

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI ÉS INFORMATIKAI KAR
FIZIKA DOKTORI ISKOLA

Nemradiális pulzációk vizsgálata fedési kettős rendszerekben

PhD értekezés tézisei

Bókon András

okleveles fizikus

Témavezető:

Dr. Bíró Imre Barna, tudományos főmunkatárs
SZTE Bajai Obszervatórium

Konzulens:

Dr. Szabó M. Gyula, kutatóprofesszor
ELTE Gothard Asztrofizikai Obszervatórium és Multidiszciplináris
Kutatóközpont

Szeged

2024

Tudományos háttér

A megfigyelt csillagok szinte mindegyike mutat valamilyen szabályos vagy szabálytalan változást emberi időskálán. Kiemelt jelentőséggel bírnak közülük az asztrofizikában a szabályos változócsillagok, megfigyelésük tervezhetősége, valamint a rájuk alkalmazható adatelemzési módszerek tárházának változatossága okán. Ez különösen igaz a pulzáló változócsillagokra, amelyek fényességében a belsejükben gerjesztődő sajátrezgések okozta periodikus kitágulás és összehúzódás miatt történnek periodikus változások. A pulzációk a csillagok belsejében terjedő hullámokként értelmezhetők, és vizsgálatukkal oly módon deríthető fel belső szerkezetük, mint a földrengéshullámok révén a Földé. Jelen ismereteink szerint ez egyedülálló lehetőség, amely sikerének azonban elengedhetetlen feltétele a módusazonosítás: az egyes frekvenciák rezgési módusainak (sajátfüggvényeinek) meghatározása.

Pulzációk a csillagok fejlődési állapotának szinte minden szakaszában előfordulnak, többek között a Napnál is jelen vannak. Központi égitestünk asztroszeizmológiai vizsgálata igen sikeresnek bizonyult, mivel közelsége révén a Nap könnyen és pontosan, nagy térbeli felbontással mérhető üresközökkel; több ezernyi pulzációs módot tartalmazó, szabályos rezgési spektruma alapján még a tengelyforgási sebességének belső eloszlása is feltérképezhetővé vált. Ugyanakkor távoli csillagok felszíne nem felbontható, csak a korongjukra integrált mennyiségek mérhetők, amelyek idősor-analízisével csak rezgési spektrumaik határozhatóak meg (frekvencia, amplitúdó, kezdőfázis). Egyes csillagok spektruma a Napéhoz hasonló szabályosságokat mutat, azokra a módusok szintén sikerrel azonosíthatók. Ugyanakkor sok más csillag rezgési spektruma teljesen szabálytalan, alaposan megnehezítve a kutató dolgát. Közülük is kiemelkednek a Hertzsprung-Russell Diagramon a fősorozat és az instabilitási sáv metszetében helyet foglaló δ Sct csillagok. Tömegük 1,5–2,5 naptömeg, periódusidejük percek-órák, fényességváltozásuk pedig néhány tized és ezred magnitúdó tartományban mozog. Egyaránt mutatnak radiális és nemradiális módusokat. Rezgési spektrumuk annyira esetleges szerkezetet mutat, mintha bizonyos rezgési módusaik valamilyen ismeretlen okból nem gerjesztődnének. Az ilyen csillagokra többszín-fotometriai, vagy a színeképvonalalaikat részletesen elemző spektroszkópiai módszerekkel lehet részleges sikert elérni. E módszerek azonban részletes csillagmodellt igényelne, ezért erősen függenek a csillag alapvető jellemzőitől – tömeg, sugár, összetétel, fejlődési állapot –, amelyek egyedülálló csillagokra csak korlátozott pontossággal ismerhetők meg. Újabban a nagy pontosságú, hosszú időbeli lefedettségű úrfotometriai mérések révén a rezgési spektrumaikban is sikerült szabályszerűségeket felfedezni és kihasználni.

A csillagok mintegy fele azonban nem magányos, hanem egy vagy több társ csillaggal áll gravitációsan kötött kapcsolatban. Keringési pályáik számunkra kedvező állása esetén

a tagcsillagok periodikusan el-elfedik egymást. Ezek a szabályos változó csillagok másik fontos csoportját alkotó fedési kettőscsillagok. Fontosságuk abban rejlik, hogy fotometriai és spektroszkópiai mérésekből a pályaparamétereik és a csillagtagok abszolút jellemzői (tömeg, sugár, felszíni hőmérséklet) igen nagy pontossággal meghatározhatók. Ugyanezek magányos csillagokra csak korlátozott pontossággal becsülhetők. Különösen szerencsés konfiguráció, ha valamelyik tagcsillag egyben pulzáló változó is. Egyrészt a pulzációk elemzéséből kapható asztroszeizmológiai tömeg összevethető és kalibrálható a fedési kettősségből meghatározható valódi tömegekkel. Másrészt a fedések szolgáltatva virtuális felszíni letapogatás egyedülálló lehetőséget kínál a pulzációs módusok empirikus azonosítására. A fedések ideje alatt a kiintegrandó korongrészek változnak, ami a különböző módusokra azok felszíni mintázatától függő amplitúdó- és kezdőfázis-modulációkat idéz elő. Ezek alkalmas elemzése a fedési geometria ismeretében elvezethet a pulzációs mintázatok rekonstrukciójára, módusszámaik beazonosítására. Ez az empirikus módusazonosítás nem igényli a csillag pontos asztroszeizmológiai ismeretét; ellenkezőleg, annak pontosítására független, lényegi információval szolgál.

Az elfedett pulzációk elemzésére többféle módszer áll rendelkezésre, melyeket a következő fejezetben részletezek. Közös jellemzőjük, hogy igen pontos, jó időfelbontású, és hosszú időbeli lefedettségű fotometriai méréseket igényelnek. Szerencsére az elmúlt másfél évtizedben a *Kepler* illetve *TESS* űrtávcsövek pontosan ilyen jellegű megfigyelésekkel látták-látják el a tudományos közösséget, így e lehetőségek alkalmas rendszerekre kivitelezhetők. Kutatómunkám nagy részében ilyen már meglévő módszerek tanulmányozásával valamint újabb módszerek kidolgozásával foglalkoztam, majd alkalmaztam azokat a KIC 3858884 jelű fedési kettős δ Scuti komponense pulzációinak módusazonosítására.

Vizsgálataim szempontjából egy másik, szintén érdekes helyzet áll elő, amikor pulzáló csillag körül nem egy másik csillag, hanem bolygó kering, mely kedvező pályaorientáció esetén a fedési kettőscsillagokhoz hasonló elven okoz szabályosan ismétlődő fényesség-változást a gazdacsillaga előtti elhaladása, azaz *tranzitja* során. Ezzel a módszerrel már több mint két évtizede fedeznek fel exobolygókat. A tranzitok mélysége elenyésző a fedési kettőscsillagoknál tapasztalható fedésmélységhez képest, legfeljebb 1-2%-nyi csökkenést okoz. Kielégítő mértékű elemzéséhez ugyanolyan nagy pontosságú felmérő programok szükségesek, mint az elfedett pulzációk vizsgálatához, és azokat ugyanazok az űrtávcsövek is szolgáltatják (amelyeket egyébként elsősorban tranzitáló exobolygórendszerek keresése céljából hoztak létre). Ugyan a tranzitok távolról sem okoznak megfigyelhető modulációt a gazdacsillag pulzációiban, de egyrészt egy pulzáló csillag asztroszeizmológiai tömege révén jóval definiáltabbá válnak az exobolygó jellemzői, másrészt viszont a pulzációk jelenléte kedvezőtlenül befolyásolhatja utóbbiak tranzitgörbéből való meghatározását. A tranzitos

exobolygóknál ugyanis érdekes lehetőség adódik a bolygópályának a csillag forgástengelyéhez viszonyított helyzete megállapítására, ha a gazdacillag gyorsan forog. A forgás okozta gravitációs sötétedés (a kisebb gravitációs gyorsuláshoz kisebb felületi fényesség társul) miatt egy megdőlt exobolygó-pálya aszimmetrikus tranzitgörbét okoz, amelyből a pálya irányszögei határozhatók meg. Ám hasonló aszimmetriát okozhatnak a gazdacillagnak a detektálási limit közelében rejtőzködő, kis amplitúdójú pulzációi is. A ma ismert több ezer exobolygó-rendszerből több olyan is ismert, amelynek gazdacillaga pulzál, egyesekben δ Scuti típusú csillagok vannak, amelyek többmódusú, komplex pulzációi különösen nagy torzítást okozhatnak, hamisan dőlt pályákat eredményezve. Kutatási tevékenységem részeként ezt a kérdéskört is megvizsgáltam, különös tekintettel az okozott tévesztés elkerüléséhez szükséges megközelítésekre.

Kutatási módszerek

A fedési kettősökben végbemenő modulált pulzációk elemzésére számos már kidolgozott módszer áll rendelkezésre: térbeli szűrés (elkülönített amplitúdó- és kezdőfázis-modulációk közvetlen illesztése, Gamarova és tsai., 2003), a teljes pulzációs fényességváltozás illesztése gömbharmonikus függvényeknek feltételezett felszíni mintázatokkal (közvetlen illesztés, Direct Fitting, Bíró, 2013), vagy azok általánosabb térképként történő rekonstrukciója, szintén a pulzációs adatsorból (fedési leképezés, Eclipse Mapping, Bíró és Nuspl, 2011). Utóbbi kettőt témavezetőm dolgozta ki, az eljárásokat megvalósító `pulzem` programcsomagot rendelkezésemre bocsájtotta. Ezek közül a gömbharmonikus felszíni mintázatok (gömbfüggvényeket) illesztő Direct Fitting (a továbbiakban DF) elvének felhasználásával alternatív módszert dolgoztam ki. A gömbfüggvények közvetlen illesztéséhez ugyanis pont a keresett (ℓ, m) módusszámokat kellene ismerni, amit a DF úgy old meg, hogy az összes frekvenciára végigfut az összes lehetséges módusszám-kiosztáson, és az adatokhoz legjobban illeszkedő kombinációt fogadja el megoldásnak. Ugyanakkor a lehetséges kombinációk száma igen meredeken emelkedik a bevont frekvenciák számával, ezért a DF igen hamar számításkapacitási korlátokba ütközik. Témavezetőm egyik megoldása a frekvenciák kis csoportokban történő iteratív illesztése volt a hozzájuk tartozó amplitúdók szerint, ám annak is megvannak a maga korlátai, például nem garantált, hogy a végén valóban a legjobb megoldást találja meg. Saját megközelitésem az összes kombináció átvizsgálása helyett a módusok paraméterterének sztochasztikus mintavételezése volt, Markov-lánchos Monte Carlo (MCMC) módszerrel, Metropolis-Hastings valamint Gibbs algoritmusok felhasználásával. Ebben a megközelítésben a nem-numerikus természetű módusokat kategóriaváltozóként kellett figyelembe venni, saját rendezési utasítással az ergodikus bejárás megvalósításához.

A megszerkesztett algoritmusokat különféle egy- és többmódusú pulzációkat tartalmazó, mesterségesen modellezett adatsorokon teszteltem, majd később a KIC 3858884 elemzése során is alkalmaztam, az eredeti Direct Fitting és Eclipse Mapping módszerekkel együtt. E rendszer elemzése során a Direct Fitting módszert a pulzációs tengely irányának megállapításához is felhasználtam. E módban az egyedi gömbfüggvények helyett ℓ -multiplett illesztése történik, majd azok együtthatóit a Wigner-féle forgatási mátrix elemeiként felfogva meghatározhatók annak a koordináta-rendszernek az Euler-féle forgatási szögei, amelyből nézve a multiplettek a legjobban leírhatók egy-egy gömbfüggvénnyel. A pulzációs tengely ismerete szükséges az Eclipse Mapping alkalmazásához.

Az általam vizsgált KIC 3858884 rendszer vizsgálatához annak a *Kepler* űrtávcsővel mért ún. short cadence fotometriáját használtam. A módusazonosításhoz szükséges a fénygörbe szétválasztása a fedési kettős és pulzációs jelekre; előbbi az egyensúlyi intenzitások elfedődését, utóbbi a pulzációk modulációját foglalja magában. A feladatot iteratív módon végeztem el két elemző program többszörös egymás utáni alkalmazásával. A fedési kettős jelleg illesztéséhez a PHOEBE (PHysics Of Eclipsing BinariEs, Prša és Zwitter, 2005) programcsomagot használtam, amely a népszerű Wilson-Devinney kódon alapul (Wilson és Devinney, 1971), a pulzációk idősor-analízisére pedig a SigSpec (Reegen, 2007) programot alkalmaztam, amely automata módban állítja elő az adatsor frekvenciaspektrumát. A fénygörbe szétválasztásának utolsó lépéseiben az addig radiális módusként kezelt pulzációk fedési modulációi helyett az Eclipse Mapping által rekonstruált modulációkat használtam a nyolc legnagyobb amplitúdójú frekvenciára. Ez utóbbi lépés drasztikusan megnövelte a szétválasztás minőségét.

Az pulzációk forráscsillagának megállapításához három módszerrel éltem: 1) a fenti szétválasztás reziduáljainak vizsgálata a két legnagyobb amplitúdójú pulzáció különböző kombinációinak feltételezésével, 2) az ún. fázismodulációs módszer alkalmazása a nyolc legerősebb frekvenciára, amely a pulzációkban a csillagok keringése által okozott fényidő-effektusát használja ki (Murphy és tsai., 2014), valamint 3) egy kettős Eclipse Mapping szintén a nyolc legerősebb pulzációra, amelynek során minden frekvenciát egyszerre mindkét csillagon feltételezem, és a mindkét típusú fedést magában foglaló fénygörbe alapján a pulzációk jeleit az algoritmus osztja szét a komponensek között, a nagyobb jelet a pulzáció forráscsillagának ítélve.

A pulzáló csillagok közül keringő exobolygók tranzitgörbéjének modellezése, illesztése és annak elemzése egy több részfeladatból álló munkafolyamatot igényelt. A modellek egyensúlyi fényességváltozását a FITSH programmal (Pál, 2012), a pulzációkat a pulzem egy erre a célra, a témavezetőm által továbbfejlesztett eljárással szintetizáltam. A kombinált szintetikus adatsorokat a TLMC (Transit Light Curve Modeller, Csizmadia, 2020) segítségével illesztettem két különböző konfigurációban, igazodott és szabad szögös állásban. A pulzációt

mint asztrofizikai jelet vörös zajként tekintve egy, az ilyen jellegű zajokra speciálisan kifejezett fejlesztett wavelet eljárás kezelte a TLCM-en belül, az adatsor illesztésével egyidejűleg. Az egyes illesztéseket különböző információs kritériumok segítségével értékeltem ki, amelyek során a vöröszaj-kezelés mikéntje is kétféleképpen került beszámításra: 'yn' (yes, noise in the model), illetve 'nn' (no noise in the model) attól függően, hogy a vöröszaj illesztést a modellhez tartozónak tekintjük azokat vagy sem.

Új tudományos eredmények

1. Új, saját fejlesztésű, sztochasztikus mintavételezésen alapuló módusazonosítási eljárást dolgoztam ki pulzáló csillagot tartalmazó fedési kettősökre, és validálását követően meghatároztam az alkalmazási korlátait. (Bókon és Bíró, 2020)

1.a. Metropolis-Hastings és Gibbs-algoritmuskon alapuló MCMC-eljárásokat dolgoztam ki a fedési kettősökben elfedett pulzációs módusok paraméterterének sztochasztikus mintavételezésére. Az eljárások újdonságát az (ℓ, m) számpárral jellemzett gömbfüggvénnyel leírható módusok diszkrét kategóriaváltozóként történő kezelése adja. A módszert sikeresen teszteltem néhány módusban pulzáló fedési kettős modelljéből generált szintetikus adatsorokon. Vizsgálatom során megállapítottam, hogy kedvező fedési konfiguráció esetén hasonló módusszelektivitással rendelkezik, mint a teljes szekvencián végigmenő $dfit$, cserébe annál jóval kevesebb számítási időt vesz igénybe. A nem szelektív eseteknél pedig az eljárás a hasonló módusokat is megtalálta olyan értelemben, hogy azonos nagyságrendű valószínűségeket rendelt hozzájuk.

1.b. Ugyanakkor azt is megállapíthattam, hogy amennyiben a pulzációs amplitúdók több nagyságrendet ölelnek fel, a legkisebb amplitúdójú módusok azonosítása kevésbé sikeres. Ez arra utal, hogy komplexebb pulzációval rendelkező csillagok esetén a kívánt analízist célszerű lehet két-három frekvenciánként, iteratív módon végrehajtani.

2. Megvizsgáltam, hogy milyen torzító hatással bírnak a tranzitáló exobolygók anyacsillagának nemradiális pulzációi az exobolygó tranzitgörbéiből kinyerhető paramétereire, különös tekintettel a bolygópálya dőlt konfigurációjára. (Bókon és tsai, 2023)

2.a. Nemradiálisan pulzáló csillag körül keringő exobolygók tranzit fénygörbéjét szintetizáltam abból a célból, hogy meghatározzam a nemradiális módusok tranzit okozta amplitúdó- és fázismodulációit. Megállapítottam, hogy a pulzációs amplitúdók fedés alatti változása a fedésen kívüli amplitúdójának legfeljebb 2-5%-a, míg a $\Delta\phi$ fáziskésés-eltérés 2° körüli. Valós mérési körülmények között ezek a modulációk sokkal kisebbek, mint a mérési hibák,

emiatt gyakorlatilag nem befolyásolják a tranzit alakját, ergo egyszerű harmonikus jelként kezelhetők.

2.b. Megvizsgáltam, hogy a pulzációk jelenléte okoz-e hibás tranzitparamétereket az illesztés során. Előfordulhat ugyanis, hogy az adatok jellege nem teszi lehetővé a pulzációk megfelelő modellezését és előzetes levonását a tranzit fénygöréből (például gyenge pulzációk, vagy kevés adat). E célból egymódusú és többmódusú pulzációval rendelkező rendszerek szintetikus fénygöréjét illesztettem a TLCM programmal, amely a nem tranzitjellegű asztrofizikai jeleket vörös zajként szimultán illeszti. Vizsgálataim során arra a következtetésre jutottam, hogy az egymódusú pulzációk nem jelentenek gondot a TLCM vöröszaj-kezelő algoritmusának, és gravitációs sötétedés feltételezése mellett is sikerrel azonosítja az igazodott tengelyű exobolygórendszereket.

2.c. A TLCM-mel végzett illesztés általában alacsony amplitúdójú többmódusú pulzációk jelenlétében is megfelelő eredményeket adott. Ez alól viszont kivételt képeznek azok az esetek, amikor a frekvenciák valamelyike közel rezonáns, vagyis a keringési frekvencia közel többszöröse. Az ilyen frekvenciák jelenlétében a program dőlt exobolygó-konfigurációt ad megoldásként. Ugyanakkor azt is tapasztaltam, hogy az ilyen hamis megoldásokat a BIC paraméter 'yn' változata sikeresen detektálta a tesztesetekben, ami reménykeltő lehet a valós adatok elemzésére nézve.

2.d. A δ Scuti pulzációknál tapasztalt relatív amplitúdók használata esetén a vörös zajt kezelő algoritmus képességeinek határát értük el, a kapott bizonytalanságok 6-10-szer nagyobbak voltak, mint az előző vizsgálatok során tapasztaltak. Megállapítottam, hogy a frekvenciák egyszerű harmonikus modellként történő eltávolítása után a program hatékonyan kezelte a tranzit alatt megmaradt nemradiális módusok modulációját.

3. A KIC 3858884 pulzáló csillagot tartalmazó fedési kettős úrfotometriai adatain alapuló részletes elemzést végeztem, amelynek során több, független módszerrel módusazonosítást hajtottam végre. (Bókon, Bíró és Derekas, 2024, beküldve)

3.a. Egyedi, iteratív eljárást dolgoztam ki és végeztem el az adatsor fedésből és pulzációból származó fényjárulékainak szétválasztására. Az eljárás egyedisége, hogy a legutolsó lépésben a pulzációk fedések általi modulációit egy előzetes Eclipse Mapping algoritmussal illesztve, a pulzációs járulékokat jóval tökéletesebb mértékben ki lehet szűrni a fedési fénygöréből, mintha egyszerű radiális módusként vennénk azokat figyelembe. Az ily módon letisztított fedési fénygöréből sikerült pontosítani a fedési kettős modelljét.

3.b. Többféle módszerrel, nevezetesen a reziduálok vizsgálatával, fázismodulációs analízissel és kettős Eclipse Mapping bevetésével megvizsgáltam a domináns pulzációs módusok forráscsillagát. Megállapítottam, hogy a nyolc legnagyobb amplitúdójú módus nagy valószínűségi

nűséggel a másodkomponensről ered, ezzel megcáfolva Manzoori (2020) következtetését, miszerint a két legerősebb két külön csillagról származna.

3.c. A célpontról rendelkezésre álló Kepler mérések mennyisége és pontossága lehetővé tette, hogy úgynevezett échelle-diagramok segítségével részletesebben is megvizsgáljam a pulzációk modulációját és forrását. Egyfelől megállapítottam, hogy a főkomponensen csak olyan kis amplitúdójú pulzációk modulálódnak, amelyek részletesebb elemzése jelen keretek között nem volt lehetséges. Másrészt azt is kiderítettem, hogy a domináns módusoknak csak egy része modulálódik a másodfedések alatt, a többi egyik fedés sem befolyásolja, ezért ez utóbbiak valószínűleg nem valódi pulzációk, hanem kombinációs frekvenciák. Találtam viszont olyan kis amplitúdójú módusokat, amelyek a másodfedések alatt a domináns módusoknál is erősebb modulációt mutatnak; ezek valószínűleg az úgynevezett rejtett módusok közé tartoznak. Ezen eredmények következtében sikerült kiválogatnom azokat a frekvenciákat, amelyek jó eséllyel rekonstruálhatók módusazonosítás céljából a másodkomponensen. Ezek az F1, F2, F3, F6, F15, F44 és F52.

3.d. A 3.c. pontban megállapított frekvenciákra összetett, L-multipllett illesztést végeztem a Direct Fitting algoritmussal forgástengellyel azonosnak feltételezett pulzációs tengely irányának megállapításához. A legjobban illeszkedő megoldás multipllett-együtthatóira a Wigner-féle forgatási mátrix együtthatóit illesztve a pulzációs tengely azimut-szögére 22° , dőlésszögére 22° adódott, ami lényegében egy igazodott forgástengelyű konfigurációnak tekinthető.

3.e. A 3.c. pontban kiválasztott frekvenciákra többféle módszerrel módusazonosítást végeztem. Ezek: a közvetlen gömbharmonikusok illesztése (Direct Fitting, DF Cleaning), a **T1** tézispontban bemutatott sztochasztikus módszer (YLMCMC), valamint az általánosabb megközelítésű képrekonstrukciós módszer (Dynamic Eclipse Mapping). A kapott eredmények összehasonlításával becslést adtam e módusok felületi (l és m) módusszámaira. A két legerősebb pulzációra (F1, F2) szektorális módusokat kaptam, (2,-2) és (3,3) legvalószínűbb azonosítással; az előzetes várakozásokkal szemben egyikük sem radiális. Nemradiális mivoltukat a modulációs oldalcsúcsaik szerkezete is alátámasztja. A különböző módszerek által adott eredmények között eltérések vannak, amit e legerősebb pulzációk gömbharmonikustól való eltérésének vagy a pulzációs tengely irányának nem kielégítő mértékű ismeretének lehet tulajdonítani. Az F3 és F15 egyértelműen radiálisnak adódtak, F6 (1,-1) értékekkel retrográd szektorális. Tudomásom szerint elsőként sikerült azonosítanom két rejtett módot az F44 és F52 személyében, amelyek módusszámaira (3,-1) és (2,1) adódott.

Publikációk

Az értekezéshez felhasznált saját publikációk

Referált, angol nyelvű szakcikk:

- **Bókon, A.** és Bíró, I. B., *A stochastic sampling method for the analysis of eclipsed pulsations*, Bulgarian Astronomical Journal, 33, 47 (2020).
- **Bókon, A.**, Kálmán, S., Bíró, I. B., és Szabó, M. G., *Stellar pulsations interfering with the transit light curve: configurations with false positive misalignment*, arXiv e-prints, arXiv:2305.00440 (2023).
- **Bókon, A.**, I. B. Bíró és A. Derekas „Eclipse mapping study of the eclipsing binary KIC 3858884 with hybrid δ Sct/ γ Dor component”. A&A. beküldve. arXiv: 2408.14464 (2024, beküldve).

Egyéb, az értekezés témájához kötődő anyagok

Referált, angol nyelvű szakcikk:

- Kálmán, S., **Bókon, A.**, Derekas, A., Szabó, G. M., Hegedűs, V., és Nagy, K., *Gravity darkening and tidally perturbed stellar pulsation in the misaligned exoplanet system WASP-33*, A&A, 660, L2 (2022).
- Derekas, A., Murphy, S. J., Dályá, G., Szabó, R., Borkovits, T., **Bókon, A.**, Lehmann, H., Kinemuchi, K., Southworth, J., Bloemen, S., Csák, B., Isaacson, H., Kovács, J., Shporer, A., Szabó, G. M., Thygesen, A. O., és Mészáros, S., *Spectroscopic confirmation of the binary nature of the hybrid pulsator KIC 5709664 found with the frequency modulation method*, MNRAS, 486, 2129 (2019).

Angol nyelvű konferencia előadások:

- Bókon, A.: *Application of Eclipse Mapping and Direct Fitting method on KIC 3858884 eclipsing binary system* – KOLOS 2017, 2017. december 7-9., Stakcin, Szlovákia
- Bókon, A.: *A stochastic sampling method for the analysis of eclipsed pulsations* – Joint Conference of SREAC & BgAS, Bulgaria, 2019. június 4-8
- Bókon, A.: *A stochastic sampling method for the analysis of eclipsed pulsations* – KOLOS 2019, 2019. december 5-7., Stakcin, Szlovákia
- Bókon, A.: *A stochastic sampling method for the analysis of eclipsed pulsations* – PIMMS Workshop, 2021. január 18 22.; University of Surrey, Egyesült Királyság; online

Hivatkozások


- Bíró, I. B. (2013. febr.). „The Dynamic Eclipse Mapping method in pulsating binaries”. *EAS Publications Series*. Szerk. K. Pavlovski, A. Tkachenko és G. Torres. 64. köt. EAS Publications Series, 331–338. old. DOI: 10.1051/eas/1364046.
- Bíró, I. B. és J. Nuspl (2011. szept.). „Photometric mode identification methods of non-radial pulsations in eclipsing binaries - I. Dynamic eclipse mapping”. *MNRAS* 416.3, 1601–1615. old. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2011.18400.x. arXiv: 1101.5162 [astro-ph.SR].
- Csizmadia, Sz (2020. aug.). „The Transit and Light Curve Modeller”. *MNRAS* 496.4, 4442–4467. old. DOI: 10.1093/mnras/staa349.
- Gamarova, A. Yu. és tsai. (2003. márc.). „Application of the Spatial Filtration Method to RZ Cas”. *Interplay of Periodic, Cyclic and Stochastic Variability in Selected Areas of the H-R Diagram*. Szerk. C. Sterken. 292. köt. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 369. old.
- Manzoori, Davood (2020. okt.). „Linear and non-linear tidal oscillations and mode identification in the eccentric binary system KIC 3858884”. *MNRAS* 498.2, 1871–1890. old. DOI: 10.1093/mnras/staa2207.
- Murphy, Simon J. és tsai. (2014. júl.). „Finding binaries among Kepler pulsating stars from phase modulation of their pulsations”. *MNRAS* 441.3, 2515–2527. old. DOI: 10.1093/mnras/stu765. arXiv: 1404.5649 [astro-ph.SR].
- Pál, András. (2012. ápr.). „FITSH- a software package for image processing”. *MNRAS* 421.3, 1825–1837. old. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2011.19813.x. arXiv: 1111.1998 [astro-ph.IM].
- Prša, A. és T. Zwitter (2005. júl.). „A Computational Guide to Physics of Eclipsing Binaries. I. Demonstrations and Perspectives”. *ApJ* 628.1, 426–438. old. DOI: 10.1086/430591. arXiv: astro-ph/0503361 [astro-ph].
- Reegen, P. (2007. jún.). „SigSpec. I. Frequency- and phase-resolved significance in Fourier space”. *A&A* 467.3, 1353–1371. old. DOI: 10.1051/0004-6361:20066597. arXiv: physics/0703160 [physics.data-an].
- Wilson, Robert E. és Edward J. Deviney (1971. jún.). „Realization of Accurate Close-Binary Light Curves: Application to MR Cygni”. *ApJ* 166, 605. old. DOI: 10.1086/150986.

Társszerzői nyilatkozat

Alulírott nyilatkozom arról, hogy Bókon András „Nemradiális pulzációk vizsgálata fedési kettős rendszerekben” című doktori értekezésének 1., 2. és 3. tézispontjában 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.

- Bókon, A. and Bíró, I. B., „*A stochastic sampling method for the analysis of eclipsed pulsations*”, *Bulgarian Astronomical Journal*, vol. 33, p. 47, 2020. (T1)
- Bókon, A., Kálmán, S., Bíró, I. B., and Szabó, M. G., *Stellar pulsations interfering with the transit light curve: configurations with false positive misalignment*, *A&A*, vol. 674, 2023. doi:10.1051/0004-6361/202346078. (T2)
- Bókon, A., Bíró, I. B., and Derekas, A., “*Eclipse mapping study of the eclipsing binary KIC 3858884 with hybrid δ Sct/ γ Dor component*”, *A&A*, 2024., bíráló alatt; arXiv:2408.14464 (T3)

Baja, 2024. augusztus 27.

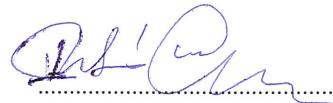

.....
Dr. Bíró Imre Barna

Társszerzői nyilatkozat

Alulírott nyilatkozom arról, hogy Bókon András „Nemradiális pulzációk vizsgálata fedési kettős rendszerekben” című doktori értekezésének 2. tézispontjában 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.

- Bókon, A., Kálmán, S., Bíró, I. B., and Szabó, M. G., *Stellar pulsations interfering with the transit light curve: configurations with false positive misalignment*, A&A., vol. 674, 2023. doi:10.1051/0004-6361/202346078. (T2)

Szombathely, 2024. augusztus 27.



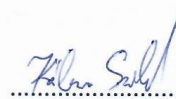
Dr. Szabó M. Gyula

Társszerzői nyilatkozat

Alulírott nyilatkozom arról, hogy Bókon András „Nemradiális pulzációk vizsgálata fedési kettős rendszerekben” című doktori értekezésének 2. tézispontjában 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.

- Bókon, A., Kálmán, S., Bíró, I. B., and Szabó, M. G., *Stellar pulsations interfering with the transit light curve: configurations with false positive misalignment*, *A&A*, vol. 674, 2023. doi:10.1051/0004-6361/202346078. (T2)

Szombathely, 2024. augusztus 5.


.....
Kálmán Szilárd

Társszerzői nyilatkozat

Alulírott nyilatkozom arról, hogy Bókon András „Nemradiális pulzációk vizsgálata fedési kettős rendszerekben” című doktori értekezésének 3. tézispontjában 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.

- Bókon, A., Bíró, I. B., and DEREKAS, A., “Eclipse mapping study of the eclipsing binary KIC 3858884 with hybrid δ Sct/ γ Dor component”, A&A,, 2024., bírálóat alatt; arXiv:2408.14464 (T3)

Szombathely, 2024. augusztus 27.


.....
Dr. DEREKAS Aliz