

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
Természettudományi és Informatikai Kar
Kísérleti Fizikai Tanszék
Csillagász szak

DIPLOMAMUNKA

Az RZ Lyrae pulzációs és modulációs tulajdonságainak
változása hosszú távú megfigyelések alapján

Készítette: Dózsa Ákos

Témavezető: Dr. Jurcsik Johanna
MTA Konkoly Thege Miklós
Csillagászati Kutatóintézet

Konzulens: Dr. Szatmáry Károly
SZTE TTIK Kísérleti Fizikai Tanszék

2012.

Tartalomjegyzék

Kivonat	vi
1. Bevezetés	1
1.1. Történeti előzmények	1
1.2. RR Lyrae típusú változócsillagok	2
1.2.1. Gerjesztő mechanizmus	2
1.3. A Blazhko-effektus	4
1.4. RZ Lyrae	5
2. Az adatfeldolgozás eszközei	7
2.1. Fourier-analízis	7
2.2. $O - C$ diagram - a periódusváltozás mérőeszköze	9
3. A megfigyelési anyag	12
3.1. Fotografikus megfigyelések	12
3.1.1. Fotografikus képrögzítés, alapfogalmak	13
3.1.2. Fotolemezek digitalizálása	14
3.1.3. Fotometria a digitális feketedési görbe alapján	15
3.2. Fotoelektromos mérések	16
3.3. CCD megfigyelések	20
3.3.1. CCD képrögzítés és alapfogalmak	20
3.3.2. CCD fotometria	21
4. A fénygörbék analízise	23
4.1. 1. csoport fénygörbe analízise	25
4.2. 2. csoport fénygörbe analízise	29

4.3. 3. csoport fénygörbe analízise	33
4.4. 4. csoport fénygörbe analízise	35
4.4.1. Fénygörbeváltozás a Blazhko-moduláció alatt	43
5. Az RZ Lyrae $O - C$ diagramja	45
5.1. Maximum időpontok meghatározása	45
5.2. Hosszú távú változások vizsgálata	46
Összefoglalás	56
Köszönetnyilvánítás	57
Nyilatkozat	58
Irodalomjegyzék	59

Táblázatok jegyzéke

1.1. Az RR Lyrae csillagok fizikai tulajdonságai	2
3.1. Összehasonlító csillagok a fotografikus mérésekhez	17
3.2. Fotoelektromos észlelések a Konkoly Obszervatóriumban	18
3.3. Távcsőkonstansok a fotoelektromos mérések idején	18
3.4. Összehasonlító csillagok a fotoelektromos és CCD-s mérések idején . . .	19
4.1. Az RZ Lyrae-ről összegyűjtött fotometriai anyag	24
5.1. Az RZ Lyrae maximum időpontjainak összefoglaló táblázata	46
5.2. Pulzációs periódusok az $O - C$ meredekségekből	48
5.3. Az RZ Lyrae pulzációs és modulációs periódusai az 1 – 4. csoportok alapján	54

Ábrák jegyzéke

1.1. Pulzáló változócsillagok a Hertzsprung–Russell diagramon	3
2.1. Példák $O - C$ diagramra	10
3.1. Részlet egy beszkenelt fotolemezeiről	13
3.2. Digitális feketedési görbék	16
3.3. Összehasonlító csillagok a fotoelektromos és CCD mérések idején	19
4.1. Az 1. csoport ablakfüggvénye és spektruma	26
4.2. Az 1. csoport pulzációs periódussal feltekert fénygörbéje	27
4.3. Részlet az 1. csoport fehérített spektrumáról	28
4.4. Az 1. csoport maximumainak ablakfüggvénye és spektruma	28
4.5. Az 1. csoport adatsora és maximum fényességei a Blazhko-periódussal feltekerve	29
4.6. A 2. csoport ablakfüggvénye és spektruma	30
4.7. A 2. csoport pulzációs periódussal feltekert fénygörbéje	31
4.8. Részlet a 2. csoport. fehérített spektrumáról	32
4.9. A 2. csoport maximumainak ablakfüggvénye és spektruma	32
4.10. A 2. csoport adatsora és maximum fényességei a Blazhko-periódussal feltekerve	33
4.11. A 3. csoport ablakfüggvénye és spektruma	34
4.12. A fotoelektromos mérések pulzációs periódussal feltekert fénygörbéje	35
4.13. A 3. csoport maximumainak ablakfüggvénye és spektruma	36
4.14. A 3. csoport adatsora és maximum fényességei a Blazhko-periódussal feltekerve	36
4.15. A 4. csoport ablakfüggvénye és spektruma	38

4.16. A 4. csoport pulzációs periódusával feltekert fénygörbe	38
4.17. A 4. csoport pulzációs periódusával fehérített fénygörbe	39
4.18. A 4. csoport tojásgörbéje	39
4.19. Részlet a 4. csoport fehérített spektrumáról	40
4.20. A 4. csoport adatsora és maximum fényességei a Blazhko-periódussal feltekerve	41
4.21. Másodmoduláció a 4. csoport fehérített spektrumában	42
4.22. A <i>CCD</i> maximum magasságának változása	42
4.23. Fénygörbeváltozás a Blazhko-periódus alatt	43
4.24. Fényesség és szín a kis amplitúdójú Blazhko-fázisban	44
5.1. Az RZ Lyrae $O - C$ diagramja	47
5.2. Pulzációs periódus változása az $O - C$ meredekségek alapján	48
5.3. A fotografikus és <i>CCD</i> -s időszak $O - C$ diagramja	49
5.4. $O - C$ változása a Blazhko-periódus alatt <i>CCD</i> -s megfigyelések idején .	50
5.5. Maximum magasságok változása az $O - C$ függvényében	51
5.6. Az RR Gem $O - C$ diagramja	52
5.7. Az RR Gem pulzációs és modulációs periódusváltozása	53
5.8. Az RV Uma $O - C$ diagramja	53
5.9. Az RV Uma pulzációs és modulációs periódusváltozása	53
5.10. Az XZ Dra $O - C$ diagramja	54
5.11. Az XZ Dra pulzációs és modulációs periódusváltozása	54
5.12. A modulációs periódus a pulzációs periódus függvényében	55

Kivonat

A Magyar Tudományos Akadémia Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézetében végeztem kutatásokat 2010 és 2012 között. Témavezetőm, Dr. Jurcsik Johanna által vezetett csoport az RR Lyrae típusú pulzáló változócsillagok pulzációs és modulációs periódusainak hosszú távú viselkedését vizsgálja. Egy 2010-ben indult kutatásba kapcsolódtam be, melynek célpontja az RZ Lyrae, egy *RRab* típusú pulzáló változócsillag. A csillagról az elmúlt 60 év során fotografikus, fotoelektromos mérések készültek az intézetben, melyet 2010-től CCD-s mérésekkel egészítettek ki. Az így rendelkezésre álló adatsor hossza elegendő lehet a hosszú távú viselkedés tanulmányozásához. Feladatom a csillagról elérhető adatsorok összegyűjtése, feldolgozása, értelmezése volt. Az RZ Lyrae hosszú távú vizsgálatáról készült cikk 2012-ben került elfogadásra.

Dolgozatomban az RR Lyrae-k történetéről, általános tulajdonságaikról és periodikus viselkedésükről adok leírást, majd bemutatom az adatsorok vizsgálatához szükséges eszközöket: a Fourier-analízist és az $O-C$ diagramot. Említést teszek a különböző fotometriai módszerekről és azok feldolgozásáról. Ezt követően részletezem a periódusvizsgálatból feltárt eredményeket. Végül a hosszú távú megfigyelésekből levonható következtetésekről lesz szó.

Kulcsszavak: horizontális ág - pulzáció - Blazhko-effektus - RZ Lyrae - fotometria - Fourier analízis - O-C diagram

1. fejezet

Bevezetés

1.1. Történeti előzmények

Az első RR Lyrae típusú változót valószínűleg D. E. Packer (1890) fedezte fel. Két változót észlelt az M5 gömbhalmazban, melyek egyikéről már tudjuk, hogy egy 26 napos periódusú Cefeida. S. I. Bailey gyanította, hogy a Packer által megfigyelt csillagok egyike RR Lyrae típusú (Bailey, 1917). Bailey az 1890-es évektől többszáz változót fedezett fel gömbhalmazokban és mivel a kezdeti felfedezések mind gömbhalmaz vizsgálata során születtek, a halmazváltozó elnevezést kapták. Az első mezőbeli RR Lyrae típusú változócsillagot, az U Leporist J. C. Kapteyn (1890) észlelte, melynek periódusát később 0.58 napban állapították meg. W. P. Fleming 1899 júliusában a Lyra csillagkép egy 7 magnitúdós csillagának változásait figyelte meg, melynek periódusa 0.56 nap (Pickering, 1901). Pickering megállapította, hogy a csillag fényváltozása nagy hasonlóságot mutat a halmazváltozókéval. Az *RR Lyrae* elnevezést kapta a csillag, mely az új változótípus névadója és legfényesebb képviselője is lett egyben.

Az RR Lyrae-eket eleinte egy úgynevezett *Antalgol*¹ típusba sorolták. Fényváltozásukat az akkor már ismert Algol típusú változókéhoz hasonlóan egy kísérő jelenlétével próbálták magyarázni. Elsőként Ritter (1879) vetette fel, hogy a fényváltozást a csillag pulzációja okozhatja. Később Shapley (1914) az RR Lyrae csillagok és a cefeidák fényváltozását már egyaránt a Ritter-féle pulzációval magyarázta.

¹Az *Algol* típusú változókéhoz hasonló fényváltozást mutattak, csak fordított fénygörbével.

periódus	P	$0,2 - 0,9 \text{ nap}$
vizuális magnitúdó	$\langle M_V \rangle$	$+0,6 \pm 0,2 \text{ mag}$
effektív hőmérséklet	$\langle T_{eff} \rangle$	$7400K - 5700 K$
felszíni gravitációs gyorsulás	$\langle \log g \rangle$	$2,5 - 3,0$
fémtartalom	$[Fe/H]$	$-3,0 - 0,0$
tömeg	M	$0,4 - 0,8 M_{\odot}$
sugár	R	$4 - 6 R_{\odot}$

1.1. táblázat. Az RR Lyrae csillagok fizikai tulajdonságai.

1.2. RR Lyrae típusú változócsillagok

Az RR Lyrae típusú változók idős, II. populációs csillagok. A sugár és felszíni hőmérséklet periodikus változása fényességváltozást okoz. A fényességváltozás nagy amplitúdójú, a pulzáció periódusa néhány tized naptól ~ 1 napig terjedő tartományba esik. Abszolút fényességük közel azonos, ezért standard gyertyákként használhatóak a távolságmérésben. Segítségükkel gömbhalmazok távolságát, a Tejútrendszer méretét, középpontjának távolságát, a szomszédos lokális csoport rendszer távolságát határozhatjuk meg. Általános fizikai paramétereik az 1.1. táblázatban van összefoglalva.

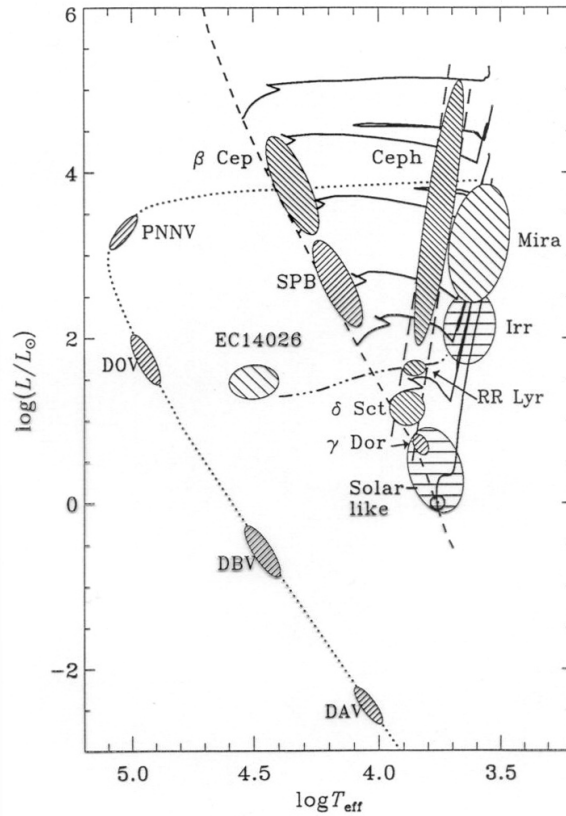
Az RR Lyrae változók a Hertzsprung–Russell-diagram horizontális ágának és az instabilitási sávnak a metszetében foglalnak helyet (1.1. ábra). Magjukban héliumot égetnek, míg a héjban hidrogén égés zajlik.

Az RR Lyrae változók osztályozása Bailey nevéhez fűződik. A kezdeti osztályozás a fénygörbéjük alapján történt meg, későbbiekben a fő besorolást az határozta meg, hogy alaplómódusban (*RRab*), első felhangon (*RRc*) pulzálnak vagy duplamódusúak, azaz alaplómódusban és első felhangon egyaránt pulzálnak (*RRd*). Számos RR Lyrae esetében a fázis és amplitúdó modulációját figyelték meg, melyről bővebben az 1.3 alfejezetben lesz szó.

1.2.1. Gerjesztő mechanizmus

Adiabatikus esetben, homogén gömbszimmetrikus csillagra levezethető a periódus-sűrűség reláció, másnéven pulzációs egyenlet:

$$P \cdot \sqrt{\bar{\rho}} = Q. \quad (1.1)$$



1.1. ábra. *Pulzáló változócsillagok a Hertzsprung–Russell diagramon.*

Forrás: Christensen-Dalsgaard (2003)

Ahol P a pulzáció periódusa, $\bar{\rho}$ az átlagos sűrűség, Q pulzációs konstans. Minél sűrűbb egy csillag anyaga, annál rövidebb a pulzáció periódusa. A csillagok pulzációja nemadiabatikus, azaz a mozgást végző tömegelem és környezete között energiacsere van.

Perturbáció hatására a csillag kimozdul egyensúlyi állapotából és a sajátfrekvenciájával rezgőmozgást végez az egyensúlyi helyzete körül, miközben igyekszik újra felvenni egyensúlyi állapotát. Ahhoz, hogy egy csillag pulzációja stabilan fennmaradjon, gerjesztő hatásra van szüksége. Az instabilitási sávban pulzáló csillagokat a légkör részlegesen ionizált H- és He-zónái gerjesztik. Az ionizált zónák viszonylag közel helyezkednek el egymáshoz, köztük a részlegesen ionizált réteg található. Ennek ionizáltsági fokában történik változás, melynek eredményeként energiát tud eltárolni és azt később kibocsátani.

A gerjesztés folyamatát a κ - és γ -mechanizmus magyarázza. A Kramer opacitási törvény értelmében a hőmérséklet növekedésével az opacitás csökken. A növekvő

hőmérséklet azonban megváltoztatja a légkör ionizáltsági fokát, így a hőmérséklet növekedésével a réteg opacitása is növekszik. Emiatt a réteg energiát tud elnyelni, mely a tágulása során munkát végez környezetén. Ez a κ -mechanizmus. Az eltárolt energia kisugárzása után a hőmérséklet, ezáltal a nyomás is csökken, a csillag összehúzódásba kezd. Összehúzódás folyamán az energia egy része ionizációra fordítódik, ezáltal megnő a rétegek energiátárolási kapacitása. Ezt a folyamatot hívjuk γ -mechanizmusnak.

Ionizált zónákat minden csillagban találhatunk. Pulzációra akkor képes egy csillag, ha ezek a zónák megfelelő mélységben vannak. Az instabilitási sáv kék határán olyan magasan vannak, hogy ott már nem képesek pulzáció keltéséhez elegendő energiát elnyelni, tárolni. A vörös oldalon a zónák túl mélyen vannak, a felszabaduló energia hamarabb elnyelődik a konvektív zónában, minthogy az pulzációt gerjeszthetne.

1.3. A Blazhko-effektus

Elsőként S. Blazhko (1907) figyelt fel arra, hogy az RW Draconis maximumának fázisa 41,6 napos periódussal oszcillál. Shapley (1916) az RR Lyrae-t vizsgálta és a fénygörbéjéből kimutatta, hogy a fényváltozás fázisa és amplitúdója is modulált. A két moduláció együttesét Blazhko-effektusnak hívjuk. Az elmúlt több, mint 100 évben számos elméleti modell született az RR Lyrae változók Blazhko-effektusáról, ám a jelenség valódi természete máig tisztázatlan, még nem született olyan elmélet, mely a jelenségre kielégítő magyarázatot adna. Az alábbi modellekkel próbálták magyarázni a Blazhko-effektust.

Rezonancia-modell: A Blazhko-effektust a radiális módushoz nem lineárisan csatolódó nem radiális módus gerjesztődésével magyarázza (Nowakowski & Dziembowski, 2001).

Ferde mágneses rotátor-modell: A ferde mágneses rotátor-modellt elsőként Balázs-Detre (1959) vetette fel. A dipól mágneses tér mentén a csillag fizikai paramétereinek gömbszimmetrikus eloszlása torzul, emiatt a radiális módus mellett nem-radiális komponensek is megjelennek (Cousens, 1983; Shibahashi, 2000). Ha a mágneses tengely a forgástengellyel szöget zár be, akkor a csillag forgása során a pulzációs fényváltozás modulációját figyelhetjük meg. Ezt a gyorsan oszcilláló Ap (roAp) csil-

lagokra vonatkozó megfigyelések jól alátámasztják. Korábban az elmélettel szembeni ellenérv az volt, hogy nem sikerült a Fourier-spektrumban a mágneses rotátor modell által jósolt kvintuplet szerkezetet kimutatni (Kovács, 1995). Elsőként az RV UMa-nál sikerült kimutatni a kvintuplet szerkezetet (Hurta et al., 2008).

Periodikus perturbációk a konvektív burokban: A modell periodikus perturbációkat feltételez a csillag konvektív burkában (Stothers, 2006). Az ilyen perturbációk a mágneses térrel változnak, amelyet egy turbulens dinamó épít fel, majd a tér elbomlik. Mindez periodikusan történik, ami a pulzációs fénygörbe-modulációjához vezet.

Periódus duplázódás: Az alaplómódus és a 9. felhang közötti 9 : 2 rezonanciával magyarázza az effektust (Szabó et al., 2011). Továbbá Buchler & Kolláth (2011) vizsgálatai azt is kimutatták, hogy nem csak Blazhko-effektust okozhat a rezonancia, hanem szabálytalan (kaotikus) modulációt is.

A legújabb vizsgálatok arra utalnak, hogy a rezonancia-modell nem okoz modulációs effektust. Számos esetben találtak multiperiodikusan modulált Blazhko-csillagot (CZ Lac: Sódor et al., 2011; UZ UMa: Sódor et al., 2006), amely a mágneses rotátor-modell szembeni ellenérv lehet, hiszen az a csillag forgásához köti a moduláció megjelenését. Stothers elméletével az a gond, hogy nehezen belátható, hogy egy szabályos, periodikus folyamat hosszú távon képes lenne fennmaradni szabálytalan, egymástól független fizikai folyamatok gerjesztése által (Molnár et al., 2012; Smolec et al., 2011).

1.4. RZ Lyrae

Az RZ Lyrae fotometriai megfigyelése a 20. század elején kezdődött. A csillagot Williams A. S. (1903) fedezte fel. Ezt követően számos vizuális (Batyrev 1951, 1952; Tsessevich 1953, 1958; Klepikova 1958; Belik 1969; Romanov 1969; Bogdanov 1972; Zverev & Makarenko 1979) és fotoelektromos (Fitch 1966; Sturch 1966; Butler 1982) észlelést publikáltak. További fotografikus és fotoelektromos mérések vártak feldolgozásra a Magyar Tudományos Akadémia Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézetben (MTA KTM CSKI).

A Blazhko-effektus tanulmányozásához ideális célpont az RZ Lyrae ($\langle V \rangle = 11.7$ mag, $P = 0.511$ nap, $\alpha_{2000} = 18^h 43^m 37^s.9$, $\delta_{2000} = +32^\circ 47' 53.9$). Tsessevich (1953) nagy

amplitúdójú, viszonylag hosszú periódusú (~ 116 nap) Blazhko-modulációt határozott meg. Amennyiben a pulzációs és modulációs periódusok között kapcsolat van, úgy a Le Brogne et al. (2007a) által meghatározott szabályos perióduscsökkenésből ($\alpha = P^{-1}dP/dt = -0.367 Myr^{-1}$) várható, hogy az RZ Lyrae modulációs periódusa sem mutat szabálytalan változást. 2010-ben a Dr. Jurcsik Johanna által vezetett csoport az RZ Lyrae CCD-s méréseibe kezdett, hogy kiderítsék, kimutatható-e egyértelmű kapcsolat a pulzáció és a moduláció periódusváltozása között, valamint, hogy feltárják a pulzációs periódus alatt a fizikai paraméterekben bekövetkező főbb változásokat.

2. fejezet

Az adatfeldolgozás eszközei

2.1. Fourier-analízis

A csillagok fényváltozásaiban mutatkozó periodikus jelek kimutatására a Fourier-analízist használjuk. Általában bármilyen periodikus folyamat ($f(t) = f(t + T) \forall t$ -re) egyértelműen előállítható olyan, megfelelő amplitúdójú és fázisú harmonikus rezgések összegeként, melynek körfrekvenciái a rezgés körfrekvenciája és ennek egész számú többszörösei:

$$f(t) = A_0 + A_1 \sin(\omega t + \alpha_1) + A_2 \sin(2\omega t + \alpha_2) + \dots + A_n \sin(n\omega t + \alpha_n) + \dots$$
$$f(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \cos(k\omega t) + B_k \sin(k\omega t)), \quad (2.1)$$

ahol $\omega = 2\pi/T$, k a sorfejtés rendje. Ha a vizsgált függvény nem periodikus, akkor a Fourier-integrált használjuk:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega. \quad (2.2)$$

Számunkra $f(t)$ ismert, $F(\omega)$ ismeretlen. $F(\omega)$ -t a Fourier-transzformáció állítja elő:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt. \quad (2.3)$$

Ezek az egyenletek folytonos függvényekre alkalmazhatóak.

A gyakorlatban változócsillagok megfigyeléseinél nem folytonos adatsorral rendelkezünk, csak diszkrét időpontokban ismerjük a fényességértéket. Ha egy képzeletbeli végtelen hosszú adatsorunk lenne egy tökéletesen szabályosan pulzáló csillagról, akkor annak a Fourier-spektruma csak diszkrét nulla szélességű csúcsokat mutatna a pulzáció

és annak felharmonikusainak frekvenciáinál. Gyakran a mintavételezés sem egyenletes. A napszakok váltakozása, a csillag szezonális láthatósága, időjárás változása és a különböző expozíciós idők közötti üres idők miatt csak diszkrét időpontokhoz tartozó értékekkel rendelkezünk. Az ilyen adatsorokra a Diszkrét Fourier-transzformációt alkalmazzuk (DFT).

$$F(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N f_k(t_k) e^{-i\omega t_k}, \quad (2.4)$$

ahol t_k a mérési pontok mérési ideje. Ez a mintavételezett jelek közelítő becslése. Érvényes a Shannon-féle mintavételezési törvény, mely szerint a mintavételi frekvenciának nagyobbak kell lennie, mint a jelben előforduló legnagyobb frekvencia kétszerese. Ezáltal a jel teljes információtartalmát visszanyerhetjük. Az így meghatározott felső határfrekvencia, másnéven Nyquist-frekvencia:

$$f_f = \frac{1}{2\Delta t} \quad (2.5)$$

Általában nem végtelen adatsorral rendelkezünk, a keresett periódus hosszát az adatsorunk hossza (T) határozza meg:

$$f_a = \frac{1}{T} \quad (2.6)$$

Mivel az adatsorunk nem folytonos, hanem diszkrét pontokból áll, a szünetek megjelenésében periodicitások mutatkozhatnak, mely azt eredményezi, hogy a Fourier-spektrum zajos lesz és hamis csúcsok, úgynevezett *alias* csúcsok jelennek meg. Az adatsor véges hossza miatt pedig az egyes csúcsok kiszélesednek. Ha a csillag pulzációja nem tökéletesen periodikus, esetleg periódusváltozást szenved (pl.: RR Gem, Sódor et al., 2007), akkor az tovább bonyolítja a spektrumot.

A valódi csúcsok körüli aliasok elhelyezkedését az *ablakfüggvény* írja le. Az ablakfüggvény a vizsgálandó adatsorral azonosan mintavételezett időpontoknak a Fourier-spektruma, mely páros függvény, negatív frekvenciákra is értelmezett. Egységnyi amplitúdójú csúcsa nullánál van. A további csúcsok a mintavételezésre jellemző módon jelennek meg. A leggyakoribb ilyen csúcs az 1 naphoz tartozó csúcs, hiszen a méréseket éjszakánként végezzük. Hosszú, több évet átfogó észleléssorozat esetén a csillag szezonális láthatósága miatt az 1 éves periódus is megjelenik.

A diszkrét Fourier-analízisről és annak matematikai hátteréről bővebben Deeming munkájában olvashatunk (Deeming, 1975).

Moduláció megjelenése a spektrumban

A Fourier-analízissel nem csak a pulzáció komponensei határozhatók meg, hanem a pulzáció mellett megjelenő moduláció is kimutatható. Egy modulált harmonikus jel spektrumában a triplet, kvintuplet,... $(if_0 \pm jf_m)$ szerkezet valamint a Blazhko-frekvencia felharmonikusai (kf_m) jelennek meg. A modulált fénygörbét leíró egyenlet:

$$m(t) = m_0 + \sum_{k=1}^l b_k \sin(k\Omega t + \varphi_{bk}) + \sum_{i=1}^n [a_i \sin(i\omega t + \varphi_i) + \sum_{j=1}^{l_i^+} a_{ij}^+ \sin(i\omega t + j\Omega t + \varphi_{ij}^+) + \sum_{j=1}^{l_i^-} a_{ij}^- \sin(i\omega t - j'\Omega t + \varphi_{ij}^-)]. \quad (2.7)$$

Ahol $\omega = 2\pi f_0$, m_0 az átlagfényesség, a, b amplitúdók, $\sum_{k=1}^l b_k \sin(k\Omega t + \varphi_{bk})$ az átlagos fényességváltozás a Blazhko-periódus alatt. Trigonometrikus azonosságokkal a 2.7 egyenlet átalakítható a következő formulára:

$$m(t) = m_0 + \sum_{k=1}^l b_k \sin(k\Omega(t) + \varphi_{bk}) + \sum_{i=1}^n [a_i + f_{A_i}(t)] \sin[i\omega t + \varphi_i + f_{F_i}(t)]. \quad (2.8)$$

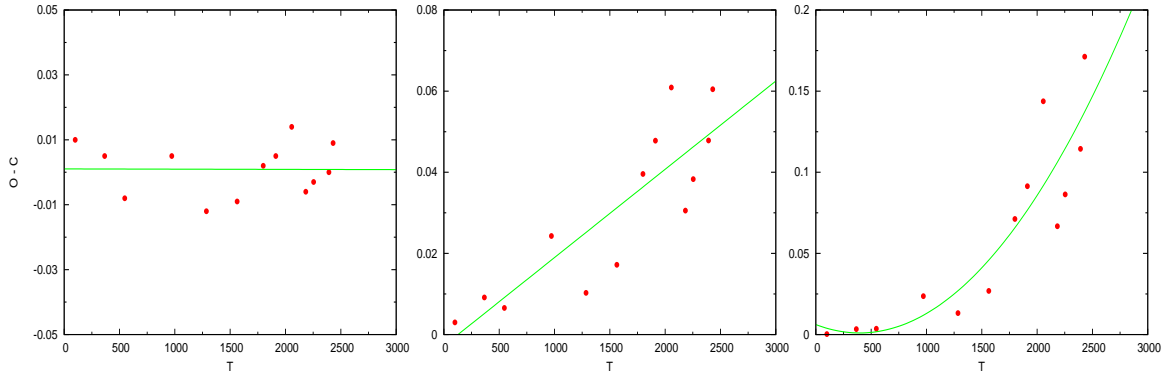
φ -k epochafüggő konstansok, $f_{A_i}(t)$ és $f_{F_i}(t)$ a pulzáció i -edik harmonikusának amplitúdó és fázismodulációját leíró függvényei, melyek csak $\Omega(t) = 2\pi f_m t$ -től és konstans paraméterektől függenek. A 2.7 és 2.8 egyenletek ekvivalensek egymással, így a modulált fénygörbe leírására egyaránt alkalmasak (Szeidl et al., 2012).

A modulációs csúcsok elhelyezkedése nem feltétlenül szimmetrikus és eltérhet a csúcsok amplitúdója is. Ha a csillag pulzációs és Blazhko-s viselkedésében szabálytalan változások történnek az tovább bonyolíthatja a spektrumot.

2.2. $O - C$ diagram - a periódusváltozás mérőeszköze

A Fourier-analízis rettentően számításigényes művelet. Az 1970-es évektől, a számítógépek elterjedésével vált egyre népszerűbbé. A Fourier-analízis alkalmazásának bevezetéséig a periódusváltozás vizsgálat egyedüli, meghatározó mérőeszköze az $O - C$ diagram volt, mely a csillag periódusában bekövetkező hosszú távú viselkedést vizsgálja. A módszer a pulzáció egy jellegzetes eseményének¹ egymás után történő bekövetkezését

¹Általában maximum időpontot vagy felszálló ág közepéhez tartozó időpontot, fedési kettősöknél minimum időpontot választanak.



2.1. ábra. *Példák $O - C$ diagramra.* Az ábrán három mesterségesen generált adatsor $O - C$ diagramja látható. A bal oldali ábra konstans, az elfogadott periódussal megegyező valódi periódust mutat. A középső ábra szintén konstans periódust mutat, azonban a valódinál rövidebb elfogadott periódust feltételezve. A jobb oldali ábra azt mutatja, hogy az elfogadott periódushoz képest a valódi periódus növekszik.

vizsgálja. Az O (observed) a megfigyelt időpont, míg a C (calculated) egy kalkulált időpontot jelent. A kalkulált (jelen esetben maximum) időpontot konstans periódust feltételezve számítjuk ki:

$$t_{max} = t_0 + E \cdot P_e, \quad (2.9)$$

ahol t_0 az efemerisz kezdőpontja, egy megfigyelt (maximum) időpont, P_e az elfogadott periódus, E az epochaszám, az efemerisz óta eltelt ciklusok száma. A két időpont különbségének ($O - C$) vizsgálata lehetőséget nyújt a periódusváltozás tanulmányozására.

$$O - C = \int P(E)dE - EP_e = \frac{1}{P_e} \int P(t)dt - t, \quad (2.10)$$

Az $O - C$ pontokra történő polinom illesztéssel

$$O - C = \sum_{i=1}^k c_i t^{i-1} \quad (2.11)$$

megkapjuk azokat a c_i együtthatókat, melyekkel meghatározhatjuk a pillanatnyi periódust:

$$P(t) = P_e \sum_{i=2}^k (i-1)c_i t^{i-2} + P_e. \quad (2.12)$$

Ebből látszik, hogy lineáris $O - C$ konstans periódust, parabolikus $O - C$ lineáris periódusváltozást jelent. Hasonló módon kimutatható, hogy periodikus $O - C$ periodikus periódusváltozásra utal. Lineáris $O - C$ esetén az egyenes meredeksége mutatja

meg, hogy az általunk használt P_e periódus rövidebb, hosszabb vagy megegyezik a valódi periódussal. Pozitív meredekségű egyenes esetén hosszabb, negatív meredekségű egyenes esetén rövidebb a valódi periódus, mint az elfogadott. Lineáris és parabolikus $O - C$ -re egy-egy példát mutat a 2.1. ábra.

3. fejezet

A megfigyelési anyag

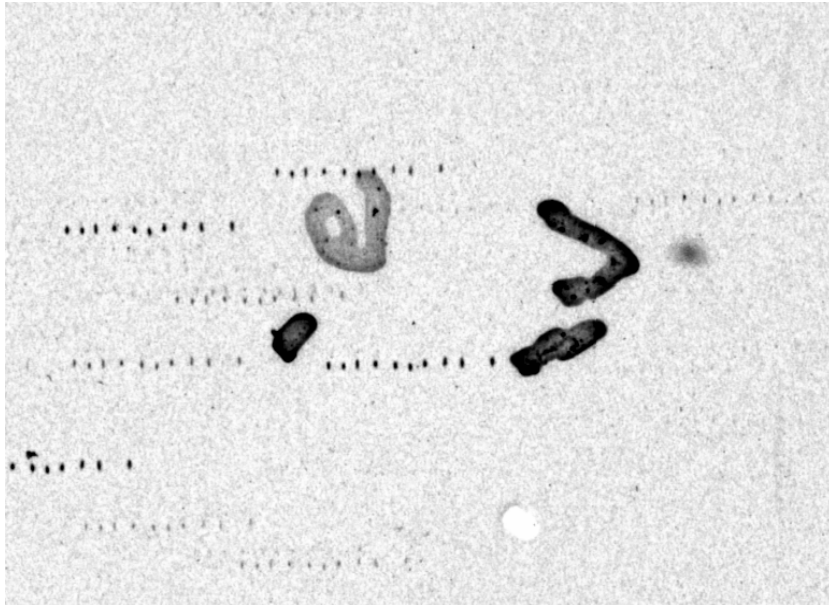
A Magyar Tudományos Akadémia Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézetben közel 60 évre visszamenőleg található fotometriai feljegyzés az RZ Lyrae fényváltozásáról. Az 1950-től fotografikus, 50-es évek végétől fotoelektromos mérések készültek, melyeket 2010-ben és 2011-ben CCD-s méréssel egészítettek ki. A hosszú távú megfigyeléshez további publikált fotometriai méréseket használtam fel. A fotoelektromos és CCD fényességeket egyaránt a Johnson-Cousins BVI_c magnitúdókra transzformáltuk.

Az intézet kutatói már több alkalommal foglalkoztak hosszú távú megfigyelések feldolgoásával, melyek közt egyaránt volt vizuális, fotografikus, fotoelektromos és CCD-s megfigyelés. Munkám során az általuk kidolgozott módszereket, programokat használtam fel az RZ Lyrae hosszú távú megfigyelésének feldolgozásához, értelmezéséhez.

3.1. Fotografikus megfigyelések

A fotografikus méréseket Detre László és munkatársai végezték 1950 és 1954 között a svábhegyi 16 cm-es asztrográffal. A 130 fotolemezre közel 1400 expozíció készült. A megfelelő tárolás miatt a lemezek jó állapotúak, bár kisebb-nagyobb inhomogenitás megfigyelhető, ami a képkészítés és előhívás során keletkezhetett. A 3.1. ábrán egy beszkenelt fotolemez részlete látható.

Egy lemezen több expozíció található. Az egyes expozíciók között a távcsövet kis mértékben elmozgatták, ezért a képeken a csillagkörnyezet egymás utáni sorozatát láthatjuk. Minden fotolemez első expozíciója után nagyobb eltolást alkalmaztak, mint



3.1. ábra. Részlet egy beszkennelt fotolemezről. Az RZ Lyrae-t a V jelöli.

a többi esetében. Ezáltal az expozíciós sorrend ismert volt, így minden expozícióhoz a neki megfelelő időpontot rendelhették hozzá. Néhány esetben nem volt egyértelműen megállapítható, hogy melyek a kezdő expozíciók. Ekkor a fotometria után vizuális ellenőrzéssel, vagy a pontokra illesztett pulzációs görbével ellenőrizhetjük a helyes sorrendet. Ha sok expozíció készül egy lemezre, vagy túl nagy eltolásokat alkalmaznak, akkor szomszédos csillagok képe egymásra tolódhat, mely a kiértékelésnél hamis értéket eredményezhet. Ezért a szokatlan értékeknél egyenként ellenőrzést végeztem. A feldolgozáskor nagy segítségemre volt, hogy a lemezek jól dokumentáltak.

3.1.1. Fotografikus képrögzítés, alapfogalmak

Egy átlátszó hordozó lemezre (általában üvegre) fényérzékeny réteget (ezüst-bromid, ezüst-klorid) visznek fel. Megvilágítás hatására a fényérzékeny rétegben kémiai változások mennek végbe. Előhívás után a fényt ért részekeken megfeketedik a réteg. A fényáteresztő képességet a *denzitással* jellemezzük. I_0 intenzitású fényt bocsájtva a fotolemezre, az $I_1 < I_0$ intenzitást ereszt át. Kifejezve a fotografikus denzitást:

$$D = \log \frac{I_0}{I_1}. \quad (3.1)$$

Azaz a nagyobb denzitás kisebb fényáteresztést jelent, ami azonos expozíciós idő esetén erősebb megvilágításnak felel meg. Bár sem a denzitás, sem az I_0/I_1 hányados nem

lineárisan függ a megvilágítás erősségétől, a denzitás szigorúan monoton nő az expozíciós megvilágítással.

Egy csillag vagy más objektum képének erősségét nem a denzitással jellemezzük, mert az előhívott fotolemezen a denzitás pontról-pontra változik, még a csillag képének korongján belül is. Ezért a denzitás helyett egy adott felületre vett integráljával jellemezzük az objektum képének erősségét. Ezt az integrált mennyiséget *feketedésnek* (F) nevezzük és a következő alakban írható fel:

$$F = \int_A DdA, \quad (3.2)$$

ahol A az apertúra. Az apertúra méretét úgy kell megválasszuk, hogy a csillag által okozott teljes denzitást figyelembe vegyük.

3.1.2. Fotolemezek digitalizálása

Ahhoz, hogy a modern eszközökkel elemezhesük a közel 60 éves fotolemezeket, digitalizálnunk (szkennelni) kell azokat. Ezáltal nem csak a feldolgozáshoz készítjük elő a felvételeket, de archiváljuk is azokat egyben. Nem ismert, hogy a digitalizálás során mennyi zaj rakódik a képekre, azonban így érzük el a legkevesebb adatvesztést. Ehhez elengedhetetlen a lemezek és a digitalizáló eszköz felületének megtisztítása és folyamatos tisztán tartása. A digitalizálást egy EPSON Perfection V750 szkennelvel végeztem. A lemezek hasonló - egyaránt 4 perces - expozíciókkal készültek. Kisebbségnagyobb inhomogenitás ettől függetlenül előfordult. Előhívásbeli különbségek, esetleges felhősödés okozhatott ilyen elváltozást. Digitalizálás során tulajdonképpen a fotólemez feketedését transzformáljuk egész számokká. A továbbiakban nem közvetlenül a fotólemez feketedésével dolgozunk, hanem a beszkennt kép pixelértékeivel. Vezessünk be két fogalmat:

Digitális denzitás: A bedigitalizált kép egy bizonyos képponjának pixelértéke. Ez a fotólemez denzitásával arányos mennyiség.

Digitális feketedés: A digitális denzitás egy adott területre vett integrálja. Ez a fotólemez feketedésének digitalizált megfelelője.

Fotolemezek digitális apertúra-fotometriája

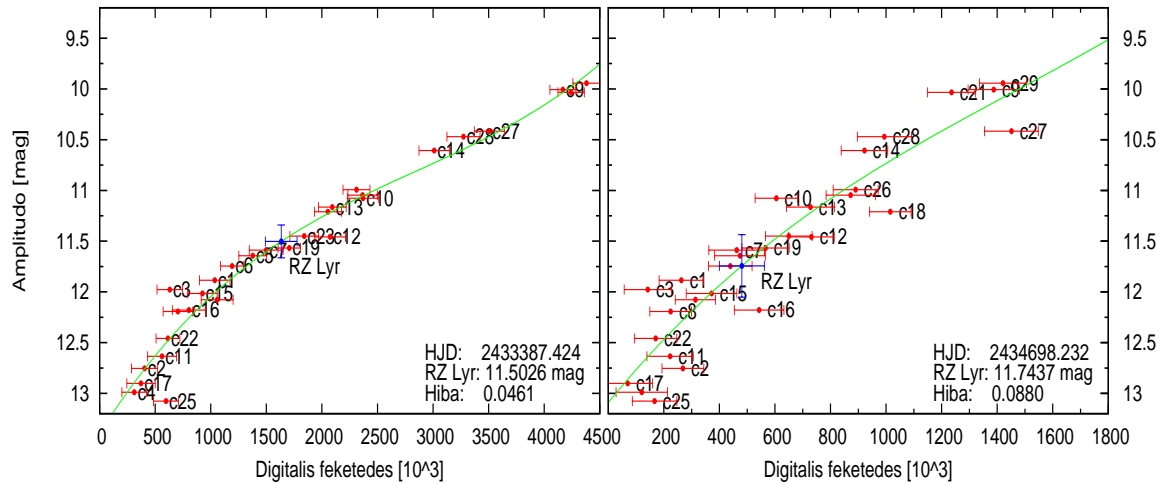
A csillagok digitális feketedésének meghatározásához a beszkenelt fotolemezekon apertúra fotometriát végeztem. Ehhez az IRAF¹ programcsomagot használtam. Az apertúra méretét úgy határoztam meg, hogy a csillag teljes egészében benne legyen, a háttérből pedig minél kevesebbet tartalmazzon. Így a háttérből eredő zaj minimalizálható. Szükséges volt az apertúra méretét képenként beállítani, ugyanis az éjszakánként változó *seeing*, a követési pontatlanság befolyásolja a csillagok alakját, méretét. A csillag mért fényességét befolyásolja az égi háttérfényesség, a fotolemez elszíneződése, inhomogenitása. Ezt úgy küszöbölhetjük ki, ha az apertúra körül egy gyűrűben mérjük a digitális denzitást, majd ezt levonjuk az apertúrán belüli denzitásból. Mivel egy fotolemezen több expozíció található, a gyűrű méretét úgy kell megválasztani, hogy az se a következő expozícióhoz tartozó csillagot, se más objektumot ne tartalmazzon. A feldolgozás során előfordult, hogy a túl sűrű csillagkörnyezet szükségessé tette egyes méréspontok figyelmen kívül hagyását.

3.1.3. Fotometria a digitális feketedési görbe alapján

Célunk az RZ Lyrae fényességének meghatározása az egyes expozíciók időpontjában, majd a fénygörbe felrajzolása és annak értelmezése. Ehhez minden expozícióhoz meg kell határoznunk a digitális feketedési görbét. A feketedési görbe megmutatja, hogy adott feketedési érték esetén a csillaghoz milyen magnitúdó érték rendelhető. A feketedési görbét úgy állíthatjuk elő, hogy a kiválasztott, ismert magnitúdójú összehasonlító csillagok magnitúdóit expozícióként ábrázoljuk a kimért digitális feketedés függvényében. A pontokra görbét illesztve² leolvasható az RZ Lyrae fényessége, melyet a digitális feketedési értéke révén határozunk meg. Fekedési görbékre mutat példát a 3.2. ábra.

¹Az IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) a NOAO (National Optical Astronomy Observatories) által fejlesztett általános célú csillagászati képfeldolgozó szoftvercsomag. <http://iraf.noao.edu/>

²Az illesztést egy Sódor Ádám által írt programmal végeztem, mely a legkisebb négyzetek módszerét alkalmazva, a beállítástól függően másod vagy harmadrendű görbét illeszt.



3.2. ábra. *Digitális feketedési görbék.* Piros pontokkal az összehasonlító csillagok, késsel az RZ Lyrae van jelölve, a zöld vonal az illesztett feketedési görbe. A bal oldalon a pontok szórása kicsi, jól kirajzolják a görbét. A jobb oldalon a pontok szórása nagy, az RZ Lyrae fényességét nagyban befolyásolja, hogy mely pontokat hagyjuk figyelmen kívül.

Az összehasonlító csillagok

Mivel a fotolemezek főleg kék-UV-ben érzékenyek ezért összehasonlító keresésekor a B színt vettem figyelembe. Az RZ Lyrae fotografikus fényességváltozása $\sim 1,7$ mag. Az összehasonlítókat a TYCHO-2 katalógusból választottam ki úgy, hogy azok fényességei lefedjék az RZ Lyrae fényességváltozását. További szempont volt, hogy a színindexek lehető legkisebb mértékben különbözzenek az RZ Lyrae-étől, így közel azonos spektráltípusú csillagokat vizsgálunk, azaz a színindexek különbségéből adódó extinció torzító hatása minimális. Mindezeket figyelembe véve egy 30 ívperc sugarú körből választottam az összehasonlítókat. Összesen 29 csillagot választottam, melyek a 3.1. táblázatban vannak összefoglalva.

3.2. Fotoelektromos mérések

A fotoelektromos méréseket Detre László és munkatársai végezték 1958-59 és 1968-72 években a Konkoly Obszervatórium 60 cm-es teleszkópjával. 1958-59 években egy

ÖH	RA [h:m:s]	DEC [°:':"]	B_T [mag]	$B_T - V_T$ [mag]
C1	18:43:18.440	+32:48:58.79	11.885	0.270
C2	18:43:57.625	+32:49:54.71	12.753	0.575
C3	18:43:37.187	+32:53:39.06	11.978	0.131
C4	18:43:53.511	+32:53:27.61	12.989	0.548
C5	18:43:23.718	+32:53:47.58	11.644	0.567
C6	18:42:50.542	+32:44:36.26	11.746	0.583
C7	18:43:29.108	+33:01:02.60	11.589	0.465
C8	18:43:39.174	+32:33:42.18	12.193	0.587
C9	18:44:31.486	+32:57:26.32	10.006	0.249
C10	18:44:45.680	+32:43:00.96	11.077	0.532
C11	18:43:01.515	+32:33:24.74	12.634	0.405
C12	18:44:59.008	+32:47:57.63	11.458	0.550
C13	18:44:51.527	+32:55:06.20	11.165	0.348
C14	18:45:04.557	+32:45:43.85	10.607	0.432
C15	18:45:08.936	+32:50:39.55	12.015	0.257
C16	18:45:13.087	+32:45:54.22	12.179	0.584
C17	18:44:31.043	+33:04:51.16	12.901	0.422
C18	18:43:46.580	+32:27:20.68	11.210	0.396
C19	18:43:16.460	+32:27:37.86	11.568	0.531
C20	18:42:49.550	+32:29:27.88	12.078	0.372
C21	18:45:21.931	+32:44:29.14	10.033	0.197
C22	18:43:33.808	+32:25:08.70	12.458	0.494
C23	18:45:27.613	+32:52:30.96	11.450	0.524
C24	18:44:02.910	+32:24:47.29	11.047	0.582
C25	18:44:41.620	+33:07:53.43	13.076	0.533
C26	18:44:16.629	+32:22:28.40	10.992	0.450
C27	18:45:48.960	+32:55:34.63	10.416	0.469
C28	18:45:07.532	+33:11:44.32	10.471	0.223
C29	18:45:13.474	+33:15:40.14	9.943	0.483

3.1. táblázat. Összehasonlító csillagok a fotografikus mérésekhez.

Időtartam	észlelések	száma	maximumok	éjszakák
HJD–2400000	B	V	száma	száma
36413 – 36816	230	226	9	11
39981 – 41394	110	109	4	9

3.2. táblázat. *Fotoelektromos észlelések a Konkoly Obszervatóriumban.*

RCA 1P21 típusú, 1968-72-ben egy EMI 9052 B típusú fotoelektronsokszorozót használtak a teleszkóp detektoraként. B és V szűrőben összesen közel 700 méréspont készült. A fotoelektromos fénygörbék differenciális magnitúdóit Dr. Szeidl Béla kiredukálva adta át. Ezek áttekintő adatait a 3.2. táblázat tartalmazza. Összehasonlítóan az 3.3. ábra a, b, c, d csillagait használták, melyek adatai a 3.4. táblázatban vannak összefoglalva. Hogy más szerzők által publikált mérésekkel együtt kezelhessük a Konkoly-s fotoelektromos méréseket, az adatsoron nemzetközi rendszerbe való transzformációt kellett elvégezni. A távcső-detektor rendszer sajátosságaiból adódóan nem tökéletes a Johnson-, Cousins rendszerbe való leképezés. A korrekcióhoz meg kell határozni a távcsőkonstansokat, standard csillagok fényessége alapján. A transzformációhoz az adott évre vonatkozó távcsőkonstansok a 3.3. táblázatban szerepelnek. A transzformációhoz az alábbi képleteket alkalmaztam:

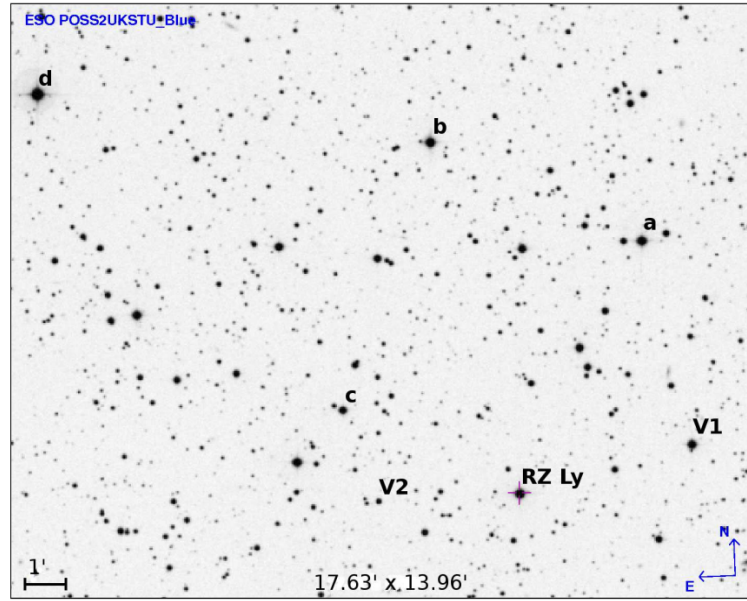
$$dV = dv + \varepsilon\mu \cdot (db' - dv)$$

$$dB = db + (\varepsilon\mu + \mu - 1) \cdot (db - dv')$$

Ahol ε és μ távcsőkonstansok, db és dv instrumentális differenciális magnitúdók. A $(db - dv)$ instrumentális fényességkülönbség csak azonos időben készült db és dv fényesség esetén érvényes. Mivel egyszerre csak egy szűrőben készülhet felvétel, ezért az egyes

Év	ε	μ
1958 – 59	–0,12	0,9
1968	–0,11	1,18
1969	–0,06	1,12
1972	–0,11	1,12

3.3. táblázat. *Távcsőkonstansok a fotoelektromos mérések idején.*



3.3. ábra. Összehasonlító csillagok a fotoelektromos és CCD mérések idején. A fotoelektromos észleléseknél felhasznált összehasonlító csillagok *a*, *b*, *c*, *d* betűvel vannak megjelölve. A CCD mérések idején összehasonlító keresés közben 2 változócsillag lett azonosítva, *V1* és *V2*. Forrás: Jurcsik et al. (2012)

színgörbék interpolációjával kell mindkét színben minden időpontra fényességértéket kreálni. Az interpolációval meghatározott "differenciális" fényességek db' és dv' betűkkel vannak jelölve. Utolsó lépésként az összehasonlító csillag nemzetközi rendszerben elfogadott értékét hozzáadjuk az általunk számolt dV , dB értékekhez.

Összehasonlító	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>I</i>	referencia
2MASS ID				
<i>a</i> 18432371 + 3253475	11,546	11,055	10,454	AAVSO VSP ^a
<i>b</i> 18434732 + 3256105	11,440	10,814	10,120	AAVSO VSP ^a
<i>c</i> 18432371 + 3253475	12,846	11,977	11,009	AAVSO VSP ^a
<i>d</i> 18432371 + 3253475	9,966	9,800	-	Sturch (1966)

3.4. táblázat. Összehasonlító csillagok a fotoelektromos és CCD-s mérések idején.

^a<http://www.aavso.org/vsp/>

3.3. CCD megfigyelések

Az RZ Lyrae CCD-s megfigyelése két szezonen át tartott. 2010 áprilisától és 2011 márciusától folytak mérések, melyek alatt összesen 109 éjszakán 2300 expozíció készült Johnson B , V valamint $Cousins I$ szűrőkben. A méréseket a svábhegyi automatizált 60 cm-es távcsőre szerelt Wright CCD detektorral végezték a Dr. Jurcsik Johanna által vezetett csoport tagjai, valamint az ELTE és az SZTE csillagász szakos hallgatói, köztük jómagam. A két szezonen alatt sikerült a Blazhko-periódus minden fázisáról mérést begyűjteni.

3.3.1. CCD képrögzítés és alapfogalmak

A képrögzítés elve

A CCD mozaikszó a Charged Coupled Device, azaz töltéscsatolt eszköz szavakból származik. Az eszköz mátrixba rendezett félvezető elemekből (pixelekből) áll. A beérkező foton a fókuszbán elhelyezett fényérzékeny félvezető rétegben a megvilágítás hosszával, intenzitásával arányos mennyiségben elektront vált ki. Az egyes pixeleken összegyűlt elektronokat kiolvastva kapjuk meg a képet. A pixelek mérete $\sim 10\mu m$ nagyságrendű, csak véges számú elektront képesek tárolni. Túl hosszú, vagy erős megvilágítás esetén a keletkezett elektronok száma meghaladja a pixel tároló kapacitását. Ekkor az elektron "kicsordul" a pixelből, Ezt hívjuk a pixel telítődésének. Telítődés közelében a linearitás sérül. Ezt megelőzhetjük, ha az expozíciós időt helyesen választjuk meg.

A CCD felvételek kalibrációja

A elkészült CCD kép a detektor sajátosságaiból adódó hibákkal terhelt, melyekre a képet korrigálni kell.

- alapszint (bias): Fénymentes környezetben, nulla integrációs idő mellett is nem nulla jelszinttel rendelkezik a kiolvasott kép.

- sötétáram (dark): A kamera nem zéró hőmérséklete miatt a termikus fluktuációk hatására a pixeleken akkor is keletkeznek töltések, ha a kamerát nem éri fény. A detektor hőmérsékletével ez exponenciálisan nő. Ennek elkerülése érdekében a CCD

kamerát hűteni kell.

- világoskép (flat): A kamera pixeleinek érzékenysége eltérő, egy elektron keltéséhez átlagosan eltérő számú fotonra van szükség. A detektoron és a leképező optikán lévő szennyeződés egyaránt befolyásolhatja a detektált fény mennyiségét.

Bias-képeket megvilágítás nélkül, nulla expozíciós idővel készítjük. Ezek matematikai átlagát vesszük, majd az átlagolt képet levonjuk a dark-, flat- és objektum képekből. A dark-képeket az objektum képével hasonló beállításokkal végezzük: azonos hőmérséklet, azonos expozíciós idő, azonban megvilágítás nélkül. Az átlagolt (matematikai) dark-képet a flat- és objektum képekből vonjuk le. Flat korrekcióhoz egy egyenletesen megvilágított homogén felületet kell fotóznunk azokon a szűrőkön keresztül, melyekkel méréseket végzünk. Flat-kép készítésre alkalmas felület lehet egy mesterségesen megvilágított ernyő (*dome flat*), vagy a szürkületi, tiszta ég (*sky flat*). A flat-képeknek vesszük a medián átlagát, majd korrigáljuk vele az objektum képeket. Átlagolásra³ azért van szükség, mert a korrekciós képekre is rakódhat valamilyen statisztikus zaj, mely így módon csökkenthető.

Saját CCD felvételek korrekciója

A Wright kamera overscan területtel dolgozik a bias megállapítása céljából. Ez azt jelenti, hogy a felvétel szélén egy keskeny sávban tárolja a bias információt, ezért külön bias felvételeket nem kellett készíteni. A CCD pixeleinek 90%-a dark mentes, a többi területet elkerüljük az észlelések folyamán, ezért dark korrekcióra nem volt szükség. Sky flat képek minden este és reggel készültek, amennyiben az ég lehetőséget ad rá. Ha ez nem lehetséges, úgy több, egymást követő éjszaka flat felvételeinek átlagát használtuk.

3.3.2. CCD fotometria

Az RZ Lyrae fényességét apertúra fotometriával mérjük ki. A fotolemezek érzékenységevel szemben a CCD érzékenysége lineáris a beérkező fény intenzitásra. Emiatt nincs szükség a fotografikuséhoz hasonló "feketedési görbe" alkalmazására, elegendő egyetlen megfelelően választott összehasonlító csillagot használni a differenciális magnitúdók elkészítéséhez. Ezt a fényességértéket, ahogy az elnevezés is sugallja, két vagy több

³Az átlagolás az egyes korrekciós képtípusok azonos pixelein végrehajtott átlagolást jelenti.

csillag fényességének összehasonlításából, azok különbségéből képezzük. Ezért rendkívül fontos, hogy a használt összehasonlító időben állandó fényességű legyen.

$$\Delta m_{f,t} = m_{var,f,t} - m_{comp,f} = -2.5 \cdot \log \frac{I_{var,f,t}}{I_{comp,f,t}}$$

Ahol $m_{var,f,t}$ a vizsgált változócsillag magnitúdója, $m_{comp,f}$ az összehasonlító csillag magnitúdója. $I_{var,f,t}$ és $I_{comp,f,t}$ a t időpontban, f fotometriai sávban apertúra fotometriával kimért intenzitással arányos mennyiség.

A mérés folyamán az aktuálisan készült méréseket kiredukálták, így az RZ Lyrae észlelések lezárultával a teljes anyagról én már a redukált adatsort kaptam meg.

Összehasonlító csillagok

Eredetileg egy kék csillag (2MASS 18431843 +3248587) volt az összehasonlító, melyről kiderült, hogy szintén változócsillag (V1). Az RZ Lyrae közvetlen közelében egy másik változócsillag is azonosításra került (V2: 18435377 +3247459). Az adatsor elkészítéséhez a 3.3. ábra a jelű csillagát használtuk.

Transzformáció nemzetközi rendszerbe

Az eljárás azonos a fotoelektromos megfigyeléseknél ismertetett transzformációs módszerrel. A használt képletek:

$$B(t) = b(t) + c_b(b(t) - v'(t))$$

$$V(t) = v(t) + c_v(v(t) - b'(t))$$

$$I(t) = i(t) + c_i(v'(t) - i(t))$$

Ahol a vesszővel jelölt mennyiségek az interpolációval számolt instrumentális differenciális fényességek.

4. fejezet

A fénygörbék analízise

Az RZ Lyrae-ről összegyűjtött észlelések a 4.1. táblázatban vannak összefoglalva. A 80 évnyi adatsort elemezve úgy deríthetjük ki, hogy volt-e periódusváltozás, ha szakaszokra osztjuk és a periódusvizsgálatot külön-külön végezzük el. A mérések közötti nagy ürök miatt az egyes észleléseket 4 elkülönülő csoportra osztottuk. Az első két csoport esetében a pulzációs periódus megállapítására az adott szakasz adatsorának Fourier-analízisét alkalmaztam. A modulációs periódus meghatározásához két módszert használtam. Az egyik esetben a spektrum fehérítése után megkerestem a modulációs csúcsokat és azoknak a pulzációs frekvenciától mért távolságaiból számoltam a modulációs periódust. Másik esetben az adott szakaszban azonosított maximumok Fourier-analízisével határoztam meg a modulációs periódust. A 3. csoport hosszú időt fed le és nagyon gyengén mintavételezett. A pulzációs periódust a fotoelektromos adatsor Fourier-analízisével, a modulációs periódust az adott időszak fotoelektromos és vizuális észleléseinél azonosított maximum idők Fourier-analízisével szereztem. A 4. csoportban a pulzációs és modulációs periódust egyaránt az adatsor Fourier-analízisével határoztam meg.

A Fourier-analízist minden esetben a MUFTRAN programcsomaggal (Kolláth, 1990) végeztem, melynek eredményét a Sódor Ádám által írt *nlfit*¹ programmal pontosítottam.

Az észlelések különböző forrásokból származnak, melynek eredményeként néhány esetben - főleg vizuális méréseknél - az adatsorokat egymáshoz kellett igazítani. Nem

¹Az *nlfit* a legkisebb négyzetek módszerét alkalmazva nemlineáris illesztést végez az általunk előre meghatározott frekvenciákhoz tartozó lineárkombinációs csúcsokra.

Időtartam HJD–2400000	észlelés típusa	pontok száma	maximumok száma	éjszakák száma	referencia
<i>1. Csoport</i>					
26074 – 32473	vis	1889	83	200	1
27661 – 27955	vis	164	5	31	2
<i>2. Csoport</i>					
33369 – 35041	pg	1446	54	61	3
33473 – 34946	vis	1736	36	113	4
33754 – 33948	vis	125	6	18	1
<i>3. Csoport</i>					
36413 – 36816	pe	500	9	11	3
37158 – 37198	vis	97	5	10	1
37161 – 37230	vis	477	12	40	5
37161 – 37278	vis	360	7	31	6
38587 – 38594	pe	10	0	5	10
38669 – 39032	pe	28	1	4	7
39293 – 39352	vis	223	4	22	8
39983 – 41394	pe	300	4	9	3
42955 – 42955	pe	7	0	1	9
<i>4. Csoport</i>					
55294 – 55826	CCD	2287	26	77	3
<i>Fel nem használt észlelések</i>					
33512 – 33619	vis	130		16	11
33824 – 33952	vis	244		25	11
41151 – 41186	vis	92		11	12

4.1. táblázat. Az *RZ Lyrae*-ről összegyűjtött fotometriai anyag. A feldolgozáshoz 4 csoportba rendeztem az észleléseket. Az utolsó 3 adatsor nem került feldolgozásra. (1) Tsessevich, (2) Zverev & Makarenko, (3) Konkoly, (4) Klepikova, (5) Romanov, (6) Migach, (7) Fitch, (8) Belik, (9) Butler, (10) Sturch, (11) Batyrev, (12) Bogdanov.

volt cél a teljes adatsor homogenizálása, azonban az együtt elemzett méréseket mindenképpen azonos skálára kellett hozni. A vizuális mérésekre jellemző volt, hogy a skálázás észlelőnként eltért. Ennek oka, hogy a csillag fényváltozását egy általuk kiválasztott skálán mérték. Néhány esetben a publikált vizuális fényeségekkel együtt megadták a magnitúdóba transzformáló képletet. A skálázást segítette, ha az a vizuális észleléssel azonos éjszakán fotografikus vagy fotoelektromos mérés is rendelkezésre állt. Sajnos még ekkor is gondot okozott néha, hogy azonos skálára hozzam a különböző típusú adatsorokat, ugyanis a korabeli fotografikus és fotoelektromos megfigyelések zömét a felszálló ág - maximum szakaszokra koncentrálták. Nagyon kis számban érhető el mért minimum.

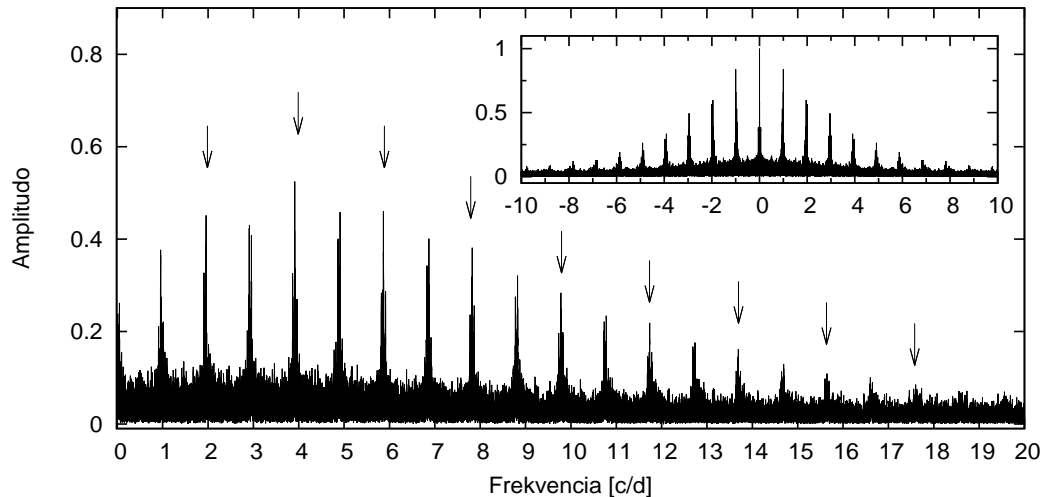
A feldolgozás során néhány begyűjtött észlelést ki kellett hagynunk. Batyrev mérései a többi adatsorhoz képest fázisban eltolódott volt. Bogdanovtól származó adatsorból lényeges információt nem lehetett kinyerni és más adatsorok kiegészítésére sem volt alkalmas.

4.1. 1. csoport fénygörbe analízise

Az első csoportban kezelt észlelések 1930 és 1947 között készültek. Ebben az időszakban kizárólag vizuális észlelések érhetőek el, melyeket Tsessevich (1953) valamint Zverev & Makarenko (1979) publikáltak. Utóbbi észlelések magnitúdóban voltak megadva, ehhez igazítottam Tsessevich észleléseit. Tsessevich által publikált észlelések két elkülönülő időszakra oszthatók. Ezek között több, mint 6 év észlelési szünet van, mégsem érdemes az egyes szakaszokat külön-külön kezelni, mert önmagában egyik szakaszra sem lehetne a hosszú modulációs periódust megbízható pontossággal meghatározni. Zverev & Makarenko észlelései Tsessevich észleléseinek 1. szakaszát egészítik ki.

A pulzációs periódus meghatározása

Tsessevich (1953) által meghatározott 0,511 napos pulzációs periódust figyelembe vettem a pulzációs periódus keresésénél. A 4.1. ábra az 1. csoport ablakfüggvényét és Fourier-spektrumát mutatja. A legnagyobb amplitúdójú jel a pulzációs frekvencia kétszeresél van. Ennek egyik oka, ami az ablakfüggvényen is látható, hogy az alias



4.1. ábra. Az 1. csoport ablakfüggvénye és spektruma. A pulzációs frekvenciát és annak felharmonikusait nyíllal jelöltem meg.

csúcsoknak erős jelük van. A másik ok, hogy a pulzációs periódus majdnem pontosan fél nap, emiatt az 1 napos aliasok "megzavarják" a felharmonikusok jelét. Az ábrán bejelöltem azokat helyeket, ahol a pulzációs periódus és annak felharmonikusai megjelennek. Az 1. csoport időszakára vonatkozó pulzációs periódus²:

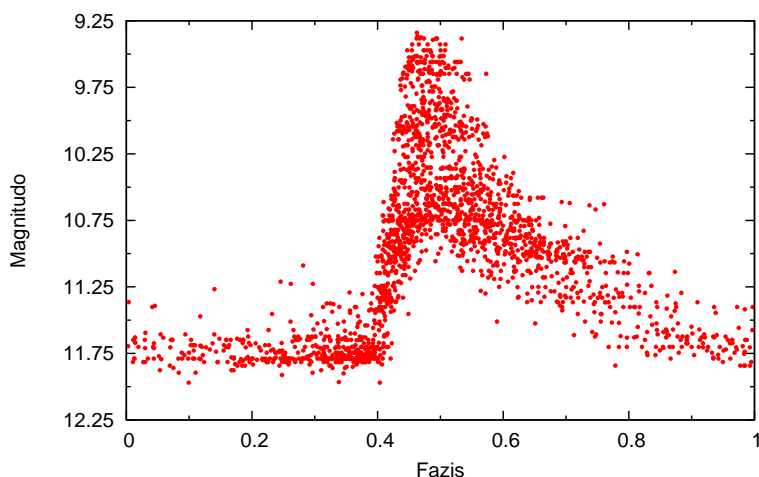
$$P_{gr_1}^P = 0,51125023 \pm 10^{-7} \text{ nap.}$$

A fénygörbe a kapott periódussal feltekerve a 4.2. ábrán látható. A pontok szórása igen nagy a pulzáció szinte minden fázisában. Ettől függetlenül az *RRab* típusúakra jellemző asszimmetrikus fénygörbe felismerhető. A $\sim 2,5$ magnitúdónyi fényességváltozás szinte biztosan a nem megfelelő magnitúdó transzformáció következménye.

Blazhko-periódus meghatározása

Tsessevich (1953) által meghatározott ~ 116 napos Blazhko-periódus értékből az várható, hogy a fehérített spektrumban a már levont pulzációs frekvenciától $\sim \pm 0,0086 \text{ nap}^{-1}$ távolságra jelennek meg a modulációs csúcsok. A spektrum fehérítését a pulzációs periódussal és 4 harmonikkal végeztem. A 4.3. ábra a fehérített spektrum egy részletét mutatja. Az azonosítható modulációs csúcsokat bejelöltem, elhelyezkedésük

²Továbbiakban ezt a jelölést használom: felső index a periódus típusára utal, az alsó index pedig a kezelt csoportra, valamint modulációs periódus számolása esetén a számolás módjára.



4.2. ábra. Az 1. csoport pulzációs periódussal feltekert fénygörbéje. A pontok szórása részben lehet a Blazhko-moduláció következménye. A nagy szórás ellenére felismerhető az asszimmetrikus fénygörbealak.

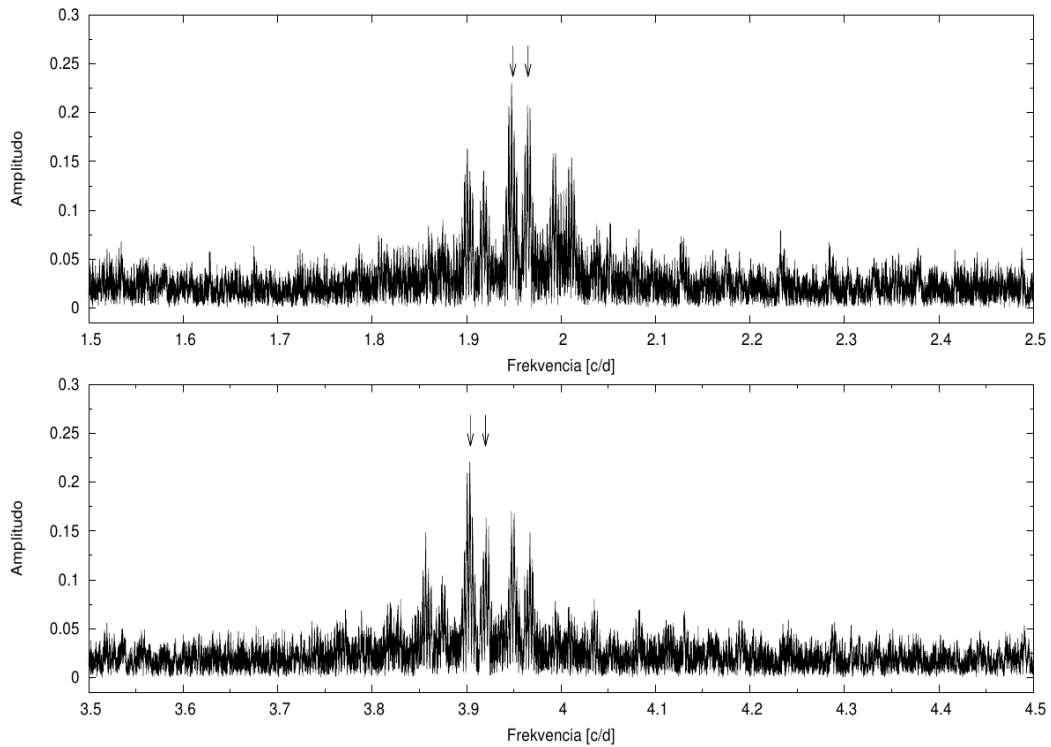
a várt frekvenciánál volt. Jellemzően a negatív oldali modulációs csúcs az erősebb. Nagyobb frekvenciáknál a pozitív oldali belevész a zajba. A frekvenciakülönbségből származó Blazhko-periódus:

$$P_{gr_1,diff}^{Bl} = 116,24 \pm 0,1 \text{ nap.}$$

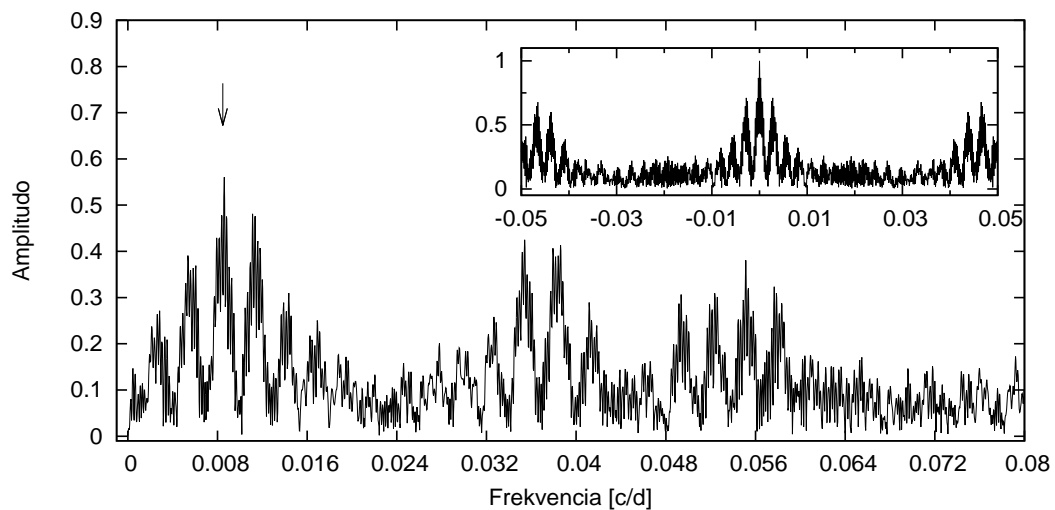
Összesen 88 maximumot lehetett azonosítani. Mivel ~ 116 napos periódust keressünk, elegendő csak a modulációs frekvencia közvetlen környezetét vizsgálni. Ezt a területet mutatja a maximumok Fourier-spektruma (4.4. ábra). A spektrum a gyenge mintavételezés miatt zajos, kiszélesedett csúcsokat mutat. Ennek oka, hogy a 88 maximumnak több, mint 17 évnyi mérést kell lefedjen. Ennek ellenére a modulációs csúcs jelentkezik a legerősebb csúccsal. A maximumok Fourier-analíziséből kapott modulációs periódus:

$$P_{gr_1,max}^{Bl} = 116,12 \pm 0,1 \text{ nap.}$$

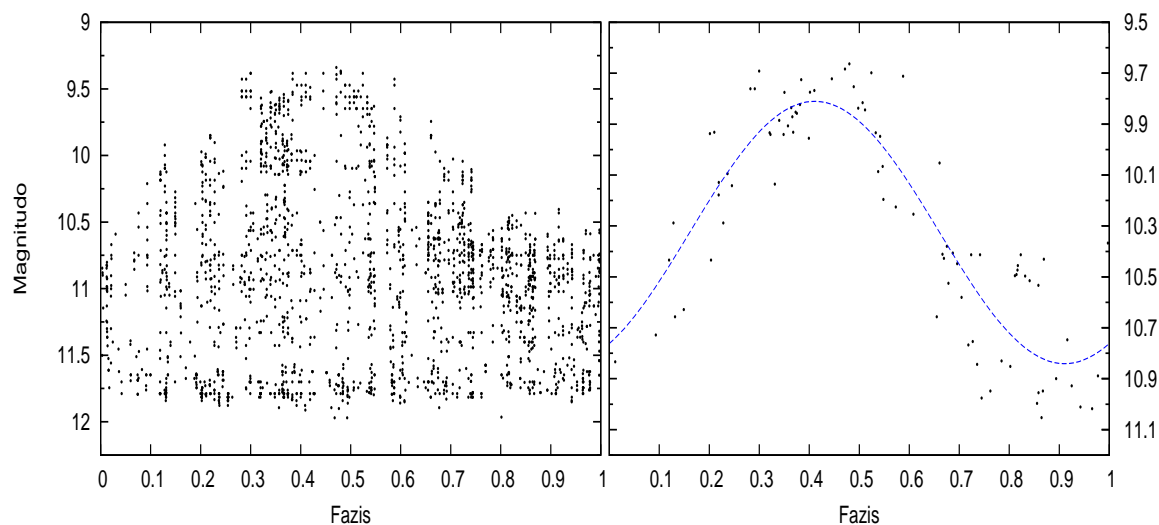
A különböző módszerrel kapott modulációs periódusok hibahatáron belül megegyeznek. A modulációs periódussal feltekert adatsor és maximumok a 4.5. ábrán láthatóak. Az alkalmazott transzformációs képlet szinte biztosan nem a tényleges magnitúdó értékeket adja meg. Így a maximum magasságok ~ 1 magnitúdós változása nem reális. A maximum magasságok szinuszos változást mutatnak.



4.3. ábra. *Részlet az 1. csoport fehérített spektrumáról. Az azonosítható modulációs csúcsokat nyíllal jelöltem be. Több erős csúcs is megjelenik a modulációs frekvencia környezetében.*



4.4. ábra. *Az 1. csoport maximumainak ablakfüggvénye és spektruma. A spektrum zajos és a csúcsok is kiszélesedtek, ám még így is a modulációs frekvencia a legerősebb.*

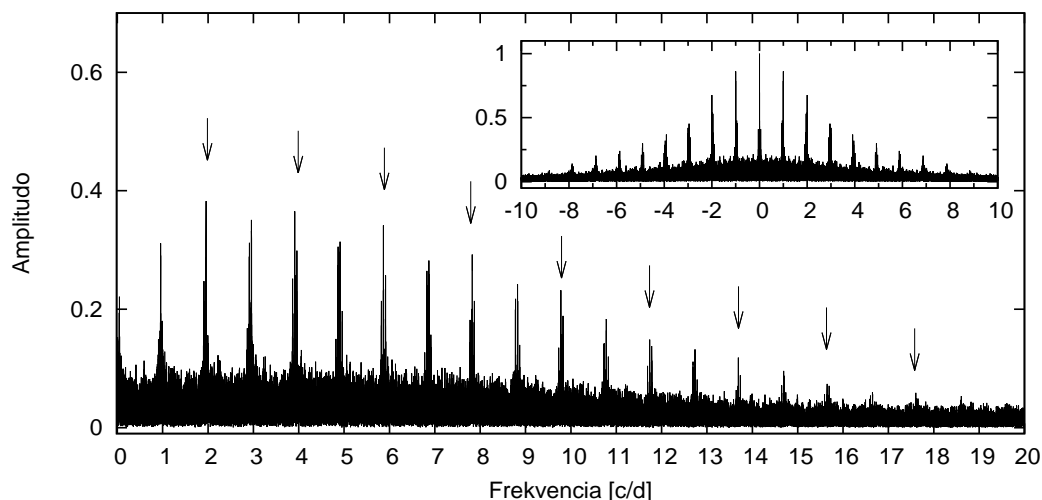


4.5. ábra. Az 1. csoport adatsora és maximum fényességei a Blazhko-periódussal feltételezve. Az adatsor és a maximumok amplitúdója jelen esetben nem reális.

4.2. 2. csoport fénygörbe analízise

A 2. csoport 1950 és 1954 közötti észleléseket tartalmaz, melynek nagy része a Konkoly Obszervatóriumban készült fotografikus mérés. Emellett Tsessevich (1958) és Klepikova (1958) publikált méréseket erre az időszakra. Transzformációs képletet egyik vizuális észleléshez sem publikáltak. A vizuális észlelések között voltak olyan éjszakák, melyek azonos éjszakára estek a fotografikus méréssel. Ezeket arra használtam fel, hogy a vizuális adatsort azonos skálára hozzam a fotografikus adatsorral. A transzformálást nehezítette, hogy az RZ Lyrae fotografikus észlelésekor a felszálló ág és a maximum megfigyelésére koncentráltak, emiatt sajnos a leszálló ágon és a minimumban szinte nincs észlelve. A vizuális észlelések szórása nagyobb, mint a fotografikusé, mégis érdemes felhasználni, mert tartalmaz leszálló ágot és minimum helyeket, mellyel az adatsor kiegészíthető.

Felmerült, hogy a fotografikus adatsort kisebb szakaszokra bontva kezeljük, de az egyes szakaszok nem elegendően jól mintavételezettek és nem elég hosszúak, hogy a több mint 100 napos Blazhko-periódust megbízható pontossággal meghatározzák.



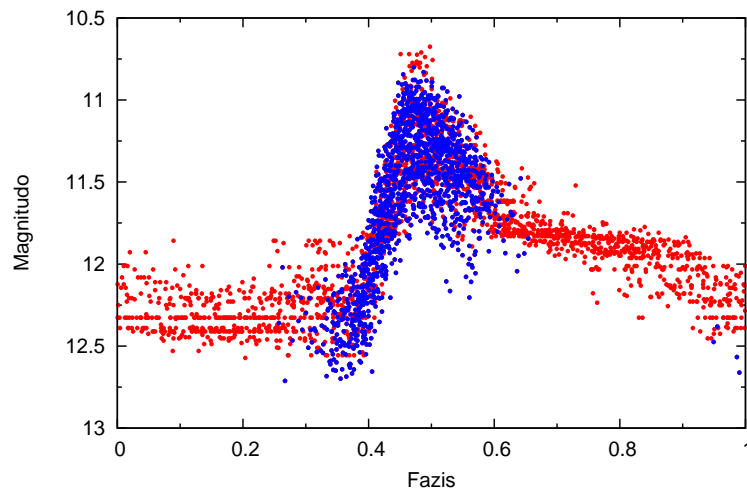
4.6. ábra. A 2. csoport ablakfüggvénye és spektruma. Nyíllal a pulzációs frekvencia és felharmonikusainak várható helyei vannak bejelölve. A vizsgálatok során a 6. felharmonikust még azonosíthatónak találtam.

A pulzációs periódus meghatározása

A fotografikus adatsor ablakfüggvényét és Fourier-spektrumát mutatja a 4.6. ábra. Az ablakfüggvényben az 1. csoportéhoz hasonlóan erősen jelentkeznek az alias csúcsok. A spektrumban a pulzációs frekvencia nem sokkal erősebb, mint a megjelenő felharmonikusok, melyek a 6. felharmonikusig követhetők egyértelműen. A fotografikus fénygörbe-analízisből származó pulzációs periódus:

$$P_{gr2}^P = 0,5112455 \pm 2,8 \cdot 10^{-7} \text{ nap.}$$

A korábbi, viziális mérésekből származó periódustól való eltérés nagyobb ($\sim 10^{-6}$ nap), mint a számolt hibahatár. A kapott periódussal feltekert fénygörbét mutatja a 4.7. ábra. A 2 adatsor között $\sim 0,1 \text{ mag}$ eltérés látszik, ami valószínűleg annak a következménye, hogy a transzformációhoz használt közös észlelés kis amplitúdójú fázisban történt, amikor a vizuális mérésekre nagyobb szórás jellemző. A kék pontok, melyek a fotografikus észlelést jelzik a felszálló ágnál kezdődnek. Ez azt jelenti, hogy az észlelés megkezdésének időpontját maga a periódus határozta meg. Emiatt jelenik meg az ablakfüggvényben a pulzációs frekvenciánál és annak felharmonikusainál csúcs, ami magát a spektrumot is befolyásolja.



4.7. ábra. A 2. csoport pulzációs periódussal feltekert fénygörbéje. Kékkel a fotografikus mérések, pirossal a transzformált vizuális mérések vannak jelölve. Úgy tűnik, hogy a két adatsor között kis eltérés van, mely a vizuális adatsor transzformációs hibája.

Blazhko-periódus meghatározása

A fehérítést a pulzációs frekvenciával és annak 6 felharmonikusával végeztem. A fehérített spektrum részletét a 4.8. ábra mutatja. A modulációs csúcsok közül a negatív oldali az erősebb, a 3. felharmonikusig mindkét oldalon beazonosíthatók, utána csak a negatív oldali ismerhető fel. A Blazhko-periódus:

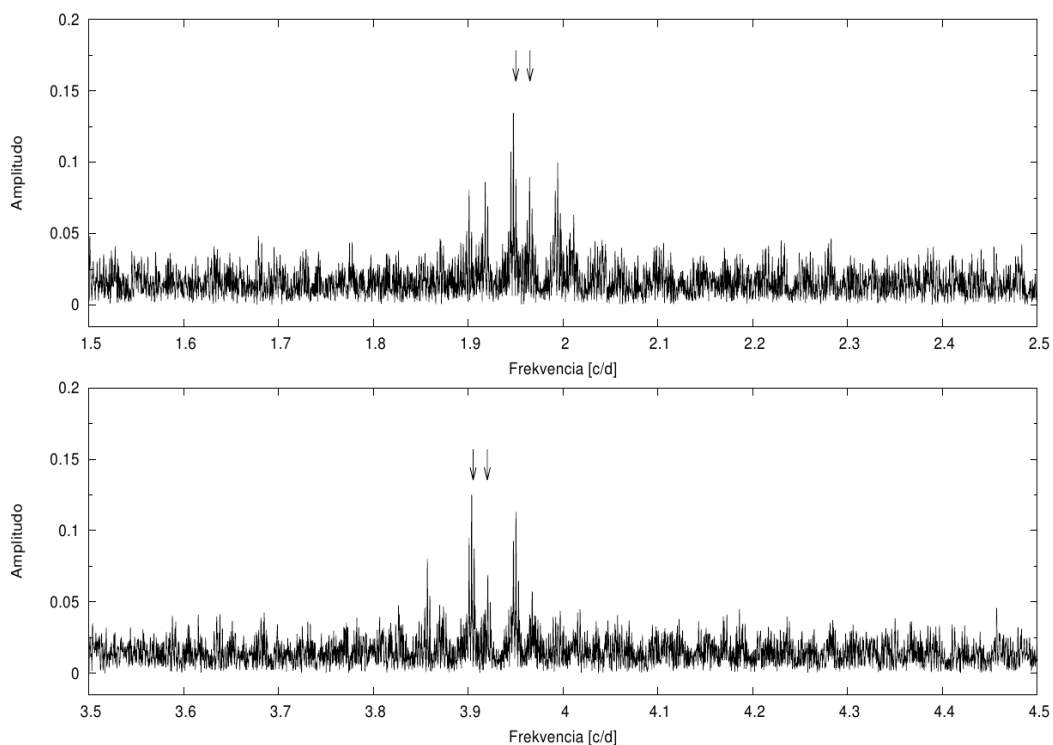
$$P_{gr_2,diff}^{Bl} = 117,38 \pm 0,13 \text{ nap}$$

A Blazhko-periódus egyértelműen nőtt, kicsivel több, mint 1 nappal.

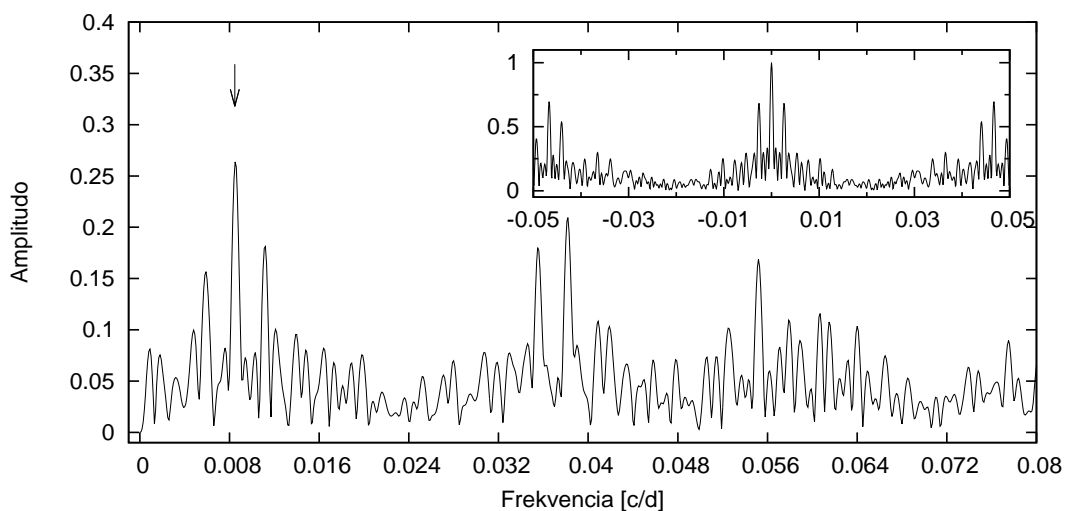
A 3 adatsorból összesen 93 maximumot lehetett meghatározni. A maximum magasságok Fourier-spektrumát a $0 - 0,08$ c/d spektráltartományban vizsgáltam (4.9. ábra). A modulációs periódus csúcsnak szignifikáns jele van a spektrumban. A maximumokból számolt modulációs periódus:

$$P_{gr_2,max}^{Bl} = 117,27 \pm 0,26 \text{ nap}$$

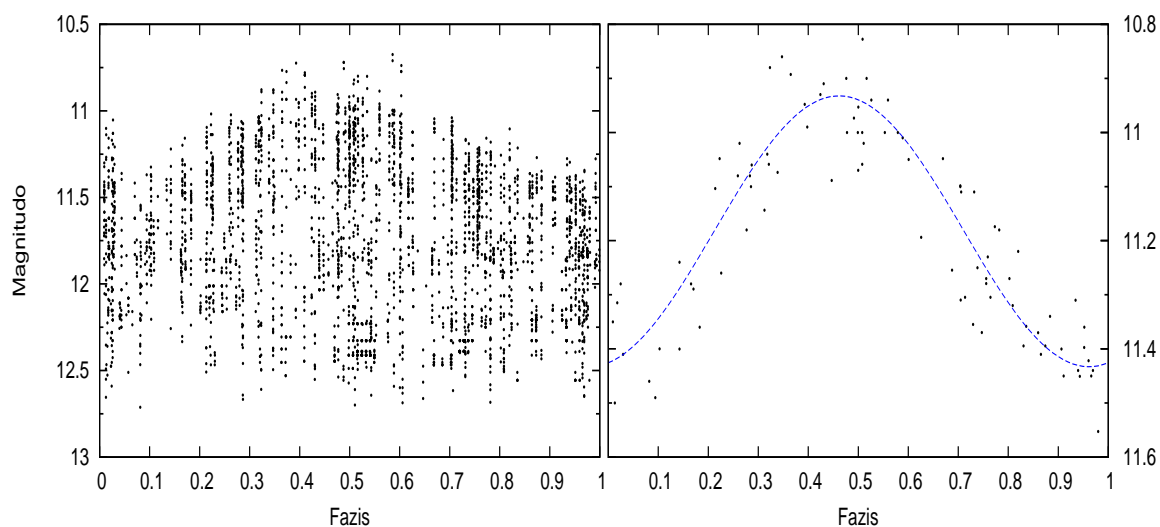
A maximumok analizésével kapott Blazhko-periódus hibahatáron belül megegyezik a frekvenciakülönbségekből kapott értékkel. Ez megerősíti, hogy a 1930-as évek végén azonosított Blazhko-periódus ~ 1 nappal nőtt. A Blazhko-periódussal feltekert fotografikus adatsor és maximum pontok (4.10. ábra) azt mutatják, hogy az amplitúdó



4.8. ábra. *Részlet a 2. csoport fehérített spektrumáról. A nyilak jelzik az azonosítható modulációs csúcsokat, melyek közül a negatív oldali szignifikánsabb.*



4.9. ábra. *A 2. csoport maximumainak ablakfüggvénye és spektruma. A modulációs csúcs mellett $f = 0,035$ c/d frekvencia környékén megjelenő csúcs, valószínűleg a Hold hónapához tartozó csúcs.*

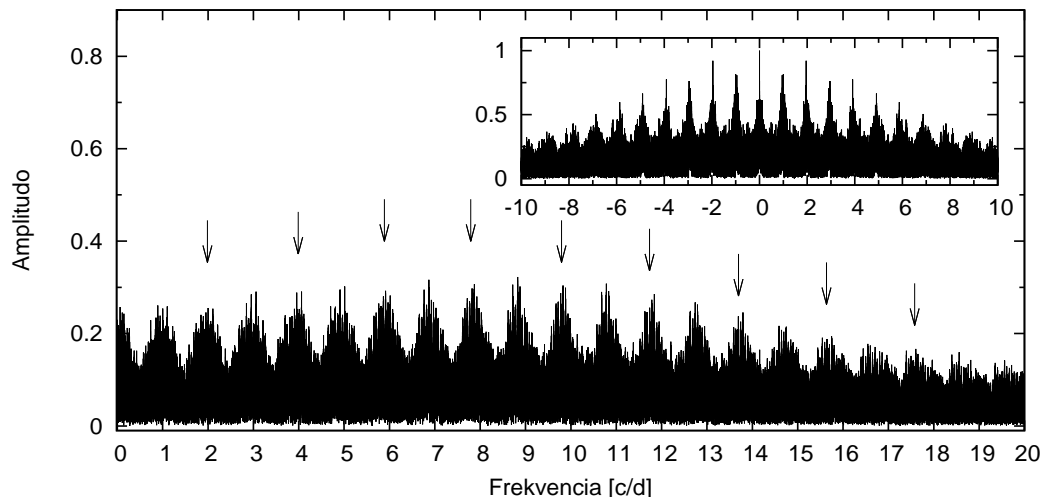


4.10. ábra. A 2. csoport adatsora és maximum fényességei a Blazhko-periódussal feltételezve. A Blazhko-moduláció során ~ 0.5 mag változás történik a maximum magasságon. A változás jóval nagyobb, mint a pontok szórása.

moduláció szinuszos és a maximum magasság a Blazhko-periódus során ~ 0.5 magnitúdónyit változik.

4.3. 3. csoport fénygörbe analízise

Az 1958 és 1972 között Konkoly Obszervatóriumban készült fotoelektromos méréseket valamint Sturch (1966), Fitch et al. (1966) és Butler et al. (1982) fotoelektromos észleléseit elemeztem együtt. További maximum időpontokat és amplitúdókat használtam fel Tsessevich (1969), Romanov (1969), Migach (1969), Belik (1969) észleléseiből. A csoportok közül talán ennek a kezelése volt a legnagyobb kihívás. Számos észlelő méréseiből épül fel az adatsor, közös éjszakához tartozó észlelés szinte nincs, a Konkoly fotoelektromos mérések mindegyikénél hiányzik a leszálló ág és a minimum hely. Mivel vegyesen fordul elő vizuális és fotoelektromos mérés, ezért a V fotometriai fényességeket használtam a fotoelektromos adatsorokból. A pulzációs periódus meghatározásához kizárólag a fotoelektromos méréseket használtam. A modulációs periódus meghatározásához a fotoelektromos és vizuális észlelésekből szerzett maximum időpontokat és magasságokat használtam.



4.11. ábra. A 3. csoport ablakfüggvénye és spektruma. A spektrum rendkívül zajos, egyértelműen nem is azonosíthatók a periódushoz tartozó csúcsok.

A pulzációs periódus meghatározása

Ahogy a 4.11. ábra is mutatja, a 3. csoport rossz mintavételezése miatt a pulzációs periódus és annak felharmonikusai eltűnnek a zajban, a várható frekvenciák helyeit nyíllal jelöltem meg. A korábban azonosított pulzációs frekvenciát megadva kerestem a fotoelektromos spektrumban megbúvó pulzációs jelet. A pulzációs periódusra:

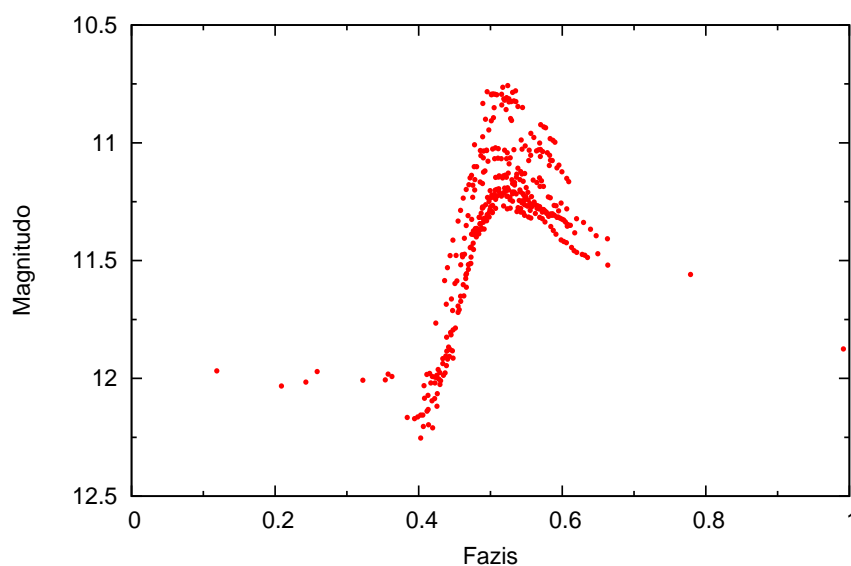
$$P_{gr3}^P = 0,5112423 \pm 1,9 \cdot 10^{-7} \text{ nap}$$

adódott. A fotografikus adatsoréhoz képest perióduscsökkenés mutatkozik, melynek mértéke egy nagyságrenddel nagyobb, mint a hibahatár. A 4.12. ábra a gyengén mintavételezett pulzációs periódussal feltekert fotoelektromos fénygörbét mutatja. A fényesség $\sim 1 - 1,5 \text{ mag}$ között változik.

Blazhko-periódus meghatározása

A több mint 13 évnyi adatsorból csupán 43 maximum magasságot sikerült azonosítani. Emiatt a spektrum (4.13. ábra) rendkívül zajos. Nem a modulációs frekvencia a legnagyobb amplitúdójú, de a maximum közvetlen környékén azonosítható, melyből a modulációs periódus:

$$P_{gr3,max}^{Bl} = 117,99 \pm 0,2 \text{ nap}$$

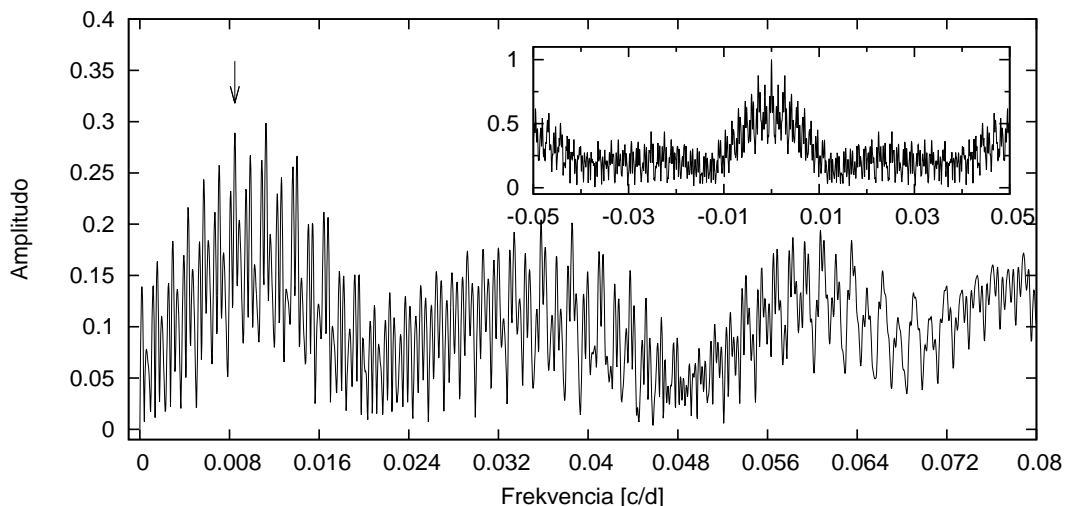


4.12. ábra. A fotoelektromos mérések pulzációs periódussal feltekert fénygörbéje. A gyenge mintavételezés ellenére az amplitúdó-moduláció több fázisában is készült mérés.

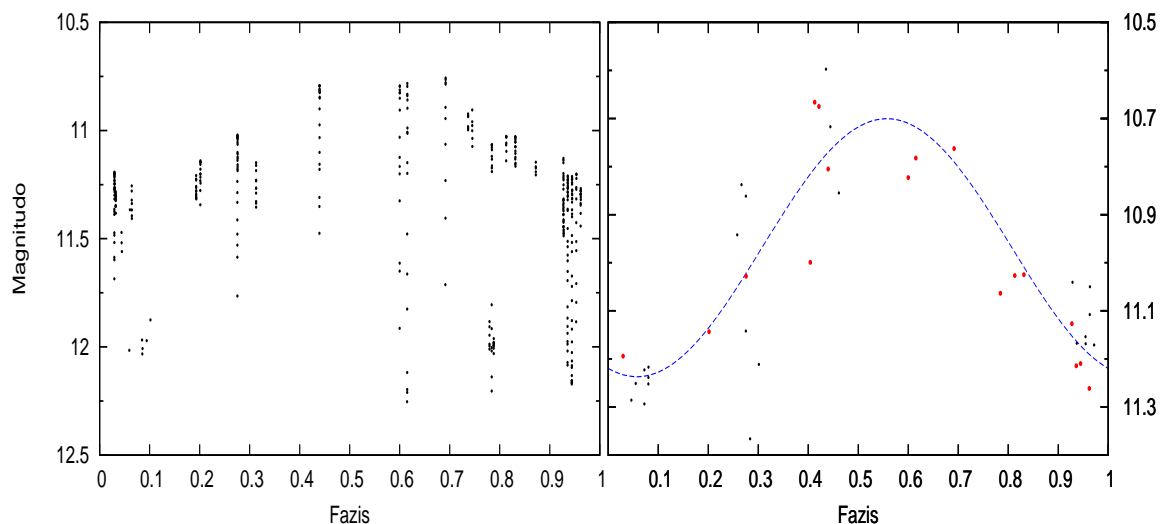
A 3. csoportban meghatározott periódusok hibái nem lépik túl az 1. és 2. csoport esetében meghatározott hibákat. Ennek oka az lehet, hogy míg az 1 – 2. esetben a nemlineáris illesztésnél a periódus mellett felharmonikusok illesztését is elvégezte a program, addig a fotoelektromos adatsor esetében kizárólag a pulzációs valamint modulációs periódus frekvenciáját kellett illesztenie. A Blazhko-periódussal feltekert adatsor és maximumok a 4.14. ábrán láthatóak. A bal oldali ábrán látható igazán, hogy mennyire gyengén mintavételezett a fotoelektromos adatsor. A jobb oldali ábrán a maximumok szórása az illesztett szinusz görbétől nem nagyobb, mint a fotografikus adatok esetén. A fotografikus mérésekhez hasonlóan a maximumok változásának amplitúdója $\sim 0,5$ magnitúdónyit változik a Blazhko-periódus alatt, ami megegyezik a fotografikus esetben mért értékkel.

4.4. 4. csoport fénygörbe analízise

A 4. csoportban a 2010 és 2011-ben a Konkoly Obszervatóriumban készült CCD méréseket kezeltem. A hosszú Blazhko-modulációt nem sikerült egy szezonnal teljesen lefedni, így a 2. szezonnal fő megfigyelési célja az volt, hogy az adatsort kiegészítse



4.13. ábra. A 3. csoport maximumainak ablakfüggvénye és spektruma. A nagy mintavételezési ürök miatt a zaj igen jelentős, a Blazhko-frekvencia környezetében számos azonos erősségű csúcs található.



4.14. ábra. A 3. csoport adatsora és maximum fényességei a Blazhko-periódussal feltekerve. Piros színnel a fotoelektromos maximum magasságokat, feketével a vizuális maximumokat jelöltem. A maximum magasságok amplitúdója a Blazhko-periódus alatt $\sim 0,5$ magnitúdónyit változik.

a Blazhko-periódus hiányzó fázisaival. 1972 és 2010 között más publikált, jó minőségű adatsort nem találtunk. A pulzációs és modulációs periódusok meghatározásához a

Konkoly-s CCD észlelésekből származó adatsort használtam fel.

A rendelkezésünkre álló adatsorok közül a CCD-s észlelések a legpontosabbak, ez lehetőséget ad arra, hogy a pulzációs és modulációs periódusok meghatározása mellett részletesebb képet kapjunk magáról a pulzációról, modulációról.

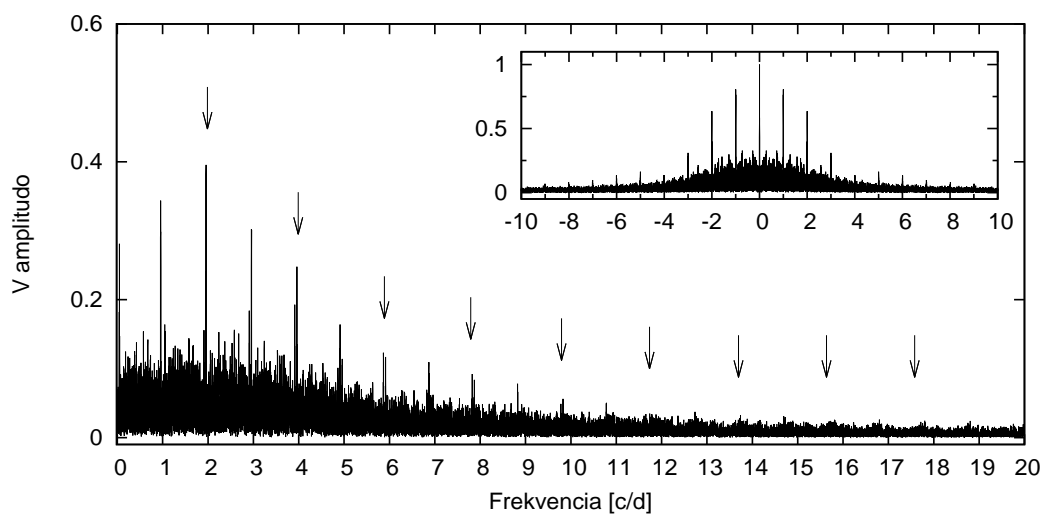
A pulzációs periódus meghatározása

Az RZ Lyrae CCD Fourier-spektruma és ablakfüggvénye a 4.15. ábrán látható. Az ablakfüggvény azt mutatja, hogy a ± 1 , ± 2 és a ± 3 c/d -s aliasok megjelennek a spektrumban. A spektrumban a pulzációs periódusnak van a legszignifikánsabb jele. A nyers spektrumban a pulzációs periódus szemre a ~ 4 . felharmonikusáig követhető, azonban a spektrum részletesebb vizsgálatával egészen a 11. felharmonikusig beazonosítható. Az illesztést 11 felharmonikussal végeztem, melyből a pulzációs periódus:

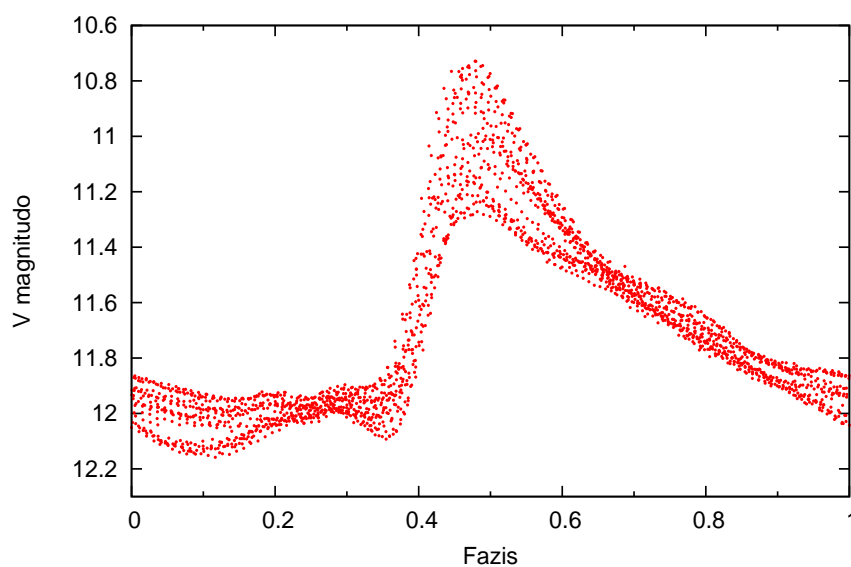
$$P_{gr4}^P = 0,5112302 \pm 10^{-7} \text{ nap}$$

Ezen periódussal feltekert fénygörbe a 4.16. ábrán látható. A pulzáció minden fázisában változik a fényesség. Legerősebb változás maximum környékére tehető ($\sim 0,6$ mag), de jelentős fényességváltozást szenved a minimum is ($\sim 0,2$ mag). Legkisebb változást a 0,3 pulzációs fázis közelében valamint a leszálló ág közepén ($\sim 0,65$ -nél) szenved el. Ebből az is kiderül, hogy a korábbi észlelések minimum helyein és leszállóágán tapasztalható szórás nem kizárólag a mérési hiba eredménye. A csillag amplitúdómodulációt mutat a pulzáció minden fázisában a Blazhko-periódus alatt. Ugyanez látható a fehérített fénygörbén is (4.17. ábra) valamint az, hogy a fázisban is történik változás. Ennek vizsgálatához elkészítettem a maximum magasságok ún. "tojásgörbéjét" (4.18. ábra).

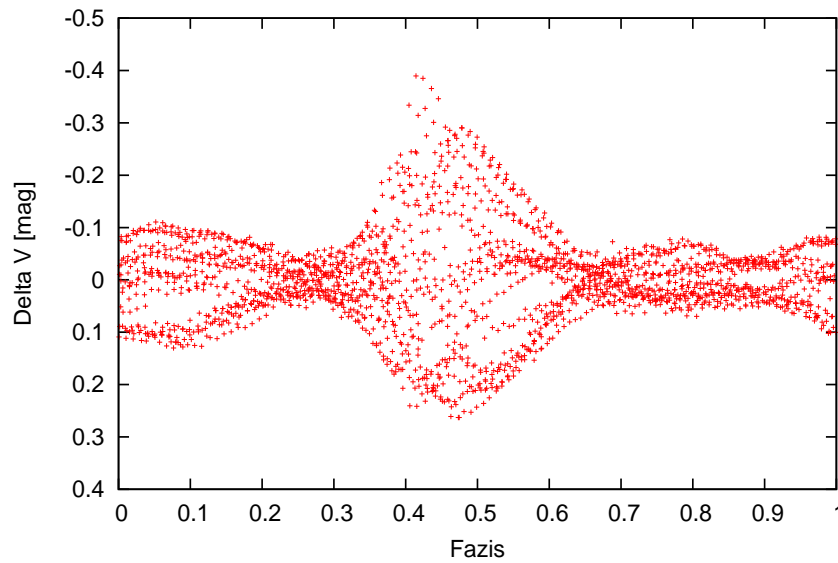
A tojásgörbe, melyen a maximum magasságot ábrázoljuk a pulzációs fázis függvényében (4.18. ábra), azt mutatja, hogy a maximumok amplitúdója és fázisa egyaránt változik a Blazhko-periódus alatt. A maximum magasságok illesztett görbétől való eltérése arról árulkodik, hogy a ~ 121 napos Blazhko-perióduson kívül más is befolyásolja a fázis változását. A görbe alapján $\sim 0,035$ pulzációs fázissal tolódik el a maximum ($\sim 0,0175$ nap). Azonban a pontok szórása ennél nagyobb, $\sim 0,045$ pulzációs fázisnyi változást jósol. A tojásgörbe körüljárási iránya lehet pozitív, negatív vagy degenerált. Utóbbi esetben egyetlen vonallá zsugorodik össze. Ha ez a vonal függőleges, akkor nincs fázismoduláció, ha a vonal ferde vagy sarlószerű, akkor van fázismoduláció.



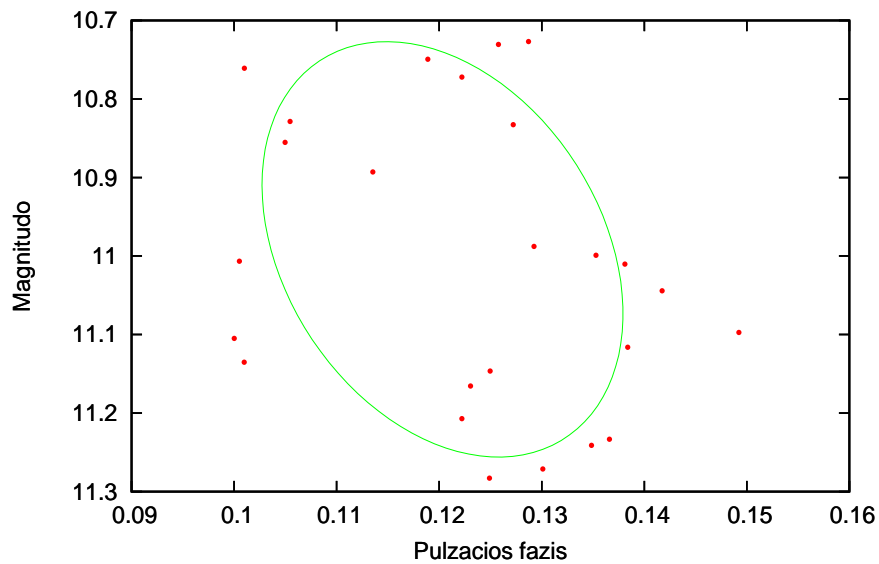
4.15. ábra. A 4. csoport ablakfüggvénye és spektruma. A nyers spektrumban csak a 4. felharmonikusig követhető a pulzációs frekvencia. A spektrum részletes tanulmányozásával a 11. felharmonikus is megjelenik.



4.16. ábra. A 4. csoport pulzációs periódusával feltekert fénygörbe. Az erős amplitúdómoduláció mellett fázismodulációs is megjelenik. 0,6 – 0,8 pulzációs fázis között a leszálló ág deformációja látható.



4.17. ábra. A 4. csoport pulzációs periódusával fehérített fénygörbe. A pulzáció szinte minden fázisában történik változás.



4.18. ábra. A 4. csoport tojásgörbéje. A maximum magasságnak nem csak az amplitúdója változik, hanem a fázisa is. Az illesztés alapján $\sim 0,035$ pulzációs fázisnyi a változás ($\sim 0,0175$ nap). A pontok elhelyezkedése azonban arra utal, hogy a fázismodulációt nem csak a ~ 121 napos Blazhko-moduláció befolyásolja.

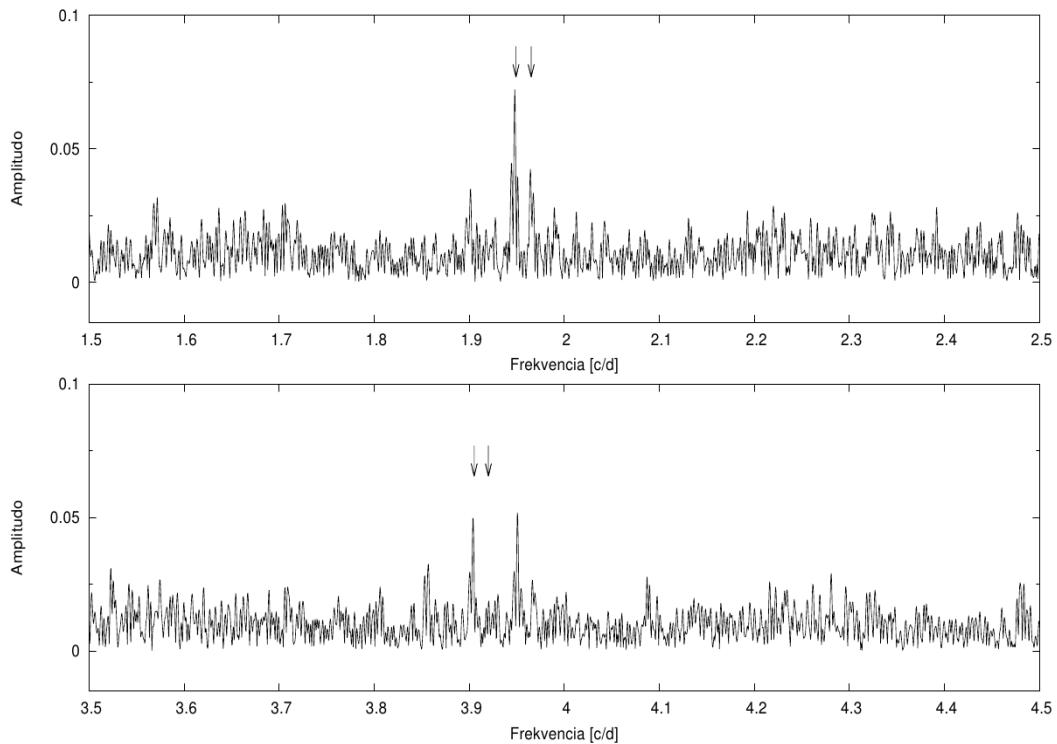
Blazhko-periódus meghatározása

A fehérített spektrum részletét lehet látni a 4.19. ábrán. Hasonlóan a korábbi fehérített spektrumokhoz itt is a negatív oldali modulációs csúcsok dominánsak. A pozitív oldali csúcs szinte már az első felharmonikusnál zajszintű. A modulációs periódus:

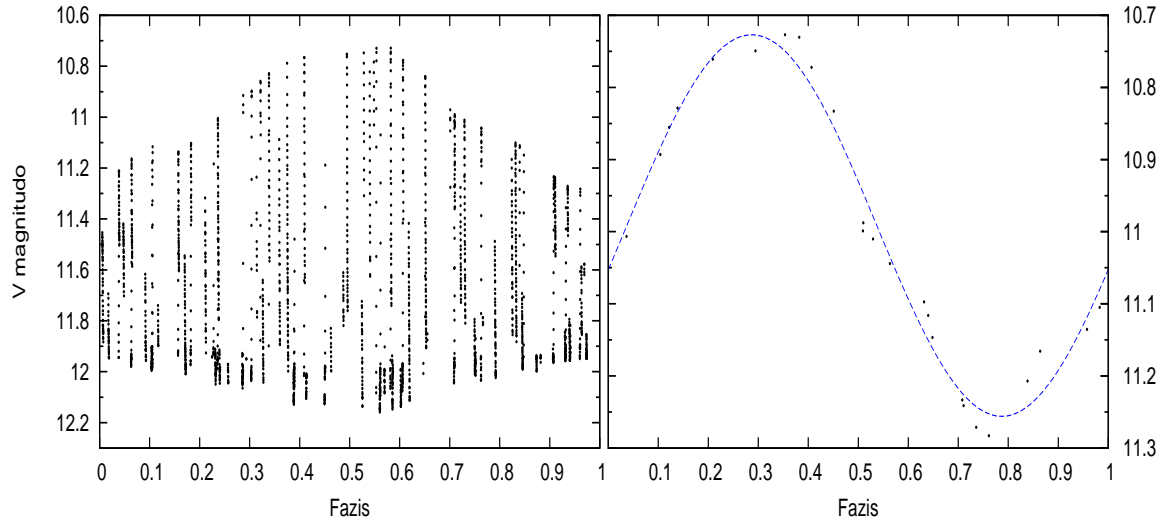
$$P_{gr4,diff}^{Bl} = 121,36 \pm 0,04 \text{ nap}$$

Ezzel a periódussal feltekert adatsor és maximumok a 4.20. ábrán láthatók. A maximum magasság változása $\sim 0,5 \text{ mag}$, mely megegyezik a fotografikus és fotoelektromos esetekben mért változással. Mivel a 2 – 4. csoportoknál meghatározott maximum magasságok változása azonos, feltételezhető, hogy ez a mérések közötti időszakokban sem változott meg. Ami azt jelenti, hogy az RZ Lyrae Blazhko-s viselkedése stabil.

A fehérített spektrum részletesebb vizsgálatával további erős csúcsokat lehetett találni. Ezek tanulmányozása során találtam rá egy újabb, feltételezhetően modulá-



4.19. ábra. *Részlet a 4. csoport fehérített spektrumáról.* A korábbi fehérített spektrumokhoz hasonlóan a negatív oldali csúcs a szignifikáns. Pozitív oldalon már az első felharmonikus esetében a zajjal van azonos szinten.

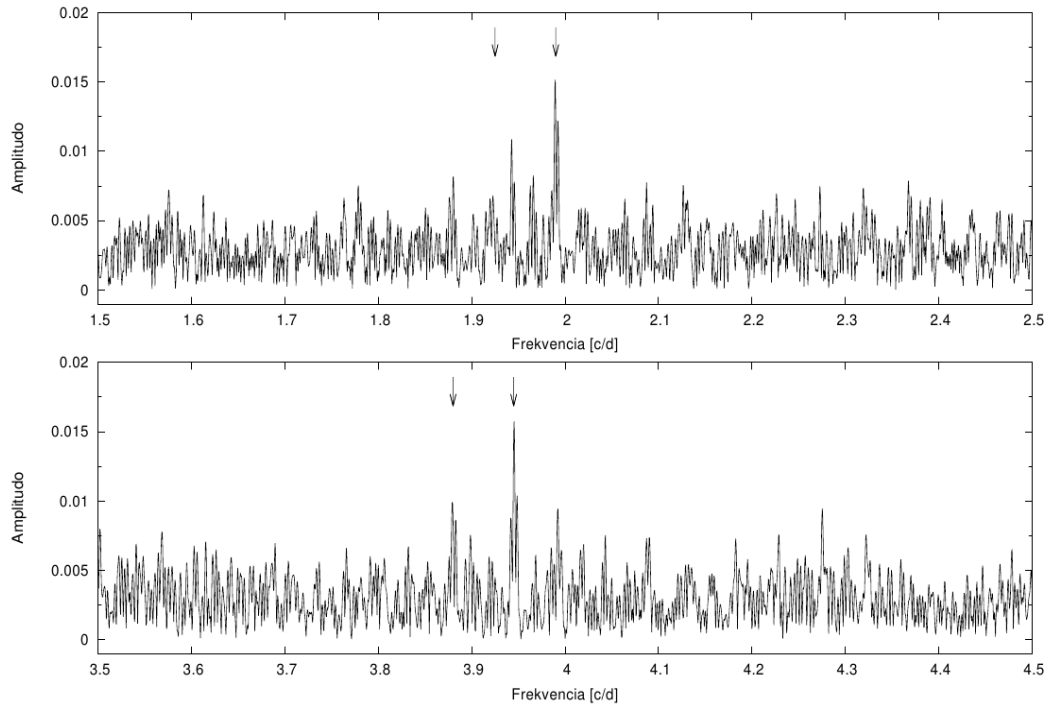


4.20. ábra. A 4. csoport adatsora és maximum fényességei a Blazhko-periódussal feltételezve. A maximum magasság amplitúdója a Blazhko-periódus alatt $\sim 0,5$ magnitúdónyit változik.

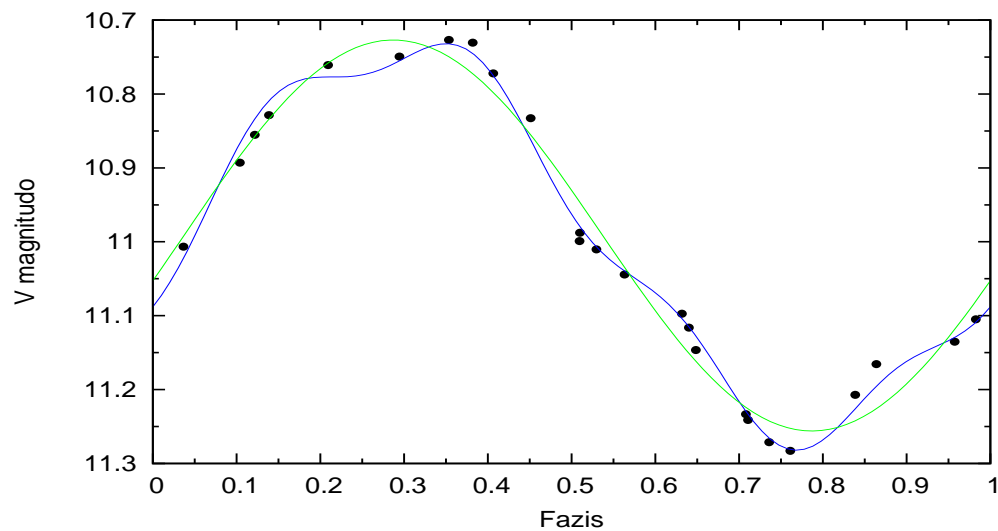
ciós jelre, ami a pulzációs frekvencia és 9 felharmonikusa mellett jelenik meg $\pm f_{m_2} = 0,03335 \text{ nap}^{-1}$ távolságra (4.21. ábra). Ez a távolság közel 4-szerese a Blazhko-moduláció (f_{m_1}) pulzációs csúcstól való távolságának ($4 \cdot f_{m_1} = 0,03296 \text{ nap}^{-1} \approx f_{m_2} = 0,03335 \text{ nap}^{-1}$). A másodmoduláció periódusa:

$$P_{gr4}^{Bl_2} = 29,98 \pm 0,01 \text{ nap}$$

Az f_{m_2} csúcsok közül a pozitív oldali az erősebb, negatív oldali alig emelkedik ki, pont ellenkezőleg, mint az $f_{m_1} = f_m$ esetében. Ez arra enged következtetni, a két moduláció egymástól független. Ennek a másodlagos modulációnak a periódusa ~ 30 nap, majdnem pontosan a negyede a Blazhko-periódusnak. Megvizsgáltam, hogy ez a másodlagos periódus megjelenik-e a Blazhko-periódus alatt. A CCD adatsorban azonosított 26 maximumot ábrázoltam a Blazhko-periódussal feltételezve. A pontokra első és negyedrendű szinuszos hullámot illesztettem (4.22. ábra). Az ábra azt mutatja, hogy a negyedrendű hullám jól illeszkedik a maximum pontokra. Ez megerősíti, hogy mindkét moduláció jelen van és magyarázatot adhat a maximumok elhelyezkedésére a 4.18. ábrán. Hasonlóan a CZ Lac-hoz (Sódor et al., 2011) az RZ Lyrae is 2 modulációt mutat $\sim 1 : 4$ -es modulációs frekvenciaarányal.



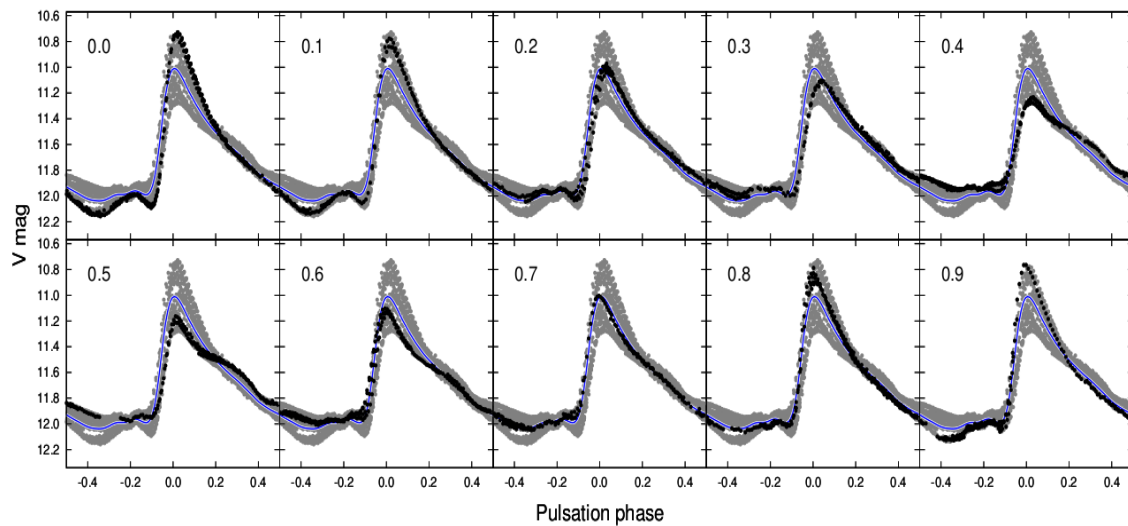
4.21. ábra. Másodmoduláció a 4. csoport fehérített spektrumában. A fehérítés után másodmodulációra utaló csúcsok jelentek meg a pulzációs frekvencia és felharmonikusai körül. A Blazhko-modulációs csúcsokkal ellentétben a pozitív oldali csúcs az erősebb.



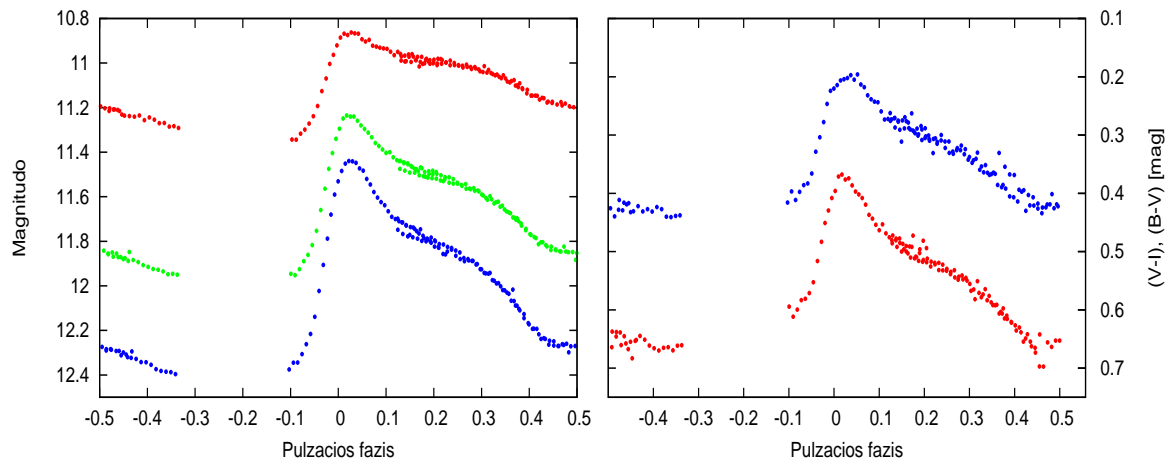
4.22. ábra. A CCD maximum magasságának változása. A ~ 121 napos Blazhko-periódusra egy ~ 30 napos másodlagos modulációs periódus rakódik.

4.4.1. Fénygörbeváltozás a Blazhko-moduláció alatt

A 4.23. ábrán az RZ Lyrae V szűrőben készült CCD fénygörbéje látható a moduláció 10 különböző fázisában. Az amplitúdó $\sim 0,8$ magnitúdónyit változik a Blazhko-periódus alatt, míg a fázis modulációja $\sim 0,035$ pulzációs fázisnyi ($\sim 0,0175$ nap). Azok a Blazhko-s csillagok, melyek nagy amplitúdójú modulációt mutatnak, a kis amplitúdójú fázisban erősen eltorzult fénygörbével rendelkeznek. Az RZ Lyrae is nagy amplitúdóval változik, ennek megfelelően a kis amplitúdójú fázisban a fénygörbén változás mutatkozik. Legszembetűnőbb a leszálló ág, ahol egy dudor jelenik meg, mely a moduláció legkisebb fázisában a legerősebb. Ilyet korábban sem stabil fénygörbéjű, sem Blazhko-s RR Lyrae-k esetében nem észleltek. Az RZ Lyrae leszálló ágán megjelenő dudorhoz hasonlót a dudoros Cefeidák fénygörbéje mutat, például az η Aql-é (Wisniewski & Johnson, 1968). A fénygörbén megjelenő dudort Smolec & Moskalik (2010) az alapl módus és a második felhang közötti 3 : 1 rezonanciával magyarázta. A jelenség megfigyelhető a dudoros Cefeidák és az RZ Lyrae színgörbéjén is (4.24. ábra), ami azt mutatja, hogy a hőmérsékletcsökkenés kevésbé meredek a kis amplitúdójú fázisban. Ebből arra következtethetünk, hogy az RZ Lyrae-nél jelentkező dudorra hasonló lehet a magyarázat, mint a dudoros Cefeidáknál.



4.23. ábra. *Fénygörbeváltozás a Blazhko-periódus alatt.* A fázis nullpontja a maximum idejére lett kalibrálva. Szürke pontok jelölik a pulzációs periódussal feltekert adat-sort, feketével az aktuális Blazhko-fázis fénygörbéje, késsel az illesztett középörbe van jelölve. Forrás: Jurcsik et al. (2012)



4.24. ábra. *Fényesség és szín a kis amplitúdójú Blazhko-fázisban.* Bal oldalon a különböző színben (piros: I , zöld: V , kék: B) mért fényesség látható, a moduláció kis amplitúdójú fázisában. Jobb oldalon a $B - V$ (kék) és a $V - I$ (piros) színek láthatók. Mindegyik fénygörbén megjelenik a dudor.

A dudoros fénygörbe egy extrém esete lehet a V445 Lyrae, egy $RRab$ típusú pulzáló változó, melynek fényváltozása a moduláció kis amplitúdójú fázisában nem éri el a 0,2 magnitúdót (Guggenberger et al., 2012) valamint kettős csúcs jelenik meg a fénygörbén.

5. fejezet

Az RR Lyrae $O - C$ diagramja

Az $O - C$ diagram a pulzációs periódus változásáról ad információt. A diagram azt mutatja meg, hogy a pulzáció egy adott időpontjának egymás utáni bekövetkezése mennyivel tér el a bekövetkezés várható idejétől. A napban megadott fáziskülönbséget ábrázolják az idő függvényében. A pulzáció periódusa kapcsolatban áll a csillag belső szerkezetével. Azaz, ha a csillagszerkezetben változás történik, akkor ez megfigyelhető változást okoz a periódusban. Modellszámítások azt mutatják, hogy a csillagfejlődés által okozott periódusváltozás olyan gyenge, hogy kimutatása csak hosszú távú megfigyelésekkel lehetséges. Mostanra már sok RR Lyrae csillagról áll rendelkezésünkre több évtizedet átfogó, akár 100 évnél is hosszabb megfigyelési anyag. Ezek között számos esetben találtak olyan csillagot, ami viszonylag rövid idő alatt, akár többször, különböző nagyságú és irányú periódusváltozást mutat (pl. RR Gem: Sódor et al., 2007).

5.1. Maximum időpontok meghatározása

A felhasznált adatsorokból kimért maximum időpontokat az irodalomban elérhető maximum időpontokkal egészítettem ki. Ezek nagy része a GEOS¹ adatbázisból származik, mely a dolgozatomban vizsgált adatsorok valamennyi maximum időpontját tartalmazza. Az azonos maximum időpontok esetében az általam kimért időpontot használtam. A maximum időpontokat szemrevételezéssel határoztam meg. Éjszánként ábrázoltam a fénygörbét és egy program segítségével fájlba írtam az általam

¹<http://geos.webs.upv.es/>

Időtartam HJD–2400000	maximum időpontok száma	referencia
13375 – 16415	14	(1)
18404 – 19009	18	(1)
26074 – 32473	88	(2), (3)
33369 – 35041	93	(2), (4), (5)
36413 – 41394	18	(2), (4), (6) (7), (8), (9)
43369 – 51757	33	(1)
52416 – 54014	43	(1)
54205 – 55075	37	(1)
55294 – 55826	26	(4)

5.1. táblázat. Az *RZ Lyrae maximum időpontjainak összefoglaló táblázata*. (1) GEOS, (2) Tsessevich, (3) Zverev & Makarenko, (4) MTA CSKI, (5) Klepikova, (6) Romanov, (7) Migach, (8) Fitch, (9) Belik.

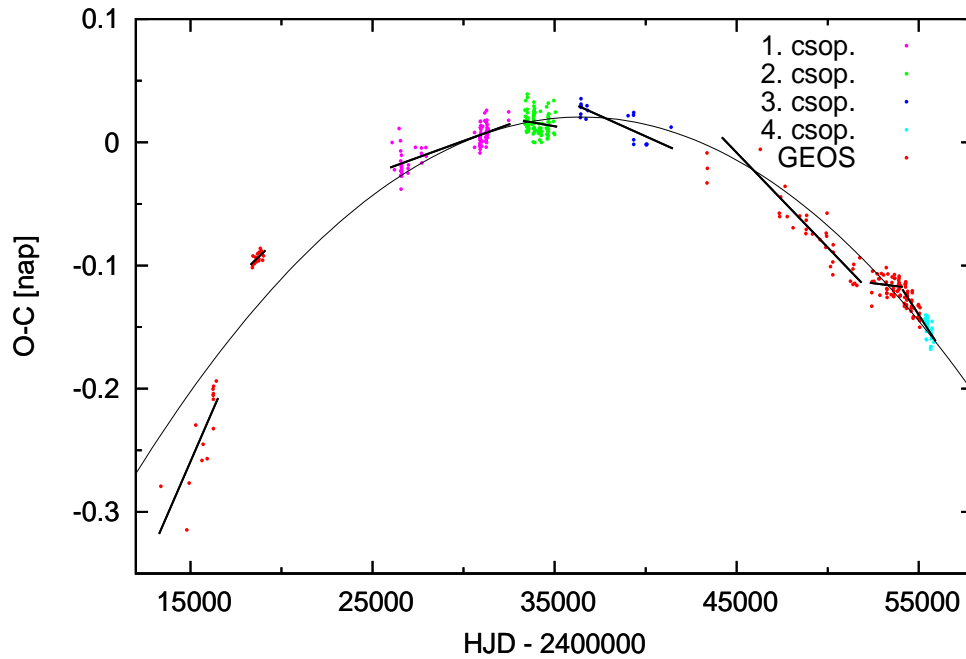
megjelölt maximum időpontokat. Az $O - C$ diagramban jelentősen kiugró pontok esetében újrazsgáltam azokat és szükség esetén eltávolítottam. A felhasznált maximum időpontokat az 5.1. táblázat tartalmazza.

5.2. Hosszú távú változások vizsgálata

Az $O - C$ értékeket a következő efemerisz és periódus alapján számoltam:

$$t_0 = 2\,441\,183.426 [HJD], P_e = 0.511247 \text{ nap.}$$

Az így elkészült $O - C$ diagram az 5.1. ábrán látható. Az egyes csoportok (1 – 4. csoport) megfelelnek a frekvencia-analízisnél kezelt csoportoknak. A pontokra illesztett parabola azt mutatja, hogy az RZ Lyrae pulzációs periódusa az elmúlt ~ 110 évben folyamatosan csökkent. A parabolikus illesztés paraméteréből a perióduscsökkenési ráta $\beta = P^{-1}dP/dt = -9,667 \cdot 10^{-10} \text{ nap}^{-1} = -0,353 \text{ Myr}^{-1}$, ami a Le Brogne et al. (2007a) által meghatározott $P^{-1}dP/dt = -0,367 \text{ Myr}^{-1}$ és a Jurcsik et al. (2012) által meghatározott $P^{-1}dP/dt = -0,323 \text{ Myr}^{-1}$ közé esik.



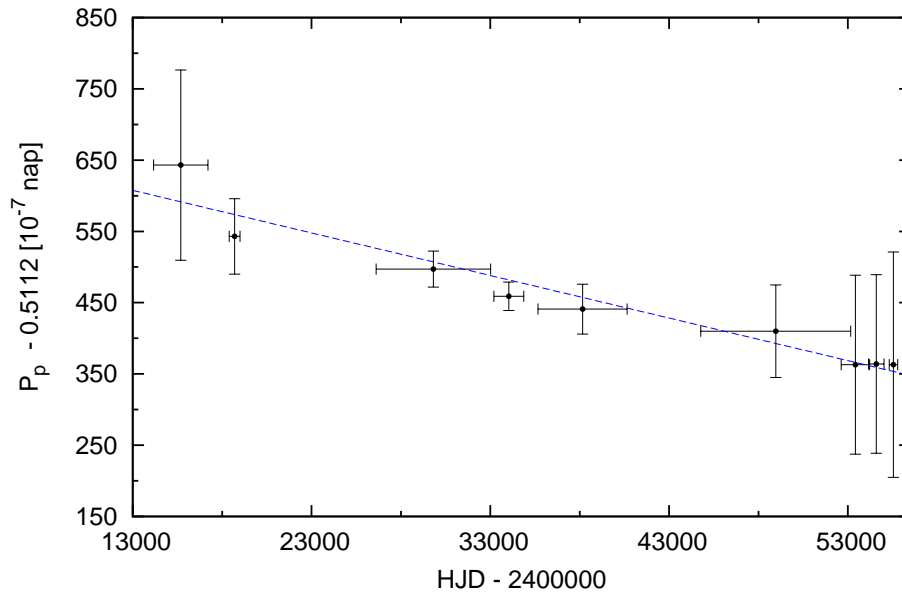
5.1. ábra. Az *RZ Lyrae* $O - C$ diagramja. Az illesztett görbe (negatív) parabola, csökkenő periódusra utal. Az 1 – 4. csoportok megegyeznek a fotometriai vizsgálatoknál alkalmazott csoportokkal.

Az 5.1. táblázat szerinti időszakok mindegyikére egyenest illesztettem, ezeket fekete vonallal jelöltem az 5.1. ábrán. A szakaszok meredekségéből számolt periódusok az 5.2 táblázatban vannak összefoglalva. A meghatározott periódusok hibáit az adatsorok hossza, a felhasznált maximumok száma és azok hibája befolyásolja. Az $O - C$ meredekségekből megállapított periódusokat ábrázoltam a HJD függvényében (5.2. ábra). A periódusokhoz tartozó HJD időpontokat az adott szakaszok HJD időpontjainak átlagából számoltam. A vízszintes vonalak az egyes adatsorok hosszát szimbolizálják. A pulzációs periódusban egyértelmű csökkenés mutatható ki az $O - C$ -kre illesztett meredekségek alapján is. A CCD-s időszakokra vonatkozó nagy periódus-bizonytalanság oka valószínűleg a rövid időtartamok miatti illesztési bizonytalanság.

Az illesztés bizonytalanságát tovább növeli az *RZ Lyrae* fázismodulációja. Bár a korábbi vizsgálatok során csak a CCD-s megfigyeléseknél sikerült kimutatni fázismodulációt, az 5.1. ábra pontjai egyértelműen mutatják, hogy a fázismoduláció közel azonos mértékben jelen volt az elmúlt ~ 110 évben.

Szakasz	P_{O-C} [nap]	dP_{O-C} [nap]
$GEOS_1$	0,5112643981	$1,335 \cdot 10^{-5}$
$GEOS_2$	0,5112543981	$5,298 \cdot 10^{-6}$
1. csoport	0,5112497503	$2,524 \cdot 10^{-6}$
2. csoport	0,5112459442	$2,001 \cdot 10^{-6}$
3. csoport	0,5112441306	$3,499 \cdot 10^{-6}$
$GEOS_3$	0,5112410360	$6,487 \cdot 10^{-6}$
$GEOS_4$	0,5112363203	$1,256 \cdot 10^{-5}$
$GEOS_5$	0,5112364123	$1,253 \cdot 10^{-5}$
4. csoport	0,5112363920	$1,581 \cdot 10^{-5}$

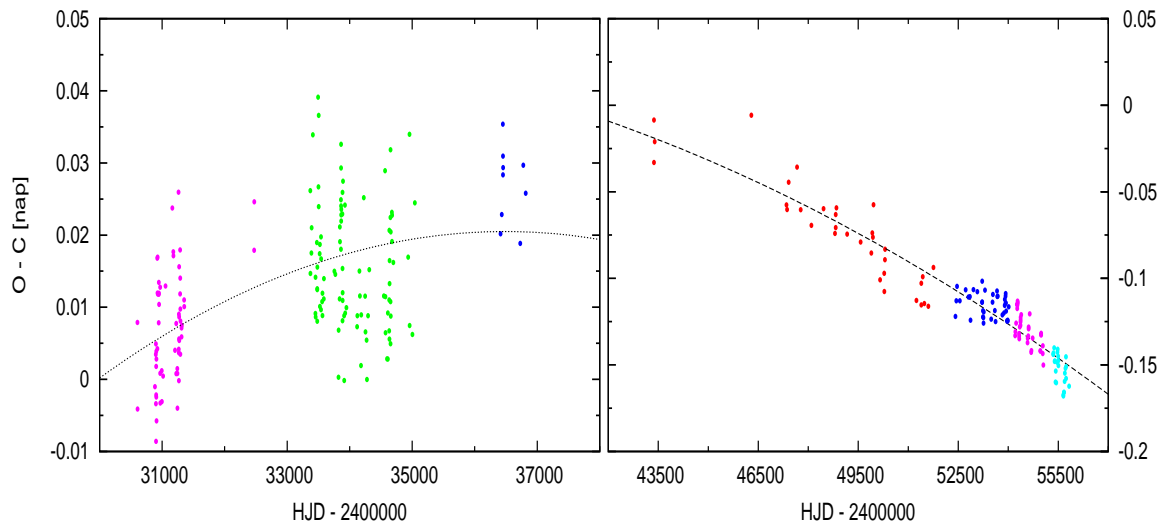
5.2. táblázat. *Pulzációs periódusok az O – C meredekségekből.* A periódusok hibája egy nagyságrenddel nagyobb, mint a teljes adatsor felhasználásával kapott periódus hiba. A pulzációs periódus csökkenést mutat.



5.2. ábra. *Pulzációs periódus változása az O – C meredekségek alapján.* A pulzációs periódus csökkenése mutatható ki. A periódus hibáját az adatok saját hibái, a fázis-moduláció és az adatsor hossza befolyásolja.

Az 5.3. ábra bal oldalán a 2. csoport (zöld) $O - C$ területe van kinagyítva. A pontok alapján a fázisingadozás $\sim 0,03 - 0,035$ napnyira tehető ($\sim 0,06$ pulzációs fázis), ami jóval nagyobb, mint a korábban a 4. csoportnál meghatározott változás. Ezt okozhatja az, hogy a fotografikus időszakban a pontok szórása nagyobb, ezért a maximum időpontok bizonytalansága is nagyobb.

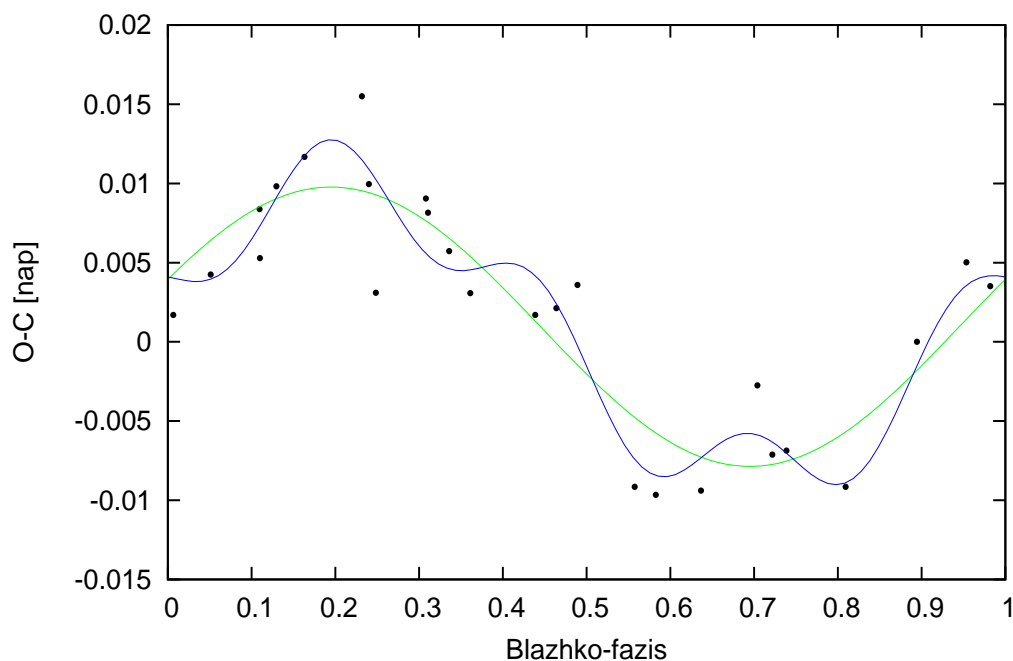
Az utóbbi ~ 10 évről érhető el CCD-s maximum időpont a GEOS adatbázisban. Részben ez a TAROT teleszkópok észlelésbe való bevonásának köszönhető. Jelenleg a CCD-s észlelések szolgáltatják a legpontosabb méréseket, így várható, hogy a periódusváltozást részletesebben tanulmányozhatjuk majd általuk. Az 5.3. ábra jobb oldalán a CCD-s maximum észlelések vannak feltüntetve. Sötétkékekkel és rózsaszínnel a GEOS adatbázis CCD-s maximumai, világoskékekkel a Konkoly Obszervatórium CCD-s maximumai vannak jelölve, melyeket a GEOS adatbázisból származó vegyes típusú észlelésekkel (piros) egészítettem ki. A fázismoduláció értéke $\sim 0,025 - 0,03$ nap ($\sim 0,05$ pulzációs fázis) körülnek állapítható meg, ami kisebb, mint a fotografikus idejére meghatározott érték, ám a 4.18. ábra pontjai által jósolt fázismodulációval azonos nagyságú.



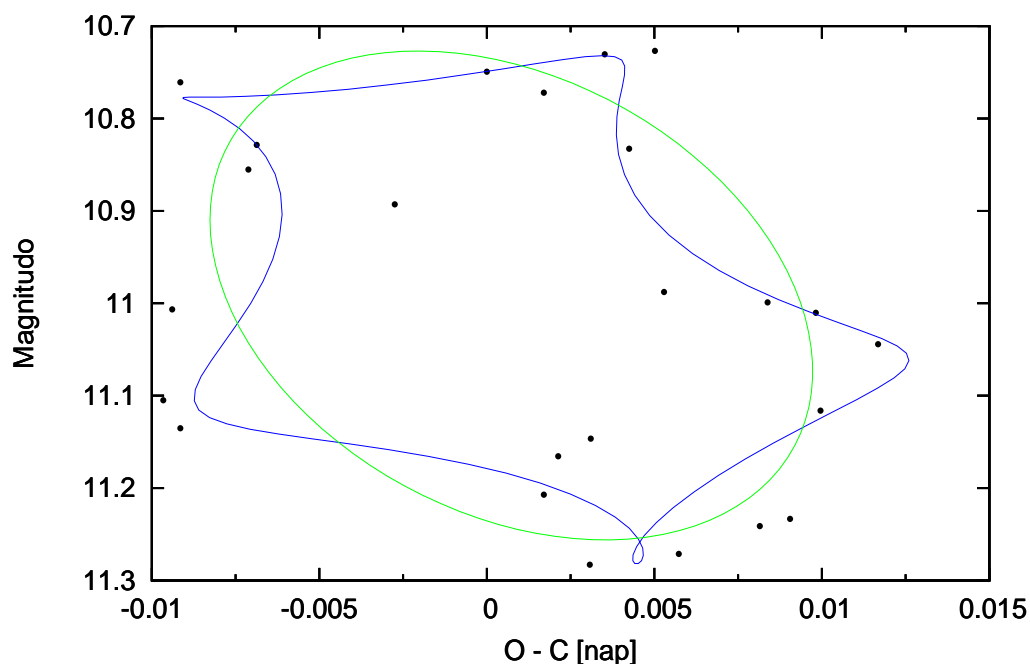
5.3. ábra. A fotografikus és CCD-s időszak $O - C$ diagramja. Mindkét szakasz azt mutatja, hogy a folytonos, lineáris periódusváltozásra további kis mértékű periódusingadozás is ráakadódik. 2. (zöld) és 4. (világoskék) csoport rendre ~ 0.03 és ~ 0.025 nap fázisingadozást mutat.

A fázismoduláció mellett egy $\sim 2000 - 3000$ napos ingadozás figyelhető meg mindkét esetben. Az észlelések azonban nem alkalmasak annak eldöntésére, hogy ezt az ingadozást a periódusváltozás ingadozása, vagy esetleg egy hosszú időskálájú harmadik moduláció okozza. A megállapításához évtizedeket átfogó pontos mérésekre van szükség. Mivel a TAROT teleszkópok rendszeresen szolgáltatnak maximum időpontokat, az RZ Lyrae hosszú távú megfigyelése megerősítheti, vagy cáfolhatja ezt a lehetséges modulációt.

Az 5.4. ábrán a 4. csoport $O - C$ pontjait ábrázoltam a Blazhko-periódussal feltekert maximum időpontok függvényében. Az elsőrendű illesztés kisebb fázismodulációt mutat ($< 0,02$ nap), mint az ugyanezen időszakra az 5.3. ábrán meghatározott érték. Azonban a negyedrendű illesztés, mely figyelembe veszi a másodlagos modulációt, már $\sim 0,0225$ napnyi ($\sim 0,044$ pulzációs fázis) fázisváltozást mutat, ami közel megegyezik az 5.3. ábrán leolvasható fázismodulációval. Azaz a másodmoduláció nem



5.4. ábra. $O - C$ változása a Blazhko-periódus alatt CCD-s megfigyelések idején. Első- (zöld) és negyedrendű (kék) hullámot illesztve a maximum időközön is jelentkezik a ~ 30 napos modulációs periódus. Az elsőrendű illesztés $\sim 0,02$ nap, a negyedrendű illesztés $\sim 0,0225$ nap fázisváltozást mutat.



5.5. ábra. *Maximum magasságok változása az $O - C$ függvényében.* A negyedrendű illesztés láthatóan jobban írja le a megfigyelt változásokat, mint az elsőrendű.

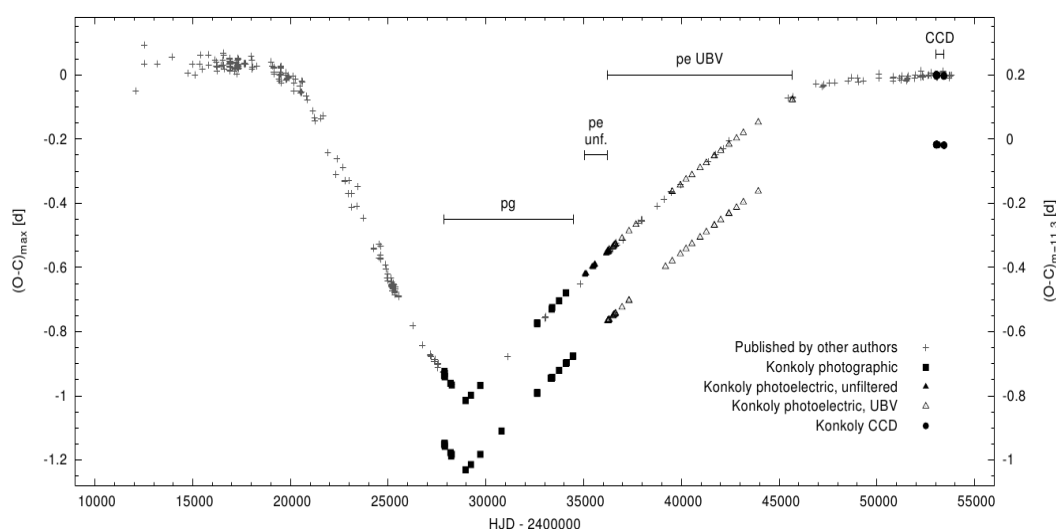
hagyható figyelmen kívül a hosszútávú megfigyelések során sem. Az 5.5. ábrán a V szűrőben mért CCD maximum magasságokat ábrázoltam az $O - C$ értékek függvényében. Az illesztett negyedrendű görbéhez a maximum magasságokat ábrázoltam a Blazhko-periódus függvényében valamint az $O - C$ értékeket ábrázoltam a Blazhko-periódus függvényében és a pontokra 1-1 negyedrendű hullámot illesztettem ($f(x)$, $g(x)$). Ezt követően t paraméterre átvérve (Blazhko-fázis $t[0:1]$ közé esik) ábrázoltam az $f(t)$, $g(t)$ függvényeket (kék görbe). Az eljárás hasonló az elsőrendű görbe (zöld) illesztése esetén is. A pontokra illesztett negyedrendű görbe jól követi a maximum magasságokat, melyek szabálytalannak tűnő fázisingadozását a másodlagos moduláció nagy mértékben befolyásolja.

Dr. Jurcsik Johanna kutatócsoportja már több mezőcsillag és gömbhalmazbeli $RRab$ hosszú távú változásait vizsgálta. Azt vizsgálták, hogy a pulzációs és a modulációs periódusváltozás között kimutatható-e egyértelmű kapcsolat. Az a tapasztalat, hogy a pulzációs és modulációs periódusváltozás között a megfigyelt csillagoknál többnyire antikorreláció van. Azokban az esetekben, ahol korreláció van a periódusváltozás

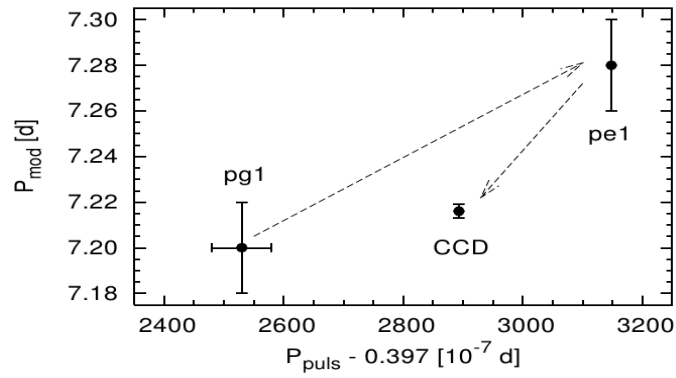
erősen irreguláris, erős változások mutatkoznak. A pulzációs és modulációs periódusokban bekövetkező változások nem egyidejűleg történnek meg, így korreláció léphet fel.

Az RR Gem (Sódor et al., 2007), RV Uma (Hurta, 2007) és XZ Dra (Jurcsik et al., 2002) periódusaiban bekövetkező szabálytalan viselkedéseket mutatja azok $O - C$ diagramja (5.6., 5.8., 5.10. ábra). A pulzációs és modulációs periódusváltozások között igen eltérő kapcsolat mutatkozik. Az RR Gem-et korreláció jellemzi periódusnövekedés és -csökkenés esetében is (5.7. ábra). Az RV Uma esetében egyaránt előfordult korreláció és antikorreláció, melyek periodikusan követik egymást (5.9. ábra). Az XZ Dra esetében is korreláló periódusnövekedést mutattak ki (5.11. ábra). Az M5 gömbhalmazban (Jurcsik et al., 2011, Szeidl et al., 2011) a pulzációs periódusban szabálytalanul változó, közel állandó periódusú vagy túl gyenge mintavételezésű RR Lyrae-eket találtak. Így eddig sem a mezőbeli, sem a halmazbeli RR Lyrae változóknál nem sikerült egyértelmű kapcsolatot kimutathatni a periódusokat jellemző rendszertelen változások miatt.

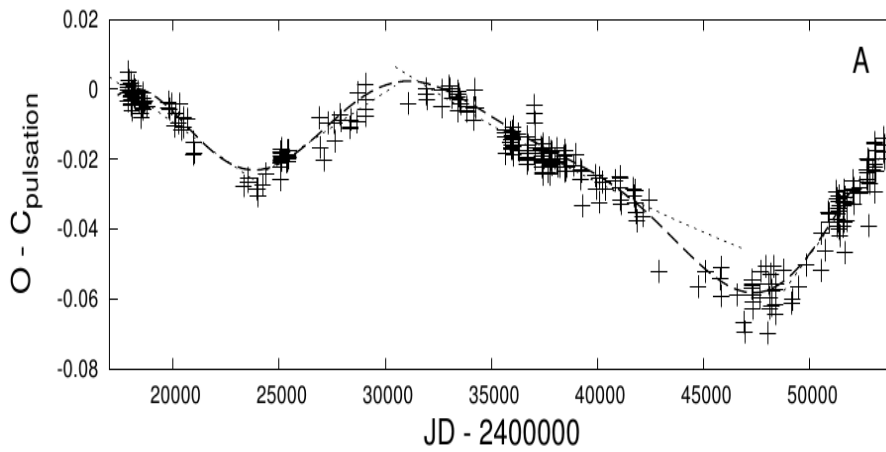
Az RZ Lyrae ilyen szempontból ideális célpont. Nem tapasztalható szabálytalan változás sem a Blazhko-periódusában, sem a pulzációs periódusában, így ha van kapcsolat, akkor annak egyértelműen jelentkeznie kell. Az 5.3. táblázatban a frekvenciaanalízissel meghatározott pulzációs és modulációs periódusokat gyűjtöttem össze azzal a céllal, hogy megvizsgáljam, hogy a két periódusváltozás között van-e kapcsolat.



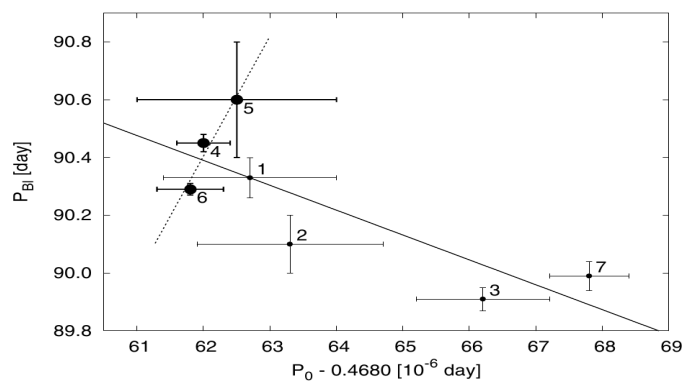
5.6. ábra. Az RR Gem $O - C$ diagramja. Forrás: Sódor et al. (2007)



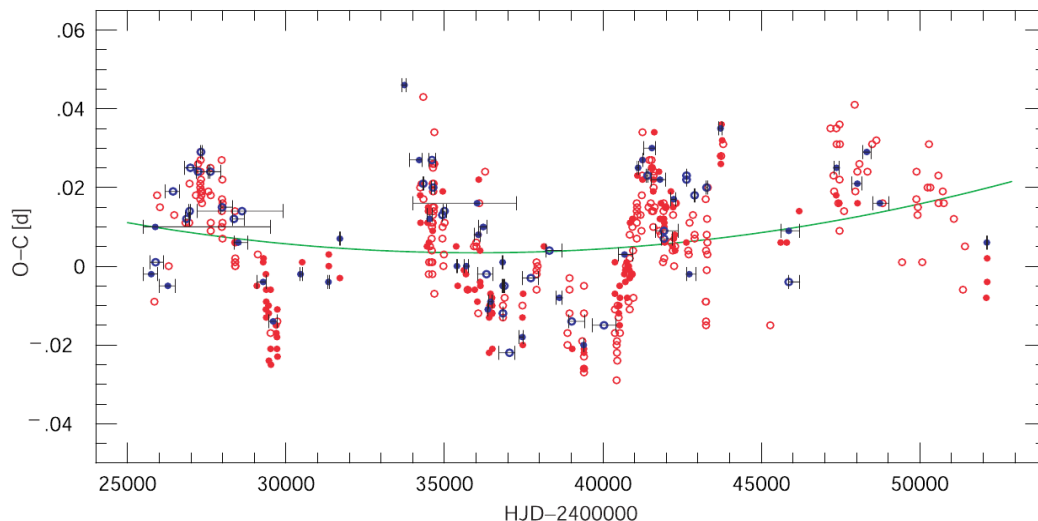
5.7. ábra. Az RR Gem pulzációs és modulációs periódusváltozása. Forrás: Sódor et al. (2007)



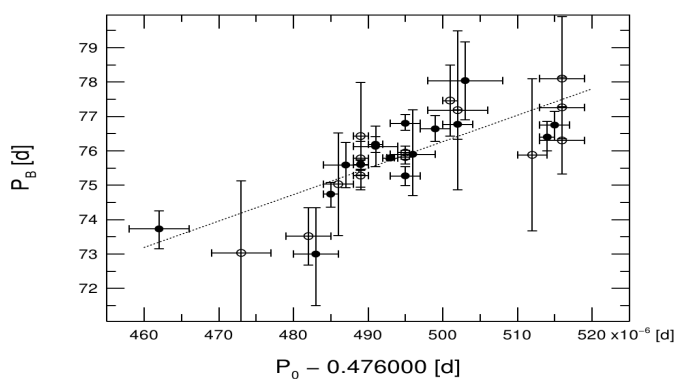
5.8. ábra. Az RV Uma O – C diagramja. Forrás: Hurta (2007)



5.9. ábra. Az RV Uma pulzációs és modulációs periódusváltozása. Forrás: Hurta et al. (2008)



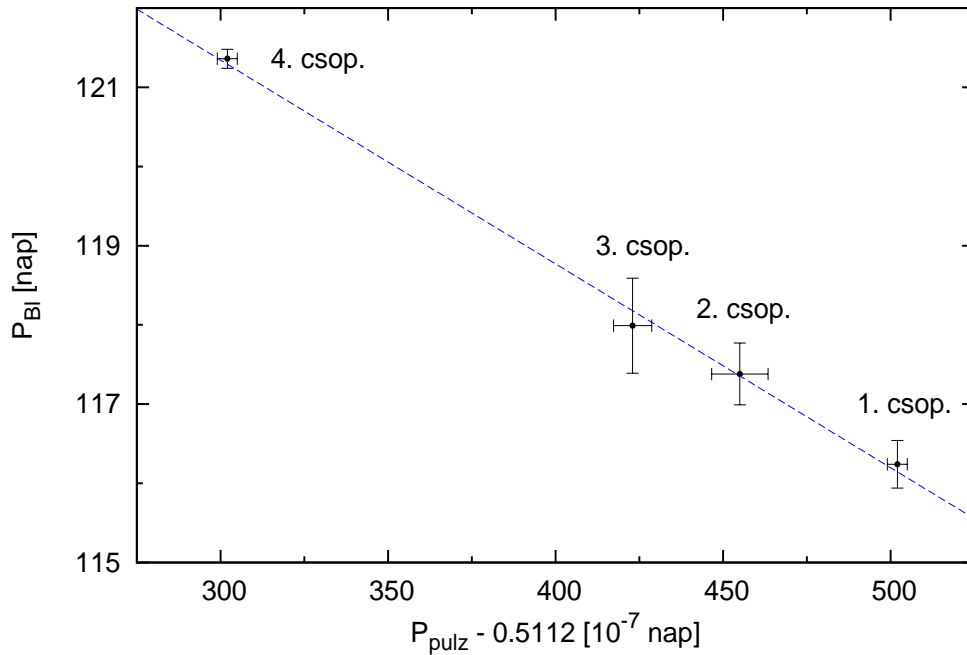
5.10. ábra. Az XZ Dra O – C diagramja. Forrás: Jurcsik et al. (2002)



5.11. ábra. Az XZ Dra pulzációs és modulációs periódusváltozása. Forrás: Jurcsik et al. (2002)

Csoport	Időtartam [HJD-2400000]	pulzációs periódus [nap]	modulációs periódus [nap]
1	26074 – 32473	$0,5112502 \pm 10^{-7}$	$116,24 \pm 0,1$
2	33369 – 35041	$0,5112455 \pm 2,8 \cdot 10^{-7}$	$117,38 \pm 0,13$
3	36413 – 42955	$0,5112423 \pm 1,9 \cdot 10^{-7}$	$117,99 \pm 0,2$
4	55294 – 55826	$0,5112302 \pm 10^{-7}$	$121,36 \pm 0,04$

5.3. táblázat. Az RZ Lyrae pulzációs és modulációs periódusai az 1 – 4. csoportok alapján.



5.12. ábra. A modulációs periódus a pulzációs periódus függvényében. A pontokat 3σ hibával ábrázoltam. Az illesztett egyenes révén a pulzációs és modulációs periódusok közti antikorreláció állapítható meg.

Az 5.12. ábrán a Blazhko-periódust ábrázoltam a pulzációs periódus függvényében 3σ hibával. A pontokra illesztett egyenes minden esetben a hibahatárokon belül van. Az elmúlt 80 év alatt a Blazhko-periódus ~ 5 nappal lett hosszabb, míg a pulzációs periódus $\sim 0,00002$ napnyival lett rövidebb. Eszerint a pulzációs és modulációs periódus között antikorreláció áll fenn az RZ Lyrae esetében. Korábban még nem sikerült Blazhko-s csillagoknál ilyen egyértelmű kapcsolatot megállapítani a pulzációs és modulációs periódusok között.

A pulzációs és modulációs amplitúdó közötti vizsgálatot nem végeztem, ugyanis csak a CCD-s mérések idejére van megbízható minimummal és maximummal egyaránt rendelkező adatsorunk. Vizuális méréseknél a minimum bizonytalansága nagyon nagy, a fotografikus és fotoelektromos méréseknél pedig hiányos a minimum hely.

Összefoglalás

Dolgozatomban feltárt eredmények az RZ Lyrae hosszú távú megfigyeléseiről:

- Az RZ Lyrae a vizsgált időszakok mindegyikében Blazhko-modulációt mutatott. A moduláció fázis- és amplitúdó-modulációból áll. A fázis moduláció $\sim 0,0225 - 0,03$ napnyi, melyet az $O - C$ vizsgálat is megerősít. Az amplitúdó moduláció $\sim 0,8$ mag. A maximum magasságok amplitúdója a fotografikus, fotoelektromos valamint a CCD-s időszakokban egyaránt $\sim 0,5$ magnitúdót változik.
- Azonosításra került egy ~ 30 napos másodlagos modulációs periódus, ami a Blazhko-periódusra rakódik rá és kimutatható az $O - C$ változásából is.
- A Blazhko-periódus hossza növekvő tendenciát mutat. A 20. század elejére meghatározott 116,24 napos periódus 2011-re 121,36 naposra nőtt.
- A pulzációs periódus az elmúlt 110 évben folyamatosan csökkent, az 1 – 4. csoportok alapján a csökkenés mértéke 0,00002 nap volt.
- A pulzációs- és Blazhko-periódus között egyértelműen antikorreláció mutatható ki az RZ Lyrae esetében.
- A fénygörbe leszálló ágán dudor jelenik meg a Blazhko-periódus kis amplitúdójú fázisában. A magyarázata a dudoros Cefeidákéhoz hasonló lehet, ahol az alapharmonikus és a második felhang 3 : 1 rezonanciában vannak egymással.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetet mondok témavezetőmnek, Dr. Jurcsik Johannának a munkám során nyújtott segítségéért, hasznos tanácsaiért és, hogy felkeltette érdeklődésemet az RR Lyrae típusú pulzáló változói iránt. Köszönöm Dr. Szeidl Bélának, hogy a fotografikus és fotoelektromos anyag feldolgozásához hasznos információkkal látott el. Köszönöm Dr. Sódor Ádámnak, hogy a felhasznált programok használatában segítséget nyújtott és dolgozatomat értékes ötletekkel látta el. Köszönöm Hajdu Gergelynek a dolgozatommal kapcsolatban tett építő kritikáit. Köszönöm az MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézetnek, hogy ott tartózkodásom alatt biztosította a szükséges eszközöket és szállást. Köszönöm családomnak, akik tanulmányaim során végig támogattak.

Nyilatkozat

Alulírott Dózsa Ákos, csillagász szakos hallgató, kijelentem, hogy a diplomadolgozatban foglaltak saját munkám eredményei, és csak a hivatkozott forrásokat (szakirodalom, eszközök, stb.) használtam fel.

Tudomásul veszem azt, hogy diplomamunkámat a Szegedi Tudományegyetem könyvtárában, a kölcsönözhető könyvek között helyezik el.

.....

aláírás

.....

dátum

Irodalomjegyzék

Bailey, S. I. 1917, Harv. Coll. Observ. Annals, 78, No. 2.

Balázs-Detre, J. 1959, Kleine Veroff. Remeis-Sternw., No. 27, p. 26.

Batyrev, A. A. 1951, PZ, 8, 155

Batyrev, A. A. 1952, PZ, 9, 48

Belik, S. I. 1969, PZ, 17, 93

Blazhko, S., 1907, Astron. Nachr., 173, 325

Bogdanov, M. B. 1972, PZP, 1, 309

Buchler, J. R., Kolláth, Z., 2011, On the Blazhko Effect in RR Lyrae Stars. ApJ, 731,
24

Butler, D., Manduga, A., Deming, D., Bell, R. A. 1982, AJ, 87, 640

Christensen-Dalsgaard, J., 2003, Lecture Notes on Stellar Oscillations

Cousens, A. 1983, MNRAS, 203, 1171

Deeming, T. J. 1975, Ap&SS, 36, 137

Fitch W. S., Wisniewski W. Z., Johnson H. L. 1966, Comm. Lunar Plan. Lab., 5, 71

Guggenberger E., Kolenberg K., Nemeč J. M., Smolec R., Benkő J. M., et al., 2012,
accepted in MNRAS, *preprint* : arXiv:1205.1344 [astro-ph.SR]

Hurta, Zs., 2007, CoAst, 159, 57

Hurta, Zs., Jurcsik, J., Szeidl, B., Sódor, Á. 2008, AJ, 135, 957

- Jurcsik J. & Kovács G., 1996, A&A, 312, 111
- Jurcsik J., Benkő J. M., Szeidl B., 2002, A&A, 396, 536
- Jurcsik J., Szeidl B., Clement C., Hurta Zs., Lovas M. 2011, MNRAS, 411, 1763
- Jurcsik J., Sódor Á., Hajdu G., Szeidl B., Dózsa Á., Posztobányi K., 2012, accepted in MNRAS, *preprint* : arXiv:1202.4388v1 [astro-ph.SR]
- Kapteyn, J., C. 1890, Astron. Nachr., 125, 165
- Klepikova, L. A., 1958, PZ, 12, 164
- Kolláth, Z. 1990, Occ. Techn. Notes Konkoly Obs., No. 1, <http://www.konkoly.hu/staff/kollath/mufran.html>
- Kovács, G., 1995, A&A, 295, 693
- Le Borgne J.F. et al., 2007a, A&A, 476, 307
- Molnár L., Kolláth Z., Szabó R., 2012, accepted in MNRAS, *preprint* : arXiv:1203.2911 [astro-ph.SR]
- Migach Ju. E., 1969, PZ, 16, 584
- Nowakowski, R. M. & Dziembowski, W. A., 2001, AcA, 51, 5
- Packer, D. E., 1890, English Mechanic 51, 378
- Pickering, E. C., 1901, Astron. Nachr., 154, 423
- Ritter, A., 1879, Wiedmans Ann., 8. 179
- Romanov Yu. S., 1969, PZ, 16, 584
- Shapley, H., 1914, ApJ, 40, 448
- Shapley, H., 1916, ApJ, 43, 217
- Shibahashi, H. 2000, in ASP Conf. Ser. 203, The Impact of Large-scale Surveys on Pulsating Star Research, eds. L. Szabados and D.W. Kurtz, p. 299
- Smith, H. A. 1995, RR Lyrae Stars (Cambridge University Press)

- Smolec R., Moscalic P., 2010, A&A, 524, 40
- Smolec, R., Moskalik, P., Kolenberg, K., Bryson S., Cote M. T., Morris R. L. 2011, MNRAS, 414, 2950
- 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
- Sódor, Á., Szeidl B., Jurcsik, J., 2007, A&A, 469, 1033
- Sódor, A., Jurcsik, J., Szeidl, B., 2009, MNRAS, 394, 261
- Sódor, Á., Jurcsik, J., Szeidl, B., 2010, MNRAS, 411, 1585
- Szabó, R., Kolláth, Z., Molnár, L., Kolenberg, K., Kurtz, D. W., et al., 2011, <http://adsabs.harvard.edu/abs/2011arXiv1111.2815S>
- Szeidl B., Hurta Zs., Jurcsik J., Clement C., Lovas M., 2011, MNRAS, 411, 1744
- Szeidl, B., Jurcsik, J., Sódor, Á., Hajdu G., Smitola, P., 2012, MNRAS, beküldve
- Stothers, R. B. 2006, ApJ, 652, 643
- Sturch C., 1966, ApJ, 143, 774
- Tsessevich V. P., 1953, GAIS, 23, 62
- Tsessevich V. P., 1958, PZ, 12, 164
- Tsessevich V. P., 1969, PZ, 16, 584
- Williams A. S., 1903, AN, 162, 257
- Wisniewski W. Z., Johnson H. L., 1968, Comm. Lunar and Planet. Lab., 7, 57
- Zverev M. S., Makarenko E. N., 1979, PZP, 3, 431