

Kiss L. László

Pulzáló vörös óriáscsillagok

Az MTA doktora cím megszerzéséért készített értekezés tézisei

Sydney, 2006

1. A kutatási téma előzményei és a kitűzött feladatok

Az asztrofizika egyik kulcsproblémája a csillagok szerkezete és fejlődése. Néhány az „örök” kérdések közül: Hogyan zajlik a csillagfejlődés? Milyen lesz Napunk jövője? Milyen fizikai folyamatok vezérlik a fejlődést? Értekezésemben a csillagfejlődés azon kései fázisait tanulmányozom, melyekben a vörös óriássá felfúvódott csillagok könnyen megfigyelhető rezgéseket végeznek, azaz pulzáló változócsillagokként észlelhetők. Annak ellenére, hogy az összes csillag kb. 90%-a átesik a vörösóriás-fázison, a csillagok életében mind a mai napig ez a legbizonytalanabban ismert szakasz. Kutatásaim során a pulzációt mint csillagszerkezeti nyomjelzőt használom az alábbi kérdésekkel kapcsolatban:

- Milyen fizikai tényezők és folyamatok játszanak elsődleges szerepet a vörös óriások pulzációjában?
- Milyen módon hat kölcsön a csillagfejlődés, a tömegvesztés és a pulzáció a kései fejlődési állapotokban?
- Hogyan térképezhetjük a lokális Univerzum háromdimenziós szerkezetét pulzáló vörös óriásokkal?

A kis és közepes tömegű csillagok (kb. $0,5\text{--}5 M_{\odot}$ között) fejlődésük során kétszer válnak vörös óriáscsillaggá. Részletes evolúciós modellszámítások alapján tudjuk, hogy amikor a fősorozati csillagok magjában kezd elfogyni a hidrogén, az energiatermelés kikerül a héliumból álló magot övező hidrogénhéjba. Ezen héjégetés során a felszabaduló sugárzási teljesítmény több nagyságrenddel megnő, aminek eredményeképpen a csillag az *(első) vörös óriáságra (Red Giant Branch, RGB)* kerül, ahol az egyre alacsonyabb hőmérsékletek és egyre nagyobb luminozitások felé fejlődik. Egy adott határluminozitást elérve, a megnövekedett tömegű héliummagban beindulnak a termionukleáris reakciók, amit – paradox módon – a luminozitás csökkenése követ. Ezután a csillag újra elkezd felfúvódni, fejlődése pedig átkerül az *aszimptotikus óriáságra (Asymptotic Giant Branch, AGB)*, ahol a nagy amplitúdójú pulzációk mellett erős tömegvesztési folyamatok is beindulnak. Az ilyen csillagokból kerülnek ki a markáns fényváltozású mirák, illetve a kevésbé szélsőséges változású félszabályos változócsillagok. Ezekben a csillagokban az energiatermelés a szénből és oxigénből álló magot övező hidrogén- és héliumhéjakban történik, melyek időbeli instabilitásairól éppen a csillagpulzáció adhat hírt. Az AGB teteje felé haladva a csillagok tömegük jelentős részét ledobják, középen feltárul a rendkívül forró, energiát már nem termelő egykori csillagmag, melynek ultrabolya fotonjai fénylésre gerjesztik a ledobott gázfelhőt – megszületett egy planetáris köd. Néhány tízezer év alatt a köd teljesen eloszlik, az egykori fényes vörös óriáscsillag helyén pedig egy lassan hűlő fehér törpe, kísérő csillag hiányában a Világegyetem egyik legstabilabb képződménye marad.

A fenti vázlatos kép egyik legfontosabb, ugyanakkor talán legbizonytalanabban ismert komponense a tömegvesztés, ami sok nagyságrendet változik a különböző fejlődési állapotok között. A legintenzívebb tömegvesztéssel a vörös óriásokban találkozunk, melyek kiterjedt légköre a legkisebb perturbációk hatására is el tud szakadni a csillagtól. A pulzáció pontosan ilyen perturbáció, hiszen a csillag minden rezgési ciklusában lökéshullámok indulnak kifelé, melyek kellő mozgási energiához juttatják a csillag legkülső rétegeit az elszakadáshoz. Jelenleg azonban nem világos, hogy mi történik a tömegvesztéssel, ha a csillagpulzáció tulajdonságai megváltoznak, illetve

ha hasonló hőmérsékletű és luminozitású, de eltérő fejlődési állapotú (RGB és AGB) csillagokat hasonlítunk össze.

A csillagmagokból származó neutrínók mellett az *asztroszeizmológia* az egyetlen közvetlen információforrás a csillagok belső szerkezetéről. Gyakorlatilag minden csillag rezgéseket végez a sajátfrekvenciáin, és ezek a rezgések, mint a csillagok legbelső tartományain is áthaladó állóhullámok, hírvivő szerepet játszanak a csillagbelsőben uralkodó fizikai körülményekről. Az asztroszeizmológia pulzáló változócsillagok megfigyelt frekvenciáit rezgési módusokkal azonosítja, melyek modellszámításokon keresztül megadják a vizsgált rendszer legfontosabb paramétereit. Vörös óriáscsillagoknál megfigyelési szempontból nehezen áthidalható probléma a rezgések időskálája, mivel a mira és félszabályos változók jellemzően 100 és 1000 nap közötti periódusokkal pulzálnak. Emiatt empirikus vizsgálatokhoz legalább 5–10 év, de inkább több évtized hosszú megfigyelésekre van szükség, amit egy kutató sem tud magára vállalni. Ez az oka annak, hogy a doktori értekezésemben bemutatott eredmények egy része kis fotometriai pontosságú, ám évtizedes skálán homogén vizuális észleléseken alapul, melyek pontosságát és megbízhatóságát több vizsgálattal is igazoltam. A módusazonosítás mellett fontos kérdés a rezgési állapotok stacionáriussága, ami szintén csak évtizedes adatsorok alapján tanulmányozható.

A gravitációs mikrolencsék keresésére irányuló programok (pl. MACHO, OGLE, EROS) nagy fotometriai adatbázisai az elmúlt szűk egy évtizedben egy teljesen új diszciplína, a *statisztikus asztroszeizmológia* megszületéséhez vezettek. Ennek keretein belül több ezer, akár több tízezer, ugyanolyan típusú pulzáló csillag statisztikus jellemzőit vizsgáljuk korábban fel nem ismert összefüggések után kutatva. A Nagy Magellán-felhő pulzáló vörös óriáscsillagai több, egymással párhuzamos periódus–fényességrelációt rajzoltak ki a periódus – K infravörös magnitúdó síkon, amit az alpmódusú pulzáció mellett felhangok gerjesztésével lehetett megmagyarázni. Ez egyúttal igazolta a Tejútrendszerben észlelt félszabályos csillagok többmódusú pulzációját. Egyik legfontosabb eredményem, az RGB fázisban fellépő csillagrezgések felfedezése is a statisztikus asztroszeizmológia eszközeivel született, és jelen sorok írásakor (2005 vége) talán ez a legpezsgőbb terület a vörös óriások pulzációival kapcsolatban.

2. A kutatás módszerei

Kutatásaim során legtöbbit a fényesség időbeli változásait megadó fénygörbékkel foglalkoztam. Céлом minden esetben a bonyolult fényváltozások asztrofizikai okainak felderítése volt a legkülönbélebb numerikus módszerekkel. Vizsgálataimat általában az adatok összegyűjtésével és a feldolgozásra való előkészítéssel kezdtem, majd az adott tudományos probléma szempontjából homogénnek tekinthető adatok elemzése következett. Az alábbiakban e két munkafázis részleteit ismertetem. Legtöbb vizsgálati eljárást saját fejlesztésű számítógépes kódokkal valósítottam meg, amiket Pascal (ritkábban C, IDL és MATLAB) nyelven írtam. Az adatok feldolgozásához ezek mellett számtalan awk-, gnuplot- és bash-szkriptet írtam, melyekkel az ASCII-formátumú adatfájlokat kezeltem.

Adatgyűjtés. Az évtizedes időskálán lejátszódó jelenségeket kis pontosságú, ám homogén és üröktől mentes vizuális észlelések matematikai analízisével tanulmányoztam. Ehhez először ki kellett választani a kérdéses jelenségeket legjobban reprezentáló változócsillagokat, majd összegyűjteni a publikus és nem publikus adatbázisokból az összes elérhető fényességbecslést. Publikus adatforrásokat gondoz a Francia

Változócsillag-észlelők Társasága (AFOEV) és a Japán Változócsillag-észlelők Ligája (VSOLJ), melyek közel száz évre visszanyúló adatai internetes felületen keresztül szabadon letölthetők. Szintén publikus a Magyar Csillagászati Egyesület Változócsillag-észlelő Szakcsoportjának adatbázisa, amely átlagosan 30 évet lefedő fénygörbéket tartalmaz. Ezzel szemben személyes kapcsolatfelvétellel kérhetők el a Brit Csillagászati Társaság, Változócsillag Szakcsoport (BAAVSS) és az Amerikai Változócsillag-észlelő Társaság (AAVSO) megfigyelései. Utóbbi szervezet archívuma tartalmazza a legtöbb vizuális észlelést (jelenleg már 12 millió felett járnak), így a tőlük kapott adatok legtöbb esetben nagyon jól használhatók.

Néhány fényes galaktikus félszabályos változóra szerzőtársaimtól (B. Skiff, T. Lebzelter) 5–10 évnyi pontos fotoelektromos fotometriai méréseket is kaptam, melyekkel periódusmeghatározás mellett a vizuális fénygörbék megbízhatóságát is teszteltem. CCD fotometriai méréseket az AFOEV adatbázisából, illetve a cseh MEDUZA csoporttól kaptam (P. Sobotka közvetítésével). Ezeket szintén a vizuális adatok ellenőrzésére használtam. Radiálissebesség-méréseket 9 félszabályos változóra kaptam, melyeket T. Lebzelter és K.H. Hinkle végzett.

Egy esetben az amerikai WIRE infravörös műhold csillagkövető kamerájának méréseit analizáltam, melyek rendkívül pontos CCD fotometriai mérések voltak egy vörös óriásági csillagról.

Saját magam is végeztem méréseket. Így például optikai spektrumokat vettem fel a Siding Spring-i Obszervatórium 2,3 m-es távcsövével déli mira és félszabályos változókról, melyekből légkörük kémiai összetételére következtettünk.

A Kis és a Nagy Magellán-felhő közel 30 ezer vörös óriás változócsillagát az Optical Gravitational Microlensing Experiment (OGLE) mikrolencse-program mérései alapján tanulmányoztam. Ehhez 68 ezer I-szűrős fénygörbét töltöttem le az OGLE internetes adatbázisából. A fénygörbék mellett fontosak voltak a közeli infravörös JHK-magnitúdók is, amiket a 2MASS publikus adatbázisából szereztem meg.

Feldolgozás. Az amatőr csillagászok által végzett vizuális fényességbecslések a tipikus megfigyelési hibák ($\pm 0,3$ – $0,5$ mag) miatt leginkább az 1 magnitúdót elérő amplitúdójú változócsillagok esetében használhatók. A görbék jel/zaj viszonyához az adatokat átlagolni kell. Bizonyos esetben további javulást értem el a görbék zajsűrésével, amit gaussos súlyfüggvényt használó mozgóátlagos simítással hajtottam végre.

A periódusokat legtöbbször Fourier-analízissel határoztam meg, egyedi csillagok vizsgálatában a Period98/Period04 szoftverrel, a Magellán-felhők több tízezernyi csillagára viszont én írtam négyfrekvenciás Fourier-felbontást automatikusan megvalósító célprogramot. Néhány esetben a fázisdiszperziós minimalizálás módszerével is becsültem periódusokat. A periodicitások stabilitását az O–C diagrammal, az Eddington–Plakidis-teszttel és idő-frekvenciás módszerekkel (pl. wavelet-analízis, Gábor-transzformált) tanulmányoztam.

A hosszú másodperiódusok rotációs modellezésére numerikus modellt generáltunk (Szabó Gy. munkája). A káoszvizsgálatokhoz elsődlegesen az időképleteléses beágyazást használtam, illetve a nemlineáris idősor-analízis egyéb eszközeit. Utóbbiakhoz a TISEAN programcsomagot használtam.

Numerikus integráló programokat írtam differenciálegyenletek Runge–Kutta-módszerrel történő megoldására, illetve kétdimenziós tömbök (képek) keresztkorrelációs függvényeinek kiszámítására. Fourier-spektrumok Lorentz-profillal történő illesztését egy speciális maximum likelihood-módszer MATLAB-ban írt implementációjával végeztem (B. Brewer munkája).

A Magellán-felhők vizsgálatában a periódus–fényesség–relációk analizálása volt a legeredményesebb módszer. A luminozitásokat a 2MASS-ból származó K-fényességekkel indikáltam. Sok új információt nyertem a luminozitásfüggvények és deriváltjaik összehasonlító vizsgálatából. Relatív távolságmodulus számításához figyelembe vettem a differenciális extinkciót az IJHK-sávokban. A két törpegalaxis térbeli szerkezetének vizsgálatához a periódus–fényesség–relációktól való egyedi eltéréseket használtuk fel.

Digitális képek (pl. spektrumok) kezelésére az IRAF csillagászati képfeldolgozó programcsomagot alkalmaztam.

3. Eredmények

A vizuális adatok felhasználása

1. Húsz félszabályos változócsillagra összehasonlítottam a vizuális fénygörbéket a Bécsi Egyetem arizonai automata távcsövével mért pontos fotoelektromos mérésekkel. A szimultán megfigyelések Fourier-analízisével kvantitatívan jellemeztem a vizuális adatok alkalmazhatóságát. Az átlagfényességben a színindextől függő szisztematikus különbséget találtam, aminek értéke jó összhangban van a korábbi irodalmi kalibrációkkal. Az R Hydrae mira változó fotoelektromos és vizuális adatainak összehasonlítása alapján az átlagfényességbeni különbség nem követi a csillag pulzációs színváltozásait, azaz jó közelítéssel állandónak tekinthető. A T Ursae Minoris és U Ursae Minoris mirák V-szűrős CCD mérései megerősítik a vizuális adatok használhatóságát a 0,1 magnitúdót meghaladó változások tanulmányozására. Eredményeim szerint az átlagfényesség, domináns periódusok és amplitúdók, illetve ezek időbeli változásai a korlátokat szem előtt tartva jól vizsgálhatók a több évtizedet átfogó fénygörbék alapján. A kis pontosságú, ugyanakkor időben folytonos vizuális adatsorok nagyon fontos megszorításokat adhatnak a nagyságrenddel pontosabb, de rövidebb és megszakításokkal terhelt fotoelektromos mérések periódusanalízisére. A pulzáció dinamikus változásai (pl. ismétlődő módusváltozások, periódusváltozás a héliumhég-fellobbanás következtében) a jelenségek időskálái miatt még évtizedekig csak vizuális adatok alapján lesznek tanulmányozhatók [11], [14], [15], [16].

2. Meghatároztuk a T Ursae Minoris mira típusú változócsillag perióduscsökkenési sebességét 90 évnyi vizuális adatsor alapján. Az egyedi ciklushosszak és az O–C diagram analízisével kapott eredmény $-3,8 \pm 0,4$ nap/év, ami a jelenleg ismert leggyorsabb periódusváltozási ráta az összes pulzáló változócsillag között ($\Delta P/P \approx 10^{-2}$). A megfigyelt változásokat a termális pulzusokat mutató AGB-csillagok héliumhég-fellobbanásával lehet magyarázni [16]. Hasonló mértékű, de ellentétes irányú periódusváltozást találtunk a BH Crucis déli mira esetében is, ahol azonban a spektrális analízis eredményei a termális pulzus ellen szólnak. Elképzelhető, hogy a pulzáció periódusa, amplitúdója és a légköri molekulaopacitások szoros csatolása okozza a BH Crucis periódusnövekedését [23].

Többszörös periodicitás, káosz, sztochasztikus gerjesztés

3. Rotációs effektust feltételezve modelleztük az RY Ursae Maioris fénygörbéjének amplitúdómodulációját. A csillag alakját közel 1:2 arányban elnyúlt ellipszoiddal közelítettük, melynek felszíne nemradiális rezgés miatt változik. Az amplitúdó modulációját a nemradiális rezgés látószögváltozásai okozzák, amit a csillag lassú rotációja

idéz elő. Az eltorzult alakot közösburok-fázisban levő kettőscsillagként értelmeztem. A moduláció periódusa (a csillag hosszú másodperiódusa) 4900 nap, ami mérési hibán belül pontosan 16-szorosa a pulzációs periódusnak. A modell helyessége esetén az RY Ursae Majoris forgási periódusa 9800 nap, az elméletileg várható nagyságrend közelében [7], [8].

4. Kilenc többszörösen periodikus félszabályos változócsillagra összehasonlítottam az egy időben mért fény- és radiálissebesség-görbéket. Az adatok szoros korrelációja radiális pulzációra utal, ugyanis az infravörös tartományban mért sebességgörbe pontosan tükrösképe a fényváltozásnak. Emellett a sebességek nagyon jól követték a fénygörbe többszörös periodicitásból eredő lassú hullámait is, amit a többmódusú pulzáció újabb bizonyítékként értelmeztem [9].

5. Meghatároztam az AI Aurigae félszabályos változócsillag fizikai paramétereit a Lowell Obszervatórium 11 évre kiterjedő Strömgren-fotometriai mérései alapján. A csillag átlagos periódusa 65 nap, a fénygörbe ciklusai időnként 0,6 magnitúdót is elérnek. A fényváltozással párhuzamos $b - y$ színváltozások radiális pulzációra utaltak. Kiszámítottam a csillag tömegét, hőmérsékletét, sugarát. A periódus-abszolút fényesség síkon elfoglalt helyzete alapján valószínűleg első felhangban pulzáló változócsillag [10]. Összegyűjtöttem több tucat rövid periódusú félszabályos változó fizikai paramétereit, amivel a csillagok periódusa és felszíni gravitációs gyorsulása közötti relációt tanulmányoztuk módusazonosítási céllal [13].

6. Elsőként fedeztem fel egy mira változó kaotikus pulzációját. Az átlagosan 430 nap pulzációs periódusú R Cygniről összegyűjtöttem az összes elérhető vizuális észlelést, amivel teljesen folytonos fénygörbét kaptam 1901 és 2001 között. Az adatok több magnitúdót elérő amplitúdóváltozásokat mutatnak. Megmutattam, hogy a klasszikus változócsillagászat eszközeivel (O-C diagram, Fourier-analízis, wavelet-analízis) nem értelmezhető a csillag fénygörbéje. Szisztematikus periódusváltozás a 101 évnél megfigyelés alatt nem történt. Stacionárius harmonikus komponensekkel a fénygörbe csak interpolálható, a sokfrekvenciás Fourier-dekompozíciók nem képesek előrejelezni az amplitúdó változásait. Ezzel szemben időképleltetéses beágyazást felhasználó nemlineáris analízissel egyértelműen megmutattam, hogy az R Cygni pulzációját alacsonydimenziójú kaotikus rendszer hajtja. A maximumfényességek modulációját perióduskétszerező bifurkáció jeleként értelmeztem, ugyanis a rekonstruált fázistér szerkezete alapján a rendszer a periódus 2 határciklus és a káosz tartományának határán mozog. Időről időre átkapcsol a két állapot között, amikor a fénygörbe kb. 1500 nap hosszú tranzienseket mutat. Különböző beágyazási paraméterekre megbecsültem a Lyapunov-spektrumot; a legnagyobb Lyapunov-exponens mindig pozitív volt, azaz a rendszer valóban kaotikus. A korrelációs integrál alapján az attraktor fraktáldimenziója 2,0–2,3. Az R Cygni pulzációját összehasonlítottam egy harmadrendű differenciálegyenlettel is, melyet szintén a perióduskétszerező bifurkáció jellemez. Az egyenlet a pulzáció klasszikus egyzóna-modelljéből leszármaztatható, és attraktora a kaotikus tartományban nagy mértékben hasonlít az R Cygniére. A fizikai fázistér legvalószínűbb dimenziója 3 vagy 4. Utóbbi esetben a káoszt két olyan rezgési módus erősen nemlineáris csatolásaként értelmezhetjük, melyek rezonanciához közeli állapotban vannak [12], [18], [20].

7. Nap típusú, azaz konvektív (sztochasztikus) gerjesztésű pulzációra utaló jeleket találtam az L₂ Puppis egyszeresen periodikus félszabályos változó fénygörbéjében. Az

1927 és 2005 közötti adatsorhoz 2003-tól kezdődően 90 éjszakán saját megfigyelésekkel is hozzájárultam. Az átlagosan 138,3 napos periódussal pulzáló csillag Fourier-spektruma a sztochasztikus csillapított oszcillátor spektrumára hasonlít, azaz Lorentz-profilú burkoló alatt több, egymáshoz nagyon közel levő csúcsot tartalmaz a domináns módus frekvenciájának kis környezetében. A spektrum maximum-likelihood módszerrel történt illesztése alapján a csillapítási tényezővel szoros kapcsolatban álló módusélettartam 4,8 év (kb. 12,5 pulzációs ciklus). A rezgési amplitúdó és fázis változásai megerősítik a rendszer sztochasztikus természetét. A fénygörbék Gábor-transzformáltja alapján összehasonlítottam az L_2 Puppis és a szintén 140 naphoz közeli periódusú X Camelopardalis mira és W Cygni félszabályos változók fázisváltozásait. Míg az X Camelopardalis mutatja a κ -mechanizmusra utaló koherens visszacsatolás fázisstabilizáló hatását, addig a W Cygni teljesen véletlenszerű viselkedésű. Az L_2 Puppis a két szélsőség között helyezkedik el, feltehetően mindkét gerjesztés működése folytán. Alacsonydimenziójú kaosz jelenlétét részletes tesztek alapján kizártam [25].

8. A WIRE-szonda csillagkövető kamerájának fotometriai méréseit felhasználva az adatsor Fourier-spektruma alapján megbecsültem az Arcturus (α Boötis) erősen csillapított oszcillációinak módusélettartamát, ami a 2,8 napos periódussal közelítőleg megegyező értékű [17].

A statisztikus asztroszeizmológia alkalmazásai

9. Egyértelműen kimutattam az első vörös óriáságon (RGB) jelentkező pulzációs instabilitás létét. A felfedezéshez 23 ezer, az OGLE mikrolencse-program keretében a Nagy Magellán-felhőben (LMC) észlelt vörös változócsillag periódus-fényesség-relációi (P-L-relációi) vezettek el. Az 1997-2001 között felvett I-szűrős fénygörbékre négyfrekvenciás Fourier-dekompozíciókat számítottam, majd a 2MASS infravörös égboltfelmérő program JHK magnitúdóival kiegészítettem a közel 63 ezer periódust tartalmazó adatbázist. A fényesebb csillagokra megerősítettem a korábbi irodalmi eredményeket az AGB-csillagok négy pulzációs P-L-szekvenciájára vonatkozóan. A halványabb csillagokra azonban két jól elkülönülő P-L-szekvenciát fedeztem fel, melyekben közel 10 ezer, 15 és 50 nap közötti periódusú csillag található. Éles határ van az RGB tetejénél (TRGB), ahol a TRGB alatti és feletti P-L-relációk között $\Delta \log P \sim 0,05$ perióduscsúszást találtam. Ezt az azonos luminozitású RGB- és AGB-csillagok átlagos evolúciós hőmérséklet-különbségével magyaráztam. A perióduscsúszás és a teljes minta TRGB-nél szétváló bimodális luminozitásfüggvénye arra utal, hogy a halványabb változók héjbeli hidrogént égető RGB-csillagok. A [periódus, abszolút fényesség, amplitúdó] adatkocka J-K színindexet is figyelembe vevő metszetei alapján szoros korrelációt találtam az amplitúdó és csillagfejlődési állapot, valamint az amplitúdó és pulzációs módus között. A jelenleg létező elméleti modellek nem reprodukálják kielégítő pontossággal a kapott eloszlásokat [19], [21], [26].

10. További bizonyítékokat találtam az RGB-n jelentkező pulzációkra a Kis Magellán-felhőben (SMC) az OGLE-program által észlelt vörös óriás változók elemzésével. Több mint 3200 csillagra 10 ezer periódust határoztam meg automatikus Fourier-analízissel, majd a 2MASS JHK-adatokkal tanulmányoztam a P-L-relációkat, illetve az eloszlások színfüggését. A Kis Magellán-felhőben hasonlóan gazdag struktúrákat találtam a periódus-fényesség síkon, amiből a pulzációs módusok eloszlásának minimális fémeségfüggésére következtettem. Meghatároztam az LMC és SMC relatív távolságmodu-

lusát ($\Delta\mu_0 = 0,44 \pm 0,03$ mag), figyelembe véve a galaxisok eltérő intersztelláris vörösödését. Mindkét galaxisra kiszámítottam a vörös változók többhullámhosszú luminozitásfüggvényeiből a TRGB IJHK-fényességeit. Az értékek a relatív távolságmodulust figyelembe véve jellegzetes hullámhosszfüggő abszolút fényességeket eredményeztek: az adatok alapján az SMC-beli TRGB kb. 0,2 magnitúddal halványabb abszolút fényességű a JHK sávokban, ami tökéletesen összhangban van a galaktikus gömbhalmazok TRGB-meghatározásain alapuló fémességfüggés jóslataival. A két Magellán-felhő kölcsönös, illetve a gömbhalmazokkal való összehasonlításából kapott konzisztens kép bizonyítja, hogy a TRGB alatti P–L-relációkat az első vörös óriáságon levő csillagok rajzolják ki. I sávban a TRGB különbsége minimális (0,03 mag), ami jelzi M_I^{TRGB} érzéketlenségét a fémességre és korra [22], [26].

11. Meghatároztam az LMC és SMC látóirányú kiterjedését a vörös óriások P–L-relációt felhasználva. Minden egyes csillag domináns periódusához hozzárendeltem egy P–L-relációt, majd meghatároztam az átlagos relációtól mért fényességkülönbséget. Ezt az adott galaxis átlagos távolságától való eltérést leíró távolságmodulus-különbségként értelmeztem. Az eredményeket az égi koordináták függvényében ábrázolva kiszámítottam az LMC korongjának látóiránnyal bezárt szögét, illetve az SMC látóirányú mélységét. Eredményeim megerősítik a más távolságindikátorokból ismert geometriai szerkezet képét: az LMC központi tartománya enyhén felénk dől, látóiránnyal bezárt szöge 29 fok körüli. A galaxis keleti vége kb. 2,4 kpc-vel közelebb található. Az SMC-ben foltos szerkezetű, 3,2 kpc-nyi változást találtam a galaxis kiterjedésében [24], [26].

12. Az LMC szerkezetére vonatkozó vizsgálatok közben a magbéli héliumégető csillagokból álló vörös csomó („red clump”) állandónak feltételezett $(V - I)_0$ színét cáfoló jeleket találtam. Az adatokat térben elkülönülő és eltérő korú vöröscsomó-populációkkal lehet értelmezni [24].

13. A két Magellán-felhő teljes OGLE-mintája alapján szisztematikusan kisebb fotometriai amplitúdókat mértem a fémszegényebb SMC-ben. A 20–150 napos periódustartományon az SMC-beli vörös változók adott periódushoz tartozó maximális I-beli amplitúdója durván kétszer kisebb, mint az LMC-ben. A trendet az I fotometriai sávba eső molekulásávok hatásával értelmeztem: a fémszegényebb SMC-ben átlagosan kevesebb nehéz elem van a csillagokban, így kevesebb molekula, azaz gyengébb molekulásávok jelentkeznek a vörös óriás légkörökben. Mivel ezek hőmérsékletfüggése erősen befolyásolja az I-ben mérhető amplitúdót, a gyengébb sávok kisebb amplitúdót eredményeznek a fémszegény környezetben [26].

4. A dolgozat témaköréből megjelent publikációk

1. Szatmáry, K., Gál, J., Kiss, L.L., 1995, Light curve analysis of long period pulsating stars with the wavelet method: The semiregular star V Boo, *ASP Conf. Series*, **83**, p. 417.
2. Szatmáry, K., Gál, J., Kiss, L.L., 1996, Applications of wavelet analysis in variable star research. II. The semiregular star V Bootis, *Astronomy and Astrophysics*, **308**, p. 791-798.

3. West, K., Howarth, J., Kiss, L.L., 1999, Simple Photometric Observations of BR Canum Venaticorum (a troublesome comparison star), *Journal of the British Astronomical Association*, **109**, p. 151-154.
4. Kiss, L.L., Szatmáry, K., 1999, Multiperiodicity in semiregular variables, *IAU Symp.*, **191**, p. 133-138.
5. Kiss, L.L., Szatmáry, K., Cadmus, R.R., Jr., Mattei, J.A., 1999, Multiperiodicity in semiregular variables. I. General properties, *Astronomy and Astrophysics*, **346**, p. 542-555.
6. Szatmáry, K., Kiss, L.L., 2000, Period analysis of the semiregular star Y Lyncis, *Proc. PhD Conference '99 „A Bridge between Generations of Variable Star Researchers”*, Kecskemét, Hungary, p.155-156.

A tézisekhez kapcsolódó publikációk

7. Kiss, L.L., Szatmáry, K., Szabó, Gy., Mattei, J.A., 2000, Changes of the physical state in semiregular variables, *ASP Conf. Series*, **203**, p. 117-118.
8. Kiss, L.L., Szatmáry, K., Szabó, Gy., Mattei, J.A., 2000, Multiperiodicity in semiregular variables. II. Systematic amplitude variations, *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, **145**, p. 283-292.
9. Lebzelter, T., Kiss, L.L., Hinkle, K.H., 2000, A comparison of light and velocity variations in semiregular variables, *Astronomy and Astrophysics*, **361**, p. 167-174.
10. Kiss, L.L., Skiff, B.A., 2001, The radial pulsation of AI Aurigae, *Astronomy and Astrophysics*, **370**, p. 496-502.
11. Lebzelter, T., Kiss, L.L., 2001, Monitoring of LPVs with an automatic telescope II: A comparison of APT data and visual observations, *Astronomy and Astrophysics*, **380**, p. 388-396.
12. Kiss, L.L., Szatmáry, K., 2002, Period-doubling events in the light curve of R Cygni: evidence for chaotic behaviour, *Astronomy and Astrophysics*, **390**, p. 585-596.
13. Szatmáry, K., Kiss, L.L., 2002, Period-gravity relation for semiregular stars, *ASP Conf. Series*, **259**, p. 566-567.
14. Kiss, L.L., 2002, The role of amateur astronomers in variable star research - case studies from the LPV research, in: *The Proc. of the International Conference on Variable Star Research*, Nov. 8-11, 2001, Brno, p. 95-102.
15. Kiss, L.L., Lebzelter, T., Sobotka, P., 2002, A comparison of visual and APT/CCD data for long-period variable stars, in: *The Proc. of the International Conference on Variable Star Research*, Nov. 8-11, 2001, Brno, p. 103-107.
16. Szatmáry, K., Kiss, L.L., Bebesi, Zs., 2003, The He-shell flash in action: T Ursae Minoris revisited, *Astronomy and Astrophysics*, **398**, p. 277-282.

17. Retter, A., Bedding, T.R., Buzasi, D.L., Kjeldsen, H., Kiss, L.L., 2003, Oscillations in Arcturus from WIRE photometry, *Astrophysical Journal*, **591**, L151-L154
18. Kiss, L.L., Szatmáry, K., 2003, R Cygni: a Mira star pulsating chaotically, in: *Proc. of „Astroseismology Across the HR Diagram“*, Eds. Thompson M.J, Cunha M.S., Monteiro M.J.P.F.G., Kluwer Academic Publisher, p. 433-436.
19. Kiss, L.L., Bedding, T.R., 2003, Red variables in the OGLE-II database. I. Pulsations and period-luminosity relations below the tip of the Red Giant Branch of the Large Magellanic Cloud, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **343**, L79-L83
20. Kiss, L.L., 2003, Chaotic pulsations of the Mira star R Cygni, in: *Stellar Variability, Proc. of the AFOEV International Conference on Variable Stars*, Eds. D. Proust, M. Verdenet, J. Minois, Burillier Publ. (Vannes), p. 59-66.
21. Kiss, L.L., Bedding, T.R., 2004, Red variables in the OGLE-II database: first results for the LMC, *ASP Conf. Series*, **310**, p. 55-59.
22. Kiss, L.L., Bedding, T.R., 2004, Red variables in the OGLE-II database. II. Comparison of the Large and Small Magellanic Clouds, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **347**, L83-L87
23. Zijlstra, A.A., Bedding, T.R., Markwick, A.J., Loidl-Gautschy, R., Tabur, V., Alexander, K.D., Jacob, A.P., Kiss, L.L., Price, A., Matsuura, M., Mattei, J.A., 2004, Period and chemical evolution of SC stars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **352**, p. 325-337.
24. Lah, P., Kiss, L.L., Bedding, T.R., 2005, Red variables in the OGLE-II data base - III. Constraints on the three-dimensional structures of the LMC and SMC, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **359**, L42-L46
25. Bedding, T.R., Kiss, L.L., Kjeldsen, H., Brewer, B.J., Dind, Z.E., Kawaler, S.D., Zijlstra, A.A., 2005, The light curve of the semiregular variable L2 Puppis: II. Evidence for solar-like excitation of oscillations, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **361**, p. 1375-1381.
26. Kiss, L.L., 2005, Red giant variables: OGLE-II and MACHO, in proc. „*Stellar pulsation and evolution*“, Mem. S. A. It., in press (astro-ph/0509618)