

Válasz Dr. Hegedüs Tibor opponensi véleményére

Először is megköszönöm az opponens alapos és körültekintő munkáját. Válaszom első felében az általános kritikai megjegyzésekre reagálok, majd áttérek a dolgozattal kapcsolatban feltett konkrét kérdésekre. A bírálatot dőlt betűkkel idézem, válaszaim álló betűkkel szerepelnek.

Az opponens kevesli a dolgozat mintegy 10%-át kitevő bevezetést. Úgy éreztem, a saját, új tudományos eredményekre kell helyeznem a fő hangsúlyt, ezért a bevezető részben csak a megértésükhöz feltétlenül szükséges ismereteket foglaltam össze. Hasonló igaz a magyar eredményekkel kapcsolatban is. A munkámhoz közvetlenül kapcsolódókat ismertettem, ill. idéztem, de teljes körű áttekintésre nem vállalkoztam, már csak azért sem, mert igencsak megközelítettem a dolgozatra engedélyezett maximális 200 oldalas terjedelmet. Ahogyan azt a dolgozatban említettem is, az RR Lyrae-k témájában két áttekintő monográfia is elérhető (Smith, 1995; Catelan és Smith, 2015). Ebből Horace Smith könyve történetileg a teljességre törekvően tekinti át az RR Lyrae-k észlelésének történetét. Nem láttam értelmét egy ilyen munkával versenyezni egy doktori dolgozat bevezetésében.

Ami a bevezető szerkezetet illeti: a Blazskó-effektus észlelési előzményeit, lehet, hogy tényleg szerencsésebb lett volna egy külön alfejezetbe szerkeszteni. A CoRoT részletesebb ismertetését az indokolta, hogy erről az űrmisszióról sokkal kevesebb magyar nyelvű ismertetés jelent meg. Továbbá, ahogyan azt a dolgozatban is megemlítettem, míg a Kepler űrtávcsővel és adataival legalább három korábbi MTA doktori dolgozatban is találkozhattunk, addig a CoRoT-val egyben sem.

A tézisekhez felsorolt publikációk számát a bíráló kevésnek érzi. Ezen cikkek számára tudtommal nem vonatkozik semmilyen előírás. A cikkek (és a tézispontok) számát úgy tudtam volna növelni, ha más munkáimat is beemelem a dolgozatomba. Jelenleg a NASA ADS 103 tudományos publikációmat tartja nyilván. Lett volna miből választanom, de el akartam kerülni a doktori dolgozatokkal kapcsolatban sokszor felmerülő kritikát, hogy nem kellően egységes a mű.

A bíráló megjegyzései a tézisekhez tartozó cikkekkel kapcsolatban a következők voltak:

Az első tézisponthoz mindössze 1 cikket rendel, amiben csak második szerző (és egyébként ez egy 17 szerzős cikk).

Ezzel kapcsolatban csak a tézisponthoz tartozó eredményeket ismertető 4. fejezet bevezetését tudom idézni: „Ebben a fejezetben az első publikált csillag, a V1127 Aql analízisének eredményeit ismertetem. Az analízis túlnyomó része saját munkám, ahol mások eredményét említettem, ott ezt külön igyekszem jelezni. Az eredményeket összefoglaló cikk első szerzője ugyan a csoport vezetője (Merieme Chadid) volt, de ennek elsősorban protokolláris oka volt. Az első megjelenő RR Lyrae eredményeket a francia űrtávcsőről a francia csoportvezető neve alatt „illett” megjelentetni...”

Az ötödik tézisponthoz felsorolt cikkek közül számomra nem világos a 2. és a 3. cikkek relevanciája (az előbbiben 6. szerző, a másodikban 7., amely utóbbi egyébként ráadásul 16 szerzős).

A 3. cikkre (Poretti és tsai, 2010) vonatkozó rész a dolgozat 49-50. oldalán a (4.3. fejezet), a következőképpen kezdődik: „Mivel a CoRoT adatait elemző cikket Poretti és tsai, (2010) külföldi társszerzőm jegyzi, ezért itt csak egy olyan eredményt ismertetek, amely az én nevemhez köthető.” Ezek után ismertetem a CoRoT 101128793 csillagban talált 3,630 d⁻¹ extra frekvencia azonosítását a második radiális felhanggal. Az, hogy ez az azonosítás (is) bekerült a cikkbe, az én érdemem. Ennio Poretti és több társszerző is meglehetősen szkeptikus volt. Ami miatt én biztos voltam az azonosításban az az, hogy közben a Kepler csillagokban már számos esetben láttam hasonló második felhangú módushoz köthető extra frekvenciát. A tézispont a nem PD-vel azonosítható extra

frekvenciák felfedezéséről szól. Ennek megfelelően, véleményem szerint, a közlemény itteni felsorolása teljesen releváns.

A 2. cikk (Guggenberger és tsai, 2011) időben később jelent meg, mint a 3., és a CoRoT 105288363 csillag analizisével foglalkozik. Az analízis részleteiről a dolgozatban nem szerepel semmi, ill. csak hivatkozás szinten, hiszen itt valóban (sokadik) társszerző voltam. Azonban a második radiális felhang ennél a csillagnál is megjelenik, és ennek beazonosításában itt is volt szerepem. Ezért került ez a cikk ehhez a tézisponthoz.

Végül a hatodik tézispontnál szereplő 12. cikk fontosságát sem tudom megítélni a saját részesedés szempontjából (itt 16 szerző közül az 5. szerző volt)

A hivatkozott cikkben a dolgozat 8. fejezetében, ill. a 6. tézispontban kifejtett matematikai leírást alkalmaztam a V445 Lyrae extrém módon modulált Kepler csillagra. Ez a Guggenberger és tsai, (2012) cikkben a 4.4. szakasz, a dolgozatban pedig a 173. oldalon tárgyalom. Mint az egyetlen alkalmazást tényleges adatokra, mindenképpen relevánsnak érzem itt szerepeltetni.

A formai kifogások zöme jogos. A reziduál helyett valóban jobb lett volna mindenhol a maradvány, vagy maradék szavak használata. Az egyedi csillagokra vonatkozó ábrák megismétlésénél megint csak a hellyel való takarékoskodás volt az elsődleges szempontom. Könyv formátumú publikációknál amúgy nem szokatlan, -- bár nem kellemes -- hogy többet kell lapozni egy-egy tárgyalt ábrához.

A hivatkozott 7.4., ill. 7.6-7.8 ábrákon a csillagok az elsődleges Blazskó-periódus szerint vannak rendezve, ahogyan ez a 7.4. és a 7.7. ábra aláírásában szerepel is. Tény, hogy a 7.6, ill. a 7.8 ábrával kapcsolatban ezt külön nem jeleztem.

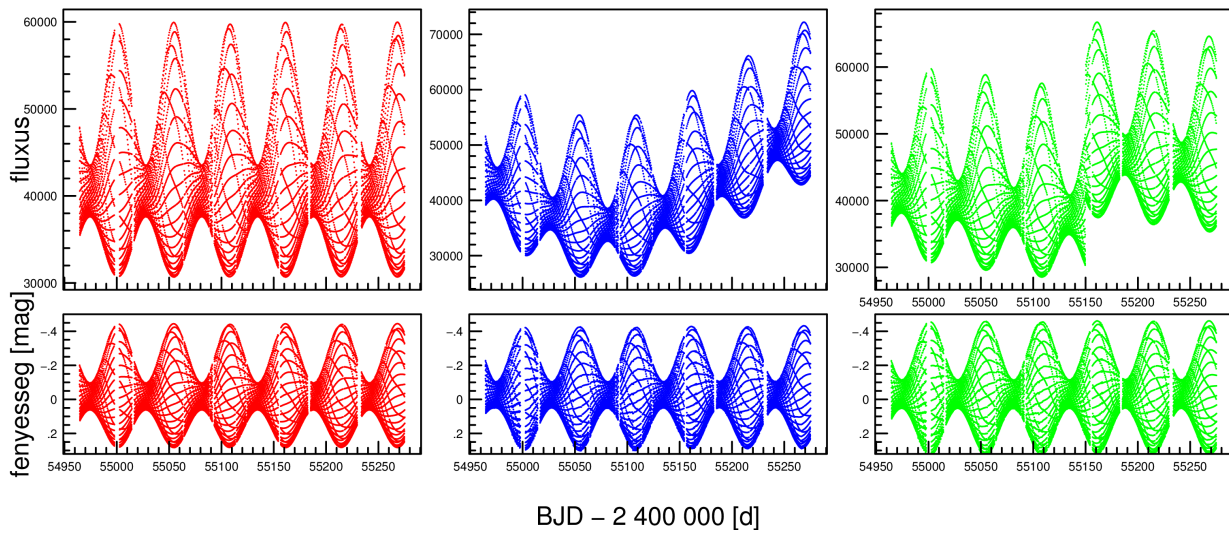
Az alábbiakban az opponens feltett kérdései, és az arra adott válaszaim következnek. Ahol a kérdés több részből állt, a válaszok egyértelműbb követhetősége érdekében a, b, ill. c betűket szúrtam be.

1. *Mindjárt a munka elején bemutatta az űrfotometriai adatok használhatóvá tételének kulcsfontosságú lépését: trend-, és ugrásmentesítést – amiben ha jól értettem meg, a vezérfonalat az adja, hogy az átlagszint egy konstans fluxus kell legyen. Azonban, amint a szerző a dolgozat későbbi részében maga is hivatkozza: az RR Lyrae-ék átlagfényessége változik (ami az amplitúdó-moduláció természetes következménye), ld. pl. 146. old. és Jurcsik et al. 2005b. Kérem mutassa be néhány példán, ill. ellenpéldán, hogy a detrendelési eljárása mennyiben befolyásolja vagy sem a későbbi Fourier-analízisből kijövő eredményeket (pl. hasonlítsa össze ugyanazon csillagnak földfelszíni, detrendelést nem igénylő, adatsorából kapott eredményeket űrfotometriából származókkal – már ha van elérhetőségében ilyen adat, ha nincs, akkor szimulált adatsoron történő bemutatással is megelégszem). Mit veszünk el a konstans átlagszintre transzformálással, miről nem tudunk nyilatkozni, ill. ezt hogyan lehet figyelembe venni a csillagok viselkedésének teljes körű értelmezésénél?*

Valóban a trend-, és ugrásmentesítés sok észlelési adatsorra szükséges volt, ezek nélkül a Fourier-spektrumok kisméretű részeit a trendek okozta frekvenciák lennének az uralkodók. A trend-, és ugrásmentesítő programom az egyik, a felhasználó által kiválasztott, módszerével (csúszóátlagolással vagy bineléssel) meghatározza a műszeres trend valószínű menetét, majd azt levonja az adatokból. A kapott adatsor – amennyiben megfelelő paraméterekkel futtattam a programot – mentes lesz a trendektől, de benne a csillaghoz tartozó fényességváltozások megőrződnek. A fluxusgörbét ezek után magnitúdóskálára transzformálok úgy, hogy a *teljes fénygöbe átlaga* nulla legyen. Az átlagfényesség időben továbbra is változhat, sőt változik is.

Amennyiben az lenne a feltételelem, hogy az átlagfényesség az időben konstans legyen, akkor a Blazskó-effektus amplitúdómodulációját teljesen ki kellene transzformálnom a fénygörbékből, de erről szó sincs! Mindössze azt követeljük meg, hogy a fénygörbe legyen folytonos, és hosszabb időskálán „ne legyen menete”. Az tény, hogy utóbbi feltétel tartalmaz egy adag szubjektivitást, de a fénygörbe tényleges változásai és a műszeres effektusok némi gyakorlattal nagy biztonsággal szétválaszthatók. A korrigált görbék gondos vizsgálata pedig segít az optimális paraméterek beállításában. Ha pl. túlságosan nagyra választom a csúszóátlagolásban a boxcar-függvény szélességét, akkor a korrigált adatsorban is marad valamennyi a trendből. Ellenkező esetben, ha túl keskeny ez a függvény, a fénygörbét torzíthatom a simítással, stb.

Az eljárás hatásait csak szintetikus adatokon tudom bemutatni. Sem CoRoT, sem Kepler RR Lyrae csillagokra nem létezik olyan minőségű földi adatsor, ami ilyesmire alkalmas lenne. A következőket tettem: (1) a V445 Lyr erősen modulált Kepler-csillag Fourier-paramétereiből (frekvencia, amplitúdók, fázisok), és a szimultán amplitúdó-, és frekvenciamodulált csillagokat leíró (8.49) képlet alapján szintetikus fénygörbét készítettem, amit a Kepler-észlelések pontjaiban mintavételeztem.



Ez látható a fenti ábra bal oldalán fent (piros pontokkal). Az ehhez tartozó magnitúdóra transzformált görbét mutatja az alatta lévő panel. (2) A szintetikus fluxusgörbét elkészítettem úgy is, hogy észlelésekben látható tipikus trendeket adtam hozzájuk. Az egyik esetben folytonos, nemlineáris trendet, (az így kapott fluxusokat mutatja a középső felső, kék pontokból álló görbe), illetve lineáris trendet ugrással (jobb felső, zöld pontokból álló görbe). A trendes görbéket a trend_rr programom segítségével trendmentesítettem, és magnitúdóskálára transzformáltam. A feldolgozott görbék láthatók a középső és jobb alsó paneleken. Mindhárom magnitúdóskálán lévő (alsó) fénygörbét Fourier-analizáltam. A lenti táblázat mutatja a görbék Fourier-paramétereit: f frekvenciákat, A amplitúdókat, és Φ fázisokat. Az eredetileg trendet tartalmazó, majd pedig trendmentesített görbéből kapott értékeket p alsó indexszel különböztettem meg. Az amplitúdókra és fázisokra kiszámítottam a relatív hibák százalékos értékeit is. A számok színei megegyeznek a hozzájuk tartozó görbék színeivel.

f [d ⁻¹]	f_p [d ⁻¹]	A [mag]	A_p [mag]	$\sigma(A)$ [%]	Φ [fok]	Φ_p [fok]	$\sigma(\Phi)$ [%]
1.948998	1.948998 1.948998	0.19181	0.18851 0.20492	1.7 6.8	188.41	188.37 188.22	0.02 0.10
3.897996	3.897995 3.897996	0.05559	0.05463 0.05883	1.7 5.8	154.90	154.88 155.33	0.01 0.28
5.846994	5.846993 5.846993	0.01907	0.01879 0.02016	1.5 5.7	129.28	129.01 129.89	0.21 0.47

7.795991	7.795991 7.795991	0.00574	0.00566 0.00603	1.4 5.1	97.44	97.42 98.64	0.02 1.23
9.744989	9.744988 9.744989	0.00149	0.00149 0.00158	- 6.0	66.12	65.25 66.85	1.32 1.10
11.693987	11.693986 11.693987	0.00033	0.00031 0.00035	6.1 6.1	60.20	56.06 57.92	6.88 3.79
13.642985	13.642984 13.642985	0.00009	0.00010 0.00011	11 22	79.11	79.21 80.08	0.13 1.23
15.591983	15.591981 15.591983	0.00004	0.00004 0.00004	- -	161.53	169.99 166.37	5.24 3.00
17.540981	17.540979 17.540980	0.00013	0.00013 0.00014	- 7.7	168.23	171.35 171.11	1.85 1.71

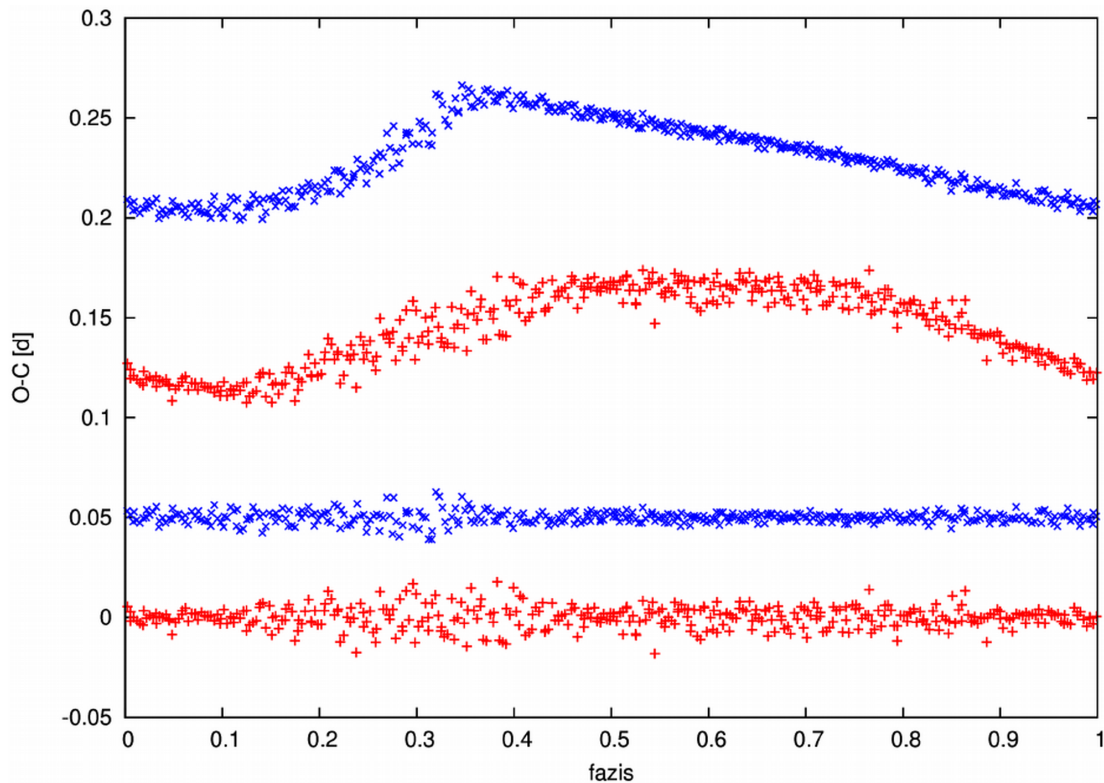
Látható, hogy az alacsonyabb ($n < 4$) harmonikusokhoz tartozó amplitúdókat néhány százalék, a fázisokat pedig néhány ezrelék pontossággal kapom vissza. Ezek azok a Fourier-paraméterek, amelyeket a különböző empirikus összefüggések felhasználnak a csillagok fizikai paramétereinek pl. hőmérséklet, fényesség, fémesség, stb., becslésére (l. Nemec és tsai, 2011, Benkő és tsai, 2016, ill. a bennük hivatkozott irodalom).

Véleményem szerint több tanulság is levonható ebből a vizsgálatból. A trendmentesítés többé-kevésbé mindig torzíja a fénygörbét. Az amplitúdókat jobban, mint a fázisokat, bár az eltérések nem drámaiak (l. táblázat). Ebből az is következik, hogy azok az empirikus formulák részesítendőek előnyben, amelyek a fáziskülönbségeket – esetleg a kevésbé érzékeny amplitúdóarányokat – használják. Azok eredménye kevésbé megbízható, amelyekben az amplitúdók is szerepelnek. Ugyanakkor azt is hangsúlyozni kell, hogy a nagy számú, standard színszűrőjű méréssel kalibrált empirikus relációk maguk is inkább csak statisztikai célokra alkalmasak, mintsem az egyedi csillagok vizsgálatára. Fokozottan igaz ez a szűrő nélkül készült CoRoT vagy Kepler észlelésekre való alkalmazásukkor. Igazából meglepő, hogy ezeknek a relációknak a CoRoT, ill. Kepler „színekre” transzformált alakjaival olyan fizikai paramétereket kapunk az RR Lyrae csillagokra, amelyek közel vannak a nagy felbontású spektroszkópiából kapott értékekhez (Nemec és tsai, 2013). Változócsillagászati szempontból az ürfotometriai idősorok elsődlegesen a frekvenciataralom meghatározására, annak vizsgálatára alkalmasak. A frekvenciák pedig megbízhatók maradnak még erős trendek eltávolítása után is.

2. A 47. oldalon példát látunk arra, hogy a fénygörbemaximumokból és minimumokból konstruált O-C görbék hogyan néznek ki. Megemlíti, hogy a minimumok alapján készült O-C görbék nagyobb szórásúak, mint a maximumokból készült – és ennek okaként a felszálló ág előtti „bump” megzavarja a minimumszámoló programokat. Ehhez képest én úgy látom, a maximumok O-C-ja is hasonló szórású a periodikus görbe minimumai környékén. A kérdésem az, hogy ez mivel magyarázható? Egyébként az is érdekes, hogy a minimumokból felépített O-C szórása meg inkább épp a periodikus viselkedés maximumai környékén nagyobb... Van ennek valami oka, ill. magyarázata?

A szórással kapcsolatos megállapítás a görbék globális szórására vonatkozik. Fourier-spektrumuk alapján mindkét O-C-görbét egy-egy ötödrendű Fourier-illesztéssel lehet leírni. A maximumokból felépített görbe illesztésekor a legkisebb négyzetes hiba (rms) 0,003 d, míg a minimumokból kapott görbére ez 0,006 d, vagyis a minimumokra kétszeres illesztési hibát kapunk a maximumokhoz képest. A görbék lokális szórásait nem vizsgáltam.

Azért, hogy ezt megtegyem elkészítettem közös skálán a két O-C-görbe fázisdiagramját, ill. mindkét O-C-görbéből levontam a megfelelő ötödrendű illesztést, és a maradványgörbét is ábrázoltam ugyan ezen az ábrán:

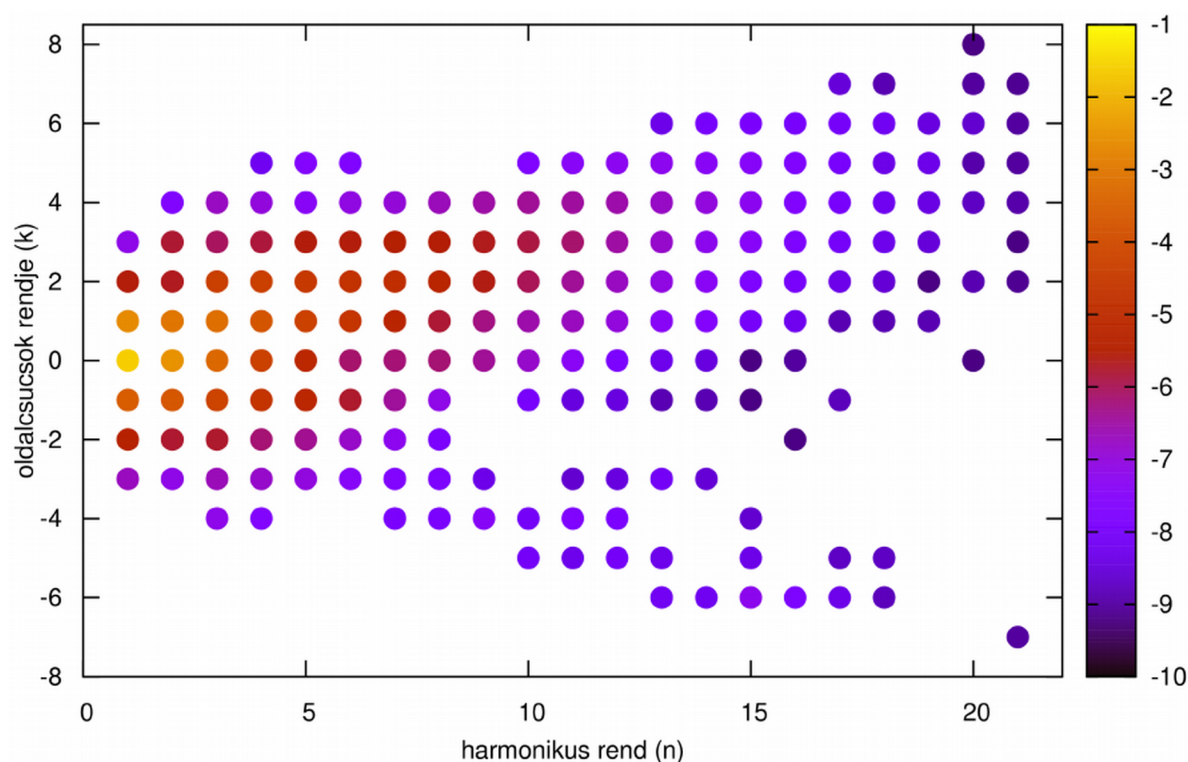


A színek megfelelnek a dolgozat 4.9. ábráján használtaknak: a piros keresztek a minimumokból, míg a kék x-ek a maximumokból számolt görbét jelzik. A maximumok maradványgömbjét a láthatóság kedvéért elcsúszttam +0,05-dal. A maradványgömbjéből két dolog látszik: (1) a fenti számolt kétszeres szóráskülönbség szemmel is érzékelhető az átlagos szórásokban. (2) Látszik, hogy a szórás valóban nem egyenletes a görbék mentén. Úgy tűnik azonban, hogy a maximumok, ill. minimumok környékének viselkedése nem különbözik a két görbénél. A meghatározó mindkét esetben a $\sim 0,3$ fázis, a „felszálló ág” környéke, ahol nagyobb a szórás, mint a görbe többi részén. Ha összevetjük a V1127 Aql O-C-gömbjét a fénygörbével, azt látjuk, hogy az O-C-görbe felszálló ágának környékén a legerősebb, az időben amúgy erőteljesen változó erősségű perióduskettőződés (PD, Szabó és tsai, 2014). Több Blazskó RR Lyrae esetében is megfigyelhető, hogy bizonyos Blazskó-fázisokban erős a PD, másutt pedig gyenge (l. Szabó és tsai, 2010, 3. és 5. ábra), más Blazskó-csillagoknál ugyanakkor nem látszik ilyen összefüggés.

A V1127 Aql O-C-jének felszálló ágán látható nagyobb „szórás” tehát valójában nem valódi szórás, hanem a Blazskó-fázissal korreláló PD megjelenése az O-C-diagramon, ami szisztematikus hibát okoz az O-C-t meghatározó programban. A rögzített paraméterekkel számoló maximumillesztés ugyanis, amellyel az O-C-diagramot megszerkesztettem, szisztematikusán előrébb, ill. hátrébb adja a maximumokat az egymást követő hegyesebb és laposabb maximumokra (l. még válaszomat a 9. kérdésre).

3. A 40. oldalon nagyon impresszív a V1127 Aql-re sikerrel meghatározott rengeteg harmonikus és modulációs oldalcsúcs térképe. Utána relatíve sokat foglalkozik az egyes tagok amplitúdóival, ezek amplitúdóarányaival. Kérdésem: egy relatíve nem is bonyolult technikával nem érné meg a 4.3. ábra n-k térképére harmadik dimenzióként (vagy pl. szürkefokozattal, színskálával, stb.) ábrázolni az amplitúdókat is? Szemléletesebb lenne, és az érdekességek megértését is segíthetné. A védésre be tudna-e egy ilyet mutatni – és ezen látszódná-e valami érdemi többlet?

A 4.3. ábra a kérdésben leírtaknak megfelelően módosított verziója az alábbi ábra:



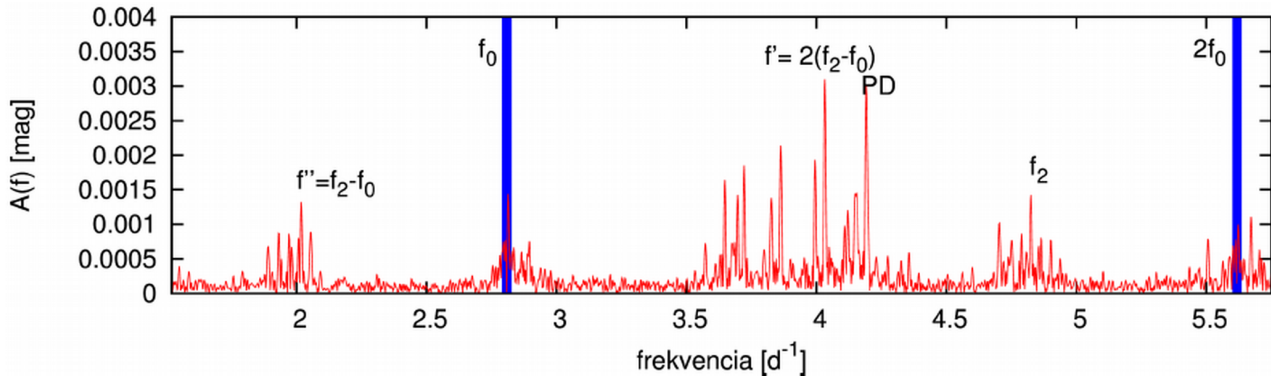
A színeket az amplitúdó logaritmusával skáláztam (az egyes k -khoz tartozó amplitúdók harmonikus rendek szerinti közel exponenciális lecsengése miatt, lineáris skálán nem sok látszana). Az ábra így kétség kívül esztétikusabb, és az oldalcsúcsok aszimmetriáját, – azaz azt, hogy pozitív k -khoz tartozó oldalcsúcsból nemcsak több van, de nagyobb amplitúdójúak is, mint a negatívakhoz tartozók, – közvetlenül mutatja. Ugyanakkor ezt a tényt, az amplitúdók harmonikus rend szerinti lefutását ábrázoló 4.6. ábra is jól mutatja, mellesleg ott a lefutások finomszerkezete is jól látszik, ami a módosított 4.3 ábrán alig-alig érzékelhető. Vagyis a módosított ábra, véleményem szerint, új információt nem tartalmaz.

4. *Ha jól gondolom a dolgozat elolvasása után – a V1127 Aql-én kívül egyetlen másik RR Lyrae sem mutat gyaníthatóan rotáció miatti felhasadásokat? Ellenben a V1127 Aql-nál viszont ugye ennek tudhatók be a majdnem reguláris frekvenciaközök a 3,647-3,749 d^{-1} közt? (46. oldal)*

A rövid válasz az, hogy nem. A V1127 Aql volt az első úrfotometriával vizsgált Blazskó RR Lyrae csillag. Nem volt semmi korábbi vizsgálat, ami vezérfonalul szolgálhatott volna az első ízben ekkor azonosított extra frekvenciák magyarázatára, így minden, logikailag szóba jöhető lehetőséget megvizsgáltunk. Ezért merült fel a szóban forgó frekvenciákra a független nemradiális módusok, és azok rotációs felhasadása is. A további csillagok vizsgálata sokat tisztított a képen, de azt nem állítanám, hogy egész biztosan mindent értünk a V1127 Aql spektrumában. A reguláris frekvenciaközöket akkor is és most is azzal magyarázatuk, hogy az egyes csúcsok ténylegesen független frekvenciák, ill. ezek lineáris kombinációi.

2009-ben a V1127 Aql Fourier-spektrumát négy független frekvenciával írtam le. Ezek: a pulzációs alaplómódus f_0 frekvenciája, a Blazskó-effektus f_B frekvenciája, és két további frekvencia, az f'' (vagy ennek kétszerese $f''=2f'$, itt nem sikerült eldönteni, melyik az elsődleges), ill. egy modulációként viselkedő kis frekvencia $f^{(1)}$. Későbbi vizsgálataink (Szabó és tsai. 2014) megmutatták, hogy a csillagban erősen jelen van a perióduskettőződés (PD, Kolenberg és tsai, 2010; Szabó és tsai, 2010). Az ehhez a jelenséghez tartozó frekvenciák az $\frac{1}{2}f_0$, $\frac{3}{2}f_0$, stb. helyeken jelennek meg csúcsokként a Fourier-spektrumban. Tehát pl. a 2009-ben $f' + f^{(1)}$ -ként azonosított

frekvencia a $3/2f_0$ PD-frekvenciával azonosítható. Az f' frekvenciához hasonló extra frekvencia több csillagon is megjelenik (Benkő és Szabó, 2014), és mint azoknál, a V1127 Aql esetében is igaz, hogy az $f' = 2(f_2 - f_0)$. Ebben az esetben a független frekvencia a második radiális felhanghoz tartozó $f_2 = 4.8254 \text{ d}^{-1}$ (azaz $f'' = f_2 - f_0$). Vagyis ismét csak négy független frekvenciánk van: a pulzációs alap és a második felhang, valamint a Blazskó-frekvencia és a perióduskettőződést létrehozó ún. strange módus frekvenciája (ami igazából $f_0 = 9/2f_0$). Az összes frekvencia ezen négy frekvencia harmonikusaival, ill. lineáris kombinációival leírható. Az alábbi ábra mutatja a (fehérített) Fourier-spektrum jelenlegi értelmezését:



A kifehérített harmonikusok helyét a kék függőleges vonalak mutatják. Az egyes csúcsok körüli reguláris szerkezetek a Blazskó-moduláció oldlacsúcsai.

Noha a fenti négy frekvencia számos Blazskó RR Lyrae csillag spektumát kielégítően leírja, és így a V1127 Aql úgy tűnik beleilleszthető egy általános képbe, az továbbra sem világos, miért lényegesen nagyobb amplitúdójú a kétszeres harmonikus (f') az f'' alaphfrekvenciájánál. Ilyen viselkedést eddig csak nemradiális módusok frekvenciáinál tapasztaltak (Balona és tsai, 2013 rhoAp csillagokra), ill. ezekre elméleti magyarázat is született (Kurtz és tsai, 2015). Ha a V1127 Aql esetében is ez a magyarázat, akkor az azt mutatja, hogy a radiális felhangok és azok lineáris kombinációi közelében valójában nemradiális módusok gerjesztődnek, ahogyan azt Dzeimbowski és Mizerski (2004) megjósolták. A tényleges helyzet kiderítéséhez nagy felbontású, idősoros spektroszkópiára lenne szükség.

5. *Nem igazán értem, hogy miért az Exo-DAT katalógus 3 leghalványabb RRab csillaga esetén a legnagyobb a maximum körüli fluxusvesztés? Azt gondolná az ember, hogy a legfényesebb csillagok maxima körül a legnagyobb... Valami más oka lehet ennek esetleg, mint pusztán a szórt fény, és az űrtávcső nem kívánt pozícióingadozásai? (72. oldal)*

Szórt fényről és a távcső ingadozásairól itt most nem beszéltem. A CoRoT 659723739 csillag két különböző CoRoT-futásban mért fluxusainak különbözősége alapján vetettem azt fel, hogy a nevezett három csillag anomális D_m paraméterének az lehet a magyarázata, hogy mindhárom csillagnál fluxusvesztés történt oly módon, hogy nem megfelelő (kisebb) maszkot definiáltak a csillagokra, mint az optimális lett volna. Az Exo-DAT mérései véletlenszerű időpontokban történtek a csillagok pulzációs fázisához képest. Ha a mérés a csillag átlagfényességétől függetlenül annak átlaga környékén történt, akkor jó eséllyel megfelelő maszkot tettek a csillagra. Ha fényességmaximumban mértek, akkor esetleg a szükségesnél nagyobb maszkot használtak, de ez fluxusvesztést biztosan nem okozott. Ha azonban a minimumban mértek, akkor a csillagot halványnak tekintették, és hozzá egy kisebb maszkot választottak, ami maximumban aztán nem bizonyult optimálisnak. Természetesen én nem állítottam, hogy biztosan ez történt. Sajnos a CoRoT esetében, ellentétben a Keplerrel, a pixeladatok általában nem érhetők el, így ez az egész csak egy feltevés. A tény az, hogy a CoRoT 659723739 esetében bizonyosan volt fluxusvesztés, a másik kettőnél pedig valószínű.

6. *A 39. oldalon a fehérítési folyamat megállítási szintjéről írva $\sigma=5,2$ spektrális szignifikanciaszintet határoz meg, de rögtön utána írja, hogy egyes frekvenciáknál alacsonyabb értékeket is elfogadott (azt viszont nem írja, hogy mennyit)... Ez így nem túl egzakt, nem lenne jobb inkább jel/zaj viszonyban gondolkodni végig? Hisz közben meg is magyarázza a fenti döntését azzal, hogy a magasabb frekvenciatartományokban alacsonyabb volt a zajszint. Tehát akkor nem lenne egyszerűbb és egzaktabb a jel/zaj viszony adott értékében meghúzni a határt a σ helyett? Felesleges plusz kivételezéstől és körülírástól kimélnénk meg magunkat.*

Egy véges hosszúságú, valahogyan mintavételezett, zajos idősor Fourier-spektrumában található csúcsok valódiságának eldöntése nem egzaktul megoldható feladat. Jellemzően két, a gyakorlatban sokat próbált módszert használtam: (1) Breger és tsai (1993) félempirikus módon definiálták egy frekvenciacsúcs jel-zaj viszonyát (S/N) a spektrumon belül. Vizsgálataik szerint ha $S/N > 4$, a csúcs jó eséllyel valós jelhez tartozik. (2) Reegen 2007-ben matematikailag egzakt módon definiálta a spektrális szignifikanciát (σ_p), amely szintén jellemzi egy frekvencia valódiságát. Reegen még azt is megmutatta, hogy a korábbi S/N és a spektrális szignifikancia nem független egymástól: $S/N=4 = \sigma_p \approx 5,5$. Ezeknek megfelelően választottam a V1127 Aql vizsgálatokor $\sigma_p > 5,2$ kritériumot.

A jel-zaj viszony és a spektrális szignifikancia közötti reláció (Reegen, 2007) miatt majdnem mindegy melyiket használjuk. A probléma mindkét esetben adott. A két módszer közül a spektrális szignifikancia az inkább egzaktabb. A jel-zaj viszony, definíciója szerint is félempirikus. Egységes tárgyalás úgy lehetett volna, ha (1) a jól látható, de nem szignifikáns szerkezeteket figyelmen kívül hagyom, esetleg (2) csökkentem a megkívánt szignifikanciaszintet. Utóbbi esetben viszont számos, kis frekvenciás instrumentális csúcsot is valósnak kellett volna tekintenem, amit el akartam kerülni. Így egy valóban nem túl elegáns, hibrid módszert választottam: egyedi csúcsot csak akkor tekintettem valósnak, ha az ténylegesen szignifikáns is, míg a harmonikusokat és Blazskó-oldalcsúcsait, amennyiben „jól látható” ($3 < \sigma_p < 5,2$) szerkezetet alkottak, elfogadtam.

7. *Több helyen is használja a „frekvenciatartam” terminológiát (pl. 39. oldal, 106. oldal), de nem tudom értelmezni az adott szövegkörnyezetben. Igaz, nem vagyok jártas a témában, így lehet, hogy elfogadott szakzsargonról van szó – de nekem úgy tűnik, hogy inkább „frekvenciatartalom”-ról van minden ilyen helyen szó, azaz az adott tartományban biztonságosan azonosítható csúcsok számáról...? Ez nem olyan jellegű, mint amit a „tartam” szóval írunk le (ami időbeli hossz, ill. tartomány).*

Teljesen igaza van az opponensnek, itt sajnos nem szakzsargonról van szó, hanem pongyola szóhasználatról, hogy azt ne mondjam fatális szótévesztésről. Mindenütt a tartalom lett volna a helyes.

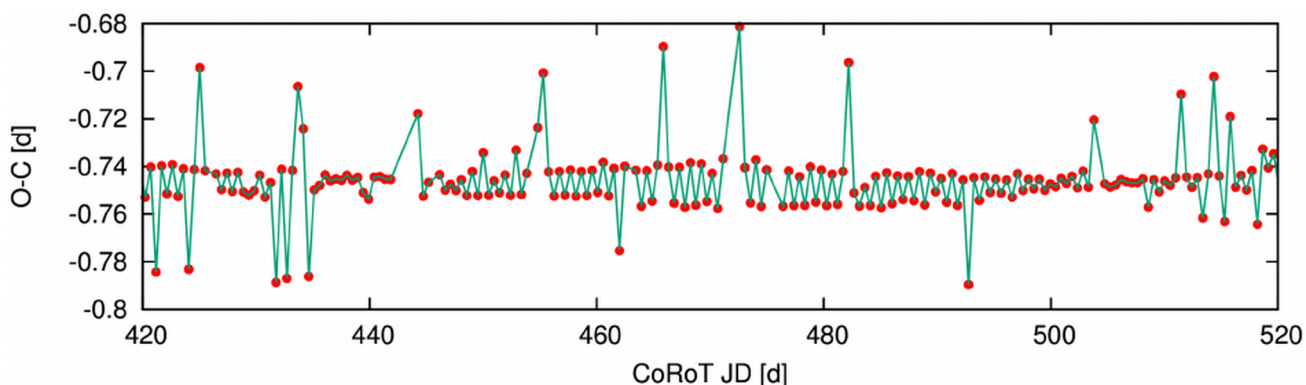
8. *A 118. oldal O-C görbéi kapcsán (V353 Lyr és V450 Lyr) nem merült-e fel a lehetősége, hogy a „túl gyors” maradék parabola esetleg egy rejtett második komponens tagnak betudható fényidő-effektus (és imígyen tehát nem is parabola)?*

Egy ilyen magyarázat ki ugyan nem zárható, de nem is túl valószínű. Az RR Lyrae-kkel kapcsolatos egyik nagy rejtély ugyanis, hogy miért nem ismerünk közöttük kettős-, ill. többes rendszereket. Az egyetlen kivétel a TU UMa, amely nagy valószínűséggel kettős (Wade és tsai, 1999; Liška és tsai, 2016b). Az OGLE óriási adatbázisában talált egyetlen fedési RR Lyrae jelöltről (Pierczyński és tsai, 2012) is kiderült, hogy a pulzáló komponens valójában nem is RR Lyrae, csak fotometriai fénygörbéje hasonló egy RR Lyrae csillaghoz (Smolec és tsai, 2013). Minden esetre a közelmúltban az űrfotometriai és az OGLE adatoknak köszönhetően felélénkült a kettős RR Lyrae-k keresése. A legkézenfekvőbb módszer ilyen kettősjelöltek keresésére a periodikus O-C-jű csillagok vizsgálata

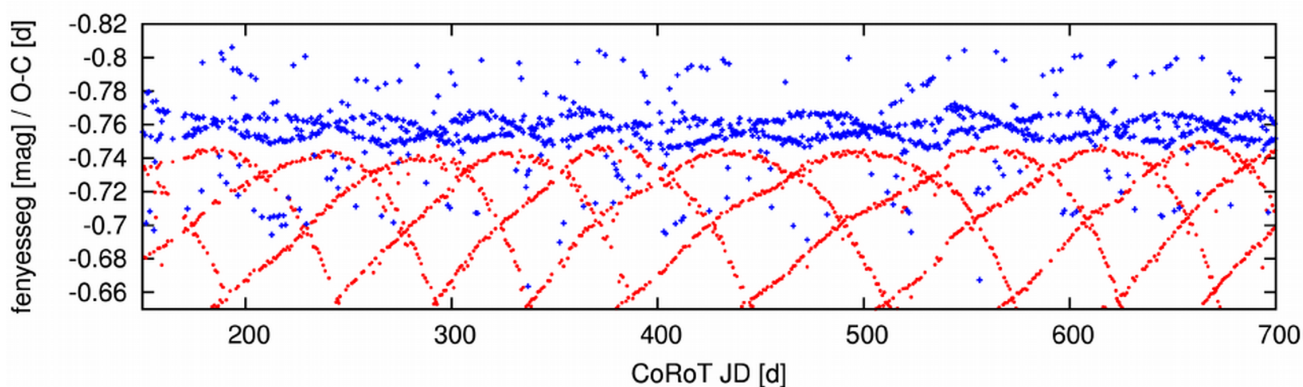
(Hajdu és tsai, 2015; Liška és tsai, 2016a), Ugyanakkor kizárólag ciklikus O-C-re alapozni a kettősséget nem lehet (Skarka és tsai, 2018), a dolgozatban mutatott O-C-k pedig még csak nem is ciklikusak (legalábbis a Kepler-észlelések négy éves időskáláján nem), továbbá mindkét csillagot észlelték a Keck-teleszkóp nagy felbontású HiReS spektrográfjával (Nemec és tsai, 2013), és ezekben a spektrumokban sincs nyoma kísérőknek. Az is tovább gyengíti a kettősséget, mint lehetséges magyarázatot, hogy ilyen gyors periódusváltozásokat sok már Blazskó-effektust mutató csillagnál is találtak, míg a nem blazskós csillagokra ez nem jellemző (l. pl. Jurcsik és tsai, 2012). Ez tehát azt sugallja, hogy itt igazából a Blazskó-effektushoz van valahogy köze ezeknek a gyors periódusváltozásoknak, és nem egy kísérőnek.

9. Kérem, kicsit részletesebben magyarázza el a 123. oldalon található 7.17. ábra O-C-jének (V838 Cyg) ezt a furcsa kettős hullámát! Abszolúte nem értem, és bár a következő oldalon ír egy „szisztematikus hullámvás”-ról, aminek mindenféle okai vannak – de a baj itt nagyobb: az értékek rövid időn belül ugrálnak, mintha többértékű függvényt látnánk... Talán nagyobb felbontásban jobban látszana, hogy miről van szó. Kérem, a védéskor mutassa be részleteiben ennek a csillagnak az O-C-jét (ill. ha azóta már tisztázódott, akkor a probléma megoldását)! Ugyanitt: az ábra alatti formulában nem hiányzik az f_0 frekvencia előtt a k szorzótényező?

A 7.17. ábra alsó paneljén ábrázolt O-C-görbéknek az volt a szerepük, hogy demonstrálják: az LC adatokból a szokásos módon megkonstruált O-C-görbén nem látható a Blazskó-effektus miatti fázismoduláció. A görbe egy részletét kinagyítva és az egymást követő pontokat összekötve kapom az alábbi ábrát:

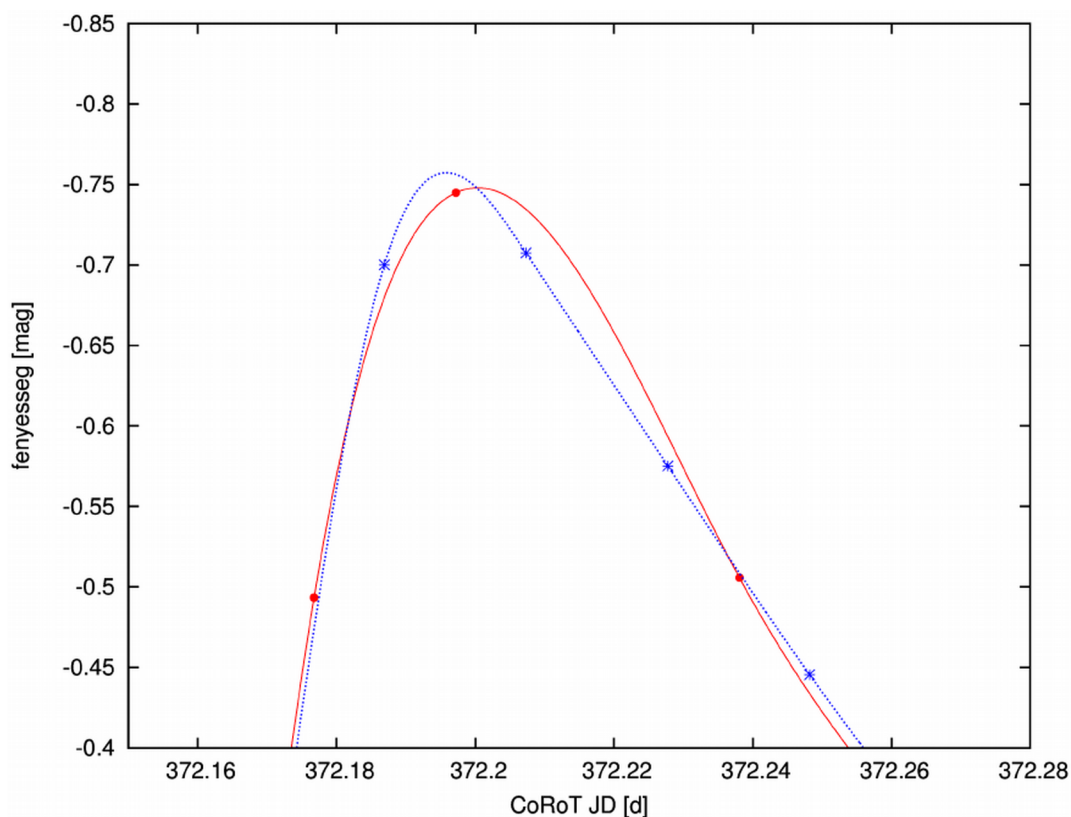
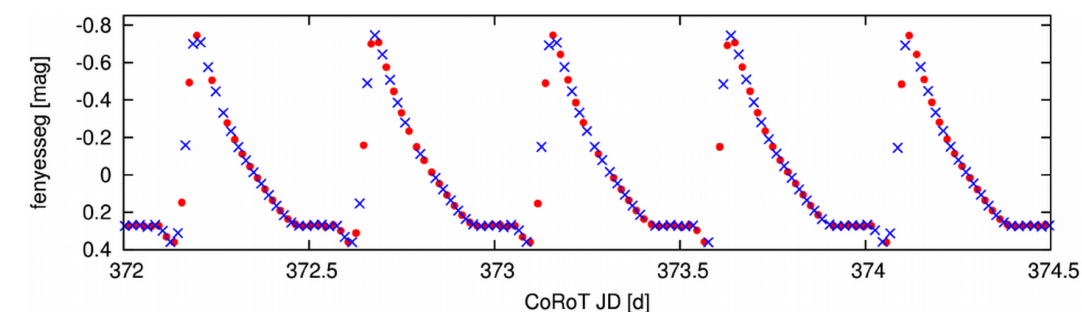


Látható, hogy a kettős hullámvonal fel-le ugráló pontok sorozatából alakul ki, ahogyan ezt az opponens is írja. A jelenséget (ahogyan a dolgozatban is szerepel) a mintavételezés és a változócsillag periodikus jelének szuperponálódása (stroboszkóp-hatás vagy moiré-effektus), – pontosabban ennek a nem megfelelő kezelése a maximumokat az O-C-hez meghatározó programban – okozza. A következő ábrán a fénygörbe egy részlete látható (piros pontok) az O-C-diagrammal (kék keresztek) egy ábrában (a jobb összevethetőség kedvéért az O-C-diagram el lett tolvá függőlegesen -0.76-tal).



A fénygörbe ilyen skáláján a nagyon erős moiré-szerkezet az uralkodó, az egyedi fénygörbék nem is ismerhetők fel. Az minden esetre egyértelmű, hogy az O-C-diagram kettős hulláma a fénygörbe moiré-szerkezetével áll kapcsolatban, hiszen jól láthatóan azt követi.

A kialakulásának megértéséhez készítettem az alábbi ábrákat:



A felső panelen a fénygörbe egy darabja látható. A piros pontok maguk az észlelések, a kék keresztek pedig a fénygörbe egy pulzációs ciklussal való eltoltságához tartozó pontok. A felszálló ágon különösen jól látható, hogy minden második ciklus van közel azonos módon mintavételezve. Ha két egymást követő ciklus maximumának környékét egymásra rajzolom úgy, hogy a maximumra

illesztett polinomokat is feltüntettem (piros folytonos, ill. kék szaggatott vonal), szemmel is érzékelhető, hogy a két illesztett polinom maximuma máshol van. Ez az oka az egymást követő ciklusok ugrándozó O-C értékeinek. A hullámot az ugrások csökkenő, ill. növekvő trendje rajzolja ki, ahogyan a moire-szerkezet lassan elcsúszik, hiszen a 29,43 perces (0,0204375 d) mintavételezés nem egész számú többszöröse a csillag pulzációs periódusának ($P_0 = 0,48027995$ d), hanem 23,499936-ad része, azaz két pulzációs ciklusban majdnem pontosan 47 pont (46,99987) van.

Valóban, az ábra alatti Fourier-összegben lemaradt a k szorzótényező, ez egy sajnálatos sajtóhiba, ami benne maradt a dolgozatban.

10. a) *Számomra nagyon meggyőző volt a Blazskó-jelenség amplitúdó- és frekvenciamodulációként történő, elegáns matematikai tárgyalása, a mérnöki világ analógiájára. A megfigyelésekből tapasztalt tények legtöbbször nyilvánvaló magyarázatot nyer így. Azonban érzésem szerint teljesen eltávolodtunk a megfigyelt pontsorozatok mögött megbúvó fizikától. Maguknak a pontsorozatoknak, ill. szélsőértékeik időbeli viselkedésének, a Fourier-analízissel kapott elemi függvényösszetevők viselkedésének dolgait meg tudtuk magyarázni. De vajon most mennyiben kerültünk közelebb a csillagfelszín alatt működő fizikai eseményekhez, ezekből mit lehet látni, mit lehet mondani az úrfotometria alapján? b) A dolgozatban pár helyen említi is, hogy a modellek számára megkorlátozásokat, megmagyarázandó tulajdonságokat jelentenek egyes általa feltárt tények (pl. 63. oldal 5.6. ábrái: a harmonikusok amplitúdóarányai, fáziskülönbségei) – de vajon ezeken túlmenően lát-e a szerző közvetlenebb, direkt kapcsolatokat az egyes kívülről megfigyelt periodikus történések, és a csillagbelső fizikája között? c) Kérem, védéskor kicsit konkrétabban és részletesebben is mutassa be, hogy az általa kimutatott megfigyelési tények/konzekvenciák, ill. valamilyen irányba eldöntött korábbi sejtések a pulzáció fizikai megértésének mely pontjain okoznak most megmagyarázatlan problémát, a modellekben javítandó részleteket – és melyek helyességét/korrekttségét erősítik/igazolják?*

a)

Sajnos sokszor találkozni az irodalomban az észlelések téves interpretálásával, amikor messzemenő, mély „fizikai” következményeket tulajdonítanak olyan megfigyelési eredményeknek, amelyek valójában nem is azok, hanem a mérőműszer, vagy a feldolgozáskor használt módszer sajátossága, vagy hibája. Szerintem a csillagok fizikájához csak úgy juthatunk el, ha egyértelműen azonosítani tudjuk az észleléseinkben, hogy mi mit jelent. Ha képesek vagyunk egy-egy megfigyelt jelenséget valamihez kötni, és itt nem kizárólag fizikai modellekre gondolkodok. Ezzel a matematikai vizsgálattal is pontosan ez volt a cél. A dolgozatban ismertetett munkámban az volt a kiindulás, hogy megvizsgáljam, hogyan viselkednek a fénygörbék, Fourier-transzformáltak stb. modulációk hatására. Korábban ugyanis az sem volt egyértelmű, hogy a moduláció jobban leírja a Blazskó-effektust mutató csillagok jelenségeit, mint a közeli frekvenciák lebegése (Breger és Kolenberg, 2006; Kolenberg és tsai, 2006). Utóbbi matematikai leíráshoz egyébként fizikailag is más modell tartozna, pl. nagy amplitúdójú nemlineáris módusok gerjesztődésére lenne szükség. Tehát érzésem szerint nem eltávolodtunk a csillagok fizikájától, hanem éppen közelebb jutottunk azáltal, hogy az észlelések számos jellemzőjéről kimutattam, hogy azoknak nincs semmilyen komolyabb fizikai oka. Pontosabban az általam leírt fénygörbe-, Fourier-, vagy éppen O-C jellemzők, nem tesznek különbséget a különböző fizikai modellek között, elegendő, ha azok képesek egy szimultán amplitúdó-, és frekvenciamodulációt létrehozni.

Ha ezen az úton tovább megyünk, és feltesszük azt a kérdést, hogy az észlelt fénygörbéket milyen matematikai formával lehet a legpontosabban leírni, akkor arra jutunk, hogy a modulációs leírás is csak egy első közelítés (Szeidl és tsai, 2012). Az észlelt fénygörbék leírására jelen pillanatban az ún. majdnem periodikus függvények tűnnek a legalkalmasabbnak (Benkő, 2018, ill. 8.4.1. fejezet). Ennek a matematikai leírásnak viszont nemcsak matematikai következményei vannak, hanem

egyértelműen mutatja azt is, hogy a Blazskó-effektus nem egy a pulzációtól független külső moduláció (amit pl. kettősség, vagy mágneses tér okoz), hanem a pulzáció belső tulajdonsága. Más szavakkal: a matematikai leírás megszorítást adott arra, hol kell keresni a Blazskó-effektus fizikai modelljét: a pulzáció fizikájában, és kizárt számos korábban felmerült alternatív fizikai magyarázatot.

b)

Valószínűleg itt szóhasználati eltérés van köztem és az opponens között, de véleményem szerint a Nap felszíni vizsgálatát, az asztrometriát, és még néhány speciális mérést leszámítva, a csillagászati mérések zöme meglehetősen áttételes, csak egy sereg modellfeltevessel együtt lehetséges az értelmezésük. Ilyen értelemben a direkt megfigyelés nagyon ritka. Ami a csillagok belsejét illeti ilyenről, a napneutrínó-méréseket leszámítva, nem is igen tudok. Amikor fotometriai idősorokkal vizsgáljuk a csillagok pulzációját, akkor az is mindig meglehetősen áttételes információnk van a csillagbelsőről, hiszen a csillag valós, három dimenziós mikro-, és makrofizika folyamatairól egy térben (és sok esetben időben is) átlagolt, integrált fluxusokból álló fluxus-idő függvényünk van csak. Az egyedi fluxusokat ráadásul alapvetően befolyásolják a csillagok légkörei, továbbá az adott mérőműszer is, amivel a mérés történt. Az észlelések értelmezése egy szukcesszív approximáció eredménye. A redukálás és elsődleges műszeres effektusok elkülönítése után jön a mérési adatok feldolgozására használt különféle módszerek tesztelése, majd pedig az ezekkel történő analízis után az eredményének összevetése a fizikai modellekkel. Ha az összes lépést megfelelően végeztük, akkor a fizikai modell és az észlelés eltérésére csak az lehet a magyarázat, hogy a modell nem teljes, valahogyan módosítani kell. Jómagam a folyamatot eddig tudom követni. A modellek bővítése, módosítása az elméleti szakemberek feladata.

c)

A tézispontokat röviden áttekintem fókuszálva, ill. reflektálva a kérdésben megfogalmazottakra.

I. Bár más észlelési eredmények is utalnak erre, az első ízben kimutatott 4. rendnél magasabb rendű Blazskó-oldalcúcsok *önmagukban cáfolják az effektusra korábban felvetett mágneses ferde rotátor modellt* (Shibahashi, 2000), hiszen az kvintuplett-szerkezetet jósol.

A Blazskó-effektus amplitúdómodulációjának nemlinearitására már volt mérési adat (Jurcsik és tsai, 2008), de a frekvenciamoduláció ilyen viselkedésére nem. Ennek kimutatása azt jelzi, hogy *csak a nemlineáris pulzációs modellekkel érdemes foglalkozni*, amikor a Blazskó-effektust próbáljuk modellezni. A dolog egyáltalán nem magától értetődő. A más változócsillag-típusokra használt nemradiális pulzációs kódok túlnyomó része még ma is lineáris.

II. A Blazskó-effektust nem mutató RRab csillagok Fourier-amplitúdóinak és fázisainak harmonikus rend szerinti lefutását összevetve a rendelkezésre álló elméleti munkákkal azt kaptam, hogy a jelenlegi modellek csak a fénygörbék globális leírására alkalmasak, a finomszerkezetek megragadására nem. Itt valószínűleg a *pulzációs modellek megfelelő légkörmodellekkel való kombinálása* hozza meg a megoldást.

A CM Ori (Blazskó-effektust nem mutató RRab csillag) pulzációs ciklusáról kimutattam, hogy az nem teljesen szabályos. Ilyen viselkedéssel kapcsolatban *több elméleti felvetés* is volt az irodalomban. Sweigart és Renzini (1979) a csillag konvektív magját körülvevő szemikonvekciós rétegben fellépő instabilitásokkal hozta kapcsolatba a radiális pulzáció esetleges, ciklusról-ciklusra való változását, míg Deasy és Wayman (1985) a pulzáció során megjelenő és eltűnő konvekciós réteggel. Ezek az elképzelések a standard hidrokódokba soha nem kerültek be, ugyanakkor a közelmúltban a Florida-Budapest *hidrokódban találtak olyan kaotikus megoldásokat*, amelyekben az egymást követő pulzációs ciklusok kissé különböznek egymástól (Plachy és tsai, 2013), hasonló módon mint az általam vizsgált észlelésekben. Ha sikerülne egyértelműen állást foglalni az

észlelések alapján utóbbi magyarázat mellett, akkor az egy *újabb érv lehetne a standard hirdokódok mellett*. (Jelenleg a Kepler-minta nemblazskós csillagain dolgozom ilyen céllal.)

III. A Kepler R Rab csillagok mintegy 50%-a bizonyult moduláltnak, míg a minta másik fele ilyesminek semmilyen jelét nem mutatta. Ezzel *cáfoltam egy korábbi sejtést*, ami a növekvő pontossággal növekvő számú Blazskó-effektust mutató RR Lyrae csillagot várt (Jurcsik és tsai, 2009). Ez egy eléggé zavarba ejtő tény, de az *effektus jövőbeli sikeres modelljének ezt reprodukálnia kell* (l. még 13. kérdésre adott válaszom).

Mintám minden Blazskó-csillaga estében kimutattam az amplitúdó- és fázismoduláció együttes jelenlétét, amivel pontosítottam a jelenség definícióját. A Blazskó-effektust magyarázó *bármely elmélet csak akkor lehet sikeres, ha mindkét modulációt egyszerre képes magyarázni*. Több korábbi elképzelés (egyes nemradiális rezonanciamodellek pl. Van Hoolst és tsai, 1998, vagy az eredeti ferde rotátor modell, Cousens, 1983) csak az amplitúdómodulációra adott magyarázatot.

Összefüggést találtam a Blazskó-effektus periódusa és az amplitúdómoduláció amplitúdója között: a hosszabb Blazskó-periódusoknak van, illetve lehet nagyobb modulációs amplitúdója, míg a rövid periódusú Blazskó-effektusok amplitúdója nem lehet tetszőlegesen nagy. A talált korrelációhoz *hasonló jelenséget gyakoriak a (hidro)dinamikai rendszerekben*, pl. a gyengén disszipatív rendszereket csak hosszú ideig ható erők képesek nagy amplitúdóval perturbálni (pl. Molnár és tsai, 2012a).

IV. A Kepler-űrtávcső Blazskó R Rab mintájának vizsgálatával arra jutottam, hogy a Blazskó-effektus alapvetően többszörös modulációként jelenik meg, és nem egy szabályos monoperiodikus jelenség. Ez *kizár mindenfajta szigorúan szabályos fizikai folyamatot* (pl. forgás, kettősség), mint magyarázatot. A modulációs frekvenciák lineáris kombinációinak megjelenése a spektrumokban, a modulációk *nemlineáris fizikai csatolását* jelzik. Az esetek többségében a két modulációs periódus aránya kis egész számokkal írható le. Ez a két moduláció *rezonáns csatolódására* utal, de ennek a fizikai oka egyelőre teljesen ismeretlen.

V. Olyan kis amplitúdójú frekvenciákat azonosítottam Blazskó R Rab csillagok Fourier-spektrumában, amelyek nem tartoznak a perióduskettőződés (PD) jelenségéhez (Kolenberg és tsai, 2010, Szabó és tsai, 2010), hanem a radiális első vagy második felhang pozíciójában jelentek meg. Ezzel beazonosítottam a később *hármás rezonanciákkal* magyarázott jelenséget (Molnár és tsai, 2012b). Ebben az esetben a meglévő hidrodinamikai modellel (Florida-Budapest hidrokód) sikerült az észleléseket (legalábbis részlegesen, az első felhangú esetekben) visszakapni.

Első ízben mutattam ki olyan kis amplitúdójú módus frekvenciáját is, amely sem a PD-jelenséggel, sem pedig a hármás rezonanciákkal nem volt magyarázható. Az ilyen a frekvenciákat rendszerint független nemradiális módusok gerjesztésével magyarázzák. Mivel az RR Lyrae-kre nem létezik nemradiális hidrodinamikai pulzációs kód, ezek a frekvenciák elméletileg csak erősen korlátozottan vizsgálhatók. Ugyanakkor én megmutattam, hogy szinte az összes ilyen frekvencia felírható az alapmódus és a második felhang lineáris kombinációjaként is. Ezzel a *meglévő radiális pulzációs kódok számára vizsgálhatókká váltak*.

VI. A Blazskó-fénygörbék modulációs matematikai leírásának is van – az a) pontnál említetteken túl is – fizikai következménye. Az olyan nagy égboltfelmérések, mint az OGLE vagy a MACHO azt mutatják, hogy a Blazskó RR Lyrae csillagok Fourier-spektrumaiban a jobb oldali Blazskó-oldalsúcsok sokkal gyakrabban nagyobbak a bal oldaliaknál, mint fordítva (pl. az LMC esetében a MACHO-mérésekből 74% a 26%-hoz képest Alcock és tsai, 2000). Az általam tárgyalt összes formula szimmetrikus, 50-50%-os valószínűséget ad, ha *az amplitúdó-, és frekvenciamoduláció kezdőfázisa azonos valószínűségű*. Az észlelt aszimmetria tehát azt mutatja, hogy ez nincs így, de

ennek mélyebb fizikai okára egyelőre még feltevés sincs.

11. *A témától távoli emberként nagyon eretnek gondolat-e annak felvetése, hogy pl. A 110. oldal 7.10. ábráján a legvégül megmaradó valósnak tűnő változások a V2178 Cyg O-C görbéjén rendszertelenül, de gyakran bekövetkező, kis mértékű periódusugrándozások lehetnek (különböző meredekségű egyenes szakaszok)? Egy másik csillag esetén (igaz, hosszabb időszakra vetítve, és nagyobb változásoknál) ilyen lehetőséget fel is vetett maga a szerző is, de ennél a csillagnál nem. Mi erről a véleménye, lehetne-e ez a magyarázat ebben az esetben is? Ha nem miért nem?*

A felvetés egyáltalán nem eretnek, itt is meg lehetett volna említeni. A gond minden ilyen strukturált maradvány O-C-vel az, hogy nem világos, mit látunk. Egy bizonyos szint alatt az sem egyértelmű, hogy amit látunk az valós-e, vagy sem, ill. ha valós, akkor az a csillaghoz tartozik-e, netán valamilyen műszeres probléma okozza. Jelenleg is intenzíven vizsgálom a Blazskó-effektust nem mutató Kepler RR Lyrae csillagok periódusváltozásait. Hasonló problémák azoknál is megjelennek, pedig ott a Blazskó-effektus nem is bonyolítja a helyzetet.

A V2178 Cyg esetében az eredeti és a fehérített O-C-k lefutása nagyon hasonló (végig azonos helyeken mennek fel vagy le a görbék). Ez inkább arra utal szerintem, hogy a Fourier-spektrumban talált frekvenciák, és az azoknak megfelelő paraméterekkel történő illesztés nem írja le megfelelően a változást. A kváziperiodikus (pláne kaotikus) idősoroknak éppen ez a jellegzetessége: noha vannak periodikus komponenseik, azokkal nem írhatók le a jelek kellő pontossággal. Egy ilyen felvetés (vagyis hogy a periódusváltozás kváziperiodikus, esetleg kaotikus) érdemi vizsgálatához azonban sokkal hosszabb adatsorra lenne szükség (l. Plachy és tsai, 2014).

12. *A bennem kialakult kép szerint a fehér fényben végezhető hasonló űrtávcsöves fotometriák ezen a ponton túl nem tudnak igazán többet adni a fizikai helyzet tisztázásához – mondjuk újabb 10-20 csillagnál megint oldalcsúcsokat nézegetni, nem azonosítható újabb frekvenciák megjelenését nyugtázni, stb., de úgy érzem, ezzel sem kerülnénk a várt válaszokhoz közelebb. Kérdésem tehát: látja-e valamely kardinális pont(ok)on értelmét RR Lyraek CoRoT-hoz vagy Keplerhez hasonló stílusú, jövőbeli űrtávcsővel az eddigiekhez teljesen hasonló módon elvégezhető mérése folytatásának? Ha igen, akkor pontosan mire kellene koncentrálni, mit kellene kicsit másképp kivitelezni? Ha pedig tényleg nem ez vezet igazi eredményre, akkor további űrfotometriai idősorok erőltetése helyett mi lenne most a logikusabb következő lépés az RR Lyrae Blazskó-problémakör tanulmányozásában?*

A dolgozatban is vizsgált CoRoT- és Kepler-csillagokon számát a Kepler/K2 misszió legalább két nagyságrenddel megnövelte (Szabó és tsai, 2017). Ezek a csillagok jelenleg vannak feldolgozás alatt. Az észlelések számos, korábban űrfotometriával nem vizsgált csillagpopulációt (pl. gömbhalmazok, extragalaxisok) is mintavételeztek. A nagy minta legalább három szempontból is előnyös: (1) módot ad statisztikai vizsgálatokra, pl. a Blazskó-effektus, a perióduskettőződés, nemradiális módusok előfordulási gyakoriságának vizsgálatára, és ezek esetleges korrelációinak vizsgálatára fizikai paraméterekkel (pl. kor, fémesség, galaxison belüli elhelyezkedés). (2) A nagyobb mintába számos olyan ritkább csillag is belekerült, amilyen a korábbi kisebb mintákban nem fordult elő (például erősen modulált RRc csillag, Blazskó-effektus mutató kétmódusú RR Lyrae, vagy anomális periódusarányú extra módusokat tartalmazó csillagok, Molnár és tsai, 2017). Továbbá, (3) a minta módot ad a különböző algoritmusok tesztelésére és kalibrálására, ami segítheti a nem kifejezetten ilyen célú égboltfelmérések (Gaia, LSST) anyagán a változócsillagászati – közöttük az RR Lyrae-eket is érintő – kutatásokat.

A Kepler űrtávcső üzemanyaga a közeljövőben elfogy, és a távcső befejezi munkáját, az ekliptikai mezők észlelését, de már itt van a 2018. április 18-án sikerrel felbocsátott utód: a TESS űrteleszkóp

(Ricker és tsai, 2015). A TESS a K2-vel részben lefedett ekliptika környékét kivéve, két évente az egész eget le fogja fedni űrfotometriai idősoros észlelésekkel. Mi újat adhat ez az újabb űreszköz? Mivel alapvetően fényesebb csillagokat mér, sokkal könnyebb lesz szimultán földi színfotometriai és spektroszkópiai méréseket végezni a TESS-szel, mint akár a Keplerrel, akár a CoRoT-val. Ilyenek a két utóbbi távcső esetében szinte nem is történtek. A fényesebb változócsillagoknak az is előnyük, hogy jellemzően már ismertek, hosszabb, esetenként több évtizedes földi észlelés áll róluk rendelkezésre, ami a pontos űrfotometriával kombinálható lesz. Esetleg közvetlenül megfigyelhetünk olyan ritka jelenségeket, mint a módusváltás (kétmódusú pulzációból monoperiodikusba), vagy blazskós pulzáció monoperiodikussá válása (Soszyński és tsai, 2014).

A fenti két bekezdésben azt próbáltam bemutatni, hogy a jelenleg folyó, ill. a közeljövőben induló űrfotometriai missziók igenis előre vihetik az RR Lyrae-k kutatását is. Tény ugyanakkor, hogy az észlelések önmagukban nem elegendők. Az elméleti modellek finomítása, bővítése, pl. a valósághoz közelebbi többdimenziós hidrokódok kifejlesztése, ezeknek a ma még nem létező dinamikus légkörmodellekkel való kombinálása, esetleg a nemradiális pulzációs kódok RR Lyrae tartományra való kiterjesztése is szükségesnek tűnik.

13. Az eddigi munkássága, ill. a doktori dolgozatban is bemutatott vizsgálatai alapján mi a személyes véleménye arról, hogy valóban reális végállapot maradhat-e az a ténymegállapítás, hogy az RR Lyrae csillagok kb. fele blazskós, a másik fele pedig stabil? És ha igen, akkor mi a sejtése: mitől lesz blazskós az egyik, és nem a másik? Egyszerűbb lenne megérteni, ha az ilyen állapotban lévő csillagok mind „blazskóznának”, csak esetleg eltérő mértékben (amplitúdóval), mert akkor mégiscsak egy homogén csoportunk lenne... De hogy kvázi ugyanolyan globális fizikai paraméterek mellett az egyik mutatja, a másik meg nem, az bizony zavarba ejtő!

Valóban, a helyzet zavarba ejtő, de tény, hogy az űrfotometriai mérések analízisa során is mindig közelítőleg 50%-ot kapunk a blazskós RRab csillagok arányára. A mai tudásom alapján ezt észlelési ténynek fogadom el. Semmilyen arra utaló jelet, mérést eddig nem láttam, amely előre vetítené, hogy valójában lényegesen nagyobb (100%-hoz közeli) lenne ez az arány.

Az okról akkor lehetne érdemben nyilatkozni, ha már bizonyosak lennénk a Blazskó-effektus kiváltó okában. Ha a ma legvalószínűbb radiális rezonanciamodelt (Buchler és Kolláth, 2011) nézem, akkor a sejtésem az, hogy az effektust kiváltó rezonancia megjelenése nagyon érzékeny a fizikai paraméterekre. Valahogy úgy tudom elképzelni, hogy (pl. az effektív hőmérséklet-luminozitás síkon) a Blazskó-effektusnak megfelelő rezonanciaállapotok fraktál szerkezeten helyezkednek el, így két, egymáshoz nagyon közeli fizikai paraméterű ponthoz tartozhat a modulált, ill. a modulálatlan fényességváltozás. Egy ilyenfajta eloszlás megmagyarázná, hogy miért nem sikerült kimutatni semmilyen szignifikáns fizikai különbséget a blazskós, és a monoperiodikus RRab csillagok között, ill. azt hogy vannak olyan csillagok, amelyek blazskósból monoperiodikussá váltak, esetleg fordítva (Soszyński, és tsai, 2014).

Hivatkozások

- Alcock, és tsai, 2000, ApJ, 542, 257
Balona, L. és tsai, 2013, MNRAS, 432, 2808
Benkő, J. M. 2018, MNRAS, 473, 412
Benkő, J. M. és Szabó, R., 2014, in Precision Asteroseismology, IAU Symp., 301, p. 383
Benkő, J. M. és tsai, 2016, MNRAS, 463, 1769
Breger, M. és Kolenberg, K. 2006, A&A, 460, 167
Breger, M. és tsai, 1993, A&A, 271, 482
Buchler, R. J. és Kolláth, Z., 2011, ApJ, 731, 24
Catelan, M. és Smith, H. A., 2015, Pulsating Stars, Wiley-VCH, Weinheim

Cousens, A., 1983, MNRAS, 203, 1171
 Deasy, H. P. és Wayman, P. S., 1985, MNRAS, 212, 395
 Dziembowski, W. A. és Mizerski, T., 2004, Acta Astron. 54, 363
 Guggenberger, E. és tsai, 2011, MNRAS, 415, 1577
 Guggenberger, E. és tsai, 2012, MNRAS, 424, 649
 Jurcsik, J. és tsai, 2008, MNRAS, 391, 164
 Jurcsik, J. és tsai, 2009, MNRAS, 400, 1006
 Jurcsik, J. és tsai, 2012, MNRAS, 419, 2173
 Kolenberg, K. és tsai, 2006, A&A, 459, 577
 Kolenberg, K. és tsai, 2010, ApJ, 713, L198
 Kurtz, D. W. és tsai, 2015, MNRAS, 450, 3015
 Liška, J. és tsai, 2016a, MNRAS, 459, 4360
 Liška, J. és tsai, 2016b, A&A, 589, A94
 Molnár, L. és tsai, 2012a, MNRAS, 424, 31
 Molnár, L. és tsai, 2012b, ApJ, 757, 13
 Molnár, L. és tsai, 2017, EPJ Web of Conf. 160, 04008
 Nemec, J. M. és tsai, 2011, MNRAS, 417, 1022
 Nemec, J. M. és tsai, 2013, ApJ, 773, 181
 Piertyński, G. és tsai, 2012, Nature, 484, 75
 Plachy, E. és tsai, 2013, MNRAS, 433, 3590
 Plachy, E. és tsai, 2014, MNRAS, 445, 2810
 Poretti, E. és tsai, 2010, A&A, 520, A108
 Reegen, P., 2007, A&A, 467, 1353
 Ricker, G. R. és tsai, 2015, J. Astron. Tel. Instr. and Systems, 1, id.014003
 Shibahashi, H. 2000, in The Impact of Large-Scale Surveys on Pulsating Star Research, ASP Conf Ser. 203, p. 299
 Smith, H. A., 1995, RR Lyrae Stars, Cambridge Univ. Press
 Smolec, R. és tsai, 2013, MNRAS, 428, 3034
 Soszyński, I. és tsai, 2014, Acta Astron., 64, 177
 Sweigart, A. V. és Renzini, A., 1979, A&A, 71, 66
 Szabó, R. és tsai, 2010, MNRAS, 409, 1244
 Szabó, R. és tsai, 2014, A&A, 570, A100
 Szabó, R. és tsai, 2017, EPJ Web of Conf. 160, 04004
 Szeidl, B. és tsai, 2012, MNRAS, 424, 3094
 Van Hoolst, T. és tsai, 1998, MNRAS, 297, 536
 Wade, R. A. és tsai, 1999, AJ, 118, 2442

Budapest, 2018. április 20.

Benkő József sk.