

Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék
Szegedi Tudományegyetem

Vörös óriáscsillagok tömegvesztése gömbhalmazokban

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Mészáros Szabolcs

Témavezető:

Dr. Andrea K. Dupree

Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics
Cambridge, USA

Belső konzulens:

Dr. Vinkó József

Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék
Szegedi Tudományegyetem

Szeged

2009

Bevezetés

A csillagszél általi tömegvesztés tanulmányozása kulcsfontosságú a csillagfejlődés folyamatának megértéséhez. A tömegvesztés mértéke a csillag fejlődési állapotától függ, és a vörös óriáscsillagok esetében több nagyságrenddel meghaladja a fősorozati csillagoknál mért értéket. Vörös óriáscsillagok nagy számban találhatók a Tejútrendszer halójában elhelyezkedő gömbhalmazokban, mely lehetővé teszi ezen csillagok egyidejű statisztikai vizsgálatát, és elősegíti a tömegvesztés mechanizmusának és mennyiségének jobb megértését. Munkám a tömegvesztés empirikus tanulmányozására irányult, ennek érdekében nagyfelbontású optikai spektroszkópiai méréseket végeztem, melyeket elméleti modellekkel értelmeztem.

A csillagok fejlődése az asztrofizika legjobban kutatott területei közé tartozik. Egy, a Nap hasonló csillag fejlődése jól meghatározott szakaszokból áll. A fősorozat előtt a csillag intersztelláris felhőből gravitációs összehúzódás révén keletkezik. Az összehúzódás során elérkezik egy pillanat mikor a magbéli hőmérséklet és nyomás elér egy kritikus értéket és a hidrogén fúzió beindul. A fősorozati (MS) állapot ekkor indul és a csillag életének közel 90%-át ebben az állapotban tölti. A fősorozat végére a mag tiszta héliumot tartalmaz, és a mag körüli helyben folyik a hidrogén fúzió. Ezen életszakaszban a csillagszél általi tömegvesztés elhanyagolható. Egy idő után a hélium mag már nem tud egyensúlyt tartani a fölötte levő rétegek nyomásával és hirtelen összehúzódik. A felszabaduló gravitációs potenciális energia a csillagmag felfűtésére és a csillag sugarának növelésére fordítódik, így a csillag eléri a vörös óriás ágat (RGB).

Az RGB-n a hélium mag erősen degenerált állapotban van, és amikor a mag hőmérséklete eléri a 10^8 K-t, a hélium fúzió robbanásszerűen indul be. Ez a hélium mag felvillanás, mely során először történik jelentős tömegvesztés. Miután a csillag magjában beindul a hélium fúzió, megkezdődik a horizontális ági (HB) fejlődés. A HB végén a hélium mag kimerül és megindul a hélium hely égés, ez az aszimptotikus óriás ági (AGB) állapot. Az AGB során a fúzió a hélium égető helyben időnként leáll, majd újra beindul, ezt hívjuk hélium héj felvillanásnak. Egy ilyen felvillanás során jelentős tömegvesztés léphet fel és az AGB végére a csillag tömegének 30-40%-át is elvesztheti. A folyamat végére a csillag magja fehér

törpévé alakul.

A csillagok tömegvesztése a csillagszálon keresztül megy végbe, mely során nagy sebességű ionok távoznak a csillag felszínéről. A tömegvesztés észlelése közvetlen módszerekkel csak az utóbbi években vált lehetővé a nagyfelbontású spektroszkópia és az infravörös észlelések ugrásszerű fejlődésével. Az AGB csillag színképében megjelenő CO molekula infravörös emisszió ereységéből becsült tömegvesztés értékére $10^{-7} - 10^{-8} M_{\odot} \text{ év}^{-1}$ adódott. Néhány gömbhalmazban infravörös és rádió mérésekből sikerült néhány tized naptömeg neutrális hidrogént és port kimutatni. Köztük van az M15 jelű gömbhalmaz is, mely ezen disszertáció egy részét is képezte.

A nagyfelbontású spektroszkópia segítségével a csillagok kromoszférájában keletkező $H\alpha$, Ca II K (egyszeresen ionizált Ca K), és hélium vonalakból a tömegvesztés mértékére és időbeli lefolyására lehet következtetni. Az emisszió megjelenése nem feltétlen jelenti csillagszél jelenlétét, mivel az egy statikus és forró atmoszférában is létrejöhet. Az abszorpciós vonal alakja azonban már érzékeny a tömegvesztésre. Ilyen kiáramlásra utaló vonalakat találtak már sok gömbhalmazban (M4, M13, M15, M22, M55, M92, 47 Tuc, ω Cen, NGC 2808, NGC 6752).

A spektrumvonalak elméleti modellezéséből számolt tömegvesztési rátákra az irodalomban korábban $10^{-8} - 10^{-9} M_{\odot} \text{ év}^{-1}$ adódott, melyek nagyjából egy nagyságrenddel kisebbek a csillagfejlődési modellek által jósoltnál.

Dolgozatom első harmadában ismertettem a csillagfejlődés és tömegvesztés elméleti hátterét, majd bemutattam megfigyeléseimet. A második harmadában részletesen elemeztem az M13, M15, és M92-es halmazokban megfigyelt emissziós vonalprofillal rendelkező vörös óriás csillagokkal kapcsolatos eredményeimet. Az utolsó részben bemutattam 15 vörös óriáscsillag $H\alpha$ vonaljának modelljét és a meghatározott tömegvesztési ráták mögötti elméleti számításaimat.

Célkitűzések

A dolgozat célkitűzései a következőképpen foglalhatók össze:

- Nagyfelbontású spektroszkópia segítségével a $H\alpha$ és Ca II K vonalából vörös óriás csillagok légkörében végbemenő fizikai folyamatok luminozitástól, effektív hőmérséklettől és fémtartalomtól való függésének meghatározása.
- A $H\alpha$ vonal elméleti modellezéséből a tömegvesztés kiszámolása és a tömegkiáramlás csillagok fizikai paramétereitől való függésének tanulmányozása.

Vizsgálati módszerek

Megfigyelések

Összesen 297, vörös óriáságon elhelyezkedő csillagról készítettem nagy felbontású spektrumokat az arizonai Multi Mirror Telescope-ra (MMT) szerelt Hectochelle nevű multiobjektum spektrográffal. Az észlelések 2005 és 2006 között három alkalommal történtek az M13, M15 és M92 jelű gömbhalmazokról a $H\alpha$ -ra centrált OB25-ös, a Ca II H&K-ra centrált Ca41-es, és a 5225 Å-ra centrált RV31-es szűrővel. A fiber pozicionáló egyszerre maximum 240 fibert képes beállítani. A Hectochelle felbontása közel 34000, mely lehetővé tette a vonalalak részletes tanulmányozását. A halmazok kis mérete miatt több fiber konfigurációra szükség volt a vörös óriás ág teljes lefedésére. A fiberek az égbolton ~ 2 ívmásodperc látzó átmérőjűek, mely tovább korlátozza az észlelhető objektumok számát, mivel egymáshoz ennél közelebb lévő csillagokat nem lehet bepozicionálni.

A spektrumok redukálása az IRAF programcsomaggal történt. A hullámhossz kalibrációhoz az éjszaka elején készült ThAr lámpákat használtam, melyekkel 0.01 – 0.002 Å pontosságot lehetett elérni. A bias, flat korrekció és a hullámhossz kalibráció után a csillagok színeképe még mindig tartalmazza az égolt színeképet, melyet le kell vonni. A CCD közepén, a 100 és 150-es aperturák között, az égboltról készített spektrumok intenzitása kb. kétszer nagyobb, mint a CCD szélén. Emiatt

a 100 és 150-es aperturák között elhelyezkedő csillagok esetében a csillaghoz a CCD-n leközelebb lévő három égbolt apertúrának az átlagát vontam ki.

Radiális sebesség mérés

Radiális sebességek méréséhez a keresztkorrelációs módszert használtam. Az M15 jelű halmazban levő csillagok spektrumát összesen 2280, az ATLAS kóddal generált model spektrumokkal korreláltattam. A model spektrumok effektív hőmérséklete 3500 és 7000 K között egyenletesen elosztva változott, míg a fém-tartalom $[Fe/H] = -2.5$ és $+0.5$ között mozgott. A $H\alpha$ szűrőben a korrelációhoz választott hullámhossz tartomány 6480 Å és 6545 Å közé lett megválasztva, tehát a $H\alpha$ vonal a kereszt korreláción kívül esett. Az M13 and M92 jelű halmazokban levő csillagok esetében az RV31 szűrőben észlelt spektrumokat korreláltattam a modellekkel. Ebben a hullámhossz tartományban több száz jól elkülönült és vékony abszorpciós vonal található, ezáltal a keresztkorrelációs függvény csúcsa sokkal keskenyebb és pontosabb sebességeket ad, mint a $H\alpha$ szűrő esetében.

A csillagok radiális sebessége néhány km s^{-1} -on belül megegyezik a szakirodalomban korábban publikált értékekkel. A halmazok átlagos sebességére a következő értékeket kaptam: M13: $-243.5 \pm 0.2 \text{ km s}^{-1}$, M15: $-105.0 \pm 0.5 \text{ km s}^{-1}$, M92: $-118.0 \pm 0.2 \text{ km s}^{-1}$. Egy csillag radiális sebességének változása általában kettősségre, vagy pulzációra utal. Összesen 6 csillag mutatott 2 km s^{-1} -nél nagyobb radiális sebesség változást az M15 halmazban, több észlelés alkalmával. Az M13-ban és M92-ben 2–2 csillag radiális sebessége változott az észlelések között, ezek közül az egyik, L72, egy jól ismert pulzáló változócsillag.

A vonalalak tanulmányozása

Emissziós vonalak jelenléte egy aktív, nagy kiterjedésű és forró kromoszférára utal, ezért a $H\alpha$ és Ca II H&K vonalakon emissziót kerestem. Az emisszió azonosítása egyszerű szemrevételezéssel történt, azonban ez a kontinuumhoz közel eső emisszió esetében nem megbízható. Ezért az emissziós vonalak kereséséhez egy másik módszert is használtam.

Nyolc emisszió nélküli, különböző hőmérsékletű és luminozitású csillag spektrumát összeátlagoltam és a többi csillag színekéből kivontam. Ezzel a mód-

szerrel a vékony és kis intenzitású emisszió is kimutatható, azonban további hibák jelenhetnek meg. A csillagok színekében lévő vonalak erőssége függ még sok más paramétertől (rotációs sebesség, mikroturbulens sebesség), melyeket a pontos azonosításhoz figyelembe kell venni. A szemmel történő azonosítás és ez a kivonásos módszer azonban azonos eredményt ad, így további részletesebb azonosítási eljárást nem vezettem be.

Ha az atmoszférában mozgás jelentkezik, akkor a Doppler-effektus következtében asszimmetrikus abszorpciós vonalprofil jön létre, melynek magja kiáramlás esetén a rövid hullámhosszak felé tolódik el. Ezen eltolódás mérésével a kromoszférában lévő mozgásokra lehet következtetni, mivel a $H\alpha$ vonal abszorpciós részének magja az atmoszférában magasabban keletkezik, mint az emisszió. A kontinuum és a vonal magja közötti sebesség különbséget a biszektor módszerrel lehet megmérni, mely során a vonalalakot 20 szektorra bontottam. A legfelső szektort a kontinuumhoz közel helyeztem, a legalsó szektort pedig az abszorpció aljára. A valódi pozíció függ a csillag spektrumának jel/zaj arányától.

A $H\alpha$ vonal modellezése

A tömegkiáramlás mértékének meghatározása céljából elméleti kromoszférikus modellekből rekonstruáltam a $H\alpha$ vonalat a három halmazból választott néhány RGB csillagra.

Az alap modellekben a kromoszférában csökkenő oszlopsűrűség függvényében lineárisan növekvő hőmérséklettel számoltam. Ezen elméleti számításokat a PANDORA nevű programmal végeztem. A modellezés során különböző méretű és hőmérsékletű kromoszférában számoltam egy 15 energia szinttel rendelkező hidrogén atomban keletkező $H\alpha$ vonalat. A számolás két lépésben történt: első lépésben egy plán-parallel atmoszférát hoztam létre, melyben az oszlopsűrűségből és hőmérsékletből megkaptam a skálamagasságot és a teljes hidrogén sűrűséget a kromoszférában. Ezután a plán-parallel modelt lecseréltem egy szférikus modellre, mely a végső spektrumot eredményezte.

A modellezés során az atmoszférában a termodinamikai egyensúlyt elhagytam, mely egy sokkal pontosabb közelítést ad a kromoszférában végbemenő fizikai folyamatok leírására. Aszimmetrikus vonalprofilok létrehozásának érdekében az

emisszió és az abszorpció keletkezésének helyén az atmoszférához egy sebességmezőt rendeltem hozzá. Ezután a kiszámolt spektrumot összehasonlítottam a megfigyelésekkel és abban az esetben, ha nem volt egyezés, a sebességmezőt megváltoztattam majd új spektrumot számoltam. Ezt addig folytattam, amíg a modellezett és megfigyelt színek között jó egyezést nem találtam.

Tézisek

1. Az M15-ben észlelt 110 vörös óriáscsillagból 29 mutatott $H\alpha$ emissziót. Az óriáscsillagok többszörös megfigyelése során jelentős változásokat észleltem a $H\alpha$ vonal alakjában (mindössze kettő kivételével), mely rövid időtartamú kromoszférikus változásokra utal. Emiatt a leghalványabb, még emissziót mutató RGB csillagok luminozitása is változik (a leghalványabb ilyen csillag fényessége $\log(L/L_{\odot}) > 2.78$ volt). Az emisszió változása valószínűleg kapcsolatban áll a csillagok pulzációjával. A luminozitás limit fölött a csillagok $\sim 83\%$ -a mutatott emissziót, melyek közül 77% esetében a kék oldali emisszió erősebb, mint a vörös oldali. Ez az atmoszférában a csillag felszíne felé történő mozgásra utal. Összesen 123 csillagot észleltem az M13-as gömbhalmazban, melyek közül 19 mutatott $H\alpha$ emissziót. A többszörösen észlelt csillagok száma mindössze kettő volt, de az emissziók erőssége itt is változott. A leghalványabb, még emissziót mutató RGB csillag fényessége $\log(L/L_{\odot}) > 2.79$ volt, e fölött a csillagok 78% -a mutatott emissziót és 45% esetében ez beáramlásra utalt. Az M92-ben 64 csillag közül összesen 9 esetében figyeltem meg az emisszió jelenlétét. Három csillagot észleltem több, mint egyszer az M92-ben, de az emissziók erőssége a többi halmazhoz hasonlóan változott. A leghalványabb még emissziót mutató RGB csillag fényessége $\log(L/L_{\odot}) > 2.74$ volt, e fölött a csillagok 78% -a mutatott emissziót és 82% esetében ez beáramlásra utalt. Az M15 halmazban Ca41 szűrővel észlelt csillagok száma 53 volt, melyek közül 14 mutatott Ca II K emissziót. Az M13 és M92-es halmazok esetében az expozíciós idő növelése miatt több csillagot sikerült észlelnem: 119-et az M13-ban (34 emisszió), 63-at M92-ben (12 emisszió). A Ca II K emisszió erőssége szintén független az effektív hőmérséklettől, luminozitástól és a halmaz fémességtartalmától. Néhány csillag esetében az M15-ben, a Ca II emisszió különböző irányú mozgásokat mutatott az atmoszférában, mint a $H\alpha$ vonal, mely rövid időtartamú változásokra, vagy bonyolult struktúrájú kromoszférára utal. A vörös óriás ágon lévő csillagok esetében $H\alpha$ emisszió csak $T_{\text{eff}} < 4500$ K és $\log(L/L_{\odot}) > 2.75$ tartományokban jelenik meg halmaztól függetlenül, mely arra utal, hogy az emisszió mértéke kevésbé

függ a csillagok egyedi fémtartalmától. A három észlelt gömbhalmaz fémtartalma $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.54$ (M13), és $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.3$ (M15, M92) között változott. Ezen három halmazban sem a $\text{H}\alpha$, sem a Ca II K emisszió jelenlétében nincs szisztematikus függés a halmazok átlagos fémtartalmától. Vörös óriás csillagok az M15-ben változó $\text{H}\alpha$ emissziót mutattak, mely miatt a még emisszióval rendelkező leghalványabb csillagok luminozitása változott.

2. A $\text{H}\alpha$ abszorpciós vonal biszektorából számolt sebességből arra következtettem, hogy csak azon csillagok mutatnak kiáramlást, melyek luminozitása nagyobb, mint $\log(L/L_{\odot}) > 2.5$, és ezen kiáramlási sebesség növekszik a csillagok fényességével. Ez a luminozitás határ mindhárom halmaznál ugyanaz, mely azt mutatja, hogy a kifelé mozgó atmoszféra megjelenése független a halmaz fémtartalmától. A Ca II K_3 vonal segítségével mért kiáramlási sebesség azonos luminozitásnál általában nagyobb, mint a $\text{H}\alpha$ -ban mért sebesség, mely egy az atmoszférában kifelé gyorsuló sebességmezőre utal. A legalacsonyabb T_{eff} -el rendelkező csillagok az M13-as halmazban azonban csökkenő kiáramlási sebességet mutatnak, ez egy jobban kiterjedt és ezért megváltozott struktúrájú légkörre utal, melyben a $\text{H}\alpha$ vonal az atmoszféra kevésbé mozgó régiójában keletkezik. Az ilyen nagy méretű csillagok esetében a kiáramlás valószínűleg csak a kromoszféra tetején indul be. Az asszimptotikus ágon lévő csillagok általában nagyobb kiáramlási sebességet mutatnak ($10\text{-}15 \text{ km s}^{-1}$), mint az azonos látszó fényességű, de a vörös óriás ágon fekvő társaik ($6\text{-}8 \text{ km s}^{-1}$). AGB csillagok biszektor sebességének változása szintén nagyobb, mint az RGB-n lévő társaiké. Amíg az RGB-n mért kiáramlási sebességek nem függenek a halmaz fémtartalmától, az M15 és M92-es halmazokban lévő AGB csillagok nagyobb kiáramlási sebességet mutatnak, mint az azonos fejlődési állapotban lévő társaik az M13-ban. A két fémszegény halmazban (M15 és M92) található csillagok $\text{H}\alpha$ vonalalakjai meglepően hasonlítanak egymásra, és nem utalnak különböző erősségű anyagkiáramlásra, ami azt jelzi, hogy a tömegvesztés nem magyarázza a második paraméter problémát e két halmaz esetében.
3. A modellezett spektrumokat összehasonlítottam a megfigyelésekkel, melyek csak akkor mutattak jó egyezést, ha a felső kromoszférában egy kifelé gyorsuló

suló sebességmező volt jelen. A tömegkiáramlási ráta ennek a sebességmezőnek a segítségével lett meghatározva, melynek pontossága egy kettes szorzó erejéig érvényes. Az így kiszámolt tömegvesztés néhányszor $10^{-9} M_{\odot} \text{ év}^{-1}$, mely egy nagyságrenddel alacsonyabb a Reimers-törvény által jósoltnál. Az M15-ben lévő K341 és K969 jelű csillagok esetében az emisszió keletkezési régiójában a sebességek előjele a megfigyelések között változott. Ezen spektrumok esetében nem lehetett a két különböző megfigyelést ugyanolyan előjelű sebességmezővel modellezni. Ez arra mutat, hogy az atmoszférában történő pulzáció a kromoszférára is kiterjed.

4. A tömegvesztés mértéke enyhén növekszik a luminozitással, csökken az effektív hőmérséklettel, és függ a csillagok átlagos fémtartalmától. A tömegvesztésre legkisebb négyzetek módszerével való illesztés során a következő formulát kaptam: $\dot{M}[M_{\odot} \text{ yr}^{-1}] = 0.092 \times L^{0.16}[L_{\odot}] \times T_{\text{eff}}^{-2.02} \times A^{0.37}$, ahol $A = 10^{[Fe/H]}$. Az RGB teteje alatt 2 magnitúdóval is megfigyelhető a tömegvesztés, mely arra utal, hogy a csillagszél az RGB-n való fejlődés során folyamatosan történik. A fémgazdagabb M13-as gömbhalmazban lévő csillagok átlagosan egy kettes faktorral nagyobb tömegvesztési rátával rendelkeznek, mint a fémszegényebb csillagok az M15-ben és az M92-ben. A számolt tömegvesztési ráták nagyjából egy nagyságrenddel kisebbek, mint amit a Reimers, Schröder, és az Origlia összefüggések jósolnak. Fényesebb csillagok esetében a különbség nagyobb. Az eltérés oka lehet, hogy a csillagszél csak magasabb régiókban válik igazán meghatározóvá és a tömegkiáramlás mértéke itt ugrásszerűen megnő. Az Origlia tömegvesztési ráta hasonlóan függ a luminozitástól, mint az általam számolt értékek. A legfényesebb csillagok az RGB tetején ($\log(L/L_{\odot}) > 3.3$) kisebb tömegvesztést mutatnak, mely újra megerősíti, hogy a $H\alpha$ vonal már nem érzékeny a csillagszélre ilyen nagy luminozitásoknál. Az M15-beli K757-es jelű csillag másfél év alatti többszörös észlelése során a tömegvesztési rátában hatszoros különbség mutatkozott, míg más csillagoknál ennél sokkal kisebb (nagyjából kétszeres) változás történt. Ez arra utal, hogy a tömegvesztés jelentős változásokon megy végbe viszonylag rövid, éves időskálán. Egy az M13-ban lévő csillag, L72, szintén mutatott változást, de ez csak egy kétszeres fak-

tor jelentett, ami közel esik a spektrum modellezés hibájához. A számolt tömegvesztési értékek átlaga jó egyezésben van a csillagfejlődési elméletekkel, melyek $\sim 0.2 M_{\odot}$ tömegvesztést jósolnak az RGB-n. Az általam kapott átlagos csillagszél erőssége $3.0 \times 10^{-9} M_{\odot} \text{ év}^{-1}$, melyből következik, hogy egy csillag az RGB-n töltött idő alatt (kb. 50 millió év) $\sim 0.2 M_{\odot}$ tömeget veszít. A Spitzer űrtávcsővel 2006-ban felfedezett, porburokkal rendelkező AGB és RGB csillagok radiális sebességének segítségével sikerült a halmaztagságot megerősíteni. Ezek közül kettő csillag $H\alpha$ vonalának modellezését is elvégeztem. Ezen csillagok $H\alpha$ vonalprofilja és a számolt tömegvesztési értékek nem különböznek más, hasonló luminozitású és effektív hőmérsékletű, de porburokkal nem rendelkező csillagok vonalakjától. Ez arra utal, hogy ha a csillagszél általi tömegvesztés felelős az infravörös tartományban sugárzó porburokért, akkor ez a csillagszél epizódikus és valószínűleg az észlelések idején porképződés nem történt.

Disszertációban felhasznált, referált szakfolyóiratban megjelent publikációk

Mészáros, Sz., Avrett, E. H., & Dupree, A. K. 2009, *Mass Outflow of Red Giant Stars in M13, M15 And M92*, AJ, 138, 615

Mészáros, Sz., Dupree, A. K., & Szalai, T. 2009, *Mass Outflow and Chromospheric Activity of Red Giant Stars in Globular Clusters. II. M13 and M92*, AJ, 137, 4282

Mészáros, Sz., Dupree, A. K., & Szentgyorgyi, A. H. 2008, *Mass Outflow and Chromospheric Activity of Red Giant Stars in Globular Clusters. I. M15*, AJ, 135, 1117

Egyéb, referált szakfolyóiratban megjelent publikációk

Derekas, A., Kiss, L. L., Bedding, T. R., Ashley, M. C. B., Csák, B., Danos, A., Fernandez, J. M., Fűrész, G., Mészáros, Sz., Szabó, Gy. M., Szakáts, R., Székely, P., & Szatmáry, K., *Binarity and multiperiodicity in high-amplitude delta Scuti stars*, 2009, MNRAS, 394, 995

Szalai, T., Kiss, L. L., Mészáros, Sz., Vinkó, J., & Csizmadia, Sz., *Physical parameters and multiplicity of five southern close eclipsing binaries*, 2007, A&A, 465, 943

Vinkó, J., Takáts, K., Sárneczky, K., Szabó, Gy. M., Mészáros, Sz., Csorvási, R., Szalai, T., Gáspár, A., Pál, A., Csizmadia, Sz., Kóspál, A., Rácz, M., Kun, M., Csák, B., Fűrész, G., DeBond, H., Grunhut, J., Thomson, J., Mochnacki, S., & Kótyay, T., *The first year of SN 2004dj in NGC 2403*, 2006, MNRAS, 369, 1780

Lindstrom, C., Griffin, J., Kiss, L. L., Uemura, M., Derekas, A., **Mészáros, Sz.**, & Székely, P., 2005, *New clues on outburst mechanisms and improved spectroscopic elements of the black hole binary V4641 Sagittarii*, MNRAS, 363, 882

Székely, P., Kiss, L. L., Szabó, Gy. M., Sárneczky, K., Csák, B., Váradi, M., & **Mészáros, Sz.**, 2005, *CCD photometry of 23 minor planets*, P&SS, 53, 925

Szabó, Gy. M., Sárneczky, K., Vinkó, J., Csák, B., **Mészáros, Sz.**, Székely, P., & Bebesi, Zs.: 2003, *Photometry of SN 2002bo with template image subtraction*, A&A, 408, 915

Derekas A., Kiss L.L., Székely P., Alfaro E.J., Csák B., **Mészáros Sz.**, Rodríguez E., Rolland A., Sárneczky K., Szabó Gy. M., Szatmáry K., Váradi M., & Kiss Cs., 2003, *A photometric monitoring of bright high-amplitude delta Scuti stars. II. Period updates for seven stars*, A&A, 402, 733

Kiss, L, L. Derekas, A., **Mészáros, Sz.**, & Székely, P., 2002, *A photometric monitoring of bright high-amplitude delta Scuti stars. I. The double-mode pulsation of V567 Ophiuchi*, A&A, 394, 943

Konferencia és online kiadványok

Szalai, T., Kiss, L. L., **Mészáros, Sz.**, Vinkó, J., Csizmadia, Sz.: 2007, *BVI and RV curves of 5 eclipsing binaries* (Szalai+, 2007), yCat, 34650943

Derekas, A., Kiss, L. L., Csák, B., Griffin, J., Lindström, C., **Mészáros, Sz.**, Székely, P., Ashley, M. C. B., Bedding, T. R.: 2006, *Binarity and multiperiodicity in high-amplitude delta Scuti stars*, Memorie della Societa Astronomica Italiana, 77, 517

Székely, P., Kiss, L. L., Szabó, Gy. M., Sárneczky, K., Csák, B., Váradi, M., **Mészáros, Sz.**: 2005, *CCD photometry of 23 minor planets* (Szekely+, 2005),

yCat, 029005301

Derekas A., Székely P., Kiss L.L., Szatmáry K., **Mészáros Sz.**: 2003, *A photometric survey of the brightest northern high-amplitude delta Scuti stars*, in: Stellar Variability, Proc. of the AFOEV International Conference on Variable Stars, Eds. D. Proust, M. Verdenet, J. Minois, Burillier Publ.(Vannes), p. 159

Kiss, L.L., Derekas, A., **Mészáros Sz.**, Székely, P.: 2002, *V light curve of V567 Oph* (Kiss+, 2002), yCat, 33940943

Egyéb, nem referált szakfolyóiratban megjelent publikációk

Uemura, M., Mennickent, R., Stubbings, R., Bolt, G., Monard, B., Cook, L. M., Williams, P., Ishioka, R., Imada, A., Kato, T., Nogami, D., Starkey, D., Maehara, H., Nakajima, K., **Mészáros, Sz.**, Szekely, P., Kiss, L. L., Lindstrom, C., Griffin, J.: 2005, *Outburst of a Black Hole X-ray Binary V4641 Sgr in 2004 July* Information Bulletin on Variable Stars, No. 5626

Borkovits T., Bíró I.B., Hegedüs T., Csizmadia Sz., Szabados L., Pál A., Posztobányi K., Könyves V., Kóspál Á., Csák B., **Mészáros Sz.**: 2003, *New times of minima of eclipsing binary systems*, Information Bulletin on Variable Stars, No. 5434

Csák B., Kiss L.L., Kovács D., **Mészáros Sz.**, Sárnechky K., Székely P.: 2001, *Two new contact binary stars*, Information Bulletin on Variable Stars, No. 5049

Társ szerzői nyilatkozat

Alulírott – mint társszerző – nyilatkozom arról, hogy **Mészáros Szabolcs: Vörös óriáscsillagok tömegvesztése gömbhalmazokban** című doktori értekezéséhez felhasznált, az fentiekben részletezett angol nyelvű szakcikkekben szereplő, közös publikációkban közölt, az értekezés konkrét tézispontjaiban összefoglalt eredményeket nem használtam fel és a jövőben sem kívánom tudományos fokozat megszerzésére felhasználni.

Andrea K. Dupree (külföld, USA)

Andrew Szentgyörgyi (külföld, USA)

Eugene H. Avrett (külföld, USA)

Szalai Tamás