

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
Természettudományi és Informatikai Kar
Kísérleti Fizikai Tanszék

Doktori/Ph.D. értekezés téziszfüzet

**Csillagok, csillaghalmazok és kisbolygók fizikai paramétereinek
meghatározása spektrofotometriai módszerekkel**

Szerző: Székely Péter, okl. csillagász

Témavezető/Konzulens:

Dr. Szatmáry Károly, egyetemi docens, Szegedi Tudományegyetem
Dr. Kiss L. László, posztdoktori ösztöndíjas, University of Sydney,
Ausztrália

Fizika Doktori Iskola

Szeged

2009

1. Tudományos háttér

- Annak ellenére, hogy a gömbhalmazok a modern asztrofizika kiváló tesztobjektumai az egyidőben, hasonló kémiai összetétel mellett született, rendkívül nagy számú csillag populációjának köszönhetően, még mindig akad köztük olyan, amely alapos vizsgálata mindeztáig nem történt meg. Az NGC 362 eddig kevés átfogó vizsgálat tárgya volt, különös tekintettel a halmaz centrális vidékeire. Noha az első változócsillagokat már Sawyer 1931-es munkája is bemutatta, a legelső, teljességre törekvő változó-felmérést jelen értekezés tartalmazza. A legutóbbi vizsgálatok is csupán nagy határfényességű szín-fényesség-diagramok elkészítését célozták meg. A gömbhalmazbeli változócsillagok katalógusa is csupán 16 bejegyzést tartalmaz, amelyek nagy része távol van a halmaztól és bizonytalan paraméterűek.

A gömbhalmazok elméleti modelljei szerint az őket alkotó csillagok ugyanabból a gázfelhőből születtek hozzávetőlegesen ugyanabban az időben, ezért a halmazbeli csillagok fizikai tulajdonságai magát a halmazt reprezentálják. A legutóbbi időkben számos tapasztalati, kalibrált összefüggés látott napvilágot RR Lyrae típusú csillagokra, amelyek használatával meghatározható ezen változócsillagok fémessége, abszolút fényessége, vörösödése és más fizikai paramétere a fénygörbék alakjából. Értekezésemben bemutatom az NGC 362-ben lévő RR Lyrae csillagok analízisét, de emellett röviden kitérek más változócsillag-osztályokba tartozó égitestek tulajdonságaira is.

- A gömbhalmazok a Tejútrendszerünkben lévő legidősebb objektumok közé tartoznak, és csillagaik egyedülálló módon adnak betekintést a kozmikus időskálán zajló galaxisfejlődésbe. Ezek a halmazok a Tejútrendszer gravitációs potenciáljának érzékeny indikátorai, mivel a külső régiókban lévő csillagok radiális sebességeloszlását befolyásolja a Tejútrendszer környező gravitációs tere. Jelenlegi tudásunk szerint a gömbhalmazok jelentős dinamikai fejlődésen mentek keresztül. Ennek részei voltak olyan folyamatok is, amelyek a csillagok „elpárolgásáért” felelősek: árapályszerű kölcsönhatások a galaxissal és a kéttest-relaxáció. Legtöbb esetben a halmaz nagymértékben elnyújtott pályán kering a galaxis centruma körül. A perigalaktikus pont közelében lépnek fel a legerősebb gravitációs hatások, amelyek eredménye az árapály-nyúlványok kialakulását előidéző árapály-lökés.

A 3,9 méteres Angol-Ausztrál Távcsovön üzembe helyezett AAOmega multiobjektum-spektrográf kiváló lehetőségeket kínál 350-360 radiális sebesség mérésére egyetlen expozícióval. A nagy látómező (2 fok) lehetővé teszi olyan csillagok megfigyelését is, melyek az árapály-sugár többszörösére helyezkednek el a halmaztól. Az $1-2 \text{ km s}^{-1}$ sebességmérési pontossággal könnyedén beazonosíthatóak a halmaztól elszökött csillagok, amelyek azonos vagy nagyon hasonló radiális sebességűek, mint maga a gazdahalmaz.

Értekezésem 4. fejezetében bemutatom a halmaztag csillagok radiális sebességének analízisét a megfigyelt öt halmazban tapasztalt rendszerszintű forgás tekintetében.

- A GW UMa a pulzáló változócsillagok nagy amplitúdójú δ Scuti csoportjába tar-

tozik (az angol terminológia alapján High-amplitude δ Scuti star, HADS). Ezek az objektumok a fősorozathoz közeli, I-es populációs vagy elfejlődött II-es populációs csillagok lehetnek, ez utóbbiakat SX Phe változók néven is ismeri a szakirodalom. A fényváltozás oka radiális pulzáció rövid periódussal és viszonylag nagy amplitúdóval. Ezek a tulajdonságok teszik ezeket a csillagokat vonzó célpontokká kis és közepes méretű távcsövek számára. A mérések célja lehet evolúciós hatások kimutatása, illetve a feltételezett kettős nagy amplitúdójú δ Scuti csillagok fizikai paramétereinek pontosítása a kettősség segítségével.

A δ Scuti típusú pulzáló csillagok egyik legfrissebb katalógusában számos objektum tartozik kettős vagy többszörös rendszerek közé. Ezek közül csupán néhány csillag tagja fedési kettős rendszereknek. A fedési kettős rendszerekbeli δ Scuti típusú pulzáló komponensek az asztroszeizmológia kívánatos célpontjai, mivel segítségükkel lehetőség nyílik a pulzációs módusok azonosítására az alapvető fizikai paraméterek meghatározásán keresztül. Egy másik érdekes lehetőség az árapályhatások tanulmányozása az oszcillációkra.

Értekezésem 5. fejezetében bemutatom a fedési kettős SZ Herculisra és a GW UMa-ra (nagy amplitúdójú δ Scuti) vonatkozó eredményeimet.

- Több mint 200 évvel az első fővbeli kisbolygó, az 1 Ceres felfedezése óta nagy mértékben automatizált és kellően érzékeny felmérések korábban elképzelhetetlen mennyiségben ontják a frissen felfedezett kisbolygókat. A folyamat jelenleg is egyre gyorsul, és a megfigyelések a leghalványabb, így legkisebb kisbolygók birodalmát ostromolják. A mások oldalról viszont a megfigyelt objektumok nagy száma erős korlátokat jelent ezeknek az égitestek esetében azok fizikai tulajdonságainak meghatározásában és megértésében. Ezek az újonnan felfedezett kisbolygók minden különösebb figyelem felkeltése nélkül kerülnek bele az elektronikus katalógusokba: a naprendszerbeli égitestek egyre nagyobb hányadát ismerjük meg anélkül, hogy a megfigyelhető tulajdonságaikról (pl. forgás, alak) információt szereznénk. A fentebb említett tényekből kifolyólag egy új megfigyelési terület alakult ki, amelyhez egy kisebb főiskolai/egyetemi obszervatórium, vagy akár még egy megfelelő eszközökkel rendelkező, jól felszerelt amatőr csillagász is jelentős hozzájárulást tud nyújtani: a közepesen halvány és kisméretű aszteroidák felfedezést követő fotometriai megfigyelésének területe.

Értekezésem 6. fejezetében 23 kisbolygó esetében végzett, új fotometriai megfigyeléseim eredményeit mutatom be.

2. Kutatási módszerek

Munkám során számos obszervatórium műszerét használtam. A gömbhalmaz-fotometriai vizsgálatokat az ausztráliai Siding Spring Obszervatóriumban található, 1 méteres távcsővel végeztem, amely az Ausztrál Nemzeti Egyetem (ANU) műszere. A kisbolygókra, illetve változócsillagokra vonatkozó fotometriai adatokat a Szegedi Csillagvizsgáló 0,4 méteres Cassegrain-távcsövével és a Magyar Tudományos Akadémia Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete Piskéstetői Obszervatóriumában található 60/90/180 cm Schmidt-távcsővel rögzítettem.

Spektroszkópiai úton meghatároztam öt, az NGC 362 jelű gömbhalmazban lévő, RR Lyrae típusú csillag radiális sebességeit is a pulzációs fázis során. Ehhez az ANU 2,3 méteres Advanced Technology Telescope-ján lévő Double Beam Spectrograph nevű műszert vettem igénybe.

A 3,9 méteres Angol-Ausztrál Távcsövön üzembe helyezett AAOmega multiobjektum-spektrográffal összességében több mint 10500 csillag spektrumát rögzítettük. A megfigyelés során kapott nyers spektrumok redukálása a standard 2dF adatfeldolgozó csomaggal történt.

A fotometriai adatok feldolgozása standard IRAF rutinokkal történt. A gömbhalmaz képeinek kiértékelésére egyrészt PSF-fotometriát használtam (az IRAF *daophot* csomagja), másrészt képkivonási technikát alkalmaztam. A standard fotometriai kalibrációkhoz különböző Landolt-mezőket észleltem. A standard transzformációs koefficienseket az IRAF *photcal* taszkja segítségével határoztam meg. A radiális sebességeket keresztkorrelációs módszerrel számítottam ki.

A PSF-illesztésből és a képkivonási eljárásból származó fénygörbéket több módszerrel is vizsgáltam lehetséges fényváltozási periódusok detektálása érdekében. Ehhez a következő eljárásokat használtam: Fourier-analízis, fázisdiszperziós módszer, füzérhossz-minimalizálás.

Munkám során nagy segítséget jelentettek az általam írt C nyelvű programok és shell scriptek.

3. Tézispontok

1. PSF- és képkivonásos fotometriát alkalmazva az általam rögzített CCD-felvételeken 45 RR Lyrae változócsillagot találtam az NGC 362 látómezejében, ezek közül 28 új felfedezés. A képkivonásos technika során eredményül kapott fluxusgörbéket egy egyszerű, általunk kidolgozott eljárással átkonvertáltam magnitúdó-görbéké. Ez lehetővé tette az RR Lyrae csillagok számára a szakirodalomban létező empirikus fénygörbealak és fizikai paraméterek közti kalibrációk használatát. Ezek segítségével meghatároztam 16 RR Lyrae csillagra a fémességet, hőmérsékletet, abszolút fényességet, luminozitást, vörösödést, távolságot.

Az RR Lyrae csillagok között - mind az RRab, mind az RRc altípus esetében - viszonylag nagy arányban találtam modulált fénygörbéket, azaz a Blazskó-effektus jelenlétét. Az NGC 362 ezért kiváló célpontja lehet a Blazskó-effektus vizsgálatára kémiaailag homogén környezetben.

Izokrón illesztéssel szintén meghatároztam a halmaz fő paramétereit. Mind az RR Lyrae csillagok, mind a szín-fényesség-diagram analízise konzisztens fizikai paraméterekre vezetett, melyek jó egyezésben vannak a szakirodalomban fellelhető értékekkel: a $[Fe/H]$ értéke $-1,34$, a halmaz távolsága $8,5$ kpc, míg a kora 11 milliárd évnek adódott.

Nagyszámú, egyéb osztályba tartozó változócsillagokat fedeztem fel: cefeidákat, a Kis Magellán-felhőben lévő, hosszú periódusú változókat, fedési ket-tősöket, a galaktikus mezőben lévő, δ Sct típusú pulzáló csillagokat (Székely és mktsai, 2005; Székely és mktsai, 2006a; Székely és mktsai, 2006b; Székely és mktsai, 2007).

2. Közel 10500 csillagra vettünk fel közepes felbontású, közeli infravörös spektrumokat öt, a déli égbolton található gömbhalmazban és azok környezetében a 3,9 méteres Angol-Ausztrál Távcsövön a közelmúltban üzembe helyezett, AAOmega nevű multiobjektum-spektroszkóppal. A kiválasztott gömbhalmazok a következők voltak: 47 Tuc, M12, M30, M55 és NGC 288. A radiális sebesség-mérés pontossága keresztkorrelációs módszerrel $\pm 1 \text{ km s}^{-1}$ körüli, emellett szintetikus modellspektrumok illesztésével minden csillagra megbecsültük a fémességet, az effektív hőmérsékletet, a felszíni gravitációt és a forgási sebességet. A sebesség-térképek és a halmaztag csillagokra vonatkozó sebesség diszperziók általam végzett analízise felfedte négy halmaz esetében a rendszer forgását (Kiss és mktsai, 2007a; Székely és mktsai, 2007b).
3. A GW UMa csillagra vonatkozó analízisem megmutatta, hogy a csillag nagy valószínűséggel monoperiodikus. Az R_{21} Fourier amplitúdó paraméter a nagy amplitúdójú δ Scuti (HADS) objektumok közé helyezi a csillagot, ezzel kizártam az első vagy második felhangú RR Lyrae pulzáció lehetőségét. Ezen kívül 8 új maximumidőpontot határoztam meg. Az O–C értékek alapján lehetséges, hogy egy enyhe periódus változás történt az elmúlt évtizedben (Derekas és mktsai, 2002; Derekas és mktsai, 2003a; Derekas és mktsai, 2005).
4. Az Algol-típusú SZ Herculis fedési kettősre vonatkozó új, *VRI* szűrős, CCD-fotometriai méréseim alapján 4 új epochát számítottam ki az elsődleges minimumok esetében. Nem detektáltam rövid időskálájú fényváltozást, ami pulzáló komponens(ek) jelenlétére utalna. Az O–C diagram alapján az SZ Her esetleg egy harmadik komponenssel is rendelkezik (Székely, 2003).
5. Elvégeztem 23 közepes és kisméretű fővbeli kisbolygó *R*-szűrős és szűrő nélkül felvett CCD-fotometriai vizsgálatát. Ezek közül 8 objektumra korábban nem volt szakirodalmi adat. 17 égitest mutatott jól detektálható fényességváltozást. A kompozit fénygörbékből 7 kisbolygó esetében meghatároztam a szinodikus forgási periódusokat. 3 égitest esetében megbecsültem a forgási periódust, a többi objektumra vonatkozóan csak a forgási paraméterek alsó korlátjainak megadása volt lehetséges. Két esetben (894 Erda, 3682 Welther) gyors fényességváltozást találtam, ami a sokkal lassabb, forgás általi változásokra rakódott. Ennek oka lehet az esetleges kettősség (Székely, 2002; Székely és mktsai, 2005).

1. **Székely, P.**; Kiss, L. L.; Szatmáry, K.; Csák, B.; Bakos, G. Á.; Bedding, T. R.:
Radial velocities of five globular clusters obtained with AAOmega
Astronomische Nachrichten, Vol. 328, Issue 8, p. 879-882 (2007b)
2. Kiss, L. L.; **Székely, P.**; Bedding, T. R.; Bakos, G. Á.; Lewis, G. F.:
A Wide-Field Kinematic Survey for Tidal Tails around Five Globular Clusters
The Astrophysical Journal, Volume 659, Issue 2, pp. L129-L132. (2007a)
3. **Székely, P.**; Kiss, L. L.; Jackson, R.; Derekas, A.; Csák, B.; Szatmáry, K.:
RR Lyrae stars in the southern globular cluster NGC 362
Astronomy and Astrophysics, Volume 463, Issue 2, February IV 2007, pp. 589-600. (2007)
4. **Székely, P.**; Kiss, L. L.; Szabó, Gy. M.; Sárneczky, K.; Csák, B.; Váradi, M.; Mészáros, Sz.:
CCD photometry of 23 minor planets
Planetary and Space Science, Volume 53, Issue 9, p. 925-936. (2005)
5. **Székely, P.**:
A CCD Photometric Search for Pulsations in SZ Her
Information Bulletin on Variable Stars, 5467, 1. (2003)
6. 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.:
A photometric monitoring of bright high-amplitude δ Scuti stars. II. Period updates for seven stars
Astronomy and Astrophysics, v. 402, p. 733-743. (2003a)

1. **Székely, P.;** Jackson, R.; Kiss, L. L.; Szatmáry, K.:
A survey of variable stars in the globular cluster NGC 362
Proceedings of the 4th Workshop of Young Researchers in Astronomy & Astrophysics Budapest, Hungary, 11-13 January, 2006. Publications of the Astronomy Department of the Eötvös University (PADEU) Edited by E. Forgács-Dajka, ISBN 963 463 557, ISSN 0238-2423, Vol. 17., p. 127 (2006a)
2. **Székely, P.:**
A comprehensive survey of variable stars in the globular cluster NGC 362
Astrophysics of Variable Stars, ASP Conference Series, Vol. 999, 349, 343 (2006b)
3. Derekas, A.; Kiss, L. L.; Csák, B.; Griffin, J.; Lindstrom, C.; Mészáros, Sz.; **Székely, P.;** Ashley, M. C. B.; Bedding, T. R.:
Binarity and multiperiodicity in high-amplitude δ Scuti stars
Workshop on Stellar Pulsation and Evolution, Rome, June 2005
Memorie della Societa' Astronomica Italiana, Vol. 77, 517
4. **Székely, P.;** Kiss, L. L.; Csák, B.; Derekas, A.; Bedding, T. R.; Szatmáry, K.:
A comprehensive survey of variable stars in the globular cluster NGC 362
Workshop on Stellar Pulsation and Evolution, Rome, June 2005
Memorie della Societa' Astronomica Italiana, Vol. 77, 346
5. **Székely, P.:** Photometry of selected asteroids
Proc. of "Meeting on Asteroids And Comets in Europe", Visnjan, Croatia, 17–19 May 2002
6. Derekas, A., **Székely, P.;** Kiss, L. L.; Szatmáry, K.; Mészáros, Sz.:
Photometric survey of the brightest northern high amplitude δ Scuti stars
Proc. of "International Meeting on Variable Stars", Bourbon-Lancy, France, August 2002; Ed. J. Minois, Burillier Publ. (Vannes), p. 159-164