

Válasz Dr. Szatmáry Károly opponensi véleményére

Először is megköszönöm az opponens körültekintő és gyors munkáját. Az alábbiakban a feltett kérdései dőlt betűvel, a válaszaim alattuk, álló betűvel szerepelnek.

1. Mik a különbségek és a hasonlóságok a Florida–Budapest-kód és a Varsó-kód között?

Előjáróban el kell mondnom, hogy ezek a kódok a manapság szokásos értelemben nem nyíltak, azaz a kódokhoz az azokat írókon kívül nincs másoknak hozzáférésük, így nekem sem. Ennek megfelelően a két kód összevetését csak az irodalomban megjelent információk, ill. A Florida–Budapest-kódot használó kollégáim személyes elmondása alapján tudom megtenni.

A két kód nagyon nagy mértékben azonos, hiszen mindkettő Stellingwerf (1975) egydimenziós, tisztán radiatív pulzációs hidrodinamikai kódjának Kovács és Buchler (1988) által továbbfejlesztett változatán alapszik. A két kód a turbulens konvekció kezelésében különbözik. Smolec és Moskalik (2008) leírása alapján a három fő különbség a következő: (1) A konvektív cellák sugárzási csillapodását a Varsó-kód egy radiatív hűlési taggal veszi figyelembe, ahogyan azt Wuchterl és Feuchtinger (1998) javasolta, míg a Florida-Budapest-kód a Pécelet-féle korrekciót alkalmazza (Buchler és Kolláth, 2000). (2) A turbulens áramlásban fellépő örvények keltette látszólagos (ún. eddy) viszkozitás kezelésekor a Varsó-kód a Reynolds-tenzor első rendű közelítésére a Kuhfuss (1986) által megadott formát használja, míg a Budapest-Florida-kód Stellingwerf 1982-es eddy viszkozitásának egy módosított alakját (Kolláth és tsai, 2002). (3) A gáz energiáját és a turbulens energiát leíró egyenletek közötti csatolási tagban szereplő forrásfüggvényben van a harmadik különbség. A Varsó-kód alapbeállítása megengedi a forrásfüggvény negatív értékeit is, míg a Florida-Budapest-kód alapbeállítása nemnegatív értékekkel fut. Ez utóbbi különbség azonban nem annyira a kódok, mint inkább azok beállításainak különbsége. Mindkét kóddal reprodukálható a másik alapbeállításának megfelelő futás.

2. A 4.7. ábra aláírása szerint a kettős csúcsokat a mintavételezés okozza. Kérem ezt alátámasztani.

Az hivatkozott ábraaláírás zárójeles megjegyzése a dolgozat ezen fejezetének alapjául szolgáló cikkből (Chadid és tsai, 2010) került ide. Akkoriban az egyes, kis amplitúdójú frekvenciák kettős csúcsait nem tudtuk mire vélni, és az akkor nagyon új úrfotometria sajátosságának gondoltuk. Tény, hogy ezt módszeresen nem teszteltük, hiszen rengeteg új jelenség volt, amit akkor láttunk először, és ezekre fókuszáltunk a vizsgálatainkkor. Később nyilvánvalóvá vált (Benkő és tsai, 2010), hogy az RR Lyrae csillagokban meglévő kis amplitúdós extra frekvenciák erősen időfüggők. A CoRoT minta csillagaira, – köztük a V1127 Aql-ra is – Szabó és tsai (2014) vizsgálták részletesen ezen frekvenciák időfüggését. Azt kapták (l. Szabó és tsai, 2014, 6. ábra), hogy az időfüggés nemcsak amplitúdó- és frekvenciaváltozást jelent, hanem az adott frekvenciák szerkezete is erősen változik. A Fourier-spektrumokban az adott frekvenciák helyén időnként egy, máskor két (vagy több) csúcs is látható. Valójában tehát ennek a változó spektrumnak az időátlaga van a 4.7. ábrán, és ez okozza a kettős csúcsokat. Az opponens nagyon éles szeműen észrevette, hogy itt nincs indoklás. Mint utóbb kiderült nem is lehetne, hiszen nem a mintavételezés az ok. Ezt a hibát sajnos nem vettem észre a dolgozat összeállításakor. Szerencsére sem a cikk, sem a dolgozat ezzel a megjegyzéssel a továbbiakban nem foglalkozott, így azok eredményeit ez a téves interpretáció nem érinti.

3. A 72. oldalon szerepel: „További érv a fluxusvesztés mellett, hogy a #739 csillag két CoRoT-futásban (LRc07, LRc10) különböző maszkkal mért fénygörbéje és így azok amplitúdói és egyéb Fourier-paraméterei is különbözők. Ha a maszkok tartalmaznák a teljes fluxust, ilyen különbséget nem szabadna látnunk.” Kérem bemutatni a különbségek mértékét.

Valóban, sem a dolgozatban, sem a dolgozat ezen a fejezetének alapjául szolgáló cikkben (Benkő és tsai, 2016), nem adtam meg számszerűen ezeket az eltéréseket. Itt most pótolom.

Az 1. táblázatban a CoRoT 659723739 (V2042 Oph) csillag Fourier-paramétereinek összehasonlítása látható a két különböző észlelési időszakban (LRc07, 2011 és LRc10, 2012). A hibák egyedi megadása helyett azt a konvenciót követtem, hogy az utolsó értékes jegyre kerekítve adom meg az adatokat. Az 1a. táblázat az első öt Fourier amplitúdót (A_1 - A_5) mutatja a CoRoT instrumentális magnitúdóskáláján, az 1b. táblázatban pedig az ezekből képezett R_{n1} ($= A_n/A_1$) amplitúdóarányok vannak.

1a. táblázat

	A₁ (mag)	A₂ (mag)	A₃ (mag)	A₄ (mag)	A₅ (mag)
LRc07 (2011)	0.27611	0.15599	0.09901	0.05773	0.03260
LRc10 (2012)	0.23723	0.13437	0.08541	0.04966	0.02837

1b. táblázat

	R₂₁	R₃₁	R₄₁	R₅₁
LRc07 (2011)	0.5650	0.3586	0.2091	0.1181
LRc10 (2012)	0.5664	0.3600	0.2093	0.1196

Jól látszik, hogy az LRc10 futás adataiból számolt amplitúdók mindegyike kisebb, mint az LRc07 futás amplitúdói. A két futás amplitúdóinak különbsége függ a harmonikus rendtől: az A_1 esetén meglévő nagyon nagy (0,04 magnitúdós) különbség az A_5 amplitúdókra 0,004 mag-ra csökken. Az amplitúdóarányokon ilyen nyilvánvaló trend nem látszik, a különbség rendtől függetlenül 0,001-0,002. Az amplitúdókülönbségek csökkenése a harmonikus renddel azonban egyértelműen arra utal, hogy a kisebb amplitúdójú görbében a nagyobbhoz képest fluxusvesztés történt.

Az 1c. táblázatban az első négy epochafüggetlen fáziskülönbségeket ($\varphi_{n1} = \varphi_n - n\varphi_1$) adom meg, mivel a különböző epochára számolt fázisok önmagukban nem összehasonlíthatók. A fáziskülönbségeket a szokásos radián mellett, fokokban is megadom.

1c. táblázat

	φ_{21} (rad; deg)	φ_{31} (rad; deg)	φ_{41} (rad; deg)	φ_{51} (rad; deg)
LRc07 (2011)	2.6318; 150.8	5.3220; 304.9	2.0621; 118.2	4.6248; 265.0
LRc10 (2012)	2.6126; 149.7	5.2829; 302.7	1.9938; 114.3	4.5366; 259.9

Ezekből az adatokból az látszik, hogy a fáziskülönbségek különbségei a két futásra néhány fokokak, és határozottan növekszenek a növekvő harmonikus renddel. A φ_{21} mintegy egy fokos különbsége φ_{51} -re több mint öt fokra nő. Itt a dolgozatban is említett jelenség mutatkozik meg: a fénygörbék alakjában meglévő különbségekre a magasabb rendű fáziskülönbségek érzékenyebbek. Ezek összevetésével jobban szétválnak az akár kis mértékben különböző fénygörbék, mint az alacsonyabb rendek

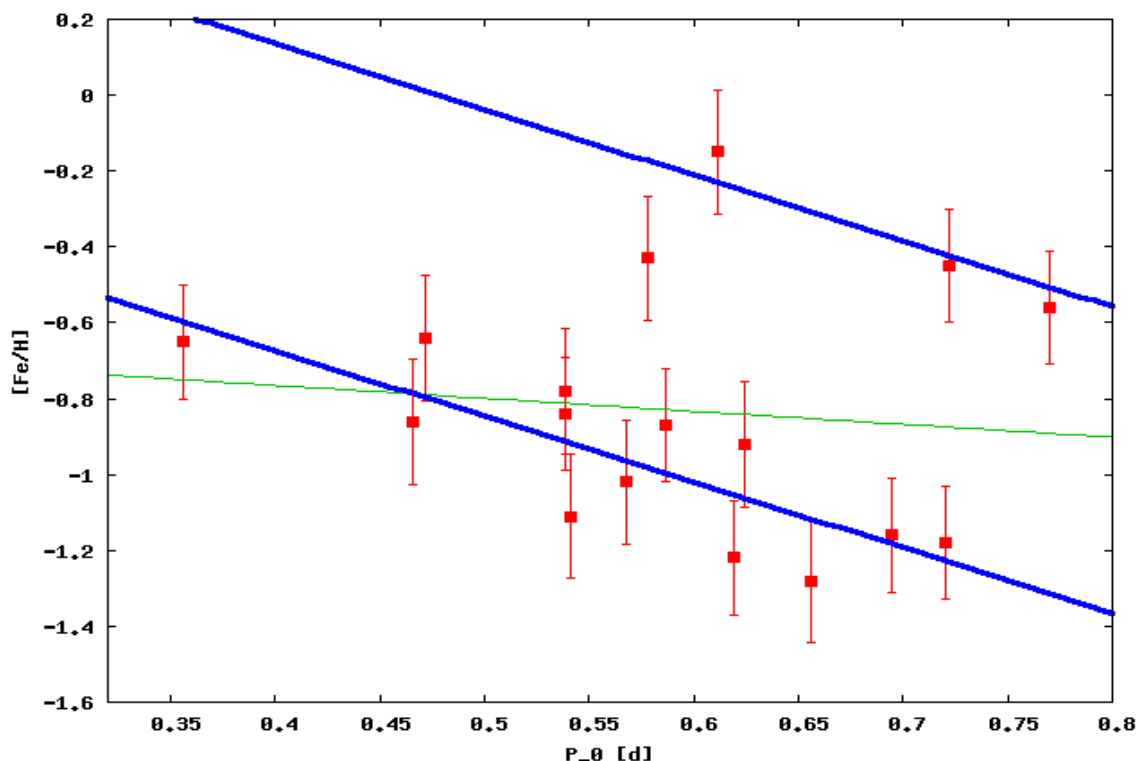
vizsgálatakor.

4. A CoRoT RR Lyrae csillagoknak az 5.10. ábrán jelzett két csoportra osztása nekem nem túl meggyőző. Mi indokolja, illetve igazolja a felosztást?

Jól ismert, hogy az RR Lyrae csillagok fénygörbéje-alakja függ a csillagok fémtartalmától, mégpedig úgy, hogy ha a fémtartalmat a $[\text{Fe}/\text{H}]$ vas-hidrogén aránnyal jellemezzük, akkor jó közelítés egy bilineáris periódus -- ϕ_{31} -- $[\text{Fe}/\text{H}]$ reláció (Jurcsik és Kovács, 1996). Az 5.10. ábrán ábrázolt $[\text{Fe}/\text{H}]$ értékek is ebből az empirikus relációból származnak. A bilineáris reláció formálisan egy sík egyenlete, amelynek a koordinátáskokkal adott nemtriviális metszetei (bármely két paraméter függvénye) a harmadik paraméter különböző értékeivel jellemezhető párhuzamos egyenesek. Ha tehát a fémtartalmot a periódus függvényében ábrázoljuk, mint itt, akkor az empirikus reláció alapján párhuzamos egyeneseket várunk.

Ugyanakkor a hidrodinamikai modellekből azt kapjuk, hogy adott fémesség mellett a ϕ_{31} fáziskülönbség egyértékű (bár nem lineáris) függvénye a periódusnak, különböző fémességekre pedig ezek a függvények egymás párhuzamos eltoltjai (l. pl. Dorfi és Feuchtinger, 1999; Nemec és tsai, 2011). Vagyis mind a megfigyelés, mind az elmélet párhuzamos függvényekből álló szerkezetet ad. Ez indokolja, hogy ilyen szerkezetet keressünk.

Galaxisszerkezetileg homogén (közel azonos fémességű) mintán az egymással párhuzamos függvények összemosódnak és egy periódus -- fémesség trendet adnak (l. pl. az OGLE LMC minta RR Lyrae csillagait, Soszynski és tsai, 2009). A CoRoT minta azonban nem homogén, hiszen a galaktikus mező nagyon különböző részeiről lett összegyűjtve (bulge, ill. a galaktikus anticentrum irányából). Ennek ellenére csillagai is követni látszanak egy ilyen trendet. Az ábra felső részén lévő négy csillag mintha az alsó csoport egy eltoltja lenne.



A fenti ábrán a dolgozat hivatkozott 5.10. ábrája látható úgy módosítva, hogy az 5.2 táblázat alapján a fémességek becsülhető $\sim 0,1$ dex hibáit is feltüntettem. Az ábrán a halvány zöld vonal mutatja az összes pontra illesztett egyenest. Jól látszik, hogy az illeszkedés nem kielégítő ($rms = 0.32$). Amennyiben azonban az alsó pontokra külön illeszttek, akkor az illesztett egyenes (alsó kék vonal) minden pontot hibahatáron belül tartalmaz. (Az illesztés hibája $rms = 0.13$.) A felső kék vonal az alsó egyenes eltoltjának illesztése a felső három pontra (az illesztés hibája $rms = 0.07$).

Az 5. 10. ábrán látható két csoport megkülönböztetése mellett tisztán matematikai érvek is szólnak. Kétdimenziós eloszlások vizsgálatára, szerkezeteik felismerésére és ellenőrzésére széles körben használt módszer a klaszter-analízis. Alkalmazzuk ezt az ábrázolt adatokra! A Wolfram Inc. Mathematica programcsomagjának használatával először hierarchikus módszerrel, különböző metrikák alkalmazásával meghatároztam az adateloszlásban található klaszterek valószínű számát, ami kettőnek adódott. Ezek után lokális módszerrel és megint csak különböző normákkal meghatároztam az egyes klasztek elemeit. A legtöbb normánál a felső négy pont egy klaszterbe esett, esetenként még 1-2 további ponttal együtt. A különböző normákkal kapott klaszterek metszete pedig pontosan az általam javasolt négy elemű felső halmazt adta, aminek komplementere pedig az alsó klaszter. Megjegyzendő, hogy a fizikailag várt, elnyúlt alakzatok kereséséhez optimális ún. koszinusz metrika önmagában is a fenti felosztású (négy felső pont, ill. alsó pontok) két klasztert eredményezi.

5. Mi lehet a fizikai oka, hogy csak és kizárólag a blazskós, azaz modulált csillagoknál jelentkeznek extra frekvenciák (125. o.)?

Jelenleg erre a kérdésre senki nem tudja a választ. Észlelési eredmény, hogy eddig az RRab csillagok között csak Blazskó-effektust mutató csillagon találtunk extra frekvenciákat. A felhangban (is) pulzáló (RRc és RRd) csillagokra ez nem igaz, azokban számos extra frekvenciát mutattak ki függetlenül attól, hogy blazskósok-e vagy sem (Gruberbauer és tsai, 2007; Moskalik és tsai, 2015; Smolec és tsai, 2015). Bár utóbbi esetekben az extra frekvenciák teljesen mások, mint a Blazskó RRab csillagokban látottak. Az RRab csillagokban az extra frekvenciák a csillag radiális felhangjainál (f_1, f_2, f_9) találhatók, míg az RRc és RRd csillagokban talált az extra frekvenciák nem egyeznek egyetlen radiális felhang frekvenciájával sem.

Ötletek természetesen vannak. Amennyiben a Blazskó-effektust az alapmódus (f_0) és a kilencedik felhang (f_9) közötti 9:2 arányú rezonancia okozza, amint azt Buchler és Kolláth (2011) javasolta, akkor természetesnek tűnik, hogy ezen rezonancia okozta perióduskettőződés (PD) megjelenik a Blazskó-csillagok spektrumában. A gond ezzel az, hogy sokszor a PD frekvenciák nem, hanem csak az f_1 és- vagy f_2 frekvenciák jelennek meg, illetve vannak olyan blazskós csillagok is, ahol semmilyen extra frekvenciát nem sikerült kimutatni. Mindezekre magyarázat lehet az extra frekvenciák amplitúdójának erős időfüggése, magyarán: a megfigyeléseink alatt éppen nem voltak mérhetőek az adott frekvenciák, de az igazi választ akkor fogjuk megtudni, ha a Blazskó-effektust már a hidrodinamikai modellek is reprodukálni tudják.

Hivatkozások

- Benkő, J. M. és tsai, 2010, MNRAS, 409, 1585
 Benkő, J. M. és tsai, 2016, MNRAS, 463, 1769
 Buchler, R. J. és Kolláth, Z., 2000, New York Acad. Sci., 898, 39
 Buchler, R. J. és Kolláth, Z., 2011, ApJ, 731, 24
 Chadid, M. és tsai, 2010, A&A, 510, A39
 Dorfi, E. A., és Feuchtinger, M. U., 1999, A&A, 348, 815

Gruberbauer, M. és tsai, 2007, MNRAS, 379, 1498
Jurcsik, J. és Kovács, G., 1996, A&A, 312, 111
Kolláth, Z. és tsai, 2002, A&A, 385, 932
Kovács, G. és Buchler, R. J., 1988, ApJ, 324, 1026
Kuhfuss, R., 1986, A&A, 160, 116
Moskalik, P. és tsai, 2015, MNRAS, 447, 2348
Nemec, J. M. és tsai, 2011, MNRAS, 417, 1022
Smolec, R. és Moskalik, P., 2008, Acta Astron. 58, 193
Smolec, R. és tsai, 2015, MNRAS, 447, 3756
Soszyński, I. és tsai, 2009, Acta Astron. 59, 1
Stellingwerf, R. F., 1975, ApJ, 195, 441
Stellingwerf, R. F., 1982, ApJ, 262, 330
Szabó, R. és tsai, 2014, A&A, 570, A100
Wuchterl, G. és Feuchtinger, M. U., 1998, A&A, 340, 419

Budapest, 2018. április 3.

Benkő József sk.