

SÓDOR ÁDÁM

RR Lyrae csillagok Blazhko-modulációja

doktori értekezés

tézisei

Témavezető: DR. JURCSIK JOHANNA

az MTA doktora, tudományos tanácsadó

MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete

Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar

Fizika Doktori Iskola

Iskolavezető: DR. HORVÁTH ZALÁN

Részecskefizika és csillagászat doktori program

Programvezető: DR. CSIKOR FERENC

Budapest, 2009

1. A munka előzményei

Az RR Lyrae csillagok az asztrofizika sok területén játszanak igen fontos szerepet. Jellegzetes fénygörbéjük és közepesen nagy valódi fényességük miatt fontos távolságindikátorok Galaxisunk és a Lokális Halmaz távolságskáláján, így a csillagászati távolságmérés lényeges lépcsőfokát képezik. Idős koruknál fogva a csillagkeletkezés tanúi Galaxisunk korai életszakaszából. Fém tartalmuk könnyen megállapítható a fénygörbe alakját leíró Fourier-paramétereken alapuló empirikus formulákkal, így egyes csillagpopulációk kémiai összetételének, kémiai fejlődésének nyomjelzői. A pulzációs és csillagfejlődési elméletek fontos tesztobjektumai.

Az általános vélekedés szerint az RR Lyrae csillagok asztrofizikáját jól ismerjük. A csillagok belsőjében végbemenő fizikai folyamatokra, a csillagok fejlődésére vonatkozó elméleteink alapján készített modellekkel kiszámíthatjuk e csillagok szerkezeti felépítését. Az így meghatározott csillagszerkezetet pulzációs modellekbe téve a modellek által adott fénygörbealakok megfelelnek a ténylegesen megfigyeltnek. Több mint 100 éve ismert azonban, hogy egyes RR Lyrae csillagok fénygörbéje nem stabil, alakja néhány tíz napos periódus szerint változik. Ezt a jelenséget ma egyik felfedezője nyomán Blazhko-effektusnak nevezzük. Az effektus fizikai okát nem ismerjük. Korábbi statisztikák szerint RRab csillagok körében 25–30 %, RRc csillagok között még kisebb, 1–5 % a Blazhko-moduláltak aránya. Ez bár kisebbség, ám nem elhanyagolható.

Míg a Blazhko-effektus fizikai eredete ismeretlen, nem tudhatjuk, hogy figyelmen kívül hagyása az RR Lyrae csillagok fizikáján alapuló asztrofizikai eredményeket mennyiben befolyásolja.

2. Célkitűzések

2004 januárjában a frissen felújított és automatizált sváb-hegyi 60 cm-es Heyde–Zeiss távcsővel elindítottuk a Konkoly Blazhko Survey programunkat azzal a céllal, hogy a Blazhko-effektus fizikájának megértését előmozdítsuk. Ekkor még az alapvető fotometriai megfigyelések is igen hézagosak voltak; a programunk elindításakor még egyetlen Blazhko-csillagról sem állt rendelkezésre olyan fotometriai idősor, ami kellően kiterjedt lett volna ahhoz, hogy mind a Blazhko-ciklust, mind a pulzációs ciklust jól lefedje. Nem voltak tehát igazán jó adatsorok, amik a Blazhko-effektus megjelenési formáit megmutatták volna, amiket a Blazhko-modelleknek le kellene írniuk.

Célunk a Blazhko-effektus fénygörbére gyakorolt hatásának a vizsgálata, az effektus megjelenési formáinak feltárása. A többszín-fotometriai fénygörbék tanulmányozása révén végső soron a Blazhko-ciklus során a csillagban végbemenő fizikai változásokról szeretnénk információt nyerni. A felmérési programunk célja továbbá a Blazhko-moduláció előfordulási gyakoriságának vizsgálata az RR Lyrae csillagok körében, egy kellően nagy és homogén mintán keresztül.

3. Vizsgálati módszerek

A fotometriai CCD megfigyelések feldolgozásának első lépése a felvételek redukciója, mely során technikai felvételek segítségével képfeldolgozási módszerekkel a megfigyelt objektumról készült képeket kalibráljuk. A kalibrációt követően már elvégezhető a felvételeken a bennünket érdeklő csillagok fényességének meghatározása, a fotometria. Ekkor rendelkezésünkre áll a fotometriai idősor, a fénygörbe.

Az archív fotografikus illetve fotoelektromos mérések feldolgozásához az e technikák által igényelt speciális redukciós és fotometriai technikákat alkalmaztuk.

A fénygörbének egy matematikai leírását keressük harmonikus függvények összegeként. Az idősorokban meglévő periodicitások Fourier-analízissel azonosíthatók. A Fourier-spektrum a mintavételezés periodikusságai miatt hamis csúcsokkal terhelt, ezért sorozatos közelítéssel haladunk egyre több frekvencia azonosítása felé. A spektrum legerősebb csúcsai között valódi jeleket azonosítva illesztjük a fénygörbét az addig azonosított komponensekkel, majd az illesztett függvényt levonva a reziduálban folytatjuk a periodicitások keresését. E lépéseket addig ismételjük, míg nem marad szignifikáns csúcs a reziduál spektrumban. Az RR Lyrae csillagok fényességváltozását néhány lineárisan független frekvencia és ezek számos felharmonikusa és lineárkombinációja írja le.¹ Ezek azonosításával eljutunk a fénygörbe matematikai leírásához.

Az RR Lyrae fénygörbék vizsgálatának egy másik fontos eszköze az $O - C$ analízis. Ez a módszer a fénygörbe maximumának vagy egy bizonyos, jól definiált pontjának bekövetkezési idejét vizsgálja, azt valamilyen szabályosság szerint – általában állandó periódust feltételezve, ritkábban egyenletes periódusváltozást is figyelembe véve – előre számított időponttal hasonlítja össze. Az O a megfigyelt időpontra utal (observed), a C pedig a számított időpontot jelöli (calculated). Az $O - C$ diagram segítségével vizsgálhatók a pulzációs periódus változásai, illetve a fázismoduláció. A fény-idő effektus révén kísérő jelenlétének kimutatására is alkalmas a módszer, ám eddig egyetlen RR Lyrae csillagról sem bizonyosodott be egyértelműen, hogy többes rendszer tagja volna.

A kutatómunkám során felmerülő egyedi adatfeldolgozási igények gyakran egyedi megoldásokat kívánnak. Mivel sokszor nem érhető el megfelelő célszoftver, időről-időre szükségessé válik saját szkriptek, szoftverek kifejlesztése.

¹Egymódusú, RRab vagy RRc csillagoknál egyetlen lineárisan független frekvencia, a pulzáció frekvenciája és ennek felharmonikusai, kétmódusú, RRd csillagoknál az alapl módus és az első felhang két lineárisan független frekvenciája és ezek felharmonikusai és lineárkombinációi figyelhetők meg. Blazhko-csillagoknál pedig a pulzáció frekvenciája mellett a moduláció(k) frekvenciája (frekvenciái) képezik a lineárisan független tagokat és ezek számos lineárkombinációja jelenik meg a fénygörbében.

4. Új tudományos eredmények

4.1. RR Lyrae csillagok vizsgálata

- I. 2004 januárja, a Konkoly Blazhko Survey (KBS) elindítása óta veszek részt folyamatosan a sváb-hegyi 60 cm-es távcsővel folyó mérésekben, a mérések feldolgozásában és analízisében. A KBS során eddig mintegy 200 derült éjszakán kb. 1000 órányi mérési munkát végeztem, mely idő legnagyobb részében RR Lyrae csillagokat figyeltem meg. Számos, a mérések feldolgozását és a fénygörbék elemzését megkönnyítő, automatizáló programot és szkriptet írtam.

A felmérési program során eddig 30 rövid periódusú ($P < 0.5$ nap) RRab csillagot vizsgáltunk. Ebből a mintából 14 egyértelműen moduláló bizonyult, míg 16 nem mutatott szignifikáns fénygörbealak-változást. A KBS szolgáltatja az első, mind a modulációs fázis, mind a pulzációs fázis szerint teljesen lefedett többszín-fotometriai Blazhko-fénygörbéket.

A KBS 30 elemű RRab mintájában mért majdnem 50%-os modulációs gyakoriság sokkal nagyobb, mint a korábban, más vizsgálatok eredményeként kapott 25–30%. A korábbi vizsgálatok azonban nem voltak kellően pontosak ahhoz, hogy kb. 0.1 mag-nál gyengébb maximumfényesség-modulációt kimutassanak. A KBS RRab csillagai közti nagyobb moduláltsági arány minden bizonnyal a minta 7 gyengén modulált csillagának köszönhető. Feltehetően vannak olyan gyengén modulált RR Lyrae csillagok is, amiket a mi műszerük sem tud kimutatni, így az általunk talált kb. 50%-os modulációs arány is csak a tényleges arány egy alsó becslésének tekinthető. Az RR Gem-ről kimutattam, hogy a moduláció erőssége több éves időskálán jelentősen változott, volt időszak, mikor kimutathatatlanul gyenge volt a fénygörbe moduláltsága (lásd II. tézispont). Ebből a tapasztalatból pedig arra következtethetünk, hogy lehetnek Blazhko-csillagok, amelyek a megfigyelés idején épp a detektálási határnál gyengébben moduláltak, de egy korábbi vagy későbbi időpontban esetleg erősebb fénygörbealak-modulációt mutatnának. A Blazhko-csillagok tényleges aránya emiatt még magasabb is lehet. [5]

4.2. Az RR Geminorum modulációjának hosszútávú vizsgálata

- II. 2004–05-ben részt vettem az alaplómódusban pulzáló RR Lyrae típusú RR Geminorum megfigyeléseiben és azok analízisében. Erről a csillagról korábban azt lehetett tudni, hogy az 1930-as években Intézetünkben történt fotografikus megfigyelések szerint kb. 40 napos modulációt mutatott a csillag, ám a moduláció az 50-es évekre, a fotoelektromos mérések idejére eltűnt (Detre László 1970, Transactions of the IAU XIV A. Reports on Astronomy, 259). Azóta a csillagot stabil fénygörbéjű RRab-ként tartották számon.

Méréseink révén részletes és pontos többszín-fotometriai CCD fénygörbéket nyertünk. Ezeknek az adatoknak az analízise feltárta, hogy az RR Gem fénygörbéje gyenge ám határozott modulá-

ciót mutatott ebben az időben. A moduláció a V fénygörbe maximumfényességében < 0.1 mag változást okoz 7.2 napos periódusa során. 2004-ben még nem ismertünk egyetlen hasonlóan gyengén és ilyen rövid periódussal modulált RRab csillagot sem.

A Konkoly Obszervatórium kutatói az RR Gem-ről 1935-óta többé-kevésbé folyamatosan gyűjtöttek fotometriai megfigyelési anyagot. Ezeket a még publikálatlan adatokat analizálva megvizsgáltam az RR Gem modulációjának és pulzációjának hosszútávú változásait. Az archív, 1935–53 között készült fotografikus megfigyeléseket újra redukáltam a fotólemezeket digitalizálva és fotometrálva. Az 1954–83 közötti időszak archív fotoelektromos méréseit Szeidl Béla bocsátotta rendelkezésemre kiredukálva. Az egyes időszakokat lefedő adatsorok analízise megmutatta, hogy az RR Gem modulációjának mind az erőssége, mind a jellege jelentős változásokat szenvedett a vizsgált 80 év során. A fotografikus mérések első időszakában a moduláció a mainál jóval erősebb volt, mintegy 0.2 mag maximumfényesség-változással, miközben jelentős fázismoduláció is történt. Ez a későbbiekben gyengült, mialatt az amplitúdómoduláció erőssége is változásokat szenvedett. A fotoelektromos mérések elején a moduláció kimutathatatlanul gyenge volt, talán meg is szűnt. Ez az első bizonyíték arra, hogy a moduláció időszakos jelenség is lehet. Kicsiny változásokat sikerült kimutatni a moduláció periódusában is. A modulációs és pulzáció periódusa korreláltan változott. [3, 4, 8]

- III. Az RR Gem fotografikus mérési időszakának közepén jelentős pulzációsperiódus-változás ment végbe igen rövid idő alatt. Ekkor a moduláció tulajdonságainak ugrásszerű változásai mellett a pulzáció közepes amplitúdója is megváltozott, mégpedig olymértékben, ami még a viszonylag gyengébb fotografikus mérési pontosság mellett is egyértelműen megállapítható. Ez az első alkalom, hogy egy RR Lyrae csillag fénygörbéjének pulzációs amplitúdójában változást sikerült kimutatni. Az $O - C$ diagram tanúsága szerint ez a változás igen rövid időskálán ment végbe. Magát a változást nem sikerült megfigyelni, de a megfigyelésekből számított $O - C$ adatoknak a kérdéses időszak körüli futása felső határt szab annak időtartamára. Így arra következtethetünk, hogy az egész változás legfeljebb 100–200 nap alatt lezajlott. A periódusváltozás relatív mértéke $1.6 \cdot 10^{-4}$, ami bár nem egyedülálló, de különösen nagy változásnak számít, főleg ilyen rövid idő alatt. A hirtelen periódusváltozás a csillag belsejében végbemenő szerkezeti átrendeződésre utal, ami a moduláció és a pulzáció erősségére is hatással volt. Érdeemes megjegyezni, hogy a közelmúltban a KBS keretében vizsgált egyik Blazhko-csillag, az RY Comae közepes pulzációs amplitúdója szintén ugrásszerűen változott, mégpedig jól dokumentált módon, a CCD megfigyeléseink közben, kevesebb mint egy hét leforgása alatt. [3, 4]

4.3. Fénygörbe-moduláció további Blazhko-csillagoknál

- IV. A KBS előkészítéseként felülvizsgáltam a korábban ismert Blazhko-csillagok modulációját. E csillagokat elsőként Szeidl Béla (1988, Multimode Stellar Pulsation, szerk. Kovács G., Szaba-

dos L. és Szeidl B., Kultúra, Budapest, p. 45) gyűjtötte össze, majd a listát Horace Smith (1995, RR Lyrae Stars, Cambridge University Press) frissítette. Ez utóbbi listán összesen 43 RRab és 3 RRc csillag szerepel. Egyrészt megvizsgáltam az eredeti adatokat – amennyiben publikáltak azokat – a ma már rendelkezésünkre álló Fourier-analízis segítségével, másrészt az NSVS és ASAS égboltfelmérési programok fotometriai idősor adatbázisaiban e csillagokról található fénygörbéket is vizsgáltam, hogy mutatnak-e modulációt a publikált periódussal. Az elemzés eredményeként 10 csillag esetében úgy találtam, hogy a korábban publikált moduláció periódusa, illetve esetenként a moduláció ténye is kétségbe vonható. A tíz csillagból kettőt (MW Lyr és DM Cyg) utóbb a KBS során megfigyeltünk, és eredményeink bebizonyították, hogy e kétségek helyénvalóak voltak. Bár mindkét csillagot modulálnak találtuk végül, ám mindkettőt a korábban publikálttól eltérő periódussal illetve amplitúdóval. A DM Cyg modulációja olyan gyenge, hogy azt vizuális megfigyelésekkel szinte bizonyosan nem lehetett volna kimutatni. [1, 11, 15]

- V. A sváb-hegyi 60 cm-es távcsővel az SS Cancr-ról végzett többszín-fotometriai méréseink a csillag Blazhko-modulációját mutatták. Az SS Cnc az RR Gem-hez hasonlóan gyengén modulált, ráadásul nála is rövidebb, 5.3 napos periódussal. A két csillag modulációja között a sok hasonlóság mellett különbségek is vannak. Míg az RR Gem-nek szinte csak a minimum- és maximumfényessége változik a moduláció során, az SS Cnc-nél ezek mellett a maximumfényességnek és a felszálló ágának a fázisa is modulált. A moduláció jóval szélesebb pulzációs fázistartományt érint. A Fourier-spektrumban is kimutatható a moduláció RR Gem-étől eltérő jellege; a modulációs csúcsok amplitúdói a tripleteken belül erősen aszimmetrikusak, a legtöbb pulzációs harmonikus mellett a kisebb frekvenciás komponensek ($kf_0 - f_m$) amplitúdója jóval nagyobb a nagyobb frekvenciájú oldalánál ($kf_0 + f_m$). [9]
- VI. Az UZ Ursae Maiorisról nyert CCD megfigyeléseinket vizsgálva kimutattam, hogy ennek az RRab csillagnak a modulációja nem írható le egyetlen modulációs frekvencia figyelembe vételével a mérési bizonytalanságnak megfelelő pontossággal. Az UZ UMa minden jel szerint egynél több periódussal modulált. A második kimutatott periódus az idősor hosszához közel van, így nem állapítható meg, hogy ez a frekvencia valóban periodikus változást ír-e le. [2]
- VII. 2006–07-ben két szezonon keresztül végeztünk többszín-fotometriai megfigyeléseket kollégáimmal az MW Lyrae-ről a KBS keretében a sváb-hegyi 60 cm-es távcsővel. Ezek a fénygörbék nagyon markáns modulációs változást mutatnak 16.5 nap periódussal. Az MW Lyr fénygörbéjének pulzációs amplitúdója egy Blazhko-ciklus alatt a kétszeresére növekszik, majd az eredeti amplitúdóra csökken vissza, miközben a minimum, a felszálló ág és a maximum fázisa is erős modulációt szenved. Az MW Lyr Fourier-spektrumában a pulzációs harmonikusok frekvenciái mellett nem csak $\pm f_m$ -nek megfelelő szeparációval jelennek meg modulációs csúcsok (triplett), de $\pm 2f_m$ -nél (kvintuplett) és $\pm 4f_m$ -nél (szeptuplett) is. A reziduál spektrum még ezek eltávolítása után is tartalmaz csúcsokat, többek közt néhány modulációs csúcsot $\pm 12.5f_m$ sze-

parációval. A reziduál szórása még további mintegy 30 frekvencia eltávolítása után is nagyobb, mint a mérési bizonytalanságunk, ami arra utal, hogy az MW Lyr fényváltozásának egy része nem periodikus, hanem sztochasztikus/kaotikus lehet. [11]

4.4. Inverz Fotometriai Baade–Wesselink-analízis

VIII. Az RR Lyrae csillagok többszín-fotometriai fénygörbéiből képzett átlagszínek nem egyértelmű voltak miatt nem alkalmasak a fizikai paraméterek meghatározására. Ezért kifejlesztettem egy új, inverz fotometriai Baade–Wesselink (BW) módszert (IP módszer), ami alkalmas arra, hogy RRab csillagok többszín-fotometriai fénygörbéiből egyes fizikai paraméterek (effektív felszíni hőmérséklet – T_{eff} , luminozitás – L , sugár – R) időbeli változásait meghatározzuk. A módszer előnye a korábbi BW módszerekhez képest, hogy alkalmazásához a fotometria mellett nincs szükség radiálissebesség-görbére, ami csak spektroszkópiailag mérhető.

Az IP módszer lényege, hogy egy legkisebb négyzetes illesztési eljárás során szimultán módon meghatározza a felszín effektív hőmérsékletének és a csillag sugarának pulzációs ciklus során történő változásait ($T_{eff}(\varphi)$ és $R(\varphi)$, ahol φ a pulzáció fázisa), valamint illeszti a csillag távolságát és a pulzációs ciklusra számított átlagos sugarát. Az illesztés eredményeként azokat a $T_{eff}(\varphi)$ és $R(\varphi)$ görbéket kapjuk, amely görbék szerinti, sztatikus légkörmodell-táblázatokból vett szintetikus fényesség- és színgörbék legjobban leírják a ténylegesen megfigyelt fotometriai méréseket minden felhasznált hullámsávban.

Kilenc tesztobjektum példáján keresztül megmutattam, hogy ez a módszer a korábbi spektroszkópiai BW analízisekhez hasonlóan jó eredményeket szolgáltat RRab csillagokról, amennyiben jó minőségű VI_C vagy BVI_C fénygörbékkel használjuk. Megmutattam azt is, hogy kellően nagy pontosságú fénygörbék használata esetén a szín-nullpontok ismerete nélkül is kielégítően jó eredményt kapunk, amennyiben ezek értékeit is illesztendő változóknak tekintjük. [7]

IX. Az IP módszer kifejlesztése során kimutattam, hogy az RRab csillagok pulzációssebesség-görbéje az I_C fénygörbe alakjával szorosán korrelál. A két görbe közötti összefüggést egy egyszerű hetedrendű polinom alakjában megadtam. Korábban Tianxing Liu (1991, *PASP*, 103, 205) publikált minta pulzációssebesség-görbét RRab csillagokhoz, aminél az én összefüggésem a legtöbb pulzációs fázisban valamivel jobb, a felszálló ágon pedig lényegesen jobb eredményt ad. További előnye ennek a formulának, hogy Blazhko-moduláció esetén az I_C fénygörbe alakjának modulációjával összhangban a levezetett pulzációssebesség-görbe alakja is változik a Blazhko-fázissal, ami minden bizonnyal jobban közelíti a valós helyzetet mint a Liu-féle görbe rögzített alakja. [7]

X. Az IP módszer kifejlesztésekor mindvégig különös hangsúlyt fektettem annak Blazhko-csillagokra való alkalmazhatóságára. Modulált RR Lyrae csillagról ugyanis mindeddig nem

készült a pulzáció és moduláció fázisát is kellően jól lefedő szimultán radiálissebesség-mérés és többszín-fotometria, így a modulációnak a globális fizikai paraméterekre gyakorolt hatása korábban nem volt vizsgálható. Az IP módszer sikeresen alkalmazatónak bizonyult az erős Blazhko-effektust mutató MW Lyrae modulációjának vizsgálatára. A vizsgálat kimutatta, hogy az MW Lyrae nagy amplitúdójú Blazhko-fázisban mintegy 50 K-el hűvösebb, közepes sugara $0.04 R_{\odot}$ -al, átlagos luminozitása pedig $1 L_{\odot}$ -al nagyobb, mint kis amplitúdójú Blazhko-fázisban. Ez az első alkalom, hogy a fizikai paraméterek modulációs változásait sikerült kimutatni. [14]

- XI. Az erősen modulált és méréseinkből ismert szín-nullpontokkal rendelkező MW Lyr után az általunk a sváb-hegyi 60 cm-es távcsővel a KBS során mért leggyengébb modulációt mutató DM Cygni-n is kipróbáltam az IP módszer használhatóságát. Itt a gyenge moduláció mellett ráadásul a szín-nullpontokat sem ismertük előre. Mindezek ellenére az IP módszer ilyen körülmények között is használhatónak bizonyult. Az IP módszerrel kapott megoldások szerint a DM Cyg a fénygörbe gyenge modulációjával összhangban az MW Lyr-nél gyengébb fizikaiparaméter-változásokat mutat a Blazhko-ciklus során. A két csillagnál az átlagos globális fizikai paraméterek a Blazhko-ciklus során hasonló fázis szerint változnak, e változások amplitúdóinak aránya pedig összhangban van a fénygörbe-modulációjuk erősségének arányával. [15]
- XII. A KBS keretében 16 modulációt nem mutató RRab csillagot is megfigyeltünk, ezek többszín-fotometriai fénygörbéit publikáltuk. A mérések 2–4 sávban készültek (V_{IC} , BV_{IC} vagy BVR_{IC} szűrőkkel), nagy fotometriai pontossággal és jó fázislefedettséggel. Meghatároztuk mind a 16 objektum fotometriai fémtartalmát a fénygörbék Fourier-paraméterei alapján. A közeljövőben tervezem ezeknek a csillagoknak az analízisét az IP módszer segítségével. [6, 10, 12, 13, 16]

5. Következtetések

A Konkoly Blazhko Survey eddig 30 csillagról szolgáltatott részletes és pontos többszín-fotometriai fénygörbét. E 30 RRab csillag közül 14-nél mutattunk ki modulációt. A tudományos célokat teljesítettük, azonban sok további tennivalónk van még.

A fénygörbe-moduláció többféle megjelenési formáját tártuk fel; kimutattuk a moduláció időbeli változásait, találtunk multiperiodikus modulációt mutató Blazhko-csillagokat, és különféle multiplet struktúrákat azonosítottunk a Fourier-spektrumban. Kimutattuk, hogy a moduláció a korábban feltételezettnél jóval gyakoribb.

Míg azonban a Blazhko-effektus háttérében meghúzódó fizikai folyamatok mibenlétére fény nem derül, addig további munkára van még szükség a Blazhko-csillagok vizsgálata terén.

A tézisek alapjául szolgáló közlemények

Egy illetve első szerzős cikkek

1. **Sódor, Á.**, Jurcsik, J. 2005, IBVS, 5641: „Revision of the List of Galactic Field RRab Stars with Known Blazhko Periods”
2. **Sódor, Á.**, Vida, K., Jurcsik, J., Váradi, M., Szeidl, B., Hurta, Zs., Dékány, I., Posztobányi, K., Vityi, N., Szing, A., Kuti, A., Lakatos, J., Nagy, I., Dobos, V. 2006, IBVS, 5705
„UZ UMa: An RRab star with double-periodic modulation”
3. **Sódor, Á.** 2006, PADEU, 17, 115: „The long term behaviour of RR Gem”
4. **Sódor, Á.**, Szeidl, B., Jurcsik, J. 2007, A&A, 469, 1033: „The Blazhko behaviour of RR Gemini-
norum II, Long-term photometric results”
5. **Sódor, Á.** 2007, AN, 328, 829: „Studying Blazhko RR Lyrae stars with the 24-inch telescope
of the Konkoly Observatory”
6. **Sódor, Á.**, Jurcsik, J., Nagy, I., Váradi, M., Dékány, I., Vida, K., Hurta, Zs., Posztobányi, K.,
Vityi, N., Szing, A., Dobos, V., Kuti, A. 2007, IBVS, 5793: „Multicolour CCD Photometry of
Three RRab Stars”
7. **Sódor, Á.**, Jurcsik, J., Szeidl, B. 2008, MNRAS, közlésre elfogadva: „A new method for de-
termining physical parameters of fundamental mode RR Lyrae stars from multicolour light
curves”

További cikkek

8. Jurcsik, J., **Sódor, Á.**, Váradi, M., Szeidl, B., Washüttl, A., M. Weber, I. Dékány, Zs. Hurta,
B. Lakatos, K. Posztobányi, A. Szing, and K. Vida 2005, A&A, 430, 1049: „The Blazhko
behaviour of RR Geminorum I, CCD photometric results in 2004”
9. Jurcsik, J., Szeidl, B., **Sódor, Á.**, Dékány, I., Hurta, Zs., Posztobányi, K., Vida, K., Váradi, M.,
Szing, A. 2006, AJ, 132, 61: „The shortest modulation period Blazhko RR Lyrae star: SS Cnc”
10. Jurcsik, J., **Sódor, Á.**, Váradi, M., Vida, K., Posztobányi, K., Szing, A., Hurta, Zs., Dékány, I.,
Washüttl, A., Vityi, N. 2006, IBVS, 5709: „ $BVR_C I_C$ photometry of three RRab stars”
11. Jurcsik, J., **Sódor, Á.**, Hurta, Zs., Váradi, M., Szeidl, B., Smith, H. A., Henden, A., Dékány, I.,
Nagy, I., Posztobányi, K., Szing, A., Vida, K., Vityi, N. 2008, MNRAS, 391, 164: „An extensive
photometric study of the Blazhko RR Lyrae star MW Lyr: I. Light curve solution”

12. Jurcsik, J., **Sódor, Á.**, Hurta, Zs., Kővári, Zs., Vida, K., Hajdu, G., Nagy, I., Dékány, I., Posztobányi, K., Koponyás, B., Váradi, M., Vityi, N. 2008, IBVS, 5844: „Multicolour CCD Photometry of Three RRab Stars”
13. Jurcsik, J., **Sódor, Á.**, Hurta, Zs., Kővári, Zs., Posztobányi, K., Vida, K., Hajdu, G., Nagy, I., Koponyás, B. 2008, IBVS, 5846: „Multicolour CCD Photometry of Four RRab Stars”
14. Jurcsik, J., **Sódor, Á.**, Szeidl, B., Kolláth, Z., Smith, H. A., Hurta, Zs., Váradi, M., Henden, A., Dékány, I., Nagy, I., Posztobányi, K., Szing, A., Vida, K., Vityi, N. 2008, MNRAS, közlésre elfogadva: „An extensive photometric study of the Blazhko RR Lyrae star MW Lyr: II. Changes in the physical parameters”
15. Jurcsik, J., Hurta, Zs., **Sódor, Á.**, Szeidl, B., Nagy, I., Posztobányi, K., Vida, K., Dékány, I., Váradi, M., Hajdu, G., Kővári, Zs., Kun, E. 2009, MNRAS, beküldve: „An extensive photometric study of the Blazhko RR Lyrae star, DM Cyg”
16. Kun, E., **Sódor, Á.**, Jurcsik, J., Hurta, Zs., Nagy, I., Kővári, Zs., Posztobányi, K., Kovács, G., Vida, K., Belucz, B. 2008, IBVS, 5859: „Multicolour CCD Photometry of Three RRab Stars”

