

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI ÉS INFORMATIKAI KAR
FIZIKA DOKTORI ISKOLA

RV Tauri-típusú pulzáló változócsillagok vizsgálata az űrtávcsövek korszakában

Doktori értekezés tézisei

Bódi Attila
okleveles csillagász

Témavezető: Dr. Szatmáry Károly, egyetemi tanár
SZTE Kísérleti Fizikai Tanszék

Konzulens: Dr. Kiss L. László, kutatóprofesszor
MTA CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet

Szeged, 2019

Tudományos háttér

A centrális hélium égető fázist követően a 0,5 naptömeget meghaladó tömegű második populációs csillagok a horizontális ágat (Horizontal Branch; HB) elhagyva az aszimptotikus óriáság (Asymptotic Giant Branch; AGB) felé fejlődnek. A fejlődés során távol a HB-től a fellépő számos termális pulzus hatására keresztelhetik az instabilitási sávot, ami radiális pulzáció kialakuláshoz vezet. Az ilyen fajta csillagokat kettes típusú vagy második populációs cefeidáknak nevezzük. Pulzációs periódusuk a luminozitásuktól függően egy naptól nagyjából egy hónapos időtartamig terjed (Aerts, Christensen-Dalsgaard & Kurtz, 2010).

A hosszabb periódusú második populációs cefeidákat már Henrietta Leavitt is felfedezte a 20. század elején; az objektumokat sokáig W Virginis néven illették. Ma már a kettes típusú cefeidákat három csoportba soroljuk a megfigyelt periódusok alapján. Az 1-5 nap közötti periódust mutatóak a BL Her, a 10-20 nap közöttiek a W Virginis és a 20 napnál hosszabbak az RV Tauri osztályt alkotják, amelyek mind különböző fejlődési előtörténettel rendelkeznek (Wallerstein, 2002). Ez a felosztás valójában teljesen önkényes.

Az RV Tauri változók a pulzáló változók egyik kisebb osztályát alkotják, mindössze néhány tucatnyi ismert példánnyal a Tejútrendszerben, illetve hasonló létszámban a Magellán-felhőkben. Fémszegény, kis tömegű ($\sim 0,5\text{-}0,8 M_{\odot}$), F-, G- és K színképosztályú, átlagosan 5000-6000 K felszíni hőmérsékletű szuperóriás csillagok, amelyek néhány ezer napluminozitás mellett a II-es típusú cefeida pulzáló csillagok hosszúperiódusú kiterjesztéseinek tekinthetők a klasszikus instabilitási sáv hidegebb széléhez közel. A poszt-RGB/poszt-AGB-n való gyors fejlődésük planetáris ködök kialakításával ér véget (Manick és mtsai, 2018, Kamath, Wood & Van Winckel, 2015, 2014, Jura, 1986).

A poszt-AGB csillagok között az RV Taurik relatíve legszabályosabb, cefeidaszerű pulzációt mutatnak. Legjellemzőbb tulajdonságuk a fénygörbe fedési kettősökre hasonlító alakja, amelyet váltakozó mélységű minimumok dominálnak (minden második minimum sekélyebb). Az átlagos pulzációs periódusok 30 naptól 90 napig terjednek. A periodicitás nem szigorúan szabályos, ciklusról-ciklusra változhat a pulzáció lefutása. A pulzációk mellett az RV Taurik elég nagy arányban mutatnak hosszú távú átlagfényesség-változást (modulációt), aminek a pe-

riódusa 700-2500 nap közé esik. A jelenséget évtizedek óta a csillagokat övező porral társítják, amely során az elhalványulásokat az okozza, hogy a pulzáló csillag egy olyan kettős rendszerben kering, amit körbevesz egy sűrű porkorong; az elhalványodások során a pulzáló komponens sűrűbb porfelhők mögé kerül, kifényesedéskor pedig kibukkan mögülük (Fokin, 1994, Pollard és mtsai, 1996, Van Winckel és mtsai, 1999, Fokin és mtsai, 2001, Maas, Van Winckel & Waelkens, 2002, Gezer és mtsai, 2015). Az átlagfényesség változás hiányára, illetve jelenlétére alapszik az RV Taurik RVa és RVb fotometria alosztályokba való sorolása.

Az RV Tauri csillagok periódus–fényesség relációját (PL-relációját) vizsgáló korábbi tanulmányok szinte kizárólag a Magellán-felhők második populációs cefeidáinak különböző mintáin vagy gömbhalmazokon alapultak. Ezek a vizsgálatok felvetették annak lehetőségét, hogy a hosszabb periódusú kettős típusú cefeidák a rövidebbekétől eltérő meredekségű PL-relációt követnek (McNamara, 1995). Arra is fény derült, hogy a különbség függ a megfigyelt hullámhossztól is, amelynek mértéke elhanyagolható a JHK_S sávokban (Matsunaga és mtsai, 2006). A Magellán-felhőkben, valamint a Tejútrendszerben található poros RV Taurikkal kapcsolatos legújabb vizsgálatok arra utalnak, hogy ezen csillagok PL-relációja meredekebb, mint a többi kettős típusú cefeidáé (Groenewegen & Jurković, 2017, Manick és mtsai, 2017).

Valójában mindmáig nem publikáltak olyan PL-relációt, amely közeli, fényes és minden más szempontból részletesen megfigyelt galaktikus RV Taurikon alapszik. Első alkalommal a *Gaia* második adatkibocsájtása (DR2) adott lehetőséget a galaktikus RV Taurik geometriai úton történő távolságmérésére.

Kutatási módszerek

Doktori kutatómunkám során először a valaha látott legpontosabb fényességmérésekkel rendelkező RV Tauri-típusú csillag, a DF Cygni részletes tanulmányozásával foglalkoztam. Az extrém pontos adatokat szolgáltató *Kepler*-űrtávcső méréseit az amatőr csillagászok által több évtizeden át folyamatosan gyűjtött adatokkal egészítettem ki, amelyeket Fourier- és wavelet-analízissel, valamint a hagyományos O–C módszerrel vizsgáltam. A legújabb hidrodinamikai modellek

eredményeit felhasználva következtetéseket vontam le a fénygörbében megjelenő atipikus változásokkal kapcsolatban. A több évtized hosszú mérések alapján megvizsgáltam a hosszú periódusú és nagy amplitúdójú fényességváltozás stabilitását, amelyből fontos megkötéseket vonhatunk le a csillag fényességváltozásainak lehetséges fizikai magyarázataival kapcsolatban.

Bár a gyors fejlődésüknek (azaz csillagászati értelemben rövid élettartamuknak) köszönhetően kevés RV Tauri-típusú csillagot ismerünk, az egyedik objektumok tanulmányozása után több csillag fényességváltozásait együttesen vizsgáltam. A cél az RVb altípusba tartozó csillagok hosszabb (több száz napos) és rövidebb (néhány tíz napos) időskálán megfigyelhető periodikus változásai közti kapcsolat kimutatása volt, ezzel alátámasztva a porkorongos modellt. Az elemzéshez minden egyes csillag összes pulzációs ciklusára meghatároztam a lokális átlagfényességet (fluxusban), illetve a pulzáció által okozott változások minimuma és maximuma közötti fényességkülönbséget, azaz a lokális pulzációs amplitúdót, szintén fluxus-egységekben. Eredményeim arra utalnak, hogy a korábbi szerzők nem vették észre, hogy valójában az adatok teljes mértékben alátámasztják a porkorongos fénycsökkenés nyomán várható pulzációsamplitúdó-változásokat. Ennek felismeréséhez szükséges volt a fluxusban gondolkodás, amit a *Kepler*-űrtávcső természetes módon elősegít, tekintve, hogy a letölthető *Kepler*-mérések fluxusban szerepelnek az adatfájlokban.

A kutatásom utolsó szakaszában az Európai Űrügynökség által 2013 decemberében indított *Gaia* asztrometriai műhold adatai használtam több RV Tauri csillag együttes vizsgálata céljából. A 2018 áprilisában kiadott második katalógusban számos pulzáló csillag nagy pontossággal meghatározott parallaxisa is megtalálható. Ezen adatokból, valamint földfelszíni fotometriai és spektroszkópiai mérésekből statisztikus módszereket alkalmazva sikerült meghatároznom több galaktikus RV Tauri csillag távolságát, luminozitását, sugarát. Megalapoztam a Tejútrendszerbeli csillagokra is a Kis- és Nagy Magellán-felhőkben, csillagtársulásokban, valamint gömbhalmazokban már ismert szoros kapcsolatot a pulzációs periódus és a luminozitás között. A Hertzsprung–Russell-diagramon való elhelyezkedésük, valamint csillagfejlődési modellek alapján következtetéseket vontam le az RV Taurik fejlődési történeteit illetően.

Új tudományos eredmények

1. Egyesítettem a Változócsillag-észlelők Amerikai Társasága (AAVSO) által gyűjtött közel 50 év hosszú vizuális észleléseket a kb. 4 év hosszú *Kepler* mérésekkel annak érdekében, hogy egy RV Tauri-típusú változócsillag, a DF Cygni eddigi legrészletesebb fénygörbevizsgálatát végezhessem el. (Bódi, Szatmáry, Kiss, 2016, A&A, 504, 24)
 - 1.a Megmutattam, hogy a fényes RVb típusú változócsillag, amely osztályának tipikus képviselője, átlagfényességének hosszú periódusú változását mutatja, valamint amplitúdójában és fázisában is folyamatosan változó, cefeidákhoz hasonló pulzációval rendelkezik.
 - 1.b A *Kepler*-adatsor Fourier-spektrumában szubharmonikusok sorozatát fedeztem fel, amely bonyolult periódus-kettőződés jelenlétére utal. Az időfrekvencia analízisből egyértelműen megmutattam, hogy az amplitúdó változásai nem ismétlődnek.
 - 1.c A *Kepler* fénygörbében tranziens jelenségeket is kimutattam, ezek közül kiemelkedik egy, amely során tapasztalt periódus-amplitúdó antikorrreláció a nemlineáris effektusok felerősödésére utalhat.
 - 1.d Az RVb változás hosszú távú stabilitása összhangban áll a kettőscsillagok mozgásával. Emellett az átlagfényesség változása és a pulzáló vörös óriás csillagok hosszú másodlagos periódusa közötti hasonlóságokat is megemlítettem.
2. Összegyűjtöttem a mindeddig legteljesebb mintát jól észlelt RVb-csillagokról, amihez vizuális, földi CCD-s és ultraprecíz *Kepler*-adatokat kombináltam. (Kiss, Bódi, 2017, A&A, 608, 99)
 - 2.a Univerzális lineáris korrelációt találtam a pulzációs amplitúdó és az átlagfényesség fluxusban kifejezett értékei között. A pulzációk valójában jó közelítéssel állandó mértékűek, ha a mindenkori átlagfényességhez viszonyítjuk őket.
 - 2.b A korreláció tulajdonságait természetes módon magyarázhatjuk egy olyan mechanizmussal, ami a teljes fénygörbét skálázza időfüggő módon. Egy nagy fénycsökkentő ernyő, feltehetően a kettős rendszereket kívülről öve-

ző porkorong periodikusan változó eltakarása pontosan ilyen mechanizmust szolgáltat.

- 2.c** Következtetésem szerint az RVb-csillagok fényváltozásait jelenségek szintjén teljes mértékben leírhatjuk az időben változó nemlineáris pulzációk és az RVb-jelenség porkorongos fénycsökkentést feltételező modelljének kombinálásával. Nincs szükség semmilyen további egzotikus kölcsönhatások és bonyolult jelenségek feltételezésére.
- 3.** A Tejútrendszer és a Magellán-felhők RV Tauri populációjának, valamint a PL-relációk univerzalitásának összehasonlítása érdekében létrehoztam a valaha létezett legmegbízhatóbb RV Tauri változók kollekcióját, kiegészítve a *Gaia* DR2 által nagy pontossággal meghatározott távolságokkal. (Bódi, Kiss, 2019, ApJ, 872, 60)
- 3.a** Megmutattam, hogy az RV Taurik esetében a *Gaia* DR2-ben található effektív hőmérsékletek szignifikánsan eltérnek a spektroszkópai úton meghatározottaktól, átlagosan ~ 436 K-el alacsonyabbak. A szisztematikus eltérés hátterében az áll, hogy a Hertzsprung–Russell-diagramon az RV Taurik pozíciójában elhelyezkedő csillagok esetében nem korrigáltak a vörösödéésre.
- 3.b** Ismertettem a galaktikus RV Tauri-típusú csillagok meglehetősen zavaros fejlődési állapotát. A legfényesebb, az $1 M_{\odot}$ modell vörös óriáságának tetejénél is fényesebb csillagok feltehetőleg poszt-AGB-k, amelyek $1 M_{\odot}$ -nél nagyobb tömegű objektumok leszármazottjai. A halványabb csillagok abban az esetben valószínűleg poszt-AGB-k, ha a kezdeti tömegük $\sim 2-4 M_{\odot}$ között volt. Más esetben feltehetőleg kisebb tömegű poszt-RGB kettőscsillagokból fejlődtek el. A többi csillag kisebb tömegű progenitorral rendelkező poszt-RGB kettős lehet.
- 3.c** A csillagok HRD-n elfoglalt pozíciója alapján arra következtettem, hogy az RV Taurik a klasszikus cefeidák instabilitási sávjának vörös oldalától alacsonyabb hőmérsékleteken is mutatják a cefeida-szerű pulzációt.
- 3.d** Sikerült leszármaztatnom a galaktikus RV Tauri-típusú változócsillagok parallaxis méréseken alapuló periódus-fényesség és periódus-sugár relációit. A relációk a rövidebb periódusú második populációs cefeidákéhoz

képest nagyobb meredekségűek.

- 3.e** Az első alkalommal mutattam ki korrelációt az RVb csillagok átlagfényesség változásának periódusa és a V-sávbeli abszolút fényesség között. Ezen reláció nagyon kevés csillagon alapszik; további vizsgálatokra van szükség a feltételezett korreláció megerősítésére.
- 3.f** Azt találtam, hogy az RVa csillagok $0,45\text{--}0,52 M_{\odot}$ közötti tömegűek, amely összhangban áll a kettes típusú cefeida modellszámításokkal. Az igen kevés tagból álló RVb csillagok tömegeloszlása kétcsúcúnak tűnik, ahol a tömegek a $\sim 0,7 M_{\odot}$ és az $\sim 1,8 M_{\odot}$ körül szórnak.

Hivatkozások

- Aerts, C., Christensen-Dalsgaard, J., Kurtz, D. W., 2010, *Asteroseismology*, Astronomy and Astrophysics Library, ISBN 978-1-4020-5178-4, Springer Science+Business Media B.V.
- Fokin, A.B., 1994, *A&A*, 292, 133
- Fokin, A.B., Lèbre, A., Le Coroller, H., Gillet, D., 2001, *A&A*, 378, 546
- Gezer, I., Van Winckel, H., Bozkurt, Z., De Smedt, K., Kamath, D., Hillen, M., Manick, R., 2015, *MNRAS*, 453, 133
- Groenewegen, M.A.T., Jurković, M., 2017, *A&A*, 604, 29
- Jura M., 1986, *ApJ*, 309, 732
- Kamath, D., Wood, P. R., Van Winckel, H., 2014, *MNRAS*, 439, 2211
- Kamath, D., Wood, P. R., Van Winckel, H., 2015, *MNRAS*, 454, 1468
- Maas, T., Van Winckel, H., Waelkens, C., 2002, *A&A*, 386, 504-516
- Manick, R., Van Winckel, H., Kamath, D., Hillen, M., Escorza, A., 2017, *A&A*, 597, 129
- Manick, R., Van Winckel, H., Kamath, D., Sekaran, S., Kolenberg, K., 2018, *A&A*, 618, 21
- Matsunaga, N., Fukushi, H., Nakada, Y., Tanabé, T., Feast, M.W., és mtsai, 2006, *MNRAS*, 370, 1979
- McNamara, D.H., 1995, *AJ*, 109, 2134
- Pollard, K. R., Cottrell, P. L., Kilmartin, P. M., Gilmore, A. C., 1996, *MNRAS*, 279, 949
- Van Winckel H., Waelkens C., Fernie J. D., Waters L. B. F. M., 1999, *A&A*, 343, 202
- Wallerstein, G., 2002, *PASP*, 114, 689

Publikációk

Az értekezéshez felhasznált saját publikációk

Referált angol nyelvű szakcikkek

1. **Bódi, A.**, Kiss, L. L.: *Physical properties of galactic RV Tauri stars from Gaia DR2 data*, 2019, Astrophysical Journal, 872, 60
2. Kiss, L. L., **Bódi, A.**: *Amplitude variations of modulated RV Tauri stars support the dust obscuration model of the RVb phenomenon*, 2017, Astronomy & Astrophysics, 608, 99
3. **Bódi, A.**, Szatmáry, K., Kiss, L. L.: *Periodicities of the RV Tauri-type pulsating star DF Cygni: A combination of Kepler data with ground-based observations*, 2016, Astronomy & Astrophysics, 596, 24

Egyéb, az értekezés témájához kötődő anyagok

Poszterek, konferencia kiadványok

1. Kiss, L. L., **Bódi, A.**: *RV Tauri-Type Stars: A Fresh Look at the Pulsation Patterns*, TASC3/KASC10 Workshop: TESSting Stellar Astrophysics, 2017. júl. 16-21., Birmingham, Anglia

Egyéb, az értekezéshez szorosan nem kötődő publikációk

Referált angol nyelvű szakcikkek

1. G. Zsidi, P. Ábrahám, J. A. Acosta-Pulido, . . . , **A. Bódi**, és mtsai: *The weakening outburst of the young eruptive star V582 Aur*, 2019, The Astrophysical Journal, arXiv:1902.03673
2. Dimitriadis, G., Foley, R. J., Rest, A., . . . , **Bódi, A.**, mtsai: *K2 Observations of SN 2018oh Reveal a Two-component Rising Light Curve for a Type Ia Supernova*, 2019, The Astrophysical Journal Letters, 870, 1

3. Li, W., Wang, X., Vinkó, J., . . . , **Bódi, A.**, mtsai: *Photometric and Spectroscopic Properties of Type Ia Supernova 2018oh with Early Excess Emission from the Kepler 2 Observations*, 2019, The Astrophysical Journal, 870, 12
4. Plachy, E., **Bódi, A.**, Kolláth, Z.: *Chaotic dynamics in the pulsation of DF Cygni, as observed by Kepler*, 2018, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 481, 2986
5. Mitnyan, T., **Bódi, A.**, Szalai, T., mtsai: *The contact binary VW Cephei revisited: surface activity and period variation*, 2018, Astronomy & Astrophysics, 612, 91
6. Bányai, E., Kiss, L. L., Bedding, T. R., . . . , **Bódi, A.**, mtsai: *Variability of M giant stars based on Kepler photometry: general characteristics*, 2013, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 436, 1576

Posztterek, konferencia kiadványok

1. **A. Bódi**, L. L. Kiss, O. Latković, A. Cséki, G. Djurašević: *Asteroseismic analysis and spectrophotometric study of KIC 2422539, a Kepler red giant binary with active mass transfer*, TASC4/KASC11 workshop: First Light in a new Era of Astrophysics, 2018. júl. 8-13., Aarhus, Dánia
2. Plachy, E., **Bódi, A.**, Kolláth, Z.: *The Global Flow Reconstruction of DF Cyg*, 2018, The RR Lyrae 2017 Conference. Revival of the Classical Pulsators: from Galactic Structure to Stellar Interior Diagnostics. Proceedings of the meeting held 17-21 September, 2017 in Niepołomice, Poland. Proceedings of the Polish Astronomical Society, Vol. 6. Edited by R. Smolec, K. Kinemuchi, and R.I. Anderson, ISBN 978-83-938279-9-2, pp.312-313
3. **Bódi, A.**, Molnár, L., Plachy, E., Szabó, R.: *Shockwave Behaviour in RR Lyrae Stars*, 2018, The RR Lyrae 2017 Conference. Revival of the Classical Pulsators: from Galactic Structure to Stellar Interior Diagnostics. Proceedings of the meeting held 17-21 September, 2017 in Niepołomice, Poland. Proceedings of the Polish Astronomical Society, Vol. 6. Edited

by R. Smolec, K. Kinemuchi, and R.I. Anderson, ISBN 978-83-938279-9-2, pp.282-283

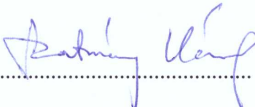
4. Plachy, E., Molnár, L., **Bódi, A.**, mtsai: *K2 Photometry of RR Lyrae Stars*, 2018, The RR Lyrae 2017 Conference. Revival of the Classical Pulsators: from Galactic Structure to Stellar Interior Diagnostics. Proceedings of the meeting held 17-21 September, 2017 in Niepołomice, Poland. Proceedings of the Polish Astronomical Society, Vol. 6. Edited by R. Smolec, K. Kinemuchi, and R.I. Anderson, ISBN 978-83-938279-9-2, pp.114-118
5. **A. Bódi**, L. L. Kiss: *Variability of M giant stars based on Kepler and OGLE photometries: asteroseismic analysis and physical parameters*, TASC3/-KASC10 Workshop: TESSing Stellar Astrophysics, 2017. júl. 16-21., Birmingham, Anglia
6. L. Molnár, E. Plachy, A. Pál, . . . , **A. Bódi**, mtsai: *The K2 RR Lyrae and Cepheid Survey: Pulsating Stars Near and Far*, TASC3/KASC10 Workshop: TESSing Stellar Astrophysics, 2017. júl. 16-21., Birmingham, Anglia
7. **A. Bódi**, K. Szatmáry, L. L. Kiss: *Kepler M giants: Comparison of stellar parameters from the KIC and APOGEE databases*, KASC8/TASC1 Workshop: Space Asteroseismology: The next generation, 2015. jún. 15-19., Aarhus, Dánia

Társszerzői nyilatkozat

Alulírott nyilatkozom arról, hogy Bódi Attila „*RV Tauri-típusú pulzáló változócsillagok vizsgálata az űrtávcsövek korszakában*” című doktori értekezésének 1. tézispontjában szereplő, az alábbi cikkben közösen publikált eredmények elérésében a jelölt szerepe meghatározó volt. Ezeket az eredményeket korábban nem használtam tudományos fokozat megszerzésére, és ezt a jövőben sem teszem.

- Bódi, A., Szatmáry, K., Kiss, L. L.: *Periodicities of the RV Tauri-type pulsating star DF Cygni: A combination of Kepler data with ground-based observations*, 2016, *Astronomy & Astrophysics*, 596, 24 (T1)

Szeged, 2019. február 22.



.....


Dr. Szatmáry Károly

Társszerzői nyilatkozat

Alulírott nyilatkozom arról, hogy Bódi Attila „*RV Tauri-típusú pulzáló változócsillagok vizsgálata az űrtávcsövek korszakában*” című doktori értekezésének 1., 2., és 3. tézispontjaiban szereplő, az alábbi cikkekben közösen publikált eredmények elérésében a jelölt szerepe meghatározó volt. Ezeket az eredményeket korábban nem használtam tudományos fokozat megszerzésére, és ezt a jövőben sem teszem.

- Bódi, A., Szatmáry, K., Kiss, L. L.: *Periodicities of the RV Tauri-type pulsating star DF Cygni: A combination of Kepler data with ground-based observations*, 2016, *Astronomy & Astrophysics*, 596, 24 (T1)
- Kiss, L. L., Bódi, A.: *Amplitude variations of modulated RV Tauri stars support the dust obscuration model of the RVb phenomenon*, 2017, *Astronomy & Astrophysics*, 608, 99 (T2)
- Bódi, A., Kiss, L. L.: *Physical properties of galactic RV Tauri stars from Gaia DR2 data*, 2019, *Astrophysical Journal*, 872, 60 (T3)

Budapest, 2019. február 22.



.....

Dr. Kiss László