom jelenség része annak a sokkal bonyolultabb pulzációs nemlineáris dinamikai rendszernek, amelyről néhány évvel ezelőtt még mit sem sejtettünk.

A MOST, a CoRoT és Kepler precíz, folytonos megfigyelései alapján megállapítottam, hogy azon dominánsan első felhangban pulzáló RR Lyrae csillagokban (RRc-k és R Rd-k), melyekről úrfotometriai adatsorok állnak rendelkezésre, minden esetben jelen vannak kis amplitúdójú, extra periodicitások (Szabó és mtsai, 2014; Szabó, 2014). Bár a földi, kisebb pon-

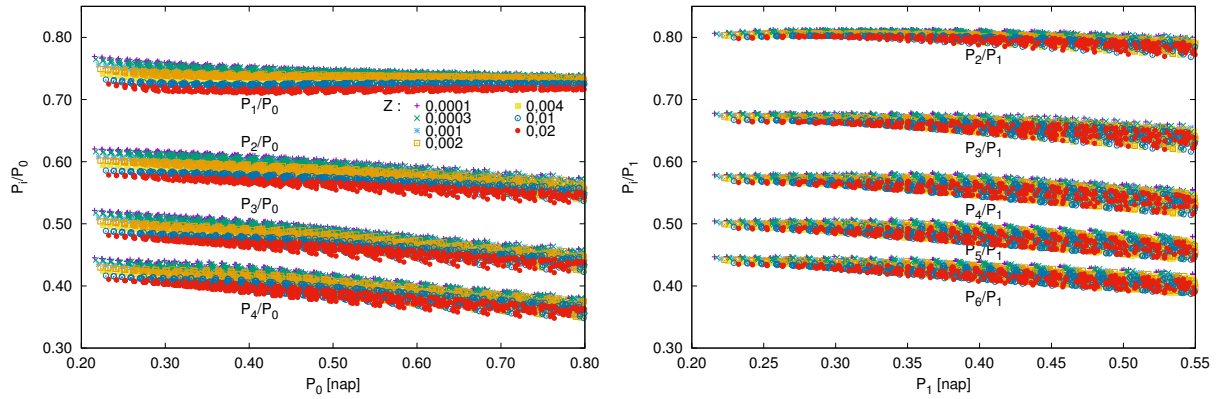


4.30. ábra. Extra frekvenciák a CoRoT RRab csillagokban. **Balra:** Blazskó-modulált csillagok. **Jobbra:** nemmodulált csillagok. A jelölések megegyeznek a 4.29 ábrával. Figyelemre méltó az extra frekvenciák teljes hiánya a nemmodulált csillagokban (Szabó és mtsai, 2015a).

tosságú megfigyelések (pl. OGLE) természetesen csak a csillagok egy részénél képesek ezeket a periodicitásokat kimutatni, a nagyobb mintán talált gyakoriság legalábbis nem zárja ki, hogy minden RRc és RRd csillagnál – kellő pontossággal megfigyelve – jelen vannak járulékos, független frekvenciák (Netzel és mtsai, 2015c; Jurcsik és mtsai, 2015).

Ezek közül a legprominensebb a 0,61–0,63 periódusarányal bíró frekvencia. Mivel lineáris modelljeink alapján ez a periódusarány nem illeszkedik a radiális módusok spektrumához, ahogy ezt a 4.31 ábra egyértelműen mutatja, így ez a frekvencia nem lehet radiális módus. **A legvalószínűbb magyarázat, hogy nemradiális módusról van szó.** A négy vizsgált Kepler RRc csillagból kettő fémgazdag ($[Fe/H]=-0,18$, illetve $-0,27$), kettő pedig fémszegény ($[Fe/H]=-2,13$, illetve $-1,58$) (Moskalik és mtsai, 2015). Úgy tűnik tehát, hogy ezen frekvenciák előfordulását nem befolyásolja a fémtartalom. A CoRoT által megfigyelt RRc csillagok fémtartalma egyelőre nem ismert. Vizsgálataim szerint az extra frekvenciák amplitúdója 2-6%-a a felhang amplitúdójának. Ezt Netzel és mtsai (2015c) a galaktikus bulge irányában (0,6-5,5%) és Jurcsik és mtsai (2015) munkái az M3 gömbhalmazban megerősítették (2-8%).

A CoRoT- és Kepler-idősorok segítségével alapos vizsgálatnak vettem alá a kis amplitúdójú frekvenciák időbeli viselkedését. A modulált RRab csillagokban a perióduskettőződés miatt fellépő fél-egész frekvenciák amplitúdója és alakja is változik időben, ezt a moduláció miatt fellépő frekvenciaváltozásokkal és a jelenség időleges voltaival modelleztem és magyaráztam (Szabó és mtsai, 2010). **Az RRc és RRd csillagokban fellépő, az első felhanggal 0,61–0,63 periódusarányban álló periodicitások időbeli viselkedése minden alaposan megvizsgált, ürfotometriai adatsorral rendelkező csillagban időben változó, inkoherens, az extra frekvencia néha rövid időre el is tűnik. Amplitúdója és a frekvenciacsúcs szerkezete nagymértékben változik, ennek időskálája jellemzően 10–200 nap között van.** Ez a változékonyság valószínűleg a radiális és nemradiális módusok közötti dinamikai kölcsönhatásra vezethető vissza, a Kepler négy év hosszúságú adatsorainak ismeretében a közeli, feloldatlan frekvenciák jelenléte kevésbé valószínű.



4.31. ábra. Lineáris RR Lyrae modellek radiális sajátrezgéseinek spektruma. **Balra:** periódusarányok az alaphangéhoz viszonyítva, **jobbra:** ugyanez az első felhang periódusával. Csak az első néhány radiális felhangot ábrázoltam, széles fémtartalom-tartományban. A különböző fémtartalommal számolt modelleket a bal oldali jelmagyarázat mutatja. Látható, hogy az első felhangban rezgő, tipikus periódussal bíró (0,20–0,45 nap) RRc csillagoknál (jobb oldalon) a 0,61–0,63 periódusarány nem illeszkedik a radiális sajátrezgések spektrumához.

Az említett 0,61-es frekvenciáknál – amelyeket nagy valószínűséggel nemradiális módusokkal azonosíthatunk – perióduskétszerezést találtunk: a fél-egész frekvenciák jelenléte egyértelműen erre utal. Ezek többször nem éles csúcsok, hanem egész csúcserdők jelennek meg az $1/2f_X$ és $3/2f_X$ helyeken. Ez egyrészt adódhat ezek időleges megjelenéséből (lásd Szabó és mtsai (2010) szimulációját és a magyarázatot a 4.1.3 fejezetben). Más alternatíva lehet az, hogy ezeken a helyeken további módusok gerjesztődnek, esetleg ezek a módusok frekvenciában felhasadva jelennek meg (pl. forgás miatt). De a legvalószínűbb, hogy a radiális módusokat is érintő kváziperiodikus moduláció miatt jelennek meg oldalcsúcsok, miközben a multiplet összetevői ki is szélesednek.

Ahogy említettem, 0,61-es periódusaránnal klasszikus cefeidákban is találtak kis amplitúdójú frekvenciákat, elsősorban a Magellán-felhőkben (Moskalik, 2013). Ezek a cefeidák vagy az első felhangban pulzálnak, vagy az alapmódusban és az első felhangban rezgő kétmódusú csillagok. Egyetlen esetben sem találtak pusztán az alapmódusban rezgő csillagnál hasonló jelenséget. Ez tökéletes egyezésben van az RR Lyrae csillagokban találtakkal, és valószínűsíti, hogy azonos magyarázat fog születni mindkét csillagtípusnál ezen módusok megjelenését illetően.

Amennyiben bebizonyosodik, hogy nemradiális pulzáció áll az újonnan felismert periodicitások hátterében, akkor ez megnyitja a lehetőséget az RR Lyrae csillagok szeizmológiai vizsgálata felé, és az oly sikeresen alkalmazott asztroszeizmológiai módszerek (pl. Bedding és mtsai, 2011) ennél a változócsillagtípusnál is bevezethetők lesznek. A pontos hidrodinamikai modellezéshez ugyanakkor a két- és háromdimenziós modellek szerepe megkerülhetetlen lesz. Konklúzióként leszűrhetjük, hogy mindenképpen további elméleti munka szükséges az úrfotometriai adatsorokban talált új, kevésbé értett pulzációs viselkedéssel kapcsolatos kérdések megnyugtató tisztázásához.

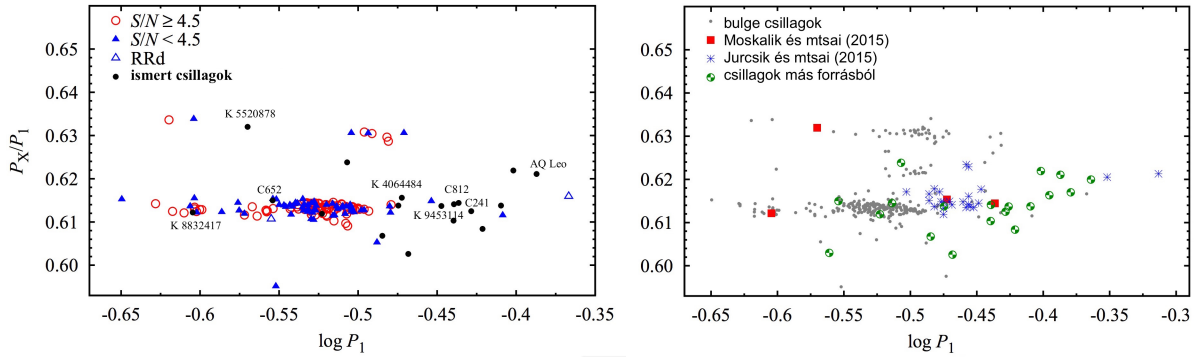
4.2.5. Újabb eredmények

A klasszikus pulzáló változócsillagok általam végzett és vezetett – űrfotometriai adatokon alapuló – vizsgálatai szélesre tárták a kaput a földi megfigyelések dinamikai jelenségekre fókuszáló analízise előtt, és elősegítették azok megfelelő értelmezését is.

Sódor és mtsai (2012) szintén két Blazskó-modulációt mutató RRab csillagnál (XY And és UZ Vir), fedeztek fel 4-4 extra frekvenciát. Mindkét esetben feltételezhető, hogy egy független frekvenciáról van szó, míg a másik három frekvencia az alapmódus frekvenciájával vett lineáris kombináció. Mivel a frekvenciák egy része az erősen csillapított harmadik–hatodik radiális felhang tartományába esik, a kutatók két alternatív magyarázatot adtak az XY And esetében: vagy nemradiális módusról van szó, vagy pedig egy különösen rövid, 5 nap körüli periódusú második modulációval állunk szemben. Az UZ Virginisnél a nemradiális módus mellett felmerül az is, hogy a radiális első felhangot látjuk, igaz, a 0,754-es periódusarány kicsit nagynak számít, de az utóbbi években kiderült, hogy nem egyedi esetről van szó, és több ilyen periódusarányú RRd csillagot is sikerült felfedezni (pl. Jurcsik és mtsai, 2015; Smolec és mtsai, 2015a). Jurcsik és mtsai (2012) az RZ Lyrae blazskós RRab csillag fotometriai megfigyelései alapján – az alacsony amplitúdójú modulációs fázisban látható erőteljes másodmaximum okán – feltételezték, hogy az alaphang időnként rezonanciába kerülhet egy magasabb radiális felhangbeli módussal.

Smolec és mtsai (2015a) az OGLE által a galaktikus dudorban (bulge) talált RR Lyrae csillagokat vizsgálták. Érdekesség, hogy Blazskó-modulációt találtak klasszikus kétmódusú (RRd) csillagokban, szám szerint 15 esetben. Jól mutatja a terület pezsgését, hogy röviddel korábban Jurcsik és mtsai (2014) szintén találtak blazskós, kétmódusú RR Lyraeket az M3 gömbhalmazban. A kétmódusú csillagokban a két módus mutathat azonos, vagy eltérő modulációs periódust is, sőt a moduláció többszörös periodicitása is nagyon gyakori, jó egyezésben a legújabb földi (Skarka, 2014) és Kepler-mérésekkel (Benkő és mtsai, 2014). Fontos megjegyezni, hogy Smolec és mtsai (2015a) vizsgálatai alapján annál az RRd csillagnál, ahol az extra frekvencia (valószínű nemradiális módus) 0,61 periódusarányt mutat a felhanggal, ez a kis amplitúdójú változás időben változó karakterisztikájú, csakúgy, mint a CoRoT- (Szabó és mtsai, 2014) és Kepler-minta (Moskalik és mtsai, 2015) esetében.

Netzel és mtsai (2015a) 143 RRc és 2 RRd csillagot találtak a $P_X/P_1 \approx 0,61$ – $0,62$ periódusarányal az OGLE-III adatai alapján, szintén a galaktikus dudorban. Ezek a csillagok szoros eloszlást követnek a Petersen-diagramon 0,613 periódusarányal, és egy második szekvencia is sejthető, bár jóval kevesebb reprezentánssal 0,631 (P_X/P_1) környékén (4.32 ábra, bal oldali panel). Ez utóbbi csoportnál a periódusarány enyhe függését látjuk a felhang periódusától. Megfigyelhető, hogy a galaktikus dudorhoz tartozó minta a diagram rövid periódusú tartományában koncentrálódik, míg a korábban ismert csillagok hosszabb periódusoknál is megtalálhatók. Ez minden bizonnyal a populációs különbségekre vezethető vissza, hiszen a korábban ismert csillagok között egyaránt találunk gömbhalmazbeli (ω Centauri), mezőbeli (SDSS-, MOST-, CoRoT-, Kepler-csillagok) és a Nagy-Magellán-felhőhöz tartozó RR Lyrae csillagokat



4.32. ábra. **Balra:** Netzel és mtsai (2015a) által felfedezett galaktikus dudorbéli OGLE RRc és RRd csillagok, melyekben az első radiális felhang mellett valószínűleg nemradiális módus(ok) is gerjesztett(ek). A kis szórást mutató periódusarány-koncentráció azonos eredetet és geometriát sugall a nemradiális módura. A kék üres háromszögek a kétmódusú (RRd) csillagokat jelzik. A mintában a MOST (AQ Leo), és az általam vizsgált vagy felfedezett CoRoT- és Kepler-csillagokat is bejelöltem. Forrás: Netzel és mtsai (2015a). **Jobbra:** Ugyanaz, Netzel és mtsai (2015c) és Jurcsik és mtsai (2015) újabb csillagaival kiegészítve. Itt már egyértelműen három, közel vízszintes szekvencia különíthető el a közepes periódusok tartományában (Forrás: Netzel és mtsai, 2015c).

is. Igaz, hogy a földi mikrolencseprogramok megfigyeléseinek pontosságától nem várható, hogy minden egyes RRc/RRd csillagnál szignifikánsan ki lehessen mutatni (vagy ki lehessen zárni) a P_X (vagy egyéb extra) módusok jelenlétét, a talált nagyszámú, azonos tulajdonságokat mutató, feltehetően több módusban pulzáló csillagok mégis erőteljesen alátámasztják megfogalmazott tézisemet, miszerint ezek a periodicitások nagyon gyakoriak a felhangban (RRc) és két radiális módusban (F/O1, RRd) pulzáló RR Lyrae csillagok között.

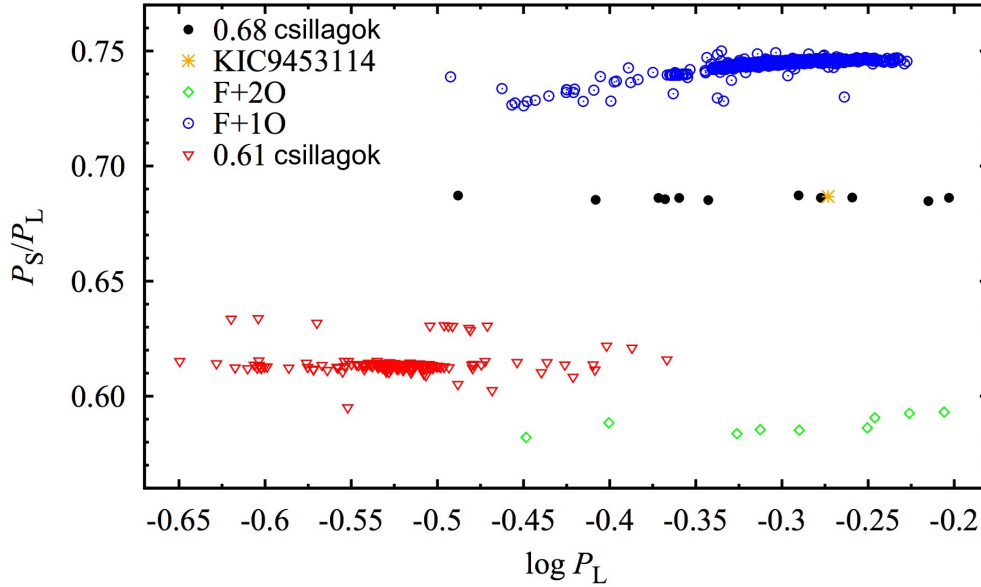
Netzel és mtsai (2015c) újabb csillagokkal egészítették ki a 0,61 periódusarányt mutató RRc csillagok listáját. Ezúttal is az OGLE-IV égboltfelmérés volt a segítségükre, amellyel két, sűrűn mintavételezett galaktikus dudorbéli területet vetettek alá alaposabb elemzésnek. Ezeket a területeket az OGLE négy szezónban is megfigyelte, és több mint 8000 megfigyelési pont áll rendelkezésre minden csillag esetében. Három periódusarány-szekvenciát különítettek el a Petersen-diagramon: 0,613, 0,622 és 0,631 periódusarány-értékeknél (4.32 ábra, jobb oldali panel). Ez a mintázat nagyon hasonlít a cefeidáknál látott elrendeződéshez. A csillagok frekvenciaspektruma nagyon gazdag, egy adott csillag sokszor kettő, vagy három különböző szekvenciához tartozó, jelentősebb csúcsot is mutat a 0,61–0,64 periódusarány-tartományban. A legpopuláltabb a legelső szekvencia, a legkevesebb tagot pedig a középső csoportosulás mutatja, ez ehhez tartozó periódusarány ráadásul csak egy szűk P_1 periódustartományban fordul elő. A kutatók által megvizsgált RRc-k 27%-a mutatja a jelenséget, sőt az extra csúcsot mutató csillagok minden szempontból megfelelnek a teljes RRc-mintának. Így ez a munka is alátámasztja, hogy az RRc csillagok többsége (vagy mindegyike) több módusban pulzál, ahol a leggyakoribb extra (valószínűleg nemradiális) módus az említett periódusarány-intervallumban jelentkezik. Itt is erőteljes változások látszottak a kis amplitúdójú frekvenciák csúcshierarchiájában évről évre szinte minden megfigyelt csillagnál, amit frekvencia és/vagy amplitúdóváltozás okozhat.

Ennél jobb időfelbontást az adatok nem tesznek lehetővé, de a változások szabálytalannak tűnnek, és teljes mértékben alátámasztják a hasonló, de jobb időfelbontással kapott analízisünket az űrfotometriával megfigyelt csillagok esetében.

Jurcsik és mtsai (2015) az M3 gömbhalmaz RRc és RRd csillagait vetette alá alaposabb analízisnek. Harminchét RRc-ből 14 mutatta a 0,61-hez arányhoz közeli frekvenciát, míg a tíz vizsgált RRd-ből 4-nél volt látható szignifikáns jel ennél a periódusaránynál. A földi megfigyelések révén a galaktikus bulge irányába talált 27% (Netzel és mtsai, 2015c) és az M3 gömbhalmaznál detektált 38%-os arány alátámasztja az űrfotometriai adatok valamivel kisebb mintán kapott, de közel 100%-os előfordulását a 0,61 periódusarány tekintetében. Ugyanez a szerzőgárda megerősítette az extra frekvenciák időbeli változékonyságát, miközben a radiális módusok a néhány hetes-hónapos időskálán általában változatlanok maradnak (ha a Blazskó-effektustól eltekintünk). A 0,61-hez közeli periódusarányú frekvenciák előfordulására a kutatók azt találták, hogy azok egy bizonyos periódus- (avagy effektív hőmérséklet) tartományban koncentrálnak az M3-ban. Nevezetesen, 0,31 napos periódusnál rövidebb RRc csillagokban nem találták a nevezetes frekvenciát, és ahol igen, azok a csillagok egybeesnek, vagy kicsit forróbbak a klasszikus kétmódusú csillagokkal, ahol ez a frekvencia szintén előfordul. Ez felveti azt a lehetőséget, hogy a kétmódusú (F/O1) pulzációhoz kötődő jelenségről van szó. Ugyanakkor egyrészt az űrtávcsöves mérések rövidebb periódusoknál is mutatnak 0,61-es módust, nem is szólva a Netzel és mtsai (2015c) munkájáról, amelyben egészen 0,22 napos periódusig szinte összefüggő eloszlást találunk, ami ennek a konklúciónak ellentmondani látszik. A populációs effektusoktól és fémtartalom hatásaitól eltekintve előfordulhat azonban, hogy a megjelenés amplitúdója változik az effektív hőmérséklettel, aminek alaposabb vizsgálatára további megfigyelések szükségesek.

Netzel és mtsai (2015a) az OGLE-minta 147 csillagából 34-ben találtak jeleket arra, hogy az extra módus amplitúdója és/vagy frekvenciája időben nem állandó, esetleg a frekvenciacsúcs közelében a frekvenciafelbontás határán belüli újabb csúcs van. Ez a magas arány szintén megerősíti az űrfotometriai adatainkból leszűrt következtetéseimet, miszerint az extra csúcsok az esetek legnagyobb részében időben változó jellemzőket mutatnak. Több RRc csillagban, amely mutatja ezt a periódusarányt, megjelenik a P_X módus szubharmonikusa is ($1/(2P_X) = f_X/2$) néhány esetben a $(3/(2P_X))$, ami perióduskétszereződésre utal (Moskalik, 2014; Moskalik és mtsai, 2015; Netzel és mtsai, 2015a, 2015c). Egyelőre nem értjük pontosan, hogy miért éppen ez a módus esik át ilyen bifurkáción (és a nagyobb amplitúdójú, radiális módus(ok) nem). Sok esetben nem is egy csúcs, hanem egész csúcserdő jelentkezik a fél-egész frekvenciák várható helyének környékén, ami megint csak a jelenség időben változó voltát jelzi, teljes összhangban az általunk a Kepler-mintában találtakkal. Megjegyezzük, hogy Netzel és mtsai (2015a, 2015c) az esetek $\sim 10\%$ -ban Blazskó-modulációt is sejtettek az extra módust mutató galaktikus dudorbeli RRc csillagoknál.

Smolec és mtsai (2015b) egy érdekes csillagot találtak a galaktikus bulge-ban az OGLE adatai alapján. Az OGLE-BLG-RRLYR-24137 három módusban pulzál: az alaplómódus és az első felhang mellett egy harmadik, független frekvencia is jelen van a Fourier-spektrumban, ami



4.33. ábra. Netzel és mtsai (2015b) által felfedezett OGLE RRc csillagok a galaktikus dudorban, melyekben az első radiális felhang mellett olyan nemradiális módusok is gerjesztettek, melyek periódusa hosszabb mind az első felhang, mind a várható alpmódus periódusánál (fekete pöttyök). Az ábrán az általunk elsőként a Keplerrel felfedezett ilyen objektumot is feltüntettem (narancs csillag, Moskalik és mtsai, 2015). P_L a hosszabb, P_S a rövidebb periódust jelöli. Kékkel a normál F/O1 kétmódusú, zölddel a második radiális felhangban is rezgő (F/O2), míg pirossal az eddigiekben taglalt RRc és RRd csillagokra jellemző P_X módust mutató csillagok is látszanak. Forrás: Netzel és mtsai (2015b).

lehet a harmadik felhang, de ezt hidrodinamikai modellekkel nem sikerült konzisztens módon modellezni. A másik lehetőség, hogy nemradiális módusról van szó, ez pedig megint csak azt a tézist erősítené, hogy extra (nemradiális) módusok csak a Blazskó-modulált R Rab, és a felhangban is pulzáló (RRc, RRd) csillagokban fordulnak elő, ott pedig gyakran, mint ahogy az űrfotometriai adatok ezt világosan megmutatták (Gruberbauer, 2007; Szabó és mtsai, 2014). Érdekesség, hogy a harmadik periodicitás amplitúdója nem sokkal kisebb a radiális módusokénál. Ami a csillagot különösen érdekessé teszi, az az, hogy a harmadik frekvencia perióduskettőződést mutat, ami egyrészt megerősíti, hogy pulzációs módusról van szó, másrészt viszont további vizsgálatokat tesz majd szükségessé, abban a tekintetben, hogy milyen rezonancia hozhatja létre ezt a jelenséget, és miért nem látjuk a perióduskettőződést a két radiális módus esetében.

Netzel és mtsai (2015b) egy másik, újonnan talált viselkedést is megerősítettek. Nevezetesen további 11 reprezentánsát találták meg a Moskalik és mtsai (2015) munkában bemutatott, hosszú periódusú nemradiális módussal pulzáló RRc csillagoknak. Az objektumokat a galaktikus dudor kettő, az OGLE által sűrűn észlelt látómezejében fedezték fel (4.33 ábra). Ezeknél a csillagoknál $P_X/P_1 \approx 0,686$. A periódusarány független a felhang periódusától, ez utóbbi széles tartományban változik 0,22 és 0,42 nap között.

A Benkő és Szabó (2015) munkában két olyan, a Kepler által megfigyelt R Rab csillagot analizáltunk, amelyek extra frekvenciákat mutattak, de nem tűntek moduláltnak. A második ra-

diális felhang környékén frekvenciacsúcsot mutató V350 Lyr és a KIC 7021124 csillagokat O–C diagramjuk alapján moduláltak találtuk, ennek az eredménynek az eléréséhez is pixelszintű egyedi fotometriát alkalmaztunk. Ez az eredmény is megerősíti a megállapításomat, miszerint a Blazskó-modulációt mutató RRab csillagok frekvenciaspektrumában előszeretettel jelennek meg a radiális sajátmódusokkal, a modulációval és a perióduskettőződéssel nem magyarázható további csúcsok. A V350 Lyr a legkisebb amplitúdóval bíró, multiperiodikus blazskós csillagnak bizonyult.

A Kepler utód-missziójának, a K2-nek is kiemelt szerepe lesz az RR Lyrae csillagok extra módusainak követésében, és főként adottságai miatt az előfordulási statisztikák további pontosításában. Mi sem mutatja ezt jobban, mint az a tény, hogy a K2 korai, még csak kalibrációs (és nem tudományos) céllal megfigyelt területén (K2-E2¹⁷) 33 RR Lyrae csillagot sikerült észlelnünk (Molnár és mtsai, 2015a). Köztük 2 RRd, 4 pedig RRc csillag. Bár a K2-t a rövidebb megfigyelések, és a nagyjából kettes faktorral gyengébb fotometriai pontosság ebben a feladatban kihívások elé állítja, nem meglepő, hogy mind a 6 csillag mutat extra módusokat, teljes összhangban az általam megfogalmazott tézissal. Ráadásul a két RRd csillag 0,61 körüli periódusarányú extra frekvenciája perióduskettőződés jeleit is mutatja. A 0,61-es periódusarányú (feltehetően) nemradiális módus megjelenik a négy K2 által észlelt RRc csillagból háromnál. A negyedik egy erős amplitúdómodulációt mutató RRc csillag, ahol valószínűleg a K2 viszonylag rövid adatsora miatt hiányoznak a további alacsony amplitúdójú módusok, hiszen Netzel és mtsai (2015c) két blazskós RRc csillagnál is találtak extra módusokat.

Kurtz és mtsai (2016) egy kétmódusú RR Lyrae vizsgáltak a K2 adataiban, és szintén megtalálták az első felhanggal 0,6163 periódusarányt mutató nemradiális módust. Az EPIC 201585823 jelű csillag nemradiális módusa szintén perióduskettőződést mutat, amplitúdója és frekvenciája nem állandó, ami alátámasztja eredményeimet, és tovább erősíti a Szabó és mtsai (2014) munkában megfogalmazott tendenciákat, nevezetesen, hogy az összes RRc és RRd csillag extra módusai időben változnak.

Várható, hogy a K2 az RR Lyrae csillagok kis amplitúdójú dinamikai jelenségei témájában még sok újdonsággal fog szolgálni, és elkezdhetjük a Galaxis különböző irányában és eltérő populációkban látható különbségek feltérképezését. Ez utóbbi célt segíti, hogy a K2 sikeres működés esetén végigpásztázza az ekliptika síkját, emellett gömbhalmazokban (pl. M4, M80), extragalaxisokban (Sagittarius törpegalaxis, Leo IV, Molnár és mtsai, 2015b), törpegalaxisok beolvadó maradványaiban (halo streamek) is fog különböző altípusokba tarozó RR Lyrae csillagokat megfigyelni. Ennek előkészítésében tevékenyen részt vettem: a Kepler/K2 RRL/CEP munkacsoportjának vezetőjeként 13 sikeres RR Lyrae csillagokat célzó K2 távcsőidő-pályázatot menedzseltem, ebből négyet PI-ként vezetek, további hatot pedig kutatócsoportom magyar tagjai irányítanak¹⁸.

Az itt felsorolt, távolról sem teljes lista a legújabb eredményekről tovább erősíti azt a tézi-

¹⁷K2 Two-Wheel Concept Engineering Test

¹⁸Az elfogadott tudományos K2 programok kivonata és célpontlistája az alábbi linken érhető el: <http://keplerscience.arc.nasa.gov/k2-approved-programs.html>

sem, hogy a nem-modulált RRab csillagokban nem fordulnak elő további módusok és periódicitások, míg a többi altípusban gyakran – vagy minden esetben – látunk ilyeneket. Hasonlóképpen, ma már azt is kellő súlyú és számú földi megfigyelés támasztja alá, hogy az RR Lyrae csillagokban található extra csúcsok az esetek legnagyobb részében időben változó jellemzőket mutatnak.

5. fejezet

Forró jupiterek vizsgálata a Kepler-úrtávcsóval

Ha annyi ezer dollárom lenne, ahány
bolygót találtunk ...

*William [Bill] Borucki, a Kepler vezetője,
Kalifornia, 2013. november, személyes közlés*

5.1. Bevezetés

A nagyjából Jupiter-tömegű, 0,8 – 6,3 napos keringési idejű planétákat forró jupitereknek nevezzük, és megkülönböztetjük azokat az ún. meleg jupiterektől, melyek kicsit hosszabb, 6,3 – 15,8 napos keringési idejűek. Nagy méretük és rövid keringési periódusuk miatt a forró jupitereket a legkönnyebb felfedezni az exobolygók közül. Nem véletlen, hogy az első, napszerű csillag körül felfedezett exobolygó (Mayor és Queloz, 1995), és az első fedési exobolygó is forró jupiter volt (Charbonneau és mtsai, 2000, Henry és mtsai, 2000). Sőt a különböző földi exobolygókereső égboltfelmérések első bolygói is ebbe a típusba tartoznak (HATNet: Bakos és mtsai, 2007; SuperWASP: Collier Comeron és mtsai, 2007). A Kepler felbocsátásáig a forró jupiterek alkották a felfedezett exobolygók többségét, ráadásul több jellemzőjük a ma elérhető technológia mellett is meghatározható, így belső szerkezetük (Batygin és mtsai, 2009), légköri összetevőik (Charbonneau és mtsai, 2002) stb. Számos vizsgálat irányult keletkezésükre (minden bizonnyal jelenlegi helyüknél jóval távolabb alakultak ki), fejlődésükre, szerkezetük, atmoszférájuk modellezésére, és várható, hogy ez a trend még sokáig folytatódni fog.

Az egyik nyitott kérdés, ami további vizsgálati lehetőséget nyújt az, hogy vannak-e bolygószo-
mszédjai a forró jupiteknek. Az elterjedt paradigma szerint a forró jupiterek magányosak, hiszen képviselőiket nem, vagy csak elvétve találták többszörös bolygórendszerekben. Távoli, a belső bolygó(k)ra jelentős dinamikai hatással nem bíró planéták létezése nem kizárt, ezek

hiányát részben a bolygókereső vizsgálatok stratégiája, illetve a forró jupiterek felfedezése óta eltelt viszonylag rövid idő magyarázhatja. E paradigma szerint a forró jupiterek pályájukat perturbációmentesen kell hogy róják, szigorúan periodikusan bekövetkező tranzitidőpontokkal¹. Ennek ellenére jó néhány forró jupiternél találtak a tranzitidőpontokban bekövetkező szisztematikus változásokat: sietést, illetve késést (idegen szóval: TTV, transit timing variation) (Steffen és mtsai, 2012; Ford és mtsai 2012), amik további vizsgálatot igényelnek. Olyan forró jupitert tartalmazó rendszereket ismerünk, ahol távoli ($P_{orb} > 200$ nap) kísérőt találtak (pl. Knutson és mtsai, 2014), illetve meleg jupiter mellett is sikerült közeli kísérőt találni (KOI-191: Steffen és mtsai, 2010; Sanchis-Ojeda és mtsai, 2014), azonban forró jupiterek kísérőit tekintve az itt ismertetendő eredményeim voltak az első szisztematikus vizsgálatok, melyek dinamikai perturbációra utalnak (Szabó és mtsai, 2013a).

Egy másik, ehhez kapcsolódó kérdés, hogy a forró jupiterek némelyikénél megfigyelt tranzitidőpont-változások lehetnek-e exoholdakra utaló jelek? A forró jupiterek TTV-inek szisztematikus vizsgálatával erre is fényt kívántam deríteni. A kutatók nagy reménysége volt, hogy az extrém pontos Kepler-adatokból kimutathatók lesznek az exobolygók nagyobb holdjai is (Simon és mtsai, 2007; Kipping, 2009a, 2009b). Érdekes módon ez mindeddig nem következett be vagy a holdak alacsony gyakorisága vagy túl kis mérete miatt (Simon és mtsai, 2010; Kipping és mtsai, 2012, 2013a, 2013b, 2014; Hippke, 2015). Természetesen az is lehetséges, hogy a Kepler-adatokban ott lapulnak a holdakra utaló jelek, és hamarosan megtalálják az első valódi exoholdat. Mindenesetre további űrtávcsöves missziók, így az európai CHEOPS² (Simon és mtsai, 2015) és PLATO³ (Rauer és mtsai, 2014) kiemelt feladata lesz az exoholdak utáni vadászat is.

A Kepler több éves, folyamatos és extrém pontos adatai a ma létező legjobb kiindulópontot jelentik ezekhez a vizsgálatokhoz. A forró jupiterek fedésidőpontjaiban bekövetkező piciny, de szisztematikus változások elárulhatják egy kísérő jelenlétét, annak gravitációs hatása folytán. TTV jelenlétét többen függetlenül előre jelezték extraszoláris bolygórendszerekben, a Neptunusz felfedezésének analógiájára (Holman és Murray, 2005; Agol és mtsai, 2005), sok vizsgálat próbálta kimutatni mind földi (Steffen és Agol, 2005), mind űrfotometriai adatokban (Csizmadia és mtsai, 2010), de a Kepler adatainak megjelenéséig nagyon kevés és bizonytalan megfigyelés állt csak rendelkezésre a TTV-k tekintetében. A Kepler folyamatos, nagy pontosságú megfigyelései forradalmat indítottak a TTV-k felfedezése, tanulmányozása és dinamikai alkalmazása (Steffen és mtsai, 2013; Masuda, 2014; Hadden és Lithwick, 2014; Jontof-Hunter és mtsai, 2015) terén is. A TTV-k vizsgálatával már sikerült kimutatni fedéseket nem mutató planétákat is fedési bolygót tartalmazó exobolygórendszerekben (pl. Kepler-19: Ballard és mtsai, 2011).

A kísérők hiánya vagy jelenléte a forró jupitereket tartalmazó rendszerekben fontos következménnyel bír az azok létrejöttét leíró elméletekre nézve. A kísérők hiánya azt a forgatóköny-

¹Legalábbis néhány éves időskálán, egyéb, pl. a csillagtól eredő perturbációktól eltekintünk.

²CHaracterizing ExOPlanet Satellite, 2017-re tervezett ESA Small Mission

³PLAnetary Transits and Oscillations of stars, 2024-ben induló ESA M-class Mission

vet támogatja, miszerint a gázóriások a jéghatáron túl keletkeznek, és nagy excentricitású migrációval (HEM: high excentricity migration) kerülnek közelebb a csillagukhoz (Mustill és mtsai, 2015). Az elmélet szerint az excentricitás gerjesztése bolygó- vagy csillagkísérőknek köszönhető. Ez a folyamat destabilizálja a rövid periódusú kísérők pályáit, tehát nem is várunk rövid periódusú további bolygókat. Ugyanakkor a Kepler bolygómintájának statisztikai elemzésével az is megmutatható, hogy nem keletkezhetett minden gázóriás ezen a módon (Dawson és mtsai, 2015), és a protoplanetáris diszkkel történő, kevésbé erőteljes kölcsönhatás eredményezte migráció is szerepet játszhat a forró jupiterek létrejöttében, amelynek során megőrizhetnek egy kiterjedtebb bolygórendszert.

Ford és mtsai (2012)⁴ publikált egy, a Kepler Q0 – Q6 adatain alapuló TTV-katalógust, ami sok esetben későbbi munkák alapjául szolgált. Munkám célja egyrészt ennek a katalógusnak a kritikai revíziója volt, a lehetséges nemdinamikai, virtuális TTV-változások kiszűrésével. A maradék, többszörös szűrőn átment, periodikus TTV-jelek dinamikai vizsgálata ezután következhetett. Összesen három ilyen jelöltet találtam, aminek dinamikai eredete bolygó- vagy exohold-kísérőre utalhat. A munkához a szülőcsillagok fényváltozásait és a tranzitokat analizáltam. Meghatároztam a forró jupiter jelöltekben található legjobb TTV-jelek periódusát, amplitúdóját és szignifikanciaszintjeit.

5.2. Módszerek és adatanalízis

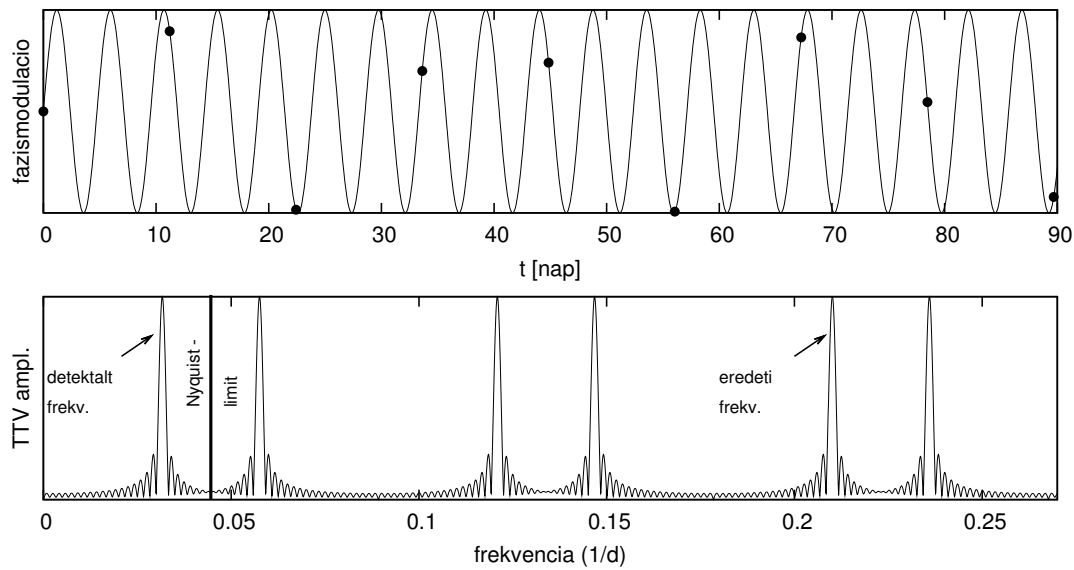
Először is kiválogattam az egyetlen bolygót tartalmazó rendszereket a Kepler bolygójelölt-katalógusából (Batalha és mtsai, 2013), és ezek közül csak azokat tartottam meg, amik sugara $6 R_{\oplus}$ -nál nagyobb volt⁵. Szintén elhagytam azokat, amikre a Kepler 12-nél kevesebb tranzitot észlelt, vagy túl bizonytalan volt a planéta keringési periódusa. Ily módon 159 jelölttel folytattam a további analízist. Ennek a mintának a medián bolygósugara $11,23 R_{\oplus}$, a keringési periódusok mediánja pedig 5,70 nap volt. A leghosszabb keringési periódus 54 nap volt.⁶

A tranzitidőpontokat Ford és mtsai (2012) katalógusából vettem, és sztenderd Fourier-analízisnek vettem alá, melyhez a MUFRAN programcsomagot (Kolláth, 1990a) használtam. A módszer alapjaiban megegyezik a pulzáló változócsillagok esetében rendszeresen végzett frekvenciaanalízissel, periodicitások vizsgálatával. Ha a keringési fázist periodikusan moduláljuk, periodikus TTV-t figyelhetünk meg. Megfigyelési pontjaink csak a tranzitok időpontjaiban lesznek (a tranzitok mintavételezik a TTV-görbét!). Egy súlyos problémára azonban érdemes felhívni a figyelmet: egyszerűen belátható, hogy a TTV-görbe moduláció periódusát nem tudjuk rekonstruálni a TTV-jelből, ha az rövidebb, mint két keringési periódus. Ilyenkor az alul-mintavételezés miatt a megfigyelt frekvencia a valódinak a Nyquist-határon visszatükrözött képe lesz (5.1 ábra). Általános esetben emiatt akár többszörösen túlbecsülhetjük a moduláció periódusát, és nincs információnk annak helytelen voltáról. Ezért csak egy alsó

⁴<http://www.astro.ufl.edu/~eford/data/kepler/>

⁵ $R_{\oplus}$ a Föld sugarát, $M_{\oplus}$ a tömegét jelöli.

⁶Később ez az érték 8,39 napra csökkent (19 jelölt), legvégül pedig 3,2 napra (3 jelölt), így tényleg csak forró jupiterek maradtak a listán.

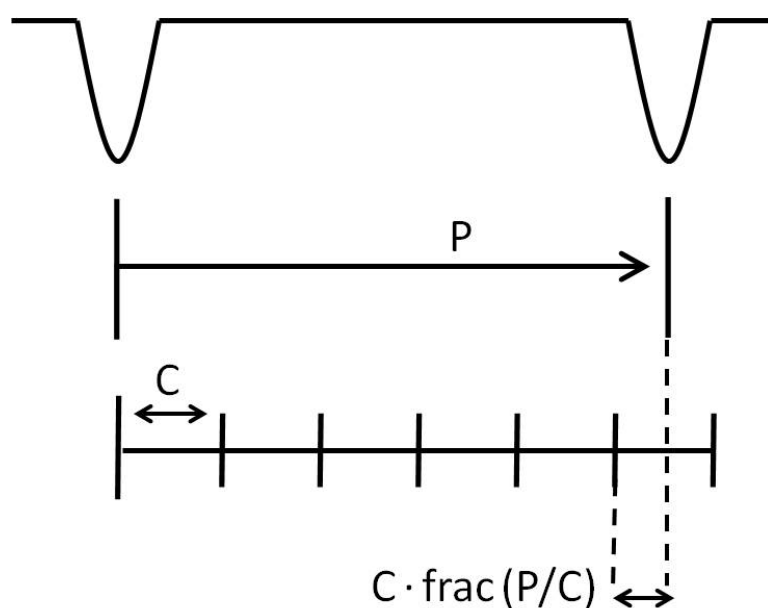


5.1. ábra. Illusztráció a Nyquist-határnál nagyobb frekvenciájú keringési periódus jelének megfigyelhetőségéről. **Felül:** egy Kepler-negyednyi (90 nap) részlet egy 600 nap hosszú szimulációból. A pontok a tranzitok által megvalósított mintavételezést jelentik. **Alul:** A 600 napos adatsor Fourier-spektruma, a Nyquist-frekvencia többszöröség ábrázolva. A valódi és a neki megfelelő, Nyquist-határ alatt megfigyelt frekvenciát nyilak jelölik. A szimulációt 4,76 napos modulációs és 11,21 napos keringési (mintavételezési) periódussal végeztük (Szabó és mtsai, 2013a), ezek az értékek nem feltétlenül felelnek meg stabil bolygókonfigurációnak.

frekvenciahatárt tudunk mondani, és a moduláció tényét rögzíthetjük. Szerencsére azonban a jel amplitúdója jól rekonstruálható (kivéve a rezonáns eseteket), illetve a TTV-periódusok általában hosszabbak a keringési periódusnál.

A tranzitidőpontokból előálló adatsorok Fourier-transzformáltjait minden egyes jelöltre kiértékeltem. A TTV-jeleket mutatóknál meghatároztam a jel periódusát, és az amplitúdót. Akkor tekintettem a bolygójelöltet TTV-jelet mutatónak, ha a Fourier-spektrumban a lokális zajszintet 4σ -val meghaladta a szóban forgó csúcs amplitúdója. Fontos, hogy nem tételeztem fel normál eloszlást a zajra. A standard deviáció értéke a Gauss-eloszlástól eltérő zajra is meghatározható, viszont a találatok szignifikanciaszintjeinek értelmezésénél különös gonddal kell eljárunk. Ehhez bootstrap analízis bizonyult a legalkalmasabb eszköznek, amihez a Ford és mtsai (2012) által megadott tranzitidőpont-hibákat használtam fel. Minden jelölthöz 20000 mesterséges adatsort generáltam az eredeti időadatok felhasználásával. Ezek az adatsorok nem tartalmaztak jelet, csak az eredeti mérés hibáit. Ezután a Fourier-spektrumban meghatároztam az amplitúdók 0,9995 és 0,995 kvantiliseit, amik a 0,05% és 0,5% hamis riasztási szinthez⁷ tartoznak. A 4σ kritériummal detektált csúcsok a jelöltek mindegyikénél meghaladták a 0,5% FAP-szintet is. A 159-es listáról 36 forró jupiter mutatott periodikus TTV-jelet.

⁷FAP: False Alarm Probability



5.2. ábra. A tranzitidőpontok egyenetlen mintavételezés miatti virtuális frekvenciájának kiszámítása. P és C a keringési és a mintavételezési periódus, $frac$ a törtrészfüggvényt jelenti (Szabó és mtsai, 2013a).

5.3. Nem dinamikai eredetű periodikus TTV-jelek

A következő lépésben megvizsgáltam, hogy milyen megfigyelési és fizikai folyamatok okozhatnak periodikus TTV-jelet, és ezek előfordulnak-e a mintámban. Két ilyen folyamatot találtam: az egyik a mintavételezés miatti *stroboszkopikus* periódus, a másik pedig a központi csillag aktivitása. Ezeket munkám folyamányaként ma már rutinszerűen veszik figyelembe TTV-vizsgálatoknál (lásd a 5.7. alfejezetet). Most ezeket mutatom be részletesen.

5.3.1. Stroboszkopikus periódus

Néhány esetben azt találtam, hogy a megfigyelt szignifikáns frekvenciák könnyen magyarázhatók a mintavételezésből adódó effektusokkal. A Kepler-adatok legnagyobb része long cadence (LC), azaz 29,424 percenként van egy adatpontunk. Ezért egy-egy tranzitot átlagosan 3–6 ponttal mintavételezzünk. Mivel a keringési periódus nem egész számú többszöröse a Kepler mintavételezési rátájának, ezért a tranzitokat különböző fázisokban mintavételezzük, de ez az eltolódás nagyon szabályosan változik, a konstans LC-rátának köszönhetően. Ez a mintavételezési szabályszerűség apróbb hibákat okozhat a tranzitidőpont-meghatározásban⁸, ami azonban a szabályos ismétlődés miatt virtuális változásokat visz a TTV-görbébe.

Az 5.2 ábrán illusztrálom, hogy hogyan lehet ezt a frekvenciát meghatározni. Mivel az expozíciók természetes módon nem a tranzitok középidéjében történnek, szisztematikus eltolódás fog fellépni a tranzitok mintavételezési struktúrájában tranzitról tranzitra. A mintavételezés $|P - nC|$ időeltolódást fog szenvedni egy tranzit alatt, ahol P a keringési periódus, C a

⁸Más szavakkal: adott mintavételezési minta adott szisztematikus eltérést okozhat a tranzitidőpont meghatározásában, így azzal a periódussal, amikor visszaáll az eredeti pozíció, virtuális csúcs jelenhet meg, amit sok esetben meg is figyeltem.

mintavételezési ráta, n pedig egy alkalmasan választott egész szám. Tudjuk, hogy $n = [P/C]_{-0}^{+1}$, ahol $[]$ az egészrészfüggvényt jelenti. Két eset lehetséges: az egyik, amikor nC kicsit kisebb, mint P (a különbség kisebb mint $P/2$, lásd az 5.2 ábrán). A másik az, amikor nC kicsit nagyobb P -nél. A törtrészfüggvényt $[]$ -lel jelölve az alábbiakat írhatjuk a két esetben:

$$P - \left[\frac{P}{C} \right] C = C \left(\frac{P}{C} - \left[\frac{P}{C} \right] \right) = C \left[\frac{P}{C} \right], \quad (5.1)$$

és hasonló gondolatmenetet követve és az előjelet megcserélve (hiszen az abszolútértékben álló mennyiség negatív), kapjuk:

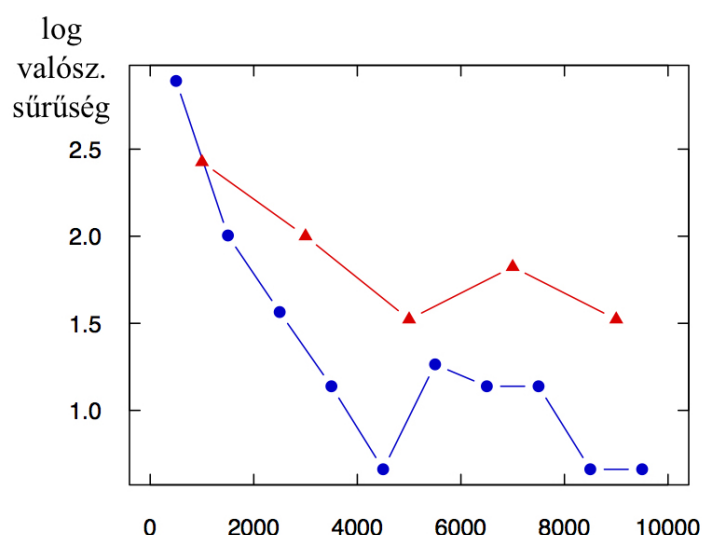
$$\left| P - \left[\frac{P}{C} + 1 \right] C \right| = C \left[1 - \frac{P}{C} \right]. \quad (5.2)$$

Így az időeltolódás $C \cdot s$ -ként írható, ha s -et a következőképpen definiáljuk: $s = \min([P/C], 1 - [P/C])$. A $C \cdot s$ időkézés s -szer egy mintavételi idő, és $1/s$ tranzit után az eredeti tranzit/mintavétel konfiguráció fog visszaállni. Így a virtuálisan megjelenő csúcshoz P/s periódus, azaz s/P frekvencia fog tartozni. Mivel a definícióból következően $s < 0,5$, a virtuális csúcs mindig megjelenik, de nem minden esetben okoz szignifikáns csúcsot. Összefoglalva: ha a bolygórendszerünk P/s periódusú TTV-t mutat, gyanakodnunk kell, hogy a mintavételezés miatti virtuális (stroboszkopikus) periódussal van dolgunk.

5.3.2. Csillagaktivitás

A tranzitidőpontok meghatározását a csillagok mágneses aktivitása is befolyásolhatja, hiszen a csillagfoltok modulálják a csillag fényességét, ezáltal szisztematikus hibát okozhatnak, eltorzítva a tranzitok alakját is. Ennek az effektusnak a hatása nagymértékben függ a tranzit-időpont meghatározására alkalmazott algoritmustól is. Mivel sem a Kepler-adatok feldolgozásának pontos algoritmusát, sem a Ford és mtsai (2012) által alkalmazott metódust nem állt módomban tesztelni abból a szempontból, hogy milyen szisztematikus hibákra érzékenyek és melyekre nem a csillagaktivitást tekintve, a biztonság kedvéért a fénygörbéből meghatározható csillagaktivitás (kvázi)periódusához közel eső TTV-jeleket nem tekintettem dinamikai okokra visszavezethetőnek.

A minta majdnem minden csillaga mutatott forgásból és foltosságból eredő változást. Ahhoz, hogy meghatározzam, hogy a TTV-mintákat milyen mértékben befolyásolta a csillagaktivitás, megvizsgáltam a fénygörbék tranziton kívül eső részét. Ehhez a Q8–Q9 negyedek adatait használtam, amik nem tartalmaznak nagyobb űröket, és összeillesztésük is csak minimális eltolást igényelt. A tranzitokat és a másodlagos fedéseket kimaszkolva, egy felüláteresztő szűrő alkalmazásával megszabadultam a hosszú periódusú változásoktól. Ezeket a fénygörbéket Fourier-analízisnek vettem alá, és rögzítettem a legnagyobb frekvenciacsúcsok amplitúdóját és frekvenciáját. Ezzel nem csak a csillagaktivitást, de a csillagpulzációt és egyéb, a TTV-meghatározást zavaró periodicitást is sikerült megragadni. A TTV-jelöltjeink mintájában talált frekvenciacsúcsok amplitúdóeloszlását összehasonlítottam az összes forró jupitérével. Az alapötlet az volt, hogy ha a csillagaktivitás hatása elhanyagolható, akkor a két mintának statisztikai szempontból azonos eloszlást kell mutatnia.



A legmagasabb fedésen kívüli csúcs amplitúdója [ppm]

5.3. ábra. A legnagyobb amplitúdók eloszlása 159 Jupiter-méretű Kepler bolygójelölt fedésen kívüli fényváltozásából számolt periodogramjaiban (alsó, kék pontok), és 36 olyan jelöltében, ahol TTV-változást gyanítottunk (felső, piros háromszögek) (Szabó és mtsai, 2013a).

A gyakorlatban a legmagasabb csúcsok amplitúdóeloszlását hasonlítottam össze az 5.3 ábrán a szignifikáns periodikus jelet mutató, és a teljes forrójupiter-minta esetében. Nyilvánvaló eltérés van a két minta fedéseken kívül mutatott változásaiban, mégpedig a TTV-jeleket mutató objektumokban erőteljesebb a csillagaktivitásból származó hozzájárulás. A legkisebb amplitúdók 300–500 ppm közé estek a teljes mintában, míg a feltételezett TTV-jelet mutató mintában három jelölt mutatott 400 ppm alatti maximális csúcsokat, ezek: KOI-186, 897, és 977⁹. Ez a három forró jupiter a legjobb jelöltünk, mivel – több szempont mellett – ezeket érinti legkisebb mértékben központi csillaguk forgása.

Megjegyezzük, hogy a fedésen kívüli változásokból eredő csúcsok a legtöbb esetben eléggé távol esnek a gyanított periodikus (dinamikai hatás által okozott) TTV-k frekvenciájától, ezekenél nem állítható fel egyértelmű kapcsolat a TTV-jel és a csillag forgása között. Az amplitúdóeloszlás alapján azonban sejthető az indirekt kapcsolat.

5.4. A legjobb jelöltek

Az eredeti, 159 forrójupiter-jelöltet tartalmazó listából tehát 36 mutatott periodikus TTV-jelet. Ebből tizenötnél csak stroboszkopikus periódus volt jelen. A maradékból 19 jelölt TTV-periódusa esik elég távol a stroboszkopikus jeltől ahhoz, hogy valódi jelöltnek fogadhassam el. Mindössze három esetben kellett kihúzni a listáról jelölteket csillagforgásra utaló hatások miatt (KOI-412, 822, 895), két másik jelöltet már a vizsgálat elején kizártam, ahol a TTV-jel hibahatáron belül megegyezett a jól mérhető csillagforgás frekvenciájával, ezek a KOI-883 és a Kepler-17b (Désert és mtsai, 2011). Más, erős rotációra utaló jelet mutató objektumot azért

⁹KOI: Kepler Object of Interest

5.1. táblázat. A többszörös teszteken átmert, szignifikáns, periodikus TTV-jeleket mutató forró jupiterek listája. Kövér betűtípussal szedtem a legjobb három jelöltet. A Kepler-fénygörbék vizsgálata alapján bizonytalannak minősített TTV-jeleket dőlttel szedtem. A stroboszkopikus periódusokat nem tüntettem fel. Az első három oszlop a bolygójelöltre vonatkozik, a második három a központi égitestre, míg a 7-9. oszlopok a TTV-jelre.

KOI	sugár [$R_{\oplus}$]	per. [nap]	M_* [$M_{\odot}$]	T_{eff} [K]	R_* [$R_{\odot}$]	TTV per. [nap]	ampl. [min]	szignif. σ	megj.
131.01	9,61	5,0142325	1,13	6244	1,21	114,377216	0,6192	4,2	1
186.01	12,35	3,2432603	1,06	5826	0,97	13,877132	0,3888	6,1	
						7,2431227	0,3744	5,8	
256.01	25,34	1,3786789	0,65	3639	0,52	41,755397	0,4464	4,4	2
823.01	7,89	1,028414	1,1	5976	0,96	142,897970	2,2608	18,8	
						59,477785	1,6272	13,0	
						48,562549	1,2960	10,0	
						84,061870	1,1952	9,0	
						343,28870	1,0800	8,0	
						19,033480	0,8784	6,2	
882.01	12,17	1,9568102	0,93	5081	0,79 ^a	41,879554	0,5328	6,4	2
897.01	12,41	2,0523497	1,07	5734	1,03	81,973932	0,3888	4,7	2
977.01	63,45	1,3537763	0,21	4204	16,48	101,522843	12,2832	5,6	3
						20,029644	9,6768	4,0	

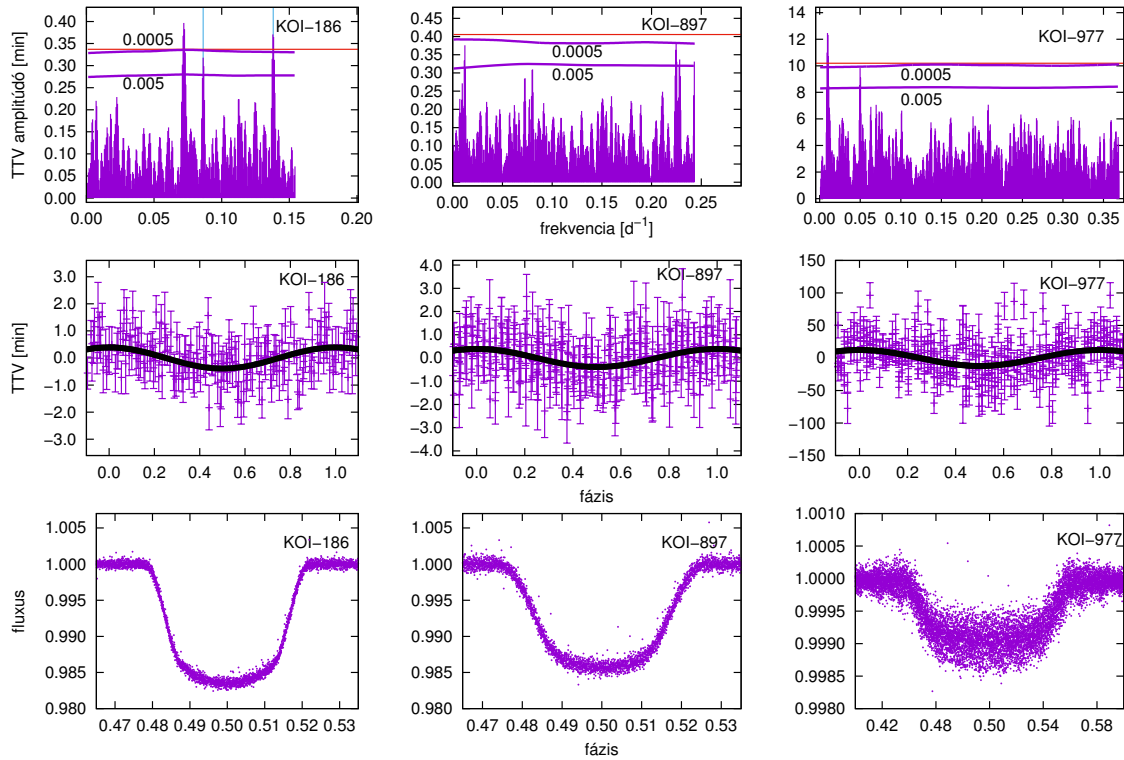
(1): Santerne és mtsai (2012); Prša és mtsai (2011), (2): Batalha és mtsai (2013) V-alakú fedés (3): Ford és mtsai (2011) keringési fázishoz kötött változások, a: A munka publikálása közben kismértékben eltérő csillagsugár-értékek jelentek meg a MAST adatbázisban, de a konzisztencia kedvéért maradtam a korábban publikált értékeknél. A változás olyan kismértékű, hogy a konklúziókat nem befolyásolja. Egyedüli kivétel a KOI-882, aminek sugara korábban 0,55 $R_{\odot}$ volt.

kellett kizárnom, mert false positive-nak¹⁰, vagy fedési kettőscsillagnak bizonyultak (pl. KOI-1003 és KOI-1152, Ofir és Dreizler, 2013; Mazeh és mtsai, 2013; Prša és mtsai, 2011; Batalha és mtsai, 2013). Így összesen egy 7 bolygójelöltet számláló listához jutottam, amik valódi, periodikus tranzitidőpont-változást mutatnak. Ezeket a 5.1. táblázat tartalmazza a csillag- és bolygó-paramétereikkel egyetemben; ez utóbbiak a folyamatosan frissülő PlanetQuest weboldról¹¹ származnak.

Ezt a hetes listát is tovább szűkítettem, megszabadulva a túl sok frekvenciát mutató jelöltől (KOI-823), és azoktól, ahol nem lehetett teljesen biztosan elkülöníteni a csillag változásaiból és a dinamikai hatásokból eredeztethető TTV-jeleket. A maradék három (KOI-186, 897 és 977) forró jupiter TTV-jének frekvenciaspektrumát az 5.4 ábra legfelső paneljei mutatják. Ahogy említettem, ezek a rendszerek mutatják a legkisebb jelét a csillag forgásából adódó modulációnak, és minden további teszten is túljutottak (stroboszkopikus periódus zavaró hatása, false positive ellenőrzés stb.).

¹⁰False positive-nak nevezzük azt a fedési bolygójelöltet, aminek bolygófedésre hasonlító fénygörbeparamétereket más asztrofizikai konfiguráció hozza létre. Ez tipikusan lehet háttér vagy előtér fedési kettőscsillag, sűrű fedést mutató kettőscsillag, kisméretű bolygó gyanúja esetén háttérbeli forró jupiter stb.

¹¹<http://planetquest.jpl.nasa.gov/>



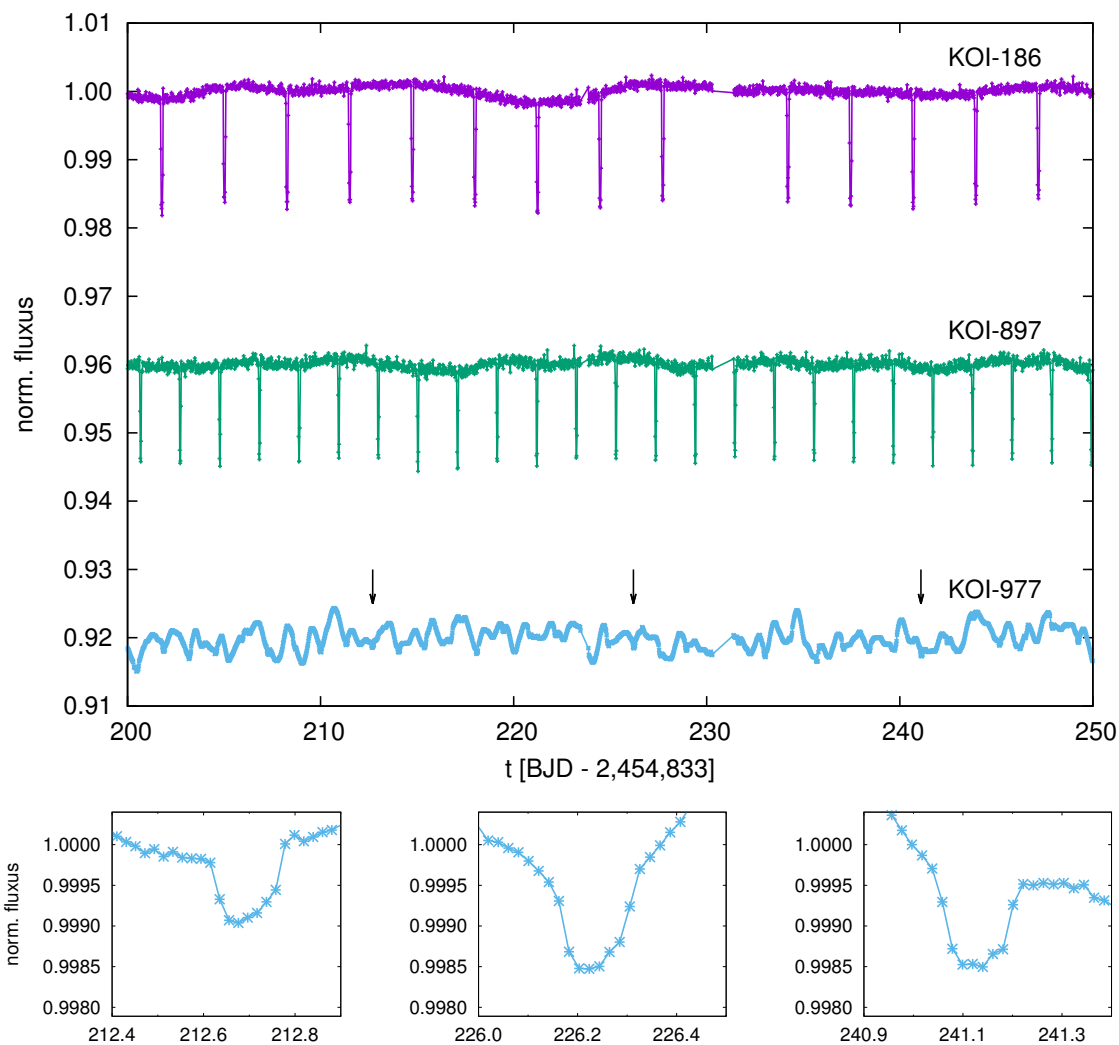
5.4. ábra. **Felül:** A legjobb jelöltjeim tranzitidőpont-változásainak Fourier-spektruma. A vízszintes piros vonal az $5\text{-}\sigma$ detektálási határt mutatja, a lila görbék a frekvenciafüggő, bootstrap analízisből számolt, a téves riasztás valószínűségét (false alarm probability, FAP) jelző határok. A KOI-186 esetében függőleges, kék vonalak jelölik a hamis csúcsokat. **Középen:** A legjobb periódusokkal összetekert TTV-görbék. A KOI-977 esetében a legnagyobb, 101,5 napos csúcsot használtam. **Alul:** A legjobb jelöltek tranzitalakjai a feltekert Kepler-fénygörbékből (Szabó és mtsai, 2013a).

Az ábrán az $5\text{-}\sigma$ detektálási és a 0,005 és 0,0005 FAP-szintekhez tartozó vonalakat is feltüntettem¹². Az ábra középső paneljei a feltekert TTV-görbéket mutatják. A KOI-977 esetében a 101,5 napos periódust használtam. A detektálás megbízhatóságának tesztelésére egy valószínűségi arány tesztet is elvégeztem (Lupton, 1993)¹³. Ez alapján mindhárom detektálást megerősítettem. Megjegyzendő, hogy a KOI-186 esetében egy stroboszkopikus és egy, a csillag forgásából eredő frekvencia is jelen van. Végül, az 5.4 ábra legalsó paneljein a tranzitok alakját ábrázoltam a Q0–Q6 negyedek alapján. Szabó Gy. és mtsai (2011) munkájában leírt módon normalizáltam a fénygörbéket, a keringési periódusok Batalha és mtsai (2013) munkájából származnak. A KOI-977 esetében tapasztalható nagyobb szórás a csillag nagyobb méretéből és az ennek megfelelő kisebb tranzitmélységből, valamint a csillag változékonyságából (feltehetően pulzációtól) ered. Ellenőriztem, de nem találtam fedési kettősre utaló jelet ennek a jelöltnek az esetében sem.

A három legjobb jelöltem tehát, amelyeknél dinamikai okokat feltételezhetünk a periodikus

¹²Ez utóbbi az 5σ határhoz tartozik. Megjegyezzük, hogy bár megalapozottabb az FAP-szintek használata, azok nagyon enyhe frekvenciafüggése mutatja, hogy a valódi zajeloszlás nincs túl messze a Gauss-eloszlástól.

¹³A számítás részletei megtalálhatók Szabó és mtsai, 2013 cikkben.



5.5. ábra. **Felül:** A három legjobb TTV-jelölt normalizált Kepler-fénygörbéje. Jól láthatók a csillagból eredő változások. A fénygörbéket a jobb láthatóság kedvéért függőlegesen eltoltam. **Alul:** Mivel a KOI-977 fedései nem látszanak a fenti panelen, kinagyítottam három fedésének környezetét, amiket a felső ábrán nyilak jeleznek. A csillag fényének erőteljes változásai miatt a tranzitmélység is változóknak tűnik.

TTV-jelek okaként, a KOI-186, -897, és -977¹⁴. Ezt a három jelöltet érdemes itt alaposabban is bemutatni.¹⁵ Fénygörbékük az 5.5 ábrán látható. A detektált jelek periódusai rendre 14, 82 és 101,5 nap. Minthogy a megfigyelt TTV-periódus csak egy felső határ a Nyquist-határ miatt, ezért lehetséges, hogy a valódi moduláció periódusa jóval rövidebb. A KOI-186 és -897 esetében az amplitúdó kisebb 1 percnél, a KOI-977-nél pedig 12 perc.

KOI-186. Ez a Jupiter-méretű bolygó a Naphoz hasonló ($M = 1,06 M_{\odot}$) csillag körül kering. Három szignifikáns periodicitást találtam, ezek periódusa 13,877, 7,243 és 11,583 nap. Ezek közül az utolsó stroboszkopikus, a második pedig közel van a csillag feltételezett forgási periódusához (7,84 nap), így az egyetlen szignifikáns, TTV-re utaló periodicitás a 13,877 nap marad. A csillag fénygörbéjén látható egy kis amplitúdójú (338 ppm), hosszú periódusú változás a tranzitokon kívül, amelynek periódusa 94 nap, és ami minden valószínűség szerint független a TTV-jelünktől.

KOI-897. Ez a bolygójelölt kissé nagyobb, mint a Jupiter, és egy Naphoz hasonló csillag körül kering 2,68 napos periódussal. Egy valódinak tűnő TTV-periódust találtam (82,0 napnál), de a stroboszkopikus periódus is szignifikáns, ami 4,45 napnál található. A legnagyobb tranziton kívüli csúcs a Fourier-spektrumban viszonylag alacsony (338 ppm) 115 napnál, ami az egyik legjobb dinamikai okokból TTV-t mutató jelöltünké avatja a KOI-897-et.

KOI-977. A szülőobjektum a Kepler Input Katalógus¹⁶ szerint $0,21 M_{\odot}$, mérete $16,48 R_{\odot}$, effektív hőmérséklete 4204 K. A csillag paramétereit Muirhead és mtsai (2012) részben megerősítették: közeli infravörös spektroszkópiai mérésekkel egyértelműen óriás állapotban lévő csillaggal van dolgunk. Ennek megfelelően a kísérő mérete is nagy: $63,45 R_{\oplus}$, ami a legnagyobb volt a teljes mintánkban. A csillag tömegbecslése azonban minden bizonnyal túl alacsony értéket adott, aminek legvalószínűbb oka az, hogy a Kepler-missziót és a célpontkiválasztást a fősorozati csillagokra optimalizálták. Minthogy a paraméterek bizonytalanok, a kísérő forró jupiter besorolása is kérdéses lehet. A TTV-spektrumban két független frekvencia található: 101,5, illetve 20,0 napnál.

5.5. Exoholdak vagy bolygókísérők?

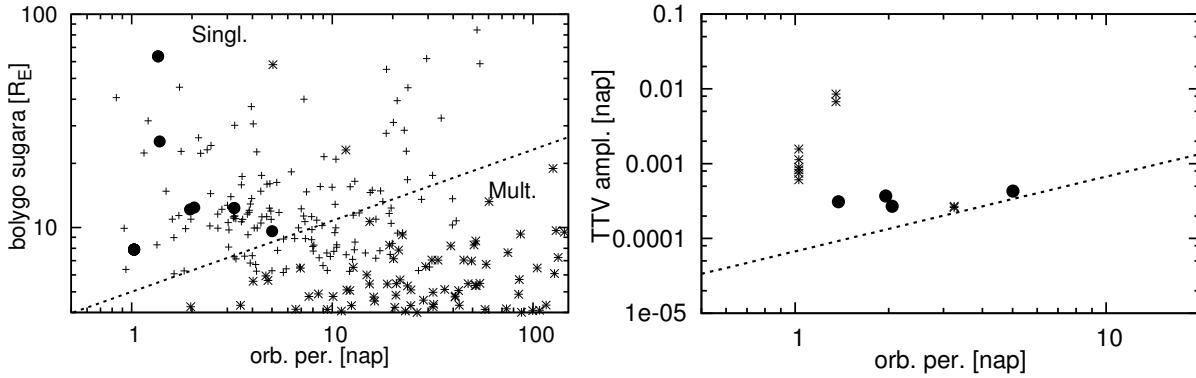
A magányosság paradigmája fényében váratlan felfedezés, hogy a forró jupiterek tranzitidő-pont-változásokat mutathatnak. Miután minden más eshetőséget kizártam, a következő forgatókönyvek lehetségesek:

- a fedést mutató forró jupitereknek lehet tranzitot nem mutató, nem azonos síkban keringő, nagy tömegű, közeli bolygókísérője (természetesen a kísérő(k) lehet(nek) közel egy síkban is a forró jupiterrel fedéseket mutatva, de ilyet eddig még nem figyeltek meg, ugyanakkor lásd az 5.7. fejezetet);

¹⁴E sorok írásakor, 2016 februárjában még mindhárom objektum bolygójelöltet tartalmazóként szerepel a Kepler-katalógusokban. Ezt azért érdemes megjegyezni, mert ezek a katalógusok időnként frissülnek, és az újabb adatok, mérések alapján megerősített bolygóvá, vagy false positive-vá is minősíthetnek egy-egy objektumot.

¹⁵A többi, kiostált, de érdekes rendszer jellemzéséről a Szabó és mtsai (2013a) munkában olvashatók további részletek.

¹⁶<http://archive.stsci.edu/kepler/kic10/search.php>



5.6. ábra. **Balra:** Teszt a magányos forró jupiterek kimutatására. Csillagokkal a többszörös rendszereket, keresztekkel egyedülálló forró jupitereket, nagy fekete körökkel a szignifikáns TTV-jelet mutató forró jupitereket jelöltem. A behúzott vonal az ismert, koplanáris, többszörös bolygórendszerek által elfoglalt térrész felső határát mutatja. **Jobbra:** Teszt exohold-kísérők kimutatására. Nagy fekete körök: egyszeres TTV-jelet mutató forró jupiterek, csillagok: többszörös TTV-jelet mutató rendszerek a mintánkból. A ferde pontozott vonal egy $1 M_{Jup}$ tömegű bolygó körül a Hill-sugár távolságában keringő, $1 M_{\oplus}$ tömegű hold által okozott TTV-jelet mutatja (Szabó és mtsai, 2013a).

- a szignifikáns TTV-t mutató forró jupitereknek nagy holdjaik vannak;
- egyéb, azonosíthatatlan folyamat okoz periodikus TTV-t.

A legvalószínűbb forgatókönyv, hogy néhány forró jupiternek bolygókísérői vannak. Könnyen elképzelhető, hogy többségük nem mutat fedéseket a nagy kölcsönös inklináció és a rálátás szöge miatt. Egy ismert forró jupiter többszörös bolygórendszerben a HAT-P-13 (Bakos és mtsai, 2009), ahol a második, nagy tömegű, külső bolygó (még valószínűbb, hogy barna törpe) excentrikus pályán kering, de nagy valószínűséggel nem mutat fedéseket (Szabó Gy. és mtsai 2010). A WASP-12-nél a fedéseket mutató forró jupiter TTV-jeléből és radiálissebesség-mérésekből egy második komponens létrehozható következtetnek (Maciejewski és mtsai 2011, 2013). Újabban a Kepler-424, forró jupitert tartalmazó rendszerben fedeztek fel egy távolabb, excentrikus pályán keringő, nagy tömegű bolygót radiálissebesség-mérésekkel (Endl és mtsai, 2014).

Az 5.6 ábra bal oldali panelje azonban azt mutatja, hogy a TTV-s forró jupiterek eloszlása nagyban különbözik a többszörös bolygórendszerekétől. Itt a bolygók sugarát tüntettem fel a keringési periódus logaritmusának függvényében. Külön jelöltem a többszörös és magányos rendszereket, illetve a TTV-t mutató forrójupiter-jelölteket. Megfigyelhető, hogy nagyon kevés többszörös rendszer tagja található az empirikusan behúzott $R/R_E > 5 \sqrt[3]{P/\text{nap}}$ vonal felett. Másrészt, minden TTV-s forró jupiterünk (a katalógus végső tesztje előtti, 7 objektumot tartalmazó állapotából) a vonal felett helyezkedik el, illeszkedve a TTV-t nem mutató, magányos jupiterek eloszlásához. Fel lehet hozni érvként, hogy ferde pályán mozgó, nagy tömegű, fedéseket nem mutató bolygókísérők perturbálhatják a fedési forró jupitereket, de ekkor nem lehetnek túl messze a forró jupitertől ahhoz, hogy az 50 nap körüli TTV-periódusokat megma-

gyarázhassuk. Az ilyen bolygóknak előbb-utóbb a radiális sebességet mérő programokban is fel kell bukkanniuk (Steffen és mtsai, 2012). Megjegyezzük, hogy ezek a rendszerek teljesen más architektúrájúak lennének, mint mondjuk a HAT-P-13.

A másik – igaz, egyelőre csak elméleti – lehetőség, hogy a detektált TTV-ket holdak jelenléte okozza (Sartoretti és Schneider, 1999; Szabó és mtsai, 2006; Simon és mtsai, 2007; Kipping 2009a,b). Hogy az ebből adódó TTV-jel nagyságát megbecsülhessük, feltehetjük, hogy a hold nem okoz észrevehető torzulást a fénygörbén, csakis a bolygó tranzitidőpontját módosítja. Ebben az esetben a TTV amplitúdója $a_s M_s P (\pi a M_p)^{-1}$ lesz, ahol a_s és a a hold és a bolygó pályafélnagytengelye, M_s és M_p a tömegük, P a bolygó keringési ideje (Sartoretti és Schneider, 1999). Nagyságrendi becslés céljából $1 M_{Jup}$ tömegű bolygót, $1 M_{\oplus}$ tömegű holdat tételeztem fel, és a holdpálya méretére $a_s = a_H$ értéket vettem, ahol a_H a Hill-sugár. Ezekkel a feltételezésekkel kiszámolható a hold által okozott hatás a bolygó periódusának függvényében.

Az 5.6 ábra jobb oldalán felrajzoltam a forró jupitereink mért TTV-amplitúdóit a keringési idő függvényében. A többszörös periodicitást mutató rendszereket eltérő szimbólumok jelölik, de ezek a jelöltek is követik az egyszerűen periodikus jelű bolygójelöltek eloszlását. Az ábrán berajzolt egyenes mutatja az előbb jellemzett Jupiter + Föld rendszerektől várható TTV-amplitúdót. Bár a jó jelölteink száma csekély, sejthetjük, hogy két napos keringési idő felett a pontok jól követik a modellt, míg rövidebb periódusok esetén jóval nagyobb jelet mutatnak. Az is valószínű azonban, hogy a TTV-amplitúdókat akár 2–5-szörösen is alulbecsülhettük a Sartoretti és Schneider (1999) feltételezésekkel, különösen, ha a hold mérete viszonylag nagy (Szabó és mtsai, 2006; Simon és mtsai, 2007), így a megfigyelések magyarázhatók lennének kisebb tömegű exoholdakkal is.

Felvethető a hold-forgatókönyv ellen, hogy legalább a forró jupiterek egy részének rendelkeznie kell kellően nagy tömegű és távoli holddal, hogy magyarázhassuk a megfigyelt TTV-jeleket. Bár a nagy tömegű ($M > 1 M_{\oplus}$) holdak lehetősége vonzónak tűnhet, ilyen holdak keletkezésére forró jupiterek körül jelenleg nem léteznek megbízható elméletek. A keletkezés és gyakoriság mellett felmerül a stabilitás kérdése is. Az ilyen forró jupiterek mind a csillagtól, mind a holdjuktól jelentős árapályhatást szenvednek el, aminek következtében a bolygó forgási periódusa változik, a hold távolsága pedig tág határok között, igen jelentősen módosulhat, aminek végkimenetele bespirálózás, kilökődés, oszcilláció, sőt akár kaotikus viselkedés is lehet (Barnes és O'Brien, 2002). Ezen az alapon jelentős kétségek fogalmazhatók meg ilyen rendszerek fennmaradása tekintetében, de ez nem zárja ki, hogy néhány ilyen fiatal, vagy egzotikus (pl. befogás) állapotában lévő bolygó-hold rendszert megfigyelhessünk.

5.6. Diszkusszió

Ennél a pontnál érdemes röviden összefoglalni a bemutatott eredményeket:

- Megmutattam, hogy a Kepler egyenletes mintavételezéséhez hasonló programokban mesterséges, stroboszkopikus frekvenciák lépnek fel, amiket a TTV-analízisben figyelembe kell venni. Ugyancsak óvatosan kell kezelni a csillag forgásából adódó periodicitásokat,

amik szintén hamis jelet, periodikus tranzitidőpont-változást indukálhatnak. Szerencsére a Kepler fotometriai pontossága miatt a csillagok fénygörbéje rendszerint felhasználható a forgási periódus egyértelmű megállapítására.

- Miután minden ismert, zavaró, nem-dinamikai eredetű periodicitást kiszűrtem, a Kepler forrójupiter-jelöltjeinek kb. 2%-a mutat periodikus jelet (ezek: KOI-186, 897, 977), ami további vizsgálatot igényel. Ezek a változások nagy valószínűséggel dinamikai eredetűek: bolygókísérő vagy exohold okozhatja őket. Ennek alapján a forró jupiterek magányosságának paradigmája jó eséllyel megkérdőjelezhető (lásd még az 5.7 fejezetet a legújabb fejleményekről e területen).
- A jelöltek egy részénél többszörösen periodikus tranzitidőpont-változás figyelhető meg (mely megerősítést nyert pl. Mazeh és mtsai (2013) munkája révén). Ezek eredete egyelőre nem tisztázott, de nem magyarázható az itt tárgyalt mechanizmusokkal.

Santerne és mtsai (2012) radiálissebesség-méréseken alapuló becslése szerint a Kepler rövid periódusú jupiter jelöltjei között a false positive-ok aránya akár a $34,8\% \pm 6,5\%$ -ot is elérheti. Ugyanez a csoport az eredeti 159 jelöltet tartalmazó mintánkból néhányról kimutatta, hogy nem bolygó. Korábban Morton és Johnson (2011) 5–10% közötti false positive arányt állapítottak meg a Kepler-mintára. Fressin és mtsai (2013) magyarázata a legvalószínűbb az ellentmondásra: megmutatták, hogy jelentősen különbözik egymástól a kis- és nagyméretű bolygókat eredményező hamis asztrofizikai konfigurációk száma, így például a kis neptunuszokra ($2-4R_{\odot}$) $6,7 \pm 1,1\%$, míg a gázóriásokra ($6-22 R_{\odot}$) $17,7 \pm 2,9\%$ false positive arány adódik. Attól függően, hogy melyik munkát vesszük, a 159-es mintánkból akár 8–60 is lehet false positive (ha a barna törpéket is megengedjük), a végső, háromra redukálódott jelöltlista viszont maximum egyetlen nembolygó-jelöllet tartalmazhat (de legvalószínűbb, hogy mindegyik dinamikai eredetű TTV-t mutató jelöltünk valódi bolygó).

Figyelemre méltó, hogy a már említett, elfejlődött KOI-977-en, valamint a KOI-256-on kívül (ami egy M törpe egy nagy Jupiter típusú planétával), az 5.1 táblázatban található jelöltek nagyon hasonlóak mind csillagaik, mind pedig bolygóik paramétereinek tekintetében. A csillagtömegek árnyalatnyival nagyobbak a Napénál ($0,93$ és $1,13 M_{\odot}$ között szóródnak), míg a sugarak ($0,97-1,21 R_{\odot}$) fősorozati csillagokat sugallnak. A planéták sugarai ($7,9-12,4$ Föld-sugár) a kanonikus jupiterkének felelnek meg, a keringési periódusuk $1,0$ és $5,0$ nap közé esik. Ha a talált periodikus TTV-k dinamikai eredetűek, akkor talán nem véletlen egybeesés, hogy ennyire hasonló architektúrájú bolygórendszerekben fordulnak elő. Megjegyezzük, hogy a legjobb jelöltjeimnél talált TTV amplitúdók jelentősen kisebbek, mint a legtöbb TTV felhasználásával megerősített és karakterizált bolygórendszerek esetében találunk (pl. Holman és mtsai, 2010; Steffen és mtsai, 2013).

5.7. Az eredmények hatása

Az itt ismertetett tranzitidőpont-változásokkal kapcsolatos metodológiai és forró jupiterekkel kapcsolatos eredményeim (Szabó és mtsai, 2013a) nagy visszhangot keltettek, megjelenésük óta már 25 független idézetet¹⁷ kaptak. Amióta felhívtuk a figyelmet a látszólagos frekvenciák jelentkezésére, azóta több kutatócsoport is nagy hangsúlyt fektet azok kiszűrésére, sőt bevett eljárás lett az azóta megjelent TTV-t vizsgáló kutatásoknál (Mazeh és mtsai, 2013, 2015; Seeliger, és mtsai, 2014; Swift és mtsai, 2015; Holczer és mtsai, 2015), valamint hasznosnak bizonyult az exobolygó-jelöltek Kepler-fénygörbéinek alaposabb vizsgálatánál is (Armstrong és Rein, 2015).

Kipping és mtsai (2013a) a HEK¹⁸ projekt keretében átvizsgáltak néhány Kepler-rendszert exoholdak után kutatva. Ez a tanulmány jól kiegészíti a forró jupiterekkel kapcsolatos munkámat: Kipping és mtsai a TTV-k eloszlását vizsgálta, én pedig periódusanalízist alkalmaztam. A legjobb jelöltjeink listája diszjunkt: Kipping és mtsai (2013a) a 6 Föld-sugárnál kisebb bolygók körül kerestek kísérőket, s bár néhány jó jelölt itt is akadt, exohold-felfedezésről egyelőre nem számolhatunk be. Megemlítendő, hogy a HEK-csapat (Kipping és mtsai, 2014) később 8 M törpe bolygói körül keresett holdkísérőket, szintén negatív eredménnyel.

Steffen és mtsai (2012) független vizsgálatot végeztek a Kepler Q0–Q6 adatain tranzitidőpont-változásokat és a forró jupiterekén kívüli tranzitokat keresve. A fő megállapításuk, hogy jelentős különbség van a forró jupiterek és az egyéb exobolygópopulációk (meleg jupiterek, forró neptunuszok stb.) között a további kísérők jelenléte szempontjából, amit a rendszerek különböző dinamikai története magyarázhat. Steffen és mtsai (2012) jelöltlistája szintén diszjunkt a Szabó és mtsai (2013) munkában találhatóval, aminek fő oka, hogy ők elsősorban a hosszú periódusú TTV-eket keresték. Ezek ugyanis azok a változások, amelyeket rezonanciaközei konfiguráció esetén várunk.

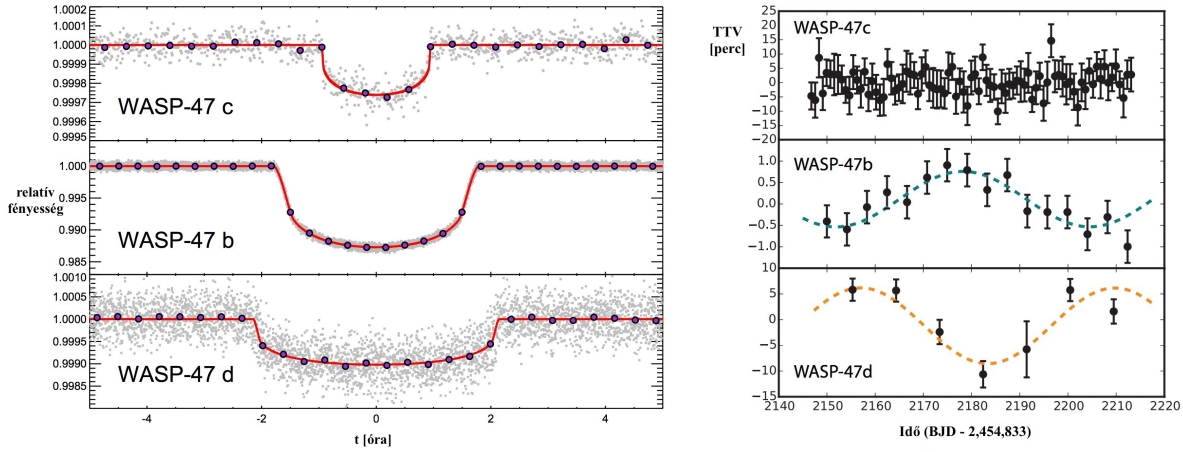
Mazeh és mtsai (2013) az enyémhez nagyon hasonló eljárást követtek, és hasonló jelöltlistát tettek közzé, immár a Q12-es Kepler-negyeddal bezárólag végezve a vizsgálatokat. A több frekvenciát mutató TTV-jelöltek egy részét ez a tanulmány megerősítette, néhány false positive kiszűrését pedig segítette.

A saját és mások itt felsorolt munkái nyomán megállapíthatjuk, hogy a 16 hónapnyi Q0–Q6 Kepler-adat a legtöbb esetben nem elég hosszú a jelöltek TTV-viselkedésének pontos megértéséhez. A Kepler teljes megfigyelési anyagának (ahol lehetséges, a mintavételezési effektust elkerülendő, 1 perces, short cadence üzemmódban) újbóli átvizsgálása, pontos földi mérések, és a jövő tervezett űrfotometriai programjai (elsősorban a PLATO (Rauer és mtsai, 2014) lesz erre alkalmas) segíthetnek a munka továbbvitelében.

Ahogy említettem, elsőként hívtam fel a figyelmet arra, hogy elképzelhető, hogy a forró jupiterek nem magányosak. Miközben sok cikk hivatkozik a forró jupiterek "magányosságának" paradigmájára (pl. Gandolfi és mtsai, 2015), és ennek következményeire a bolygórendszerek keletkezésére vonatkozóan (Seeliger és mtsai, 2015), e dolgozat leadása előtt néhány héttel je-

¹⁷2015 januárjáig.

¹⁸Hunt for Exomoons with Kepler



5.7. ábra. **Balra:** A K2 által felfedezett bolygók 1 perces mintavételezésű fedési fénygörbéi a WASP-47 rendszerben. A középen szereplő WASP-47b, forró jupiter korábban is ismert volt. A szürke pontok az egyedi mérések, a kék pöttyök átlagolás eredményei. **Jobbra:** A rendszer két nagyobb bolygójára mérhető TTV-változások, melyek megerősítik a bolygók tömegét (Becker és mtsai, 2015).

lent meg egy munka, amely az első olyan rendszer felfedezéséről szól, amelyik a forró jupiter mellett távolabbi és közelebbi kísérőbolygókat is tartalmaz. A Kepler utódmissziója, a K2 felfedezése tehát megerősíti gondolatmenetemet és felvetésemet, miszerint érdemes további bolygókat (holdakat) keresni ezekben a rendszerekben.

A WASP-47 bolygórendszer

A WASP-program (Pollaco és mtsai, 2006) által felfedezett WASP-47 rendszerben egyetlen forró jupiter volt ismert (WASP-47b, Hellier és mtsai, 2012). A rendszert a K2 misszió is megfigyelte a 3. mezőben 69 napig 2014 novembere és 2015 januárja között (Becker és mtsai, 2015). A megfigyelések további két bolygókísérőre derítettek fényt: a WASP-47c szuperföld (sugara $1,817 R_{\oplus}$), és mindössze 0,7896 nap alatt kerüli meg szülőcsillagát; a WASP-47d pedig egy neptunusz (sugara $3,60 R_{\oplus}$), és a forró jupiternél távolabb kering (keringési periódusa 9,03079 nap). Érdekesség, hogy mindhárom bolygó fed, a K2 közvetlenül csak ezeket a planétákat képes kimutatni. A rendszer központi csillaga hasonlít a Naphoz, tömege: $M = 1,04 \pm 0,08 M_{\odot}$, sugara: $R = 1,15 \pm 0,04 R_{\odot}$. Numerikus szimulációk szerint a bolygórendszer milliárd éves időskálán stabil, amit a nagyon kis excentricitás és a kicsi kölcsönös inklináció (azaz a rendszer lapossága) nagyban elősegít. A K2 által kimért fedési fénygörbéket az 5.7 ábra bal oldalán láthatjuk.

A gravitációs kölcsönhatás mérhető, több perces amplitúdójú TTV-jelet eredményez a két nagyobb bolygó között. A K2 által mért TTV-ből kiszámolhatók a tömegek: a WASP-47b-re $M = 337^{+22}_{-36} M_{\oplus}$, a WASP-47d-re $M = 8,5^{+3,8}_{-3,6} M_{\oplus}$ adódott, míg a szuperföldre (mérhető TTV híján) csak felső becslés adható: WASP-47c $M < 22 M_{\oplus}$. A TTV nem csak a bolygótömegek mérésére használható, de általa igazolható az is, hogy az exobolygók valóban egy rendszerhez tartoznak (validálás). Az ellentétes fázisban mozgó TTV-hullámokat az 5.7 ábra jobb oldala mutatja. Érdemes megjegyezni, hogy a TTV-ből származtatott tömeg megegyezik a radiális

sebességből mérttel (Hellier és mtsai, 2012). Dai és mtsai (2015) független spektroszkópiai (Doppler-) mérésekkel a WASP-47b jelű planétára $M = 370 \pm 29 M_{\oplus}$ -et, a WASP-47d esetében $M = 10,4 \pm 8,4$ földtömeget kaptak. A legbelső bolygó tömegét is sikerült pontosítani: eszerint a WASP-47c tömege $M = 12,2 \pm 3,7 M_{\oplus}$, így átlagsűrűsége $11,2 \pm 3,6 \text{ g/cm}^3$.

A rendszer azért is különösen fontos, mert a forró jupiterek tekintélyes hányadának keringési síkja nem merőleges a csillag forgástengelyére (ennek a szögnek az égbolt síkjával alkotott vetülete mérhető a Rossiter–McLaughlin-effektus révén), időnként még fordított irányú keringés is előfordul. Ez valószínűleg a bolygófejlődés viharos dinamikai múltját tükrözi. A többszörös, kompakt exobolygórendszerek azonban legtöbbször nem mutatnak ilyen eltérést, keringési síkjuk normálisa gyakorlatilag egybeesik a központi csillag forgástengelyével. Egy fontos kivétel azonban itt is akad: a Kepler-56 rendszer egy központi vörös óriásból és két, ferde pályán, de azonos síkban keringő fedési exobolygóból áll (Huber és mtsai, 2013). Az egyik $0,88 \pm 0,04$ a másik $0,58 \pm 0,03$ jupitersugarú planéta, és keringési síkjuk 45 fokkal hajlik a csillag egyenlítőjéhez. Ennél a rendszernél valószínűleg egy távolabbi, fedést nem mutató bolygókísérő okozza a nagy pályahajlást.

Felmerül a kérdés, hogy a WASP-47 forró jupitere melyik csoportba tartozik. Sanchis-Ojeda és mtsai (2015) spektroszkópiai mérései megmutatták, hogy a rendszer keringési síkjának normálisa $\lambda = 0 \pm 24^\circ$ szöget zár be vetületben a csillag forgástengelyével, vagyis dinamikai fejlődése valószínűleg csendesen zajlott. A mérés viszonylag nagy bizonytalansága abból adódik, hogy a csillag forgásának látóiránnyal bezárt szöge ($v \sin i$) csak nagy hibával ismert.

Neveu-VanMalle és mtsainak (2015) radiálissebesség-mérésekkel egy negyedik, távolabb keringő bolygókísérőt is sikerült felfedezniük a WASP-47 rendszerben. Ezt a planétát 572 napos keringési idő jellemzi, 1,36 csillagászati egységre kering a központi égitesttől és a tömegére kapott alsó becslés: $M \cdot \sin i = 1,24 \pm 0,22 M_{\text{Jup}}$.

A WASP-47 az első forró jupiter, aminek további közeli, jelentős gravitációs hatást kifejtő bolygókísérőit sikerült felfedezni. Mindez alátámasztja az ebben a fejezetben bemutatott eredményeimet, miszerint ha nem is gyakran, de előfordulhatnak forró jupitert tartalmazó rendszerben további bolygókísérők, amik tranzit, vagy TTV révén (később pedig hosszabb, pontosabb radiálissebesség-mérésekkel) kimutathatók lesznek. Ez pedig a forró jupiterek keletkezéséről is bővebb információval fog szolgálni.

6. fejezet

Kitekintés

A szerencse a tervezés és a munka mellékterméke.

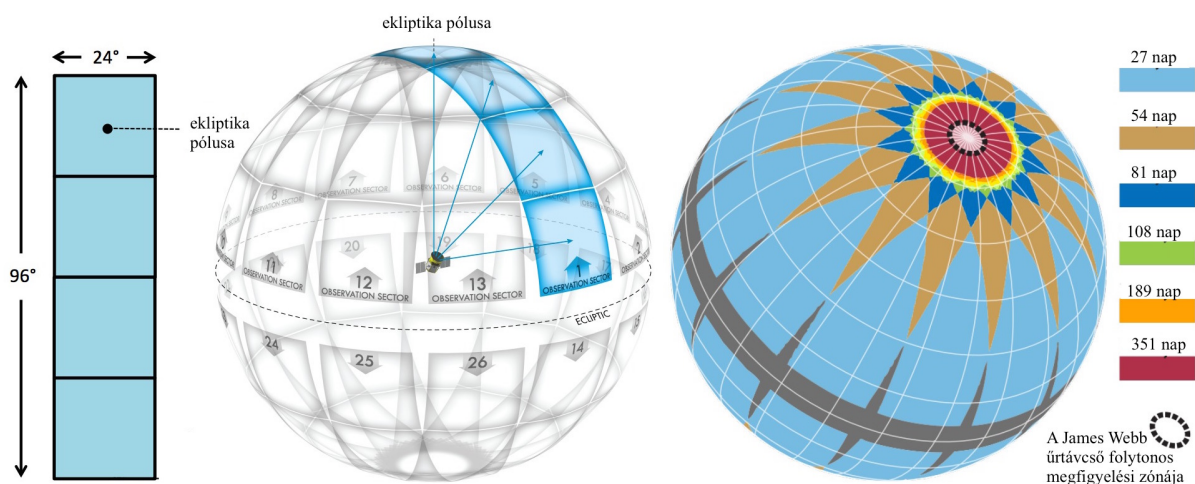
Branch Rickey, baseballjátékos (1881–1965)

A dolgozatban felvillantott témák nem zárultak le, sőt ahogy érzékeltettem is minden fejezet végén, további izgalmas felfedezések várhatók mind az exobolygók, mind a csillagok fizikájának, és azon belül a pulzáció klasszikus, de mindmáig temérdek kutatási feladatot adó alterületein. Összefoglalásként az űrfotometria jövőjét vázolom, bemutatva a következő generációs űreszközöket, űrtávcsöveket, röviden kitérve a magyar vonatkozásokra is. Ahogy e fejezet mottója sugallja: ez a sokszor kevésbé látványos, de nélkülözhetetlen, akár több évtizeden is átívelő előkészítő háttérmunka teszi lehetővé, hogy a nagy felfedezések megszülethessenek.

A **BRITE–Constellation** a MOST nyomdokain halad: hat apró, 3 cm átmérőjű objektívekkel felszerelt nanosatellitából áll, melyek célja a legfényesebb ($V < 4\text{--}6$ mag) csillagok fotometriai analízise, elsősorban pulzációjuk vizsgálata (Weiss és mtsai, 2014). Az osztrák, kanadai és lengyel együttműködésben készült, kék vagy vörös színszűrővel felszerelt űrtávcsövek többek között cefeidákat is fognak mérni, az RR Lyrae csillagok azonban túl halványak a BRITE-nak. A "konstelláció" első tagjait 2013-ban állították Föld körüli pályára, és a kezdeti nehézségek fokozatos legyűrése után ma már a flottát alkotó műholdak közül öt üzemszerűen működik.

Bár elsősorban a már felfedezett exobolygók további részletes vizsgálatát célozza az Európai Űrügynökség első Small Mission kategóriában kiválasztott **CHEOPS**¹ (CHaracterizing ExOPlanet Satellite) missziója, az űrfotometria természete révén magukról a csillagokról is fog információt szolgáltatni (aktivitás, foltok, változékonyság stb.), így itt is fontos röviden kitérni rá. A tervezett megfigyelési stratégia az, hogy ismert és előre jelzett exobolygófedéseket fog megfigyelni az űrteleszkóp, előreláthatólag mintegy 2-3000-szer. A pontos megfigyelések az exobolygók pontos alakjának és méretének mérését célozzák, de egyes esetekben gyűrűk vagy

¹<http://cheops.unibe.ch/>



6.1. ábra. A TESS egyszerre megfigyelt látómezeje és megfigyelési stratégiája, jobbra az égbolt egyes területeinek maximális megfigyelési hossza (Ricker és mtsai, 2015).

exoholdak kimutatására is lehetőség nyílhat (Simon és mtsai, 2015). A konzorciumot svájci intézetek vezetik, de a tudományos tanácsban (Science Board) és a tudományos bizottságban (Science Team) magyar képviselőink is vannak, és Magyarország hardverépítéssel is hozzájárul a 2017-ben indítandó misszió remélt sikeréhez.

A TESS² szintén 2017-ben induló, de a NASA által finanszírozott és az MIT által vezetett exobolygókereső misszió lesz (Ricker és mtsai, 2015), ami a közeli, fényes csillagok körül keringő bolygók felfedezésére vállalkozik, szinte a teljes égboltot lefedve. A Kepler viszonylag kis égterületet vizsgált át, és halvány csillagok körül talált bolygókat a fedési módszerrel, azok 1-2 évnél rövidebb keringési idejű kísérőiről teljes statisztikát szolgáltatva. A TESS ezzel szemben négy kisebb távcsővel nagyobb területet vizsgál át hasonló módszerrel, így a fényesebb – és egyben közelebbi – csillagok körüli planéták lesznek a célpontjai. Ezek az exobolygók szerkezete és légköre tanulmányozható ugyanis a legjobban földi és űrtávcsövekkel (pl. a jövőbeli, infravörös tartományban működő James Webb űrteleszkóppal). A stratégia egyben jelzi, hogy napjainkban az exobolygó kutatás fókuszja a felfedezéstől a bolygók karakterizálása felé mozdul el.

A műszer négy, 10 cm körüli, széles látómezejű távcsőből áll, mindegyik teleszkópnál négy darab, 2000x2000 pixelből álló CCD szolgálja a képrögzítést. A teleszkópok mindegyike 24x24 fokos égterületet lát, ami azt jelenti, hogy egyszerre az ekliptika síkjától annak pólusáig viszonylag széles sávot képes lefedni. Egy területet 27 napig monitoroz a TESS. Ekkor az észlelendő sávot eltolva folytatja a megfigyeléseket. Tizenhárom ilyen beállítással az égbolt 50%-a lefedhető. A sávokat úgy választják, hogy átfedések révén az ekliptika pólusa körüli égterület állandóan észlelhető lesz, ami a James Webb teleszkóp folyamatos megfigyelési zónájával is egybeesik. Egy év után az ekliptikától délre fekvő területek következnek hasonló stratégiával (6.1. ábra). Sikeres küldetés esetén a műszer akár egy évtizedig is működhet.

A 200 millió dollár költségvetésű, SMEX (Small Explorer) kategóriájú misszió két év alatt

²Transiting Exoplanet Survey Telescope, <http://tess.gsfc.nasa.gov/>

szinte a teljes égboltot átvizsgálja, ami 400-szor akkora területet jelent, mint a Kepler látómezeje. Ebből csak az ekliptika közvetlen környezete, valamint a Galaxisunk síkja körüli területek maradnak ki, ahol a viszonylag nagy pixelek miatt a sűrű csillagmezőben az egyedi objektumok szétválasztása aránytalanul nagy gondot jelentene. Eközben a TESS a Kepler-mintához viszonyítva átlagosan tízszer közelebbi bolygókat fog felfedezni. A műszer félmillió célpontot (csillagot) figyel meg, ebből kb. 35 ezernek pontosan ismerjük a távolságát a Hipparcos műholdnak köszönhetően. Ha minden a tervek szerint halad, akkor a többi égitest távolságát – ami a csillagok és így a bolygórendszerek pontos karakterizálását fogja segíteni – az európai Gaia űrszonda szolgáltatja. Mintegy 200000 csillagról 2 perces időközökben lesz egy-egy adatpont, de fél óránként a teljes látómezőt letöltik és eltárolják, nagyságrendekkel több objektum precíz fényességének méréséhez nyitva meg az utat. Az előzetes becslések alapján a TESS-bolygók között 315 szuperföld-, 710 szub-Neptunusz-, 1060 Neptunusz- és 660 Jupiter-méretű várható.

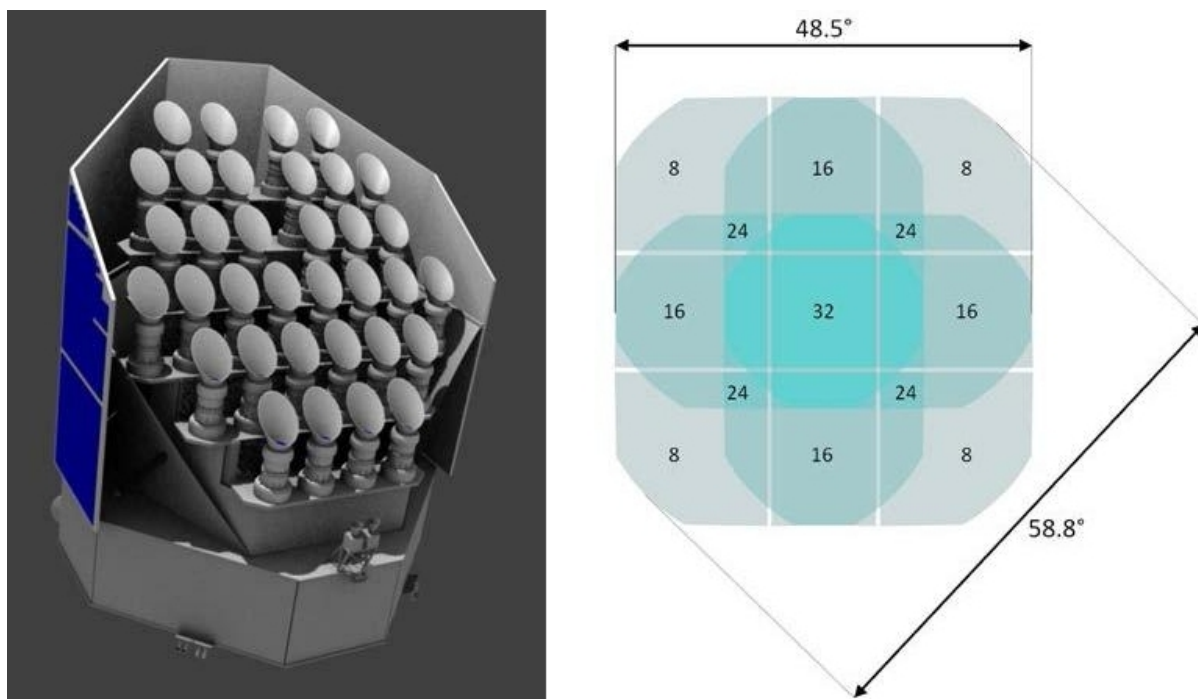
Az űrtávcső újszerű, mondhatni zseniális pályája biztosítja a 27 napos folyamatos megfigyeléseket. A nagyjából két hét keringési idejű speciális pálya a Hold keringési síkjára csaknem merőleges. Különlegesség, hogy az űrtávcső pontosan két keringést tesz meg, amíg a Hold egyszer megkerüli Földünket, vagyis a két szatellita 2:1 arányú rezonanciában lesz. A földközelpontjában geoszinkron, legtávolabbi pontjában pedig a Hold távolságában húzódó pályát többszöri módosítással fogják elérni, ahol a parittya szerepét a hintamanőverben a Hold tölti majd be. Az adatok továbbítása a Földre kéthetente néhány órát vesz igénybe, amikor a műszer földközelen halad el.

E sorok írója 2015-től az RR Lyrae és cefeida csillagokkal foglalkozó munkacsoport vezetésére kapott megbízást. A TESS-adatok feldolgozásában nagy hasznát vesszük majd a Keplerrel szerzett tapasztalatoknak.

A **PLATO**³ az Európai Űrügynökség M-osztályú missziója (Rauer és mtsai, 2014). Fő célja a fényes csillagok körül keringő exobolygók felfedezése és asztroszeizmológiai, illetve földi follow-up mérésekkel a lakhatósági zónában keringő Föld-típusú bolygók minél jobb karakterizációja.

A berendezés 34 darab 12 cm átmérőjű egyedi lencsés teleszkópból fog állni, melyeket közös platformra szerelnek (6.2 ábra). A tervezés szakít az eddigi egyetlen távcsőre épülő megoldással. Az új design egyedülállóan nagy látómezőt fog biztosítani. Erre szükség is lesz, hiszen a küldetés fő feladata a fényes csillagok körüli fedési exobolygók megtalálása, ehhez pedig nagy égterületeket kell átvizsgálni. A távcsőrendszer a CoRoT-hoz és a Keplerhez hasonlóan a bolygófedések okozta apró fénycsökkenésre vadászik majd a csillagok fényét folyamatosan megfigyelve. A 2250 négyzetfok látómezejű műszer újítása abban is rejlik, hogy ugyanazt a területet több távcső fogja megfigyelni, így a fénygörbék átlagolásával jóval nagyobb pontosság érhető el, mint az az egyedi kisméretű távcsövektől elvárható lenne. A hat évre tervezett névleges működés alatt a PLATO az égbolt felét fogja letapogatni, a megfigyelési stratégia két terület 2-3 évre tervezett hosszú megfigyeléséből, és további néhány terület 2-5 hónapig tartó rövidebb megfigyelési szakaszaiból áll majd (6.3 ábra).

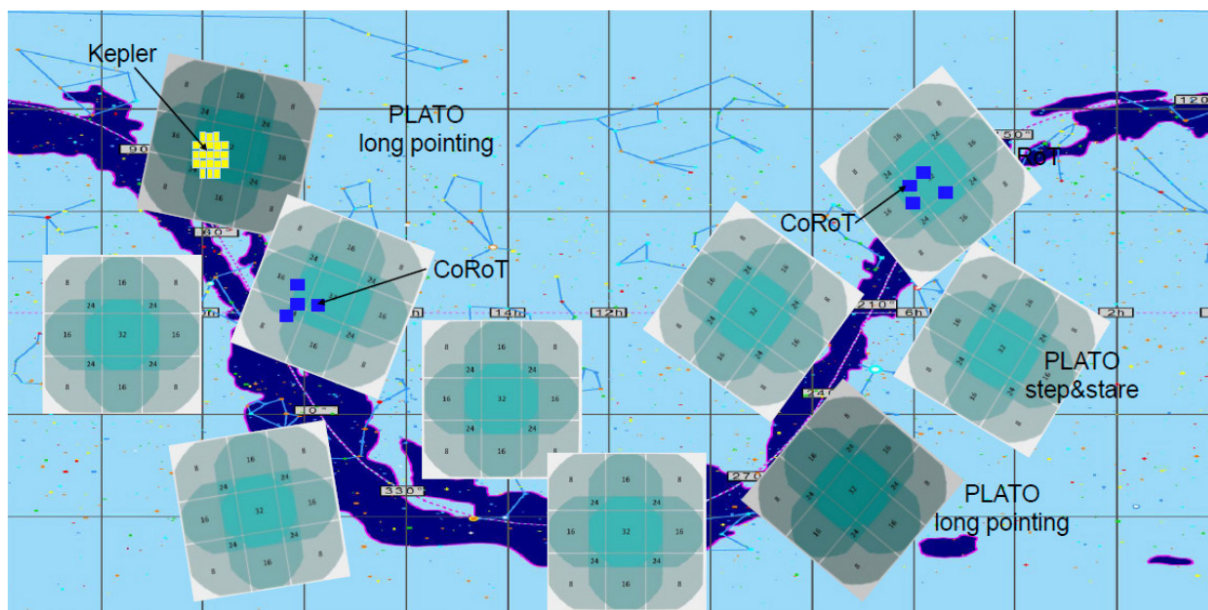
³PLANetary Transits and Oscillations of Stars, <http://www.oact.inaf.it/plato/PPLC/Home.html>



6.2. ábra. A PLATO 34 db optikai távcsöve és az általuk lefedett, átlapoló, nagyméretű látómező (Rauer és mtsai, 2014).

A PLATO fedélzetén 32 db normál kamera lesz, melyeket 25 másodpercenként olvasnak ki, 2 db gyors kamera pedig 2,5 másodpercenként szolgáltat majd egy-egy mérési pontot. Ez utóbbiakat kék, illetve vörös színszűrővel is felszerelik, míg a normál kamerák fehér fényben fognak mérni. A tervezett detektorrendszer 136 darab CCD-érzékelőből áll, amik együttesen $0,9 \text{ m}^2$ felületet foglalnak majd el. A PLATO-val egymillió 4–16 magnitúdós csillag fényességét tervezzük mérni, ez több száz kisméretű bolygó felfedezését jelentheti, és sok ezer új planétát a Neptunusz–Jupiter mérettartományban. A hangsúly a bolygók paramétereinek pontos meghatározásán van: a felfedezésen kívül pontos sugár, tömeg és koradatokat is várunk a PLATO-tól. Ezekben nagy szerepe lesz a csillagszeizmológiai vizsgálatoknak, ami a csillagok Nap-típusú rezgéseit felhasználva 2%-os pontossággal sugarat, 4–10%-os bizonytalansággal tömeget, és 10% pontosságú kormeghatározást tesz lehetővé, ami közel egy nagyságrenddel jobb a más módszerekkel elérhető becsléseknél. A hosszú megfigyelések a lakhatósági zónában keringő bolygók tömeges felfedezését is előrevetítik. A műszert a Nap–Föld-rendszer L2 Lagrange-pontjába juttatják majd.

A 12 európai ország és Brazília alkotta PLATO konzorcium tagja 2010 óta Magyarország is, a szervezet legfelső irányító testületében (Board) e sorok írója képviseli hazánkat, aki ezenkívül a szaturált csillagok fotometriáját előkészítő csoport munkáját is vezeti. Utóbbiak a legfényesebb csillagok lesznek, ahol kulcsfontosságú, hogy a detektor kiolvasási oszlopai mentén szétfolyt fluxus ellenére pontos fényességmérést tudjunk végezni, hiszen ezek jelentik a program legfontosabb célpontjait. Ugyancsak e sorok írója vezeti a kiegészítő tudományos programban a klasszikus pulzáló változócsillagok analízisét és annak előkészítését végző nemzetközi munkacsoportot. A misszióhoz előreláthatóan jelentős magyar hardverhozzájárulás is lesz.



6.3. ábra. A PLATO látómezeje és a lehetséges megfigyelt égitérületek. Érdeemes ezeket összehasonlítani a Kepler (kis sárga négyzetek) és a CoRoT (kék négyszögek) által elérhető területek nagyságával (Rauer és mtsai, 2014).

A klasszikus pulzáló változócsillagok vizsgálata tehát nemcsak megmarad, hanem ki is bővül majd, új kérdéseket fogunk megválaszolni a következő generációs műszerekkel. A K2, a TESS és a PLATO meg fogja sokszorozni a nagy pontossággal, megszakításmentesen monitorozott RR Lyrae és cefeida csillagok számát. Így akár sok száz, vagy több ezer RR Lyrae és cefeida csillagról fog rendelkezésre állni néhány hét (TESS), 2-3 hónapnyi (K2) vagy akár több év (PLATO) hosszúságú adatsorunk. Ezek a lehetőségek az űrfotometria új aranykorát jelzik előre, hiszen részleteiben és nagy mintán vizsgálhatjuk majd a nemlineáris dinamikai jelenségek (rezonanciák, perióduskettőződés, Blazskó-effektus, nemradiális módusok) e dolgozatban is tárgyalt megjelenési formáit, statisztikai elemzéseket végezhetünk előfordulásukkal kapcsolatban a galaktikus pozíció, a fémtartalom, kor és más paraméterek függvényében. Ugyanakkor ritkán előforduló (például amplitúdómodulált RRc) csillagokat is nagyobb számban lesz alkalmunk tanulmányozni. Az említett űrfotometriai programok kiegészítik egymást: a TESS elkerüli az ekliptikai területeket, a K2 pedig éppen ezeket pásztázza. A Keplerrel szemben a TESS a teljes égbolt fogja megfigyelni, kisebb határfényességig, míg a PLATO nagyobb határfényességig fogja monitorozni az égbolt mintegy felét. Az exobolygók és a pulzáló csillagok vizsgálata az eddigiekhez hasonlóan kéz a kézben fog haladni.

Mindezeket az erőfeszítéseket a Gaia⁴ asztrometriai és az LSST⁵ hatalmas égboltfelmérő programok fogják megkoronázni, melyek nemcsak a csillagok parallaxisát és távolságát fogják szolgáltatni (elsősorban a Gaia, de a halványabb csillagok esetén az LSST is, Ivezic és mtsai, 2012), de az ismert klasszikus pulzáló változócsillagok számát is meg fogják sokszorozni, és megnyitják az utat Galaxisunk keletkezésének, szerkezetének, a törpegalaxisok beolvadásá-

⁴<http://sci.esa.int/gaia/>

⁵<http://www.lsst.org/>

nak és a galaktikus hálóstruktúrákat célzó beható vizsgálatok előtt. Nem utolsósorban: az űrfotometriai missziók által jól tanulmányozott, jól karakterizált változócsillag-minta, ami az asztrometriai misszióknak és az űrtávcsöveknek is közös célpontja lesz, alapvető viszonyulási pontot fog kijelölni a következő évtizedek vizsgálataiban. Ezt az évtizedekre szóló kutatási programot most alapozzuk meg az űrfotometriai missziókban végzett előkészítő munkával és sikeres pályázatokkal.

Elméleti oldalról a legnagyobb előrelépést a pulzáció dinamikájának leírásában a háromdimenziós kódok előretörésétől reméljük (Muthsam 2016; Deupree 2016). A konvekció valószínűsége közelebb álló, kevesebb közelítést igénylő modellezésével a konvekció-pulzáció kapcsolata, a radiális és nemradiális módusok gerjesztésének ma még kevésbé értett kérdései, a különös magas rendű rezonanciák, és magának a rejtélyes Blazskó-effektusnak a jobb megértése várható. Az ebben rejlő potenciál teljes kihasználásához azonban a kutatók rendelkezésére álló számítási kapacitás további növekedése is szükséges.

Az ismerttetett, előkészületi fázisban levő űrfotometriai programok okkal jogosítanak tehát arra, hogy bízzunk az űrfotometria fényes jövőjében. A dolgozat keretei között felvillantott eredmények – amik természetesen csak egy szeletét adják a Magyarországon folyó, témához kapcsolódó kutatásoknak – véleményünk szerint erős alapokon nyugvó, biztos bázist jelentenek a területhez várható magyar hozzájárulás tekintetében. Az olvasó fogadja ezt a dolgozatot is az ebbe az irányba tett apró, de határozott lépésként.

Hivatkozások

1. Affer, L., Micela, G., Favata, F., Flaccomio, E.: The rotation of field stars from CoRoT data, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 424, 11, 2012
2. Agol, E., Steffen, J., Sari, R., Clarkson, W.: On detecting terrestrial planets with timing of giant planet transits, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 359, 567, 2005
3. Aigrain, S., Hodgkin, S. T., Irwin, M. J., Lewis, J. R., Roberts, S. J.: Precise time-series photometry for the Kepler-2.0 mission, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 447, 2880, 2015
4. Akerlof, C., Amrose S., Balsano R., Bloch, J., Caspersen, D. és 11 társszerző: ROTSE All-Sky Surveys for Variable Stars. I. Test Fields, *The Astronomical Journal*, 119, 1901, 2000
5. Alcock, C., Allsman, R. A., Axelrod, T. S., Bennett, D. P., Cook, K. H. és 11 társszerző: The MACHO project LMC variable star inventory. 1: Beat Cepheids-conclusive evidence for the excitation of the second overtone in classical Cepheids, *The Astronomical Journal*, 109, 1653, 1995
6. Alcock, C., Allsman, R. A., Alves, D., Axelrod, T. S., Becker, A. C. és 16 társszerző: The MACHO Project LMC Variable Star Inventory. VI. The Second Overtone Mode of Cepheid Pulsation From First/Second Overtone Beat Cepheids, *The Astrophysical Journal*, 511, 185, 1999
7. Alcock, C., Alves, D. R., Becker, A., Bennett, D., Cook, K. H. és 18 társszerző: The MACHO Project Large Magellanic Cloud Variable Star Inventory. XI. Frequency Analysis of the Fundamental-Mode RR Lyrae Stars, *The Astrophysical Journal*, 598, 597, 2003
8. Alexander, D. R., Ferguson, J. W.: Low-temperature Rosseland opacities, *The Astrophysical Journal*, 437, 879, 1994
9. Anderson, R. I., Ekström, S., Georgy, C., Meynet, G., Mowlavi, N., Eyer, L.: On the effect of rotation on populations of classical Cepheids. I. Predictions at solar metallicity, *Astronomy & Astrophysics*, 564, A100, 2014
10. Antonello, E., Aikawa, T.: A comparison between observations and nonlinear models of first overtone mode Cepheids, *Astronomy & Astrophysics*, 302, 105, 1995
11. Antonello, E., Aikawa, T.: Study of transient double-mode behaviour of nonlinear models of Cepheids, *Astronomy & Astrophysics*, 337, 145, 1998
12. Antonello, E., Kanbur, S. M.: The characteristics of second-overtone-mode Cepheids predicted by non-linear pulsation models, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 286, 33, 1997
13. Antonello E., Morelli, P. L.: Search for resonance effects in long period Cepheids, *Astronomy & Astrophysics*, 312, 541, 1996
14. Antonello, E., Poretti, E.: Structural properties of the light curves of s-Cepheids, *Astronomy & Astrophysics*, 169, 149, 1986
15. Antonello, E., Poretti, E., Reduzzi, L.: The separation of S-Cepheids from classical Cepheids and a new definition of the class, *Astronomy & Astrophysics*, 236, 138, 1990
16. Appourchaux, T., Michel, E., Auvergne, M., Baglin, A., Toutain, T. és 17 társszerző: CoRoT sounds the stars: p-mode parameters of Sun-like oscillations on HD 49933, *Astronomy & Astrophysics*, 488, 705, 2008
17. Arellano Ferro, A: Period and amplitude variations of Polaris, *The Astrophysical Journal*, 274, 755, 1983
18. Arellano Ferro, A., Rojo Arellano, E., González-Bedolla, S., Rosenzweig, P.: *uvby β* Photometric Data and Fourier Coefficients for Galactic Population I and Population II Cepheids, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 117, 167, 1998
19. Armstrong, C., Rein, H.: High Order Harmonics in Light Curves of Kepler Planets, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 453, L98, 2015
20. Asplund, M., Grevesse, N., Sauval, A. J.: The Solar Chemical Composition, *ASP Conference Series*, 336, 25, 2005

21. Auvergne, M., Bodin, P., Boisdard, L., Buey, J.-T., Chaintreuil, S. és 106 társszerző: The CoRoT satellite in flight: description and performance, *Astronomy & Astrophysics*, 506, 411, 2009
22. Baglin, A., Michel, E., Auvergne, M., COROT Team: The seismology programme of the CoRoT space mission, *Proceedings of SOHO 18/GONG 2006/HELAS I, Beyond the spherical Sun (ESA SP-624)*, id.34.1, 2006
23. Bakos, G. Á., Noyes, R. W., Kovács, G., Latham, D. W., Sasselov, D. D. és 14 társszerző: HAT-P-1b: A Large-Radius, Low-Density Exoplanet Transiting One Member of a Stellar Binary, *The Astrophysical Journal*, 656, 552, 2007
24. Bakos, G. Á., Howard, A. W., Noyes, R. W., Hartman, J., Torres, G. és 14 társszerző: HAT-P-13b,c: A Transiting Hot Jupiter with a Massive Outer Companion on an Eccentric Orbit, *The Astrophysical Journal*, 707, 446, 2009
25. Ballard, S., Fabrycky, D., Fressin, F., Charbonneau, D., Desert, J.-M. és 26 társszerző: The Kepler-19 System: A Transiting $2.2 R_{\oplus}$ Planet and a Second Planet Detected via Transit Timing Variations, *The Astrophysical Journal*, 743, 200, 2011
26. Balona, L. A., Breger, M., Catanzaro, G., Cunha, M. S., Handler, G. és 11 társszerző: Unusual high-frequency oscillations in the Kepler δ Scuti star KIC 4840675, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 424, 1187, 2012
27. Bányai, E., Kiss, L. L., Bedding, T. R., Bellamy, B., Benkő, J. M. és 13 társszerző: Variability of M giant stars based on Kepler photometry: general characteristics, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 436, 1576, 2013
28. Baranowski, R., Smolec, R., Dimitrov, W., Kwiatkowski, T., Schwarzenberg-Czerny, A. és 7 társszerző: V440 Per: the longest-period overtone Cepheid, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 396, 2194, 2009
29. Barclay, T., Rowe, J. F., Lissauer, J. J., Huber, D., Fressin, F. és 53 társszerző: A sub-Mercury-sized exoplanet, *Nature*, 494, 452, 2013
30. Barnes, J. W., O'Brien, D. P.: Stability of Satellites around Close-in Extrasolar Giant Planets, *The Astrophysical Journal*, 575, 1087, 2002
31. Basu, S., Antia, H. M.: Helioseismology and solar abundances, *Physics Reports*, 457, 217, 2008
32. Batalha, N. M., Borucki, W. J., Koch, D. G., Bryson, S. T., Haas, M. R. és 7 társszerző: Selection, Prioritization, and Characteristics of Kepler Target Stars, *The Astrophysical Journal*, 713, 109, 2010
33. Batalha, N. M., Rowe, J. F., Bryson, S. T., Barclay, T., Burke, C. J. és 71 társszerző: Planetary Candidates Observed by Kepler. III. Analysis of the First 16 Months of Data, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 204, 24, 2013
34. Batygin, K., Bodenheimer, P., Laughlin, G.: Determination of the Interior Structure of Transiting Planets in Multiple-Planet Systems, *The Astrophysical Journal*, 704, 49, 2009
35. Beaulieu, J. P., Krockenberger, M., Sasselov, D. D., Renault, C., Ferlet, R. és 25 társszerző: EROS VARIABLE STARS: Discovery of Beat Cepheids in the Small Magellanic Cloud and the effect of metallicity on pulsation, *Astronomy & Astrophysics*, 321, L5, 1997
36. Beaulieu, J. P., Buchler, J. R., Kolláth, Z.: Cepheid mass-luminosity relations from the Magellanic Clouds, *Astronomy & Astrophysics*, 373, 164, 2001
37. Beaulieu, J.-P., Buchler, J. R., Marquette, J.-B., Hartman, J. D., Schwarzenberg-Czerny, A.: Detection of Beat Cepheids in M33 and Their Use as a Probe of the M33 Metallicity Distribution, *The Astrophysical Journal*, 653, 101, 2006
38. Becker, J. C., Vanderburg, A., Adams, F. C., Rappaport, S. A., Schwengeler, H. M.: WASP-47: A Hot Jupiter System with Two Additional Planets Discovered by K2, *ApJL*, 812, L18, 2015
39. Bedding, T. R., Mosser, B., Huber, D., Montalbán, J., Beck, P. és 29 társszerző: Gravity modes as a way to distinguish between hydrogen- and helium-burning red giant stars, *Nature*, 471, 608, 2011
40. Bedding, T. R., Murphy, S. J., Colman, I. L., Kurtz, D. W.: Échelle diagrams and period spacings of g modes in γ Doradus stars from four years of Kepler observations, *EPJ Web of Conferences*, Volume 101, id.01005, 2015
41. Béky, B., Holman, M. J., Kipping, D. M., Noyes, R. W.: Stellar Rotation-Planetary Orbit Period Commensurability in the HAT-P-11 System, *The Astrophysical Journal*, 788, 1, 2014
42. Benkő, J. M., Kolenberg, K., Szabó, R., Kurtz, D. W., Bryson, S. T. és 16 társszerző: Flavours of variability: 29 RR Lyrae stars observed with Kepler, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 409, 1585, 2010
43. Benkő, J. M., Plachy, E., Szabó, R., Molnár, L., Kolláth, Z.: Long-timescale Behavior of the Blazhko Effect from Rectified Kepler Data, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 213, 31, 2014
44. Benkő, J. M., Szabó, R., Paparó, M.: Blazhko RR Lyrae light curves as modulated signals, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 417, 974, 2011

45. Benkő, J. M., **Szabó, R.**: The Blazhko Effect and Additional Excited Modes in RR Lyrae Stars, *The Astrophysical Journal Letters*, 809, L19, 2015
46. Berdnikov, L. N., Ignatova, V. V., Pastukhova, E. N., Turner, D. G.: A search for evolutionary changes in the periods of low-amplitude Cepheids, *Astronomy Letters*, 23, 177, 1997
47. Berdnikov, L. N.: Photoelectric observations of Cepheids in $UBV(RI)_c$, *VizieR On-line Data Catalog II/285*, 2008
48. Blazhko, S.: Mitteilung über veränderliche Sterne *Astronomische Nachrichten*, 175, 325, 1907
49. Bloemen, S., Marsh, T. R., Østensen, R. H., Charpinet, S., Fontaine, G. és 22 társszerző: Kepler observations of the beaming binary KPD 1946+4340, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 410, 1787, 2011
50. Bono, G., Caputo, F., Cassisi, S., Marconi, M., Piersanti, L., Tornambè, A.: Intermediate-Mass Star Models with Different Helium and Metal Contents, *The Astrophysical Journal*, 543, 945, 2000
51. Bono, G., Gieren, W. P., Marconi, M., Fouqué, P.: On the Pulsation Mode Identification of Short-Period Galactic Cepheids, *The Astrophysical Journal*, 552, 141, 2001
52. Borkovits, T., Hajdu, T., Sztakovics, J., Rappaport, S., Levine, A. és 2 társszerző: A comprehensive study of the Kepler triples via eclipse timing, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 455, 4136, 2016
53. Borucki, W. J., Summers, A. L.: The photometric method of detecting other planetary systems, *Icarus*, 58, 121, 1984
54. Brown, T. M., Latham, D. W., Everett, M. E., Esquerdo, G. A.: Kepler Input Catalog: Photometric Calibration and Stellar Classification, *The Astronomical Journal*, 142, 112, 2011
55. Bruntt, H., Kjeldsen, H., Buzasi, D. L., Bedding, T. R.: Evidence for Granulation and Oscillations in Procyon from Photometry with the WIRE Satellite, *The Astrophysical Journal*, 633, 440, 2005
56. Bruntt, H., Evans, N. R., Stello, D., Penny, A. J., Eaton, J. A. 4 társszerző: Polaris the Cepheid Returns: 4.5 Years of Monitoring from Ground and Space, *The Astrophysical Journal*, 683, 433, 2008
57. Bryson, S. T., Tenenbaum, P., Jenkins, J. M., Chandrasekaran, H., Klaus, T. és 6 társszerző: The Kepler Pixel Response Function, *The Astrophysical Journal Letters*, 713, L97, 2010
58. Buchler, J. R.: A dynamical systems approach to nonlinear stellar pulsations, *Astrophysics and Space Science*, 210, 9, 1993
59. Buchler, J. R.: Beat Cepheids as Probes of Stellar and Galactic Metallicity. II. Opacities with the AGS Mixture, *The Astrophysical Journal*, 680, 1412, 2008
60. Buchler, J. R.: Classical Cepheids - a Review, *Variables Stars and the Astrophysical Returns of the Microlensing Surveys*. Eds: R. Ferlet, J.-P. Maillard és B. Raban, Editions Frontieres, 181. o., 1997
61. Buchler, J. R., Kolláth, Z.: Strange Cepheids and RR Lyrae Stars, *The Astrophysical Journal*, 555, 961, 2001
62. Buchler, J. R., Kolláth, Z.: Mode-switching Timescales in the Classical Variable Stars, *The Astrophysical Journal*, 573, 324, 2002
63. Buchler, J. R., Kolláth, Z., Beaulieu, J. P.: Magellanic Cloud Cepheids: Pulsational and evolutionary modelling vs. observations, *Astronomy & Astrophysics*, 423, 643, 2004
64. Buchler, J. R., Kolláth, Z.: On the Blazhko Effect in RR Lyrae Stars, *The Astrophysical Journal*, 731, 24, 2011
65. Buchler, J. R., Kovács, G.: Period doubling bifurcations and chaos in W Virginis models, *The Astrophysical Journal*, 320, 57, 1987
66. Buchler, J. R., Moskalik, P., Kovács, G.: A survey of Bump Cepheid model pulsations, *The Astrophysical Journal*, 351, 617, 1990
67. Buchler, J. R., Moskalik, P.: Pulsational study of BL Herculis models. I - Radial velocities, *The Astrophysical Journal*, 391, 736, 1992
68. Buchler, J. R., **Szabó, R.**: Beat Cepheids as probes of stellar and galactic metallicity, *The Astrophysical Journal*, 660, 723, 2007
69. Buchler, J. R., Wood, P. R., Keller, S., Soszyński, I.: Ultralow-Amplitude Cepheids in the Large Magellanic Cloud, *The Astrophysical Journal Letters*, 631, 151, 2005
70. Buchler, J. R., Yecko, P. A., Kollath, Z.: The nature of strange modes in classical variable stars, *Astronomy & Astrophysics*, 326, 669, 1997
71. Buzasi, D. L., Bruntt, H., Bedding, T. R., Retter, A., Kjeldsen, H. és 6 társszerző: Altair: The Brightest δ Scuti Star, *The Astrophysical Journal*, 619, 1072, 2005
72. Campante, T. L., Barclay, T., Swift, J. J., Huber, D., Adibekyan, V. Zh. és 36 társszerző: An Ancient Extrasolar System with Five Sub-Earth-size Planets, *The Astrophysical Journal*, 799, 170, 2015

73. Cabrera, J., Csizmadia, Sz., Lehmann, H., Dvorak, R., Gandolfi, D. és 5 társszerző: The Planetary System to KIC 11442793: A Compact Analogue to the Solar System, *The Astrophysical Journal*, 781, 18, 2014
74. Carrera, R., Gallart, C., Pancino, E., Zinn, R.: The Infrared Ca II Triplet as Metallicity Indicator, *The Astronomical Journal*, 134, 1298, 2007
75. Carrera, R., Gallart, C., Hardy, E., Aparicio, A., Zinn, R.: The Chemical Enrichment History of the Large Magellanic Cloud, *The Astronomical Journal*, 135, 836, 2008
76. Castor, J. I.: A Simplified Picture of the Cepheid Phase Lag, *The Astrophysical Journal*, 154, 793, 1968
77. Çelik, L., Ekmekci, F., Nemec, J., Kolenberg, K., Benkő, J. M., **Szabó, R.** és 3 társszerző: How to Correctly Stitch Together Kepler Data of a Blazhko Star, *Astrophysics and Space Science Proceedings series*, 31, P25, 2013
78. Chadid, M., Wade, G. A., Shorlin, S. L. S., Landstreet, J. D.: No evidence of a strong magnetic field in the Blazhko star RR Lyrae, *Astronomy & Astrophysics*, 413, 1087, 2004
79. Chadid, M., Benkő, J. M., **Szabó, R.**, Paparó, M., Chapellier, E. és 12 társszerző: First CoRoT light curves of RR Lyrae stars. Complex multiplet structure and non-radial pulsation detections in V1127 Aquilae, *Astronomy & Astrophysics*, 510, 39, 2010
80. Chadid, M.: Detection of multiple modes in a new double-mode RR Lyrae star, *Astronomy & Astrophysics*, 540, A68, 2012
81. Chaplin, W. J., Kjeldsen, H., Christensen-Dalsgaard, J., Basu, S., Miglio, A. és 54 társszerző: Ensemble Asteroseismology of Solar-Type Stars with the NASA Kepler Mission, *Science* 332, 213, 2011
82. Charbonneau, D., Brown, T. M., Latham, D. W., Mayor, M.: Detection of Planetary Transits Across a Sun-like Star, *The Astrophysical Journal*, 529, 45, 2000
83. Charbonneau, D., Brown, T. M., Noyes, R. W., Gilliland, R. L.: Detection of an Extrasolar Planet Atmosphere, *The Astrophysical Journal*, 568, 377, 2002
84. Christensen-Dalsgaard, J., Petersen, J. O.: Pulsation models of the double-mode Cepheids in the Large Magellanic Cloud, *Astronomy & Astrophysics*, 299, 17, 1995
85. Christensen-Dalsgaard, J.: An Overview of Helio- and Asteroseismology, *Proceedings of the SOHO 14 / GONG 2004 Workshop (ESA SP-559)*, 1, 2004
86. Christensen-Dalsgaard, J., Kjeldsen, H., Brown, T. M., Gilliland, R. L., Arentoft, T. és 5 társszerző: Asteroseismic Investigation of Known Planet Hosts in the Kepler Field, *The Astrophysical Journal*, 713, 164, 2011
87. Collier Cameron, A., Bouchy, F., Hébrard, G., Maxted, P., Pollacco, D. és 34 társszerző: WASP-1b and WASP-2b: two new transiting exoplanets detected with SuperWASP and SOPHIE, *The Astrophysical Journal*, 375, 951, 2007
88. Cordier, D.: Lés étoiles de type céphéide: tests pur la théorie de la structure interne stellaire, PhD thesis, Univ. Rennes, 2000
89. Cordier, D., Lebreton, Y., Goupil, M.-J., Lejeune, T., Beaulieu, J.-P.: Cepheids in the SMC: Blue Loops and Mass-Luminosity Relation, *ASP Conference Proceedings*, 274, 69, 2002
90. Coughlin, J. L., Thompson, S. E., Bryson, S. T., Burke, C. J., Caldwell, D. A. és 7 társszerző: Contamination in the Kepler Field. Identification of 685 KOIs as False Positives via Ephemeris Matching Based on Q1–Q12 Data, *The Astronomical Journal*, 147, 119, 2014
91. Cox, A. N.: Some Thoughts About the Blazhko Effect for RR Lyrae Variable Pulsations, *Astrophysics and Space Science Proceedings*, 31, 77, 2013
92. Cox, J. P., Giuli, R. T.: *Principles of Stellar Structure* (New York: Gordon & Breach), 1968
93. Crockett, N. R.; Garnett, D. R.; Massey, P.; Jacoby, G.: Neon and Oxygen Abundances in M33, *The Astrophysical Journal*, 637, 741, 2006
94. Cseresnyes, P., Alard, C., Guibert, J.: Structure of the Sagittarius dwarf galaxy at low Galactic latitudes, *Astronomy & Astrophysics*, 357, 871, 2000
95. Csizmadia, Sz., Renner, S., Barge, P., Agol, E., Aigrain, S. és 31 társszerző: Transit timing analysis of CoRoT-1b, *Astronomy & Astrophysics*, 510, 94, 2010
96. Da Costa, G. S., Rejkuba, M., Jerjen, H., Grebel, E. K.: Ancient Stars Beyond the Local Group: RR Lyrae Variables and Blue Horizontal Branch Stars in Sculptor Group Dwarf Galaxies, *The Astrophysical Journal*, 708, 121, 2010
97. Dai, F., Winn, J. N., Arriagada, P., Butler, R. P., Crane, J. D. és 6 társszerző: Doppler Monitoring of the WASP-47 Multiplanet System, *The Astrophysical Journal Letters*, 813, L9, 2015
98. Dawson, R. I., Murray-Clay, R. A., Johnson, J. A.: The Photoeccentric Effect and Proto-hot Jupiters. III. A Paucity of Proto-hot Jupiters on Super-eccentric Orbits, *The Astrophysical Journal*, 798, 66, 2015

99. Deb, S., Singh, H. P., Kumar, S., Kanbur, Shashi M.: Morphology and metallicity of the Small Magellanic Cloud using RRab stars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 449, 2768, 2015
100. Debosscher, J., Sarro, L. M., Lopez, M., Deleuil, M., Aerts, C. és 25 társszerző: Automated supervised classification of variable stars in the CoRoT programme. Method and application to the first four exoplanet fields, *Astronomy & Astrophysics*, 506, 519, 2009
101. Deeg, H., Moutou, C., Erikson, A., Csizmadia, Sz., Tingley, B. és 57 társszerző: A transiting giant planet with a temperature between 250K and 430K, *Nature*, 464, 384, 2010
102. Dékány, I., Minniti, D., Catelan, M., Zoccali, M., Saito, R. K. és 2 társszerző: VVV Survey Near-infrared Photometry of Known Bulge RR Lyrae Stars: The Distance to the Galactic Center and Absence of a Barred Distribution of the Metal-poor Population, *The Astrophysical Journal Letters*, 776, 19, 2013
103. Derekas, A., Kiss, L., Borkovits, T., Huber, D., Lehmann, H. és 39 társszerző: HD 181068: A Red Giant in a Triply Eclipsing Compact Hierarchical Triple System, *Science*, 332, 216, 2011
104. Derekas, A., Szabó, Gy. M., Berdnikov, L., **Szabó, R.**, Smolec, R. és 9 társszerző: Period and light-curve fluctuations of the Kepler Cepheid V1154 Cygni, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 425, 1312, 2012
105. de Ridder, J., Barban, C., Baudin, F., Carrier, F., Hatzes, A. P. és 8 társszerző: Non-radial oscillation modes with long lifetimes in giant stars, *Nature*, 459, 398, 2009
106. Désert, J.-M., Charbonneau, D., Demory, B.-O. Ballard, S. Carter, J. A. és 37 társszerző: The Hot-Jupiter Kepler-17b: Discovery, Obliquity from Stroboscopic Starspots, and Atmospheric Characterization, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 197, 14, 2011
107. Detre, L., Szeidl, B.: On the Nature of the 41-day Cycle of RR Lyrae, *Astrophysics and Space Science Library*, 36, 31, 1973
108. Deupree, R.: Multidimensional Hydrodynamic Convection in Full Amplitude RR Lyrae models, *Communications from the Konkoly Observatory of the Hungarian Academy of Sciences*, 105, nyomdában, 2016, szerk: Szabó, R., Szabados, L., Kinemuchi K.
109. Di Criscienzo, M., Caputo, F., Marconi, M., Musella, I.: RR Lyrae-based calibration of the Globular Cluster Luminosity Function, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 365, 1357, 2006
110. Dinshaw, N., Matthews, J. M., Walker, G. A. H., Hill, G. M.: The radial-velocity variations of Polaris - A Cepheid leaving the instability strip?, *The Astronomical Journal*, 98, 2249, 1989
111. Doyle, L. R., Carter, J. A., Fabrycky, D. C., Slawson, R. W., Howell, S. B. és 44 társszerző: Kepler-16: A Transiting Circumbinary Planet, *Science*, 333, 1602, 2011
112. Dziembowski, W.: Oscillations of giants and supergiants, *Acta Astronomica*, 27, 95, 1977
113. Dziembowski, W. A., Cassisi, S.: Nonradial Modes in RR Lyr Stars, *Acta Astronomica*, 49, 371 1999
114. Dziembowski, W. A., Smolec, R.: Double-Overtone Cepheids in the Large Magellanic Cloud, *Acta Astronomica*, 59, 19, 2009
115. Dziembowski, W. A.: Puzzling Frequencies in First Overtone Cepheids, *Acta Astronomica*, 62, 323, 2012
116. Dziembowski, W. A.: Nonradial Oscillations in Classical Pulsating Stars. Predictions and Discoveries, *Communications from the Konkoly Observatory of the Hungarian Academy of Sciences*, 105, nyomdában, 2016, szerk: Szabó, R., Szabados, L., Kinemuchi K.
117. Eaton, J. A., Henry, G. W., Odell, A. P.: Orbits and Pulsations of the Classical ζ Aurigae Binaries, *The Astrophysical Journal*, 679, 1490, 2008
118. Edmonds, P. D., Gilliland, R. L.: K Giants in 47 Tucanae: Detection of a New Class of Variable Stars, *The Astrophysical Journal Letters*, 464, L157, 1996
119. Endl, M., Caldwell, D. A., Barclay, T., Huber, D., Isaacson, H. és 11 társszerző: Kepler-424 b: A "Lonely" Hot Jupiter that Found a Companion, *The Astrophysical Journal*, 795, 151, 2014
120. ESA: Hipparcos Catalogue, ESA SP-1200, 1997
121. Evans, N. R., **Szabó, R.**, Derekas, A., Szabados, L., Cameron, C. és 8 társszerző: Observations of Cepheids with the MOST satellite: Contrast between Pulsation Modes, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 446, 4008, 2015
122. Fadeyev, Yu. A.: Theoretical rates of pulsation period change in the Galactic Cepheids, *Astronomy Letters*, 40, 301, 2014
123. Fadeyev, Yu. A.: Evolutionary status of Polaris, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 449, 4011, 2015
124. Feast, M. W., Catchpole, R. M. : The Cepheid period-luminosity zero-point from HIPPARCOS trigonometrical parallaxes, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 286, 1, 1997

125. Fernie, J. D.: Classical Cepheids with companions. II. Polaris., *The Astronomical Journal*, 71, 732, 1966
126. Feuchtinger, M., Buchler, J. R., Kolláth, Z.: Hydrodynamical Survey of First-Overtone Cepheids, *The Astrophysical Journal*, 544, 1056, 2000
127. Fletcher, S. T., Chaplin, W. J., Elsworth, Y., Schou, J., Buzasi, D.: Frequency, splitting, linewidth and amplitude estimates of low- ℓ p modes of α Cen A: analysis of Wide-Field Infrared Explorer photometry, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 371, 935, 2006
128. Ford, E. B., Rowe, J. F., Fabrycky, D. C., Carter, J. A., Holman, M. J. és 21 társszerző: Transit Timing Observations from Kepler. I. Statistical Analysis of the First Four Months, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 197, 2, 2011
129. Ford, E. B., Ragozzine, D., Rowe, J. F., Steffen, J. H., Barclay, T. és 16 társszerző: Transit Timing Observations from Kepler. V. Transit Timing Variation Candidates in the First Sixteen Months from Polynomial Models, *The Astrophysical Journal*, 756, 185, 2012
130. Freedman, W. L., Madore, B. F., Gibson, B. K., Ferrarese, L., Kelson, D. D. és 10 társszerző: Final Results from the Hubble Space Telescope Key Project to Measure the Hubble Constant, *The Astrophysical Journal*, 553, 47, 2001
131. Freedman, W. L., Madore, B. F.: The Hubble Constant, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 48, 673, 2010
132. Fressin, F., Torres, G., Charbonneau, D., Bryson, S. T., Christiansen, J. és 4 társszerző: The False Positive Rate of Kepler and the Occurrence of Planets, *The Astrophysical Journal*, 766, 81, 2013
133. Fressin, F., Torres, G., Désert, J.-M., Charbonneau, D., Batalha, N. M. és 28 társszerző: Kepler-10c: a 2.2 Earth Radius Transiting Planet in a Multiple System, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 197, 5, 2015
134. Fröchlich, H.-E.: The differential rotation of ϵ Eri from MOST data, *Astronomische Nachrichten*, 328, 1037, 2007
135. Fuller, J., Derekas, A., Borkovits, T., Huber, D., Bedding, T. R., Kiss, L. L.: Tidally induced oscillations and orbital decay in compact triple-star systems, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 429, 2425, 2013
136. Gandolfi, D., Parviainen, H., Deeg, H. J., Lanza, A. F., Fridlund, M. és 14 társszerző: Kepler-423b: a half-Jupiter mass planet transiting a very old solar-like star, *Astronomy & Astrophysics*, 576, A11, 2015
137. Garnett, D. R., Shields, G. A., Skillman, E. D., Sagan, S. P., Dufour, R. J.: Interstellar Abundance Gradients in NGC 2403: Comparison to M33, *The Astrophysical Journal*, 489, 63, 1997
138. Genovali, K., Lemasle, B., da Silva, R., Bono, G., Fabrizio, M. és 14 társszerző: On the α -element gradients of the Galactic thin disk using Cepheids, *Astronomy & Astrophysics*, 580, A17, 2015
139. Geroux, C. M., Deupree, R. G.: Radial Stellar Pulsation and Three-dimensional Convection. I. Numerical Methods and Adiabatic Test Cases, *The Astrophysical Journal*, 731, 18, 2011
140. Geroux, C. M., Deupree, R. G.: Radial Stellar Pulsation and Three-dimensional Convection. II. Two-dimensional Convection in Full Amplitude Radial Pulsation, *The Astrophysical Journal*, 771, 113, 2013
141. Geroux, C. M., Deupree, R. G.: Radial Stellar Pulsation and Three-dimensional Convection. III. Comparison of Two-dimensional and Three-dimensional Convection Effects on Radial Pulsation, *The Astrophysical Journal*, 783, 107, 2014
142. Geroux, C. M., Deupree, R. G.: Radial Stellar Pulsation and Three-dimensional Convection. IV. Full Amplitude Three-dimensional Solutions, *The Astrophysical Journal*, 800, 35, 2015
143. Gil de Paz, A., Boissier, S., Madore, B. F., Seibert, M., Joe, Y. H. és 21 társszerző: The GALEX Ultraviolet Atlas of Nearby Galaxies, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 173, 185, 2007
144. Gillet, D.: Atmospheric dynamics in RR Lyrae stars. The Blazhko effect, *Astronomy & Astrophysics*, 554, A46, 2013
145. Gilliland, R. L., Brown, T. M., Christensen-Dalsgaard, J. ..., **Szabó R.** és 14 társszerző: Kepler Asteroseismology Program: Introduction and First Results, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 122, 131, 2010
146. Gilliland, R. L., McCullough, P. R., Nelan, E. P., Brown, T. M., Charbonneau, D. és 3 társszerző: Asteroseismology of the Transiting Exoplanet Host HD 17156 with Hubble Space Telescope Fine Guidance Sensor, *The Astrophysical Journal*, 726, 2, 2011
147. Gilliland, R. L., Chaplin, W. J., Dunham, E. W., Argabright, V. S., Borucki, W. J. és 12 társszerző: Kepler Mission Stellar and Instrument Noise Properties, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 197, 6, 2011
148. Girardi, L., Bressan, A., Bertelli, G., Chiosi, C.: Evolutionary tracks and isochrones for low- and intermediate-mass stars: From 0.15 to 7 M_{sun} , and from $Z=0.0004$ to 0.03, *Astronomy & Astrophysics Supplement*, 141, 371, 2000

149. Gorynya, N. A., Samus', N. N., Rastorguev, A. S., Sachkov, M. E.: A catalog of Cepheid radial velocities measured in 1992-1995 with a correlation spectrometer, *Astronomical Letters*, 22, 175, 1996
150. Gorynya, N. A., Samus', N. N., Sachkov, M. E., Rastorguev, A. S., Glushkova, E. V., Antipin, S. V.: A catalog of Cepheid radial velocities measured in 1995-1998 with the correlation spectrometer, *Astronomical Letters*, 24, 815, 1998
151. Grevesse, N., Anders, E.: Solar element abundances, Solar interior and atmosphere, Tucson, AZ, University of Arizona Press, 1227. o., 1991
152. Grevesse, N., Noels, A.: Cosmic abundances of the elements, Symposium in Honour of Hubert Reeves' 60th birthday: Origin and evolution of the elements, p. 15, 1993
153. Grigahcène, A., Antoci, V., Balona, L., Catanzaro, G., Daszyńska-Daszkiewicz, J. és 37 társszerző: Hybrid γ Doradus – δ Scuti Pulsators: New Insights into the Physics of the Oscillations from Kepler Observations, *The Astrophysical Journal Letters*, 713, 192, 2010
154. Gruberbauer, M., Kolenberg, K., Rowe, J. F., Huber, D., Matthews, J. M. és 10 társszerző: MOST photometry of the RRd Lyrae variable AQ Leo: two radial modes, 32 combination frequencies and beyond, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 379, 1498, 2007
155. Guggenberger, E., Kolenberg, K., Poretti, E., Chapellier, E., **Szabó, R.** és 2 társszerző: The CoRoT star 105288363: strong cycle to cycle changes of the Blazhko modulation, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 415, 1577, 2011
156. Guggenberger, E., Kolenberg, K., Nemec, J. M., Smolec, R., ... **Szabó, R.** és 11 társszerző: The complex case of V445 Lyr observed with Kepler: two Blazhko modulations, a non-radial mode, possible triple mode RR Lyrae pulsation, and more, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 424, 649, 2012
157. Guzik, J. A., Kaye, A. B., Bradley, P. A., Cox, A. N., Neuforge, C.: Driving the Gravity-Mode Pulsations in γ Doradus Variables, *The Astrophysical Journal Letters*, 542, L57, 2000
158. Guzik, J. A., Bradley, P. A., **Szabó, R.**, Molnár, L., Pigulski, A. és 4 társszerző: Observing Open Clusters with a Sequence of Ages with Kepler, *Kepler White Paper*, arXiv:1310.0772 2013
159. Haas, M. R., Batalha, N. M., Bryson, S. T., Caldwell, D. A., Dotson, J. L. és 11 társszerző: Kepler Science Operations, *The Astrophysical Journal Letters*, 713, L115, 2010
160. Hadden, S., Lithwick, Y.: Densities and Eccentricities of 139 Kepler Planets from Transit Time Variations, *The Astrophysical Journal*, 787, 80, 2014
161. Hartman, J. D., Bakos, G., Stanek, K. Z., Noyes, R. W.: HATNET Variability Survey in the High Stellar Density „Kepler Field” with Millimagnitude Image Subtraction Photometry, *The Astronomical Journal*, 128, 1761, 2004
162. Haschke, R., Grebel, E. K., Duffau, S.: New Optical Reddening Maps of the Large and Small Magellanic Clouds, *The Astronomical Journal*, 141, 158, 2011
163. Hellier, C., Anderson, D. R., Collier Cameron, A., Doyle, A. P., Fumel, A. és 14 társszerző: Seven transiting hot Jupiters from WASP-South, Euler and TRAPPIST: WASP-47b, WASP-55b, WASP-61b, WASP-62b, WASP-63b, WASP-66b and WASP-67b, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 426, 739, 2012
164. Henry, G. W., Marcy, G. W., Butler, R. P., Vogt, S. S.: A Transiting „51 Peg-like” Planet, *The Astrophysical Journal*, 529, 41, 2000
165. Hippke, M.: On the Detection of Exomoons: A Search in Kepler Data for the Orbital Sampling Effect and the Scatter Peak, *The Astrophysical Journal*, 806, 51, 2015
166. Hodson, S. W., Cox, A. N., King, D. S.: Opacity and nonlinear effects on theoretical BL Herculis models, *The Astrophysical Journal*, 253, 260, 1982
167. Hog, E., Baessgen, G., Bastian, U., Egret, D., Fabricius, C. és 7 társszerző: The TYCHO Catalogue, *Astronomy & Astrophysics*, 323, 57, 1997
168. Holman, M. J., Murray, N. W.: The Use of Transit Timing to Detect Terrestrial-Mass Extrasolar Planets, *Science*, 307, 1288, 2005
169. Holman, M. J., Fabrycky, D. C., Ragozzine, D., Ford, E. B., Steffen, J. H. és 36 társszerző: Kepler-9: A System of Multiple Planets Transiting a Sun-Like Star, Confirmed by Timing Variations, *Science*, 330, 51, 2010
170. Holczer, T., Shporer, A., Mazeh, T., Fabrycky, D., Nachmani, G. és 6 társszerző: Time Variation of Kepler Transits Induced by Stellar Spots — A Way to Distinguish between Prograde and Retrograde Motion. II. Application to KOIs, *The Astrophysical Journal*, 807, 170, 2015
171. Howell, S. B., Sobek, C., Haas, M., Still, M., Barclay, T. és 14 társszerző: The K2 Mission: Characterization and Early Results, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 126, 398, 2014
172. Huang, C. X., Penev, K., Hartman, J. D., Bakos, G. Á., Bhatti, W. és 2 társszerző: High Precision Photometry for K2 Campaign 1, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 454, 4159, 2015

173. Huber, D., Bedding, T. R., Arentoft, T., Gruberbauer, M., Guenther, D. B. és 6 társszerző: Solar-like Oscillations and Activity in Procyon: A Comparison of the 2007 MOST and Ground-based Radial Velocity Campaigns, *The Astrophysical Journal*, 731, 94, 2011
174. Huber, D., Carter, J. A., Barbieri, M., Miglio, A., Deck, K. M. és 30 társszerző: Stellar Spin-Orbit Misalignment in a Multiplanet System, *Science*, 342, 331, 2013
175. Idiart, T. P., Maciel, W. J., Costa, R. D. D.: Chemical evolution of the Small Magellanic Cloud based on planetary nebulae, *Astronomy & Astrophysics*, 472, 101, 2007
176. Iglesias, C. A., Rogers, F. J.: Updated Opal Opacities, *The Astrophysical Journal*, 464, 943, 1996
177. Ignatova, V. V., Vozyakova, O. V.: Photoelectric observations of cepheids in 1997-98, *Astronomical and Astrophysical Transactions*, 19, 133, 2000
178. Ivezić, Ž., Tyson, J. A., Abel, B., Acosta, E., Allsman, R. és 184 társszerző: LSST: from Science Drivers to Reference Design and Anticipated Data Products, 2008, arXiv:0805.2366
179. Ivezić, Ž., Beers, T. C., Jurić, M.: Galactic Stellar Populations in the Era of the Sloan Digital Sky Survey and Other Large Survey, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 50, 251, 2012
180. Jeffery, E. J., Smith, E., Brown, T. M., Sweigart, A. V., Kalirai, J. S. és 4 társszerző: HST/ACS Observations of RR Lyrae Stars in Six Ultra-deep Fields of M31, *The Astronomical Journal*, 141, 171, 2011
181. Jenkins, J. M., Caldwell, D. A., Chandrasekaran, H., Twicken, J. D., Bryson, S. T. és 13 társszerző: Initial Characteristics of Kepler Long Cadence Data for Detecting Transiting Planets, *The Astrophysical Journal Letters*, 713, L120, 2010
182. Jontof-Hutter, D., Rowe, J. F., Lissauer, J. J., Fabrycky, D. C., Ford, E. B.: The mass of the Mars-sized exoplanet Kepler-138 b from transit timing, *Nature*, 522, 321, 2015
183. Jurcsik, J., Szeidl, B., Sódor, Á., Dékány, I., Hurta, Zs. és 4 társszerző: The Shortest Modulation Period Blazhko RR Lyrae Star: SS Cancr, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 132, 61, 2006
184. Jurcsik, J., Sódor, Á., Hurta, Zs., Váradi, M., Szeidl, B. és 8 társszerző: An extensive photometric study of the Blazhko RRLyrae star MW Lyr - I. Light-curve solution, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 391, 164, 2008
185. Jurcsik, J., Sódor, Á., Szeidl, B., Kolláth, Z., Smith, H. A. és 9 társszerző: An extensive photometric study of the Blazhko RR Lyrae star MW Lyr - II. Changes in the physical parameters, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 393, 1553, 2009a
186. Jurcsik, J., Sódor, Á., Szeidl, B., Hurta, Zs., Váradi, M. és 7 társszerző: The Konkoly Blazhko Survey: is light-curve modulation a common property of RRab stars?, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 400, 1006, 2009b
187. Jurcsik, J., Sódor, Á., Hajdu, G., Szeidl, B., Dózsa, Á. és 11 társszerző: An extensive photometric study of the Blazhko RR Lyrae star RZ Lyr, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 423, 993, 2012
188. Jurcsik, J., Sódor, Á., Szeidl, B., Smith, H., Hajdu, G. és 12 társszerző: Is period doubling indeed the clue to understanding the Blazhko effect? in: *Stellar Pulsations, Impact of New Instrumentation and New Insights*, Springer, Szerk.: Suárez, J.C., Garrido, R., Balona, L.A., Christensen-Dalsgaard, J., 2013
189. Jurcsik, J., Smitola, P., Hajdu, G., Nuspl, J.: On the Modulation of RR Lyrae Stars in the Globular Cluster M3, *The Astrophysical Journal Letters*, 797, 3, 2014
190. Jurcsik, J., Smitola, P., Hajdu, G., Sódor, Á., Nuspl, J. és 13 társszerző: Overtone and Multi-mode RR Lyrae Stars in the Globular Cluster M3, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 219, 25, 2015
191. Kallinger, T., Zwintz, K., Pamyatnykh, A. A., Guenther, D. B., Weiss, W. W.: Pulsation of the K 2.5 giant star GSC 09137-03505? *Astronomy & Astrophysics*, 433, 267, 2005
192. Kallinger, T., Guenther, D. B., Matthews, J. M., Weiss, W. W., Huber, D. és 3 társszerző: Nonradial p-modes in the G9.5 giant ϵ Ophiuchi? Pulsation model fits to MOST photometry, *Astronomy & Astrophysics*, 478, 497, 2008
193. Kienzie, F., Moskalik, P., Bersier, D., Pont, F.: Structural properties of s-Cepheid velocity curves Constraining the location of the $\omega_4 = 2\omega_1$ resonance, *Astronomy & Astrophysics*, 341, 818, 1999
194. Kipping, D. M.: Transit timing effects due to an exomoon, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 392, 181, 2009a
195. Kipping, D. M.: Transit timing effects due to an exomoon - II, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 396, 1797, 2009b
196. Kipping, D. M., Bakos, G. Á., Buchhave, L., Nesvorný, D., Schmitt, A.: The Hunt for Exomoons with Kepler (HEK). I. Description of a New Observational project, *The Astrophysical Journal*, 750, 115, 2012

197. Kipping, D. M., Hartman, J., Buchhave, L. A., Schmitt, A. R., Bakos, G. Á., Nesvorný, D.: The Hunt for Exomoons with Kepler (HEK). II. Analysis of Seven Viable Satellite-hosting Planet Candidates, *The Astrophysical Journal*, 770, 101, 2013a
198. Kipping, D. M., Forgan, D., Hartman, J., Nesvorný, D., Bakos, G. Á., Schmitt, A., Buchhave, L.: The Hunt for Exomoons with Kepler (HEK). III. The First Search for an Exomoon around a Habitable-zone Planet, *The Astrophysical Journal*, 777, 134, 2013b
199. Kipping, D. M., Nesvorný, D., Buchhave, L. A., Hartman, J., Bakos, G. Á., Schmitt, A. R.: The Hunt for Exomoons with Kepler (HEK). IV. A Search for Moons around Eight M Dwarfs, *The Astrophysical Journal*, 784, 28, 2014
200. Kiss, L. L., Szatmáry, K.: Period-doubling events in the light curve of R Cygni: Evidence for chaotic behaviour, *Astronomy & Astrophysics*, 390, 585, 2002
201. Kiss, Cs., Pál, A., Farkas-Takács, A. I., Szabó, Gy. M., **Szabó, R.** és 6 társszerző: Nereid from space: Rotation, size and shape analysis from Kepler/K2, Herschel and Spitzer observations, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, közlésre elfogadva, 2016, arXiv:1601.02395
202. Klagyivik, P., Szabados, L.: Observational studies of Cepheid amplitudes. I. Period-amplitude relationships for Galactic Cepheids and interrelation of amplitudes, *Astronomy & Astrophysics*, 504, 959, 2009
203. Klein, C. R., Richards, J. W., Butler, N. R., Bloom, J. S.: Mid-infrared period-luminosity relations of RR Lyrae stars derived from the AllWISE Data Release, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 446, L96, 2014
204. Knutson, H. A., Dragomir, D., Kreidberg, L., Kempton, E. M.-R., McCullough, P. R. és 5 társszerző: Friends of Hot Jupiters. I. A Radial Velocity Search for Massive, Long-period Companions to Close-in Gas Giant Planets, *The Astrophysical Journal*, 794, 155, 2014
205. Kolenberg, K., Smith, H. A., Gazeas, K. D., Elmasli, A., Breger, M. és 9 társszerző: The Blazhko effect of RR Lyrae in 2003-2004, *Astronomy & Astrophysics*, 459, 577, 2006
206. Kolenberg, K., Bryson, S., **Szabó, R.**, Kurtz D. W., Smolec, R. és 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
207. Kolenberg, K., **Szabó, R.**, Kurtz, D. W., Gilliland, R. L., Christensen-Dalsgaard J. és 19 társszerző: First KEPLER Results on RR Lyrae Stars, *The Astrophysical Journal Letters*, 713, L198, 2010
208. Kolláth, Z.: MUFRA, Konkoly Observatory Technical Notes, 1, 1, 1990a
209. Kolláth, Z.: Chaotic Behaviour in the Light Variation of the RV Tauri Star R Scuti, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 247, 377, 1990b
210. Kolláth, Z., Beaulieu, J. P., Buchler, J. R., Yecko, P.: Nonlinear Beat Cepheid Models, *The Astrophysical Journal Letters*, 502, 55, 1998
211. Kolláth, Z., Buchler, J. R.: Double-mode stellar pulsations, in *Stellar Pulsation: Nonlinear Studies*, eds. M. Takeuti & D. D. Sasselov (Dordrecht: Kluwer), 29, 2001
212. Kolláth, Z., Buchler, J. R., **Szabó, R.**, Csabry, Z.: Nonlinear beat Cepheid and RR Lyrae models, *Astronomy & Astrophysics*, 395, 932, 2002
213. Kolláth, Z., Molnár, L., **Szabó, R.**: Period-doubling bifurcation and high-order resonances in RR Lyrae hydrodynamical models, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 414, 1111, 2011
214. Kolláth, Z.: The unique dynamical system underlying RR Lyrae pulsations, *Communications from the Konkoly Observatory of the Hungarian Academy of Sciences*, 105, nyomdában, 2016, szerk: Szabó, R., Szabados, L., Kinemuchi K., arXiv:1601.06625
215. Kolodziejczak J. J., Caldwell D. A.: Science from Kepler Collateral Data: 150 ksec/year from 13 Million Stars?, *First Kepler Science Conference*, 2011
216. Kovács, G., Buchler, J. R.: A survey of RR Lyrae models and search for steady multimode pulsations, *The Astrophysical Journal*, 324, 1026, 1988a
217. Kovács, G., Buchler, J. R.: Regular and irregular nonlinear pulsation in population II Cepheid models, *The Astrophysical Journal*, 334, 971, 1988b
218. Kovács, G.: The distance modulus of the Small Magellanic Cloud based on double-mode Cepheids, *Astronomy & Astrophysics*, 360, 1, 2000
219. Kovács, G.: On the double-mode RR Lyrae variables of the Sculptor dwarf galaxy, *Astronomy & Astrophysics*, 375, 469, 2001
220. Kovács, G.: The Blazhko Effect, *AIP Conference Proceedings*, 1170, 261, 2009
221. Kovács, G.: The Blazhko phenomenon, *Communications from the Konkoly Observatory of the Hungarian Academy of Sciences*, 105, nyomdában, 2016, szerk: Szabó, R., Szabados, L., Kinemuchi K., arXiv:1512.05722

222. Kovtyukh, V. V., Luck, R. E., Chekhonadskikh, F. A., Belik, S. I.: Mode identification of three low-amplitude classical Cepheids: V1334 Cyg, V440 Per and V636 Cas, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 426, 398, 2012
223. Kudritzki, R.-P., Urbaneja, M. A., Gazak, Z., Bresolin, F., Przybilla, N. és 2 társszerző: Quantitative Spectroscopy of Blue Supergiant Stars in the Disk of M81: Metallicity, Metallicity Gradient, and Distance, *The Astrophysical Journal*, 747, 15, 2012
224. Kudritzki, R.-P., Urbaneja, M. A., Bresolin, F., Hosek, M. W. Jr., Przybilla, N.: Stellar Metallicity of the Extended Disk and Distance of the Spiral Galaxy NGC 3621, *The Astrophysical Journal*, 788, 56, 2014
225. Kunder, A., Rich, R. M., Hawkins, K., Poleski, R., Storm, J. és 19 társszerző: A high-velocity bulge RR Lyrae variable on a halo-like orbit, *The Astrophysical Journal Letters*, 808, 12, 2015
226. Kurtz, D. W., Cameron, C., Cunha, M. S., Dolez, N., Vauclair, G. és 41 társszerző: Pushing the ground-based limit: 14- μ mag photometric precision with the definitive Whole Earth Telescope asteroseismic data set for the rapidly oscillating Ap star HR1217, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 358, 651, 2005
227. Kurtz, D. W., Bowman, D. M., Ebo, S. J., Moskalik, P., Handberg, R., Lund, M. N.: EPIC 201585823, a rare triple-mode RR Lyrae star discovered in K2 mission data, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 455, 1237, 2016
228. Kwitter, K. B., Lehman, E. M. M., Balick, B., Henry, R. B. C.: Abundances of Planetary Nebulae in the Outer Disk of M31, *The Astrophysical Journal*, 753, 12, 2012
229. Learned, J. G., Kudritzki, R.-P., Pakvasa, S., Zee, A.: The Cepheid Galactic Internet, arXiv:0809.0339, 2008
230. Leavitt, H. S., Pickering, E. C.: Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic Cloud, *Harvard College Observatory Circular*, 173, 1, 1912
231. Lee, C.-H., Kodric, M., Seitz, S., Riffeser, A., Koppenhoefer, J. és 13 társszerző: Properties of M31. III. Candidate Beat Cepheids from PS1 PAndromeda Data and Their Implication on Metallicity Gradient, *The Astrophysical Journal*, 777, 35, 2013
232. Léger, A., Rouan, D., Schneider, J., Barge, P., Fridlund, M. és 156 társszerző: Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. VIII. CoRoT-7b: the first super-Earth with measured radius, *Astronomy & Astrophysics*, 506, 287, 2009
233. Leisy, P., Dennefeld, M.: Planetary nebulae in the Magellanic Clouds. II. Abundances and element production, *Astronomy & Astrophysics*, 456, 451, 2006
234. Lenz, P., Breger, M.: *Period04 User Guide*, *Communications in Asteroseismology*, 146, 53, 2005
235. Long, J. P., Karoui, N. E., Rice, J. A., Richards, J. W., Bloom, J. S.: Optimizing Automated Classification of Variable Stars in New Synoptic Surveys, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 124, 280, 2012
236. Luck, R. E., Kovtyukh, V. V., Andrievsky, S. M.: The Distribution of the Elements in the Galactic Disk, *The Astronomical Journal*, 132, 902, 2006
237. Luck, R. E., Andrievsky, S. M., Fokin, A., Kovtyukh, V. V.: Phase-Dependent Variation of the Fundamental Parameters of Cepheids. IV. s-Cepheids, *The Astronomical Journal*, 136, 98, 2008
238. Luck, R. E., Lambert, D. L.: The Distribution of the Elements in the Galactic Disk. III. A Reconsideration of Cepheids from $l = 30^\circ$ to 250° , *The Astronomical Journal*, 142, 136, 2011
239. Lund, M. N., Handberg, R., Davies, G. R., Chaplin, W. J., Jones, C. D.: K2P² – A Photometry Pipeline for the K2 Mission, *The Astrophysical Journal*, 806, 30, 2015
240. Lupton, R.: *Statistics in Theory and Practice*, Princeton University Press, 1993
241. Maciejewski, G., Errmann, R., Raetz, S., Seeliger, M., Spaleniak, I., Neuhäuser, R.: High-precision photometry of WASP-12 b transits, *Astronomy & Astrophysics*, 528, A65, 2011
242. Maciejewski, G., Dimitrov, D., Seeliger, M., Raetz, St., Bukowiecki, Ł. és 36 társszerző: Multi-site campaign for transit timing variations of WASP-12b: possible detection of a long-period signal of planetary origin *Astronomy & Astrophysics*, 551, A108, 2013
243. Macri, L. M., Stetson, P. B., Bothun, G. D., Freedman, W. L., Garnavich, P. M. és 3 társszerző: The Discovery of Cepheids and a New Distance to NGC 2841 Using the Hubble Space Telescope, *The Astrophysical Journal*, 559, 243, 2001
244. Madore, B. F., Hoffman, D., Freedman, W. L., Kollmeier, J. A., Monson, A. és 4 társszerző: A Preliminary Calibration of the RR Lyrae Period-Luminosity Relation at Mid-infrared Wavelengths: WISE Data, *The Astrophysical Journal*, 776, 135, 2013
245. Maehara, H., Shibayama, T., Notsu, S., Notsu, Y., Nagao, T. és 4 társszerző: Superflares on solar-type stars, *Nature*, 485, 478, 2012

246. Magrini, L., Perinotto, M., Mampaso, A., Corradi, R. L. M.: Chemical abundances of Planetary Nebulae in M 33, *Astronomy & Astrophysics*, 426, 779, 2004
247. Mantegazza, L., Poretti, E.: The Fourier decomposition as a mode discriminator - New first overtone pulsators among Cepheids with P less than 5.5 d, *Astronomy & Astrophysics*, 261, 137, 1992
248. Marconi, M., Caputo, F., Di Criscienzo, M., Castellani, M.: RR Lyrae Stars in Galactic Globular Clusters. II. A Theoretical Approach to Variables in M3, *The Astrophysical Journal*, 596, 299, 2003
249. Marino, R. A., Gil de Paz, A., Castillo-Morales, A., Muñoz-Mateos, J. C., Sánchez, S. F. és 5 társszerző: Integral Field Spectroscopy and Multi-wavelength Imaging of the nearby Spiral Galaxy NGC 5668: An Unusual Flattening in Metallicity Gradient, *The Astrophysical Journal*, 754, 61, 2012
250. Marquette, J. B., Beaulieu, J. P., Buchler, J. R., **Szabó, R.**, Tisserand, P. és 34 társszerző: The beat Cepheids in the Magellanic Clouds: an analysis from the EROS-2 database, *Astronomy & Astrophysics*, 495, 249, 2009
251. Martínez-Vázquez, C. E., Monelli, M., Bono, G., Stetson, P. B., Ferraro, I. és 5 társszerző: Variable Stars in Local Group Galaxies. I: Tracing the Early Chemical Enrichment and Radial Gradients in the Sculptor dSph with RR Lyrae Stars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 454, 1509, 2015
252. Masuda, K.: Very Low Density Planets around Kepler-51 Revealed with Transit Timing Variations and an Anomaly Similar to a Planet-Planet Eclipse Event, *The Astrophysical Journal*, 783, 53, 2014
253. Mayor, M., Queloz, D.: A Jupiter-mass companion to a solar-type star, *Nature*, 378, 355, 1995
254. Mazeh, T., Nachmani, G., Holczer, T., Fabrycky, D. C., Ford, E. B. és 11 társszerző: Transit Timing Observations from Kepler. VIII. Catalog of Transit Timing Measurements of the First Twelve Quarters, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 208, 16, 2013
255. Mazeh, T., Holczer, T., Shporer, A.: Time Variation of Kepler Transits Induced By Stellar Rotating Spots — a Way to Distinguish between Prograde and Retrograde Motion. I. Theory, *The Astrophysical Journal*, 800, 142, 2015
256. Michel, E., Baglin, A., Weiss, W. W., Auvergne, M., Catala, C. és 62 társszerző: First asteroseismic results from CoRoT, *Communications in Asteroseismology*, 156, 73, 2008
257. Miglio, A., Montalbán, J., Baudin, F., Eggenberger, P., Noels, A. és 4 társszerző: Probing populations of red giants in the galactic disk with CoRoT, *Astronomy & Astrophysics*, 503, A21, 2009
258. Miglio, A., Brogaard, K., Stello, D., Chaplin, W. J., D'Antona, F. és 19 társszerző: Asteroseismology of old open clusters with Kepler: direct estimate of the integrated red giant branch mass-loss in NGC 6791 and 6819, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 419, 2077, 2012
259. Moffett T. J., Barnes T. G. III: Observational studies of Cepheids. III - Catalog of light curve parameters, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 58, 843, 1985
260. Molenda-Żakowicz J., Frasca A., Latham D. W.: Spectroscopic Study of Candidates for Kepler Asteroseismic Targets - Solar-Like Stars, *Acta Astronomica*, 58, 419, 2008
261. Molnár, L., Kolláth, Z., **Szabó, R.**, Bryson, S., Kolenberg, K. és 2 társszerző: Nonlinear asteroseismology of RR Lyrae, *The Astrophysical Journal Letters*, 757, L13, 2012a
262. Molnár, L., Kolláth, Z., **Szabó, R.**, Plachy, E.: New results in RR Lyrae modeling: Convective cycles, additional modes and more, *Astronomische Nachrichten*, 333, 950, 2012b
263. Molnár, L., Kolláth, Z., **Szabó, R.**: Can turbulent convective variations drive the Blazhko cycle? Dynamical investigation of the Stothers idea, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 424, 31, 2012c
264. Molnár, L., Szabados, L., Dukes, R. J. Jr., Györfy, Á., **Szabó, R.**: Analysis of the possible Blazhko-effect Cepheid V473 Lyrae, *Astronomische Nachrichten*, 334, 980, 2013a
265. Molnár, L., **Szabó, R.**, Kolenberg, K., Borkovits, T., Antoci, V. és 5 társszerző: The Kep-Cont Mission: Continuing the observation of high-amplitude variable stars in the Kepler field of view, *Kepler White Paper*, arXiv:1309.0740, 2013b
266. Molnár, L., **Szabó, R.**, Moskalik, P. A., Nemec, J. M., Guggenberger, E. és 5 társszerző: An RR Lyrae family portrait: 33 stars observed in Pisces with K2-E2, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 452, 4823, 2015a
267. Molnár, L., Pál, A., Plachy, E., Ripepi, V., Moretti, M. I., **Szabó, R.**, Kiss, L. L.: Pushing the Limits, Episode 2: K2 Observations of Extragalactic RR Lyrae Stars in the Dwarf Galaxy Leo IV, *The Astrophysical Journal*, 812, 2, 2015b
268. Monteverde, M. I., Herrero, A., Lennon, D. J., Kudritzki, R.-P.: The Stellar Oxygen Abundance Gradient in M33, *The Astrophysical Journal*, 474, 107, 1997
269. Morgan, S. M., Welch, D. L.: Beat cepheid period ratios from OPAL opacities, *The Astronomical Journal*, 114, 1183, 1997

270. Morton, T. D., Johnson, J. A.: On the Low False Positive Probabilities of Kepler Planet Candidates, *The Astrophysical Journal*, 738, 170, 2011
271. Moskalik, P., Buchler, J. R.: Resonances and period doubling in the pulsations of stellar models, *The Astrophysical Journal*, 355, 590, 1990
272. Moskalik, P., Buchler, J. R.: Classical Cepheids with RV Tauri characteristics?, *The Astrophysical Journal*, 366, 300, 1991
273. Moskalik, P., Buchler, J. R., Marom, A.: Toward a resolution of the bump and beat Cepheid mass discrepancies, *The Astrophysical Journal*, 385, 685, 1992
274. Moskalik, P., Ogłóza, W.: The Pulsation Mode of Polaris, *ASP Conf. Ser.*, 203, 237, 2000
275. Moskalik, P., Kołaczowski, Z., Mizerski, T.: Nonradial pulsations in classical Cepheids of the Magellanic Clouds, *ASP Conf. Series*, 310, 498, 2004
276. Moskalik, P., Kołaczowski, Z., Mizerski, T.: Double Mode Cepheids with Amplitude Modulation, *Memorie della Società Astronomica Italiana*, 77, 563, 2006
277. Moskalik, P., Kołaczowski, Z.: Nonradial modes in classical cepheids, *Communications in Asteroseismology*, 157, 343, 2008
278. Moskalik, P., Kołaczowski, Z.: Frequency analysis of Cepheids in the Large Magellanic Cloud: new types of classical Cepheid pulsators, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 394, 1649, 2009
279. Moskalik, P.: Multi-periodic Oscillations in Cepheids and RR Lyrae-Type Stars, *Astrophysics and Space Science Proceeding*, 31, 103, 2013
280. Moskalik, P.: Multi-mode oscillations in classical Cepheids and RR Lyrae-type stars, *IAU Symposium*, 301, 249, 2014
281. Moskalik, P., Smolec, R., Kolenberg, K., Molnár, L., Kurtz, D. W., **Szabó, R.** és 8 társszerző: Kepler photometry of RRc stars: peculiar double-mode pulsations and period doubling, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 447, 2348, 2015
282. Muirhead, P. S., Hamren, K., Schlawin, E., Rojas-Ayala, B., Covey, K. R., Lloyd, J. P.: Characterizing the Cool Kepler Objects of Interests. New Effective Temperatures, Metallicities, Masses, and Radii of Low-mass Kepler Planet-candidate Host Stars, *The Astrophysical Journal*, 750, 37, 2012
283. Mulet-Marquis, C., Glatzel, W., Baraffe, I., Winisdoerffer, C.: Nonradial oscillations in classical Cepheids: the problem revisited, *Astronomy & Astrophysics*, 465, 937, 2007
284. Mundprecht, E., Muthsam, H. J., Kupka, F.: Multidimensional realistic modelling of Cepheid-like variables - I. Extensions of the ANTARES code, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 435, 3191, 2013
285. Mundprecht, E., Muthsam, H. J., Kupka, F.: Multidimensional realistic modelling of Cepheid-like variables - II. Analysis of a Cepheid model, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 449, 2539, 2015
286. Mustill, A. J., Davies, M. B., Johansen, A.: The Destruction of Inner Planetary Systems during High-eccentricity Migration of Gas Giants, *The Astrophysical Journal*, 808, 14, 2015
287. Muthsam, H.: Stellar pulsation modelling: The numerical issue, *Communications from the Konkoly Observatory of the Hungarian Academy of Sciences*, 105, nyomdában, 2016, szerk: Szabó, R., Szabados, L., Kinemuchi K.
288. Nardetto, N., Mourard, D., Kervella, P., Mathias, Ph., Mérand, A., Bersier, D.: High resolution spectroscopy for Cepheids distance determination. I. Line asymmetry, *Astronomy & Astrophysics*, 453, 309, 2006
289. Nataf D. M., Gould, A., Fouqué, P., Gonzalez, O. A., Johnson, J. A. és 9 társszerző: Reddening and Extinction toward the Galactic Bulge from OGLE-III: The Inner Milky Way's $R_V \sim 2.5$ Extinction Curve, *The Astrophysical Journal*, 769, 88, 2013
290. Nather, R. F., Winget, D. E., Clemens, J. C., Hansen, C. J., Hine, B. P.: The whole earth telescope - A new astronomical instrument, *The Astrophysical Journal*, 361, 309, 1990
291. Neeley, J. R., Marengo, M., Bono, G., Braga, V. F., Dall'Ora, M. és 11 társszerző: On the Distance of the Globular Cluster M4 (NGC 6121) Using RR Lyrae Stars. II. Mid-infrared Period-luminosity Relations, *The Astrophysical Journal*, 808, 11, 2015
292. Neilson, H. R., Engle, S. G., Guinan, E., Langer, N., Wasatonic, R. P., Williams, D. B., *The Astrophysical Journal Letters*, 745, L32, 2012
293. Neilson, H. R.: Revisiting the fundamental properties of the Cepheid Polaris using detailed stellar evolution models, *Astronomy & Astrophysics*, 563, 48, 2014
294. Neilson, H. R., Ignace, R.: Convection, granulation, and period jitter in classical Cepheids, *Astronomy & Astrophysics*, 563, L4, 2014
295. Neilson, H. R., Izzard, R. G., Langer, N., Ignace, R.: The strange evolution of the Large Magellanic Cloud Cepheid OGLE-LMC-CEP1812, *Astronomy & Astrophysics*, 581, A1, 2015

296. Nemec, J. M., Smolec, R., Benkő, J. M., Moskalik, P., Kolenberg, K., **Szabó R.** és 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
297. Nemec, J. M., Cohen, J. G., Ripepi, V., Derekas, A., Moskalik, P. és 3 társszerző: Metal Abundances, Radial Velocities, and Other Physical Characteristics for the RR Lyrae Stars in The Kepler Field, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 773, 181, 2013
298. Netzel, H., Smolec, R., Moskalik, P.: Double-mode radial-non-radial RR Lyrae stars in the OGLE photometry of the Galactic bulge, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 447, 1173, 2015a
299. Netzel, H., Smolec, R., Dziembowski, W.: Discovery of a new group of double-periodic RR Lyrae stars in the OGLE-IV photometry, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 451, 25, 2015b
300. Netzel, H., Smolec, R., Moskalik, P.: Double-mode radial-non-radial RR Lyrae stars. OGLE-IV photometry of two high cadence fields in the Galactic bulge, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 453, 2022, 2015c
301. Ngeow, C.-C., Kanbur, S. M., Nikolaev, S., Tanvir, N. R., Hendry, M. A.: Reconstructing a Cepheid Light Curve with Fourier Techniques. I. The Fourier Expansion and Interrelations, *The Astrophysical Journal*, 586, 959, 2003
302. Neveu-VanMalle, M., Queloz, D., Anderson, D. R., Brown, D. J. A., Collier Cameron, A. és 12 társszerző: Hot Jupiters with relatives: discovery of additional planets in orbit around WASP-41 and WASP-47, *Astronomy & Astrophysics*, 586, A93, 2016
303. Nowakowski, R. M., Dziembowski, W. A.: Nonlinearity of Nonradial Modes in Evolved Stars, *Astrophysics and Space Science*, 284, 273, 2003
304. Ofir, A., Dreizler, S.: An independent planet search in the Kepler dataset. I. One hundred new candidates and revised Kepler objects of interest, *Astronomy & Astrophysics*, 555, 58, 2013
305. Ogłóza, W., Moskalik, P., Kanbur, S.: Phase Lag of Classical Cepheids and RR Lyrae Stars, *ASP Conf. Ser.*, 203, 235, 2000
306. Olech, A., Moskalik, P.: Double mode RR Lyrae stars in Omega Centauri, *Astronomy & Astrophysics*, 494, 17, 2009
307. Olling, R. P., Mushotzky, R., Shaya, E. J., Rest, A., Garnavich, P. M. és 4 társszerző: No signature of ejecta interaction with a stellar companion in three type Ia supernovae, *Nature*, 521, 332, 2015
308. Oosterhoff, P. Th.: U Trianguli Australis, a classical Cepheid with secondary period, *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands*, 13, 317, 1957a
309. Oosterhoff, P. Th.: The light-variation and the radial-velocity curve of TU Cas explained in terms of a primary period and a beat period, *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands*, 13, 320, 1957b
310. Osaki, Y.: Stability of Cepheid-Type Stars against Nonradial Oscillations, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 29, 235, 1977
311. Pál, A., **Szabó, R.**, Szabó, Gy. M., Kiss, L. L., Molnár, L. és 2 társszerző: Pushing the Limits: K2 Observations of the Trans-Neptunian Objects 2002 GV₃₁ and (278361) 2007 JJ₄₃, *The Astrophysical Journal Letters*, 804, L45, 2015
312. Pál, A., Kiss, Cs., Müller, T. G., Molnár, L., **Szabó, R.** és 3 társszerző: Large size and slow rotation of the trans-neptunian object (225088) 2007 OR₁₀ discovered from Herschel and Kepler/K2 observations, *The Astronomical Journal*, beküldve, 2016
313. Paparó, M., **Szabó, R.**, Benkő, J. M., Chadid, M., Poretti, E. és 3 társszerző: Shock wave and pulsation connection in a monop periodic CoRoT RR Lyrae star, *AIP Conf. Ser.*, 1170, 240, 2009
314. Pejcha, O., Kochanek, C. S.: A Global Physical Model for Cepheids, *The Astrophysical Journal*, 748, 107, 2012
315. Perryman, M. A. C., de Boer, K. S., Gilmore, G., Høg, E., Lattanzi, M. G és 5 társszerző: GAIA: Composition, formation and evolution of the Galaxy, *Astronomy & Astrophysics*, 369, 336, 2001
316. Petersen, J. O.: Masses of double mode cepheid variables determined by analysis of period ratios, *Astronomy & Astrophysics*, 27, 89, 1973
317. Pietrinferni, A., Cassisi, S., Salaris, M., Castelli, F.: A Large Stellar Evolution Database for Population Synthesis Studies. II. Stellar Models and Isochrones for an α -enhanced Metal Distribution, *The Astrophysical Journal*, 642, 797, 2006
318. Pietrukowicz, P., Udalski, A., Soszyński, I., Nataf, D. M., Wyrzykowski, Ł. és 6 társszerző: The Optical Gravitational Lensing Experiment: Analysis of the Bulge RR Lyrae Population from the OGLE-III Data, *The Astrophysical Journal*, 750, 169, 2012
319. Pietrukowicz, P., Dziembowski, W. A., Mróz, P., Soszyński, I., Udalski, A. és 6 társszerző: Large Variety of New Pulsating Stars in the OGLE-III Galactic Disk Fields, *Acta Astronomica*, 63, 379, 2013

320. Pietrukowicz, P., Kozłowski, S., Skowron, J., Soszyński, I., Udalski, A. és 8 társszerző: eciphering the 3D Structure of the Old Galactic Bulge from the OGLE RR Lyrae Stars, *The Astrophysical Journal*, 811, 113, 2015
321. Pietrzyński, G., Thompson, I. B., Gieren, W., Graczyk, D., Stepień, K. és 13 társszerző: RR-Lyrae-type pulsations from a 0.26-solar-mass star in a binary system, *Nature*, 484, 75, 2012
322. Pigulski, A., Pojmański, G., Pilecki, B., Szczygieł, D. M.: The All Sky Automated Survey. The Catalog of Variable Stars in the Kepler Field of View, *Acta Astronomica*, 59, 33, 2009
323. Pilyugin, L. S., Grebel, E. K., Kniazev, A. Y.: The Abundance Properties of Nearby Late-type Galaxies. I. The Data, *The Astronomical Journal*, 147, 131, 2014
324. Pinsonneault, M. H., An, D., Molenda-Żakowicz, J., Chaplin, W. J., Metcalfe, T. S., Bruntt, H.: A Revised Effective Temperature Scale for the Kepler Input Catalog, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 199, 30, 2012
325. Plachy, E., Kolláth, Z., Molnár, L.: Low-dimensional chaos in RR Lyrae models, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 433, 3590, 2013
326. Pojmanski, G., Maciejewski, G.: The All Sky Automated Survey. Catalog of Variable Stars. III. 12h-18h Quarter of the Southern Hemisphere, *Acta Astronomica*, 54, 153, 2004
327. Pollacco, D. L., Skillen, I., Collier Cameron, A., Christian, D. J., Hellier, C. és 22 társszerző: The WASP Project and the SuperWASP Cameras, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 118, 1407, 2006
328. Pompéia, L., Hill, V., Spite, M., Cole, A., Primas, F. és 4 társszerző: Chemical abundances in LMC stellar populations. I. The inner disk sample, *Astronomy & Astrophysics*, 480, 379, 2008
329. Pope, B. J. S., White, T. R., Huber, D., Murphy, S. J., Bedding, T. R. és 4 társszerző: Photometry of very bright stars with Kepler and K2 smear data, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 455, 36, 2016
330. Popielski, B. L., Dziembowski W. A., Cassisi, S.: Petersen Diagram for RRd Stars in the Magellanic Clouds, *Acta Astronomica*, 50, 491, 2000
331. Poretti E.: The Fourier decomposition of new light curves of Cepheids with $P < 7$ d, *Astronomy & Astrophysics*, 285, 524, 1994
332. Poretti E., Paparó, M., Deleuil, M., Chadid, M., Kolenberg, K., **Szabó, R.** és 10 társszerző: CoRoT light curves of RR Lyrae stars. CoRoT 101128793: long-term changes in the Blazhko effect and excitation of additional modes, *Astronomy & Astrophysics*, 520, 108, 2010
333. Poretti E., Baglin, A., Weiss, W. W.: The CoRoT Discovery of a Unique Triple-mode Cepheid in the Galaxy, *The Astrophysical Journal Letters*, 795, 36, 2014
334. Poretti, E., Le Borgne, J. F., Rainer, M., Baglin, A., Benkő, J. M., Debosscher, J., Weiss, W. W. és 2 társszerző: CoRoT space photometry of seven Cepheids, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 454, 849, 2015
335. Pritchett, C. J., van den Bergh, S.: Observations of RR Lyrae stars in the halo of M31, *The Astrophysical Journal*, 316, 517, 1987
336. Prša, A., Batalha, N., Slawson, R. W., Doyle, L. R., Welsh, W. F. és 10 társszerző: Kepler Eclipsing Binary Stars. I. Catalog and Principal Characterization of 1879 Eclipsing Binaries in the First Data Release, *The Astronomical Journal*, 141, 83, 2011
337. Rauer, H., Catala, C., Aerts, C., ..., **Szabó, R.** és 140 társszerző: The PLATO 2.0 Mission, *Experimental Astronomy*, 38, 249, 2014
338. Reegen, P.: SigSpec. I. Frequency- and phase-resolved significance in Fourier space, *Astronomy & Astrophysics*, 467, 1353, 2007
339. Retter, A., Bedding, T. R., Buzasi, D. L., Kjeldsen, H., Kiss, L. L.: Oscillations in Arcturus from WIRE Photometry, *The Astrophysical Journal*, 591, 151, 2003
340. Ricker, G. R., Winn, J. N., Vanderspek, R., Latham, D. W., Bakos, G. Á. és 53 társszerző: The Transiting Exoplanet Survey Satellite, *SPIE Journal of Astronomical Telescopes, Instruments and Systems*, 1, 014003, 2015
341. Rosenblatt, F.: A Two-Color Photometric Method for Detection of Extra solar Planetary Systems, *Icarus*, 14, 71, 1971
342. Rowe, J. F., Matthews, J. M., Kuschnig, R., Guenther, D. B., Moffat, A. F. J. és 4 társszerző: Direct imaging photometry with the MOST satellite, *Memorie della Società Astronomica Italiana*, 77, 282, 2006a
343. Rowe, J. F., Matthews, J. M., Seager, S., Kuschnig, R., Guenther, D. B. és 5 társszerző: An Upper Limit on the Albedo of HD 209458b: Direct Imaging Photometry with the MOST Satellite, *The Astrophysical Journal*, 646, 1241, 2006b
344. Samus, N. N., Durlevich, O. V., Kazarovets E V., Kireeva N.N., Pastukhova E.N. és 2 társszerző: Combined General Catalogue of Variable Stars, *VizieR On-line Data Catalog: II/250*, 2004

345. Sanchis-Ojeda, R., Rappaport, S., Winn, J. N., Kotson, M. C., Levine, A., El Mellah, I.: A Study of the Shortest-period Planets Found with Kepler, *The Astrophysical Journal*, 787, 47, 2014
346. Sanchis-Ojeda, R., Winn, J. N.: Starspots, Spin-Orbit Misalignment, and Active Latitudes in the HAT-P-11 Exoplanetary System, *The Astrophysical Journal*, 743, 61, 2011
347. Sanchis-Ojeda, R., Winn, J. N., Dai, F., Howard, A. W., Isaacson, és 7 társszerző: A low stellar obliquity for WASP-47, a compact multiplanet system with a hot Jupiter and an ultra-short period planet, *The Astrophysical Journal Letters*, 812, L11, 2015
348. Sánchez, S. F., Rosales-Ortega, F. F., Iglesias-Páramo, J., Mollá, M., Barrera-Ballesteros, J. és 32 társszerző: A characteristic oxygen abundance gradient in galaxy disks unveiled with CALIFA, *Astronomy & Astrophysics*, 563, 49, 2014
349. Santerne, A., Díaz, R. F., Moutou, C., Bouchy, F., Hébrard, G. és 4 társszerző: SOPHIE velocimetry of Kepler transit candidates. VII. A false-positive rate of 35% for Kepler close-in giant candidates, *Astronomy & Astrophysics*, 545, A76, 2012
350. Sartoretti, P., Schneider, J.: On the detection of satellites of extrasolar planets with the method of transits, *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 134, 553, 1999
351. Schmidt, E.: The Double-Mode Cepheid V371 Persei Redux, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 123, 381, 2011
352. Schmitt, J. R., Wang, J., Fischer, D. A., Jek, K. J., Moriarty, J. C. és 27 társszerző: Planet Hunters. VI. An Independent Characterization of KOI-351 and Several Long Period Planet Candidates from the Kepler Archival Data, *The Astronomical Journal*, 148, 28, 2014
353. Seeliger, M., Dimitrov, D., Kjurkchieva, D., Mallonn, M., Fernandez, M. és 22 társszerző: Transit timing analysis in the HAT-P-32 system, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 441, 304, 2014
354. Seeliger, M., Kitze, M., Errmann, R., Richter, S., Ohlert, J. M és 44 társszerző: Ground-based transit observations of the HAT-P-18, HAT-P-19, HAT-P-27/WASP40 and WASP-21 systems, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 451, 4060, 2015
355. Sesar, B., Ivezić, Z., Stuart, J. S., Morgan, D. M., Becker, A. C. és 5 társszerző: Exploring the Variable Sky with LINEAR. II. Halo Structure and Substructure Traced by RR Lyrae Stars to 30 kpc, *The Astronomical Journal*, 146, 21, 2013
356. Shapley, H.: On the changes in the spectrum, period, and lightcurve of the Cepheid variable RR Lyrae, *The Astrophysical Journal*, 43, 217, 1916
357. Shibahashi, H., Kurtz, D. W.: FM stars: a Fourier view of pulsating binary stars, a new technique for measuring radial velocities photometrically, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 422, 738, 2012
358. Simon, N. R., Davis, C. G.: The light and velocity curves of classical Cepheids - Theory versus observation, *The Astrophysical Journal*, 266, 787, 1983
359. Simon, N. R.: Phase lags and pulsation modes of classical Cepheids, *The Astrophysical Journal*, 284, 278, 1984
360. Simon, A., Szatmáry, K., Szabó, Gy. M.: Determination of the size, mass, and density of „exomoons” from photometric transit timing variations, *Astronomy & Astrophysics*, 470, 727, 2007
361. Simon, A. E., Szabó, Gy. M., Szatmáry, K., Kiss, L. L.: Methods for exomoon characterization: combining transit photometry and the Rossiter-McLaughlin effect, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 406, 2038, 2010
362. Simon, A. E., Szabó, Gy. M., Kiss, L. L., Fortier, A., Benz, W.: CHEOPS Performance for Exomoons: The Detectability of Exomoons by Using Optimal Decision Algorithm, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 127, 1084, 2015
363. Skarka, M.: Bright Blazhko RRab Lyrae stars observed by ASAS and the SuperWASP surveys, *Astronomy & Astrophysics*, 562, 90, 2014
364. Smolec, R., Moskalik, P.: Convective Hydrocodes for Radial Stellar Pulsation. Physical and Numerical Formulation, *Acta Astronomica*, 58, 193, 2008a
365. Smolec, R., Moskalik, P.: Double-Mode Classical Cepheid Models, Revisited, *Acta Astronomica*, 58, 233, 2008b
366. Smolec, R., Moskalik, P., Kolenberg, K., Bryson, S., Cote, M. T., Morris, R. L.: Variable turbulent convection as the cause of the Blazhko effect – testing the Stothers model, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 414, 2950, 2011
367. Smolec, R., Moskalik, P.: Period doubling and Blazhko modulation in BL Herculis hydrodynamic models, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 426, 108, 2012

368. Smolec, R., Soszyński, I., Moskalik, P., Udalski, A., Szymański, M. K. és 7 társszerző: Discovery of period doubling in BL Herculis stars of the OGLE survey. Observations and theoretical models, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 419, 2407, 2012
369. Smolec, R., Pietrzyński, G., Graczyk, D., Pilecki, B., Gieren, W. és 9 társszerző: Pulsation models for the 0.26 $M_{\odot}$ star mimicking RR Lyrae pulsator. Model survey for the new class of variable stars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 428, 3034, 2013
370. Smolec, R., Soszyński, I., Udalski, A., Szymański, M., Pietrukowicz, P. és 8 társszerző: Blazhko-type modulation in the double-mode RR Lyrae stars of the OGLE Galactic bulge collection, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 447, 3756, 2015a
371. Smolec, R., Soszyński, I., Udalski, A., Szymański, M., Pietrukowicz, P. és 9 társszerző: Intriguing triple-mode RR Lyrae star with period doubling, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 447, 3873, 2015b
372. Smolec, R.: Survey of non-linear hydrodynamic models of type-II Cepheids, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 456, 3475, 2016
373. Sódor, Á., Jurcsik, J., Szeidl, B., Váradi, M., Henden, A., és 5 társszerző: The multiperiodic Blazhko modulation of CZ Lacertae, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 411, 1585, 2011
374. Sódor, Á., Hajdu, G., Jurcsik, J., Szeidl, B., Posztobányi, K. és 3 társszerző: The light-curve modulation of XY And and UZ Vir: Two Blazhko RR Lyrae stars with additional frequencies, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 427, 1517, 2012
375. Soszyński, I., Udalski, A., Szymański, M., Kubiak, M., Pietrzyński, G. és 2 társszerző: The Optical Gravitational Lensing Experiment. Cepheids in the Magellanic Clouds. VI. Double-Mode Cepheids in the Large Magellanic Cloud, *Acta Astronomica*, 50, 451, 2000
376. Soszyński, I., Poleski, R., Udalski, A., Kubiak, M., Szymański, M. és 4 társszerző: The Optical Gravitational Lensing Experiment. Triple-Mode and 1O/3O Double-Mode Cepheids in the Large Magellanic Cloud, *Acta Astronomica*, 58, 153, 2008
377. Soszyński, I., Udalski, A., Szymański, M. K., Kubiak, M., Pietrzyński, G. és 4 társszerző: The Optical Gravitational Lensing Experiment. The OGLE-III Catalog of Variable Stars. III. RR Lyrae Stars in the Large Magellanic Cloud, *Acta Astronomica*, 59, 1, 2009
378. Soszyński, I., Poleski, R., Udalski, A., Szymański, M., Kubiak, M., Pietrzyński, G. és 3 társszerző: The Optical Gravitational Lensing Experiment. The OGLE-III Catalog of Variable Stars. VII. Classical Cepheids in the Small Magellanic Cloud, *Acta Astronomica*, 60, 17, 2010
379. Soszyński, I., Udalski, A., Poleski, R., Szymański, M., Kubiak, M., Pietrzyński, G. és 4 társszerző: The Optical Gravitational Lensing Experiment. The OGLE-III Catalog of Variable Stars. XIV. Classical and Type II Cepheids in the Galactic Bulge, *Acta Astronomica*, 61, 285, 2011a
380. Soszyński, I., Dziembowski, W. A., Udalski, A., Poleski, R., Szymański, M. K. és 6 társszerző: The Optical Gravitational Lensing Experiment. The OGLE-III Catalog of Variable Stars. XI. RR Lyrae Stars in the Galactic Bulge, *Acta Astronomica*, 61, 1, 2011b
381. Spreckley, S. A., Stevens, I. R.: The period and amplitude changes of Polaris (α UMi) from 2003 to 2007 measured with SMEI, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 388, 1239, 2008
382. Stasińska, G., Peña, M., Bresolin, F., Tsamis, Y. G.: Planetary nebulae and H II regions in the spiral galaxy NGC 300. Clues on the evolution of abundance gradients and on AGB nucleosynthesis, *Astronomy & Astrophysics*, 552, 12, 2013
383. Steffen, J. H., Agol, E.: An analysis of the transit times of TrES-1b, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 364, 96, 2005
384. Steffen, J. H., Batalha, N. M., Borucki, W. J., Buchhave, L. A., Caldwell, D. A. és 25 társszerző: Five Kepler Target Stars That Show Multiple Transiting Exoplanet Candidates, *The Astrophysical Journal*, 725, 1226, 2010
385. Steffen, J. H., Ragozzine, D., Fabrycky, D. C., Carter, J. A., Ford, E. B. és 7 társszerző: Kepler constraints on planets near hot Jupiters, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109, 7982, 2012
386. Steffen, J. H., Fabrycky, D. C., Agol, E., Ford, E. B., Morehead, R. C. és 13 társszerző: Transit timing observations from Kepler - VII. Confirmation of 27 planets in 13 multiplanet systems via transit timing variations and orbital stability, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 428, 1077, 2013
387. Stellingwerf, R. F., Nemec, J. M., Moskalik, P.: The Kepler RR Lyrae SC Data Set: Period Variation and Blazhko Effect, 2013, arXiv:1310.0543
388. Stello, D., Gilliland, R. L.: Solar-like Oscillations in a Metal-poor Globular Cluster with the Hubble Space Telescope, *The Astrophysical Journal*, 700, 949, 2009
389. Stello, D., Meibom, S., Gilliland, R. L., Grundahl, F., Hekker, S. és 18 társszerző: An Asteroseismic Membership Study of the Red Giants in Three Open Clusters Observed by Kepler: NGC 6791, NGC 6819, and NGC 6811, *The Astrophysical Journal*, 739, 13, 2011

390. Storm, J.: How good are RR Lyrae and Cepheids really as distance indicators? The observational approach, *Memorie della Società Astronomica Italiana*, 77, 188, 2006
391. Stothers, R. B.: A New Explanation of the Blazhko Effect in RR Lyrae Stars, *The Astrophysical Journal*, 652, 643, 2006
392. Strohmeier W., Knigge R., Ott H., Bamberg Veröff., V, Nr. 16, 1963
393. Strom, S. E., Strom, K. M., Rood, R. T., Iben, I., Jr.: On the Evolutionary Status of Stars above the Horizontal Branch in Globular Clusters, *Astronomy & Astrophysics*, 8, 243, 1970
394. Struve, O.: Proposal for a project of high-precision stellar radial velocity work, *The Observatory*, 72, 199, 1952
395. Suárez, J. C., Garrido, R., Goupil, M. J.: The role of rotation on Petersen diagrams. The $\Pi_{1/0}(\Omega)$ period ratios *Astronomy & Astrophysics*, 447, 649, 2006
396. Subramanian, S., Subramanian, A.: Depth estimation of the Large and Small Magellanic Clouds, *Astronomy & Astrophysics*, 496, 399, 2009
397. Süveges, M., Sesar, B., Váradi, M., Mowlavi, N., Becker, A. C. és 7 társszerző: Search for high-amplitude δ Scuti and RR Lyrae stars in Sloan Digital Sky Survey Stripe 82 using principal component analysis, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 424, 2528, 2012
398. Swift, J. J., Montet, B. T., Vanderburg, A., Morton, T., Muirhead, P. S., Johnson, J. A.: Characterizing the Cool KOIs. VIII. Parameters of the Planets Orbiting Kepler's Coolest Dwarfs, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 218, 26, 2015
399. Szabados, L.: Photoelectric *UBV* Photometry of Northern Cepheids I, *Communications of the Konkoly Observatory*, 70, 1, 1977
400. Szabados, L., Klagyivik, P.: Problems and possibilities in fine-tuning of the Cepheid P-L relationship, *Astrophysics and Space Science*, 341, 99, 2012
401. Szabó, Gy. M., Szatmáry, K., Divéki, Zs., Simon, A.: Possibility of a photometric detection of "exomoons", *Astronomy & Astrophysics*, 450, 395, 2006
402. Szabó, Gy. M., Kiss, L. L., Benkő, J. M., Mező, Gy., Nuspl, J. és 8 társszerző, **Szabó, R.**: A multi-site campaign to detect the transit of the second planet in HAT-P-13, *Astronomy & Astrophysics*, 523, 84, 2010
403. Szabó, Gy. M., **Szabó, R.**, Benkő, J. M., Lehmann, H., Mező, G. és 5 társszerző: Asymmetric Transit Curves as Indication of Orbital Obliquity: Clues from the Late-type Dwarf Companion in KOI-13, *The Astrophysical Journal*, 736, L4, 2011
404. **Szabó, R.**: Az RR Lyrae instabilitási sáv numerikus modellezése, PhD értekezés, 2004
405. **Szabó, R.**, Kolláth, Z., Buchler, J. R.: Automated nonlinear stellar pulsation calculations: Applications to RR Lyrae stars. The slope of the fundamental blue edge and the first RRd model survey, *Astronomy & Astrophysics*, 425, 627, 2004
406. **Szabó, R.**, Buchler, J. R., Bartee, J.: The Cepheid phase lag revisited, *The Astrophysical Journal*, 667, 1150, 2007
407. **Szabó, R.**, Paparó, M., Benkő, J. M., Chadid, M., Kolenberg, K., Poretti, E.: Amplitude and phase modulation in CoRoT RR Lyrae stars, *AIP Conf. Ser.*, 1170, 291, 2009
408. **Szabó, R.**, Kolláth, Z., Molnár, L., Kolenberg, K. és 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
409. **Szabó, R.**, Szabados, L., Ngeow, C. C., Smolec, R., Derekas, A. és 33 társszerző: Cepheid investigations using the Kepler space telescope, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 413, 2709, 2011
410. **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 & Astrophysics*, 553, A17, 2013a
411. **Szabó, R.**, Molnár, L., Kołaczowski, Z., Moskalik, P., Ivezić, Ž. és 25 társszerző: The Kepler-SEP Mission: Harvesting the South Ecliptic Pole large-amplitude variables with Kepler, *Kepler White Paper*, arXiv:1309.0741, 2013b
412. **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, Wrocław, Lengyelország, 2014
413. **Szabó, R.**, Benkő, J. M., Paparó, M., Chapellier, E., Poretti, E. és 5 társszerző: Revisiting CoRoT RR Lyrae stars: detection of period doubling and temporal variation of additional frequencies, *Astronomy & Astrophysics*, 570, A100, 2014
414. **Szabó, R.**, Benkő, J. M., Paparó, M., Chapellier, E., Poretti, E. és 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, 2015a

415. Szabó, R., Sárneczky, K., Szabó, Gy. M., Pál, A., Kiss, Cs. P. és 4 társszerző: Main-belt Asteroids in the K2 Engineering Field of View, *The Astronomical Journal*, 149, 112, 2015b
416. Szeidl, B., Jurcsik, J.: The frequency spectrum of periodically modulated sinusoidal oscillation, *Communications in Asteroseismology*, 160, 17, 2009
417. Sziládi, K., Vinkó, J., Poretti, E., Szabados, L., Kun, M.: New homogeneous iron abundances of double-mode Cepheids from high-resolution echelle spectroscopy, *Astronomy & Astrophysics*, 473, 579, 2007
418. Tarrant, N. J., Chaplin, W. J., Elsworth, Y., Sreckley, S. A., Stevens, I. R.: Asteroseismology of red giants: photometric observations of Arcturus by SMEI, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 382, 48, 2007
419. Tarrant, N. J., Chaplin, W. J., Elsworth, Y., Sreckley, S. A., Stevens, I. R.: Oscillations in β Ursae Minoris. Observations with SMEI, *Astronomy & Astrophysics*, 483, 43, 2008
420. Tiede, G. P., Sarajedini, A., Barker, M. K.: The Stellar Populations in the Outer Regions of M33. I. Metallicity Distribution Function, *The Astronomical Journal*, 128, 224, 2004
421. Thompson, S. E., Everett, M., Mullally, F., Barclay, T., Howell, S. B. és 8 társszerző: A Class of Eccentric Binaries with Dynamic Tidal Distortions Discovered with Kepler, *The Astrophysical Journal*, 753, 86, 2012
422. Turner, D. G., Savoy, J., Derrah, J., Abdel-Sabour A.-L. M., Berdnikov, L. N.: The Period Changes of Polaris, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 117, 207, 2005
423. Turner, D. G., Bryukhanov, I. S., Balyuk, I. I., Gain, A. M., Grabovsky, R. A. és 15 társszerző: The Period Changes of the Cepheid RT Aurigae, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 119, 1247, 2007
424. Turner, D. G., Kovtyukh, V. V., Usenko, I. A., Gorlova, N. I.: The Pulsation Mode of the Cepheid Polaris, *The Astrophysical Journal*, 762, 8, 2013
425. Udalski, A., Soszyński, I., Szymański, M., Kubiak, M., Pietrzyński, G. és 2 társszerző: The Optical Gravitational Lensing Experiment. Cepheids in the Magellanic Clouds. I. Double-Mode Cepheids in the Small Magellanic Cloud, 1999
426. Urbaneja, M. A., Herrero, A., Kudritzki, R.-P., Najarro, F., Smartt, S. J. és 3 társszerző: Blue Luminous Stars in Nearby Galaxies: Quantitative Spectral Analysis of M33 B-Type Supergiant Stars, *The Astrophysical Journal*, 635, 311, 2005
427. Uytterhoeven, K., Moya, A., Grigahcène, A., Guzik, J. A., Gutiérrez-Soto, J. és 36 társszerző: The Kepler characterization of the variability among A- and F-type stars. I. General overview, *Astronomy & Astrophysics*, 534, 125, 2011
428. Van Cleve, J. E., Caldwell, D. A.: *Kepler Instrument Handbook (KSCI-19033)*, 2009
429. Vanderburg, A., Johnson, J. A.: A Technique for Extracting Highly Precise Photometry for the Two-Wheeled Kepler Mission, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 126, 948, 2014
430. Van Hoolst, T., Dziembowski, W. A., Kawaler, S. D.: Unstable non-radial modes in radial pulsators: theory and an example, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 297, 536, 1998
431. van Leeuwen, F., Evans, D.W., Grenon, M., Grossmann, V., Mignard, F., Perryman, M.A.C.: The Hipparcos mission: photometric data, *Astronomy & Astrophysics*, 323, 61, 1997
432. Vilchez, J. M., Pagel, B. E. J., Diaz, A. I., Terlevich, E., Edmunds, M. G.: The chemical composition gradient across M 33, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 235, 633, 1988
433. Vivas, A. K., Zinn, R.: The QUEST RR Lyrae Survey. II. The Halo Overdensities in the First Catalog, *The Astronomical Journal*, 132, 714, 2006
434. Wachmann, A. A.: Photoelectric UBV photometry of six cepheids, *Astronomy & Astrophysics Supplement Series*, 23, 249, 1976
435. Walker, G., Matthews, J., Kuschnig, R., Johnson, R., Rucinski, S. és 10 társszerző: The MOST Asteroseismology Mission: Ultraprecise Photometry from Space *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 115, 1023, 2003
436. Walker, G. H. A., Croll, B., Kuschnig, R., Walker, A., Rucinski, S., M. és 5 társszerző: The Differential Rotation of κ^1 Ceti as Observed by MOST, *The Astrophysical Journal*, 659, 1611, 2007
437. Weiss, W. W., Rucinski, S. M., Moffat, A. F. J., Schwarzenberg-Czerny, A., Koudelka, O. F. és 13 társszerző: BRITe-Constellation: Nanosatellites for Precision Photometry of Bright Stars, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 126, 573, 2014
438. Welsh, W. F., Orosz, J. A., Aerts, C., Brown, T. M., Brugamyer, E. és 25 társszerző: KOI-54: The Kepler Discovery of Tidally Excited Pulsations and Brightenings in a Highly Eccentric Binary, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 197, 4, 2011
439. Wils, P., Henden, A. A., Kleidis, S., Schmidt, E. G., Welch, D. L.: V371 Per - A thick-disc, short-period F/10 Cepheid, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 402, 1156, 2010

-
440. Winn, J. N., Matthews, J. M., Dawson, R. I., Fabrycky, D., Holman, M. J. és 9 társszerző: A Super-Earth Transiting a Naked-eye Star, *The Astrophysical Journal*, 737, 18, 2011
 441. Yecko, P. A., Kolláth, Z., Buchler, J. R.: Turbulent convective cepheid models: linear properties, *Astronomy & Astrophysics*, 336, 553, 1998
 442. Zurita, A., Bresolin, F.: The chemical abundance in M31 from H II regions, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 427, 1463, 2012

Köszönetnyilvánítás

Először is szeretném megköszönni feleségemnek és gyermekeimnek azt a sok türelmet és a megértést, amelyett az évek során a sokszor időigényes, és hosszú távolléteket is igényelő munkám iránt tanúsítottak. Szüleimnek is hálával tartozom, mert mindenben támogattak, így pályaválasztásomban is. Különösen jól emlékszem egy éjszakára, amikor Édesapám először mutatta meg a Göncölszekér csillagait. Később a tudományról és más kérdésekről folytatott diszkusszióinkból is sok megszívlelendő dolgot kaptam későbbi munkámhoz.

Köszönetet mondok a Magyar Tudományos Akadémia Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Csillagászati Intézetének, ahol a munka nagy része elkészülhetett, és ahol tudományos pályafutásom eddigi bő másfél évtizedének döntő hányadát tölthettem. Külön köszönöm az igazgatóknak, Szeidl Bélának[†], Balázs Lajosnak és Ábrahám Péternek és Kiss L. Lászlónak, hogy hittek bennem, bátorítottak és támogatták munkámat.

Köszönet illeti a University of Florida Fizika Tanszékét, ahol a dolgozat egyes fejezeteinek alapjául szolgáló munkákat végeztem posztdoktori ösztöndíjasként 2005 és 2007 között. A Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics falai között 2011-ben és 2013-ban tölthettem el néhány hetet Kepler- és MOST-adatokon dolgozva, rendkívül pezsgő intellektuális környezetben. A University of California, Santa Barbara, Kavli Elméleti Fizikai Intézete (KITP) adott otthont az Asteroseismology in the Space Age című programnak 2011-ben, ahol különösen inspiráló miliőben mélyíthettem el meglévő tudományos együttműködéseimet, és tehettem szert újakra. A University of Sydney és Tim Bedding vendégszeretetét 2012-ben 1 hónapig élvezhettem, ami szintén nagy lökést adott kutatásaimnak.

Hálával gondolok számos hazai és külföldi kolléga segítségére, tanácsaira és útmutatására, akik közül itt csak néhányat tudok felsorolni. Közülük kiemelkedik Kolláth Zoltán józan és tudományos éleslátása, Kiss L. László ötletei, kiváló mentor attitűdje és támogatása, Robert J. Buchler[†] elmélyült és széles látókörű tudása, problémamegoldási eleganciája. Köszönettel tartozom Szabó M. Gyulának statisztikai kérdésekben nyújtott segítségéért, Nancy Evansnek bölcs szakmaiságáért és érdekesítő beszélgetésekért, Katrien Kolenbergnek – akivel mindenben együtt tudtunk működni a KASC-munkacsoportok vezetésében – a dolgozatomban felhasznált művészi rajzaiért, Jim Nemecknek és Ennio Porettinek, a Kepler, illetve CoRoT RR Lyrae-kkel kapcsolatos diszkussziókért, Jaymie Matthewsnek, aki minden MOST-tal kapcsolatban felmerült technikai és tudományos kérdést időben megválaszolt. Pawel Moskalik és Radek Smolec a pulzáció elméleti modellezésével kapcsolatos kérdésekben bizonyultak kellelhetetlen vitapartnereknek, ami a tudományág előrelépését szolgálta. Željko Ivezić szakmai támogatása is sokat jelent számomra: sokoldalú tapasztalata és tudása az én érdeklődésemet is jelentős mértékben kitágították.

Külön köszönetemet fejezem ki Don W. Kurtz professzornak, aki számos esetben segítette nemcsak a személyes karrieremet, de a magyar csillagászat ügyét is szorosan figyelemmel kíséri. Steve Bryson a Keplerrel kapcsolatos technikai kérdésekben volt segítségemre. Martin Still és Thomas Barclay, a Kepler Guest Observer Office igazgatóiként készséggel álltak rendelkezésemre minden egyes alkalommal, amikor szükség volt a tanácsaikra. Bill Boruckit a Kepler-misszió megálmodóját, annak következetes végigviteléért és kitartó megvalósításáért

személyes példaképemnek tekintem. Natalie Batalha, Michael Haas és Steve Howell mind a Kepler, mind a K2-misszióban támogatták munkámat. Jørgen Christensen-Dalsgaard és Hans Kjeldsen a Kepler Asztroszeizmológiai Tudományos Konzorcium megalapításában szereztek elévülhetetlen érdemeket, nélkülük a dolgozatomban bemutatott, Keplerre támaszkodó eredmények nagy része nem jöhetett volna létre. Annie Baglin a CoRoT-misszió fáradhatatlan vezetője is sokszor támogatott erkölcsileg és tudományos szempontból is.

Sokat tanultam idősebb kollégáimtól is: Paparó Margit, Jurcsik Johanna, Oláh Katalin és Kovács Géza munkájára, tanácsaira és tapasztalatára mindig számíthattam és építhettem. Benkő József és Nuspl János különösen sokat tettek a magyar Kepler-csoport elindítása érdekében, és természetesen utána is számíthattam rájuk. A Kepler-projekt kezdeti támogatásáért a Magyar Űrkutatási Irodát és Kelemen Jánost is köszönet illeti. Molnár László, Plachy Emese és Derekas Aliz, akiknek a szakmai fejlődését figyelemmel kísérhettem és valamennyire befolyásolhattam is – fiatalos hévvel és lendülettel, az új generáció mindent tudni akarásával vetették bele magukat a munkába, és rendkívül gyümölcsöző együttműködés alakulhatott ki köztünk. Hallgatóim, Dálya Gergely, Hanyecz Ottó és Jurković Mónika lelkesen követték útmutatásaimat, de a szakmai kapcsolat sosem maradt egyoldalú, hiszen rengeteg ötletet, inspirációt köszönhetek nekik.

Szabados László szakmai támogatását is nagyra értékelem: akár szervezési vagy tudományos problémáról, angol vagy magyar szövegek javításáról, akár egy bonyolultabb helyesírási kérdésről van szó, gyorsan, és mindig a helyes válasszal áll elő. Borkovits Tamással és Vida Krisztiánnal öröm volt együtt dolgozni tőlem kissé távolabb álló problémákon is. Pál Andrásnak, P. Kiss Csabának és Sárnecky Krisztiánnak jó hangulatú Kepler-workshopok emlékét és eredményeit köszönhetem. Moór Attila, akivel legalább egy évtizeden keresztül osztoztunk egy irodán, mély szakmai tudásával és alaposágával nyűgözött le, ezenkívül a napi problémák megbeszélésében is mindig kiváló partner volt. Regály Zsolt és Sándor Zsolt is inspiráló irodatársaknak bizonyultak.

Szeretném megköszönni az NIIF és a Floridai Egyetem High-Performance Computing Center szuperszámítógép-szolgáltatásait, melyek a munkám nagy számítási teljesítményt igénylő részeihez nyújtottak elengedhetetlen segítséget.

Végezetül köszönöm az OTKA (K-83790), az NKFIH (K-115709), a Bolyai-ösztöndíj (2011–2014), az MTA Lendület programja, az NKTH KTIA (URKUT_10-1-2011-0019), a MAG Zrt. HUMAN MB08C 81013 Mobilitás pályázata, a Magyar Állami Eötvös Ösztöndíj, valamint az MTA CSFK Főigazgatói keret támogatását. Munkámat anyagilag segítették továbbá az EU FP7-es programjai: (IRSES/ASK No. 269194 és SPACEINN No. 312844), a Sydney-i Egyetem IRCA-grantja (2012), az Amerikai Egyesült Államok-beli National Science Foundation PHY05-51164 sz. pályázata, és az Európai Űrügynökség PECS szerződései: No. 98022, 98114, 4000103541/11/NL/KML és 4000110889/14/NL/NDe. Ezek nélkül munkám nagy része nem, vagy csak igen kis részben valósulhatott volna meg.

Az értekezés tézisei

1. Cefeidák fáziskésése – a módusmeghatározás új módszere

Pulzáló változócsillagok esetében a radiálissebesség-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) módszerek 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 úrfotometriai 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 tézisonthoz 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 – $Z_{\text{LMC}} = 0,0045$ és $Z_{\text{SMC}} = 0,0018$ átlagos fémtartalom adódott. A munka nem mellesleg 31, illetve 110 százalékkal növelte a két galaxisban található ismert kétmódusú klasszikus cefeidák számát.

A tézisonthoz 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. Pixel-szintű 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 alaplómodusú, 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 alaplómodusban 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 pixelelkel 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 csillagiban, 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, szub-millimagnitúdós pontossággal végzett, folyamatos megfigyelései alatt. A perióduskettőződésre alapozva Buchler és Kolláth (2011) új 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 mindegyik csillagban változott időben. A legjobb jel/zaj viszonytal megfigyelt – például a névadó — RR Lyrae csillagok fénygörbéjében azonban gyakorlatilag folyamatosan jelen vannak az alternáló pulzációs ciklusok. A perióduskettőződés erőssége ugyanakkor nem volt egyértelműen a moduláció fázisához köthető. 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 minden esetben hiányoznak a modulálatlan RRab csillagok frekvenciaspektrumából 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 tézisponthoz 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 bolygókísérők, ugyanis korábban nem találtak sem pályájukon kívül, sem belül keringő közeli, mozgásukat érdemben befolyásoló bolygó-kísérőt. Ezért is volt meglepő, hogy néhányuknál periodikusnak tűnő tranzitidőpont-változást (TTV) vélték kimutatni. A kérdés tisztázására megvizsgáltam a Kepler forró-jupiter-jelöltjeinek rendelkezésre álló tranzitidőpontjait, illetve központi csillagaik fény-változását 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 bolygó-kísérők 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 $\sim 2\%$ -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 bolygó-kísérő jelenléte. A munka publikálását követően a K2 misszió 2015 augusztusában felfedezte a WASP-47b forró jupiter kísérőt (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 tézisponthoz tartozó publikáció: [13]

A tézisponthoz 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., Dály, 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, Wrocław, 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

A tézispontokban előforduló külső hivatkozások listája

1. Buchler, R. Kolláth, Z., ApJ, 731, 24, 2011
2. Kolláth, Z., Occasional Technical Notes of the Konkoly Observatory, No. 1. 1990
3. Kolláth, Z., Buchler, R., Szabó, R., Csubry, Z., A&A, 386, 932, 2002
4. **Szabó, R.**, Kolláth, Z., Buchler, R., A&A 425, 627, 2004