

SÓDOR ÁDÁM

**RR Lyrae csillagok Blazhko-modulációja**

doktori értekezés

Témavezető: DR. JURCSIK JOHANNA

az MTA doktora, tudományos tanácsadó

MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete

Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar

Fizika Doktori Iskola

Iskolavezető: DR. HORVÁTH ZALÁN

Részecskefizika és csillagászat doktori program

Programvezető: DR. CSIKOR FERENC

Budapest, 2009

*„Kinek kell egy játék amiben a csillagok mind kövek?”*

*Kispál és a Borz*

# Tartalomjegyzék

Táblázatok jegyzéke	v
Ábrák jegyzéke	v
Előszó	xi
<b>1 Bevezetés</b>	<b>1</b>
1.1 Az RR Lyrae típusú változócsillagok	1
1.1.1 Történeti előzmények	2
1.1.2 Az RR Lyrae csillagok általános jellemzői	2
1.1.3 A Blazhko-effektus	5
1.2 A Konkoly Blazhko Survey	8
1.3 Adatfeldolgozás	10
1.3.1 Fotometria	10
1.3.2 Fourier-analízis, fénygörbe illesztés	11
1.3.3 $O-C$ analízis	12
<b>2 RR Geminorum</b>	<b>15</b>
2.1 Blazhko-viselkedés 2004–05-ben	16
2.1.1 A CCD fénygörbe	16
2.1.2 A Blazhko-moduláció tulajdonságai	16
2.1.3 Megfigyelt változások a Blazhko-ciklus során	21
2.2 A moduláció és pulzáció hosszútávú viselkedése	24
2.2.1 Az $O-C$ diagram	25
2.2.2 A fotografikus fénygörbe – 1935–1953	27
2.2.3 A fotoelektromos fénygörbe – 1954–1983	32

2.2.4	A CCD fénygörbe – 2004–05 . . . . .	38
2.2.5	A hosszútávú viselkedés áttekintése . . . . .	38
2.2.6	Az RR Gem pulzációs és modulációs változásainak összefoglalása . . . . .	43
<b>3</b>	<b>Fénygörbe-moduláció további Blazhko-csillagoknál</b>	<b>45</b>
3.1	Az ismert Blazhko-csillagok felülvizsgálata . . . . .	45
3.2	SS Cancri . . . . .	49
3.2.1	Adatok . . . . .	49
3.2.2	Pulzáció és moduláció . . . . .	49
3.2.3	Az SS Cnc és az RR Gem modulációjának összehasonlítása . . . . .	51
3.3	UZ Ursae Maioris . . . . .	55
3.3.1	Mérési adatok . . . . .	55
3.3.2	Pulzáció és moduláció . . . . .	55
3.4	MW Lyrae . . . . .	60
3.4.1	Adatok . . . . .	60
3.4.2	Az MW Lyr fénygörbéjének modulációja . . . . .	60
<b>4</b>	<b>Inverz Fotometriai Baade–Wesselink-analízis</b>	<b>69</b>
4.1	Az IP módszer . . . . .	71
4.1.1	A kiindulási effektív hőmérséklet-görbe . . . . .	74
4.1.2	A kiindulási pulzációs sebesség-görbe . . . . .	74
4.1.3	Az eredmények hibája . . . . .	79
4.2	Teszteredmények modulálatlan csillagokra . . . . .	80
4.2.1	Alkalmazhatóság . . . . .	89
4.2.2	A Konkoly Blazhko Survey modulálatlan RRab csillagai . . . . .	93
4.3	Az IP módszer és a moduláció . . . . .	93
4.4	Az MW Lyrae modulációjának vizsgálata az IP módszerrel . . . . .	94
4.4.1	Felhasznált adatok . . . . .	95
4.4.2	Állandó és átlagos fizikai paraméterek . . . . .	95
4.4.3	Fizikai paraméterek változása a pulzáció során . . . . .	98
4.4.4	Átlagos fizikai paraméterek változása a Blazhko-ciklus során . . . . .	105
4.5	A DM Cygni modulációjának vizsgálata az IP módszerrel . . . . .	108
4.5.1	Adatok . . . . .	108
4.5.2	Állandó és átlagos fizikai paraméterek . . . . .	108

---

4.5.3	Átlagos fizikai paraméterek változása a Blazhko-ciklus során . . . . .	109
4.6	Az IP módszer alkalmazásának és lehetőségeinek összefoglalása . . . . .	112
<b>5</b>	<b>Összegzés és előre tekintés</b>	<b>115</b>
<b>A</b>	<b>függelék: Szoftverfejlesztések</b>	<b>119</b>
<b>B</b>	<b>függelék: A Konkoly Blazhko Survey csillagai</b>	<b>121</b>
	<b>Irodalomjegyzék</b>	<b>125</b>



# Táblázatok jegyzéke

1.1	Az RR Lyrae-k alapvető fizikai paraméterei. . . . .	3
2.1	Az RR Gem két részre bontott fotografikus adatsorának adatai. . . . .	27
2.2	A pg2 adatsor amplitúdó- és fázismodulációjának erőssége. . . . .	32
2.3	A pe2 adatsor amplitúdó- és fázismodulációjának erőssége. . . . .	37
2.4	Az RR Gem modulációjának és pulzációjának tulajdonságai a vizsgált időszakban. . . . .	40
3.1	Az MW Lyr fénygörbe megoldásai. . . . .	63
4.1	Az IP módszer futtatásainál alkalmazott beállítások. . . . .	80
4.2	Az IP módszerrel kapott eredmények összehasonlítása korábbi irodalmi BW megoldásokkal kilenc tesztobjektumra. . . . .	82
4.3	Teszteredmények (folytatás). . . . .	83
4.4	Teszteredmények (folytatás) . . . . .	84
4.5	Alkalmazhatósági tesztek az SW And és RR Gem adatokon. . . . .	92
4.6	Az MW Lyr átlagos fizikai paraméterei. . . . .	97
4.7	A DM Cyg átlagos fizikai paraméterei. . . . .	110
B.1	A Konkoly Blazhko Survey során eddig megfigyelt 30 RRab csillag. . . . .	122





# Ábrák jegyzéke

1.1	Az ET Per fény- és színgörbéi. . . . .	5
1.2	Az MW Lyr modulációja. . . . .	6
2.1	Az RR Gem CCD $V$ fénygörbéje. . . . .	17
2.2	Az RR Gem modulációja a $V$ fénygörbe reziduáljában. . . . .	17
2.3	Az RR Gem Fourier-spektruma. . . . .	18
2.4	Az RR Gem modulációja. . . . .	19
2.5	Az RR Gem Fourier-megoldásának amplitúdói. . . . .	20
2.6	Az RR Gem fénygörbéje 10 Blazhko-fázisban. . . . .	21
2.7	A $V$ fénygörbe Fourier-paramétereinek Blazhko-fázis függése. . . . .	22
2.8	Az RR Gem $\bar{V}$ fényességének és színeinek Blazhko-fázis függése. . . . .	23
2.9	Az RR Gem $(O-C)_{\max}$ diagramja 1890-től napjainkig. . . . .	26
2.10	Az RR Gem fotografikus fénygörbéi a pg1 és pg2 időszakra. . . . .	29
2.11	A pg1 időszak $(O-C)_{m=11.3}$ adatsorának Fourier-spektruma. . . . .	30
2.12	Az RR Gem modulációjának hosszútávú alakulása. . . . .	33
2.13	A pe1 időszak $B$ fénygörbéje. . . . .	35
2.14	A pe1 $B$ és $V$ maximumok Fourier-spektruma. . . . .	36
2.15	A pe1 $B$ és $V$ maximumok a 7.28 napos modulációs periódus szerint feltekerve. . . . .	37
2.16	Az RR Gem pulzációs és modulációs tulajdonságainak hosszútávú változása. . . . .	39
2.17	Az RR Gem pulzációs és modulációs periódusának hosszútávú változásai. . . . .	42
3.1	Az SS Cnc $V$ fénygörbéje a pulzáció fázisa szerint. . . . .	49
3.2	Az SS Cnc Fourier-spektruma. . . . .	50
3.3	Az SS Cnc $B$ fénygörbéjének modulációja. . . . .	51
3.4	Az SS Cnc és RR Gem $V$ reziduál fénygörbéje a pulzáció levonása után. . . . .	52
3.5	Az SS Cnc és RR Gem tojásgörbéi és annak komponensei. . . . .	53

3.6	Az SS Cnc és RR Gem pulzációs görbéinek Fourier-paraméterei 10 Blazhko-fázisban. . . . .	54
3.7	Az UZ UMa $V$ fénygörbéje. . . . .	56
3.8	Az UZ UMa pulzációval fehéritett fénygörbéjének kumulatív spektruma. . . . .	57
3.9	Az UZ UMa modulációja. . . . .	59
3.10	Az MW Lyr $V$ fénygörbéjének modulációja. . . . .	61
3.11	Az MW Lyr $V$ fénygörbéjének reziduálja a pulzáció levonása után. . . . .	62
3.12	Az MW Lyr $V$ fénygörbéjének reziduál spektrumi. . . . .	64
3.13	Az MW Lyr $B$ , $V$ és $I_C$ fénygörbéjének reziduál spektrumi. . . . .	66
3.14	Az időtranszformáció hatása az MW Lyr fénygörbéjére. . . . .	68
4.1	Liu minta $V_p(\varphi)$ görbéjének alakja. . . . .	75
4.2	Liu $A_{V_p} - A_V$ összefüggése. . . . .	76
4.3	$V_p^*(\varphi) - I_C^*(\varphi)$ reláció. . . . .	77
4.5	Az IP módszer fénygörbeillesztése. . . . .	85
4.6	A fénygörbeillesztések reziduálja. . . . .	86
4.7	Megoldások a $V_{\text{rad}}(\varphi)$ görbékre. . . . .	87
4.8	Az SW And sugárváltozása a pulzáció során. . . . .	88
4.9	$\log g_{\text{st}}$ értékek $\log P$ függvényében. . . . .	88
4.10	$M_{V_0}$ a fémtartalom függvényében. . . . .	89
4.11	Abszolút $I_C$ fényességek összefüggése a periódussal és fémtartalommal. . . . .	90
4.12	Periódus- $V$ fényesség- $(V - I_C)$ szín összefüggés . . . . .	90
4.13	Az MW Lyr szín-fényesség és szín-szín hurkai a moduláció 20 fázisában. . . . .	96
4.14	$T_{\text{eff}}$ változása a pulzáció során. . . . .	99
4.15	$L/L_{\odot}$ változása a pulzáció során. . . . .	99
4.16	$R/R_{\odot}$ változása a pulzáció során. . . . .	100
4.17	$V_{\text{rad}}$ változása a pulzáció során. . . . .	100
4.18	$\log g_{\text{eff}}$ változása a pulzáció során. . . . .	101
4.19	Az MW Lyr időtranszformált $V(\varphi)$ fénygörbéi 20 Blazhko-fázisban. . . . .	101
4.20	$T_{\text{eff}}(\varphi)$ pulzációs változása 20 Blazhko-fázisban. . . . .	102
4.21	$L/L_{\odot}$ változása 20 Blazhko-fázisban. . . . .	102
4.22	$R/R_{\odot}$ változása 20 Blazhko-fázisban. . . . .	103
4.23	$V_{\text{rad}}$ változása 20 Blazhko-fázisban. . . . .	103
4.24	$\log g_{\text{eff}}$ változása 20 Blazhko-fázisban. . . . .	104

---

4.25	Chadid & Chapellier (2006) $V_{\text{rad}}$ mérései az RR Lyr-ről. . . . .	105
4.26	Az MW Lyr megfigyelt és az IP módszerrel számított átlagos paramétereinek változása a Blazhko-fázis szerint. . . . .	107
4.27	A DM Cyg megfigyelt és az IP módszerrel számított átlagos paramétereinek változása a Blazhko-fázis szerint. . . . .	111



# Előszó

A magyar csillagászatban és a Konkoly Obszervatóriumban<sup>1</sup> immár évszázados múltra visszatekintő, nemzetközi elismertségnek örvendő változócsillagászati kutatásokba 2004-ben, a sváb-hegyi 60 cm-es Heyde–Zeiss teleszkóp felújítása és automatizálása után kapcsolódtam be. A távcsővel folyó kutatásokat Jurcsik Johanna, Szeidl Béla és Oláh Katalin vezetik. A távcsődő legnagyobb részét, mintegy 90 %-át RR Lyrae csillagok többszín-fotometriai CCD megfigyelésére fordítjuk. Ez a távcső nemzetközi összehasonlításban közepes méretű fotometriai műszernek számít. A megfigyelésre alkalmas éjszakák aránya 50 %, ami hasonló a piszkés-tetői statisztikához. Műszerünkkel a budapesti levegő- és fényszennyezés ellenére nemzetközi mércével is kiemelkedő, pontos és egyedülállóan kiterjedt többszín-fotometriai fénygörbéket nyertünk az elmúlt 5 év alatt több mint 30 változóról. E sikeresség többek közt a programra dedikált, folyamatosan rendelkezésre álló távcsőnek, az automatizálás után igen alacsony humán erőforrást igénylő megfigyelési munkának, illetve a megfigyelési program lehetőségeinkhez igazított jó megválasztásának köszönhető.

2004-ben indítottuk a Konkoly Blazhko Survey nevű programunkat, az úgynevezett Blazhko-effektus, vagyis az RR Lyrae fénygörbék alakjában és amplitúdójában bekövetkező periodikus moduláció jelenségének vizsgálata céljából. Ez az effektus bár már több mint 100 éve ismert, kielégítő fizikai modell, mely minden aspektusát megmagyarázná, a mai napig nem létezik. Az sem tisztázott, hogy a Blazhko-effektus az RR Lyrae csillagok mekkora hányadánál jelentkezik, ám vizsgálataink nyomán egyértelművé vált, hogy a korábban gondolt 1/4–1/3 aránynál jóval többük érintett, az alapmódusú RR Lyrae-k legalább 50 %-a. Célunk minél több modulált RR Lyrae csillagról kiterjedt többszín-fotometriai fénygörbe összegyűjtése, és ezek vizsgálatával a jelenség mélyebb tanulmányozása, megértése.

Dolgozatomban e kutatási munka során elért főbb eredményeimet ismertetem.

<sup>1</sup> Alapítva 1871-ben Ógyallán, Konkoly Thege Miklós magánobszervatóriumaként. Az alapító az intézetet 1899-ben a Magyar Államnak adományozta, neve akkor Magyar Királyi Astrophysikai Obszervatórium lett. Az 1952 óta az MTA hálózatába került kutatóintézet mai neve Magyar Tudományos Akadémia Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete. Hivatalos nemzetközi elnevezése szerint Konkoly Obszervatóriumként hivatkozok rá.



# 1. fejezet

## Bevezetés

Ebben a bevezető fejezetben rövid áttekintést nyújtok az RR Lyrae csillagokkal és a Blazhko-modulációval kapcsolatos ismereteinkről, bemutatom a Konkoly Blazhko Survey megfigyelési programunkat, illetve a mért adataink feldolgozásánál és a fénygörbéink analizésénél alkalmazott legfontosabb módszereket.

### 1.1. Az RR Lyrae típusú változócsillagok

Az RR Lyrae csillagok pulzáló változócsillagok, melyek fényességváltozása a sugaruk és felszíni hőmérsékletük periodikus változásából adódik. A pulzáció alapvetően radiális, vagyis gömbszimmetrikus, és nagy amplitúdójú fényességváltozással jár. E csillagok pulzációs periódusa a pulzáció módusától függően néhány tized naptól valamivel több mint egy napig terjedő tartományba esik. Jellemzően idős, több milliárd éves, a magjukban héliumot égető csillagok, melyek a Hertzsprung–Russel-diagram (HRD) horizontális ágán találhatók, ott, ahol ez az ág metszi a klasszikus instabilitási sávot.

Ezek a változócsillagok az asztrofizika több területén is igen fontos szerepet játszanak. Jellegzetes fénygörbéjük és közepesen nagy valódi fényességük miatt fontos távolságindikátorok Galaxisunk és a Lokális Halmaz távolságskáláján, így a csillagászati távolságmérés lényeges lépcsőfokát képezik<sup>1</sup>. Idős koruknál fogva a csillagkeletkezés tanúi Galaxisunk korai életszakaszából. Fémtartalmuk könnyen megállapítható a fénygörbe alakját leíró Fourier-paramétereken

<sup>1</sup> A csillagászat távolságmeghatározási módszerei egymásra épülő lépcsőfokokkal szemléltethetők. E lépcsőfokok az egyre távolabbi és távolabbi objektumok távolságát a közelebbi objektumok távolságához viszonyítva adják meg, azaz minden egyes lépcsőfok az összes öt megelőzőre épül, a hibák pedig kumulálódnak.

alapuló empirikus formulákkal (Jurcsik & Kovács, 1996), így egyes csillagpopulációk kémiai összetételének, kémiai fejlődésének nyomjelzői. A pulzációs és csillagfejlődési elméletek fontos tesztobjektumai.

### 1.1.1. Történeti előzmények

Az RR Lyrae típusú változócsillagokat, köszönhetően fényváltozásuk nagy amplitúdójának<sup>2</sup>, illetve rövid, jellemzően kevesebb mint egy napos periódusuknak, már az 1890-es években felfedezték. E felfedezésben E. C. Pickering és S. I. Bailey munkássága kiemelkedő. Bailey gömbhalmazokat vizsgálva a 19. évszázad végéig több mint 500 változót fedezett fel, többet, mint amennyit akkoriban halmazokon kívül összesen ismertek. Bailey felismerte, hogy a változók többsége sok hasonlóságot mutat egymással. Ezek periódusa rövidebb mint 1 nap, egy-egy halmazon belül pedig átlagos látszó fényességük megegyezik. Ekkor ezeket a változókat halmazváltozóknak nevezték, ma pedig RR Lyrae típusúakként ismerjük őket – az égbolton látható legfényesebb képviselőjük neve után.<sup>3</sup> Bailey nevéhez fűződik az RR Lyrae csillagok első osztályozása is, fénygörbéjük alakja és periódusa alapján. Bailey osztályozását némi módosítással, illetve jónéhány altípussal kiegészítve használjuk ma is.

A fényváltozást eleinte egy kísérő jelenlétével igyekeztek magyarázni mind az RR Lyrae-k esetében, mind a hozzájuk sok tekintetben – a fénygörbe és a radiális sebesség-görbe alakjában – hasonló, de jóval nagyobb abszolút fényességű Cefeidáknál. 1918-ban azonban Shapley már helyesen, pulzációval magyarázta a jelenséget mindkét változótípusnál.

### 1.1.2. Az RR Lyrae csillagok általános jellemzői

Az RR Lyrae-k alapvető fizikai paramétereit az 1.1. táblázat sorolja fel Smith (1995) összefoglaló műve nyomán.

Klasszikus instabilitási sávbeli változókként az RR Lyrae csillagok radiális pulzációjának hajtómotorja a  $\kappa$ - illetve  $\gamma$ -mechanizmus, mely a hidrogén és hélium részleges ionizációs zónáihoz kapcsolódik.

<sup>2</sup> Fényességük intenzitása minimum és maximum között kék optikai tartományban akár több mint ötszöröseire növekedhet mindössze néhány óra leforgása alatt.

<sup>3</sup> A névváltoztatás azért vált szükségessé, mert utóbb egyre több ilyen csillagot találtak halmazokon kívül is.



1.1. táblázat. AZ RR LYRAE-K ALAPVETŐ FIZIKAI PARAMÉTEREI. Smith (1995) nyomán.

$P$	0.2–1.1 nap
$\langle M_v \rangle$	$+0.6 \pm 0.2$ mag (fémzegény csillagok esetén)
$\langle T_e \rangle$	7400–6100 K
$\langle \log g \rangle$	2.5–3.0
[Fe/H]	–2.5–0.0
$M$	$\approx 0.7 M_\odot$
$R$	4–6 $R_\odot$

### Az RR Lyrae csillagok pulzációja

A csillagpulzáció a csillagok sajátrezgése. A csillagot alkotó gázgömb mint fizikai rendszer, más fizikai testekhez hasonlóan különböző módusokban tud sajátrezgést végezni. Ezeket a rezgési módusokat három kvantumszámmal lehet jellemezni; a radiális csomófelületek számával (radiális fok,  $n = 0 \dots \infty$ ), a felszíni horizontális csomóvonalak számával (horizontális fok,  $\ell = 0 \dots \infty$ ), és az ezek közül az (önkéntesen választható) póluson átmenő csomóvonalak számával (azimutális rend,  $m = -\ell \dots +\ell$ ). Ez végtelen sok lehetséges módust jelent, ám tényleges oszcilláció csak azokban a módusokban jöhet létre, amelyekkel szemben a csillag instabil.

A csillagok többsége kis perturbációkkal szemben stabil, azaz ha valamilyen hatás kitéríti egyensúlyi állapotából, akkor oda igyekezik visszatérni, miközben a kitéréshez befektetett energia eldisszipál. Azok a csillagok, amelyek nem rendelkeznek ezzel a stabilitási tulajdonsággal, a HRD meghatározott részein, az instabilitási sávokban helyezkednek el. Az instabilitás oka, hogy a csillag bizonyos rétegeiben a tömegelemek tágulásuk vagy összenyomódásuk során munkát tudnak végezni a környezetükön. Emiatt a mikroszkopikus perturbációk makroszkopikus, távolról is megfigyelhető változássá tudnak növekedni. A növekedést persze nemlineáris effektusok és a környező stabil rétegek csillapítása valahol megállítja.

Ilyen instabilitást okoz az opacitás összenyomás hatására történő növekedése, mivel ekkor az adott tömegelemen keresztül a csillag belsejéből kifelé áramló sugárzási energia hatékonyabban nyelődik benne el, így a tömegelem tágulása során munkát tud végezni a környezetén. Ez a helyzet például a H és He részleges ionizációs zónáinak belső részén. Ugyanezen zónák külső rétegeiben ellentétes hatás érvényesül, ami stabilizáló hatású. Az opacitás ilyen viselkedésének neve  $\kappa$ -mechanizmus. Ha az összenyomás során elnyelt többlet energia egy része az

anyag további ionizációjára fordítódik, az tovább fokozza az instabilitást. Ezt a jelenséget pedig  $\gamma$ -mechanizmusnak hívják. A kettő általában együtt jár, ekkor  $\kappa$ - $\gamma$ -mechanizmusként említik. Pulzáció akkor jön létre, ha a kérdéses zónákban a sugárzásos energiatranszport dominál a konvekcióval szemben, illetve ha a részleges ionizációs zónák megfelelő mélységben helyezkednek el ahhoz, hogy destabilizáló hatásuk érvényre jusson a stabilizáló zónák hatása ellenében. E két hatás határozza meg a zónák vörös és kék határait a HRD-n. Az RR Lyrae-k esetében, illetve az egész klasszikus instabilitási sávban a H és He részleges ionizációs zónái játsszák a destabilizáló szerepet, de bizonyos fémek is okozhatnak hasonló hatást, ami a HRD forróbb tartományaiiban vezet  $\kappa$ - $\gamma$  gerjesztésű pulzációhoz.

A  $\kappa$ -mechanizmus lehetőségét már Eddington (1926) felvetette. Részletes elméleti kidolgozását Zhevakin (1963) és Cox (1980) végezték el.

### Az RR Lyrae-k osztályozása

Az RR Lyrae csillagokat pulzációjuk szerint csoportosítjuk. Alapvetően két módus lehet gerjesztett bennük, a radiális alaplómódus ( $n = \ell = m = 0$ ), és az első radiális felhang ( $n = 1, \ell = m = 0$ ). Az alaplómódusban pulzáló csillagokat az RRab-vel jelölt csoportba soroljuk, míg az első felhangban pulzálók alkotják az RRc csoportot. Egyes RR Lyrae változók mindkét módusban egyidejűleg pulzálnak, ezek az RRd csillagok, melyek nagy pontossággal meghatározható periódusaránya fontos empirikus megszorítást jelent a csillag szerkezetére nézve. Az RRab csillagok periódusa hosszabb mint 0.3 nap, fénygörbéjük amplitúdója kb 1 mag  $V$  hullámsávban, fénygörbéjük szinusztól erősen eltérő alakú, meredek felszálló ággal és jóval laposabb leszálló ággal. Az RRc csillagok pulzációs periódusa 0.6 napnál rövidebb, fénygörbéjük alakja szinuszoshoz közelebb áll, amplitúdója néhány tized magnitúdó. Az ismert RR Lyrae-k között 10 RRab-re esik egy RRc csillag, ám valódi részarányuk ennél nagyobb lehet, hiszen a kisebb amplitúdó miatt nehezebb rábukkanni ez utóbbi változókra.

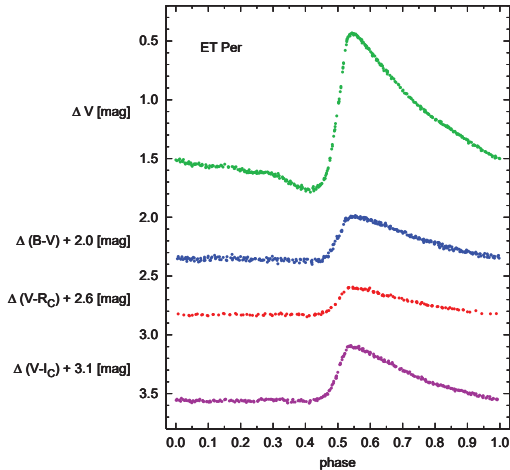
Az elmúlt másfél évtized során nagy hatással volt a változócsillagászati kutatásokra több gravitációs lencse jelenséget kereső program illetve egyéb égboltfelmérési fotometriai programok, mint pl. a MACHO<sup>4</sup>, az OGLE<sup>5</sup>, az NSVS<sup>6</sup> vagy az ASAS<sup>7</sup>, amelyeknek köszönhetően sok változócsillagról készült viszonylag hosszú időt lefedő és sok pontból álló fénygörbe. E

<sup>4</sup> <http://wwwmacho.mcmaster.ca/>

<sup>5</sup> <http://ogle.astrouw.edu.pl/>

<sup>6</sup> <http://skydot.lanl.gov/nsvs/nsvs.php>

<sup>7</sup> <http://archive.princeton.edu/asas/>



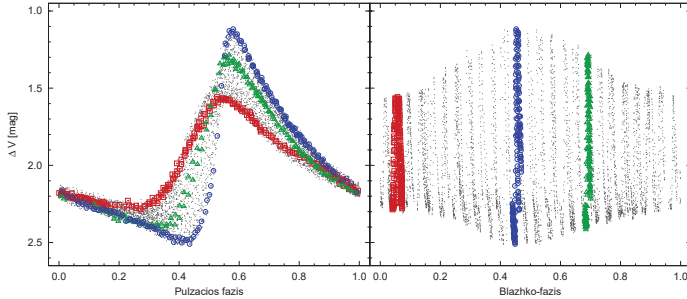
**1.1. ábra.** AZ ET PER FÉNY- ÉS SZÍNGÖRBÉI. Ezt a csillagot a Konkoly Obszervatóriumban a 443 napot átfogó mérési időszakon belül 12 éjjelen figyeltük meg. A pulzáció minden fázisa 4–6-szor van mérésekkel lefedve. A fénygörbe a több mint egy éves időszakban stabil maradt.

kutatások eredményei az RR Lyrae csillagok csoportosításának finomítását is szükségessé tették. Alcock és munkatársai a MACHO projekt RR Lyrae csillagait vizsgáló cikksorozatukban új jelölésrendszert vezettek be (Alcock, Alzman, Alves et al., 2000). Ennek fő csoportjai megfelelnek a korábbi csoportosításnak, de ezeken belül számos alcsoportot is definiáltak.

### 1.1.3. A Blazhko-effektus

Az RR Lyrae csillagok ismertek arról, hogy fénygörbájük alakját stabilan megőrzik az egymást követő pulzációs ciklusok ezrein keresztül. Egy ilyen stabil fénygörbére mutat például az 1.1. ábra. Az ábrán az ET Persei fény- és színgörbéi láthatók a pulzációs fázis függvényében. Ezt az RRab csillagot a Konkoly Obszervatórium sváb-hegyi 60 cm-es távcsövével egy 443 nap hosszú időszakon belül 12 éjszakán mértük (Sódor, Jurcsik, Nagy et al., 2007). A mérési éjszakák a pulzáció minden fázisát 4–6-szor lefedik. Megfigyelhető, hogy a fénygörbe ez idő alatt a kb. 0.01 magnitúdós mérési pontosságon belül stabil maradt.

Nem minden RR Lyrae csillag fénygörbéje mutat azonban ilyen stabilitást. Elsőként S. Blazhko figyelte meg, hogy az RW Dra fényesség maximumának fázisa 41.6 napos periódussal oszcillál, azaz a pulzáció fázisa modulált (Blazhko, 1907). Nem sokkal később



**1.2. ábra.** AZ MW LYR MODULÁCIÓJA. A maximum magassága, valamint a felszálló ág és a maximum fázisa is modulált. A moduláció periódusa 16.5 nap. Ez egy különösen erősen modulált RR Lyrae csillag.

Shapley (1916) az RR Lyr fénygörbéjét vizsgálva kimutatta, hogy a fázismoduláció mellett a maximum fényessége is ugyanazzal a – kb 41 napos – periódussal változik, az amplitúdó is modulált. Az RR Lyrae csillagok mindkétféle modulációját – amely gyakran együtt jár – Blazhko-effektusnak nevezzük. A fénygörbe fázis- és amplitúdómodulációját az MW Lyrae általunk mért adatsorán az 1.2. ábra szemlélteti (Jurcsik, Sódor, Hurta et al., 2008a). A fénygörbét ennek az ábrának a paneljein a pulzációs és modulációs fázis függvényében ábrázoltam, egyes Blazhko-fázisokat különböző színű szimbólumokkal kiemeltem.

A Blazhko-moduláció egy másodlagos periodicitás, melynek a frekvenciája ( $f_m$ ) a pulzációs frekvenciával ( $f_0$ ) együtt határozza meg a fénygörbe Fourier-spektrumát. Az aszimmetrikus alakú pulzációs fénygörbe miatt  $f_0$ -nak számos felharmonikusa jelenik meg az RRab csillagok Fourier-spektrumában. Blazhko-csillagoknál ezen felül modulációs csúcsok is megjelennek a pulzációs harmonikusok körül  $f_m$  távolságban ( $k \cdot f_0 \pm f_m$ ;  $k = 1, 2, 3, \dots$ ). Az ilyen hármas, egyenközü spektrálsúcs elrendezést tripletnek nevezzük. Az, hogy maga az  $f_m$  frekvencia megjelenik-e a fénygörbék spektrumában, az a mi vizsgálataink előtt nyitott kérdés volt, ahogyan az is, hogy  $f_m$  többszöröseivel jelennek-e meg modulációs csúcsok (kvintuplett, szep-  
tuplett stb.).

A fénygörbe-modulációt mutató csillagok arányát az RRab-k között 25–30%-ra, az RRc típuson belül pedig 1–2%-ra tették a legutóbbi időkig (Szeidl, 1988). Ezek az arányok gömbhalmazok fotográfikus megfigyelésein és mező RR Lyrae-k fotográfikus és fotoelektromos

vizsgálatain alapulnak. A fenti értékekkel nagyjából összhangban lévő arányt találtak az OGLE RR Lyrae mintájában a galaktikus bulge-ra is – az itt talált arány az RRab-k közt  $23.3\% \pm 3.9\%$ , az RRc-k között pedig  $4.6\% \pm 2.5\%$  (Moskalik & Poretti, 2003). A MACHO vizsgálatban a Nagy Magellán-felhő csillagai között a Blazhko-modulált RRab csillagok arányára ennél jóval kisebb érték adódott, mindössze  $10.2\% \pm 0.8\%$ , míg az RRc csillagok közötti arány  $4.5\% \pm 1.1\%$  (Alcock, Alsmann, Alves et al., 2000). A MACHO RRc csillagainak valamivel későbbi, hosszabb idősorait Nagy & Kovács (2006) újra, szofisztikáltabb módszerrel vizsgálta Blazhko-csillagokat keresve. Így  $7.5\%$ -os modulációs arány adódott. Azt tapasztaljuk tehát, hogy alaposabb vizsgálattal több modulált csillag detektálható ugyanazon mintában, mert a moduláció erősségének nincs alsó határa és a pontosabb vizsgálatok gyengébb modulációt is ki tudnak mutatni. Ennek fényében mindezek az értékek a moduláció gyakoriságára csak alsó becslésnek tekinthetők.

A több mint 100 éve ismert jelenséget kielégítően magyarázó modellt, mely az effektus minden megfigyelt aspektusát megmagyarázná, a mai napig nem született. Jelenleg három hipotézisen alapuló modell-családdal próbálják megmagyarázni a Blazhko-viselkedést, ám mindhárommal szemben komoly kifogások támaszthatók. A háromféle modell a következő:

**REZONANCIA-MODELLEK** ♦ Ezek a modellek a modulációt a radiális módushoz nem lineárisan csatolódó nem radiális módus gerjesztődésével magyarázzák (Nowakowski & Dziembowski, 2001). A legegyszerűbb esetben alacsony fokú ( $\ell = 1, 2$ ), a forgástengelyre nézve nem szimmetrikus ( $m = \pm 1$ ) nemradiális módusok csatolódnak a radiális módushoz, és a forgás miatti rotációs felhasadás következtében észlelünk fénygörbe-modulációt.

**FERDE MÁGNESES ROTÁTOR-MODELLEK** ♦ Ezek a modellek a mágneses tér által a pulzáció sebességtérében létrehozott nemradiális mozgásokkal, a csillag alakjának a pulzáció során a gömbszimmetriktól való eltéréseivel magyarázzák a jelenséget (Cousens, 1983; Shibahashi, 2000). Amennyiben a mágneses dipóltér tengelye és a látóirány a forgástengellyel bizonyos szöget zár be, a csillag forgása miatt változó amplitúdójú fénygörbét észlelünk. A fázismodulációt ez a modell a forgástengely és mágneses tengely kitérő voltával tudja magyarázni. Korábban egy fontos ellenérv volt ezzel a modellel szemben, hogy a Fourier-spektrumban kvintuplett szerkezetet jóval, ilyet pedig nem sikerült megfigyelni. Elsőként mi mutattunk ki kvintuplett szerkezetet az RV UMA-nál (Hurta, Jurcsik, Szeidl & Sódor, 2008).

**PERIODIKUS PERTURBÁCIÓK A KONVEKTÍV BUROKBAN** ♦ Stothers (2006) modellje periodikus perturbációkat tételez fel a csillag konvektív burkában. E perturbációk az elmélet szerint a mágneses térrel változnak, amelyet egy turbulens dinamó épít fel, majd a tér elbomlik. Mindez periodikusan történik, ami a pulzációs fénygörbe-modulációjához vezet.

Az első két modell-család a csillag rotációjához köti a moduláció periódusát, ami ellen a legkomolyabb kifogás, hogy vizsgálataink során találtunk multiperiodikusan modulált Blazhko-csillagokat is (CZ Lac: Sódor 2009; UZ UMa: Sódor, Vida, Jurcsik et al. 2006), ami nem egyeztethető össze a rotációs periódus unikális voltával. Árnyalja azonban a képet, hogy egyik munkánkban éppen mi mutattuk meg, hogy ha a moduláció periódusát a csillag tengelyforgási idejének feleltetjük meg, az így kapott periódusok horizontális ág menti eloszlása jól illeszkedik az instabilitási sávon kívül, annak két oldalán megfigyelt horizontális ági csillagok tengelyforgási idejének eloszlásába (Jurcsik, Szeidl, Nagy & Sódor, 2005). Stothers turbulens dinamóval magyarázott modulációjával pedig az a probléma, hogy bár ismert, hogy turbulens dinamó ciklikusan képes mágneses teret létrehozni, ám nehéz elképzelni, hogy a Blazhko-moduláció reguláris, gyakran hosszú időn át szigorúan periodikus viselkedését (pl. MW Lyr: Jurcsik, Sódor, Hurta et al. 2008a) ilyen sztochasztikus fizikai folyamatok okoznák.

## 1.2. A Konkoly Blazhko Survey

A régóta ismert Blazhko-moduláció fizikai magyarázatának kidolgozásához még 2004-ben is hiányoztak az ilyen RR Lyrae csillagokról készült részletes többszín-fotometriai megfigyelések. Ahhoz, hogy a kevesebb mint egy napos pulzációs periódus mellett az esetenként több tíz, néha több száz napos modulációs periódus szerint is jól lefedett fénygörbékét kapjunk, egy-egy csillagról több tucat éjszakányi mérés szükséges. Ugyanakkor az északi égbolton több száz viszonylag fényes ( $V < 13$  mag) RR Lyrae csillag található. Így tehát a frissen felújított és automatizált sváb-hegyi 60 cm-es Heyde–Zeiss refraktorra – ami a fotometriai távcsövek közt közepes kategóriájúnak számít, ráadásul folyamatos hozzáférésünk van hozzá –, egy szisztematikus RR Lyrae megfigyelési program éppen ideális volt. 2004 januárjában elindítottuk a felmérési programunkat, aminek a célpontjai az északi égbolt 13 magnitúdónál fényesebb, fél napnál rövidebb periódusú RRab csillagai (Sódor, 2007). A programunkat Konkoly Blazhko Survey-nek (KBS) neveztük el. A KBS célja Blazhko-csillagok pontos és kiterjedt többszín-fotometriája mellett a moduláció előfordulási gyakoriságának vizsgálata is. Ezért csak olyan

célpontokat vettünk fel a programunkba, amikről korábbi mérések alapján nem lehetett megállapítani a csillag moduláltságát.

A KBS igen sikeresen bizonyult, Blazhko-fénygörbéink a ma hozzáférhető legkiterjedtebb homogén többszín-fotometriai méréseket képviselik. Ez a program szolgáltatta az első, mind a modulációs fázis, mind a pulzációs fázis szerint teljesen lefedett többszín-fotometriai Blazhko-fénygörbéket. Az új változócsillagászati fotometriai méréseket végző űrtávcsövekkel (pl. Corot<sup>8</sup>, MOST<sup>9</sup>, Kepler<sup>10</sup>) ugyan mérési pontosságban és az egybefüggő adatsorok hosszában nem vehetjük fel a versenyt, azonban egyik űrprogram sem tud többszín-fotometriát készíteni, ami viszont a fizikai vizsgálatokhoz igen fontos.

E programnak 2008 őszén a végére értünk, 30 csillagot megvizsgálva. Ez a kritériumainknak megfelelő összes R Rab csillagnak több mint fele. A megfigyelt csillagok listáját, a mérések legfontosabb adatait és a Blazhko-változókra vonatkozó legfontosabb eredményeket a B függelékben foglaltam össze. A KBS-t a hosszabb periódusú R Rab csillagokra kiterjesztve folytatjuk.

A 30 vizsgált R Rab csillagból 14 egyértelműen moduláltak bizonyult, míg 16 nem mutatott a mérési pontosságnál szignifikánsan nagyobb fénygörbealak-változást. Ez a majdnem 50%-os modulációs gyakoriság sokkal nagyobb, mint a korábban, más vizsgálatok eredményeként kapott 25–30% (lásd 1.1.3. pont). A korábbi vizsgálatok azonban nem voltak kellően pontosak ahhoz, hogy kb. 0.1 mag-nál gyengébb maximumfényesség-modulációt kimutassanak. A KBS R Rab csillagai közti nagyobb moduláltsági arány minden bizonnyal a minta 7 gyengén modulált csillagának köszönhető. Feltehetően vannak olyan gyengén modulált RR Lyrae csillagok is, amiket a mi műszerünk sem tud kimutatni, így az általunk talált kb. 50%-os modulációs arány is csak a tényleges arány egy alsó becslésének tekinthető. Az RR Gem-ről kimutattam, hogy a moduláció erőssége több éves időskálán jelentősen változott, volt időszak, mikor kimutathatatlanul gyenge volt, azaz a fénygörbe stabilnak mutatkozott (lásd 2.2. rész, illetve Sódor, Szeidl & Jurcsik 2007). Ebből a tapasztalatból pedig arra következtethetünk, hogy lehetnek Blazhko-csillagok, amelyek a megfigyelés idején épp a detektálási határnál gyengébben moduláltak, de egy korábbi vagy későbbi időpontban esetleg erősebb fénygörbealak-modulációt mutatnának. A Blazhko-csillagok tényleges aránya emiatt még magasabb lehet.

<sup>8</sup> <http://smc.cnes.fr/COROT/>

<sup>9</sup> <http://www.astro.ubc.ca/MOST/index.html>

<sup>10</sup> <http://kepler.nasa.gov/>

## 1.3. Adatfeldolgozás

### 1.3.1. Fotometria

#### CCD fotometria

2004 januárja, a Konkoly Blazhko Survey (KBS) elindítása óta veszek részt folyamatosan a sváb-hegyi 60 cm-es távcsővel folyó mérésekben és a mérések feldolgozásában. A munkám során leggyakrabban használt megfigyelési adatok e távcső CCD detektoráról származnak. A nyers CCD képeket technikai felvételek segítségével redukáljuk, majd a kalibrált képeken apertúra fotometriát végzünk. Végül egy vagy több, a látómezőben található, megfelelő színű és fényességű, a változónkhoz lehetőleg közel látszó állandó fényességű összehasonlító csillaghoz képest meghatározzuk a változócsillag relatív fényességét. A képfeldolgozási műveletekhez az IRAF programcsomagot használjuk.

Az így meghatározott relatív magnitúdók a műszer instrumentális színrendszerében értendőek és az extinkció hatását is tartalmazzák. Ezért az extinkcióra korrigálnunk kell, majd standard (esetünkben Johnson–Cousins  $BVR_{CI}$ ) rendszerbe kell a méréseket transzformálni<sup>11</sup>. A színrendszer-transzformációhoz szükséges távcsőkonstansokat ismert standard magnitúdójú csillagok megfigyelésével határozzuk meg. Ilyenek pl. az M67 nyílthalmaz egyes csillagai (Chevalier & Ilovaisky, 1991), illetve Arne Henden<sup>12</sup> kérésünkre megmérte két, a KBS során megfigyelt terület (CZ Lac és MW Lyr) csillagainak standard magnitúdóit (Jurcsik, Sódor, Horta et al., 2008a).

A felsorolt lépések nagymértékben automatizálhatók, e célra redukáló-fotometráló, színrendszer-transzformáló és az extinkcióra korrigáló szkripteket és programokat írtam.

#### Fotografikus fotometria

A CCD mérések mellett a Konkoly Observatórium archív RR Geminorum fotólemezeit is feldolgoztam. A lemezek szkennelése után itt is digitális apertúra fotometriát alkalmaztam. Mivel a fotólemezek feketedése<sup>13</sup> bár gyakorlatilag monoton, ám nem lineáris függvénye a csil-

<sup>11</sup> Mivel mind a bennünket elsősorban érintő másodrendű extinkció, mind a standard transzformáció függ a változó pillanatnyi színétől, ezért ezek a korrekciók csak többszín-fotometria esetén végezhető el.

<sup>12</sup> American Association of Variable Star Observers (AAVSO)

<sup>13</sup> Feketedésnek a fotólemez denzitásának, azaz az emulzió fényelnyelő képességének a csillag képére vett integrálját nevezzük.



lag fluxusának, így itt összehasonlító csillagoknak a változó által a pulzáció során bejárt teljes fényességtartományt lefedő sorozatát kell alkalmazni. Az összehasonlítókból minden egyes exponícióra feketedési görbét (magnitúdó–feketedés függvényt) állapítottam meg, és ezzel transzformáltam a változó mért feketedését magnitúdóvá. E feladatokra egy a feketedési görbéket polinommal illesztő, a munkát a lehetőségekhez képest automatizáló programot írtam.

A fotólemezek érzékenységi tartománya leginkább a Johnson  $B$  sávhoz van közel. Hogy a fotografikus fénygörbéink minél inkább összehasonlíthatók legyenek a későbbi fotoelektromos és CCD  $B$  fénygörbéinkkel, a fotografikus összehasonlító-sorozat csillagaira a 60 cm-es távcsővel kimért  $B$  magnitúdókat fogadtam el.

### 1.3.2. Fourier-analízis, fénygörbe illesztés

Miután előállt a fénygörbe, abban periodicitásokat keresünk, megpróbáljuk a megfigyelt adatsor egy matematikai modelljét meghatározni, általában harmonikus függvények összegével közelítve a méréseinket.

A periodicitások azonosítására a Fourier-spektrum, a fénygörbe Fourier-transzformáltja alkalmas eszköz. A Fourier-analízis alkalmazását nem egyenközüen, diszkrét pontokban mintavételezett és zajjal terhelt csillagászati idősorokra Deeming (1975) dolgozta ki. A spektrumban azonosított frekvenciájú harmonikus komponensekkel illesztjük a fénygörbét, majd az illesztett függvényt levonva a reziduálban keresünk további periodicitásokat. Ezt a sorozatos közelítési eljárást addig ismételjük, míg a reziduál spektruma szignifikáns csúcsokat tartalmaz. A fenti lépéseket segítő, egyszerűen kezelhető interaktív program a Kolláth Zoltán által kifejlesztett MuFrAn csomag (Kolláth, 1990). Mivel egyes adatsoraink analízise meghaladta a MuFrAn lehetőségeit (több mint 50 Fourier-komponens, több alaphfrekvencia lineárkombinációinak szimultán illesztése), kifejlesztettem egy nemlineáris Fourier-illesztő programot, ami lineárisan független frekvenciákat, illetve ezek lineárkombinációjával leírt harmonikus komponenseket illeszt idősorokra. Esetenként a CLEAN algoritmus (Roberts, Lehár & Dreher, 1987) hasznos segédeszköz a spektrum valódi csúcsainak azonosítására, hamis csúcsoktól (aliasoktól) való megkülönböztetésükre.

A Fourier-analízis rendkívül hatékony és hasznos segédeszköze munkánknak, éppen ezért fontos tisztában lennünk a módszer korlátaival is. A Fourier-spektrum vizsgálatok, illetve a fénygörbe harmonikus függvényekkel való illesztésekor azzal a feltételezéssel élünk, hogy a fényváltozás stacionárius, azaz állandó frekvenciájú, amplitúdójú és fázisú harmonikus függvények összegeként előállítható. A valóság azonban gyakran ennél bonyolultabb. Közismert,

hogy az RR Lyrae csillagok többségének pulzációs frekvenciája hosszabb-rövidebb időskálán jól kimutatható változásokat szenved. Ezek a változások lehetnek lassúak, hosszú évtizedeken át egyenletesek, de előfordul igen gyorsan, akár néhány nap alatt végbemenő jelentős változás is, úgy a frekvenciákban, mint az amplitúdókban. Ilyenkor vagy a változások által nem, vagy csak elhanyagolható mértékben érintett részhalmazokra vagyunk kénytelenek bontani az idősort, vagy a változást is tekintetbe kell vennünk az illesztett függvényben.

### 1.3.3. $O - C$ analízis

A Fourier-analízist nagy számítási igénye miatt csak a '70-es évek óta, a számítógépek elterjedésével kezdték a változócsillagzatban alkalmazni. Korábban az  $O - C$  analízis volt az RR Lyrae fénygörbék vizsgálatának egyik legfontosabb eszköze. Ez a módszer a fénygörbe maximumának vagy egy bizonyos, jól definiált pontjának bekövetkezési idejét vizsgálja, azt valamilyen szabályosság alapján előre számított időponttal hasonlítja össze. Az  $O$  a megfigyelt időpontra utal (observed), a  $C$  pedig a számított időpontot jelöli (calculated).

A  $C$  időpontokat leggyakrabban konstans periódust feltételezve számítjuk, az azt megadó képletet efemerisznak nevezzük. Egy maximum-időpontokat leíró efemerisz a következőképp néz ki:

$$t_{max} = t_0 + E \cdot P_0,$$

ahol  $t_0$  az efemerisz kiindulópontja, egy megfigyelt maximum-időpont,  $E$  a pulzációs ciklusok száma (egész), más néven epocha szám,  $P_0$  pedig a pulzációs periódus. Ha a periódus változását is figyelembe vesszük, akkor  $E$ -szerinti magasabb rendű tagok is szerepelnek az efemeriszben. Ha ezután megfigyeljük egy maximum bekövetkezéének tényleges időpontját, valamint ha tudjuk, hogy az hányadik epochához tartozik, akkor ebből a megfigyelt időpontból az efemerisszel számított időpontot kivonva kapjuk az adott maximum  $O - C$  értéket, amit az idő függvényében grafikonon szoktunk ábrázolni.

Az  $O - C$  adatokon keresztül vizsgálhatók a pulzációs periódus változásai és a fénygörbe adott pontjának fázismodulációja. A periódusváltozás olymódon nyilvánul meg az  $O - C$  diagramban, hogy az adatpontok egyenes vonal helyett egy görbe, esetleg töröttvonal mentén sorakoznak. A pontok periodikus elhelyezkedése adódhat fényidő-effektusból, ha egy kísérő körül kering a változó<sup>14</sup>, illetve jelezheti a változó saját fázismodulációját is.

<sup>14</sup>Érdemes megjegyezni, hogy annak ellenére, hogy keletkezésükkor a csillagok kb. fele kettős vagy többes rendszer

Mivel a csillagot rendszerint nem teljesen folytonosan figyeljük meg, az epocha értékében valami bizonytalanság általában lesz, ugyanis nem fogjuk biztosan tudni, hogy ténylegesen hány pulzációs ciklus zajlott le, míg nem történtek mérések. Az RR Lyrae csillagok pulzációs periódusa néhány ezreléken belül stabil, azaz ennél nagyobb változásokat emberi időskálán nem mutatnak. Azonban ezreléknyi, tízezreléknyi változást egész rövid, akár néhány hetes időtartam alatt is szenvedhet a pulzációs periódus. Ebből az következik, hogy ha kevesebb mint 1000 ciklust tesz ki egy megfigyeléseket nélkülöző időszak (1–2 év), akkor még ritka erős periódusváltozások esetében is nagy biztonsággal azonosítható az epocha. Az ilyen erős periódusváltozások azonban ritkák, így gyakran 5–10 év kihagyás sem jelent problémát az epocha pontos meghatározásánál.

tagjaként kezdi pályafutását, RR Lyrae csillagok közt nem igen ismerünk kettőst. Pedig a kettősség épp ezzel a módszerrel, az  $O-C$  diagraból könnyen kimutatható volna. Ilyenkor ugyanis tiszta fázismodulációt figyelniük meg, ami könnyen megkülönböztethető a Blazhko-modulációtól, ami a tapasztalatok szerint a fénygörbe alakjának modulációjával is jár.



## 2. fejezet

### RR Geminorum

Az RR Gem 11.2 mag közepes vizuális fényességével az északi égbolt fényesebb RRab csillagai közé tartozik. A Konkoly Obszervatóriumban az RR Lyrae csillagok illetve a Blazhko-moduláció tanulmányozása jelentős múlttal rendelkező, hagyományos kutatási terület. E program keretében az RR Gem-ről 1935 és 2005 között többé-kevésbé folyamatos fotometriai megfigyelési anyag gyűlt össze, mely mindig az adott kor legfejlettebb mérési technikájával készült: 1953-ig fotografikus, 1954-től 1983-ig fotoelektromos, 2004–05-ben CCD.

A fotografikus mérések alapján, az 1930-as években a csillag Blazhko-moduláltnak mutatkozott, kb. 48 nap periódussal (Balázs, 1960). A moduláció azonban a fotografikus mérések második felére, illetve a fotoelektromos mérések idejére, az 1940–50-es évekre látszólag eltűnt (Detre, 1970). Ekkortól a csillagot stabil pulzációs fénygörbéjű RRab-ként tartották számon. A fotoelektromos fénygörbe alakja megfelel a fénygörbealak – fizikai paraméterek közötti empirikus összefüggéseknek (Jurcsik & Kovács, 1996), vagyis normál, modulálatlan RR Lyrae fénygörbének mutatkozik. Ilyen előzmények után kezdtünk az RR Gem CCD megfigyelésébe a Konkoly Blazhko Survey programunk első célpontjaként 2004 januárjában. Miután a CCD mérésekből egyértelművé vált, hogy a csillag Blazhko-modulált, ráadásul a várt több tíz naposnál jóval rövidebb 7.2 nap periódussal, úgy döntöttünk, a korábbi, publikálatlan archív fotografikus és fotoelektromos méréseket is újra kiértékeljük, a fénygörbéket újra analizáljuk.

A majdnem egy évszázadot felölelő adatsor kivételes lehetőséget nyújt a Blazhko-effektus hosszútávú viselkedésének vizsgálatára. A jelenség fizikai hátterének megértéséhez fontos tudnunk, hogy hosszútávon miképp változhatnak a moduláció tulajdonságai.

Az RR Gem vizsgálatában elért, e fejezetben ismertetett eredményeinket három cikkben publikáltuk. A 2004-es CCD megfigyeléseink eredményeit 2005-ben (Jurcsik, Sódor, Váradi

et al., 2005b), a teljes 70 éves fotometriai anyag analizését pedig 2007-ben (Sódor, Szeidl & Jurcsik, 2007) tettük közzé. A 2005-ös szezonnal kiegészített CCD mérések eredményeiről egy konferencia kiadvány szól (Sódor, 2006).

## 2.1. Blazhko-viselkedés 2004–05-ben

A 70 évet átfogó RR Gem megfigyelési anyag vizsgálatának ismertetését a legutolsó 2 év CCD adatsorával érdemes kezdeni, mert ez a legrészletesebb, legpontosabb fénygörbe a csillagról, a Blazhko-viselkedés ezen tanulmányozható a legrészletesebben. A többi időszakot ennek fényében érdemes vizsgálni.

### 2.1.1. A CCD fénygörbe

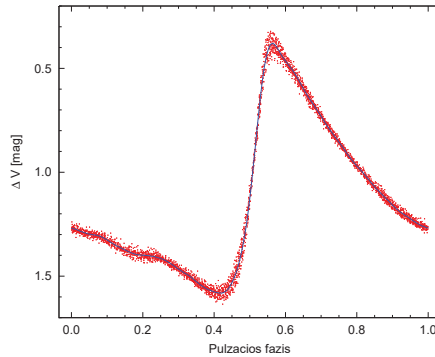
A CCD méréseink két szezonna terjednek ki, egy 420 napos időszakot átfogva. Összesen 63 éjszakán történtek mérések, ebből 32 éjjelen maximumot is megfigyeltünk. A 4 színben ( $BVR_{CI}$ ) készült fénygörbék színenként 3300–3400 adatpontot tartalmaznak. 2005-ben ez volt az addigi legkiterjedtebb homogén többszín-fotometriai RR Lyrae adatsor, és egyben az első, ami teljesen lefedte egy Blazhko-csillagnak mind a moduláció, mind a pulzáció összes fázisát.

A  $V$  fénygörbét láthatjuk a 2.1. ábrán a pulzáció fázisának függvényében. Az ábrán folytonos vonal jelöli az illesztett középgörbét<sup>1</sup>, ami körül az adatpontok sávja minimum és maximum környékén láthatóan kiszélesedik. A pontok szórása itt jóval nagyobb, mint a mérési bizonytalanság, ez a Blazhko-moduláció jele. Az adatsorból a középgörbét levonva kapott reziduál látható a 2.2. ábrán, amin megfigyelhetjük, hogy a moduláció mindössze egy keskeny, két tizednyi fázisstartományra koncentrálódik, a minimum és maximum környékére.

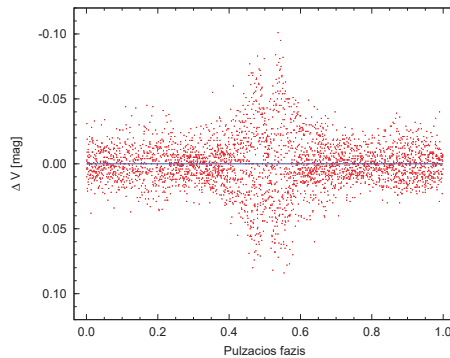
### 2.1.2. A Blazhko-moduláció tulajdonságai

Az eredeti fénygörbe, illetve a pulzáció levonása utáni reziduál Fourier-spektrumát a 2.3. ábra mutatja. Az utóbbi spektrumban megjelöltük a pulzációs frekvencia és felharmonikusai körül szimmetrikusan elhelyezkedő modulációs csúcsokat. Ebben a spektrumban jól láthatóan megjelenik továbbá maga a modulációs frekvencia is. Ez a magnitúdóátlagolt közepes fényesség

<sup>1</sup> Középgörbének itt azt az illesztett görbét nevezzük, amelynél csak a pulzációs frekvenciát és felharmonikusait vesszük figyelembe ( $kf_0$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots$ ), eltekintve a modulációs komponensektől.

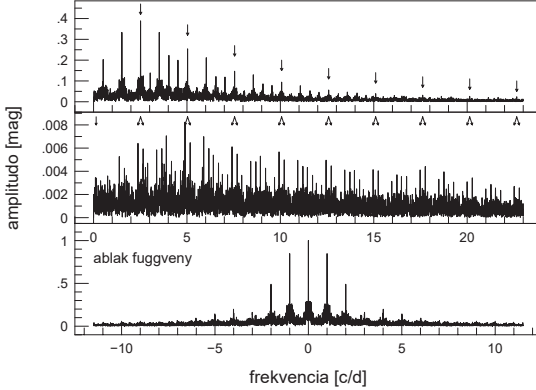


**2.1. ábra.** AZ RR GEM CCD  $V$  FÉNYGÖRBÉJE. A minimum és maximum környéki enyhe kiszélesedés a közpérgörbe körül a moduláció jele. A felszálló ág közepén lévő csomópont azt mutatja, hogy fázismoduláció nem történik.



**2.2. ábra.** AZ RR GEM MODULÁCIÓJA A  $V$  FÉNYGÖRBE REZIDUÁLJÁBAN. A reziduált a pulzációs közpérgörbe levonása után, a pulzáció szerint feltekerve ábrázoltuk. A moduláció lényegében csak a felszálló ág környéki szűk, két tizednyi fázistartományon (0.4–0.6) fejt ki hatását.

modulációval való változását jelenti. Korábban vitatott volt, hogy ez a frekvencia megjelenik-e egyáltalán Blazhko-csillagoknál.



**2.3. ábra.** AZ RR GEM FOURIER-SPEKTRUMA. Az eredeti (felső panel) és a pulzáció levonása utáni (középső panel)  $V$  fénygörbe amplitúdóspektruma. Az ablakfüggvényt az alsó panel mutatja. Felül megjelöltük a pulzációs harmonikusok csúcsait. A fent jelölt frekvenciákkal való fehérités után kapjuk a középső panel spektrumát. Itt láthatóvá válnak a modulációs csúcsok, melyeket nyilakkal jelölünk. Baloldalt a legszélső csúcs maga a modulációs frekvencia ( $0.139$  c/d), a többi a pulzációs harmonikusok körüli modulációs komponens ( $kf_0 \pm f_m$ ).

Az RR Gem fénygörbéjét a modulációs frekvenciával és 16 triplettel, vagyis 16 pulzációs harmonikkal és az ezekhez tartozó 2-2 modulációs komponenssel szimultán illesztettük, az alábbi képlet szerint:

$$\begin{aligned} \text{Mag}(t) = & A_{m0}^+ \sin(2\pi f_m(t - t_0) + \delta_{m0}) + \\ & \sum_{k=1}^n (A_k \sin(k2\pi f_0(t - t_0) + \varphi_k) + A_{mk}^+ \sin((k2\pi f_0 + f_m)(t - t_0) + \varphi_{mk}^+) + \\ & + A_{mk}^- \sin((k2\pi f_0 - f_m)(t - t_0) + \varphi_{mk}^-)) \end{aligned}$$

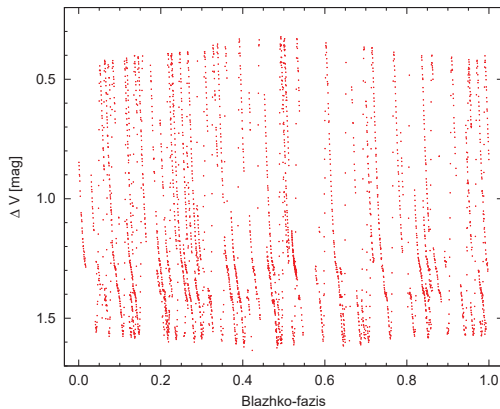


ahol most  $n = 16$ ,  $f_0$  a pulzációs frekvencia,  $f_m$  pedig a moduláció frekvenciája. A nemlineáris illesztés megadta az egyes komponensek amplitúdói és fázisai mellett a pulzáció és moduláció frekvenciáját is. A moduláció frekvenciájára illetve periódusára kapott érték:

$$f_m = 0.13867(2) \text{ c/d,}$$

$$P_m = 7.211(1) \text{ d.}$$

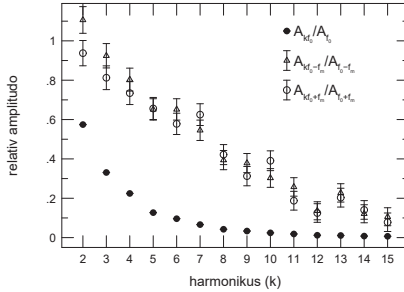
Ilyen rövid modulációs periódusú Blazhko-csillagot korábban nem ismertek<sup>2</sup>. A  $V$  fénygörbe a modulációs periódussal feltekerve látható a 2.4. ábrán. Megfigyelhetjük, hogy a maximum- és minimumfényesség alig 0.1 magnitúdót változik a moduláció során. Ezzel a gyenge modulációval az RR Gem szintén csúcstartó volt 2005-ben.



**2.4. ábra.** AZ RR GEM MODULÁCIÓJA. A  $V$  fénygörbe a Blazhko-fázis függvényében. A minimum- és maximumfényességek kevesebb mint 0.1 magnitúdót változnak a modulációs ciklus során. Látható a Blazhko-fázis szerinti jó lefedettség.

Az RR Gem pulzációs középüregébét leíró Fourier-komponensek amplitúdói ( $A_k$ ), hasonlóan más RR Lyrae csillagokhoz, közelítőleg exponenciálisan csökkennek az egyre magasabb

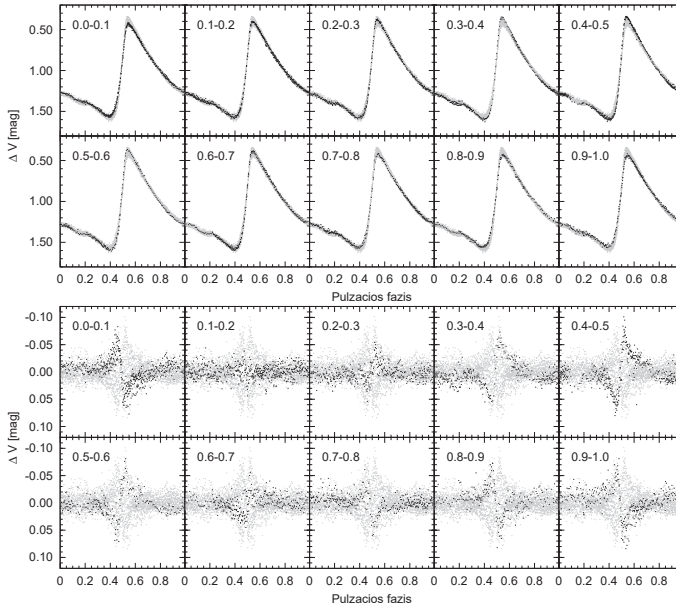
<sup>2</sup> A korábbi csúcstartó mező csillagok közt az AH Cam volt 10.9 nap Blazhko-periódussal (Smith, Matthews, Lee et al., 1994).



**2.5. ábra.** AZ RR GEM FOURIER-MEGOLDÁSÁNAK AMPLITÚDÓI. Teli szimbólumok jelölik a pulzációs felharmonikusok amplitúdóarányait az alapharmonikusokhoz viszonyítva ( $R_{k1}$ ). Üres szimbólumok a modulációs komponensek relatív amplitúdóit jelölik a pulzáció alapharmonikusa ( $k = 1$ ) körüli modulációs komponensekhez viszonyítva. Körökkel a pozitív oldali modulációs csúcsokat ( $kf_0 - f_m$ ), háromszögekkel a negatív oldaliakat jelöljük ( $kf_0 + f_m$ ).

felharmonikusok felé. A modulációs csúcsook amplitúdói ( $A_{mk}^+$  és  $A_{mk}^-$ ) ezzel szemben a pulzációs harmonikus szerint nagyjából lineárisan csökkennek csak, a 2.5. ábrán látható módon. A 2–15. pulzációs felharmonikusok tripllettjei esetében a modulációs csúcsook tehát a pulzációs csúcsokhoz képest relatíve erősebbek, mint az alapharmonikus tripllettjénél. Ez összhangban van azzal az iménti megállapítással, hogy a moduláció a pulzációnak csak egy szűk fázistartományában jelentős. Egy ilyen jel leírásához ugyanis sok felharmonikus szükséges.

Az amplitúdók ilyen viselkedésének a magyarázata a rezonancia-modellek számára nehézséget jelent, mivel ott a domináns radiális pulzációs módushoz egy nemradiális módus csatolódik, aminek a frekvenciája valamelyik modulációs komponensének felel meg (Nowakowski & Dziembowski, 2003). E két módus nemlineáris kölcsönhatása révén a spektrumban további lineárkombinációs csúcsook jelennek meg, ezek alkotják a többi modulációs csúcsoot. A kölcsönhatás az amplitúdóval arányosan gyengül, így a pulzáció magasabb felharmonikusai körül gyengébb modulációs csúcsokat várunk, magasabb felharmonikusok felé a pulzációhoz hasonlóan exponenciális lecsengéssel.

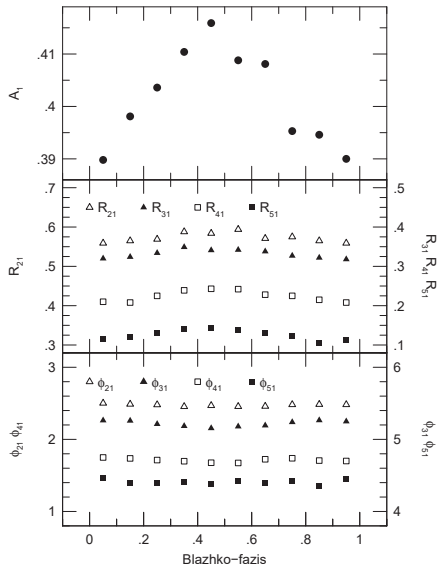


**2.6. ábra.** AZ RR GEM FÉNYGÖRBÉJE 10 BLAZHKO-FÁZISBAN. A felső paneleken a  $V$  fénygörbe látható a különböző Blazhko-fázisokban, az alsó panelek ugyanezeket a görbékét mutatják a közép görbe levonása után, a pulzációs fázis szerint. Az ábrákon feltüntetjük a Blazhko-fázis tartományt.

### 2.1.3. Megfigyelt változások a Blazhko-ciklus során

Az RR Gem CCD fénygörbéje az első olyan Blazhko-fotometria, ami kellően kiterjedt ahhoz, hogy mind a pulzáció, mind a moduláció fázisa szerint jó lefedettséget biztosítson. A  $V$  adatsort Blazhko-fázis szerint 10 egyenlő részre bontva minden fázisra 200–600 adatpont jut, és e Blazhko-fázisok mindegyike teljesen lefedi a pulzációs görbét<sup>3</sup>. Ilymódon részletesen tanulmányozható a moduláció lefolyása, a moduláció hatása a fénygörbe alakjára, illetve a pulzáció

<sup>3</sup> Mivel diszkrét adatpontokról van szó, a teljes lefedettség úgy értendő, hogy a pulzációs periódus szerint feltekket fénygörbén a legnagyobb fázisköz két szomszédos pont közt jóval kisebb, mint az illesztett legnagyobb frekvenciájú komponensnek megfelelő periódusidő. Így stabil Fourier-megoldást kapunk.

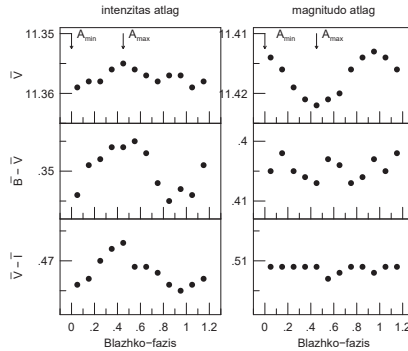


**2.7. ábra.** A  $V$  FÉNYGÖRBE FOURIER-PARAMÉTEREINEK BLAZHKO-FÁZIS FÜGGÉSE. A felső panel tulajdonképpen az amplitúdómodulácót mutatja, a középső nyhe fénygörbealak változást jelez a Blazhko-ciklus során, míg az alsó panel a felharmonikusok alapharmonikus-hoz viszonyított relatív fázisainak állandóságát mutatja.

szerint kiátlagolt színek és fényességek változása a Blazhko-fázis szerint. A 2.6. ábra mutatja a 10 Blazhko-fázis pulzációs fénygörbéit a középgörbe levonása előtt és után.

A 10 fázis pulzációs görbéjét az adatpontokra illesztett, csak a pulzációs frekvenciát és felharmonikusait tekintve vevő Fourier-illesztéssel írjuk le, mert az RR Gem gyenge modulációjának hatása ilyen keskeny fázisstartományban már elhanyagolható. A fénygörbe alakjában a Blazhko-fázis szerint bekövetkező változásokat az illesztett görbék Fourier-paramétereiben bekövetkezett változásokkal lehet kvantitatív módon jellemezni. A jellemzéshez a következő Fourier-paramétereket használjuk:

- Amplitúdók:  $A_k$  a  $k$ . harmonikus ( $kf_0$ ) amplitúdója.  $R_{k1}$  a  $k$ . harmonikus relatív amplitúdója az 1. harmonikuséhoz viszonyítva ( $R_{k1} = A_k/A_1$ ).
- Fázisok:  $\varphi_k$  a  $k$ . harmonikus fázisa adott epochára vonatkoztatva.  $\varphi_{k1}$  az epochafüggetlen fáziskülönbség a  $k$ . és az 1. harmonikus között ( $\varphi_{k1} = \varphi_k - k\varphi_1$ ).



**2.8. ábra.** AZ RR GEM  $\bar{V}$  FÉNYESSÉGÉNEK ÉS SZÍNEINEK BLAZHKO-FÁZIS FÜGGÉSE. A bal oldali panelek az intenzitás szerinti átlagokat mutatják, jobboldalt magnitudo szerint átlagoltunk. Az intenzitásátlagolt mennyiségek átlagszín- és így átlaghőmérséklet-változásra utalnak, mégpedig úgy, hogy a csillag kis pulzációs amplitúdójú állapotában mintegy 30–40 K-el hidegebb.

Ezeknek a paramétereknek a Blazhko-fázis függését mutatja a 2.7. ábra.  $A_1$  kismértékű, ám határozott változása a 2.4. ábrán látható totál pulzációs amplitúdó változásnak megfelelő függést mutat. A relatív amplitúdók enyhe Blazhko-fázis függése arra utal, hogy a moduláció nem tiszta amplitúdómoduláció, a különböző Blazhko-fázisokban a fénygörbének nem csak az amplitúdója, de az alakja is változik kissé. Az epochafüggetlen fázisok változása azonban a Blazhko-ciklus során jelentéktelen.

A 10 Blazhko-fázisra átlagos fényességeket és színeket is levezethetünk a 10 Fourier-görbe alapján, amiből az átlagos fizikai paraméterek Blazhko-fázis szerinti változására következtethetünk.<sup>4</sup> Az átlagolás azonban többféleképp is elvégezhető. A műszerünk intenzitás jellegű mennyiséget mér egy bizonyos hullámhossz tartományban, amit a hagyományokhoz igazodva logaritmikus skálára, magnitúdóvá transzformálunk. A fénygörbe alakjából következik, hogy nem ugyanazt az átlagértéket kapjuk, ha intenzitás, vagy ha magnitudo szerint átlagolunk. Az átlagolással a célunk a csillag sztatikus paramétereinek becslése, vagyis arra vagyunk kíváncsiak, hogy ugyanez a csillag milyen színű és fényességu volna, ha nem pulzálna. Hogy melyik átlagolási mód adja vissza jobban ezeket a sztatikus értékeket, az vitatott kérdés. A 2.8. ábrán

<sup>4</sup> Itt átlagos mennyiségeknek a pulzációs ciklusra vett átlagolást nevezzük, így már csak a Blazhko-fázistól való függés marad meg.

követhetjük az átlagos  $\bar{V}$  fényesség, illetve az átlagos színek ( $\bar{B} - \bar{V}$ ,  $\bar{V} - \bar{I}$ ) Blazhko-fázis szerinti változását mindkétféle átlagolási mód szerint. Ezek az eredmények azt mutatják, hogy a fotometriai átlagértékek változása a Blazhko-fázis szerint erősen függ az átlagolás módjától. A  $V$  fénygörbe intenzitásátalga alig változik a Blazhko-fázissal, míg a magnitúdóátlag határozott Blazhko-függést mutat. Az átlagos színeknél a helyzet épp fordított. Itt az intenzitás szerinti átlag mutat kb. 30–40 K amplitúdójú átlaghőmérséklet változást, úgy, hogy alacsony amplitúdójú állapotban hűvösebb a csillag.

A Blazhko-csillagok fizikai paramétereinek modulációval való változásainak vizsgálatára később egy az itt alkalmazottnál jóval szofisztikáltabb módszert (IP módszer) dolgoztam ki (lásd 4. fejezet). A módszerrel a közeljövőben tervezzük az RR Gem vizsgálatát is. Azt azonban már most, az MW Lyr és DM Cyg eredményei alapján is látni lehet (lásd 4.4. és 4.5. pontok), hogy a Blazhko-ciklus során bekövetkező hőmérsékletváltozásokat a magnitúdóátlagolt színindexek (a 2.8. ábra jobb oldali alsó két panelje) tükrözik helyesebben. Bár az RR Gem e mennyiségekben gyakorlatilag nem mutat függést a Blazhko-fázistól, csak szórást, a DM Cyg tapasztalata alapján a valódi fizikai változásokat az IP módszer ennek ellenére képes kimutatni.

## 2.2. A moduláció és pulzáció hosszútávú viselkedése

Az RR Gem 1930-as évekbeli fotografikus mérései alapján 37 és 48 nap közötti modulációs periódus becslések láttak napvilágot. A 2004–05-ös CCD fotometriánkból kimutatott 7.2 napos periódus ettől annyira eltér, hogy felmerül a kérdés, vajon valóban ekkora változást szenvedett a moduláció periódusa, vagy esetleg valami más áll a háttérben? Lehetséges, hogy a moduláció periódusa korábban is 7 nap körül alakult, ám ezt a 30-as években nem találták meg. Ennek oka lehet egyfelől, hogy abban az időben 30–40 napos volt a legrövidebb ismert Blazhko-periódus is, így talán nem is számítottak ilyen rövid periódusra, s ennek megfelelően az egy hetes periodicitáshoz képest túlságosan ritkán történtek a mérések. Másfelől pedig akkoriban jóval körülményesebb volt a periodicitások azonosítása a fénygörbében, hiszen kollégáink híján voltak a ma bárki számára rendelkezésre álló számítógépek által nyújtott hatalmas számítási teljesítménynek. A maximumok időpont–fényesség adatainak Fourier-spektruma a matematikailag értelmes igen tág tartományra ma néhány mozdulattal másodperceken belül kiszámolható, így tetszőleges periodicitás azonnal láthatóvá válik. E megfontolásból kiindulva vizsgáltuk újra a korábbi fénygörbéket, és valóban, az adatok nagyrészeben a kb. 7.2 napos modulációt ki tudtuk mutatni.

A 70 évet átfogó adatsort több részre kell osztanunk az analízishez, többek közt azért,

mert a fotografikus megfigyelések szűrő nélkül készültek, így – bár a fotólemezek érzékenységi tartománya közel van a Johnson  $B$  hullámsávhoz, amit a későbbi fotoelektromos és CCD méréseknél is használtunk, az eltérő fotometriai rendszer miatt a fotografikus mérések külön kezelendők. A pulzációs periódus változásai, valamint az egyes fotometriai módszerekkel nyert fénygörbék adateloszlása szintén indokolja ezen adatsorok tovább bontását. Mind a fotografikus, mind a fotoelektromos mérések első éveiben jóval intenzívebben figyelték meg a csillagot, mint a későbbiekben. Így az első időszakokat érdemes külön vizsgálni.

### 2.2.1. Az $O - C$ diagram

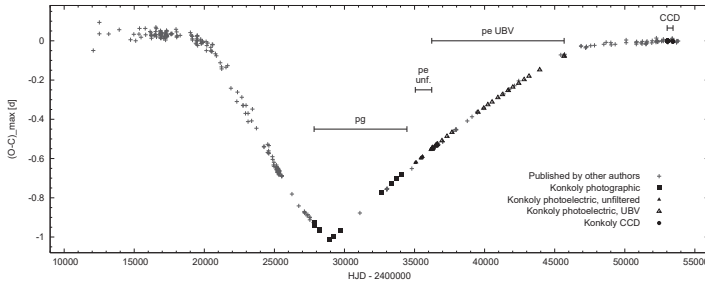
#### Adatok

Az RR Gem hosszútávon mutatott periódusváltozásait a maximum-időpontok  $O - C$  adatai segítségével vizsgáltuk, a fázismoduláció tanulmányozásához pedig a felszálló ág egy bizonyos pontjának  $O - C$  értékeit használtuk.

A Konkoly-fénygörbékből meghatározott maximum-időpontokon túl felhasználtuk az irodalomban fellelhető, 115 évre visszanyúló adatokat is. Ezek nagyrésze a GEOS adatbázisban<sup>5</sup> össze van gyűjtve (30 szerző 42 publikációjából). Mi további két szerzőtől találtunk publikált maximum-időpont adatokat.

A fázismoduláció a fénygörbe egy jól definiált fázisának bekövetkezési időpontjain keresztül tanulmányozható. A maximum-időpontok nem a legalkalmasabbak erre a célra, mert maximumban a fénygörbe ellapul, ez az időpont túlságosan nagy hibával határozható csak meg. Ezért inkább a felszálló ág egy bizonyos pontját választottuk, mivel ott elég meredek a fénygörbe, így nagy pontossággal számítható az időpont. A felszálló ág középtájt a legmeredekebb, ráadásul a CCD adatoknál láthattuk, hogy ha nincs fázismoduláció, akkor a felszálló ág közepe csomópont. Ez a pontja a fénygörbének ezért nagyon alkalmas az esetleges fázismoduláció kimutatására. Mivel azonban a fotografikus mérések gyakran csak a maximum szűk környezetére koncentráltak, a mérések néha csak a felszálló ág közepe után kezdődtek. Így kompromisszumra kényszerültünk, és a felszálló ág felső – nagyjából – negyedelő pontját választottuk vizsgálatunkhoz, ahol a  $B$  fényesség eléri a 11.3 magnitúdót. A felszálló ág ezen pontjára vonatkozó  $O - C$  és időpont adatok jelölése  $(O - C)_{m=11.3}$  és  $t_{m=11.3}$ , míg a maximum-időpontokéi  $(O - C)_{\max}$  és  $t_{\max}$ .

<sup>5</sup> [http://rr-lyr.ast.obs-mip.fr/dbrr/dbrr-V1.0\\_0.pdb](http://rr-lyr.ast.obs-mip.fr/dbrr/dbrr-V1.0_0.pdb)

Az  $(O-C)_{\max}$  diagram

**2.9. ábra.** AZ RR GEM  $(O-C)_{\max}$  DIAGRAMJA 1890-TŐL NAPJAINKIG. A diagramot a csillag 115 évre számított átlagos pulzációs periódusával konstruáltuk. Szürke '+' jelek az irodalomból átvett maximum-időpontokat reprezentálják, a fekete szimbólumokkal jelölt adatok pedig a Konkoly Obszervatóriumban 1935 és 2005 között történt megfigyelésekből származnak. A különböző mérési időszakokat a pontok feletti vonalakkal jelöltük.

Az RR Gem periódusváltozásai követhetők nyomon a 2.9. ábra  $(O-C)_{\max}$  diagramján, 1890-től napjainkig. Az egyes Konkoly-megfigyelések időszkait megjelöltük az ábrán – 'pg' a fotografikus, 'pe' a fotoelektromos méréseket jelenti, és 'CCD' jelöli a 2004–05 közötti CCD méréseinket. Ennek a diagramnak a megkonstruálásához a következő eferisztt használtam:

$$t_{\max} = 2412077.521 [\text{HJD}] + 0^d 397291066 \cdot E$$

az itt használt periódus a teljes 115 éves időszakra számított átlagos periódusérték. A maximum-megfigyelések jól lefedik a teljes időszakot, ennek köszönhetően az epochában gyakorlatilag sehol sincs bizonytalanság. A diagramon egyaránt megfigyelhetünk lassú folytonos és hirtelen ugrásszerű periódusváltozásokat. Az elsöre példa nagyjából a Konkoly fotoelektromos mérések ideje, ahol a pontok sora enyhe de egyenletes görbületet mutat. Ugrásszerű periódusváltozás pedig JD 2428 800-nál figyelhető meg. Érdeemes megjegyezni, hogy ez az  $(O-C)_{\max}$  diagram nagyon hasonlít két másik Blazhko-csillag, az XZ Cyg (Baldwin & Samolyk, 2003) és az RW Dra (Balázs & Detre, 1962) hasonló diagramjára.



## 2.2.2. A fotografikus fénygörbe – 1935–1953

### Adatok

A fotografikus megfigyelések 1935 és 1953 között történtek a Konkoly Obszervatórium 16 cm-es asztrográfiájával ( $f = 2240$  mm). Ezidő alatt mintegy 1000 expozíció készült kb. 80 fotólemezre. Sajnos sok lemez eltűnt vagy használhatatlanná vált azóta, így összesen 598 expozíciót tudunk kimérni 56 lemez digitalizált képéről. A fotólemezek egy részét korábban analóg technikával kimérték, amiből 331 adatpont maradt ránk. Eből 70 származik a számunkra hozzáférhetetlenné vált lemezekről, míg 261 adatpont a miénkkel közös. A digitális fotometriánál a fotografikus összehasonlító csillagok magnitúdóit a Johnson  $B$  hullámsáv szerint határoztuk meg (lásd 1.3.1. pont), emiatt a korábbi fotometriából származó adatokat transzformálnunk kellett a saját skálánkra. Ehhez a 261 közös adatpont alapján lineáris regresszióval határoztuk meg a transzformációs képletet. A 70 további ponttal kiegészítve összesen 668 fotografikus mérési pont állt rendelkezésünkre.

Az  $O - C$  analízis kimutatta, hogy a fotografikus mérési időszak 3. évében egy igen komoly, ugrásszerű változás történt a pulzációs periódusban. Ez lehetetlenné teszi az adatsor egyben történő analízisét, mert ettől a Fourier-spektrum nehezen értelmezhetővé válik. Számítanunk kell ráadásul arra, hogy azok a fizikai folyamatok, amelyek a periódus ilyen hirtelen megváltozásához vezettek, azok esetleg a Blazhko-modulációban is változást okoztak, ami szintén szükségessé teszi az adatok külön történő vizsgálatát. A már említett adateloszlás szintén a periódusugrás idejénél indokolja a kettébontást, ugyanis azt megelőzően 2 szezonból 16 éjszakáról vannak mérések, a periódus változást követő 16 szezonból pedig 21 éjszakáról, vagyis évente átlagosan alig több mint 1 éjszaka. A fotografikus adatsort ezért JD 2 428 800-nál két részre bontottuk. A két időszak adataira 'pg1' és 'pg2' néven fogunk hivatkozni. A két idősor adatait a 2.1. táblázat foglalja össze.

**2.1. táblázat.** AZ RR GEM KÉT RÉSZRE BONTOTT FOTOGRAFIKUS ADATSORÁNAK ADATAI.

jelölés	kezdeté [JD – 2 400 000]	vége	időtartam [év]	maximumok száma	éjszakák száma	mért pontok száma
pg1	27 833	28 248	1.12	8	16	266
pg2	28 953	34 457	15.07	12	21	402

### Pulzációs viselkedés

A két fotografikus időszak pulzációs periódusát Fourier-illesztéssel határoztuk meg, 8 harmonikust figyelembe véve. Mivel a 'pg2' adatsor nem fedi le a leszálló ág közepét, az illesztés stabilizálásához a CCD  $B$  középörbe leszálló ágából képzett mesterséges adatpontokat is felhasználtunk, megfelelően eltolva és skálázva e pontokat. Ezek a szintetikus pontok csak a Fourier-illesztés stabilizálását szolgálják, és semmilyen hatással nincsenek a vizsgálataink eredményére. A 15 évet átfogó 'pg2' időszak  $t_m = 11.3$  adataiból enyhe periódus csökkenés mutatható ki a pulzációban, amit lineáris változásként figyelembe vettünk az analízis során. A pulzációs periódus a két időszakra:

$$P_{pg1} = 0.397253 \pm 5 \cdot 10^{-6} \text{ d},$$

$$P_{pg2} = P_{pg20} + \dot{P}_{pg2} \cdot (t - t_{pg20}) \text{ d},$$

ahol

$$P_{pg20} = 0.3973177 \pm 2 \cdot 10^{-6} \text{ d},$$

$$\dot{P}_{pg2} = -(3.7 \pm 0.8) \cdot 10^{-10} \text{ d/d}, \text{ valamint } t_{pg20} = 2428953.0 \text{ [HJD]}.$$

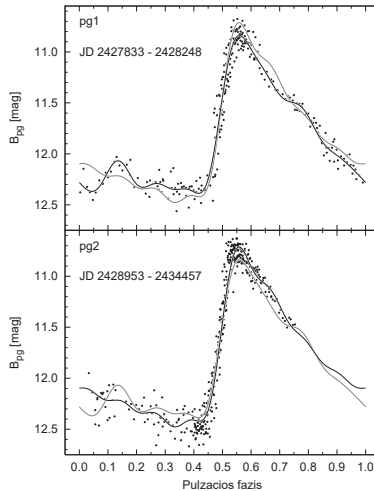
A két időszak fénygörbéi a 2.10. ábrán a megfelelő pulzációs periódusokkal számított fázis függvényében láthatók. Az illesztett középgörbékét szintén feltüntettük. Az ábra elkészítéséhez a második időszak HJD adatait konstans periódusra transzformáltuk Jurcsik, Clement, Geyer et al. (2001) szerint.

A  $t_{m=11.3}$  adatokból az  $(O - C)_{m=11.3}$  értékeket a következő efemeriszekkel számítottuk:

$$t_{m=11.3pg1} = 2427854.9870 \text{ [HJD]} + P_{pg1} \cdot E_{pg1},$$

$$t_{m=11.3pg2} = 2428953.0176 \text{ [HJD]} + P_{pg20} \cdot E_{pg2} - 7.3 \cdot 10^{-11} \cdot E_{pg2}^2.$$

A 2.10. ábra fénygörbéi változást mutatnak a közepes pulzációs amplitúdóban a két időszak között. A pulzáció amplitúdója növekedett a pg1-ről a pg2 időszakra. Sem a felhasznált fotografikus nyersanyag, sem a megfigyelések kiértékelése nem okozhatja ezt az eltérést, a fénygörbék a közepes pulzációs amplitúdó tényleges változását mutatják. Ez a változás láthatóan egybe esik a pulzációs periódus  $O - C$  diagramon követhető hirtelen növekedésével. Ez az első alkalom, hogy egy RR Lyrae csillag fénygörbéjének pulzációs amplitúdójában változást sikerült kimutatni.

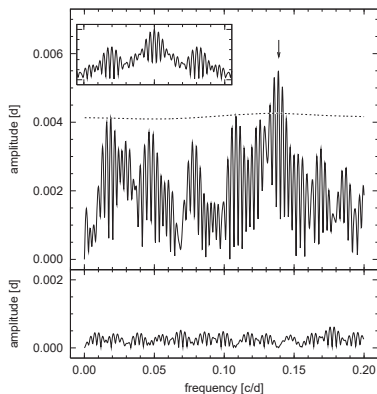


**2.10. ábra.** AZ RR GEM FOTOGRAFIKUS FÉNYGÖRBÉI A PG1 ÉS PG2 IDŐSZAKRA. Folytonos vonalak jelölik az illesztett közép görbét, melyeket 8 harmonikus figyelembevételével számítottunk. Szürke vonal mutatja a másik időszak közép görbét összehasonlítás céljából. A pg2 adatsor időadatait transzformáltuk, hogy az enyhe, folytonos periódusváltozás hatását kiküszöböljük.

### Modulációs viselkedés a pg1 időszakban (JD 2 427 833–2 428 248)

A pg1 fénygörbe felszálló ága erősebb szórást mutat fázis szerint a közép görbe körül, mint a pg2 adatok. Ezt okozhatja a pg1 adatsor folytonos periódusváltozása vagy a felszálló ág fázismodulációja. Mithogy az  $(O-C)_{m=11.3}$  adatok ebben az időszakban kettőnél többször váltanak előjelet, a folytonos periódusváltozás kizárható, a kiszélesedés gyanítható oka a fázismoduláció.

A pg1 adatsor modulációját először a felszálló ág fázis-adatokban vizsgáltuk. Az  $(O-C)_{m=11.3}$  adatsort Fourier-analízisnek vetettük alá. A szóbjárehető modulációs frekvencia tartomány amplitúdóspektrumát a 2.11. ábra felső része mutatja. A spektrum legjelentősebb csúcsa 0.139 c/d-nél található. Az adatsort e frekvenciával fehéritve az ábra alsó felén mutatott reziduál spektrumot kapjuk, ami csupán gyenge zajt tartalmaz. A legjobb szinuszgörbe-illesztés a következő modulációs tulajdonságokat adja:



**2.11. ábra.** A PG1 IDŐSZAK  $(O-C)_{m=11.3}$  ADATSORÁNAK FOURIER-SPEKTRUMA. A panel a bal felső sarokban az ablakfüggvényt mutatja. A pontozott vonal a  $4\sigma$  szignifikancia-szintet jelöli. A 0.1389 c/d csúcsot nyíl jelöli. Alul a reziduál spektrum látható, ami már nem tartalmaz mást, mint gyenge zajt.

$$f_{\text{modpg1}} = 0.1389 \pm 0.0004 \text{ c/d},$$

$$P_{\text{modpg1}} = 7.20 \pm 0.02 \text{ d},$$

$$A_{\text{phmodpg1}} = 0.0094 \pm 0.0004 \text{ d}.$$

Az  $(O-C)_{m=11.3}$  adatok e periódussal feltekerve, az illesztett szinuszgörbével a 2.12. ábra bal felső paneljén láthatók. Az elsőrendű harmonikus illesztés igen alacsony reziduálja meggyőző bizonyítéka a fázismodulációnak. A moduláció periódusa pedig hibahatáron belül megegyezik a CCD adatokban talált amplitúdómoduláció periódusával.

A fotografikus mérések nagy szórása és éjszakáról-éjszakára változó szisztematikus hibája miatt a maximumfényesség-adatok a modulációt csak bizonytalanabban mutatják. Ezek az adatok nem használhatók a modulációs periódus pontosítására, de a felszálló ágra kapott fázismodulációs periódussal feltekerve megbecsülhető belőlük a maximumfényesség modulációjának amplitúdója. A 2.12. ábra bal oldali középső panelje mutatja a maximumfényesség-adatokat a moduláció periódusával feltekerve, az illesztett harmonikus görbével. Az illesztésből kapott eredmények:

$$A_{\text{ampmodpg1}} = 0.19 \pm 0.07 \text{ mag},$$

$$\bar{B}_{\text{pg1 max}} = 10.83 \pm 0.02 \text{ mag}.$$

$\bar{B}_{\text{pg1 max}}$  az átlagos maximumfényességet jelöli. Az, hogy a maximumfényesség-adatok feltételezve a 7.2 napos Blazhko-periódussal, változást mutatnak, megerősíti, hogy az RR Gem ebben az időszakban valóban modulált volt, éspedig a maihoz hasonló periódussal.

### Modulációs viselkedés a pg2 időszakban (JD 2 428 953 – 2 434 457)

A második fotografikus időszak ritka adateloszlása a maximumfényesség-adatoknak és a felszálló ág  $O - C$  adatainak a Fourier-spektrumát értelmezhetetlenné teszik a hamis csúcsok erős jelenléte miatt, és mert a hosszú idő alatt változhattak a moduláció tulajdonságai.

Bár a moduláció tulajdonságai nem határozhatók meg a pg2 adatsorból egyértelműen, a fázis- és amplitúdómoduláció erősségére tudunk becslést tenni. A 2.12. ábra alsó sorában a maximumfényesség-adatok az  $(O - C)_{m=11.3}$  értékek függvényében vannak ábrázolva azokra az egyes megfigyelt pulzációs ciklusokra, amikre mindkét érték meghatározható volt a fénygörbéből. Ezek az ábrák függetlenek a modulációs periódus tényleges értékétől, és bármilyen korreláció a két mennyiség közt arra utal, hogy az adatok szórása nem mérési hibákból vagy irregularis viselkedésből, hanem modulációtól származik. A pg2 időszakra vonatkozó ilyen ábra azt mutatja, hogy valóban ez a helyzet, a két mennyiség egyáltalán nem független egymástól. Az ábráról leolvasva az amplitúdó- és fázismoduláció nagyságát a következő becslés adható:

$$A_{\text{ampmodpg2B}} = 0.14 \text{ mag},$$

$$A_{\text{phmodpg2B}} = 0.003 \text{ d}.$$

Ha feltételezzük, hogy a pg1 és pg2 adatsor hasonló hibával terhelt, és hogy a modulációs amplitúdók és az adatok szórása közel azonos arányban állnak egymással, akkor egy másik becslést is tehetünk a pg2 időszak kétféle modulációjának amplitúdójára a pg1 adatsor alapján. Ennek a számításnak az eredményei a 2.2. táblázatban olvashatók. A mért mennyiségek normál betűkkel, az ezek alapján becsült fázis- és amplitúdómodulációs értékek félkövérrel állnak. Az így meghatározott amplitúdók nagyon jó egyezést mutatnak a 2.12. ábráról leolvasott értékekkel, ami alátámasztja ezek helyességét.

Az átlagos maximumfényesség a pg2 méréseknél

**2.2. táblázat.** A PG2 ADATSOR AMPLITÚDÓ- ÉS FÁZISMODULÁCIÓJÁNAK ERŐSSÉGE. A mért szórás és amplitúdó értékek normál betűkkel szerepelnek, az ezek alapján becült fázis- és amplitúdómoduláció nagyságok félkövérrel olvashatók. A becsléshez feltételeztük, hogy a két fotografikus időszakra számított  $\sigma/A$  arány közel azonos.

adatsor	$\sigma(B_{\max})$ [mag]	$A_{\text{ampmod}}$ [mag]	$\sigma(O-C)_{m=11.3}$ [d]	$A_{\text{phmod}}$ [d]
pg1	0.065	0.19	0.0034	0.0094
pg2	0.052	<b>0.15</b>	0.0011	<b>0.0030</b>

$$\bar{B}_{\text{pg2max}} = 10.71 \pm 0.05 \text{ mag},$$

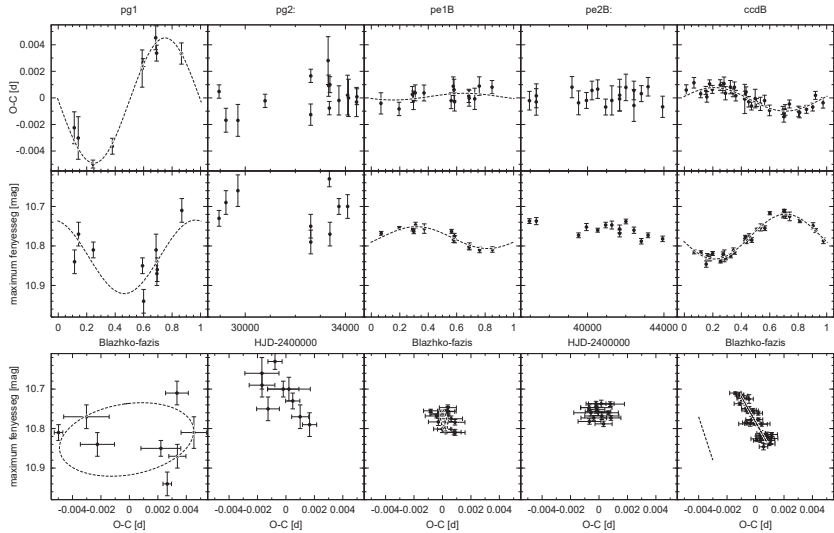
ami  $0.12 \pm 0.07$  magnitúdóval fényesebb mint a pg1 időszakban. Bár a minimum körüli nagy szórás a teljes közepes pulzációs amplitúdó meghatározását még bizonytalanabbá teszi, megállapíthatjuk, hogy a két időszak közt a pulzáció közepes amplitúdója mintegy 0.15–0.25 magnitúdóval növekedett.

Megvizsgáltuk, hogy a közepes pulzációs amplitúdóban talált változás magyarázható-e valamilyen instrumentális effektussal. Ehhez a fotólemezeken kimért minden egyes összehasonlító csillag fényességét is meghatároztuk a változóhoz hasonló módon, a többi összehasonlítóhoz viszonyítva. Az összehasonlítókat így megállapított fényességei nem mutatnak 0.04 magnitúdónál nagyobb szisztematikus eltérést a két időszak között. Következésképp a közepes maximumfényesség 0.12 magnitúdónyi növekedése a két időszak közt valós változás kell, hogy legyen, és minden valószínűség szerint a közepes pulzációs amplitúdó növekedésére utal.

### 2.2.3. A fotoelektromos fénygörbe – 1954–1983

#### Adatok

A fotoelektromos mérések a Konkoly Obszervatórium sváb-hegyi 60 cm-es és a piszkés-tetői 50 cm-es távcsöveivel történtek, kezdetben szűrő nélkül, majd  $B$  és  $V$  színekben. Az utolsó évben, Piskés-tetőről 3 éjszakán  $U$  mérések is történtek. A mérések standard fotoelektromos redukciós eljárással lettek feldolgozva. A differenciális extinkcióra nem történt korrekció, mert az összehasonlító mindössze 8 ívpercre látszik a változótól. Színi extinkcióra sem történt korrekció, mert a változó és az összehasonlító  $B - V$  színindexe maximumban éppen megegyezik.



**2.12. ábra.** AZ RR GEM MODULÁCIÓJÁNAK HOSSZÚTÁVÚ ALAKULÁSA. Minden egyes külön analizált adatsorhoz egy oszlop tartozik az ábrán. A felső sorban a felszálló ág felső részén mért fázismodulációt figyelhetjük meg, a középső sor paneljei a maximummagassággal jellemzett amplitúdómodulációt mutatják. A pg2 és pe2 adatsorok nem voltak alkalmasak az esetlegesen akkor is jelenlévő moduláció periódusának megállapítására, így itt Blazhko-fázis helyett az idő függvényében ábrázoltuk az adatokat. Az alsó sorban az amplitúdó- és fázismoduláció kombinációja látható, vagyis a maximumfényesség a felszálló ág fázisának függvényében, minden olyan pulzációs ciklusra, amelyről mindkét adat rendelkezésünkre áll. Megjegyzendő, hogy ez a diagram nem függ a moduláció tényleges periódusától, ám az itt megfigyelhető korreláció utal a moduláltságra.

A szűrővel készült mérések nemzetközi rendszerbe transzformálása a rendszeresen meghatározott távcsőkonstansok alapján történt.

A szűrő nélküli mérések az Intézet új fotométerének<sup>6</sup> a teszt időszakában készültek, több különböző beállítással. Emiatt ez az adatsor inhomogenitása miatt nem alkalmas a moduláció vizsgálatára, ebből csak maximum-időpontokat határoztunk meg az  $O-C$  diagramhoz.

<sup>6</sup> Ennek a fotométernek a detektorát, egy fotoelektron-sokszorozót Harlow Shapley a Magyarországon folyó változócsillagászati kutatások elismeréseképp ajándékozta Intézetünknek, amit Detre László a zsebében csempészett be az országba, mert az akkoriban tiltott katonai eszköznek minősült.

### Pulzációs viselkedés

A pulzációs periódus JD 2 435 000 és JD 2 445 000 között egyenletesen csökkent. Ezután a csökkenési ráta kb. egy nagyságrenddel növekedett, de az utolsó időszak ritkás mérései miatt a pontos érték nem határozható meg. Az adatok időbeli eloszlása a fotografikus mérésekéhez hasonlóan egyenetlen. Az első 2 szezonból származik a mérések nagyjából fele, míg ezután évi 1–2 éjszakára csökkent a megfigyelések gyakorisága, illetve az utolsó pizskés-tetői mérések előtt évekig szünetelt. Ezért a fotoelektromos méréseket is két időszakra osztjuk. A szűrővel való mérések első két szezonja a 'pe1' jelű időszak (JD 2 436 229–JD 2 436 628), az ezutánani időszakot 'pe2'-vel jelöljük (JD 2 436 956–JD 2 443 931). A periódusváltozás felgyorsulása utáni igen ritka megfigyeléseket kihagytuk a pe2 adatsorból.

A pe1 és pe2 időszak pulzációs periódusa:

$$P_{pe} = P_{pe0} + \dot{P}_{pe} \cdot (t - t_{pe0}) \text{ d,}$$

ahol

$$P_{pe0} = 0.3973148 \pm 2 \cdot 10^{-7} \text{ d, } \dot{P}_{pe0} = -(7.4 \pm 0.2) \cdot 10^{-10} \text{ d/d,}$$

$$\text{valamint } t_{pe0} = 2436229.0 \text{ [HJD].}$$

A periódust és annak változási ütemét a Konkoly fotoelektromos  $t_{m=11.3}$  időadatok alapján határoztuk meg.

Az  $(O-C)_{m=11.3}$  értékeket a pe1 és pe2  $t_{m=11.3}$  időadataiból a következő efemerisz szerint számítottuk:

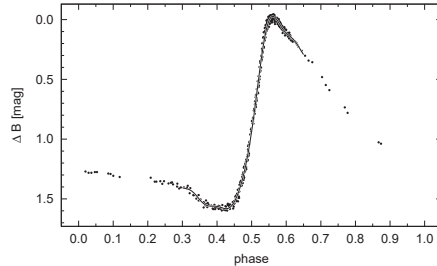
$$t_{m=11.3,pe} = 2436229.0727 \text{ [HJD]} + P_{pe0} \cdot E_{pe} - 1.47 \cdot 10^{-10} \cdot E_{pe}^2.$$

A pe1 időszak  $B$  fénygörbéje az erre az időszakra vett átlagos pulzációs periódussal feltekerve a 2.13. ábrán látható, az illesztett középgörbével együtt, amelynek kiszámításához 13 harmonikust vettünk figyelembe.

### Modulációs viselkedés a pe1 időszakban (JD 2 436 229–2 436 628)

A 2.13. ábrán bemutatott fénygörbe nem mutatja fázismoduláció jelét a felszálló ágon, viszont a maximum környékén mutatott szórás nagyobb, mint a mérési bizonytalanság, ami a maximumfényesség változására utal. A periódusváltozás hatása elhanyagolható a pe1 időszak





**2.13. ábra.** A PE1 IDŐSZAK *B* FÉNYGÖRBÉJE. A fénygörbe alig mutat szórást a középgörbe körül, a moduláció csak alaposabb analízissel mutatható ki. A középgörbét nem ábrázoltuk a leszálló ágon, mert ott a pontok ritkassága miatt az illesztés nem ad értelmes eredményt.

400 napja alatt. A *B* és *V* fénygörbék maximumfényesség-adatainak Fourier-spektrumát mutatja a 2.14. ábra. Mindkét spektrumban két csúcs is van a várt 0.139 c/d frekvenciánál. A mindkét adatsort szimultán legjobban illesztő frekvencia illetve periódus:

$$f_{\text{modpe1}} = 0.1374 \pm 0.0003 \text{ c/d,}$$

$$P_{\text{modpe1}} = 7.28 \pm 0.02 \text{ d.}$$

A távolság e csúcs és a szomszédja között 0.003 c/d, ami a  $-1$  ciklus/év alias távolságának felel meg. Ennek a hamis csúcsnak a frekvenciájával való illesztés lényegesen nagyobb reziduált eredményez. A pe1 időszak *B* és *V* maximumfényesség-adatai a fenti periódussal feltekerve, az illesztett elsőrendű harmonikus görbékkel a 2.15. ábrán láthatók. Az illesztésből meghatározott értékek:

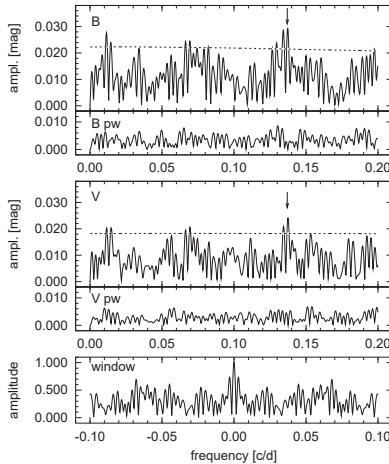
$$A_{\text{ampmodpe1 } B} = 0.054 \pm 0.006 \text{ mag,}$$

$$A_{\text{ampmodpe1 } V} = 0.052 \pm 0.007 \text{ mag,}$$

$$\bar{B}_{\text{pe1 max}} = 10.77 \pm 0.01 \text{ mag,}$$

$$\bar{A}_{\text{pulspe1 } B} = 1.61 \pm 0.02 \text{ mag.}$$

ahol  $\overline{A}_{\text{pulspe1}B}$  a közepes pulzációs amplitúdót jelenti a  $B$  hullámsávban. A moduláció nagysága a kimutathatóság határán van, de a maihoz közeli periódus alátámasztja, hogy az RR Gem ebben az időben is modulált volt, a maihoz hasonló periódussal.



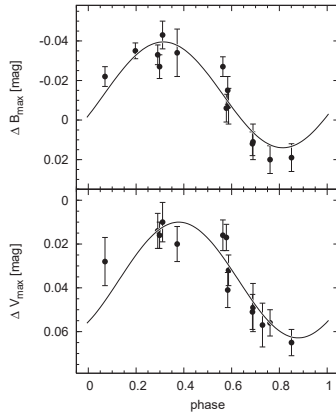
**2.14. ábra.** A PE1  $B$  ÉS  $V$  MAXIMUMOK FOURIER-SPEKTRUMA. Pontozott vonal jelöli a  $4\sigma$  szignifikancia szintet. Nyilak mutatják a  $0.139$  c/d-nél található csúcsokat. A 'pw'-vel jelölt panelek a jelölt csúcsok frekvenciájával való fehérítés utáni spektrumot mutatják, a legalsó panel pedig az ablakfüggvényt tartalmazza, ami a két adatsorra gyakorlatilag megegyezik.

### Modulációs viselkedés a pe2 időszakban (JD 2 436 956–2 445 673)

A hízagos adateloszlás, valamint a pulzációs periódus lassú ám nem jelentéktelen változása a pe2 időszak adatainak értelmezését igen megnehezíti, ezért ezeket az adatokat a pg2 időszakéhoz hasonlóan kezeltük.

A pe2 időszak maximumfényesség-adatainak szórása háromszor nagyobb, mint az egyes adatpontok átlagos szórása. Ez arra utal, hogy ebben az időszakban is történhetett moduláció, ám annak amplitúdója még a pg1 időszakénál is valamivel gyengébb lehetett. Az  $(O-C)_{m=11.3}$  adatok nem mutatják fázismoduláció jelét. A pe1 időszak szórás és modulációs amplitúdó adataiból megbecsült fázis- és amplitúdómoduláció nagysága a 2.3. táblázatban van felsorolva.

A pe2 időszak átlagos  $B$  maximumfényessége



**2.15. ábra.** A PE1  $B$  ÉS  $V$  MAXIMUMOK A 7.28 NAPOS MODULÁCIÓS PERIÓDUS SZERINT FELTEKERVE.

$$\bar{B}_{\text{pe2max}} = 10.76 \pm 0.01 \text{ mag},$$

vagyis hibahatáron belül megegyezik a pe1 időszakéval. A közepes pulzációs amplitúdó szintén nem változott hibahatáron túl a két fotoelektromos időszak között.

**2.3. táblázat.** A PE2 ADATSOR AMPLITÚDÓ- ÉS FÁZISMODULÁCIÓJÁNAK ERŐSSÉGE. A mért szórás és amplitúdó értékek normál betűkkel szerepelnek, az ezek alapján becsült fázis- és amplitúdómoduláció nagyságok félkövérrel olvashatók. A beclséshez feltételeztük, hogy a két fotoelektromos időszakra számított  $\sigma/A$  arány közel azonos.

adatsor	$\sigma(B_{\text{max}})$ [mag]	$A_{\text{ampmod}}$ [mag]	$\sigma(O-C)_{m=11.3}$ [d]	$A_{\text{phmod}}$ [d]
pe1 $B$	0.022	0.05	0.0005	0.0005
pe2 $B$	0.017	<b>0.04</b>	0.0004	<b>0.0004</b>

### 2.2.4. A CCD fénygörbe – 2004–05

A CCD mérések analiziséről a 2.1. pont alatt részletesen szövtünk. A hosszútávú viselkedés tanulmányozása érdekében, hogy a korábbi időszakok fénygörbéivel a CCD mérésekben talált modulációt összehasonlíthassunk, további két vizsgálatot végeztünk el. Meghatároztuk az  $(O - C)_{m=11.3}$  adatokat és a maximumfényesség–maximum-időpont adatokat. A korábban kimutatott 7.211 napos periódussal feltekerve e két mennyiség látható a 2.12. ábra jobb oldali paneljein. Az amplitúdó- és fázismodulációk nagysága, a közepes maximumfényesség és a közepes pulzációs amplitúdó a CCD  $B$  mérésekben:

$$A_{\text{ampmodCCDB}} = 0.114 \pm 0.004 \text{ mag,}$$

$$A_{\text{phmodCCDB}} = 0.0018 \pm 0.0002 \text{ d,}$$

$$\bar{B}_{\text{CCDmax}} = 10.76 \pm 0.01 \text{ mag,}$$

$$\bar{A}_{\text{pulsCCDB}} = 1.62 \pm 0.01 \text{ mag.}$$

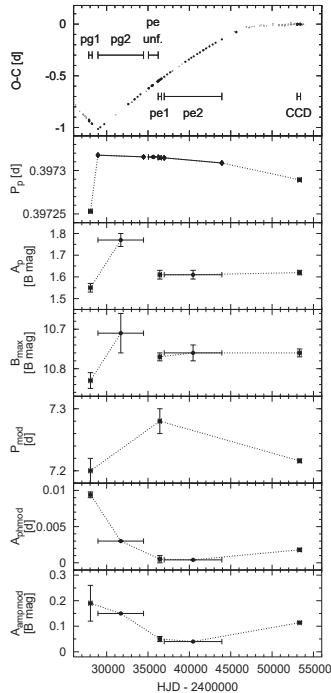
### 2.2.5. A hosszútávú viselkedés áttekintése

Az RR Gem pulzációjában és modulációjában bekövetkezett hosszútávú változások a 2.12. és a 2.16. ábrákon követhetők. A moduláció és pulzáció tanulmányozott időszakokban mutatott tulajdonságait a 2.4. táblázat foglalja össze.

Minden vizsgált paraméter – úgy mint a pulzáció és moduláció periódusa és amplitúdója, a maximumfényesség és az  $(O - C)_{m=11.3}$  adatok fázis-viszonya valamint a közepes maximumfényesség – erősebb változásokat mutat, mint ezeknek az adatoknak a bizonytalansága. Ez arra enged következtetni, hogy a megfigyelt eltérések valódi változásokból adódnak.

#### A modulációs tulajdonságok változásai

A 2.12. ábra a maximumfényesség és az  $(O - C)_{m=11.3}$  modulációját, valamint a közöttük fennálló kapcsolatot mutatja az öt vizsgált időszakra. A felső és középső panelek az  $(O - C)_{m=11.3}$  és a maximumfényesség-adatokat a moduláció periódusával feltekerve mutatják a pg1, pe1 és CCD időszakokra, az illetzett szinuszgörbékkel. Minthogy a pg2 és pe2 időszakokra nem tudunk modulációs periódust meghatározni előnytelen adateloszlásuk miatt, ezek adatai az idő függvényében szerepelnek. Az ábra alsó sorában a két fenti mennyiséget egy-



**2.16. ábra.** AZ RR GEM PULZÁCIÓS ÉS MODULÁCIÓS TULAJDONSÁGAINAK HOSSZÚTÁVÚ VÁLTOZÁSA. A grafikonok fentről lefelé az  $(O - C)_{\max}$ , a pulzációs periódus, a közepes  $B$  pulzációs amplitúdó, a közepes  $B$  maximumfényesség, a modulációs periódus, a fázismoduláció-amplitúdó és a maximumfényesség modulációs amplitúdójának változásait ábrázolják.

más függvényében ábrázoltam minden olyan megfigyelt pulzációs ciklusra, amelyre mindkét mennyiség meghatározható volt. Az alsó sor grafikonjai függetlenek a moduláció periódusától, és az amplitúdó- és fázismoduláció fázisviszonyát tükrözik. Az itt berajzolt ellipszisek a felső paneleken látható szinuszgörbék kombinációi.

Nem könnyű egzakt módon különbséget tenni RR Lyrae csillagok amplitúdó- és fázismo-

**2.4. táblázat.** AZ RR GEM MODULÁCIÓJÁNAK ÉS PULZÁCIÓJÁNAK TULAJDONSÁGAI A VIZSGÁLT IDŐSZAKOKBAN. A zárójelekben megadott hiba az utolsó helyiértékre vonatkozik és az  $1\sigma$  bizonytalanságot jelöli.

időszak	$P_{\text{puls}}$ [d]	$P_{\text{mod}}$ [d]	$A_{\text{puls}}$ [mag]	$\overline{B}_{\text{max}}^a$ [mag]	$A_{\text{phmod}}$ [d]	$A_{\text{ampmod}}$ [mag]	$\Delta$ fázis <sup>b</sup> [rad]
pg1	0.397253(5)	7.20(2)	1.55(2)	10.83(2)	0.0094(4)	0.19(7)	-1.8(3)
pg2	0.397317(2) <sup>c</sup>	-	1.77(3)	10.71(5)	0.003	0.15	0.6(7)
pe unf.	0.3973156(35)	-	-	-	-	-	-
pe1 <i>B</i>	0.3973148(2)	7.28(2)	1.61(2)	10.77(1)	0.0005(4)	0.05(1)	-
pe2 <i>B</i>	0.3973160(2) <sup>c</sup>	-	1.61(2)	10.76(2)	0.0004	0.04	-
CCD <i>B</i>	0.3972893(3)	7.211(1)	1.62(1)	10.76(1)	0.0018(2)	0.114(4)	0.0(1)

<sup>a</sup> A közepes maximumfényesség-értékek hibáit kétféle módon számítottuk. Amikor a moduláció periódusa azonosítható volt (pg1, pe1, CCD), azokban az esetekben a maximumfényesség–maximum-időpont adatokra illesztett szinuszgörbe nullponti hibáját adjuk meg. A maradék 2 időszaka (pg2, pe2) a maximumfényességek szórását adjuk meg, bár ezzel túlbecsüljük a tényleges bizonytalanságot, amennyiben ezeknek a pontoknak az eltérése részben modulációból adódik.

<sup>b</sup>  $\Delta$  fázis a maximumfényesség és az  $(O-C)_{m=11.3}$  modulációs változásai közti fáziseltérést jelöli.

<sup>c</sup> Minthogy a pulzáció periódusa kissé változott a pg2 és pe2 időszakok folyamán, itt az időszak közepére számított értéket adjuk meg.

dulációja között, mert a fénygörbe alakja (a Fourier-komponensek relatív amplitúdói és epocha-független fáziskülönbségei) valamelyest mindig változnak a Blazhko-ciklus során (lásd 2.1.3. rész). Még ha a felszálló ág közepe csomópont is a moduláció során – mint az RR Gem esetében –, a maximumfényesség fázisa enyhe modulációt mutat. Ezért probléma, hogy miképp mérjük a fázismoduláció nagyságát. Az  $(O-C)_{m=11.3}$  adatok az amplitúdómoduláció miatt a felszálló ág meredekségében bekövetkező változás miatt akkor is mutatnának enyhe fázismodulációt, ha amúgy a fénygörbealak modulációs változása tisztán amplitúdóban történő skálázással leírható volna. Összehasonlításképp a 2.12. ábra jobb alsó paneljén szaggatott vonal jelzi, milyen meredekségű összefüggés ered a CCD középgörbéből származtatott teszt-adatsorra tiszta amplitúdómoduláció esetén az itt ábrázolt két mennyiségre. Ha a tényleges összefüggés ennél kevésbé meredek, az fázismoduláció jelenlétére utal. A fotoelektronos mérésekből  $(O-C)_{m=11.3}$  moduláció nem volt kimutatható, a többi esetben mindig nagyobb e mennyiség modulációja, mint

az tiszta amplitúdómoduláció esetén várható.

A 2.12. ábra alsó paneljeinek tanúsága szerint az RR Gem modulációs tulajdonságaiban jelentős változások történtek a vizsgált 70 év során. A legjelentősebb változás a moduláció természetében JD 2 428 800 környékén, a  $pg1$  és  $pg2$  időszakok közt történt, a pulzációs periódus hirtelen megváltozásával együtt. Ez előtt az esemény előtt igen erős amplitúdó- és fázismoduláció volt megfigyelhető. A hirtelen pulzációs periódus ugrás után a moduláció jellege, a kétféle moduláció fázisviszonya megváltozott. Innentől bár a moduláció amplitúdója napjainkig tovább erős változásokat szenvedett, ez a fázisviszony nem változott kimutathatóan.

A 2.16. ábrán megfigyelhetjük, hogy az  $(O - C)_{m=11.3}$  és a maximumfényesség modulációjának erősségei változnak egymással leginkább szinkronban. A korrelált változás arra utal, hogy a moduláció „összintenzitása” jelentősen változott a 70 év során. Az RR Gem mellett csupán néhány RR Lyrae csillagról van olyan hosszú időszakot átfogó adatsor, amelyben a moduláció változása nyomonkövethető. A legtöbbet tanulmányozott közülük maga az RR Lyr, ami 4 éves időskálájú ciklikus változást mutat a modulációban (Szeidl, 1976). További vizsgálatok foglalkoztak az XZ Cyg (LaCluyzé, Smith, Gill et al., 2004), AR Her (Almár, 1961), AH Cam (Smith, Barnett, Silbermann et al., 1999), és RW Dra (Balázs & Detre, 1962) változókkal, amelyeknél szintén egyértelmű jelek utalnak a moduláció jellegének erős változásaira, ám részletes hosszútávú vizsgálat róluk nem látott napvilágot.

### A pulzációs tulajdonságok változásai

Ennek a hosszútávú vizsgálatnak az egyik legfontosabb és legmeglepőbb eredménye, hogy határozott változást találtunk a közepes maximumfényességben és a közepes pulzációs amplitúdóban, amely a fotografikus mérések közben történt. A kimutatott 0.12 magnitúdónyi változás az átlagos maximumfényességben jóval meghaladja a hibahatárok által megengedett 0.05 magnitúdót, vagyis a változás valódi. Megjegyezzük, hogy időközben a sváb-hegyi megfigyeléseink során egy másik Blazhko-csillagnál, az RY Comae-nél is hasonló változást találtunk, ami folyamatos CCD megfigyeléseink közben zajlott le, így még jobban dokumentált, mint az RR Gem esetében.

A  $pg2$  és  $pe1$  adatsor közt is megfigyelhető változás a pulzáció amplitúdójában a 2.16. ábra szerint, ám a némileg eltérő fotometriai rendszer miatt ennek a változásnak a valódisága bizonytalan.

A Dziembowski & Mizerski (2004) által a Blazhko-moduláció magyarázatára kidolgozott elmélet energiátranzportot feltételez a radiális fundamentális módus és egy nemradiális módus

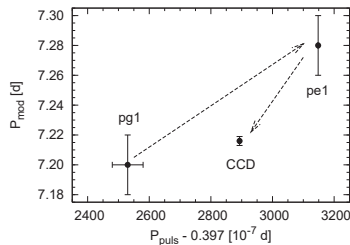
közt. Ennek megfelelően azt prediktálja, hogy nagyobb modulációs amplitúdó kisebb pulzációs amplitúdóval jár együtt. Az RR Gem legerősebben modulált időszakában (pg1) a pulzáció amplitúdója mintegy 0.1 magnitúdóval kisebb volt, mint később bármikor, ami egybevág Dziembowski & Mizerski (2004) előrejelzésével.

### A pulzációs és modulációs tulajdonságok közti kapcsolat

A pulzációs és modulációs periódusváltozások pozitív korrelációra utalnak, ahogy a 2.17. ábráról leolvasható, bár csupán 3 időszak adatai állnak rendelkezésünkre. Az adatokra illesztett egyenes meredeksége

$$dP_{\text{mod}}/dP_{\text{puls}} = (1.6 \pm 0.8) \cdot 10^3.$$

Néhány más Blazhko-csillagokról LaCluyzé, Smith, Gill et al. (2004) publikált ilyen adatokat.



**2.17. ábra.** AZ RR GEM PULZÁCIÓS ÉS MODULÁCIÓS PERIÓDUSÁNAK HOSSZÚTÁVÚ VÁLTOZÁSAI.

Korábban megmutattuk, hogy a legnagyobb lehetséges modulációs amplitúdó függ az RRab csillag pulzációs frekvenciájától (Jurcsik, Sódor & Váradi, 2005a). Egy bizonyos pulzációs frekvenciánál azonban a moduláció erőssége 0 és e felső határ közt bármekkora lehet.

A moduláció „instabilitása” minden bizonnyal általános tulajdonsága a Blazhko-csillagoknak, ezért bármilyen Blazhko-modellnek képesnek kellene lenni ennek az irregularitásnak a magyarázatára.

Hogy a moduláció tulajdonságai (amplitúdó, fázisviszony az amplitúdó- és fázismoduláció közt stb.) mit mondanak a jelenség fizikájáról, ha ilyen változásokat képesek produkálni, az jelenleg tisztázatlan. A fotoelektromos mérések idején az RR Gem alig mutatott modulációt. Ez arra figyelmeztet bennünket, hogy a moduláció nem mindig mutatható ki, lehetnek olyan



Blazhko-csillagok, amelyek épp nem mutatnak modulációt. Lehetséges, hogy a moduláció minden RR Lyrae csillag általános tulajdonsága.

### 2.2.6. Az RR Gem pulzációs és modulációs változásainak összefoglalása

Az RR Gem az első Blazhko-csillag, amelynél a pulzáció amplitúdójának határozott változása kimutatható. Egyértelmű pulzációsamplitúdó-ugrás történt 1937-ben, JD 2 428 800 körül, ami még a fotografikus mérések viszonylag gyengébb pontossága mellett is kimutatható. A pulzációs amplitúdó megváltozása egybeesik a pulzáció periódusának ugrásszerű növekedésével. Az  $O-C$  diagram tanúsága szerint ez a változás igen rövid időskálán ment végbe. Magát a változást nem sikerült megfigyelni, de a megfigyelésekből számított  $O-C$  adatoknak a kérdéses időszak körüli futása felső határt szab a változás időtartamára. Így arra következtethetünk, hogy az egész változás legfeljebb 100–200 nap alatt lezajlott. A periódusváltozás relatív mértéke  $\Delta P/P = 1.6 \cdot 10^{-4}$ , ami bár nem egyedülálló, de rendkívül nagy változásnak számít, különösen ilyen rövid idő alatt.

Ezt az ugrást megelőzően erős amplitúdó- és fázismoduláció is kimutatható volt a fotografikus megfigyelésekből. A maximumfényesség kb. 0.2 magnitúdóval modulált volt, a felszáláló ág fázisa pedig 14 perces modulációs amplitúdót mutatott. A periódus hirtelen növekedése után a moduláció gyengült, a pulzációs amplitúdó nőtt. Az 1958–59-es fotoelektromos mérések egyértelmű ám gyenge amplitúdómodulációt mutatnak, valamivel hosszabb modulációs periódussal. A 2004–05-ös CCD adatok 0.1 magnitúdós maximumfényesség-modulációt mutatnak  $B$  sávban, nagyon gyenge fázismodulációval.

RR Lyrae csillagoknál ismertek ciklikusan változó modulációs tulajdonságok, pl. az RR Lyr (Szeidl, 1976) és az XZ Dra (Jurcsik, Benkő & Szeidl, 2002b) esetében. Ha az RR Gem is ilyen ciklikussággal rendelkezik, mely évszázados időskálájú lehet, akkor a jövőben a pulzációs periódus csökkenésére és a moduláció erősödésére lehet számítani, amit az 1937-eshez hasonló ugrásszerű változás követhet. Ha ez történe a jövőben, az kivételes lehetőséget biztosítana a pulzációs és modulációs tulajdonságok részletes vizsgálatára az 1937-es fotografikusnál sokkal pontosabb mérési technikával. Az RR Gem egy hetes modulációs periódusa mellett könnyű a csillag Blazhko-viselkedésének rendszeres figyelemmel kísérése.



## 3. fejezet

# Fénygörbe-moduláció további Blazhko-csillagoknál

Az RR Gem mellett eddig négy, a Konkoly Blazhko Survey során megfigyelt modulált RRab csillagról publikáltuk analízisünk eredményeit (SS Cnc: Juresik, Szeidl, Sódor et al. 2006; UZ UMa: Sódor, Vida, Juresik et al. 2006; MW Lyr: Juresik, Sódor, Hurta et al. 2008a; DM Cyg: Juresik, Hurta, Sódor et al. 2009). Az első három csillagról kapott eredményeket foglalom össze ebben a fejezetben, illetve az MW Lyr-ről és DM Cyg-ről a következő fejezetben is szólok.

Előbb azonban még egy rövidebb lélegzetvételű munkánkat ismertetem, mely során felülvizsgáltuk a korábban Blazhko-moduláltnak nyilvánított RR Lyrae csillagokat, vajon tényleg mutatnak-e modulációt (Sódor & Juresik, 2005). Ezek az eredményeink ugyanis szerepet játszottak később a Konkoly Blazhko Survey célobjektumainak kiválasztásában.

### 3.1. Az ismert Blazhko-csillagok felülvizsgálata

A Blazhko-modulált RR Lyrae csillagokról elsőként Szeidl (1988) tett közzé összefoglaló listát, amit Smith (1995) kiegészített. E csillagok többségéről azonban csak vizuális, esetleg fotografikus fotometria vagy  $O - C$  adatok alapján állapították meg a moduláció tényét és periódusát. Az RR Gem-ről korábban közzétett 37–42 napos modulációs periódusokkal szemben mi ugyanazokból a fotografikus megfigyelésekből 7.2 napos Blazhko-periódust találtunk, ami gyanakvásra adhat okot a többi fotografikus és vizuális Blazhko-megfigyeléssel szemben is.

A ma már rendelkezésünkre álló számítógépes adatelemzési technikák, mint pl. a Fourier-

analízis, lehetővé teszik azoknak az eredeti adatsoroknak az újraelemzését, amelyek alapján ezeket az RR Lyrae csillagokat moduláltak nyilvánították – amennyiben ezek hozzáférhetőek. Így ellenőrizhetjük a Blazhko-periódus helyességét, illetve a moduláció meglétét is. Az északi illetve déli égboltot lefedő NSVS<sup>1</sup> és ASAS<sup>2</sup> fotometriai felmérési programok adatbázisai sok RR Lyrae csillagról tartalmaznak néhány század magnitúdó pontosságú, 200–500 adatpontból álló fénygörbéket. Ezek az adatsorok is lehetővé teszik a korábban publikált moduláció jelenlétének ellenőrzését.

Ugyanakkor szem előtt kell tartanunk, hogy a felhasznált mérési adatok bizonytalansága illetve eltérő idejük miatt bizonyosan sosem állíthatjuk, hogy egy vizsgált RR Lyrae csillag nem modulált, csak felső határt adhatunk az esetleges moduláció maximális mértékére egy bizonyos megfigyelési időszakra. Épp az RR Gem jelenlegi gyenge modulációja figyelmeztet bennünket arra, hogy sok olyan gyengén modulált RR Lyrae csillag lehet, melyekről az eddigi vizsgálatok pontossága nem volt képes kimutatni a Blazhko-effektust. Azt is az RR Gem példája mutatta meg, hogy a moduláció erőssége és jellege időben változhat, így a későbbi adatok egy RR Lyrae csillag korábban megfigyelt modulációját nem cáfolhatják egyértelműen, mivel lehetséges, hogy maga a moduláció változott időközben.

A Smith (1995) listáján szereplő 46 Blazhko-csillag közül összesen tíz, az alábbiakban felsorolt RRab csillagról állapítottuk meg, hogy a korábban publikált modulációs periódus nem mutatható ki a jelenleg rendelkezésre álló adatokban. Ezeknél a csillagoknál további vizsgálatokig a moduláció periódusát, illetve egyes esetekben magának a modulációnak a tényét is bizonytalannak kell tekintenünk.

**MW Lyr** ♦ Csak két korábbi (fotografikus és vizuális) fénygörbét publikáltak erről a csillagról. Mandel (1970) vizuális megfigyelései alapján 33.3 nap modulációs periódust közölt, amit a mi elemzésünk is megerősített, ám a fénygörbe alakja igen különös, még egy Blazhko-csillaghoz képest is (lásd Mandel 1970, 5. ábra). A megfigyelések többsége normál pulzációs amplitúdót mutat, míg néhány éjszakán ehhez képest irreálisan nagy, mintegy háromszoros amplitúdót figyelhetünk meg, látszólag minden átmeneti fázis nélkül. Gessner (1966) korábbi fotografikus mérései 7 maximumot tartalmaznak Mandel (1970) 33.3 napos periódusának különböző fázisaiból, ám a fénygörbe-modulációnak ebben az adatsorban nyoma sincs. Az NSVS adatbázis valamiért nem tartalmaz adatot az MW Lyr-ről.

<sup>1</sup> <http://skydot.lanl.gov/nsvs/nsvs.php>

<sup>2</sup> <http://archive.princeton.edu/asas/>

Az MW Lyr-t a későbbiekben vizsgáltuk a Konkoly Blazhko Survey során, az eredményekről ebben és a következő fejezetben számolok be.

**DM Cyg** ♦ Lysova & Firmanjuk (1980) 29 maximum vizuális megfigyelése alapján 26 napos fázismodulációt találtak. Bár Fourier-analízissel valóban találunk ilyen periódusú jelet a közölt adatokban, az azokra illeszthető 0.006 nap amplitúdójú változás (kb. 10 perc) a vizuális megfigyelések pontosságához viszonyítva gyanúsán kicsi. Az NSVS adatok a hibahatáron belül nem mutatnak modulációt, sem az idő-, sem a frekvenciatartományban. A GEOS<sup>3</sup> adatbázis 206 *O – C* adatot tartalmaz erről a csillagról, melyek alapvetően egyenletes periódusváltozást mutatnak. Ennek a trendnek a levonása után a reziduál nem mutatja a Lysova & Firmanjuk (1980) által publikált periodicitást.

A DM Cyg-et a későbbiekben vizsgáltuk a Konkoly Blazhko Survey során, az eredményekről a következő fejezetben számolok be.

**TU Com** ♦ A moduláció tényét és periódusát Ureche (1965) fotografikus megfigyelések alapján publikálta. Bár a fotografikus adatok valóban fénygörbealak-változásokra utalnak, a Fourier-analízis nem támasztja alá a 75 napos periodicitást, igaz, más periódus sem állapítható meg egyértelműen az adatokból. Az eltérő fénygörbealakok szisztematikus mérési hibákból is eredhetnek. Schmidt & Seth (1996) is közölt CCD fénygörbét a csillagról, mely a pulzáció szerint feltekerve némileg hiányos lefedettségű, ám az adatok nem utalnak modulációra. Az NSVS adatok szintén nem mutatják moduláció jelét, igaz ennél a viszonylag halvány csillagnál elég nagy a fénygörbe szórása.

**SW Boo** ♦ Baldwin (AAVSO) publikálatlan vizuális megfigyelései alapján Taylor (1977) állapított meg Blazhko-modulációt ennél a csillagnál. A közölt fénygörbeváltozás szokatlanul nagy, 0.7–2.6 mag között változó amplitúdóval, melynek periódusa 13 nap. Az NSVS adatok egyértelműen cáfolják egy ilyen erős moduláció jelenlétét, minthogy modulációnak semmi jelét nem mutatják. Husar (2004) CCD megfigyelései szintén ellentmondanak a nagy amplitúdójú modulációnak.

**V434 Her** ♦ Erről a csillagról Hoffmeister (1960) 35 maximum-időpont adatot publikált, közülük 19 vizuális, 16 fotografikus. Ezen adatok alapján Rozhavski (1964) 26.1 napos fázismo-

<sup>3</sup> [http://rr-lyr.ast.obs-mip.fr/dbrr/dbrr-V1.0\\_0.php](http://rr-lyr.ast.obs-mip.fr/dbrr/dbrr-V1.0_0.php)

dulációt talált 0.06 nap amplitúdóval. A Fourier-analízis nem mutat szignifikáns periodicitást az eredeti  $O - C$  adatokban sem együtt, sem a vizuális és fotografikus adatokban külön-külön. Az NSVS mérései túl nagy hibával terheltek, hogy belőlük bármilyen következtetést levonhassunk.

**SW Psc** ♦ Ureche (1971) 34.5 napos fázismodulációt publikált 0.013 nap amplitúdóval, 15 fotografikus maximum megfigyelése alapján. Az eredeti adatok Fourier-analízise valóban mutatja ezt a periodicitást. A korábbi  $O - C$  adatok túlságosan ritkások, és nem mutatnak szignifikáns periodicitást, csak zajt. Az NSVS fénygörbe nem mutat modulációt ezzel a periódussal.

**V788 Oph és V829 Oph** ♦ Ezeket a változókat Mandel (1969) vizuálisan és fotografikusan észlelte, de csak a vizuális adatok lettek publikálva. Ezek az adatok valóban mutatják moduláció jeleit, ám a Fourier-analízis nem igazolja a Mandel által publikált periódusokat (115 nap a V788 Oph esetében és 165 nap a V829 Oph-nál). A megfigyelt fénygörbe maximumok túl kevesen vannak a modulációs periódus egyértelmű megállapításához. A két csillag halványasága miatt az NSVS zajos fénygörbéi alapján a modulációt sem megerősíteni, sem cáfolni nem lehet.

**AD UMa** ♦ Hoffmeister (1958) vizuális megfigyeléseiből 35–41 napos periódusú maximumfényesség-modulációt publikált, melynek amplitúdója 0.25 mag. Az eredeti adatsor nem hozzáférhető, csak két feltekert fénygörbe lett publikálva, melyek a legkisebb és legnagyobb pulzációs amplitúdóra vonatkoznak (Hoffmeister, 1958, 2. és 3. ábra). Tekintve, hogy a csillag mindössze 15 magnitúdó fényes maximumban, a 0.25 mag modulációs amplitúdó a vizuális mérések szokásos bizonytalansága mellett megkérdőjelezhető. NSVS adat nem érhető el a csillagról, bizonyára kis fényessége miatt.

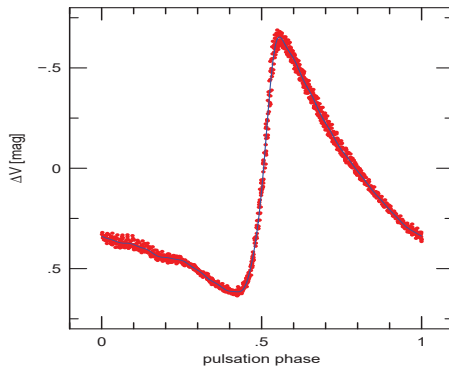
**WY Dra** ♦ Chis, Chis & Mihoc (1975) találta moduláltak ezt a csillagot. A publikáció 24.3 napos periódusú fénygörbealak-változásokról és a maximumfényesség 0.6 magnitúdós változásáról számol be. Az  $O - C$  és maximumfényesség adatok Fourier-analízise nem utal e periodicitás jelenlétére. Az NSVS adatok nem mutatnak változást a maximumfényességben a hibahatáron túl, ami messze kevesebb 0.6 magnitúdónál.

## 3.2. SS Cancri

Az SS Cnc-t 2005 tavaszán mértük a sváb-hegyi 60 cm-es távcsővel. A méréseink kimutatták, hogy ez az RRab csillag a ma ismert legrövidebb Blazhko-periódussal, 5.3 nappal modulált. Ezeket az eredményeinket a Jurešik, Szeidl, Sódor et al. (2006) cikkünkben tettük közzé.

### 3.2.1. Adatok

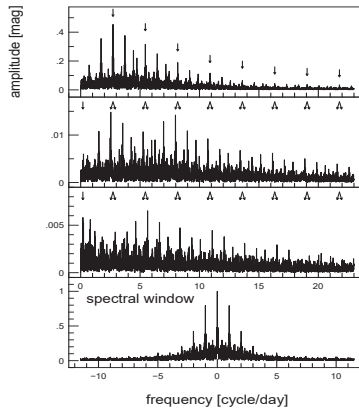
A CCD mérések  $BVR_CI_C$  színekben történtek, 35 éjszakáról színenként kb. 1500 adatpontot gyűjtöttünk. Összehasonlítóként három állandó csillag (GSC 01927-00504, GSC 01927-00744 és GSC 01927-00835) fényességének átlagát használtuk a relatív fotometriához. Ezeknek a csillagoknak az egymáshoz viszonyított fényessége 0.008–0.009 mag szórással stabil mind a négy sávban.



3.1. ábra. AZ SS CNC  $V$  FÉNYGÖRBÉJE A PULZÁCIÓ FÁZISA SZERINT.

### 3.2.2. Pulzáció és moduláció

A pulzációs periódussal feltekert fénygörbe a 3.1. ábrán a mérési pontatlanságnál nagyobb szórást mutat. A pulzációs frekvencia 25 harmonikusával történő illesztés reziduálja 0.028, 0.022, 0.017 és 0.014 mag  $B$ ,  $V$ ,  $R_C$  és  $I_C$  színekben.



**3.2. ábra.** AZ SS CNC FOURIER-SPEKTRUMA. Felül az eredeti  $V$  fénygörbe amplitúdóspektrumát láthatjuk, melyen a pulzációs komponensek csúcsait megjelöltük ( $kf_0$ ). Ezek eltávolítása után kapjuk a 2. panel reziduál spektrumát. Az itt látható csúcsok a rövid frekvenciás modulációs komponensek ( $kf_0 - f_m$ ). Ezek eltávolítása után láthatóvá válnak a másik, jobb oldali modulációs komponensek is ( $kf_0 + f_m$ ) a 3. panelen. A 2. és 3. panelen a modulációs komponenseket megjelöltük. A 4. panelen az ablakfüggvényt ábráztoltuk.

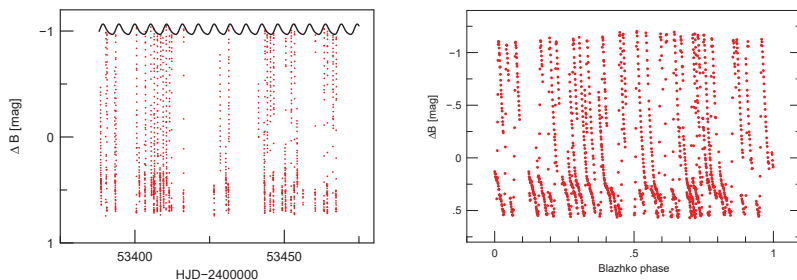
Az eredeti  $V$  fénygörbe Fourier-spektrumát a 3.2. ábra felső paneljén láthatjuk. Az első 25 pulzációs harmonikkal fehérített spektrumot ábrázolja a következő panel. Ebben az amplitúdóspektrumban a pulzációs frekvenciáktól balra azonos távolságokra lévő csúcsokat láthatunk, ezek modulációs csúcsok ( $kf_0 - f_m$ ). Ha ezeket a komponenseket is eltávolítjuk a fénygörbéből illetve a spektrumból, a 3.1. ábra 3. paneljén bemutatott spektrumot kapjuk, melyben láthatóvá válnak a jobb oldali modulációs csúcsok ( $kf_0 + f_m$ ). A spektrumban található tripletek erősen aszimmetrikusak, a kisebb frekvenciás modulációs komponensek ( $kf_0 - f_m$ ) sokkal nagyobb amplitúdójúak mint a nagyobb frekvenciájúak ( $kf_0 + f_m$ ). A modulációs frekvencia illetve periódus, aminek megfelelő modulációs komponensekkel a fénygörbe legjobban illeszthető:

$$f_m = 0.18835 \text{ c/d}; P_m = 5.309 \text{ d.}$$

Ez az eddig ismert legrövidebb modulációs periódusú mező RR Lyrae csillag.

A  $V$  fénygörbét a HJD illetve a moduláció fázisának függvényében ábráztoltuk a 3.3. ábrán. A moduláció amplitúdója igen kicsi; kisebb mint 0.1 mag a maximumfényesség változása a Blazhko-ciklus során.





**3.3. ábra.** AZ SS Cnc *B* FÉNYGÖRBÉJÉNEK MODULÁCIÓJA. Baloldalt az idő függvényében ábrázoltuk a mérési pontjainkat a maximum fényességének változását mutató folytonos vonallal, jobb oldalon pedig az 5.309 napos moduláció fázisának függvényében láthatók ugyanezek az adatok.

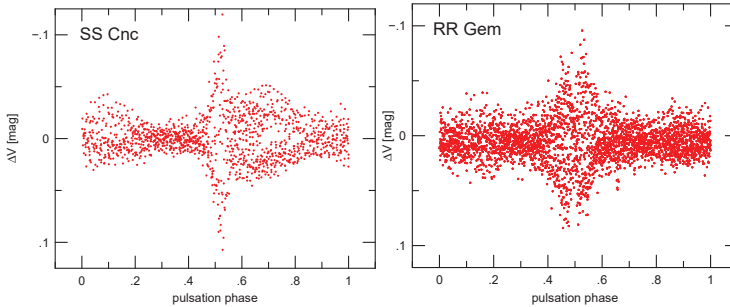
### 3.2.3. Az SS Cnc és az RR Gem modulációjának összehasonlítása

Az SS Cnc modulációja sok tekintetben hasonló az RR Gem előző fejezetben bemutatott 2005/06-os modulációjához, de néhány fontos különbséget is láthatunk. Mindkét csillag kis amplitúdóval, rövid periódussal modulált, ám míg az RR Gem szinte tisztán amplitúdómodulációt mutat, az SS Cnc-nél ezen felül a felszálló ág fázisa is modulált, amit a fénygörbe e szakaszán a mérési pontok vonalának kiszélesedéseként a 3.1. ábrán is megfigyelhetünk.

A 3.4. ábrán az SS Cnc reziduál fénygörbéjét láthatjuk a pulzáció levonása után, a pulzációs fázis függvényében. Összehasonlításképp mellé tettem az RR Gem hasonló ábráját (ez megegyezik a korábbi 2.2. ábrával). A két reziduál nem mutat sok hasonlóságot. Az SS Cnc reziduáljának a felszálló ágon a legnagyobb az amplitúdója, mert itt a meredekség miatt kis fázismoduláció is nagy eltérést tud okozni a középgörbéhez képest. Az RR Gem-nél megfigyelhető szimmetriának itt nyoma sincs. Míg az RR Gem-nek csak a maximuma és minimuma modulált (a 0.45 és 0.55 fázisok szűk környezetében), addig az SS Cnc a felszálló ági fázismoduláción túl a leszálló ágon szinte végig modulációt mutat, csupán a leszálló ág legalján, a 0.2–0.4 fázisstartományban figyelhetünk meg stabilitást.

Az SS Cnc adatsort Blazhko-fázis szerint 10 részre tudjuk bontani úgy, hogy az adatok egy kivételével mind a 10 fázisban lefedik a pulzációt. A hiányzó leszálló ági 0.2 fázisstartományt a szomszédos Blazhko-fázisokból interpolációval pótoltuk.

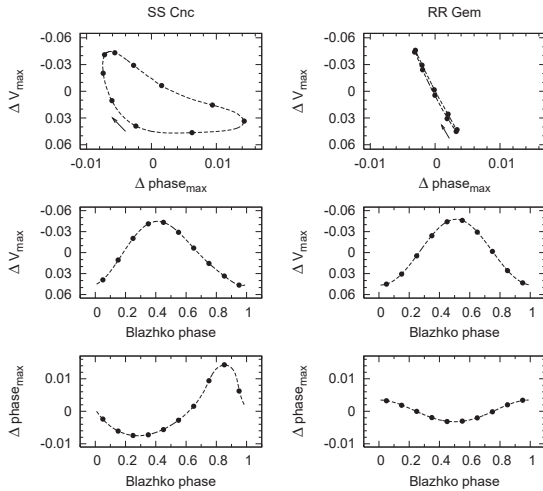
A maximumok magnitúdóját és pulzációs fázisát ábrázoltam a Blazhko-fázis, illetve egy-



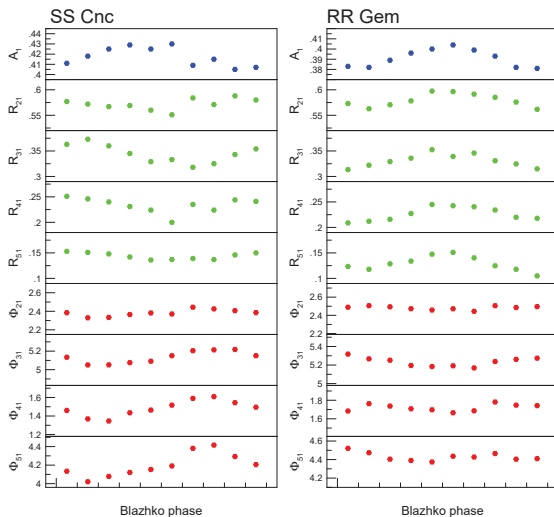
**3.4. ábra.** AZ SS CNC ÉS RR GEM  $V$  REZIDUÁL FÉNYGÖRBÉJE A PULZÁCIÓ LEVONÁSA UTÁN. AZ SS Cnc reziduáljának 0.5 fázis környékén, a felszálló ágon a legnagyobb az amplitúdója, ami a felszálló ág fázisának modulációját mutatja, szemben az RR Gem-mel, aminek a reziduáljában itt fixpont van. Míg az RR Gem-nek csak a maximuma és minimuma modulált (a 0.45 és 0.55 fázisok szűk környezetében), addig az SS Cnc a felszálló ági fázismoduláción túl a leszálló ágon szinte végig modulációt mutat, csupán a leszálló ág legalján, a 0.2–0.4 fázisstartományban figyelhetünk meg stabilitást. A jobb oldali panel lényegében megegyezik a 2.2. ábrával, itt az egyszerűbb összehasonlíthatóság érdekében ismétlem csak meg.

más függvényében a 3.5. ábrán. Ez a tojásgörbének nevezett hurok a moduláció jellegét mutatja. Láthatjuk, hogy míg az RR Gem esetében az amplitúdómoduláció dominál, az SS Cnc-nél jelentős fázismoduláció is megfigyelhető.

A 10 Blazhko-fázis pulzációs görbéinek Fourier-paramétereit a 3.6. ábra hasonlítja össze az RR Gem megfelelő adataival (utóbbiakat a 2.7. ábrán már bemutattam). Az RR Gem gyakorlatilag csak az amplitúdóarányokban ( $R_{k1}$ ) mutat Blazhko-fázis függést, míg az SS Cnc-nél emellett az epochafüggetlen fáziskülönbségek ( $\phi_{k1}$ ) is függenek a moduláció fázisától, összhangban a csillag fázismodulációjával.



**3.5. ábra.** AZ SS CNC ÉS RR GEM TOJÁSGÖRBÉI ÉS ANNAK KOMPONENSEI. A felső paneleken a maximumok magnitúdóját a pulzációs fázisuk függvényében ábrázoltam. A középső panelek a maximumok fényességét, az alsók pedig a maximumok fázisát mutatják a Blazhko-fázis függvényében. Ezeket a görbékét a két csillag matematikai fénygörbe-megoldásai alapján készítettem, így nem mutatják a tényleges mérések szórását.



**3.6. ábra.** AZ SS CNC ÉS RR GEM PULZÁCIÓS GÖRBÉINEK FOURIER-PARAMÉTEREI 10 BLAZHKO-FÁZISBAN. AZ RR Gem gyakorlatilag csak az amplitúdóarányokban ( $R_{k1}$ ) mutat Blazhko-fázis függést, míg az SS Cnc-nél emellett az epochafüggetlen fáziskülönbségek ( $\varphi_{k1}$ ) is függenek a moduláció fázisától, összhangban a csillag fázismodulációjával. A jobb oldali panel tartalmilag megegyezik a 2.7. ábrával, itt az egyszerűbb összehasonlíthatóság érdekében ismétlem csak meg.

### 3.3. UZ Ursae Maioris

Az UZ UMa RRab csillagot 2006-ban a Konkoly Blazhko Survey keretében figyeltük meg. Ennek a csillagnak a változását Baker (1938) fedezte fel Kapteyn fotólemezein, ám ő még irreguláris vagy szemireguláris változónak klasszifikálta. A változó helyes típusát és periódusát Meinunger (1968) adta meg.

Az itt ismertetett eredményeinket a Sódor, Vida, Jurcsik et al. (2006) cikkünkben publikáltuk.

#### 3.3.1. Mérési adatok

A mérések technikai okokból csak egy színben,  $V$  szűrővel történtek, összesen 1584 adatpontunk van 30 éjszakáról a 2006 január–május időszakból (JD 2 453 763 – 2 453 878). A differenciális fotometriát 5 összehasonlító átlagához képest számítottuk az összehasonlító csillagok méréséből származó bizonytalanság csökkentése érdekében. Mivel csak egy színből van fénygörbénk, standard transzformációt nem tudunk alkalmazni.

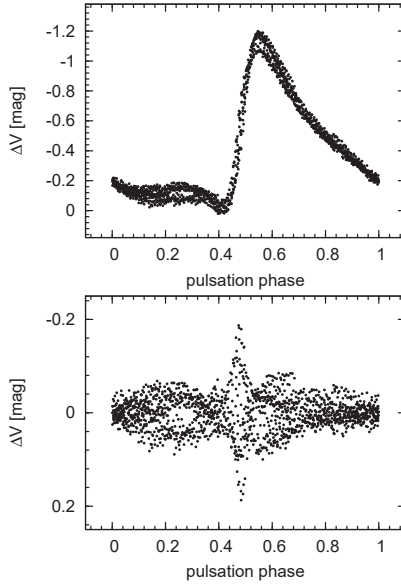
#### 3.3.2. Pulzáció és moduláció

Az UZ UMa maximum-időpontjai alapján a következő efemeriszt vezettük le:

$$t_{\max}[HJD] = 2453763.3368 + 0.4668413 \text{ d} \cdot E$$

Az eredeti és a pulzációs frekvencia 18 harmonikusával fehérített fénygörbe a pulzációs fázis függvényében látható a 3.7. ábra paneljein. A moduláció jelei mindkét panelen jól megfigyelhetők. Mind a maximum- és minimumfényesség, mind a felszálló ág fázisa modulált.

A pulzációval fehérített Fourier-spektrum a pulzációs harmonikusok körül komplex szerkezetet mutat. Ha a Blazhko-moduláció a pulzációs komponensek körül szimmetrikusan, a moduláció frekvenciájával szeparáltan elhelyezkedő modulációs csúcsokként jelenik meg a spektrumban, akkor ezt a harmonikusok körüli azonos mintázatot az úgynevezett kumulatív spektrumban jobban megfigyelhetjük, a modulációs frekvenciát könnyebben azonosíthatjuk. A kumulatív spektrumot a pulzációs harmonikusok körüli frekvenciatartományok szimmetrikus (a pulzációs frekvenciától mért távolság szerinti) összegzésével képezzük az alábbi képlet szerint:



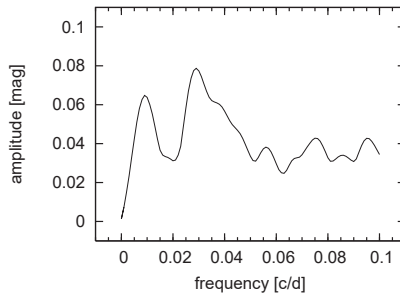
**3.7. ábra.** AZ UZ UMA  $V$  FÉNYGÖRBÉJE. Felül az eredeti, alul a pulzációs frekvencia 18 harmonikusával fehérített fénygörbét ábrázoltuk a pulzáció fázisának függvényében.

$$A'(f) = \sum_{i=1}^n [A(i \cdot f_p + f) + A(i \cdot f_p - f)], \quad f < f_r.$$

ahol  $A(f)$  az eredeti spektrum,  $f_p$  a pulzációs frekvencia,  $n$  megadja, hány pulzációs harmonikus környékét összegezzük,  $f_r$  a pulzációs komponensek körül vizsgált frekvenciatartomány, melynek nagyobbak kell lennie mint a legnagyobb keresett Blazhko-frekvencia,  $A'(f)$  pedig a kapott kumulatív spektrum, aminek jobb a jel/zaj tulajdonságai az eredeti spektruménál.

A pulzációval fehérített fénygörbe 3.8. ábrán bemutatott kumulatív spektruma két jól ki-  
vehető csúcsot mutat, az egyiket 0.0065 c/d-nél – ez nagyjából az adatsor hosszának felel meg –, egy másik szélesebb csúcsot pedig kb. 0.03 c/d frekvenciánál. Ez utóbbi csúcs kiszélesedését okozhatja, ha a különböző harmonikusok körül kicsit más távolságban találhatók a modulációs csúcsok a spektrumban, illetve ha a jobb és bal oldali csúcsok nem azonos távolságra

vannak a pulzációs komponenstől. Az eddig általunk tanulmányozott Blazhko-csillagok tapasztalatai azonban azt mutatják, hogy a modulációs csúcsok minden pulzációs komponens mellett mindkét oldalon mindig hibahatáron belül azonos távolságra találhatók, így ezt a lehetőséget kizárhatjuk. Okozhatja a csúcs kiszélesedését továbbá a modulációs frekvencia valódi változása, mely a megfigyelési időszakban megy végbe. A CZ Lacertae egy másik, két periódussal modulált Blazhko-csillag a KBS mintából. A CZ Lac-nál egyértelműen megfigyeltük, hogy a modulációs frekvenciák egy év alatt jelentős változást szenvedtek. Úgy tűnik tehát, hogy a több periódusú moduláció kevésbé stabil mint az egyetlen periódusú, és valószínűleg az UZ UMA esetében is ennek jelét láthatjuk a kumulatív spektrumban.



**3.8. ábra.** AZ UZ UMA PULZÁCIÓVAL FEHÉRÍTETT FÉNYGÖRBÉJÉNEK KUMULATÍV SPEKTRUMA.

Összhangban a két modulációs frekvencia jelenlétével, az UZ UMA fénygörbéje nem írható le a pulzáció és egyetlen modulációs frekvencia lineárkombinációs frekvenciáival a mérési bizonytalanságunknak megfelelő pontossággal. Valójában még mindkét modulációs frekvenciát figyelembe véve is 0.017 mag *r.m.s.*-el illeszthető csak a fénygörbe, ami rosszabb mint a kb. 0.01 mag mérési pontosság. Bár sok Blazhko-csillag modulációja nem szigorúan szabályos, eddig egyetlen esetben, az XZ Cyg-nél merült fel egy második modulációs periódus jelenlétének lehetősége (LaCluyzé, Smith, Gill et al., 2004). A KBS mintában már két multiperiodikusan modulált Blazhko-csillagot is találtunk (UZ UMA és CZ Lac).

A fénygörbét legjobban illesztő megoldás lineárisan független frekvencia komponensei:

$$f_0 = 2.1420555 \text{ c/d}$$

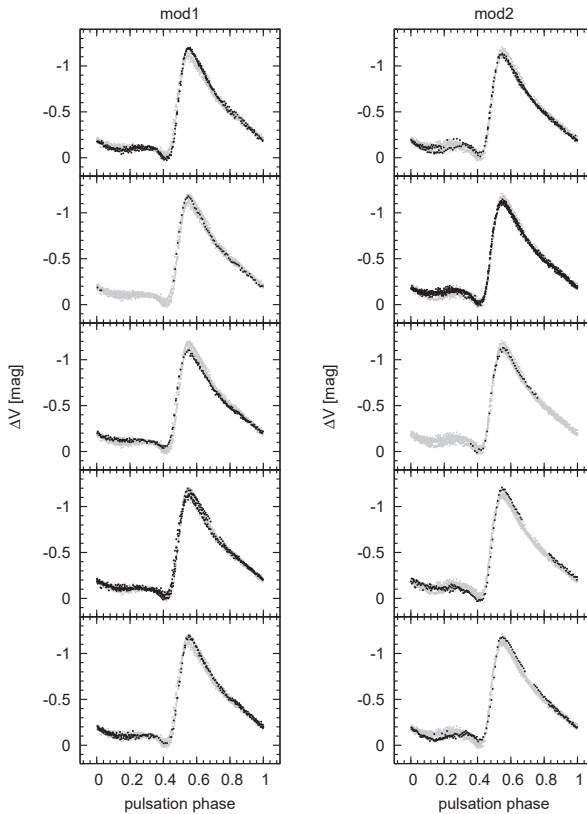
$$f_{m1} = 0.0374 \text{ c/d}; P_{m1} = 26.7 \text{ d}$$

$$f_{m2} = 0.0070 \text{ c/d}; P_{m2} = 143 \text{ d}$$

Mivel a mérési időszak csak 115 napot fed le, az utóbbi eredmény némileg bizonytalan, a tényleges periódus 125 és 170 nap között lehet, illetve az is kérdéses, hogy valóban periodikus viselkedést ír-e le ez a frekvencia. Az eredeti fénygörbét a kétféle modulációs periódus szerint 5-5 Blazhko-fázisra bontva láthatjuk a 3.9. ábra paneljein.

A reziduál 0.017 mag szórása még összetettebb viselkedésre utal, ám további szignifikáns frekvencia komponensek a reziduál spektrumban nem azonosíthatók.





**3.9. ábra.** AZ UZ UMA MODULÁCIÓJA. Baloldalt a 26.7 napos moduláció 5 fázisában, jobboldalt pedig a 143 napos periódus szerinti 5 fázisban látható a  $V$  fénygörbe (fekete pontok). Szürke pontok a más fázisokba eső méréseket jelzik.

### 3.4. MW Lyrae

Az MW Lyr egyike azoknak az RRab csillagoknak, amelyek korábban publikált modulációját megkérdőjelezhetőnek találtuk (lásd 3.1. rész e dolgozatban és Sódor & Jurcsik 2005). Az MW Lyr CCD megfigyelése a KBS során 2006–07-ben történt. A sváb-hegyi 60 cm-es automata távcső mellett Horace Smith a Michigani Állami Egyetem 60 cm-es teleszkópjával is végzett méréseket ebben a nemzetközi projektben, néhány éjszakán pedig a Konkoly Observatórium piszkés-tetői 1 m-es RCC teleszkópjával is történtek mérések. A terület csillagairól Arne Henden készített standard Johnson fotometriát a Flagstaff Observatórium 1 m-es távcsövével.

Az MW Lyr fénygörbéinek analízisét két részes cikksorozatban publikáltuk. Jelen fejezet témáját, a fénygörbe modulációs viselkedésével kapcsolatos eredményeinket ismerteti az első cikk (Jurcsik, Sódor, Hurta et al., 2008a). A második publikáció a fizikai paraméterek modulációs változásaira kapott megoldásunkat mutatja be (Jurcsik, Sódor, Szeidl et al., 2008), amiről a 4.4. alfejezetben számolok be.

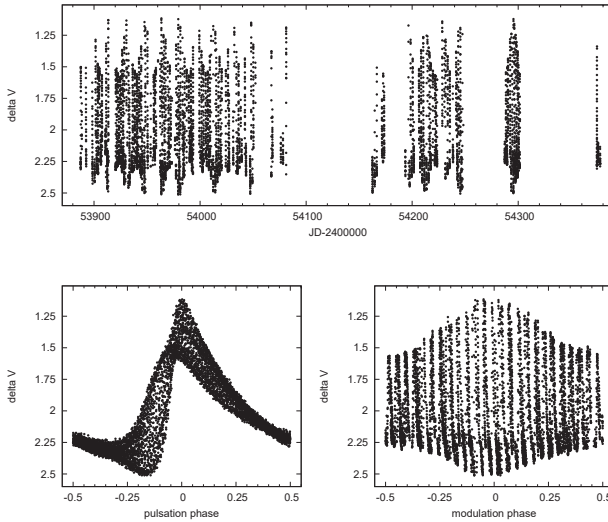
#### 3.4.1. Adatok

Az MW Lyr mérések 2006 májusa és 2007 júliusa között 177 éjszakán történtek. Minden éjszaka voltak  $BVI_C$  mérések, ezen felül 2006-ban 15 éjszakán és 2007-ben 3 éjszakán  $R_C$  sávban is mértük a változót.

Relatív fotometriánkhöz összehasonlító csillagként a GSC2.2 N0223233663 csillagot használtuk. Három további, némileg különböző színű és fényességű ellenőrző csillaghoz viszonyítva az összehasonlító fényessége stabilnak bizonyult 0.010–0.015, 0.009–0.013, 0.008–0.010 és 0.009–0.013 mag reziduálokkal  $B$ ,  $V$ ,  $R_C$  és  $I_C$  színekben.

#### 3.4.2. Az MW Lyr fénygörbéjének modulációja

Az MW Lyr  $V$  fénygörbét mutatja az idő, valamint a pulzációs és modulációs fázis függvényében a 3.10. ábra. A fénygörbe erősen modulált, a legnagyobb pulzációs amplitúdó nagyjából kétszerese a minimális amplitúdónak. A maximum fényessége 0.45 magnitúdóval, fázisa 0.07-el (kb. 40 perc) változik a modulációs ciklus során. A 3.11. ábra a pulzációs periódussal feltekert  $V$  fénygörbe reziduálját mutatja a pulzációs középgörbe levonása után. A reziduál a minium–felszálló ág környékén a legnagyobb, mivel a fénygörbe legmeredekebb szakaszának, a felszálló ágnak erősen modulált a fázisa.



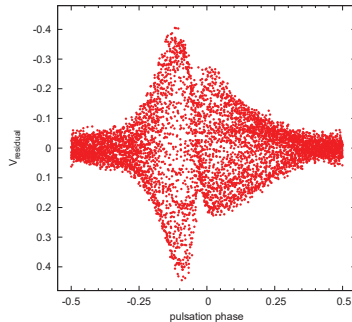
**3.10. ábra.** AZ MW Lyr  $V$  FÉNYGÖRBÉJÉNEK MODULÁCIÓJA. A felső panelen a fotometriai adatokat az idő függvényében ábrázoltuk. A bal alsó panel a pulzáció, a jobb alsó pedig a moduláció fázisa szerint mutatja ugyanezeket az adatokat.

A pulzáció és moduláció fázisait a következő efemeriszek szerint számítottuk:

$$T_{\max\text{puls}} = 2453963.4950[\text{HJD}] + 0.3976742 \cdot E_{\text{puls}},$$

$$T_{\max\text{mod}} = 2453963.4950[\text{HJD}] + 16.5462 \cdot E_{\text{mod}}.$$

A pulzáció és moduláció periódusai azok az értékek, amelyek a legjobb illesztést adják a  $V$  fénygörbére a pulzációs ( $kf_0$ ) és modulációs ( $kf_0 \pm f_m$ ,  $kf_0 \pm 2f_m$  és  $2f_m$ ) lineárkombinációs komponensek figyelembevételével.



**3.11. ábra.** AZ MW Lyr  $V$  FÉNYGÖRBÉJÉNEK REZIDUÁLJA A PULZÁCIÓ LEVONÁSA UTÁN. A pulzáció középgörbéjének eltávolítása után kapott reziduál a minimum–felszálló ág környékén a legnagyobb amplitúdójú, ami a fázismoduláció következménye.

### A fénygörbe matematikai leírása

A Blazhko-csillagok Fourier-spektrumát a pulzáció harmonikusai körüli egyenközü multiplették jellemzik, a moduláció frekvenciájának megfelelő szeparációkkal, mint azt a 2. és 3.2. fejezetekben az RR Gem és SS Cnc példáján bemutattam. Korábban csak tripleteket találtak, elsőként egy általunk vizsgált csillagnál, az RV UMA-nál sikerült kvintupletet kimutatni (Hurta, Jurcsik, Szeidl & Sódor, 2008). A modulációs frekvenciának a spektrumban való megjelenése szintén vitatott volt korábban, ám az általunk a Konkoly Blazhko Survey során megfigyelt Blazhko-csillagok mindegyikénél kimutattuk ennek a csúcsonak a jelenlétét (Jurcsik, Sódor, Váradi et al., 2005b; Jurcsik, Szeidl, Sódor et al., 2006; Hurta, Jurcsik, Szeidl & Sódor, 2008; Jurcsik, Sódor, Hurta et al., 2008a; Jurcsik, Hurta, Sódor et al., 2009). Ez tulajdonképpen a magnitúdóátlagolt közepes fényesség modulációval való változását jelenti.

Az MW Lyr spektrumát is ezek a komponensek uralják. A pulzációs frekvencia a 12. harmonikusig követhető. Ez a 12 kimutatható pulzációs komponens kevésnek tűnhet ahhoz viszonyítva, hogy más általunk vizsgált RRab csillagnál akár a 25–27. felharmonikus is kimutatható volt. Ennek az az oka, hogy az MW Lyr középgörbéjében az erős moduláció tompítja a modulálatlan RRab csillagokra jellemző meredek felszálló ágat valamint a csúcsos maximumot és minimumot. A  $kf_0 + f_m$  és  $kf_0 - f_m$  modulációs komponensek pedig  $k \leq 13$  és  $k \leq 10$  harmo-

3.1. táblázat. AZ MW LYR FÉNYGÖRCBE MEGOLDÁSAI.

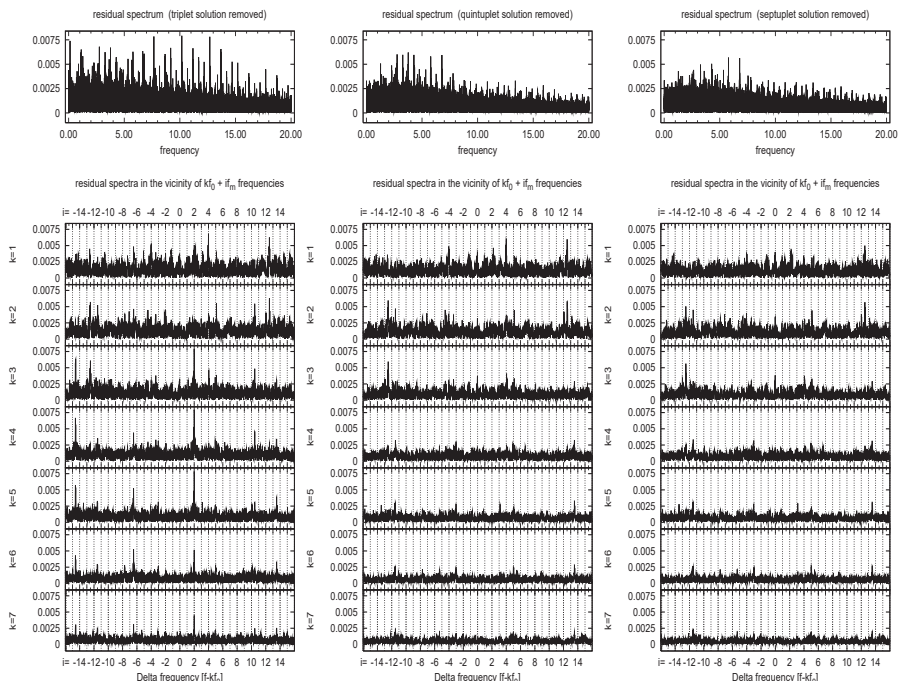
Megoldás	komponensek száma	Frekvenciakomponensek
A (triplett)	36	$kf_0, k = 1, \dots, 12; kf_0 - f_m, k = 1, \dots, 10;$ $kf_0 + f_m, k = 1, \dots, 13; f_m$
B (kvintuplett)	53	'A' megoldás, továbbá $kf_0 - 2f_m, k = 1, \dots, 7;$ $kf_0 + 2f_m, k = 1, \dots, 9; 2f_m$
C (szeptuplett)	58	'B' megoldás, továbbá $kf_0 - 4f_m, k = 1, 2, 3;$ $kf_0 + 4f_m, k = 1, 2$
D	66	'C' megoldás, továbbá $kf_0 - 12.5f_m, k = 2, 3;$ $kf_0 + 12.5f_m, k = 1, 2; kf_0 - f'_m, k = 1, 2, 3; f'_m$
$f_0 = 2.514621 \text{ cd}^{-1}; f_m = 0.060437 \text{ cd}^{-1}; f'_m = 0.00197 \text{ cd}^{-1}$		

kusig mutathatók ki. A modulációs frekvencia ( $f_m$ ) csúcsának amplitúdója jelentős, 0.014 mag a  $V$  fénygörcbénél, ami a 6. pulzációs harmonikus amplitúdójának felel meg.

A tripllett megoldással fehérített adatsor reziduál spektruma sok további szignifikáns csúcsot tartalmaz, ami annak a jele, hogy a fénygörcbe nem írható le kielégítően csak a tripllettekkel. A 3.12. ábra a  $V$  adatsor reziduál spektrumait mutatja a 0–20 c/d tartományban és kinagyítva az első hét pulzációs harmonikus frekvenciájának környezetében, különböző megoldásokkal való fehérítések után. A fehérítéseket iteratív módon végeztük, újabb és újabb frekvenciákat azonosítva a korábbi megoldás reziduáljában. Ezeket, az egyre több frekvenciát figyelembevévő megoldásokat a 3.1. táblázatban foglaltuk össze. A következő iteráció előtt mindig az összes addig azonosított frekvenciát egyszerre, szimultán módon illesztettük az eredeti adatsorra, amiről kimutattuk, hogy jobb megoldást ad, mintha csak az újabb komponenseket illesztenénk az előző reziduálhoz.

A 3.12. ábra bal oldali oszlopa a tripllett megoldás ('A' megoldás) levonása utáni reziduált mutatja. Ebben a spektrumban a legnagyobb csúcsok  $kf_0 + 2f_m$  frekvenciáknál jelennek meg. Szintén láthatók  $kf_0 - 2f_m$  frekvenciáknál és  $2f_m$ -nél is csúcsok, de ezek kisebb amplitúdójúak. Összesen 16 csúcsot azonosítottunk  $kf_0 \pm 2f_m$  komponensekből.

A kvintuplett megoldással ('B' megoldás) fehérített reziduál spektrum továbbra sem csak zajt mutat. Egyéb szignifikáns csúcsok mellett  $kf_0 \pm 4f_m$  és  $kf_0 \pm 12.5f_m$  kombinációs frekvenciáknál láthatunk csúcsokat. Sajnos e két sorozat egymás  $\pm 1$  c/d-s aliasainak felel meg, ami az amplitúdók meghatározását némileg bizonytalanná teszi. Azonban a két sorozat bármelyikét eltávolítva a másik sorozatnak megfelelő frekvenciáknál továbbra is marad jel a spektrumban, ami



**3.12. ábra.** AZ MW Lyr V FÉNYGÖRBEJÉNEK REZIDUÁL SPEKTRUMAI. A teljes spektrum látható a felső ábrákon 0–20 c/d tartományban, alattuk 7-7 panel a  $kf_0$  pulzációs harmonikusok  $\pm 1$  c/d környezetét ábrázoltuk kinagyítva. Itt a skálán  $f_m$  egész számú többszöröseit tüntettük fel a modulációs komponensek könnyebb azonosíthatósága érdekében. A 3 oszlopban 3 megoldás (balról jobbra: A, B és C – lásd 3.1. táblázat) levonása utáni reziduálok láthatók. Az 'A' megoldás reziduáljában a  $kf_0 \pm 2f_m$  csúcsok a legnagyobb amplitúdójúak, a középső oszlopban, a 'B' megoldás reziduáljában  $kf_0 \pm 4f_m$  helyeken találjuk a domináns csúcsokat, végül ha ezeket is eltávolítjuk (jobb oldali oszlop, 'C' megoldás reziduálja),  $kf_0 \pm 12.5f_m$  frekvenciánál láthatunk szignifikáns csúcsokat.

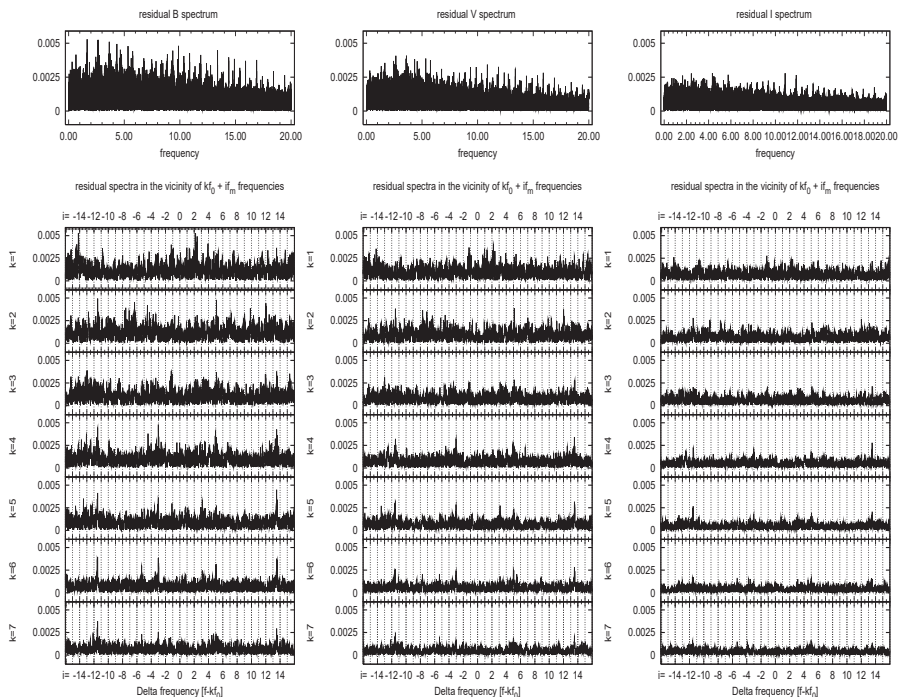
arra utal, hogy mindkét sorozat frekvenciái egymástól függetlenül jelen vannak a fénygörbében.

A 3.12. ábra jobb oldali oszlopa a szeptuplett megoldás ('C' megoldás) eltávolítása után mutatja a reziduál spektrumot, amelyben láthatjuk a  $kf_0 \pm 12.5f_m$  komponenseket, amelyek a legnagyobb amplitúdójú csúcsok itt. Nem egyértelmű, hogy ez a frekvenciaszeparáció valóban a modulációs frekvenciának pontosan a 12.5-szerese, vagy ez egy másodlagos moduláció frekvenciája, ami csak véletlenül esik nagyon közel az elsődleges moduláció frekvenciájának 12.5-szereséhez, esetleg rezonánsan kapcsolódik hozzá. Mindenesetre a frekvenciaszeparáció a méréseink pontosságának megfelelő hibahatáron belül  $12.5f_m$ . Ha ugyanis ezeket a komponenseket egy szabadon illesztett harmadik frekvenciával vesszük figyelembe, az illesztés így is hibahatáron belül  $12.5f_m$  értéket ad.

A szeptuplett megoldás ('C' megoldás – lásd 3.1. táblázat) eltávolítása utáni reziduál spektrum többek közt szignifikáns csúcsok egy olyan sorozatát is tartalmazza, amelyek egy újabb, közös frekvenciaszeparációval a pulzációs harmonikusok frekvenciái mellett jelennek meg. A szóban forgó négy csúcs frekvenciája  $f_0 - f'_m$ ,  $2f_0 - f'_m$ ,  $3f_0 - f'_m$  és  $f'_m$ , ahol  $f'_m = 0.00197$  c/d. Míthogy ennek a frekvenciának megfelelő periódus  $\sim 500$  nap, ami a teljes adatsor hosszánál alig valamivel rövidebb, ezek a csúcsok nagyjából a spektrális felbontás határának megfelelő távolságra találhatók a pulzációs csúcsok mellett, így mind a frekvencia, mind az amplitúdók meghatározása bizonytalan. Az sem állapítható meg, hogy valóban periodikus jelenséget írnak le ezek a komponensek, vagy például a pulzáció frekvenciájának a megfigyeléseink időskáláján végbemenő enyhe változásai okozzák a csúcsokat.

A 'D' megoldás a szeptuplett ('C' megoldás) mellett a  $kf_0 \pm 12.5f_m$  valamint a  $kf_0 \pm f'_m$  komponenseket is figyelembe veszi. A 3.13. ábrán A, B, V és  $I_C$  fénygörbék reziduál spektrumait mutatjuk be a 'D' megoldás levonása után, a 3.12. ábrához hasonló módon. Bár ezek a spektrumok még mindig nem teljesen simák, láthatóan nem csak zajt tartalmaznak, hanem jónéhány  $S/N > 3$  csúcsot is, pl.  $-3f_m$ ,  $5f_m$ ,  $-11.5f_m$  és  $13.5f_m$  szeparációkkal, a frekvenciaazonosítással ezen a szinten felhagyunk, mert további komponensek figyelembevételére már nem javítjuk érdemlegesen az illesztés reziduálját.

A 'D' megoldás reziduáljának *r.m.s.*-e 26, 20 és 15 mmag a B, V és  $I_C$  sávokban. Ez az MW Lyr-hez hasonló színű illetve fényességű konstans ellenőrző csillagok adataiból becslült mérési pontosságot (8–15 mag) jóval meghaladja. A reziduál főleg a pulzáció minimum–felszálló ág–maximum fázisaiban jelentős és a moduláció valamilyen nem periodikus, sztochasztikus vagy kaotikus viselkedésére utal. Ez a moduláció nagy amplitúdójával kapcsolatos jelenség lehet, mert más, gyengébben modulált Blazhko-csillagoknál nem találtunk hasonló viselkedést.



**3.13. ábra.** AZ MW LYR  $B$ ,  $V$  ÉS  $I_C$  FÉNYGÖRBÉJÉNEK REZIDUÁL SPEKTRUMAI. AZ oszlopok a 3.12. ábrával azonos módon mutatják a három fénygörbe reziduál spektrumát a 'D' megoldás (lásd 3.1. táblázat) levonása után. Bár mindhárom színben láthatók szignifikáns csúcsok, pl.  $-3f_m$ ,  $5f_m$ ,  $-11.5f_m$  és  $13.5f_m$  szeparációkkal a pulzációs harmonikusok mellett, a modulációs komponensek azonosításával ezen a szinten felhagyunk, mert további komponensek figyelembevétele már nem javítja érdemlegesen az illesztés reziduálját.



### A középgörbe

Fontos, ezidáig nem tisztázott kérdés, hogy milyen fénygörbéje lenne egy modulált RR Lyrae csillagnak a Blazhko-effektus hiányában. Vajon a középgörbe vagy a moduláció bármely fázisának fénygörbéje megegyezik-e egy hasonló fizikai paraméterekkel bíró modulálatlan RR Lyrae csillag pulzációs fénygörbéjével?

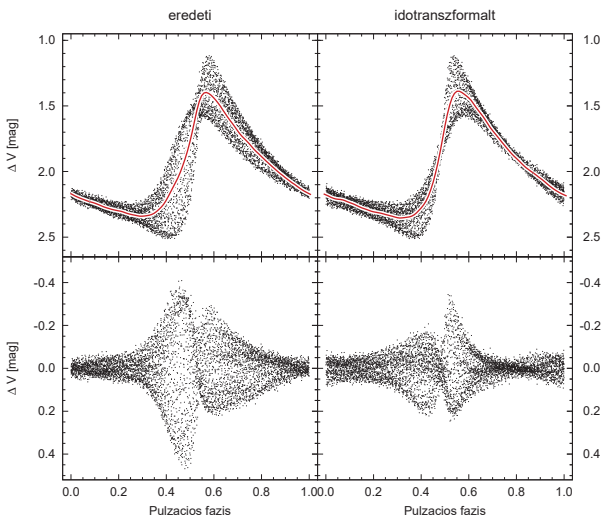
Az MW Lyr fénygörbéjének erős fázismodulációja miatt a középgörbe alakja valószínűleg jobban eltér egy modulálatlan csillag fénygörbéjétől, mint ha nem volna jelen fázismoduláció, csak amplitúdómoduláció. A felszálló ág fázisának erős modulációs változása elsősorban a középgörbe felszálló ágának alakját torzítja, az rendellenes görbületet mutat.

Kimutattuk, hogy az MW Lyr alacsony fokú epochafüggetlen fáziskülönbségei ( $\Phi_{21} \dots \Phi_{51}$ ) csak gyengén változnak a moduláció fázisával, míg maga a pulzáció alapharmonikusának fázisa ( $\Phi_1$ ) erős Blazhko-fázis függést mutat. Ez arra utal, hogy a fázismoduláció gyakorlatilag ezen az egy paraméteren keresztül fejt ki hatását, következésképp egy egyszerű fáziskorrekción avagy időtranszformáción alkalmazva, a fázismoduláció kiküszöbölhető a fénygörbéből. Az időtranszformáció  $\Phi_1$  Blazhko-fázisfüggéséből számítható. A fénygörbét Blazhko-fázis szerint 20 részre felosztva a 20 fázis fénygörbéit csak a pulzáció frekvenciájának harmonikusaival illesztjük. A 20 Blazhko-fázisban így kapott  $\Phi_1$  értékekre másodrendű Fourier-illesztést végzünk, és ez a görbe a megfelelő dimenziókkal számolva, illetve a megfelelő kezdő epochát használva megadja a szükséges időtranszformációt.

A 3.14. ábra mutatja az időtranszformáció  $V$  fénygörbére gyakorolt hatását. Látható, hogy a fel- és leszálló ágakon csomópontok jelennek meg, ami azt jelenti, hogy a fázismodulációt sikeresen kitranszformáltuk az adatsorból. Az időtranszformált adatsor középgörbéje már jobban hasonlít egy modulálatlan RR Lyrae csillag fénygörbéjére, elsősorban a felszálló ág rendellenes görbülete tűnt el. A 3.14. ábrán a pulzáció levonása utáni reziduál fénygörbékét is láthatjuk az időtranszformáció előtt és után. Az itt megfigyelhető különbségek hasonlóak a 3.4. ábrán összehasonlított SS Cnc és RR Gem reziduál fénygörbék különbségeihez. Az MW Lyr eredeti fénygörbéjének erős fázismodulációja 0.5 pulzációs fázis környezetében, a felszálló ágon okozza a legnagyobb reziduált, továbbá a reziduál a leszálló ágon is csak lassan csökken, fixpont talán csak a leszálló ág aljánál, 0.0 fázis táján figyelhető meg. Mindezeket az SS Cnc reziduálja jóval gyengébben, ám hasonló lefutásal mutatja. Az időtranszformáció után viszont fixpont jelent meg a felszálló ág közepén is, a reziduál pedig csak a minimum és maximum szűkebb környezetében jelentős, hasonlóan az RR Gem reziduáljához.

Az itt vázolt módszer lehetővé teszi a fázis- és amplitúdómoduláció egymástól független

kezelését illetve vizsgálatát. Megjegyezzük, hogy a fázismoduláció a pulzációs periódus modulációjaként is értelmezhető. Ilyen értelemben a periodikus időtranszformációval a változó pulzációs periódust állandó, átlagos értékre hozzuk.



**3.14. ábra.** AZ IDŐTRANSZFORMÁCIÓ HATÁSA AZ MW LYR FÉNYGÖRBÉJÉRE. A bal oldali panelek az eredeti adatsort, a jobb oldaliak pedig az időtranszformált adatsort mutatják. Felül a  $V$  fénygörbéket és a rájuk illesztett középgörbéket, alul ezeknek a középgörbéknek a levonása utáni reziduál fénygörbéket ábráztunk. Az alsó két panel közti különbségek hasonlóak a 3.4. ábrán összehasonlított SS Cnc és RR Gem reziduál fénygörbék különbségeihez.

## 4. fejezet

# Inverz Fotometriai Baade–Wesselink-analízis

A Konkoly Blazhko Survey során jónéhány modulált RR Lyrae csillagról készítettünk rendkívül részletes többszín-fotometriai idősort, melyek analiziséről az előző két fejezetben számoltam be. E vizsgálatok során nagyon sokmindent megtudtunk arról, hogy miként jelenik meg a moduláció a fénygörbében. Ennek ellenére nem jutottunk közelebb a Blazhko-jelenség fizikai hátterének feltáráshoz, továbbra sem tudjuk, mi okozza valójában a modulációt. A moduláció során lezajló fizikai változásokról a különböző színek fénygörbéinek egyszerű, pulzációs fázis szerinti összeátlagolásával nyert eredmények nem egyértelműek. Az előző fejezetek példáin keresztül láthattuk, hogy az eredmény függ az átlagolás módjától, vagyis hogy magnitúdó vagy intenzitás szerint végezzük a számítást, illetve hogy a színindex kiszámításánál az átlagolás megelőzi-e a különbségképzést vagy fordítva. Az RR Lyrae csillagok fénygörbéjéből származtatható átlagos fotometriai mennyiségek és a csillag sztatikai fényességei közti kapcsolat nem egyértelmű voltára Bono, Caputo & Stellingwerf (1995) is rámutatott.

Az RR Lyrae csillagok pillanatnyi és átlagos fizikai paramétereit (effektív felszíni hőmérséklet, sugár, luminizitás stb.) a direkt Baade–Wesselink-analízissel (BW)<sup>1</sup> lehet meghatározni. Ez a módszer a fotometriai idősorok mellett spektroszkópiai úton nyerhető radiális sebességgörbéket is igényel. A BW analízis lényege röviden a következő. A színgörbékéből légkörmódellek vagy empirikus összefüggések segítségével felszíni effektív hőmérsékletet és bolomet-

<sup>1</sup> Ebben a dolgozatban a BW analízis hagyományos formáit gyakran spektroszkópiai vagy direkt BW analízisnek fogjuk nevezni, megkülönböztetve az általunk kidolgozott inverz fotometriai BW analízistől.

rikus korrekciót számítunk a pulzáció bizonyos fázisaira<sup>2</sup>. Egy bizonyos hullámsávban mért fénygörbe és a rá vonatkozó bolometrikus korrekció segítségével a luminozítás relatív változása meghatározható. Mivel a luminozítás az effektív hőmérséklettől és a pillanatnyi sugártól függ, az előbbit pedig már meghatároztuk, a sugár relatív megváltozása kiszámítható. A radiálissebesség-görbe integrálásából pedig abszolút sugárváltozást kapunk két tetszőleges fázis között.<sup>3</sup> Ismerve a sugárváltozás relatív és abszolút mértékét, a teljes sugár kiszámítható a vizsgált fázisokra. A módszer így az abszolút sugár ismeretén keresztül az abszolút fényesség és a távolság meghatározására is alkalmas. A mi szempontunkból probléma azonban, hogy egy Blazhko-csillag modulációjának BW analízissel történő vizsgálatához a pulzációt különböző Blazhko-fázisokban megfelelően lefedő radiálissebesség-mérések szükségesek, szimultán többszín-fotometriai mérésekkel együtt. Máig azonban egyedül az RR Lyr-ről van ilyen kiterjedt radiálissebesség-mérés (Chadid & Chapellier, 2006), ám azzal egyidőben sajnos nem történtek fotometriai megfigyelések.

Egy másik lehetőség RR Lyrae csillagok fizikai paramétereinek meghatározására empirikus összefüggések segítségével nyílik. A fénygörbe alakjából (a Fourier-paramétereiből) fizikai paramétereket megadó empirikus formulák (pl. Jurcsik & Kovács 1996; Jurcsik 1998; Kovács & Walker 2001) kellően stabil, vagyis egyáltalán nem, vagy legfeljebb gyengén modulált fénygörbéjű RRab csillagokra lettek kalibrálva. Modulált csillagokra való alkalmazhatóságuk kérdéses. E formulák például az MW Lyr fémtartalmára különböző Blazhko-fázisokban akár 0.45 dex-szel eltérő értékeket adnak, holott a fémtartalom nyilvánvalóan nem függhet a moduláció pillanatnyi fázisától. Azt ma még nem tudjuk, hogy a moduláció szerint kiátlagolt paraméterek valamilyen középgörbe alapján számíthatók-e ezekkel, vagy hasonlóan levezethető empirikus képletekkel. Ám ha ez lehetséges is, a moduláció során a paraméterekben lezajló változásokról így nem nyerhetünk információt.

Joggal feltételezhetjük azonban, hogy a többszín-fotometriai fénygörbékben a csillag fizikai paramétereinek valamiképp kódolva vannak, így az általunk összegyűjtött kiterjedt Blazhko-adatsorokból a csillagban a pulzáció és moduláció során végbemenő fizikai változások valahogyan visszanyerhetők. E feltételezésből kiindulva dolgoztunk ki egy sikeresnek bizonyult

<sup>2</sup> A felszálló ág környékét hagyományosan ki szokás hagyni az analízisből, mert itt a legkevésbé sztatikus a légkör, így a ma rendelkezésre álló sztatikus légkörmodellek itt a legkevésbé alkalmazhatók.

<sup>3</sup> A mért radiális sebesség a csillag fotoszférájának (pontosabban a felhasznált színképvonal keletkezési rétegének) felénk forduló félgömbjére integrált tényleges mozgási sebesség látóirányú komponenséből adódik. A színképvonal eltolódásából számított sebességet ezért egy korrekciós tényezővel ( $p$  – projekciós faktor) megszorozva korrigáljuk, így kapjuk a valódi sugár irányú mozgási sebességet.

módszert, mely a BW analízishez hasonló eredményeket szolgáltat. Ezt a módszert Inverz Fotometriai Baade–Wesselink eljárásnak neveztük, angol rövidítése szerint (Inverse Photometric Method) IP módszerként fogunk rá hivatkozni. Az IP módszer nagy előnye a BW analízissel szemben, hogy alkalmazásához nem szükségesek radiálissebesség-mérések. Ily módon alkalmazhatósági területe a BW analíziséhez képest nagy mértékben kibővül, mert módszerünk a már említett számos Blazhko-mérésünkön túl modulálatlan RRab csillagokra is alkalmazható. Ennélfogva akár egy nagyságrenddel is növekedhet a vizsgálható csillagok száma. BW analízishez megfelelő többszín-fotometriai és radiálissebesség-mérés ugyanis a mai napig csupán mintegy két tucat mező RR Lyrae csillagról és egy tucatnyi gömbhalmazbeli társukról férhető hozzá az irodalomban. Radiálissebesség-mérések nélküli többszín-fotometria azonban sokkal több RRab csillagról érhető el, többek közt a Konkoly Blazhko Survey során megfigyelt modulálatlan RRab csillagokról is (Jurcsik, Sódor, Váradi et al., 2006; Sódor, Jurcsik, Nagy et al., 2007; Jurcsik, Sódor, Hurta et al., 2008b,c; Kun, Sódor, Jurcsik et al., 2008).

Ebben a fejezetben az IP módszert fogjuk ismertetni, demonstráljuk az eljárás alkalmazhatóságát olyan tesztobjektumokon, amelyekről több szerzőtől BW analízis is hozzáférhető, valamint bemutatjuk az MW Lyr modulációjáról az IP módszerrel nyert eredményeinket. Az IP módszer elvét és a modulálatlan csillagokról kapott teszteredményeinket Sódor, Jurcsik & Szeidl (2008) cikkünkben publikáltuk, az MW Lyr-ről nyert eredményeinket pedig egy másik cikkben tettük közzé (Jurcsik, Sódor, Szeidl et al., 2008). A munka részeként kifejlesztettem az IP módszert implementáló programot is, ami szintén publikusan hozzáférhető<sup>4</sup>.

## 4.1. Az IP módszer

Az IP módszerünk lényege, hogy egy nemlineáris illesztési eljárás segítségével keressük azokat a pulzációs sebesség [ $V_p(\varphi)$ ] és felszíni effektív hőmérséklet [ $T_{\text{eff}}(\varphi)$ ] görbékét ( $\varphi$  a pulzációs fázist jelöli), a csillag távolságát ( $d$ ) és közepes sugarát ( $R_0$ ), amelyek sztatikus atmoszférra modellek szintetikus színein illetve magnitúdóin keresztül a legjobban leírják a megfigyelt fénygörbékét.

A módszer bemenetei Fourier-összegek, melyek a megfigyelt többszín-fotometriai fénygörbékét írják le matematikai alakban, valamint a csillag fémtartalma ( $[\text{Fe}/\text{H}]$ ). A bemeneti Fourier-görbék reprezentálhatják egy modulálatlan csillag fénygörbéjét, egy modulált csillag középgörbéjét, vagy egy modulált csillag pulzációs görbéjét a moduláció egy bizonyos fázisá-

<sup>4</sup> <http://www.konkoly.hu/staff/sodor/ip.html>

ban. A bemenő görbéket az interstelláris vörösödéstre korrigálni kell, vagyis tudnunk kell a magnitúdók illetve színek nullpontjait. A későbbiekben megmutatjuk, hogy bizonyos esetekben – ha megfelelően jó minőségű bemenő görbék állnak rendelkezésre, – valójában a színnullpontok ismerete nélkül is működik az eljárásunk, e nullpontokat is illesztendő változóknak tekintve ezekre is megoldást kapunk.

A módszer használatához szükség van még atmoszféramodell-táblázatokra, melyek adott fémtartalom és egyéb paraméterek<sup>5</sup> mellett az effektív hőmérséklet és az effektív gravitációs gyorsulás ( $\log g_{\text{eff}}$ ) függvényében megadják a modell légkör szintetikus színeit és magnitúdóit egységnyi csillagfelszínre vonatkoztatva.

A  $\log g_{\text{eff}}(\varphi)$  görbe  $V_p(\varphi)$ -ből, a tömegeből ( $\mathfrak{M}$ ) és  $R_0$ -ból számítható a következőképp. A fotoszféra pillanatnyi sugara [ $R(\varphi)$ ] és pillanatnyi radiális irányú gyorsulása [ $a(\varphi)$ ] a pulzációs sebesség első integráljaként<sup>6</sup> és első deriváltjaként adódik. E két függvény ismeretében  $g_{\text{eff}}(\varphi)$  kiszámítható:

$$g_{\text{eff}}(\varphi) = G\mathfrak{M}/R(\varphi)^2 + a(\varphi)$$

ahol  $G$  a gravitációs állandó. A tömegre a módszerünk nem túlságosan érzékeny, így az illesztés csak nagy bizonytalansággal tudja ezt a változót megadni. Ezért a tömeget egy félempirikus képletből, a pulzációs egyenlet átrendezett formájából számítjuk:

$$\log \mathfrak{M} = -2.237 + 2.56(\log R)_0 - 1.538 \log P - 0.054(\log T_{\text{eff}})_0 \quad (4.1)$$

amelyet a Marconi, Caputo, Di Criscienzo et al. (2003, 1a egyenlet) által megadott összefüggésből származtattunk, a luminozítás logaritmusának átlagát [ $(\log L)_0$ ] az alábbi egyenlőség szerint behelyettesítve:

$$(\log L)_0 = 4(\log T_{\text{eff}})_0 + 2(\log R)_0 - 15.048.$$

Megjegyezzük, hogy  $\mathfrak{M}$ ,  $L$  és  $R$  Nap-egységekben értendő, a '0' index pulzációs fázis szerinti átlagolást jelent,  $P$  pedig a pulzáció periódusa napban kifejezve.

<sup>5</sup> Ilyen egyéb paraméterek például a turbulens sebesség, illetve a fémek egymáshoz viszonyított gyakorisága, mely lehet szoláris fémösszetételű (solar scaled) illetve alfa-dúsított (alpha enhanced). Ez utóbbi esetben a fémek közt a Napban megfigyeltnél nagyobb relatív gyakoriságban vannak jelen az ún. alfa-elemek (C, N, O, Ne, Mg, Si, ...).

<sup>6</sup> Az integrálásnál fellépő konstans abból a megszorításból számítható, hogy a sugár idő illetve fázis szerinti átlaga  $R_0$  kell hogy legyen.

E számítások elvégzése után a szintetikus színeket  $[(B - V)(\varphi)$  és  $(V - I_C)(\varphi)]$  és a  $V$  sávra vonatkozó bolometrikus korrekcióit  $[BC_V(\varphi)]$  Castelli & Kurucz (2003) sztatikus légkörmmodell táblázataiból olvassuk ki a megfelelő  $[\text{Fe}/\text{H}]$ ,  $T_{\text{eff}}(\varphi)$  és  $\log g_{\text{eff}}(\varphi)$  értékekhez, a pulzáció minden fázisára. E táblázatok felbontása  $[\text{Fe}/\text{H}]$  szerint 0.5 dex,  $T_{\text{eff}}$  szerint 250 K,  $\log g_{\text{eff}}$  szerint pedig 0.5 dex. A rácsponatok között interpoláltuk a táblázatból vett értékeket,  $[\text{Fe}/\text{H}]$ -ban lineárisan interpolálva 0.05 dex lépésenként, a másik két változó szerint pedig spline interpolációt alkalmaztunk a gépi számábrázolás pontosságának megfelelően. Az extinkció-korrigált látszó vizuális magnitúdót ezután a következő összefüggésből számíthatjuk:

$$V(\varphi) = -10 \log T(\varphi) - 5 \log R(\varphi) - BC_V(\varphi) + 5 \log d + 37.36$$

ahol  $d$  a távolság pc-ben. Az illesztéshez a Levenberg–Marquardt-féle, legkisebb négyzetek módszerével minimalizáló nemlineáris algoritmus egy implementációját (Lourakis, 2004) használtam. Az illesztő algoritmus a  $T_{\text{eff}}(\varphi)$  és  $V_p(\varphi)$  görbékét, valamint  $d$  és  $R_0$  értékeit variálva keresi meg azt a megoldást, amely a legjobban leírja a bemenő többszín-fotometriai fénygörbékét ( $BVI_C$ , esetleg csak  $VI_C$  vagy  $BV$ ). Hogy fizikailag értelmes eredményt kapjunk, a variált görbék folytonosságát, simaságát és a pulzáció szerinti periodicitását biztosítani kell. Ezért a felsorolt feltételeknek megfelelő kiindulási görbékét használunk, melyeket megfelelő fokú Fourier-komponensek hozzáadásával engedjük variálni a Fourier-paramétereken keresztül.

Köztudott, hogy az RR Lyrae csillagok atmoszférája sok szempontból nem felel meg a ma hozzáférhető sztatikus modellek feltételezéseinek. Csak a legfontosabb néhány problémát említve: a nagy amplitúdójú pulzáció során (a felszálló ág környezetében) az atmoszféra még kvázi-sztatikusnak sem tekinthető, abban lökéshullámok terjednek; nem áll fenn lokális termodinamikai egyensúly (non-LTE); az atmoszféra vastagsága nem elhanyagolható a csillag sugarához viszonyítva (nem plánparallel a rétegződés); a turbulens sebesség ( $v_t$ ) változik a pulzáció során stb. Sajnos azonban ma még nem állnak rendelkezésre olyan atmoszféramodellek, melyek ezek közül egy vagy több tényezőt figyelembe véve a paraméterek megfelelően széles tartományára volnának kiszámítva. Emiatt minden módszer, melyet változócsillagok fizikai paramétereinek meghatározására használnak – úgy fotometriai mint spektroszkópiai megfigyelésekből – kénytelen sztatikus atmoszféra modellekre támaszkodni.

Sztatikus atmoszféra modellek alkalmazhatóságát RR Lyrae csillagok dinamikus légkörére BW analízis szempontjából több szerző vizsgálta már (pl. Liu & Janes, 1990; Jones, Carney,

Storm et al., 1992). Ezek a tanulmányok kimutatták, hogy a minimális sugarú fázis környéke<sup>7</sup> az a fázisstartomány, ahol a sztatikus légkörmodellek alkalmazhatósága a leginkább megkérdőjelezhető. Ennek ellenére az IP módszer a teljes fázisstartományt használja, mert a megoldásgörbék folytonossága és simasága csak így biztosítható. E két feltétel biztosítása azért is fontos, mert – az atmoszféra dinamikus természete és a különböző színindexeknek megfelelő esetlegesen különböző hőmérsékleti skálák miatt – a bemenő fény- és szingörbék időnként kilógnak a légkörmodell-rács értelmezési tartományából, pl. a  $(B - V) - (V - I_C)$  szín–szín síkon, és ez máskülönb (direkt módszer esetén) szakadást vinne a megoldásgörbékbe. Mivel azonban az IP módszer nem használja közvetlenül a bemenő szingörbéket fizikai paraméterek meghatározására, a sztatikus légkörmodellek helytelenségéből eredő problémák is csak közvetve jelentkeznek. Eljárásunk inverz volta biztosítja, hogy a megoldásgörbék teljes egészükben a modell-rács értelmezési tartományán belül vannak. Ahol a sztatikus modellek kevésbé megfelelőek, ott kevésbé jó illeszkedést várunk a megfigyelt bemenő és az IP módszer által szolgáltatott megoldásgörbék között.

Mivel az IP módszer nemlineáris illesztést használ, fontos az illesztett paraméterekhez megfelelő kiinduló értékeket használni.

#### 4.1.1. A kiindulási effektív hőmérséklet-görbe

Mind elméleti, mind megfigyelési oldalról jól megalapozott, ismert tény, hogy a  $(V - I_C)$  színindex jó hőmérséklet-indikátor.<sup>8</sup> Ezért a Bessel, Castelli & Plez (1998) által polinomiális alakban megadott transzformációt használva határozzuk meg a bemenő  $(V - I_C)(\varphi)$  görbéből az illesztés kiinduló  $T_{\text{eff}}(\varphi)$  görbét. E formula tényleges pontossága számunkra lényegtelen, ugyanis számos tesztfuttatás tapasztalata szerint az illesztett effektív hőmérséklet-görbe elhanyagolható mértékben függ a kiindulási görbétől. További tapasztalatunk, hogy a kiinduló  $V_p(\varphi)$  görbétől is csak kis mértékben függ a  $T_{\text{eff}}(\varphi)$  megoldásgörbe, az eltérés ilyenkor is kevesebb mint 10–40 K a különböző megoldások közt, a pulzáció bármely fázisában.

#### 4.1.2. A kiindulási pulzációsssebesség-görbe

Ellentétben a  $T_{\text{eff}}(\varphi)$  görbénél megfigyelt stabilitással, az illesztett  $V_p(\varphi)$  görbe viselkedése sajnos egész más. Tapasztalataink szerint az illesztés során a  $V_p(\varphi)$  görbe hajlamos eltávolodni a

<sup>7</sup> Ez a felszálló ág környékének felel meg.

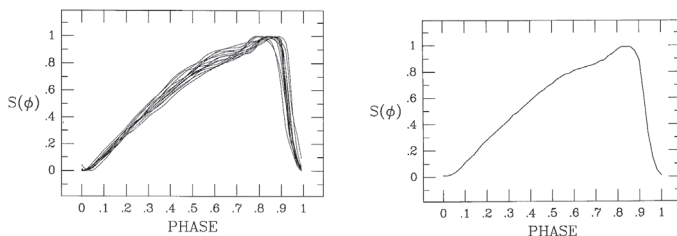
<sup>8</sup> Legalábbis az általunk használt hőmérséklet-tartományokon.



fizikailag plauzibilis alaktól, amennyiben tetszőleges variálást engedünk az illesztő eljárásnak. Ezért nagyon fontos, hogy a  $V_p(\varphi)$  görbe illesztéséhez jó kiinduló görbét használjunk, és az illesztés során a megoldást valamiképp e kiindulás közelében kell tartanunk.

#### Liu (1991) minta $V_p(\varphi)$ görbéje

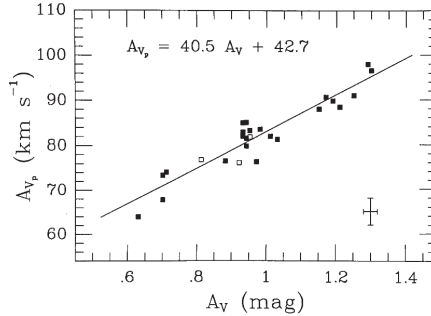
Liu (1991) cikkében egy minta pulzációsebesség-görbét publikált, amit mintegy tucatnyi RRab csillag megfigyelt radiálissebesség-görbéjéből határozott meg. Az elképzelés azon alapul, hogy megfigyelések szerint a radiálissebesség-görbék alakja nagyjából hasonló. Liu ezért egységre normalta ezek amplitúdóit és fázisban úgy tolta össze őket, hogy a fénygörbék maximumai egybe essenek (4.1. ábra bal panel). Ezután e görbék összeátlagolásával definiálta a minta  $V_p(\varphi)$  görbe alakját (4.1. ábra jobb panel). A minta radiálissebesség-görbe amplitúdójának meghatározásához pedig egy összefüggést vezetett le, mely a  $V$  fénygörbe amplitúdójához kb 5 km/s pontossággal megadja a pulzációsebesség-görbe amplitúdóját (4.2. ábra). Az így kapott minta  $V_p(\varphi)$  görbe a legtöbb fázisban kb. 5 km/s pontossággal írja le a megalkotásához felhasznált görbéket, kivéve a meredek leszálló ágon (0.85 és 1.00 fázisok közt), ahol a pontosság csupán 25 km/s körüli.



**4.1. ábra.** LIU MINTA  $V_p(\varphi)$  GÖRBÉJÉNEK ALAKJA. A bal oldali panelen a mintához felhasznált  $V_p(\varphi)$  görbék láthatók amplitúdó szerint normalva és fázisban összetolva. Jobboldalt az e görbékből számított átlaggörbe látható. Forrás: Liu (1991).

Ennek a 4.1. ábrán látható átlaggörbének van sajnos néhány hiányossága. Az igen meredek leszálló ágak közti kicsiny fáziskülönbségek miatt a mintagörbe itt az említett nagyobb pontatlansága mellett kevésbé meredek, mint bármely egyedi görbe. Hasonló okokból a minimum kevésbé csúcsos, mint a legtöbb felhasznált tényleges  $V_p(\varphi)$  görbe.

További probléma Liu (1991) minta  $V_p(\varphi)$  görbéjével, hogy alakja rögzített. Az IP mód-



4.2. ábra. LIU  $A_{V_p} - A_V$  ÖSSZEFÜGGÉSE. Forrás: Liu (1991).

szert elsősorban Blazhko-csillagok vizsgálatához fejlesztettük ki. Tekintve az erősen modulált Blazhko-csillagok fénygörbealakjainak nagy változatosságát különböző Blazhko-fázisokban, egyáltalán nem tűnik helyesnek egy rögzített alakú pulzációsebesség-görbe használata, még ha annak amplitúdóját változtatjuk is a Blazhko-fázissal. Megvizsgáltuk ezért, van-e kapcsolat a pulzációsebesség-görbe és a fény- illetve színgörbék alakja között.

#### Minta $V_p(\varphi)$ görbe az $I_C(\varphi)$ fénygörbéből

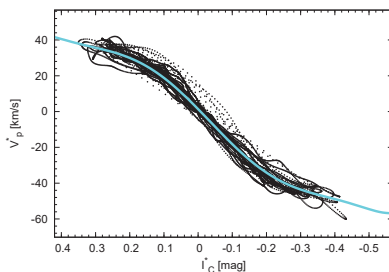
Mint már említettük, egyetlen Blazhko-csillagról sincs minden Blazhko-fázist lefedő radiálissebesség-mérés, mely szimultán többszín-fotometriával párosulna. Ezért a következőkben csak a modulálatlan RRab csillagok ilyen görbéit, e görbék kapcsolatát vizsgáljuk.

Vizsgálatunkhoz a Kovács Géza által összegyűjtött RRab csillagokra vonatkozó fotometriai és  $V_{\text{rad}}$  adatokat használtuk (Kovács, 2003). Az összesen 22 elemű mintából kettő csillag (RR Leo, W Crt) adatait elhagytuk, mert ezek valamiért a többitől eltérő, diszkrepáns görbealakokat mutattak. Felhasználtuk viszont az RV Oct adatait, ami nem volt benne Kovács Géza mintájában. Az így nyert 21 elemű mintánk tartalmaz minden RRab csillagot, melyről megfelelő minőségű, jó fázislefedettségű fotometriai és radiálissebesség-mérés hozzáférhető.

Kovács (2003) nyomán a projekciós faktor értékét 1.35-nek tekintjük, ezzel transzformálva a mért radiális sebességeket pulzációs sebességekké:

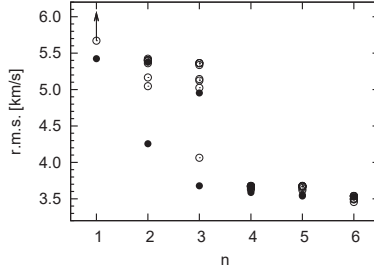
$$V_p = p \cdot V_{\text{rad}}, \text{ ahol } p = 1.35.$$

Szemrevételezve a rádiálssebesség-, valamint a szín- és fénygörbéket, azt találtuk, hogy az  $I_C(\varphi)$  görbe alakja hasonlít leginkább a  $V_{\text{rad}}(\varphi)$  görbéhez. A 21 csillag  $V_p^*$  értékeit az  $I_C^*$  magnitúdók függvényében ábrázoltuk a 4.3. ábrán. A  $**$  itt azt jelenti, hogy a görbékből levontuk a fázis szerinti átlagukat, azaz közös sebesség és magnitúdó nullpontra hoztuk őket. A 4.3. ábra szerint egy RRab csillag  $I_C^*(\varphi)$  görbéje jó pontossággal meghatározza ennek a csillagnak a  $V_p(\varphi)$  görbéjét.



**4.3. ábra.**  $V_p^*(\varphi) - I_C^*(\varphi)$  RELÁCIÓ. Az ábrázolt értékeket a 21 csillag  $I_C$  fény- és pulzációsebesség-görbéjének Fourier-illesztéseiből számítottuk, 1/500-ad fázisfelbontással. A  $**$  azt jelenti, hogy a görbékből levontuk a fázis szerinti átlagukat. A vastag vonal a hetedikrendű polinom illesztést jelöli, a 4.2. összefüggés szerint.

Statisztikai tesztek segítségével állapítottuk meg, hogy  $V_p^*$  hány paramétertől függ szignifikáns módon. Vizsgáltuk azt is, hogy vajon elégséges-e csak  $I_C^{*k}$  tagok figyelembevétele, vagy szignifikáns függést mutat a pillanatnyi pulzációs sebesség a színindexek értékeitől is?  $V_p^*$  különböző rendű regresszióinak reziduáljait ábrázoltuk a 4.4. ábrán. A regresszióknál  $I_C^{*k}$ ,  $(V - I_C)^l$ ,  $(B - V)^l$ ,  $I_C^{*k} \cdot (V - I_C)^l$ , és  $I_C^{*k} \cdot (B - V)^l$  tagokat vettünk figyelembe. A 4.4. ábra szerint nem érhető el a reziduálban szignifikáns javulás szín- és vegyestagok figyelembevételével. Azt is megfigyelhetjük ezen az ábrán, hogy egy harmadrendű polinom  $I_C^*$ ,  $I_C^{*2}$ , és  $I_C^{*3}$  tagokkal kielégítő pontossággal illeszti  $V_p^*$ -t, ez további  $I_C^{*k}$  vagy egyéb tag figyelembevételével sem javítható érdemlegesen. Azonban ha csak az említett harmadrendű illesztést használnánk a transzformációhoz, az így kapott görbe nem volna monoton növekvő a teljes  $I_C^*$  tartományon, a végeknél visszakanyarodna, ami nyilvánvalóan helytelen. E problémát úgy hidaltuk át, hogy a pontokra először egy spline simítást alkalmaztunk, és a spline-t egyenesekkel extrapoláltuk az  $I_C^*$  pontok által lefedett tartomány szélein túl kb. 0.05 magnitúdóval. Ezután ezt a spline-t illesztettük



**4.4. ábra.**  $V_p^*$  regressziójának reziduáljai  $I_C^{sk}$ ,  $(V - I_C)^l$ ,  $(B - V)^l$ ,  $I_C^{sk} \cdot (V - I_C)^l$ , illetve  $I_C^{sk} \cdot (B - V)^l$  tagok figyelembevételével. Tömör pontok azokat az  $n$ -edrendű regressziókat jelölik, ahol csak  $I_C^{sk}$  tagokat vettünk figyelembe. Az üres körökkel jelölt esetekben  $n - 1$  darab  $I_C^{sk}$  tag mellett egy színindex- vagy vegyestagot is felhasználtunk. A reziduál nem csökken jelentősen  $n = 3$  fölött. A legjobb harmadrendű illesztés  $I_C$ ,  $I_C^2$ , és  $I_C^3$  figyelembevételével történt. A bal felső sarokban a nyíl azt jelzi, hogy  $n = 1$ -nél további pontok találhatóak igen nagy, 9 km/s és 20 km/s közötti értékeknél.

egy hetedrendű polinommal (Ez a polinom látható a 4.3. ábrán folytonos vonallal). Ilymódon a következő összefüggést kaptuk  $V_p^*(\varphi)$  és  $I_C^k(\varphi)$  között, amely összefüggés az RRab csillagok  $V_p^*(\varphi)$  görbéjét a Liu-féle mintagörbénél valamivel pontosabban, a leszálló ágon pedig lényegesen pontosabban írja le:

$$V_p^*(\varphi) = \sum_{i=0}^7 c_i \cdot I_C^i(\varphi) \quad (4.2)$$

ahol

$$c_{0..7} = (1.38, 194.8, -114, -1023, 764, 4220, -1660, -6700)$$

A formula pontossága, vagyis az illesztés reziduálja 3.51 km/s. Az együtthatók hibái:

$$\sigma(c_{0..7}) = (0.08, 0.7, 4, 14, 40, 100, 110, 200)$$

Az IP módszert a tesztobjektumokra mindkét fenti  $V_p(\varphi)$  kiindulási görbével lefuttattuk.

Mivel nem tudjuk, ezek a mintagörbék valójában mennyire pontosak, az illesztés során engedjük ezek variálását is. Sajnos azonban, mint már jeleztük, ha tetszőleges variálást engedünk meg, a  $V_p(\varphi)$  megoldásgörbe irreális alakhoz konvergál. Emiatt a kiindulási görbétől való eltérést limitáltuk, olymódon, hogy magát a kezdeti  $V_p(\varphi)$  görbét is egy illesztendő görbének tekintettük, amit a megoldás keresése során a pillanatnyi  $V_p(\varphi)$  görbe illeszt. Ilymódon „büntetést” adtunk azoknak a próbálkozásoknak, amelyek a kiindulási görbétől eltértek, mégpedig az eltérés mértékével arányosan. Ez az arányossági tényező – a  $V_p(\varphi)$  görbe súlyfaktora az illesztésnél – az eljárásunk egy szabad paramétere.

Kétféle súlyfaktort használtunk az eljárásunkhoz. A kisebbik maximálisan kb. 4 km/s eltérést enged meg a kiindulástól (közepes súlyfaktor), míg a nagyobbik súly ennél 100-szor nagyobb, ami gyakorlatilag rögzíti a  $V_p(\varphi)$  megoldásgörbét annak kiindulásához (nagy súlyfaktor). A  $V_p(\varphi)$  görbe variálását egy másodrendű Fourier-összeggel engedjük meg, mert tapasztalataink szerint magasabbrendű harmonikus függvény használata esetén túlságosan hullámos megoldást kapunk.

Az eredményeink sokkal inkább függenek a bemenő fénygörbék pontosságától, mint a kiinduló minta  $V_p(\varphi)$  görbe és az alkalmazott súlyfaktor megválasztásától. A minta  $V_p(\varphi)$  görbék 3–5 km/s-os pontossága a megoldásainkban a korábbi direkt BW analízisekhez hasonló pontosság elérését teszi lehetővé, amennyiben jó minőségű fotometriai adatokkal dolgozunk.

### 4.1.3. Az eredmények hibája

Minthogy az IP módszer matematikai görbéket illeszt matematikai görbékhez, a Levenberg–Marquardt-eljárás által az illesztett paraméterek formális hibáit szolgáltatott értékek nem relevánsak, mivel ezek nem függenek egyértelmű módon az eredeti mérések pontosságától. Azt találtuk viszont, hogy a megoldásaink igen érzékenyek a bemenő fotometriai adatok minőségére és a fázislefedettségére. Ez azt jelenti, hogy jó minőségű, jól lefedett fénygörbék esetén a kiindulási  $V_p(\varphi)$  görbe és a súlyfaktor változtatása kevésbé befolyásolja a kapott megoldásokat, míg kevésbé jómínőségű bemenetnél nagyobb eltéréseket okoznak ezek a működési paraméterek. További probléma hibabecslésnél, hogy jó illeszkedést kaphatunk esetleg rossz minőségű bemenetre is, fizikailag nem megfelelő feltételekkel; ha például a tömeget nem rögzítjük a pulzációs egyenlet szerint, illetve ha nagyon kis súlyfaktorial kötik meg a  $V_p(\varphi)$  görbeillesztést. Mindezek miatt azt gondoljuk, hogy az IP módszer megoldásainak pontosságát leginkább a különféle futtatási paraméterek (minta  $V_p(\varphi)$  görbe és súlyfaktor) mellett kapott megoldások eltéréseivel jellemezhetjük. Ezért minden tesztobjektumra négy különböző beállítást

4.1. táblázat. AZ IP MÓDSZER FUTTATÁSAINÁL ALKALMAZOTT BEÁLLÍTÁSOK.

jelölés	minta $V_p(\varphi)$ görbe	$V_p(\varphi)$ súlyfaktor
A	$V_p^* - I_C^*$ (4.2. képlet)	közepes
B	$V_p^* - I_C^*$ (4.2. képlet)	nagy
C	Liu (1991)	közepes
D	Liu (1991)	nagy

tással futtattuk le az IP eljárást, ezeket a beállításokat a 4.1. táblázat foglalja össze.

## 4.2. Teszteredmények modulálatlan csillagokra

Az IP módszert kilenc stabil fénygörbéjű RRab csillagon teszteltük. Azokat a változókat választottuk tesztobjektumnak, amelyekről jó minőségű  $BVI_C$  fotometria és  $V_{\text{rad}}$  görbe is rendelkezésre áll. Mind a kilenc tesztcsillagról két vagy több szerző közölt spektroszkópiai BW analízis eredményeket. A 4.1. táblázatban felsorolt négyféle beállítás mellett az IP módszerünkkel kapott eredményeket a 4.2. táblázat tartalmazza, ahol összehasonlításul megadjuk a korábbi szerzők publikált eredményeit is a tesztobjektumokra. A táblázat felsorolja az adatok forrását, a főtartalmat és a kapott eredményeket: a közepes abszolút vizuális fényességet ( $M_{V0}$ ), a távolságot ( $d$ ), a közepes sugarat ( $R_0$ ), a közepes effektív felszíni hőmérsékletet ( $T_{\text{eff0}}$ ), a tömeget ( $\mathfrak{M}$ ), és a sztatikus felszíni gravitációs gyorsulás logaritmusát ( $\log g_{\text{st}}$ ). Amennyiben a tömeget, a sztatikus gravitációt és/vagy a távolságot nem adta meg a hivatkozott szerző, azokat a 4.1., 4.3. illetve 4.4. összefüggések szerint számítottuk a többi, a szerző által megadott értékekből. Ezeket, az általunk számított mennyiségeket dőlt számokkal szedtük a 4.2. táblázatban. A sztatikus gravitáció illetve a távolság az alábbi összefüggésekből számítható:

$$\log g_{\text{st}} = \log \mathfrak{M} - 2 \log R_0 + 4.438 \quad (4.3)$$

és

$$\log d = 0.2 \cdot (m_{V0} - M_{V0} - A_V + 5), \quad (4.4)$$

ahol  $m_{V0}$  a közepes látszó  $V$  magnitúdó,  $A_V$  pedig az instersztelláris abszorpció mértéke a  $V$  hullámsávban.

Az RR Gem bár Blazhko-csillag (lásd 2. fejezet), a gyenge modulációtól itt eltekinthetünk, az IP módszer teszteléséhez a CCD méréseink középgörbéit használtuk.

A hivatkozott szerzők BW analízisükhöz spektroszkópai úton meghatározott fémtartalom értékeket használtak, kivéve Kovács (2003), aki a fénygörbe Fourier-paramétereiből számította  $[\text{Fe}/\text{H}]$  értékét Jurcsik & Kovács (1996, 3. egyenlőség) alapján (fotometriai fémtartalom). A 4.2. táblázatban a fotometriai fémtartalom értékeket dőlt számokkal szedtük. Az RV Oct kivételével egy csillagnál sem különbözik a fotometriai és spektroszkópai fémtartalom 0.3 dex-nél többel, a legtöbb esetben az eltérés kevesebb mint 0.2 dex, ami nagyjából a kétféle módszer hibájának felel meg. Mivel az RV Oct spektroszkópai és fotometriai fémtartalma közt 0.6 dex a különbség, ami jóval meghaladja a hibahatárt, ezért erre a csillagra mindkét fémtartalommal lefuttattuk a programunkat. A többi tesztobjektumra a fotometriai fémtartalmat fogadtuk el, hiszen célunk, hogy az IP módszer spektroszkópai mérések nélkül is használható legyen.

Azt is ellenőriztük, miképp függenek az IP módszer által adott eredmények a légkörmodellnél alkalmazott fémösszetételtől. Ehhez az SU Draconisra kétféle összetételű légkörmodellel futtattuk a programunkat. A szoláris fémösszetételű  $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.6$  dex mellett egy alfa-dúsított modellt is kipróbáltunk a következő paraméterekkel:  $[\text{M}/\text{H}] = -1.6$ ,  $[\alpha/\text{Fe}] = 0.4$ . A 4.2. táblázatban ezeket a megoldásokat  $\alpha'$  jelöléssel láttuk el. Az alfa-dúsított modell hatása igen kicsi, a hőmérsékletre kapott megoldás +5 K-el, az abszolút  $V$  fényessége  $-0.04$  magnitúdóval változik csupán. Minthogy minden korábbi BW analízis a szoláris fémösszetételű légkörmodelleken alapul, az összehasonlíthatóság érdekében az összes többi tesztobjektumunknál ilyen modelleket használtunk.

A módszer megoldás-fénygörbéi a bemenő görbéket jól illesztik, az eltérés kevesebb mint 0.01–0.03 mag, ami nagyjából az egyedi mérési pontok fotometriai pontosságának felel meg. A 4.5. ábra az RR Gem, SW And és UU Cet példáján mutatja be az illeszkedést. Az SW And és RR Gem bemenő fénygörbéit a megfigyelések jól definiálják, ez két példa jó minőségű fénygörbékre. Az UU Cet fénygörbéinek fotometriai pontossága és fázislefedettsége kevésbé jó, hiszen a felszálló ág alsó fele igen kevés méréssel van csupán lefedve, ez egy gyengébb minőségű bemeneti fénygörbét szemléltet. Az IP módszer sokkal stabilabb megoldást ad – azaz a megoldás kevésbé érzékeny a módszer 4.1. táblázatban részletezett beállításaira – jó minőségű bemeneti fénygörbénél. Az illesztés be- és kimeneti görbéi közti kicsiny eltéréseket szemlélteti a 4.6. ábra az RR Gem esetében. Az eltérés kevesebb mint 0.01 mag a  $V$  fénygörbénél valamint a  $(V - I_C)$  színgörbénél és szinte mindenütt kevesebb mint 0.02 mag a  $(B - V)$  görbénél is.

Az IP módszer eredményeként megoldásgörbét kapunk a pulzációs sebességre is, amit

**4.2. táblázat.** AZ IP MÓDSZERREL KAPOTT EREDMÉNYEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA KORÁBI IRODALMI BW MEGOLDÁSOKKAL KILENC TESZTOBJEKTUMRA. Az IP eljárás beállításait (lásd 4.1. táblázat) a 'megj./ref.' oszlop jelöli. Dőlt számokkal szedtük a fotometriai úton meghatározott fémtartalmat és azoknak a kimeneti fizikai paramétereknek az értékét, amit a hivatkozott szerzők nem adtak meg cikkükben, hanem más, a szerző által megadott értékekből számítottuk a 4.1, 4.3, és 4.4 egyenletek szerint.

GCVS név (log $P$ ) megj./ref.	[Fe/H]	$M_{V0}$ [mag]	$d$ [pc]	$R_0$ [ $R_{\odot}$ ]	$T_{\text{eff0}}$ [K]	$\mathfrak{M}$ [ $\mathfrak{M}_{\odot}$ ]	$\log g_{\text{st}}$
<b>SW And (-0.354)</b>							
A	<i>-0.10</i>	1.01	504	4.34	6646	0.56	2.90
B	<i>-0.10</i>	1.00	507	4.41	6645	0.57	2.90
C	<i>-0.10</i>	0.99	508	4.42	6646	0.57	2.90
D	<i>-0.10</i>	0.97	513	4.46	6644	0.58	2.90
McNamara & Feltz (1977)	0.00	0.90	532	4.45	6680	0.60	2.92
Cacciari, Clementini, Prevot et al. (1989)	-0.15	0.88	537	4.49	6640	0.60	2.91
Liu & Janes (1990)	-0.10	0.97	511	4.36	6517	0.56	<i>2.91</i>
Jones, Carney, Storm et al. (1992)	-0.15	1.10	520	4.06			
Fernley (1994)	-0.15	0.94	522				
Kovács (2003)	<i>-0.10</i>	0.81	555	4.47	6702	<i>0.58</i>	<i>2.90</i>
Bono, Caputo, Castellani et al. (2003)	-0.24	0.93	523				
<b>WY Ant (-0.241)</b>							
A	<i>-1.55</i>	0.36	1190	6.38	6527	0.97	2.82
B	<i>-1.55</i>	0.34	1200	6.44	6526	0.99	2.82
C	<i>-1.55</i>	0.52	1105	5.93	6525	0.81	2.80
D	<i>-1.55</i>	0.49	1119	6.00	6525	0.83	2.80
Skillen, Fernley, Stobie et al. (1993)	-1.25	0.63	1035	5.61	6389	0.72	<i>2.80</i>
Fernley (1994)	-1.25	0.55	<i>1089</i>				
Kovács (2003)	<i>-1.55</i>	0.52	<i>1105</i>	6.10	6296	<i>0.87</i>	<i>2.81</i>
Bono, Caputo, Castellani et al. (2003)	-1.48	0.48	<i>1124</i>				
<b>UU Cet (-0.217)</b>							
A	<i>-1.10</i>	0.66	1865	5.72	6420	0.68	2.75
B	<i>-1.10</i>	0.62	1896	5.82	6419	0.71	2.76
C	<i>-1.10</i>	0.49	2016	6.19	6420	0.83	2.78
D	<i>-1.10</i>	0.44	2061	6.32	6420	0.88	2.78
Cacciari, Clementini, & Fernley (1992) IRF	-1.00	0.63	1887	5.75	6300	0.70	2.76
Cacciari, Clementini, & Fernley (1992) SB	-1.00	0.70	1825	5.36		0.59	2.75
Cacciari, Clementini, & Fernley (1992) SB	-1.00	0.52	1982	5.50		0.62	2.75
Fernley (1994)	-1.00	0.62	<i>1899</i>				
Kovács (2003)	<i>-1.10</i>	0.48	<i>2025</i>	6.25	6258	<i>0.85</i>	<i>2.77</i>
Bono, Caputo, Castellani et al. (2003)	-1.28	0.56	<i>1949</i>				

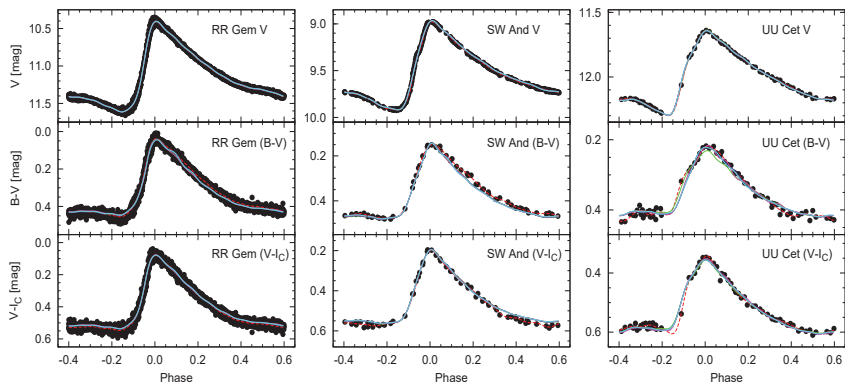


4.3. táblázat. TESZTEREDMÉNYEK (FOLYTATÁS).

GCVS név ( $\log P$ ) megj./ref.	[Fe/H]	$M_{V0}$ [mag]	$d$ [pc]	$R_0$ [ $R_{\odot}$ ]	$T_{\text{eff}0}$ [K]	$\mathfrak{M}$ [ $\mathfrak{M}_{\odot}$ ]	$\log g_{\text{st}}$
<b>SU Dra (-0.180)</b>							
A	-1.60	0.60	695	5.91	6431	0.63	2.70
B	-1.60	0.55	712	6.05	6428	0.69	2.71
C	-1.60	0.60	696	5.91	6432	0.65	2.70
D	-1.60	0.51	724	6.15	6431	0.71	2.71
$A_{\alpha}$	[M/H] = -1.6; [ $\alpha$ /Fe] = 0.4	0.57	703	5.96	6435	0.66	2.71
$B_{\alpha}$	[M/H] = -1.6; [ $\alpha$ /Fe] = 0.4	0.51	723	6.13	6433	0.71	2.71
$C_{\alpha}$	[M/H] = -1.6; [ $\alpha$ /Fe] = 0.4	0.56	707	5.99	6437	0.67	2.71
$D_{\alpha}$	[M/H] = -1.6; [ $\alpha$ /Fe] = 0.4	0.47	737	6.24	6438	0.74	2.72
Liu & Janes (1990)	-1.60	0.73	640	5.15	6433	0.47	2.69
Fernley (1994)	-1.60	0.63	685				
Barcza (2003)	-1.60	0.74	647	5.09	6490	0.66	2.84
Kovács (2003)	-1.60	0.62	689	5.85	6293	0.63	2.70
Bono, Caputo, Castellani et al. (2003)	-1.80	0.26	813				
<b>RR Gem (-0.401)</b>							
A	-0.15	0.68	1229	4.74	6882	0.80	2.99
B	-0.15	0.66	1243	4.79	6881	0.82	2.99
C	-0.15	0.67	1235	4.76	6884	0.81	2.99
D	-0.15	0.65	1247	4.80	6884	0.83	2.99
Liu & Janes (1990)	-0.20	0.99	1061	4.05	6699	0.55	2.96
Fernley (1994)	-0.30	0.89	1117				
Kovács (2003)	-0.15	0.74	1196	4.60	6721	0.74	2.98
Bono, Caputo, Castellani et al. (2003)	-0.29	0.92	1100				
<b>TT Lyn (-0.224)</b>							
A	-1.20	0.86	626	5.32	6365	0.58	2.75
B	-1.20	0.80	643	5.47	6365	0.62	2.75
C	-1.20	0.75	660	5.62	6366	0.66	2.76
D	-1.20	0.67	685	5.83	6366	0.73	2.77
Liu & Janes (1990)	-1.35	0.75	654	5.40	6284	0.62	2.77
Fernley (1994)	-1.35	0.65	690				
Kovács (2003)	-1.20	0.66	686	5.72	6283	0.69	2.76
Bono, Caputo, Castellani et al. (2003)	-1.56	0.57	717				

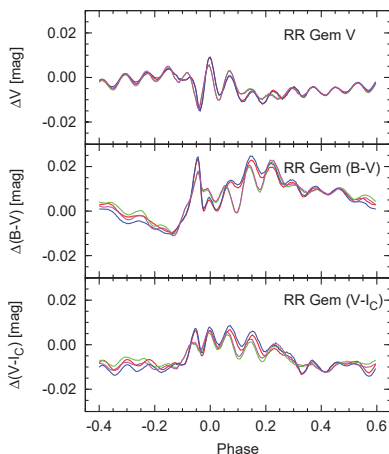
4.4. táblázat. TESZTEREDMÉNYEK (FOLYTATÁS) .

GCVS név ( $\log P$ ) megj./ref.	[Fe/H]	$M_{V0}$ [mag]	$d$ [pc]	$R_0$ [ $R_{\odot}$ ]	$T_{\text{eff0}}$ [K]	$\mathfrak{R}$ [ $\mathfrak{M}_{\odot}$ ]	$\log g_{\text{st}}$
<b>RV Oct (-0.243)</b>							
A	-1.15	0.32	1128	6.35	6567	0.97	2.82
B	-1.15	0.28	1149	6.47	6566	1.02	2.82
C	-1.15	0.43	1073	6.04	6565	0.85	2.81
D	-1.15	0.40	1089	6.14	6565	0.89	2.81
A	-1.75	0.51	1038	5.94	6538	0.82	2.80
B	-1.75	0.43	1076	6.16	6537	0.90	2.81
C	-1.75	0.61	990	5.67	6537	0.73	2.79
D	-1.75	0.56	1014	5.81	6536	0.77	2.80
Skillen, Fernley, Stobie et al. (1993)	-1.75	0.76	905	5.26	6437	0.62	2.79
Fernley (1994)	-1.75	0.68	956				
Bono, Caputo, Castellani et al. (2003)	-1.71	0.37	1102				
<b>AR Per (-0.371)</b>							
A	-0.05	1.02	489	4.25	6719	0.54	2.92
B	-0.05	1.03	487	4.23	6720	0.54	2.91
C	-0.05	1.11	470	4.09	6715	0.49	2.91
D	-0.05	1.11	469	4.08	6716	0.49	2.91
Liu & Janes (1990)	-0.30	0.97	500	4.15	6672	0.53	2.93
Fernley (1994)	-0.30	0.87	524				
Kovács (2003)	-0.05	0.72	561	4.45	6833	0.61	2.93
Bono, Caputo, Castellani et al. (2003)	-0.30	0.92	512				
<b>BB Pup (-0.318)</b>							
A	-0.45	0.80	1648	4.65	6790	0.57	2.86
B	-0.45	0.76	1677	4.73	6789	0.60	2.86
C	-0.45	0.82	1633	4.61	6793	0.55	2.85
D	-0.45	0.79	1658	4.67	6794	0.58	2.86
Skillen, Fernley, Stobie et al. (1993)	-0.60	1.21	1329	3.97	6551	0.40	2.84
Fernley (1994)	-0.60	1.13	1416				
Kovács (2003)	-0.45	0.87	1596	4.40	6712	0.49	2.84
Bono, Caputo, Castellani et al. (2003)	-0.64	0.65	1766				



**4.5. ábra.** AZ IP MÓDSZER FÉNYGÖRBEILLESZTÉSE. A módszer által adott megoldás fénygörbék (folytonos vonal), a bemenő görbék (szaggatott vonal) és a tényleges mérési pontok három tesztobjektumra. Az RR Gem és SW And fénygörbék két jó minőségű bemenő adatsort reprezentálnak, míg az UU Cet egy kevésbé jó minőségű fotometriára példa. Az IP módszer négy beállítás melletti eredményeit négy különböző színű görbe jelöli, azonban az eltérés ezek közt gyakran kisebb mint a vonalvastagság.

radiálissebesség-görbévé tudunk konvertálni a  $p$  projekciós faktor ismeretében. Az így kapott  $V_{\text{rad}}(\phi)$  görbéket hasonlítjuk a kilenc tesztobjektumunk tényleges méréseihez a 4.7. ábrán. Ehhez a transzformációhoz a  $V_{\text{rad}}$  görbék megfigyelői által publikált  $p$  értékeket használtuk. A mérések jellemző pontossága 1–4 km/s, amit az ábrák bal alsó sarkában jeleztünk. A kilenc tesztobjektumunkról a következő szerzők publikáltak  $V_{\text{rad}}$  méréseket: Cacciari, Clementini, Prevot et al. (1987, SW And), Clementini, Cacciari & Lindgren (1990, UU Cet), Liu & Janes (1989, SU Dra, RR Gem, TT Lyn, AR Per) és Skillen, Fernley, Stobie et al. (1993, WY Ant, RV Oct, BB Pup). Hangsúlyozni kell, hogy az itt feltüntetett mérési adatokat az IP módszer nem használja fel az illesztés során. A jó egyezés azt támasztja alá, hogy a módszerünk valóban működőképes  $V_{\text{rad}}$  mérések nélkül. A legtöbb esetben a megoldásgörbék hibahatáron belül egyeznek a megfigyelttel. Néhány esetben azonban szisztematikus eltérések mutatkoznak ami elérheti az 5 km/s-ot. Ezek a különbségek valószínűleg a projekciós faktor pulzációs fázistól illetve pulzációs periódustól való gyenge függéséből (lásd pl. Sabbey, Sasselov, Fieldus et al. (1995) és Nardetto, Mourard, Mathias et al. (2007) Cefeidákra), illetve a minta  $V_p(\phi)$  görbék kisebb



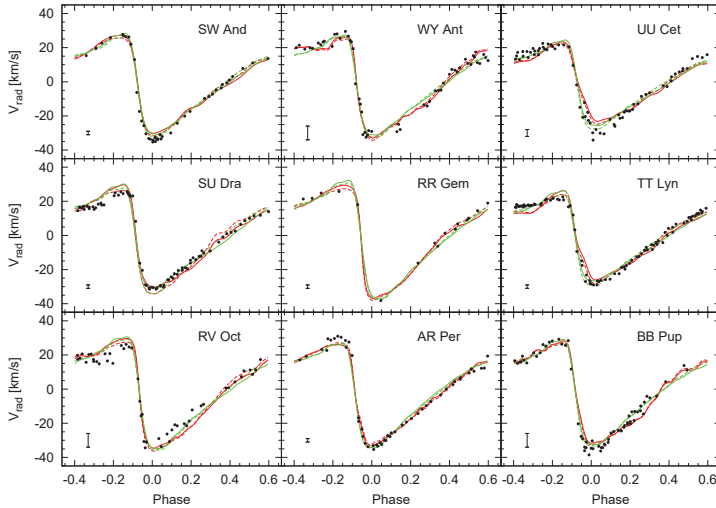
**4.6. ábra.** A FÉNYGÖRBEILLESZTÉSEK REZIDUÁLJA. Az IP módszer be- és kimeneti fénygörbéi közötti eltéréseket mutatja a négy különböző színű vonal az RR Gem esetében, a 4.1. táblázatban felsorolt négy különböző beállítás mellett.

hibáiból erednek.

A pulzációsebesség-görbéből és a közepes sugárból meghatározható a sugár pulzációs fázistól való függése,  $R(\varphi)$ . Az SW And négyféle  $R(\varphi)$  megoldásgörbéjét hasonlítja más szerzők BW megoldásaihoz a 4.8. ábra. Az egyezés tökéletesen kielégítő.

Amint azt a 4.2. táblázatból láthatjuk, az IP módszerrel számított fizikai mennyiségek jól egyeznek a más szerzők által más módszerekkel meghatározott értékekkel. Az egyes csillagokra más szerzők által meghatározott  $M_{V0}$  értékek közt 0.1–0.3 mag eltérések vannak, míg az IP módszer különböző beállításaival 0.2 magnitúdón belül megegyező megoldásokat kapunk. Minthogy objektív módon nem tudjuk eldönteni, mely irodalmi adatok helyesebbek másoknál, az eredményeink közvetlen összehasonlítása ezekkel nem egyértelmű. A BB Puppisra kapott abszolút  $V$  magnitúdóink például jó egyezést mutatnak Kovács (2003) megoldásával, azonban Skillen, Fernley, Stobie et al. (1993) és Fernley (1994) megoldásai 0.2–0.3 magnitúdóval halványabbak. A megoldásainkat az irodalmi BW adatokon túl RR Lyrae csillagokra érvényes elméleti és empirikus összefüggésekkel is összehasonlítjuk, hogy megbízhatóságukról meggyőződjünk.

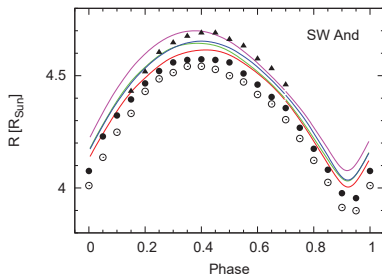
Jól definiált összefüggés áll fenn pulzáló változócsillagok periódusa és felszíni gravitáci-



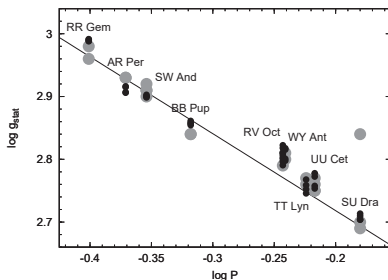
**4.7. ábra.** MEGOLDÁSOK A  $V_{\text{rad}}(\varphi)$  GÖRBÉKRE. Az IP módszer által a kilenc tesztobjektumra adott  $V_{\text{rad}}(\varphi)$  megoldásgörbék a tényleges mérésekhez hasonlóan. Hangsúlyozzuk, hogy az itt feltüntetett mérési adatokat az IP módszer nem használja fel az illesztés során. A jó egyezés a módszer működőképességét támasztja alá. A zöld vonalakkal jelölt megoldásoknál a Liu-féle kiindulási  $V_p$  görbét használtuk, míg a piros vonalak a  $V_p - I_C$  összefüggésből számított kiindulásból származnak. A közepes súlyt alkalmazó megoldásokat folytonos vonallal jelzi, a nagy súlynak a szaggatott vonalak felelnek meg. A pontokkal jelölt tényleges mérési adatokból a tömegközéppont radiális sebességét levontuk. A bal alsó sarkokban a mérések közepes bizonytalanságát jelöltük. Az  $I_C$  görbéből származtatott  $V_{\text{rad}}$  görbék némileg hullámosak a gyengébb minőségű fénygörbénél, mivel itt a fénygörbe kellően magas rendű Fourier-illesztése helyenként nem elég sima. A módszerünk által szolgáltatott  $V_p(\varphi)$  görbéket a megfelelő mérési adatokat publikáló szerzők által megadott projekciós faktorial transzformáltuk  $V_{\text{rad}}(\varphi)$  görbéké.

ója közt (lásd pl. Fernie, 1995). A 4.9. ábra az IP módszer és más szerzők által adott  $\log g_{\text{st}}$  értékeket ábrázolja  $\log P$  függvényében. Folytonos vonal a Jurcsik (1998, 15. egyenlőség) által megadott empirikus relációt jelzi. Az IP módszer megoldásai a spektroszkópiai BW analízisek eredményeihez hasonlóan jól illeszkednek erre az egyenesre.

Egy másik fontos összefüggés áll fenn horizontális ági csillagok fém tartalma és az abszo-



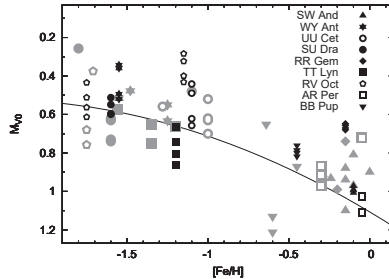
**4.8. ábra.** AZ SW AND SUGÁRVÁLTOZÁSA A PULZÁCIÓ SORÁN. AZ IP MÓDSZER MEGOLDÁSAIT FOLYTOSON VONALAK JELÖLİK, SZIMBÓLUMOKKAL PEDIG A MÁS SZERZŐK ÁLTAL SZÁMÍTOTT SUGÁRVÁLTOZÁSOKAT ÁBRÁZOLTUK: HÁROMSZÖGEK – Cacciari, Clementini, Prevot et al. (1989), TÖMÖR KORONGOK – Liu & Janes (1990), ÜRES KÖRÖK – Jones, Carney, Storm et al. (1992).



**4.9. ábra.**  $\log g_{st}$  ÉRTÉKEK  $\log P$  FÜGGVÉNYÉBEN. AZ IP MÓDSZER EREDMÉNYEIT FEKETE PONTOK JELÖLİK, AZ IRODALMI ADATOKAT PEDIG SZÜRKE KORONGOKKAL ÁBRÁZOLTUK. AZ IRODALMI ADATOK ÉS AZ IP EREDMÉNYEK SZÓRÁSA A KÉTFÉLE MÓDSZER INHERENS BIZONYTALANSÁGÁT JELZI. FOLYTOSON VONAL A Juresik (1998, 15. egyenlőség) által megadott empirikus relációt jelöli.

lút  $V$  magnitúdója között. E mennyiségeket hasonlítjuk Sandage & Tammann (2006) modell-számításokon alapuló nullkorú horizontális ágra kapott eredményeivel a 4.10. ábrán. Ez az ábra azt mutatja, hogy a megoldásaink más módszerek eredményein túl elméleti előrejelzésekkel is jó egyezésben vannak. A legtöbb tesztobjektumra kapott megoldásaink kisebb szórást mutat-

nak, mint a többi irodalmi adat ugyanannál a csillagnál. Megjegyezzük, hogy a horizontális ág csillagai a 4.10. ábra diagramján fejlődésük során a nullkorú horizontális ág vonaláról felfelé mozognak.

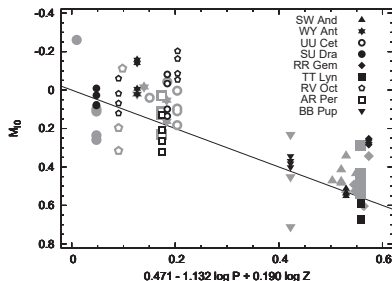


**4.10. ábra.**  $M_{V0}$  A FÉMTARTALOM FÜGGVÉNYÉBEN. Az IP módszer eredményeit fekete szimbólumok jelölik, míg szürkével az irodalmi értékeket ábrázoltuk. A folytonos vonal a nullkorú horizontális ágnak felel meg Sandage & Tammann (2006, 9. egyenlőség) szerint.

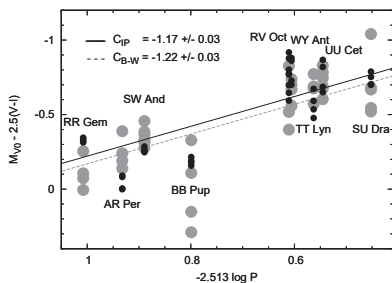
Az IP módszer eredményeit és az irodalmi adatokat szintén összehasonlítottuk periódus–fényesség (PL) és periódus–fényesség–szín (PLC) relációk segítségével a 4.11. és 4.12. ábrákon. Ezekhez a tesztekhez Catelan, Pritzl & Smith (2004)  $M_I(\log P, \log Z)$  és Kovács & Walker (2001)  $\log P(I_C, V - I_C)$  relációit használtuk. Az eredményeink e tesztek szerint is jó egyezést mutatnak a korábbi irodalmi direkt BW eredményekkel.

#### 4.2.1. Alkalmazhatóság

Gyakran előfordul, hogy csak háromnál kevesebb hullámsávból vannak fénygöréink, pl. csak  $BV$  vagy  $VI_C$  mérések állnak rendelkezésünkre egy-egy változóról. Szintén előfordulhat differenciális fotometria esetén, hogy az összehasonlítóknak és így a változóknak sem ismerjük a szín-nullpontjait, vagyis az intersztelláris vörösödéssel korrigált átlagos színeket. Megvizsgáltuk ezért azt is, hogy miként használható az IP módszer, amennyiben a fenti okok miatt korlátozott bemenő információ áll csak rendelkezésre. Természetesen ilyen körülmények közt a fénygörék minősége még az eddigieknél is jobban befolyásolja az eredmények megbízhatóságát, így ezeket a tesztek két igen jó fotometriájú csillag, az SW And és az RR Gem adatain végeztük el.



**4.11. ábra.** ABSZOLÚT  $I_C$  FÉNYESSÉGEK ÖSSZEFÜGGÉSE A PERIÓDUSSAL ÉS FÉMTARTALOMMAL. fekete és szürke szimbólumok sorrendben az IP módszer eredményeit és az irodalmi adatokat jelölik. Folytonos vonal az  $M_{10}(\log P, \log Z)$  relációt jelöli Catelan, Pritzl & Smith (2004, 3. egyenlőség) nyomán.



**4.12. ábra.** PERIÓDUS- $V$  FÉNYESSÉG- $(V - I_C)$  SZÍN ÖSSZEFÜGGÉS Kovács & Walker (2001, 8. egyenlőség) nyomán. Az egyenletben szereplő konstans ( $C$ ) értékét legkisebb négyzetes illesztéssel határoztuk meg külön az IP eredményekre és az irodalmi BW adatokra. A  $P(V, I_C)$  relációban szereplő konstans hibahatáron belül megegyezik mindkét adathalmazra, ahogy az illesztés reziduálja is azonos (0.03 mag). Folytonos és szaggatott vonalak az  $y = x + C$  egyenlőségeket jelölik sorrendben a saját IP és irodalmi BW adatokra.

### Kétszín ( $BV$ vagy $V I_C$ ) fénygörbék

Mivel a kiindulási  $T_{\text{eff}}(\varphi)$  és  $V_p(\varphi)$  görbékét részben  $I_C(\varphi)$  alapján határozzuk meg, így ha csak  $B$  és  $V$  fotometria áll rendelkezésünkre, akkor az effektív hőmérséklet kiindulási görbéjét



más összefüggésből kell számítani, pl. Alonso, Arribas & Martínez-Roger (1999, 2. táblázat és 3. egyenlőség) empirikus  $T_{\text{eff}}(B - V, [\text{Fe}/\text{H}])$  összefüggéséből, és csak Liu (1991) minta  $V_p(\varphi)$  görbéjét használhatjuk.

A két tesztobjektumra így kapott eredményeinket a 4.5. táblázat foglalja össze. A megjegyzés oszlopban 'bv' illetve 'vi' jelzi, mely két fotometriai sávot vettük figyelembe. A 'bv' esetben értelemszerűen a négyből csak két beállítással tudtuk lefuttatni a programunkat.

Az IP módszer, ha csak  $V$  és  $I_C$  színeket veszünk figyelembe, kb. 0.1 magnitúdóval halványabb illetve fényesebb  $M_{I_0}$  értéket, 0.2  $R_{\odot}$ -al nagyobb illetve kisebb sugarat, és 0.1  $\mathfrak{M}_{\odot}$ -al nagyobb illetve kisebb tömeget ad sorrendben az SW And-ra illetve az RR Gem-re. Az átlaghőmérséklet mindkét csillagnál kb. 20–40 K-el alacsonyabb ezeknél a megoldásoknál. Ezek az értékek sem térnek el jelentősen a más módszerekkel kapott irodalmi megoldásoktól, az egyezések az RR Gem esetén még valamivel jobb is, mint a  $BVI_C$  színekből kapott esetben volt.

Ha a  $B$  és  $V$  fénygörbéket használjuk, a megoldások 30–40 K-el forróbbak, és bár az SW And-ra kapott értékek még elfogadhatóak, a korábbi irodalmi értékektől erősebben eltérnek, mint a  $BVI_C$  megoldásaink. Ugyanakkor az RR Gem esetében a  $BV$  megoldás túlságosan fényes abszolút vizuális magnitúdót és túl nagy sugarat illetve tömeget ad.

Következésképp elmondhatjuk, hogy az IP módszer két színnel használva csak  $V$  és  $I_C$  színekkel ad elfogadható eredményt. Ez összhangban van más szerzők azon megállapításával, hogy a direkt BW analízis pontosabb megoldást ad hosszabb hullámhosszaktól származó fénygörbékkel ( $VJHK$ ) mint rövidebb hullámhosszúaknál ( $UB$ ).

### Ismeretlen szín-nullpontok

A szín-nullpontokat a megfigyelések alapján csak akkor rögzíthetjük az IP módszer alkalmazásakor, ha az interstelláris és atmoszférikus vörösödésre is megfelelően korrigálunk, illetve maga a megfigyelés szolgáltat színértékeket. Ez utóbbi nem teljesen nyilvánvaló, mert előfordulhat pl. relatív fotometria esetén, hogy magának az összehasonlító csillagnak nem ismertek a standard fotometriai színei. Ha az említett feltételek nem teljesülnek, a színek nullpontjai nem rögzíthetők, ám az IP módszer ettől még esetleg alkalmazható úgy, hogy magukat a nullpontokat is illesztendő paraméternek tekintjük, így keresve a megoldást.

Az illesztésnél szabadon variálni engedett nullponttal kapott megoldásainkat a 4.5. táblázat sorolja fel, a megjegyzés oszlopban 'zp'-vel jelöltük ezeket a sorokat. Ezeknél a megoldásoknál az illesztésből kapott és a fotometriából meghatározott szín-nullpontok eltéréseit is megadjuk a táblázat utolsó két oszlopában. A két jó fotometriájú tesztobjektummal történő vizsgálataink

**4.5. táblázat.** ALKALMAZHATÓSÁGI TESZTEK AZ SW AND ÉS RR GEM ADATOKON. A csak két szint ( $V_{IC}$  illetve  $BV$ ) figyelembevevő megoldásokat 'vi' illetve 'bv' jelöli a megjegyzés oszlopban, míg 'zp' azokat a megoldásokat jelöli, amelyeknél a szín-nullpontokat ismeretlennek tekintettük, és ezek is illesztendő paraméterek voltak. Ezeknél a megoldásoknál az utolsó két oszlopban megadtuk az illesztés által megadott szín-nullpont eltérését a mérésből meghatározott értéktől.

GCVS név ( $\log P$ ) megjegyzés*	[Fe/H]	$M_{V_0}$ [mag]	$d$ [pc]	$R_0$ [ $R_{\odot}$ ]	$T_{\text{eff}0}$ [K]	$\mathfrak{M}$ [ $\mathfrak{M}_{\odot}$ ]	$\log g_{\text{st}}$	$\Delta(B-V)_0$ [mag]	$\Delta(V-I)_0$ [mag]
<b>SW And (-0.354)</b>									
A vi	-0.10	0.92	527	4.63	6609	0.64	2.91		
B vi	-0.10	0.91	529	4.65	6609	0.65	2.91		
C vi	-0.10	0.89	534	4.69	6609	0.66	2.91		
D vi	-0.10	0.91	531	4.66	6608	0.65	2.91		
C bv	-0.10	1.14	475	4.08	6681	0.46	2.88		
D bv	-0.10	1.13	479	4.11	6680	0.47	2.88		
A bvi zp	-0.10	0.95	520	4.42	6707	0.57	2.90	0.005	0.027
B bvi zp	-0.10	0.98	512	4.41	6665	0.56	2.90	-0.005	0.016
C bvi zp	-0.10	0.93	525	4.47	6705	0.58	2.90	0.005	0.026
D bvi zp	-0.10	0.92	527	4.48	6708	0.59	2.90	0.006	0.027
A vi zp	-0.10	0.69	584	4.75	6842	0.68	2.92		0.062
B vi zp	-0.10	0.70	583	4.75	6841	0.68	2.92		0.061
C vi zp	-0.10	0.68	589	4.80	6840	0.70	2.92		0.061
D vi zp	-0.10	0.67	591	4.81	6842	0.70	2.92		0.062
<b>RR Gem (-0.401)</b>									
A vi	-0.15	0.80	1168	4.52	6858	0.71	2.98		
B vi	-0.15	0.79	1171	4.54	6856	0.71	2.98		
C vi	-0.15	0.77	1183	4.58	6859	0.73	2.98		
D vi	-0.15	0.77	1183	4.58	6859	0.73	2.98		
C bv	-0.15	0.40	1400	5.34	6914	1.08	3.02		
D bv	-0.15	0.40	1401	5.34	6914	1.08	3.02		
A bvi zp	-0.15	0.66	1241	4.74	6907	0.80	2.99	0.000	0.012
B bvi zp	-0.15	0.63	1258	4.83	6890	0.84	2.99	-0.004	0.008
C bvi zp	-0.15	0.63	1259	4.76	6940	0.81	2.99	0.007	0.019
D bvi zp	-0.15	0.64	1255	4.81	6893	0.83	2.99	-0.004	0.008
A vi zp	-0.15	0.74	1199	4.52	6946	0.71	2.98		0.022
B vi zp	-0.15	0.72	1205	4.51	6973	0.70	2.98		0.029
C vi zp	-0.15	0.73	1202	4.57	6918	0.73	2.98		0.015
D vi zp	-0.15	0.77	1183	4.57	6865	0.73	2.98		0.002

\*: Az A, B, C, és D jelölésekről lásd a 4.1. táblázatot.

arra mutatnak, hogy így is megbízható eredményeket ad az IP módszer, az illesztett nullpont a mérésekből meghatározott értékéhez közel, 0.01–0.03 magnitúdón belül áll be, még akkor is, ha 0.1 magnitúdó távolságból indítjuk.<sup>9</sup> Ezek a kicsiny eltérések csak elhanyagolható mértékben befolyásolják  $M_{V_0}$ -ra,  $R_0$ -ra és  $\mathfrak{M}$ -re kapott megoldásainkat. Megjegyezzük, hogy  $m_{V_0}$ , vagyis a látszó  $V$  magnitúdó-nullpont esetleges pontatlan ismerete csak a távolságmeghatározást befolyásolja, semmilyen egyéb eredményt nem.

### Kétszín ( $V_{IC}$ ) fénygörbék és ismeretlen szín-nullpontok

Végül kipróbáltuk azt is, milyen megoldásokat kaphatunk az IP módszerrel, ha sem  $B$  mérésünk nincsen, sem a  $(V - I_C)_0$  nullpontot nem ismerjük. Ezeknek a futtatásoknak az eredményei a 4.5. táblázat 'vi zp'-vel jelölt soraiban szerepelnek. A két csillagra még ezek a megoldások is elfogadhatók. Hangsúlyozzuk azonban, hogy ennyire korlátozott bemenő adatok mellett a fénygörbék fotometriai pontossága még fontosabbá válik a módszer alkalmazhatósága szempontjából. Gyengébb minőségű fénygörbék esetében könnyen kaphatunk megbízhatatlan megoldásokat.

#### 4.2.2. A Konkoly Blazhko Survey modulálatlan RRab csillagai

A KBS keretében (lásd 1.2. rész) megfigyelt 16, modulációt nem mutató RRab csillag többszín-fotometriai fénygörbéit már publikáltuk (Jurcsik, Sódor, Váradi et al., 2006; Sódor, Jurcsik, Nagy et al., 2007; Jurcsik, Sódor, Hurta et al., 2008b,c; Kun, Sódor, Jurcsik et al., 2008). Ezek a mérések 2–4 sávban készültek ( $V_{IC}$ ,  $BVI_C$  vagy  $BVR_{IC}$  szűrőkkel), nagy fotometriai pontosságot és jó fázislefedettséget képviselnek. Meghatároztuk mind a 16 objektum fotometriai fém tartalmát a fénygörbék Fourier-paramétereinek alapján. A közeljövőben tervezzük ezeknek a csillagoknak az analízisét az IP módszer segítségével.

### 4.3. Az IP módszer és a moduláció

Jurcsik, Benkő & Szeidl (2002a) megmutatta, hogy a Blazhko-csillagok modulációja során a  $V$  fénygörbe amplitúdója és a  $V_{\text{rad}}$  sebességgörbe amplitúdója másképp függ egymástól, mint modulálatlan esetben (Liu, 1991), amit eddig az IP módszerben a Liu-féle minta  $V_{\text{rad}}$  görbénél

<sup>9</sup> Az RRab csillagok szín-nullpontjai ilyen pontossággal mindig ismertek, hiszen a horizontális ág magasságában az instabilitási sáv szélessége határt szab a lehetséges szintartományoknak.

alkalmaztunk. Az  $A_V - A_{V_{\text{rad}}}$  továbbra is lineáris függvénnyel közelíthető ám a függés meredekebb és maximális amplitúdónál érjük el a Liu-féle egyenest (Lásd Jurcsik, Benkő & Szeidl 2002a, 1. és 2. ábrák). Liu (1991) több modulálatlan objektum adatpontjára illesztett egyenesének meredeksége  $30 \text{ km s}^{-1}/\text{mag}$ , míg egy-egy modulált csillag különböző Blazhko-fázisában kapott adatpontjaira illeszkedő egyenesek ennél meredekebbek,  $35\text{--}45 \text{ km s}^{-1}/\text{mag}$  körüli értékekkel. Egy Blazhko-csillag maximális pulzációs amplitúdójú fázisa kivételével egy bizonyos  $V$  fénygörbe amplitúdóhoz kisebb  $V_{\text{rad}}$  amplitúdó tartozik mint egy ugyanolyan  $V$  amplitúdójú modulálatlan csillagnál.

E tapasztalatok alapján Blazhko-csillagoknál az IP módszer futtatásakor a kiinduló  $V_{\text{rad}}(\varphi)$  görbe amplitúdóját mind a Liu-féle minta alkalmazásakor, mind a 4.2 egyenlőség  $V_{\text{rad}}(I_C(\varphi))$  összefüggésének használatakor átskáláztuk. Mivel a Blazhko-csillagokra érvényes  $A_{V_{\text{rad}}}(A_V)$  összefüggés pontos meredekségét nem ismerjük, illetve a rendelkezésre álló adatok alapján az is lehetségesnek tűnik, hogy ez a meredekség csillagról-csillagra különböző, ezért több különböző  $\Delta A_{V_{\text{rad}}}/\Delta A_V$  meredekséggel is futattuk az eljárást. A nullpontot minden egyes meredekséghez és Blazhko-csillaghoz úgy választottuk meg, hogy az adott csillagra jellemző maximális  $V$  amplitúdónál érje el  $V_{\text{rad}}$  amplitúdója a Liu (1991) összefüggésének megfelelő értéket.

Szintén nincs információnk a  $V_{\text{rad}}(\varphi)$  görbe alakjának modulációs változásairól, ezért Blazhko-csillagoknál mindkét kiindulási mintát két-két súlyfaktoral alkalmaztunk, akár csak a modulálatlan tesztcillagok esetében. Ezúttal azonban az ottaninál kisebb súlyokat használtunk, hogy az illesztő algoritmus valamivel szabadabban változtathassa a  $V_{\text{rad}}(\varphi)$  megoldásgörbe alakját az IP módszer futtatásakor.

#### 4.4. Az MW Lyrae modulációjának vizsgálata az IP módszerrel

Az IP módszert eredetileg RR Lyrae csillagok modulációjának vizsgálatára dolgoztuk ki, bár a fentebb bemutatott teszteredményeink szerint – legnagyobb örömünkre – modulálatlan csillagok esetében a direkt BW analízishez hasonlóan jól használhatónak bizonyult. A 3.4. fejezetben ismertetett szabályosan és erősen modulált MW Lyrae nagyon alkalmasnak tűnik arra, hogy az eljárásunkat elsőként ezen a Blazhko-csillagon próbáljuk ki.

#### 4.4.1. Felhasznált adatok

A 3.4.1. pontban már szoltunk az MW Lyr méréseinkről. Most a  $BV_{IC}$  mérések közép-görbéit, a fázismodulációt kiküszöbölt időtranszformált adatsorok közép-görbéit illetve a 20 Blazhko-fázis pulzációs görbéit fogjuk használni. A 20 fázis szín-fényesség és szín-szín hurkait a 4.13. ábrán láthatjuk.

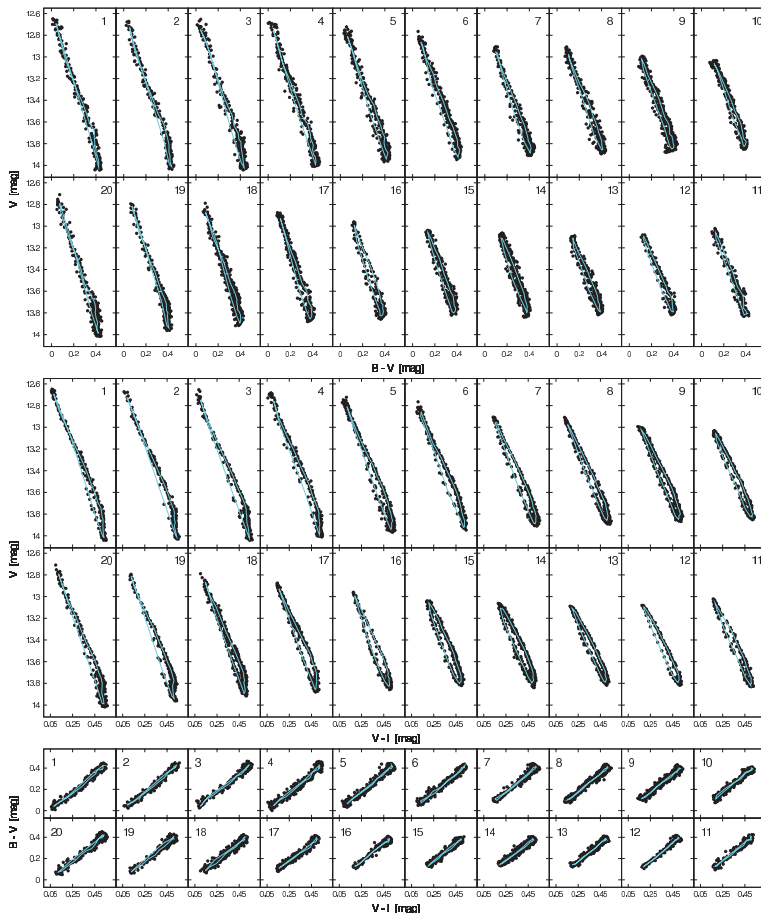
#### 4.4.2. Állandó és átlagos fizikai paraméterek

A fém tartalom, a távolság és a tömeg a Blazhko-fázistól független állandó paraméterek, így ezeket a teljes fénygörbe közép-görbéiből határozzuk meg. A későbbiekben, mikor az egyes Blazhko-fázisok fénygörbéire futtatjuk az IP módszert, ezeket a mennyiségeket rögzítjük. A közép-görbékéből a Blazhko-ciklus során változó paraméterekre pedig átlagos értékeket kapunk.

Először  $[\text{Fe}/\text{H}]$  értékét kell meghatározni, mivel az az IP módszer egyik bemenő paramétere. Az MW Lyr-ről nincs hozzáférhető spektroszkópiai mérés, így a fém tartalmat a fénygörbe alakjából Jurcsik & Kovács (1996) empirikus formulájával határozzuk meg. Ilymódon  $-0.6$  dex illetve  $-0.4$  dex értékeket kapunk  $[\text{Fe}/\text{H}]$ -ra az eredeti és az időtranszformált adatok közép-görbéjéből (ez utóbbról lásd a 3.4.2. pontot). Az eltérés nem túlságosan nagy, így a kettő átlagát,  $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.5$  dex-et fogadtuk el az MW Lyr fém tartalmára.

Mint a 3.4.2. pontban már említettük, az MW Lyr erős fázismodulációja torzítja a közép-görbe alakját. A fázismodulációt egy egyszerű időtranszformációval ki tudtuk küszöbölni, így egy modulálatlan RR Lyrae fénygörbéjéhez már jobban hasonlító alakú közép-görbét kaptunk. Nem tudjuk azonban, hogy milyen lenne egy Blazhko RR Lyrae csillag pulzációs fénygörbéje ha nem lenne modulált (Jurcsik, Benkő & Szeidl, 2002a). Ezért mindkét közép-görbére lefuttattuk az IP módszert, mégpedig három-három különböző  $\Delta A_{V_{\text{rad}}}/\Delta A_V$  meredekség mellett. Mindkét közép-görbéhez tartozó minden egyes  $\Delta A_{V_{\text{rad}}}/\Delta A_V$  meredekség mellett négyszer futtattuk az eljárást a kétféle kiinduló  $V_{\text{rad}}(\varphi)$  görbét használva 2-2 súlyfaktorial. Ebből a négy-négy futtatásból a fizikai paraméterekre kapott átlag- és szórásértékeket soroljuk fel a 4.6. táblázatban.

Az időtranszformált adatsor közép-görbéjét a teljes adatsor jobb reprezentációjának tekintjük, mert a fázis- vagy periódusmoduláció közép-görbére gyakorolt torzító hatása ebben nem nyilvánul meg. A 4.6. táblázatból az időtranszformált adatsor közép-görbéjére közepes ( $\Delta A_{V_{\text{rad}}}/\Delta A_V = 41 \text{ km s}^{-1}/\text{mag}$ ) meredekség mellett kapott megoldást használjuk a továbbiakban, rögzítve az ehhez tartozó távolság és tömeg értékeket. Az itt kapott  $\mathfrak{M} = 0.69 \mathfrak{M}_{\odot}$  tömeg valamivel nagyobb, mint a csillagfejlődési modellek szerinti tömeg, mely ilyen fém tar-



**4.13. ábra.** AZ MW LYR SZÍN-FÉNYESSÉG ÉS SZÍN-SZÍN HURKAI A MODULÁCIÓ 20 FÁZISÁBAN. Ez az első olyan kiterjedt Blazhko-adatsor, mely ilyen részletes vizsgálatot tesz lehetővé. A berajzolt görbék az egyes Blazhko-fázisra illesztett pulzációs görbékből eredő hurkok.

**4.6. táblázat.** AZ MW LYR ÁTLAGOS FIZIKAI PRARMÉTEREI. A kétféle középgörbére 3-3  $\Delta A_{V_{\text{rad}}}/\Delta A_V$  meredekség mellett 4-4 futtatásból kapott eredményekből számított átlag- és szórásértékek.

$\bar{d}$ [pc]	$\overline{M_V}$ [mag]	$L/L_\odot$	$T_{\text{eff}}$ [K]	$R/R_\odot$	$\log g_{\text{stat}}$	$\mathfrak{M}/\mathfrak{M}_\odot$
szórásértékek						
időtranszformált adatsor középgörbéje						
$\Delta A_{V_{\text{rad}}}/\Delta A_V = 37 \text{ km s}^{-1}/\text{mag}$						
3595	0.74	44.7	6892.5	4.64	2.982	0.76
147	0.09	3.6	2.5	0.19	0.010	0.08
$\Delta A_{V_{\text{rad}}}/\Delta A_V = 41 \text{ km s}^{-1}/\text{mag}$						
3460	0.83	41.4	6891.9	4.47	2.973	0.69
145	0.09	3.4	2.5	0.18	0.010	0.07
$\Delta A_{V_{\text{rad}}}/\Delta A_V = 45 \text{ km s}^{-1}/\text{mag}$						
3343	0.90	38.6	6890.3	4.32	2.965	0.63
138	0.09	3.2	2.4	0.18	0.010	0.06
eredeti adatsor középgörbéje						
$\Delta A_{V_{\text{rad}}}/\Delta A_V = 37 \text{ km s}^{-1}/\text{mag}$						
3367	0.89	39.0	6889.4	4.35	2.966	0.64
106	0.07	2.4	2.7	0.14	0.009	0.05
$\Delta A_{V_{\text{rad}}}/\Delta A_V = 41 \text{ km s}^{-1}/\text{mag}$						
3223	0.98	35.7	6888.0	4.16	2.956	0.57
111	0.08	2.4	2.3	0.14	0.008	0.05
$\Delta A_{V_{\text{rad}}}/\Delta A_V = 45 \text{ km s}^{-1}/\text{mag}$						
3104	1.06	33.2	6887.0	4.01	2.947	0.52
109	0.08	2.3	2.3	0.14	0.009	0.05

talom mellett a horizontális ágon az instabilitási sávba eső csillagokra vonatkozik (pl., ACS Survey, Dotter, Chaboyer, Jeremić et al. 2007; Padova evolutionary database, Salasnich, Girardi, Weiss et al. 2000; Y2 evolutionary tracks, Demarque, Woo, Kim et al. 2004). Az IP módszer a tömeget a pulzációs egyenlettel számítja (4.1. egyenlőség), ami azonban a direkt BW analízissel kapott paraméterekre is esetenként túl nagy tömeget ad (lásd pl. 4.2. táblázat, WY Ant és UU Cet Kovács (2003) BW eredményeiből számított tömeg értékeit). Ennek az ellentmondásnak a feloldása nem célja jelen munkánknak. Fontos ugyanakkor hangsúlyozni,

hogy a középgörbe-megoldások közötti választás a későbbiekben ismertetett eredményeinket lényegében nem befolyásolja. A fizikai paraméterek Blazhko-ciklussal történő változásaira kapott megoldásaink ugyanolyan jellegűek és amplitúdójuk, bármely távolság–tömeg kombinációt is választjuk, ettől a választástól csak a paraméterek átlagértékei függenek.

#### 4.4.3. Fizikai paraméterek változása a pulzáció során

Az IP módszert a tömeg, a távolság és a fémtartalom rögzítése után mind a 20 Blazhko-fázisstartomány fénygörbéire lefuttattuk, mégpedig fázisonként többféle beállítással. Futtattuk a módszert a  $B$ ,  $V$  és  $I_C$  fénygörbékre illetve a  $V$ ,  $(B - V)$  és  $V - I_C$  görbékre, használtuk a Liu-féle illetve a  $V_p(I_C(\varphi))$  kiindulási pulzációssebesség-görbéket és kétféle súlyfaktort alkalmaztunk. Ezeknek a lehetőségeknek mind a nyolc lehetséges kombinációjával futtatva az IP módszert a fizikai paraméterekre kapott 8-8 kissé eltérő megoldás jelzi e mennyiségek bizonytalanságát.

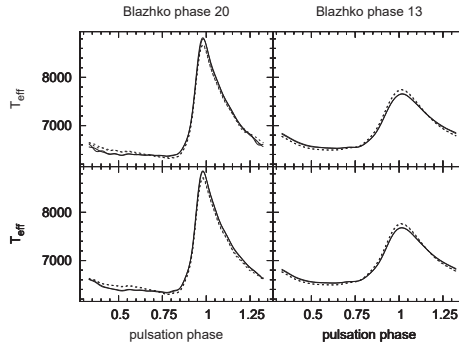
A 4.14–4.18. ábrák paneljein a  $T_{\text{eff}}(\varphi)$ ,  $L(\varphi)/L_\odot$ ,  $R(\varphi)/R_\odot$ ,  $V_{\text{rad}}(\varphi)$  és  $\log g_{\text{eff}}(\varphi)$  pulzáció szerinti változásait követhetjük a Blazhko-moduláció legkisebb és legnagyobb amplitúdójú fázisaiban. A felső panelek megoldásainál a 4.2. egyenlet szerinti kiindulási  $V_p(I_C(\varphi))$  pulzációssebesség-görbét, míg az alsóknál Liu (1991) minta  $V_p(\varphi)$  görbéjét használtuk. Folytonos vonalak a nagyobb, szaggatott vonalak pedig a kisebbik súlyfaktossal kapott megoldást mutatják. Ez utóbbi esetben a  $V_p(\varphi)$  görbe jobban eltávolodhatott a kiindulástól. A paneleken berajzoltuk a  $B$ ,  $V$  és  $I_C$  fénygörbékre, illetve a  $V$ ,  $(B - V)$  és  $V - I_C$  görbékre kapott megoldásokat is, ám ezek közt elenyésző különbség figyelhető csak meg.

A 4.19. ábra az MW Lyr  $V$  fénygörbéire illesztett Fourier-görbéket ábrázolja 20 Blazhko-fázisstartományban az időtranszformált alakban. Megjegyezzük, hogy az időtranszformáció nem érinti az egyes Blazhko-fázisokra kapott IP megoldásainkat, mert a transzformáció hatása ilyen kis fázisstartományon elhanyagolható. Az időtranszformáció itt csak annyi szerepet játszik, hogy következtében a felszálló ág közepe minden Blazhko-fázisban ugyanarra a pulzációs fázisra esik.

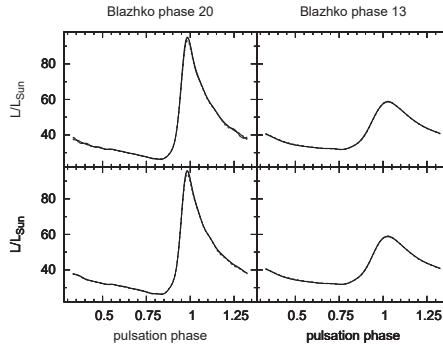
A 4.20–4.24. ábrák a  $T_{\text{eff}}(\varphi)$ ,  $L(\varphi)/L_\odot$ ,  $R(\varphi)/R_\odot$ ,  $V_{\text{rad}}(\varphi)$  és  $\log g_{\text{eff}}(\varphi)$  megoldásgörbéket mutatják 20-20 modulációs fázisra. A bal oldali panelek megoldásainál a 4.2. egyenlet szerinti kiindulási pulzációssebesség-görbét, míg a jobb oldaliaknál Liu (1991) minta  $V_p(\varphi)$  görbéjét használtuk. A felső panelek a nagy súlyfaktossal kapott megoldást mutatják, míg alul a kisebbik súly szerinti megoldások láthatók.

A luminozitás- és hőmérséklet-görbék alig függenek a kiindulási  $V_p(\varphi)$  görbe és a hozzá tartozó súlyfaktor megválasztásától. E görbék amplitúdója erősen változik a Blazhko-ciklus során.

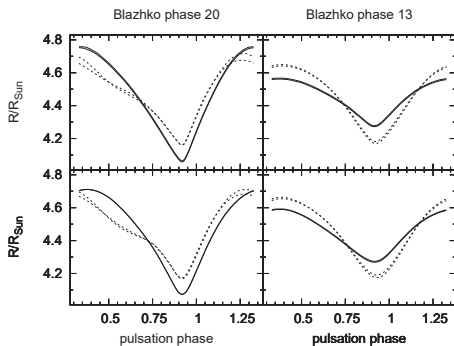




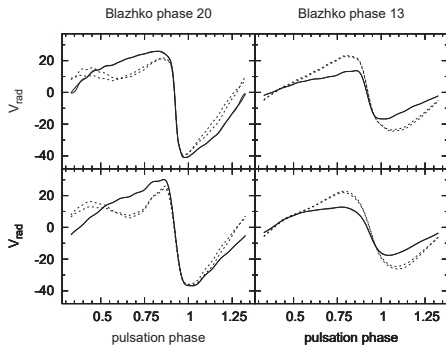
**4.14. ábra.**  $T_{\text{eff}}$  VÁLTOZÁSA A PULZÁCIÓ SORÁN. A bal oldali panelek egy nagy amplitúdójú Blazhko-fázist mutatnak, a jobb oldaliak pedig egy kis amplitúdójút. A felső panelek megoldásainál a 4.2. egyenlet szerinti kiindulási  $V_p(I_C(\varphi))$  pulzációssebesség-görbét, míg az alsóknál Liu (1991) minta  $V_p(\varphi)$  görbéjét használtuk. Folytonos vonalak a nagyobb, szaggatott vonalak pedig a kisebbik súlyfaktorialt kapott megoldást mutatják. A paneleken berajzoltuk a  $B$ ,  $V$  és  $I_C$  fénygörbékre illetve a  $V$ ,  $(B - V)$  és  $(V - I_C)$  görbékre kapott megoldásokat is, ám ezek közt elenyésző a különbség.



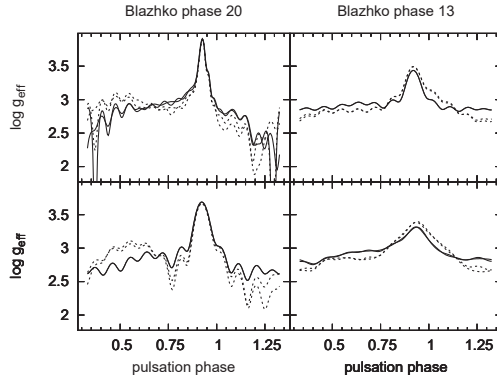
**4.15. ábra.**  $L/L_{\odot}$  VÁLTOZÁSA A PULZÁCIÓ SORÁN. Ugyanaz mint a 4.14. ábra csak a luminozitásra.



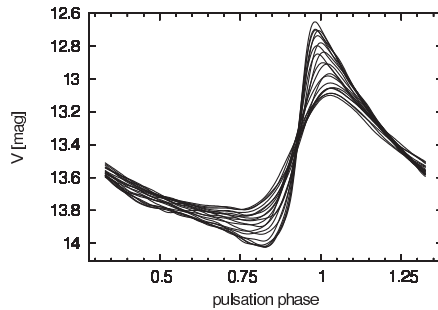
**4.16. ábra.**  $R/R_{\odot}$  VÁLTOZÁSA A PULZÁCIÓ SORÁN. Ugyanaz mint a 4.14. ábra csak a sugárra.



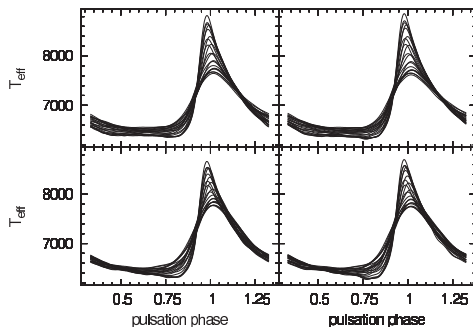
**4.17. ábra.**  $V_{\text{rad}}$  VÁLTOZÁSA A PULZÁCIÓ SORÁN. Ugyanaz mint a 4.14. ábra csak a radiális sebességre.



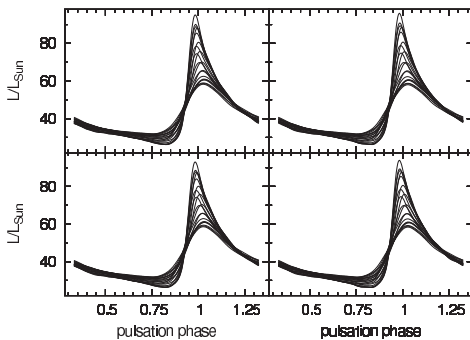
**4.18. ábra.**  $\log g_{\text{eff}}$  VÁLTOZÁSA A PULZÁCIÓ SORÁN. Ugyanaz mint a 4.14. ábra csak  $\log g_{\text{eff}}$ -re.



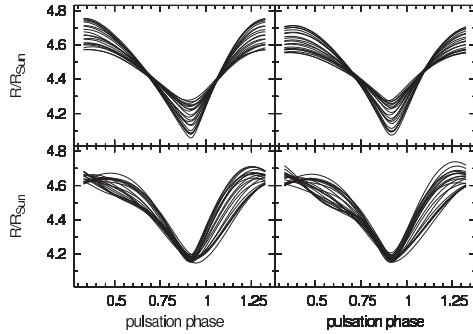
**4.19. ábra.** AZ MW LYR IDŐTRANSZFORMÁLT  $V(\phi)$  FÉNYGÖRBÉI 20 BLAZHKO-FÁZISBAN.



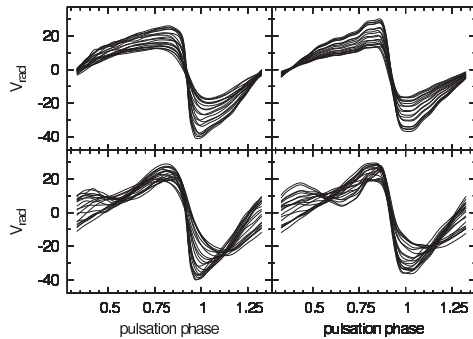
**4.20. ábra.**  $T_{\text{eff}}(\varphi)$  PULZÁCIÓS VÁLTOZÁSA 20 BLAZHKO-FÁZISBAN. A bal oldali panelek megoldásainál a 4.2. egyenlet szerinti kiindulási  $V_p(I_C(\varphi))$  pulzációssebesség-görbét, míg a jobb oldaliaknál Liu (1991) minta  $V_p(\varphi)$  görbét használtuk. A felső panelek a nagy súlyfaktossal kapott megoldást mutatják, míg alul a kisebbik súly szerinti megoldások láthatók.



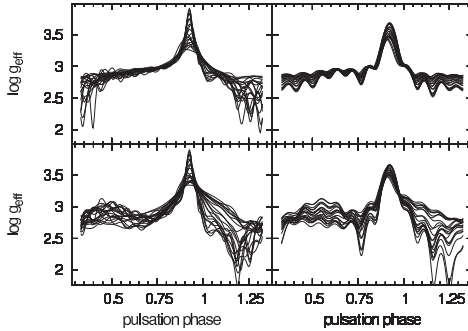
**4.21. ábra.**  $L/L_{\odot}$  VÁLTOZÁSA 20 BLAZHKO-FÁZISBAN. Ugyanaz mint a 4.20. ábra csak a luminozitásra.



4.22. ábra.  $R/R_{\odot}$  VÁLTOZÁSA 20 BLAZHKO-FÁZISBAN. Ugyanaz mint a 4.20. ábra csak a sugárra.



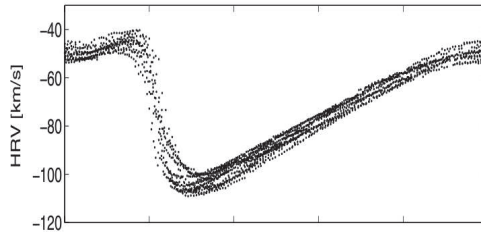
4.23. ábra.  $V_{\text{rad}}$  VÁLTOZÁSA 20 BLAZHKO-FÁZISBAN. Ugyanaz mint a 4.20. ábra csak a radiális sebességre.



**4.24. ábra.**  $\log g_{\text{eff}}$  VÁLTOZÁSA 20 BLAZHKO-FÁZISBAN. Ugyanaz mint a 4.20. ábra csak  $\log g_{\text{eff}}$ -re.

A hőmérséklet a legnagyobb amplitúdónál 6300 és 8800 K között változik, míg kis amplitúdónál 6500–7700 K a változás tartománya. A luminozitás legnagyobb amplitúdónál 26–95  $L_{\odot}$  között változik, kis amplitúdójú fázisban a változás 31-től 58  $L_{\odot}$ -ig terjed. Az amplitúdók 50%-ot változnak. Ezek a megoldásaink igen stabilak, alig függenek az IP módszer beállításától.

Jelentős változások figyelhetők meg a sugár, a radiális sebesség és  $\log g_{\text{eff}}(\varphi)$  görbéiben is. Itt azonban már nem csak a Blazhko-fázis szerint különböznek a görbealakok, de az IP módszer belső paraméterei is befolyásolják a megoldásgörbéinket. Látható, hogy ha kis súlyfaktoral költjük meg  $V_p(\varphi)$  variálását, a megoldások hasonló alakhoz konvergálnak függetlenül a kiindulási minta megválasztásától. A súlyfaktortól függően a megoldások némileg eltérőek. Nagy súlyfaktor esetén a sugárváltozás jelentős amplitúdóváltozást szenved a modulációval, míg kisebb súlyfaktornál nem annyira a sugárváltozás amplitúdója, mint az alakja változik a moduláció során. Egyetlen Blazhko-csillagról, az RR Lyr-ről publikáltak jó Blazhko-fázisfedettségű radiálissebesség-méréseket (Chadid & Chapellier, 2006). Ezeket az adatokat mutatja a 4.25. ábra. Ezek a valódi radiálissebesség-mérések nem mutatják kettős hullám nyomát, amit az IP módszer kis súlyfaktor esetén nagy amplitúdójú Blazhko-fázisoknál ad (4.23. ábra alsó paneljei). Valószínűsíthető ezért, hogy a nagy súlyfaktoral kapott megoldásaink állnak a valósághoz közelebb, vagyis a  $V_p(\varphi)$  görbének elsősorban az amplitúdója és kevésbé az alakja modulált. Ebben az esetben  $R(\varphi)$  amplitúdója is 50%-nyit változik a modulációval.



**4.25. ábra.** CHADID & CHAPPELLIER (2006)  $V_{\text{rad}}$  MÉRÉSEI AZ RR LYR-RÓL. Az RR Lyr modulációja során nem változik jelentősen a radiális sebesség-görbe alakja, ami arra utal, hogy az MW Lyr esetében a nagy súlyfaktor mellett kapott megoldások állhatnak közelebb a valóshoz (4.23. ábra felső paneljei). Forrás: Chadid & Chapellier (2006, 9. ábra).

#### 4.4.4. Átlagos fizikai paraméterek változása a Blazhko-ciklus során

Az előző fejezetek Blazhko-csillagainál már rámutattam, hogy fotometriai mennyiségekből többféleképp számíthatunk átlagértékeket a pulzációs ciklusra: intenzitás illetve magnitúdó szerint átlagolva, továbbá színindexeknél az átlagolás és a különbségképzés két lehetséges sorrendje szerint. Bono, Caputo & Stellingwerf (1995) megmutatta, hogy egyik átlagérték sem feleltethető meg a sztatikus egyenértéknek az RR Lyrae csillagok paramétereinek teljes tartományán. Ennélfogva az átlagos fizikai paraméterek Blazhko-fázis szerinti változásaira ezekből az egyszerű fotometriai átlagértékekből nem következtethetünk egyértelműen. Az MW Lyr 20 Blazhko-fázisára a fotometriai adatsorokból levezetett közepes mennyiségeket a 4.26. ábra bal oldali paneljein tüntettük fel. A függőleges tengelyeken kerek zárójel a magnitúdó szerinti, hegyes zárójel az intenzitás szerinti átlagolást jelöli. A pulzációs periódus Blazhko-fázis szerinti változása a fázismoduláció periódusmodulációként való értelmezéseként adódik, ami az  $f_0$  pulzációs frekvenciakomponens fázisának változásaiból vezettünk le (lásd 3.4.2. fejezet). A 4.26. ábrán feltüntetett átlagos fotometriai mennyiségek 0.01–0.02 mag változásokat mutatnak, ám ezek a változások különböző átlagolási módoknál ellentétes irányúak, így fizikai értelmezésük nem egyértelmű.

Az IP módszer által a fizikai paramétereknek az egyes Blazhko-fázisokra szolgáltatott pulzációs változásai viszont már alkalmasak arra, hogy belőlük egyértelműen átlagos mennyiségeket számítsunk. Ezeket az átlagos fizikai mennyiségeket ábrázolják a 4.26. ábra közép-

ső és jobb oldali paneljei, sorrendben a  $V_p(I_C)$  összefüggésből számított és a Liu-féle kiinduló pulzációsebesség-görbék használata esetén. Itt a bizonytalanság mértékének szemléltetése céljából minden Blazhko-fázisban négy-négy pontot tüntettünk fel, melyeket az IP módszer említett négy különböző beállítása mellett kaptunk.

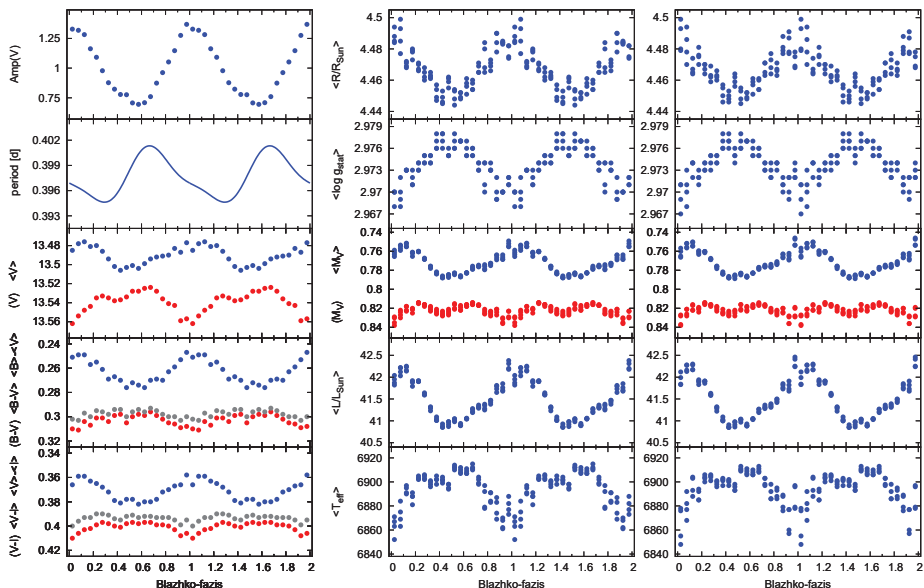
A 4.26. ábra egyértelműen mutatja, hogy az átlagos fizikai paraméterek a Blazhko-ciklus során változnak és ez az eredmény – sem a változás iránya/fázisa, sem az amplitúdója – nem függ az IP módszer belső működési paramétereinek megválasztásától. Tesztjeink segítségével arról is megbizonyosodtunk, hogy a választott tömeg és távolság kombináció sem befolyásolja ezt az eredményt. A 4.6. táblázat bármely más megoldását használva is hasonló jellegű és nagyságú változásokat kapunk az átlagos fizikai paraméterekben, csak a középértékek tolódnak el a táblázatban megadott átlagérékeknek megfelelően.

Most először sikerült kimutatni egy Blazhko-csillag átlagos fizikai tulajdonságainak változásait a moduláció során. Ezek a változások igen kicsik, mindössze 1–2% körüliek. Az MW Lyr nagy amplitúdójú állapotában mintegy 50 K-el hűvösebb, sugara  $0.04 R_\odot$ -al, luminozitása pedig  $1 L_\odot$ -al nagyobb mint kis amplitúdójú Blazhko-fázisban. Bár nem zárható ki, hogy ezek az eredmények a háttérben meghúzódó bonyolultabb folyamatok valamiféle véletlen összjátékából eredve tévesek lennének, mégis a legvalószínűbb magyarázat, hogy egyszerűen a globális fizikai paraméterek tényleges változásait tükrözik.

A relatív sugárváltozás amplitúdója a Blazhko-ciklus során  $\Delta R/R = 0.009$ , amihez a pulzációs egyenlet ( $\Delta P/P \approx 3/2 \cdot \Delta R/R$ ) szerint  $\Delta P/P = 0.014$  relatív periódusváltozás tartozik. Mint már említettük, a megfigyelt fázismoduláció periódusmodulációként is értelmezhető. Ebben az esetben a mért relatív pulzációs periódusváltozás 0.016. Ez a kitűnő egyezés egyrészt alátámasztja az IP módszer eredményeként kapott átlagsugár-változás valódiságát, másrészt igazolja a fázismodulációnak periódusmodulációként való értelmezését. Az átlagsugár és pillanatnyi periódus változásai azonban nincsenek szinkronban, amint azt várnánk, a pulzációs periódus ugyanis kis sugarú és pulzációs amplitúdójú állapotban a leghosszabb. Stothers (2006) hasonló kapcsolatot talált az RR Lyr-nél.

Eredményeink arra is fényt derítettek, hogy az intenzitásátlagolt  $\langle V \rangle$  magnitúdó tükrözi leginkább a luminozításváltozásokat, míg a  $(B - V)$  és  $(B - V)$ , illetve  $(V - I_C)$  és  $\langle V - I_C \rangle$  átlagszínek mind irányban, mind nagyságban helyesen adják vissza a hőmérsékletváltozásokat. Következésképp e mennyiségek reprezentálják helyesen a csillag sztatikus mennyiségeit. Az intenzitásátlagolt magnitúdókból képzett színindexek ezzel szemben 100–250 K-el eltérő hőmérsékleteket adnak. Az eltérés a nagy amplitúdójú (hűvös) fázisban a legnagyobb, ráadásul a





**4.26. ábra.** AZ MW LYR MEGFIGYELT ÉS AZ IP MÓDSZERREL SZÁMÍTOTT ÁTLAGOS PARAMÉTEREINEK VÁLTOZÁSA A BLAZHKO-FÁZIS SZERINT. A bal oldali panelek a  $V$  fénygörbe pulzációs amplitúdóját ( $A_V$ ), a pulzációs periódust, az intenzitás- és magnitúdóátlagolt  $V$  fényességet, és a háromféleképp számított színindexeket mutatják. Kerek zárójel a magnitúdó szerinti, hegyes zárójel az intenzitás szerinti átlagolást jelöli. A középső és jobb oldali oszlopok az IP módszerrel számított fizikai paraméterek pulzáció szerinti átlagait mutatják, sorrendben  $V_p(I_C)$  és Liu (1991) kiindulási  $V_p(\varphi)$  görbék használatával. Ezeknél a bizonytalanság mértékének szemléltetése céljából minden Blazhko-fázisban négy-négy pontot tüntetünk fel, melyeket négy különböző beállítás mellett kaptunk.

változás irányát is fordítva adják ezek a színek az IP módszerrel levezetett változáshoz képest.

## 4.5. A DM Cygni modulációjának vizsgálata az IP módszerrel

Miután sikeresen alkalmaztuk az IP módszert az erősen modulált MW Lyr-re, kipróbáltuk, miképp használható az egy gyengén modulált csillagról készült CCD fénygörbéinkkel. Ehhez a vizsgálathoz a DM Cygnit választottuk. Ezt a csillagot a sváb-hegyi 60 cm-es távcsövön futó Konkoly Blazhko Survey során mértük. A fénygörbe modulációjáról és az IP módszerrel kapott eredményeinkről szóló cikkünket (Juresik, Hurta, Sódor et al., 2009) beküldtük az MNRAS folyóirathoz.

### 4.5.1. Adatok

A DM Cyg-ről 2007 júliusa és 2008 szeptembere közti megfigyeléseink során 81 éjszakáról  $BVI_C$  sávokban színenként kb. 3100 adatpontot gyűjtöttünk.

A méréseink szerint a DM Cyg gyenge fázis- és amplitúdómodulációt is mutatott ebben az időszakban. A Konkoly Blazhko Survey RR Lyrae-i közül eddig ez a leggyengébben modulált Blazhko-csillag. A maximumfényesség  $V$  sávban mindössze 0.07 magnitúdót változik a 10.6 napos Blazhko-periódus során.

A fotometriai adatokat Blazhko-fázis szerint 10 részre bontottuk a moduláció vizsgálata céljából és e fázisok mindegyikét analizáltuk az IP módszerrel. A moduláció fázisától nem függő fém-tartalom, tömeg és távolság értékét most is a középgörbe vizsgálatából vezettük le. A gyenge fázismoduláció az MW Lyr-nél ismertetett módon jelen esetben is kitranszformálható az adatsorból (lásd 3.4.2. pont), ám ennek az eredményekre gyakorolt hatása elhanyagolható, így a továbbiakban figyelmen kívül hagyjuk a fázis modulációját.

A kis modulációs amplitúdó mellett további nehezítés az MW Lyr-hez képest, hogy a DM Cyg összehasonlítójaként szóba jöhető csillagokról nem állnak rendelkezésünkre standard Johnson magnitúdók, így a fénygörbék szín-nullpontjait sem ismerjük. Az IP módszer futtatása során ezért a nullpontokat nem tudtuk rögzíteni, azokat is az illesztéssel határoztuk meg.

### 4.5.2. Állandó és átlagos fizikai paraméterek

A középgörbéből először most is a fém-tartalmat határoztuk meg Juresik & Kovács (1996) empirikus formulájával, amire  $[Fe/H] = -0.01$  dex adódott. A DM Cyg fém-tartalmát spekt-

roszkópiái úton Suntzeff, Kraft & Kinman (1994) és Layden (1994) is megmérték, az általuk kapott értékek  $-0.16$  és  $0.07$  dex. Tekintettel ezekre az eredményekre, az  $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.0$  dex értéket fogadtuk el a DM Cyg fémtartalmaként.

Amennyiben a tömeget a 4.1. pulzációs egyenlet szerint számítjuk az IP módszer futtatásakor, úgy túl nagy,  $0.8\mathcal{M}_{\odot}$  körüli megoldásokat kapunk. Ezért a tömeget inkább rögzítettük, mert evolúciós elméletek jó megszorítást adnak rá, ami nagyjából  $0.55\mathcal{M}_{\odot}$  kell hogy legyen a DM Cyg esetében. Összesen három rögzített tömegértékkel futtattuk a módszerünket ( $0.5$ ,  $0.55$  és  $0.6\mathcal{M}_{\odot}$ ). Az MW Lyr középgörbe megoldásai attól is függtek, milyen  $\Delta A_{V_{\text{rad}}}/\Delta A_V$  meredekséget használtunk a radiálissebesség- és  $V$  fénygörbe amplitúdója közötti összefüggésben. A DM Cyg gyenge amplitúdómodulációja miatt azonban ennek a paraméternek a hatása elhanyagolható.

Az IP módszert most 16 különböző beállítás-kombinációval futtattuk minden esetben, a következők összes lehetséges kombinációja szerint: *i*) a bemenő fotometria  $BVI_C$  vagy  $V$ ,  $(B - V)$ ,  $(V - I_C)$ ; *ii*) a Liu (1991)-féle vagy a 4.2. összefüggés szerinti  $V_p(I_C(\phi))$  kiindulási pulzációssebesség-görbékét használtuk; *iii*) az MW Lyr-nél is használt kétféle súlyfaktorialt történt a  $V_p(\phi)$  görbe illesztése; *iv*) két különböző  $\Delta A_{V_{\text{rad}}}/\Delta A_V$  meredekséget alkalmaztunk.

A távolság IP módszerrel történő meghatározásához a vörösödségre korrigált látszó közepes  $V$  fényességet ismernünk kell. Ezt a két használt összehasonlító átlagából határoztuk meg. Az összehasonlító  $V$  magnitúdóit a Tycho  $B_T$  és  $V_T$  magnitúdók transzformálásával (ESA, 1997) és a terület irányára érvényes interstelláris extinkció figyelembevételével ( $A_V = 3.1E(B - V) = 0.558$ , Schlegel, Finkbeiner & Davis 1998) számítottuk ki. A  $V$  magnitúdó-nullpont bizonytalansága csak a számított távolságban okoz bizonytalanságot, semmilyen egyéb eredményünkben nem.

A középgörbére 3 rögzített tömeg mellett 16 különböző beállítással kapott paraméterek átlagait és szórásait összegzi a 4.7. táblázat. A továbbiakban a  $0.55\mathcal{M}_{\odot}$  tömegnek megfelelő távolságot és szín-nullpontokat rögzítettük a 10 Blazhko-fázis fénygörbéinek vizsgálatához.

### 4.5.3. Átlagos fizikai paraméterek változása a Blazhko-ciklus során

Bár a DM Cyg modulációjának amplitúdója csak mintegy tizede az MW Lyr-nél megfigyelt erős modulációnak, az IP módszerrel ennek ellenére sikeresen detektáltuk az átlagos fizikai paraméterek Blazhko-fázis szerinti kicsiny változásait. A fotometriai és az IP módszerrel nyert fizikai átlagparamétereket a Blazhko-fázis függvényében ábrázoltuk a 4.27. ábrán. Az ábra bal oldali paneljei a  $V$  fénygörbe pulzációs amplitúdóját ( $A_V$ ), a pulzációs periódust, az intenzi-

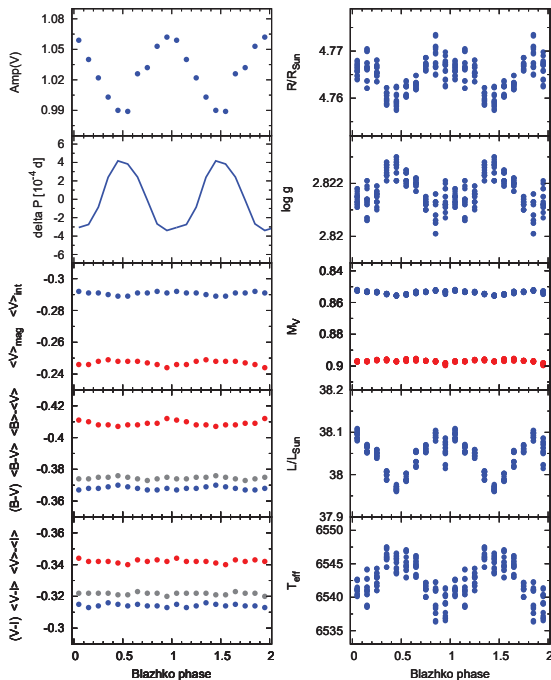
**4.7. táblázat.** A DM CYG ÁTLAGOS FIZIKAI PRARMÉTEREI. A középgörbére három rögzített tömeg mellett 16-16 futtatásból kapott eredményekből számított átlag- és szórásértékek.

$\mathfrak{M}/\mathfrak{M}_{\odot}$	$L/L_{\odot}$	$T_{\text{eff}}$	$R/R_{\odot}$	$M_V$	$d$ [pc]	$(B - V)_0$	$(V - I_C)_0$
$\sigma$							
0.50	35.7	6510	4.66	0.97	1179	0.43	0.49
	$\pm 2.0$	$\pm 55$	$\pm 0.09$	$\pm 0.05$	$\pm 23$	$\pm 0.02$	$\pm 0.01$
0.55	38.0	6540	4.76	0.90	1215	0.44	0.48
	$\pm 2.0$	$\pm 40$	$\pm 0.09$	$\pm 0.04$	$\pm 21$	$\pm 0.01$	$\pm 0.01$
0.60	39.0	6535	4.85	0.86	1233	0.42	0.48
	$\pm 2.0$	$\pm 40$	$\pm 0.08$	$\pm 0.04$	$\pm 21$	$\pm 0.01$	$\pm 0.01$

tás és magnitúdó átlagolt  $V$  fényességet, és a háromféleképp számított színindexeket mutatják. A jobb oldali panelek az IP módszerrel számított fizikai paraméterek pulzáció szerinti átlagait ábrázolják. Ha az elfogadott  $0.55 \mathfrak{M}_{\odot}$  tömeghez tartozó rögzített paraméterek helyett más értékek mellett végezzük el ugyanezt a vizsgálatot, lényegében azonos megoldásokat kapunk a Blazhko-fázis szerinti változásokra, csupán e változó paraméterek nullpontjai lesznek mások, a 4.7. táblázatban felsoroltaknak megfelelően.

A  $V$  fénygörbe intenzitás- illetve magnitúdóátlagai igen gyenge változást mutatnak a Blazhko-ciklus során, 2–4 mmag körüli amplitúdókkal. A  $V$  és  $B - V$  pulzációs középértékek gyenge szisztematikus változásai az MW Lyr-hez hasonlóak, csak kisebb amplitúdójúak, míg a  $V - I_C$  átlagok csak szórást mutatnak. Mindezek ellenére az IP módszerrel kapott megoldások szerint a fizikai paraméterek egyértelmű változásokat szenvednek. A luminozitás 0.3%-ot, az effektív hőmérséklet 7 K-t változik a Blazhko-fázissal. E két változás fázisa ellentétes, az MW Lyr-hez hasonlóan. Mindkét csillag luminozitása maximális pulzációs amplitúdójú Blazhko-fázisban a legnagyobb, és mindkettő ekkor a leghűvösebb. A közepes sugár 0.13%-nyi változása és a pulzációs periódus 0.17%-os változása jól megfelel a pulzációs egyenlet által jószolt kapcsolatuknak, akár csak az MW Lyr-nél.

A 4.27. ábrát az MW Lyr hasonló ábrájával összehasonlítva (4.26. ábra) összességében elmondhatjuk, hogy az összes fizikai paraméter hasonlóképp változik a moduláció során e két csillagnál, csak a DM Cyg esetében a változások amplitúdói nagyjából tizedakkorák, mint az MW Lyr-nél, összhangban a két csillag fénygörbe-modulációja közti kb. tízszeres különbséggel.



**4.27. ábra.** A DM CYG MEGFIGYELT ÉS AZ IP MÓDSZERREL SZÁMÍTOTT ÁTLAGOS PARAMÉTEREINEK VÁLTOZÁSA A BLAZHKO-FÁZIS SZERINT. A bal oldali panelek a  $V$  fénygörbe pulzációs amplitúdóját ( $A_V$ ), a pulzációs periódust, az intenzitás és magnitúdo átlagolt  $V$  fényességet, és a háromféleképp számított színindexeket mutatják. Kerek zárójel a magnitúdo szerinti, hegyes zárójel az intenzitás szerinti átlagolást jelöli. A jobb oldali panelek az IP módszerrel számított fizikai paraméterek pulzáció szerinti átlagait mutatják. Ezeknél a bizonytalanság mértékének szemléltetése céljából minden Blazhko-fázisban 16-16 pontot tüntettünk fel, melyeket az IP módszer 16 különböző beállítása mellett kaptunk.

## 4.6. Az IP módszer alkalmazásának és lehetőségeinek összefoglalása

Bemutattunk egy új inverz fotometriai BW módszert, amely alkalmas pusztán fotometriai mérésekből RRab csillagok fizikai paramétereinek meghatározására. Az IP módszernek elnevezett eljárásunkat kilenc modulálatlan tesztobjektumon kipróbálva megmutattuk, hogy jó minőségű fénygörbékből a direkt BW analízishez hasonlóan pontos eredményeket kaphatunk, spektroszkópiai  $V_{\text{rad}}$  mérések nélkül is. Megbizonyosodtunk arról is, hogy a módszer Blazhko-csillagok fizikai paramétereiben végbemenő modulációs változások vizsgálatára is alkalmas.

Az IP módszer egy inverz eljárás, mert  $V_p(\varphi)$  és  $T_{\text{eff}}(\varphi)$  az elsődleges függvények és a kimeneti fénygörbékét sztatikus légkörmódel használataival vezetjük le ezekből, míg a direkt BW módszerek a megfigyelt fénygörbékből határozzák meg közvetlenül  $T_{\text{eff}}$  változását a pulzáció során. Az IP módszer ezt a két elsődleges görbét variálja egy nemlineáris illesztés során úgy, hogy a kimeneti fény- és szingörbék a lehető legjobban megközelítsék a megfigyeltet.

Az IP módszer alkalmazásának sikere erősen függ a fénygörbék minőségétől. A legjobb fotometriájú fénygörbékre a módszer csupán  $V$  és  $I_C$  színek megléte esetén is használható, még úgy is, ha a  $(V - I_C)_0$  szín-nullpont ismeretlen.

Az IP módszert azzal a céllal fejlesztettük ki, hogy RR Lyrae csillagok többszín-fotometriai fénygörbéiből fizikai paraméterekre vonatkozó információt nyerjünk. A módszer kifejlesztése során mindvégig különös figyelmet fordítottunk arra, hogy az Blazhko-csillagokra is alkalmazható legyen. Az MW Lyr modulációját vizsgálva eredményeink megmutatták, hogy valóban erre is alkalmas a módszerünk. Segítségével először mutattuk ki Blazhko-csillagok fizikai paramétereinek modulációval történő változásait. Ma az IP módszer az egyetlen lehetőség erre.

A módszer hasznos lehet más területeken is, pl. gömbhalmazok és törpegalaxisok RR Lyrae csillagainak vizsgálatában. Nagyon kevés radiálissebesség-mérés áll rendelkezésre ilyen halmazok változóiról, míg a CCD detektorok elterjedésének köszönhetően nagyszámú RR Lyrae csillagról van publikált többszín-fotometria. Eddig 16 modulálatlan RRab csillagról végeztünk pontos CCD méréseket magunk is a Konkoly Blazhko Survey során (Jurcsik, Sódor, Váradi et al., 2006; Sódor, Jurcsik, Nagy et al., 2007; Jurcsik, Sódor, Hurta et al., 2008b,c; Kun, Sódor, Jurcsik et al., 2008), a közeljövőben ezeket is szándékozunk analízálni az IP módszerrel.

Jelen formájában csak RRab csillagok  $BVI_C$  fotometriájával használható az IP módszer, ám megfelelő kiindulási  $V_p(\varphi)$  görbével és a megfelelő pulzációs egyenletet alkalmazva egyéb radiálisan pulzáló változókra, megfelelő atmoszféramódel-táblázatok használataival pedig más

hullámsávokra is alkalmazható lehet.

A módszerünket sikeresen alkalmaztuk egy nagy modulációs amplitúdójú, egyetlen stabil periódussal modulált csillagra, az MW Lyr-re. Kimutattuk, hogy a pulzáció szerint kiátlagolt fizikai paraméterek a Blazhko-ciklus során 1–2 %-os változásokat mutatnak. A megfigyelt fázismoduláció a pulzációs periódus oszcillációjára vezethető vissza, ami nagyságát tekintve jól egyezik a közepes sugár modulációjából a pulzációs egyenlet szerint következő periódusváltozással.

Az általunk eddig megfigyelt leggyengébben modulált csillag, a DM Cyg fénygörbéit elemezve azt találtuk, hogy még az igen gyenge modulációval járó kicsiny fizikai paraméterváltozások is kimutathatók az IP módszerrel. A DM Cyg-re és MW Lyr-re kapott eredményeinket összehasonlítva azt találtuk, hogy a fizikai paraméterek ezeknél nagyon hasonlóan viselkednek a moduláció során, csak éppen a tízszer gyengébben modulált DM Cyg esetében a paraméterek változásainak amplitúdói is tízszer kisebbek.





## 5. fejezet

# Összegzés és előre tekintés

Mikor 2004 januárjában a frissen felújított és automatizált sváb-hegyi 60 cm-es Heyde-Zeiss távcsővel elindítottuk a Konkoly Blazhko Survey (KBS) programunkat, még egyetlen Blazhko-csillagról sem állt rendelkezésre olyan fotometriai idősor, ami kellően kiterjedt lett volna ahhoz, hogy mind a Blazhko-ciklust, mind a pulzációs ciklust jól lefedje. Mivel az északi égbolton többszáz olyan fényes mező RR Lyrae csillag van amit egy ekkora távcsővel már elég jó, kb 0.01 mag pontossággal lehet mérni, ezért belekezdünk a felmérési programunkba. A Sváb-hegyen, az Intézetben lévő, a programunk céljára folyamatosan hozzáférhető műszer az automatizálás óta igazán kényelmesen és kis emberi erőforrás ráfordítással működtethető, így mára több mint egy tucatnyi modulált R Rab csillagról gyűjtöttünk illetve gyűjtünk jelenleg is vele korábban nem látott részletességű többszín-fotometriai fénygörbéket.

A programunk célpontválasztási stratégiájából következően a megfigyelt Blazhko-csillagok többsége új felfedezés, és a maradék néhány is a korábban csak gyanított moduláció megerősítése, pontosítása. A fénygörbék matematikai elemzése minden egyes Blazhko-csillagunknál szolgált valami újdonsággal. A moduláció megnyilvánulásának olyan tulajdonságait tártuk fel, amit korábban a részletes adatsorok hiányában nem ismertünk.

A máig napvilágot látott Blazhko-modellek enyhén szólva sincsenek túlságosan részletesen kidolgozva, eddig nem is igazán lehettek, hiszen nem voltak olyan pontos megfigyelések, amikhez hozzá kellett volna igazítani őket. Nem csoda hát, hogy mindegyik modell számára nehézséget jelent a moduláció egyik vagy másik, általunk feltárt új tulajdonságának a magyarázata.

Találtunk jónéhány olyan gyengén modulált Blazhko-csillagot, aminek a detektálására a korábbi felmérések nem voltak alkalmasak (pl. RR Gem, SS Cnc, DM Cyg). Nem meglepő

ezért, hogy a KBS statisztikája szerint a moduláció előfordulási gyakorisága az RRab csillagoknál jóval nagyobb a korábban mért 25–30%-nál. A mi méréseink szerint a 30, fél napnál rövidebb periódusú RRab csillagból 14, vagyis majdnem a felük mutat modulációt. Még ez a részarány is csak alsó becslésnek tekinthető, hiszen joggal tételezzük fel, hogy vannak olyan, még gyengébben modulált RR Lyrae csillagok, amelyek modulációját a mi műszerünkkel sem lehet kimutatni. Az RR Gem 80 évet átfogó megfigyeléseit vizsgálva kimutattuk azt is, hogy a moduláció erőssége jelentős változásokat tud szenvedni már ilyen, csillagászati viszonylatban rendkívül rövid időskálán is. Ez a megfigyelés pedig arra enged következtetni, hogy egyes Blazhko-csillagok modulációja időnként olyan gyenge lehet, amit még jobb műszerekkel sem tudunk kimutatni. A Blazhko-effektus tehát még gyakoribb. Valójában úgy tűnik, hogy a modulálatlan RR Lyrae csillagok vannak kisebbségben – már ha léteznek egyáltalán ilyenek.

A modulált RRab csillagok fénygörbéinek Fourier-spektrumában olyan multipletteket találtunk, amilyeneket korábban nem láttak. Találtunk az ismert tripleteken túl kvintuplett és szeptuplett szerkezeteket az MW Lyr Fourier-spektrumában  $\pm 2f_m$  és  $\pm 4f_m$  szeparációkkal. Ami ennél is különösebb, hogy az MW Lyr néhány pulzációs csúcsa mellett  $\pm 12.5f_m$  távolságra is megfigyeltünk modulációs csúcsokat.

Találtunk többszörös periodicitással modulált csillagokat is. Az e dolgozatban ismertetett UZ Uma mellett egy sokkal érdekesebbnek tűnő és alaposabban megfigyelt csillag a CZ Lacertae. Hely hiányában, és mivel ennek a csillagnak a megfigyelései még feldolgozás alatt állnak, a CZ Lac-ról nem írtam részletesebben, ám amit már most tudni lehet, az is annyira érdekes és új, hogy feltétlenül szólni kell róla röviden. Ezt a csillagot két szezonban is mértük és mindkét szezonban egyértelműen azonosítható mindkét modulációs periódus, a spektrumokban jól elkülöníthetők a csúcsaik. A CZ Lac két modulációja egyformán erős, nincs közöttük kitértett, domináns. A két periódus az első szezonban hibahatáron belül 4:5 rezonancia arányban állt egymással. A moduláció a második szezonra szemmel láthatóan változott. A második szezonra a két modulációs periódus aránya közel 3:4-re változott, de nem egész pontosan. Úgy tűnik tehát, hogy két lineárisan független modulációs frekvenciáról van szó, amelyek azonban szeretnek rezonanciában lenni, ugyanakkor rövid időskálán képes a frekvenciájuk jelentősen megváltozni. Ennél a csillagnál igazán bonyolult multiplett struktúrák találhatóak a spektrumban a pulzációs csúcsok körül. A két modulációs frekvenciának megfelelő szeparációjú csúcsokon túl lineárkombinációs frekvenciájú modulációs csúcsok is megjelennek, sőt az egyik modulációs frekvencia 0.5-szeresének megfelelő szubharmonikus szeparációjú modulációs csúcsokat is találtam. A CZ Lac adatainak vizsgálatát folytatom, az eddigi részeredményekről a JENAM 2008

konferencián beszámoltam (Sódor, 2009), a kutatás végleges eredményeit a közeljövőben tervezem publikálni.

A moduláció fénygörbében való megmutatkozásáról a KBS-nek köszönhetően ma már sokkal többet tudunk, mint 5 évvel ezelőtt, a több mint 100 éve ismert Blazhko-effektus fizikai okát azonban továbbra sem ismerjük. A modulációs ciklus során a csillag globális fizikai paramétereiben végbemenő változásokat korábban csak a spektroszkópai Baade–Wesselink-analízis (BW analízis) módszerével tudtuk volna vizsgálni. Ehhez viszont kiterjedt, a Blazhko-ciklust és a pulzációs ciklust is jól lefedő szimultán többszín-fotometriai és spektroszkópai mérésekre volna szükség, ilyenek pedig ezidáig nem készültek. E téren áttörést jelenthet az általam kidolgozott Inverz Fotometriai Baade–Wesselink módszer (IP módszer). Ez az eljárás a BW analízishez abszolút skálán hasonlóan pontos, relatív skálán pontosabb eredményeket szolgáltat RRab csillagok fizikai paramétereinek mind a pulzációs, mind a Blazhko-ciklus során szenvedett változásairól, pusztán többszín-fotometriai fénygörbékből. A dolgozatban megmutattam a módszer használhatóságát olyan modulálatlan tesztobjektumokon, amikről korábban több szerző is közzétette spektroszkópai BW analízisének eredményeit. Az eredmények megbízhatósága nagyban függ a fénygörbék fotometriai pontosságától.

Két egyszeres periódussal modulált csillagon, az MW Lyr-en és a DM Cyg-en megmutattam, hogy az IP módszer valóban alkalmas a Blazhko-effektus által okozott fizikai változások vizsgálatára is. Ez a két Blazhko-csillag egyébként a mintánkban található legerősebben és leggyengébben modulált két csillag. Az eredményeink szerint a két csillagnál az átlagos globális fizikai paraméterek a Blazhko-ciklus során hasonló fázis szerint változnak, e változások amplitúdóinak aránya pedig összhangban van a fénygörbe-modulációjuk erősségének arányával. Ez az egyezés megerősíti, hogy nem véletlenek valamiféle szerencsétlen összjátéka okozza a módszerünkkel detektált változásokat, hanem azok valóban a csillagban végbemenő fizikai változásokat tükrözik.

Az IP módszer nem csak a Blazhko-csillagok tanulmányozását mozdíthatja nagyban előre, de a BW analízissel vizsgálható, modulációt nem mutató RR Lyrae csillagok számát is megsokszorozza. Eddig ugyanis csak kb. 3–4 tucatnyi ilyen csillagról született a spektroszkópai BW analízist lehetővé tevő radiálissebesség-mérés. Az IP módszer alkalmazásához elégséges többszín-fotometriai mérések a CCD technikának köszönhetően rengeteg halmaztag és mező RR Lyrae csillagról férhetők hozzá, és ezek száma jelenleg is folyamatosan növekszik, míg új, a BW analízishez szükséges jó fázislefedettségű radiálissebesség-mérések jópár éve nem láttak napvilágot RR Lyrae csillagokról. Mi magunk is 16, a KBS keretében megfigyelt modulálatlan

csillagról publikáltunk pontos többszín-fotometriai fénygörbéket, melyeknek az IP módszerrel való analizisét a közeljövőben tervezzük.

A KBS első részének, melyben a 0.5 napnál rövidebb pulzációs periódusú fényesebb északi RRab csillagok felmérését végeztük, mára 30 objektum vizsgálatával a végére értünk (lásd B. függelék). Ez több mint a fele a mintaválasztási kritériumainknak megfelelő csillagoknak. A programot most a hosszabb periódusú RRab csillagok vizsgálatával folytatjuk. Hogy ez ne legyen újabb öt évet igénybe, a megfigyeléseinkbe bevontuk a piskés-tetői 1 m-es RCC távcsövet is, így terveink szerint mintegy 3 év alatt tudunk hasonlóan nagy mintáról hasonlóan részletes adatsorokat gyűjteni.

# A függelék

## Szoftverfejlesztések

A kutatómunka divergens gondolkodást igényel. Ez azt jelenti, hogy a jól bevált, járt utak használata helyett gyakran egy problémának, az adataink elemzésének új megközelítése segít hozzá bennünket új felfedezésekhez. Ma a számítástechnika korában mindenfajta adatelemzést számítógépek segítségével végzünk. Az újszerű megközelítés itt azt jelenti, hogy sokszor olyan számítástechnikai problémával kerülünk szembe, aminek a megoldására előttünk nem írtak még programot mások. Napi rendszerességgel kerülünk ezért abba a helyzetbe, hogy saját szkriptet, célprogramot kell írunk a felmerült problémák kezelésére. Mivel ezt más nem teszi meg helyettünk, így a csillagászat műveléséhez nem ártanak programozói ismeretek.

Amióta a Konkoly Observatóriumban folyó munkákba 2004-ben bekapcsolódtam, rengeteg kisebb-nagyobb szoftverfejlesztést végeztem, amivel saját céljainkon túl – reményeim szerint – mások dolgát is megkönnyíthetem, ha a jövőben hasonló problémával kerülnek szembe. Hasznos lehet ezért a legfontosabb fejlesztéseim tömör összefoglalása e dolgozatban.

- Fourier illesztő program ('nlfitt' munkanév, C++): A fejlesztés végső stádiumában tart az adatsorokra harmonikus komponenseket nemlineáris módon illesztő szoftver, amely figyelembe veszi a frekvencia komponensek közti lineáris kombinációkat is. A fejlesztés még tart, de a programnak már minden funkciója működőképes. A Levenberg–Marquardt-algoritmus implementációjának kivételével saját fejlesztés.
- Légkörmodell illesztő program ('ipfit' munkanév, C++): Az IP módszer (lásd 4. fejezet) implementációja. A program és dokumentációja elérhető a <http://www.konkoly.hu/staff/sodor/ip.html> weboldalról. A Levenberg–Marquardt-algoritmus implementációjának kivételével saját fejlesztés.

- Mérés tervező, redukáló és fénygörbe ellenőrző szkriptek (IRAF, shell, Gnuplot): Ezek a programok a mérések megtervezésétől a nyers objektum felvételek feldolgozásán keresztül a fotometriáig, a kész fénygörbe előállításáig segítik munkánkat. A redukálás és fotometria teljesen automatikus. Ezután egy felhasználóbarát program segítségével további javítások végezhetők a fotometriában. Alapvetően a sváb-hegyi 60 cm-es távcső rendszeréhez fejlesztettem ki ezeket a programokat, de kis változtatással más távcsőhöz illetve kamerához is alkalmazhatók.
- Speciális, nem mindennapos igény volt az RR Gem fotólemezeinek digitális fotometriája (shell, Gnuplot, C): Erre a célra egy feketedésigörbe-illesztő programot írtam, ami a lehetőségekhez képest automatikusan generálja a fénygörbét az IRAF által szolgáltatott feketedésekből.
- Levegőtömeg korrekció, színrendszer transzformáció (shell, Python, C): Az instrumentális fénygörbéket extinkciós együtthatók, távcsőkonstansok figyelembevételével extinkcióra korrigálják, nemzetközi rendszerbe transzformálják e programok.
- Felügyeleti szkriptek a 60 cm-es távcsőhöz (shell, C/C++): Több, egymással együttműködő program, mely naponta automatikusan végzi a távcsővel nyert adatok biztonsági mentését, illetve állapotjelentést küld e-mail-ben a teljes mérőrendszerről. A nyers CCD felvételek mellett a mindennapi munka során keletkező egyéb adataink is naponta mentésre kerülnek.
- További egyszerű segédprogramok, ezeket összefogó szkriptek (C/C++, shell, Python), melyek lehetővé teszik pl. Monte-Carlo szimulációk futtatását Fourier analíziseink kiegészítéseként.
- Ezek mellett karbantartom a sváb-hegyi 60 cm-es Heyde-Zeiss távcső honlapját, mely a <http://www.konkoly.hu/24> webcímen elérhető.

## **B függelék**

### **A Konkoly Blazhko Survey csillagai**

**B.1. táblázat.** A KONKOLY BLAZHKO SURVEY SORÁN EDDIG MEGFIGYELT 30 RRAB CSILLAG. A modulált csillagok nevét félkövérrrel szedtük.

Név	szűrők	No. <sup>1</sup>	előzmények <sup>2</sup>	$P_0$ [d]	ref <sup>3</sup>	$P_{BI}$ [d]	$A_{BI}$ [mag] <sup>4</sup>
<b>AQ Lyr*</b>	<i>BV(I)<sub>C</sub></i>	20	stabil	0.3571424	3	61	0.25
<b>V759 Cyg</b>	<i>V(I)<sub>C</sub></i>	74	n/a	0.3600548	3	16.0	0.12
<b>SS Cnc</b>	<i>BV(RI)<sub>C</sub></i>	35	stabil	0.367337	1	5.3	0.09
EZ Cep	<i>BV(I)<sub>C</sub></i>	26	n/a	0.3790035	2		
BK Cas	<i>V(I)<sub>C</sub></i>	11	n/a	0.3902700	2		
<b>BR Tau</b>	<i>BV(I)<sub>C</sub></i>	115	n/a	0.3905928	3	19.3	0.13
TZ Aur	<i>BV(RI)<sub>C</sub></i>	13	stabil	0.3916746	3		
ET Per	<i>BV(RI)<sub>C</sub></i>	12	n/a	0.3940135	2		
<b>RR Gem</b>	<i>BV(RI)<sub>C</sub></i>	63	stabil/ellentmondásos	0.3972893	4	7.2	0.09
<b>MW Lyr</b>	<i>BV(I)<sub>C</sub></i>	177	ellentmondásos	0.3976742	10	16.5	0.45
V378 Per	<i>V(I)<sub>C</sub></i>	15	n/a	0.3987208	7		
<b>XY And</b>	<i>V(I)<sub>C</sub></i>	64	n/a	0.3987254	3	41.4	0.20
FH Vul	<i>BV(I)<sub>C</sub></i>	8	stabil	0.405413	9		
CN Lyr	<i>BV(I)<sub>C</sub></i>	8	stabil	0.4113823	3		
<b>DM Cyg</b>	<i>BV(I)<sub>C</sub></i>	81	ellentmondásos	0.419863	11	10.6	0.07
BK And	<i>BV(I)<sub>C</sub></i>	20	n/a	0.4216093	7		
<b>CZ Lac</b>	<i>BV(RI)<sub>C</sub></i>	116	n/a	0.432173	5	14.8/18.5	0.45
GI Gem	<i>BV(I)<sub>C</sub></i>	22	n/a	0.4332664	8		
<b>FK Vul*</b>	<i>BV(I)<sub>C</sub></i>	11	n/a	0.4340529	3	57	0.30
SW CVn	<i>BV(I)<sub>C</sub></i>	10	n/a	0.441671	8		
BH Aur	<i>V(RI)<sub>C</sub></i>	12	n/a	0.4560898	3		
UU Boo	<i>BV(RI)<sub>C</sub></i>	16	n/a	0.4569339	7		
<b>UZ Vir*</b>	<i>BV(I)<sub>C</sub></i>	32	n/a	0.459388	5	68	0.35
CG Peg	<i>BV(I)<sub>C</sub></i>	11	stabil	0.4671382	3		
<b>UZ UMa</b>	<i>V</i>	30	n/a	0.4668413	6	26.7/143:	0.14
<b>RY Com</b>	<i>BV(I)<sub>C</sub></i>	30	gyanított moduláció <sup>5</sup>	0.46889	5	32	0.06
SU Leo	<i>V(I)<sub>C</sub></i>	12	n/a	0.4722633	8		
<b>BD Her*</b>	<i>BV(I)<sub>C</sub></i>	16	n/a	0.4739064	3	22	0.45
RZ Cam	<i>BV(I)<sub>C</sub></i>	17	n/a	0.4804514	8		
TW Lyn	<i>BV(RI)<sub>C</sub></i>	17	n/a	0.4818600	3		

\* Előzetes eredmények, a megfigyelések folyamatban vannak.

<sup>1</sup> Mérési éjszakák száma.

<sup>2</sup> n/a: korábbi fotometria nem érhető el.

<sup>3</sup> Pulzációs periódusok: 1) Jurcsik, Szeidl, Sódor et al. (2006); 2) Sódor, Jurcsik, Nagy et al. (2007);

3) Kholopov et al. (1985); 4) Sódor, Szeidl & Jurcsik (2007); 5) saját eredmények;

6) Sódor, Vida, Jurcsik et al. (2006); 7) Jurcsik, Sódor, Hurta et al. (2008b); 8) Jurcsik, Sódor, Hurta et al. (2008c);

9) Kun, Sódor, Jurcsik et al. (2008); 10) Jurcsik, Hurta, Sódor et al. (2009).

<sup>4</sup> A maximumfényesség-változás amplitúdója  $V$  hullámsávban.

<sup>5</sup> Jurcsik & Kovács (1996) szerint moduláció lehetséges. Korábbi mérések

minimum körül mutatnak nagyobb szórást ami fotometriai pontatlanságból is adódhat.



# Köszönetnyilvánítás

Az első csillagászati távcsövet, amelyen át egy nyári este a Jupitert megpillantottam, teljes egészében nagypapám, Szutor Péter készítette. Ez a gyerekkori élmény a későbbi életemre nézve meghatározónak bizonyult, mégpedig pozitív értelemben. Köszönet érte.

Köszönöm témavezetőmnek, Jurcsik Johannának a közös munkánk során nyújtott segítségét, a támogatását és mindazt amit tőle megtanultam a szakterületünkéről és általában a tudományos munkáról.

Köszönöm Szeidl Bélának az öt év során nyújtott folyamatos szakmai segítségét és támogatását. Köszönöm Oláh Katalinnak, hogy bármikor bármilyen kérdésben számíthattam az ő segítségére is.

Minden „Antipinnek” köszönöm a 60 cm-es távcsóval végzett megfigyelési és adatfeldolgozási munkában nyújtott segítségét. Nélkülük a Konkoly Blazhko Survey nem érthette volna el sikereit. Első sorban is Váradi Mihályt illeti ezért köszönet, valamint azokat, akik a méréseket több éven keresztül végezték: Dékány István, Hajdu Gergely, Hurta Zsombor, Kővári Zsolt, Nagy Imre, Posztobányi Kálmán, Színg Attila, Vida Krisztián. Rajtuk kívül a mérésekben időszakosan részt vevőket is köszönet illeti: Belucz Bernadett, Dobos Vera, Koponyás Barbara, Kovács Gergely, Kun Emma, Kuti Adrienn, Lakatos Borisláv, Vityi Nándor.

Köszönettel tartozunk Arne Hendennek (AAVSO) és Horace Smith-nek (Michigan State University) az általuk végzett kiegészítő fotometriai mérésekért.

Budapesti tartózkodásuk során Albert Washüttl (AIP) és Michael Weber (AIP) nem csak a mérésekbe kapcsolódtak be, hanem számunkra rendkívül hasznos kiegészítő mérőszkripteket készítettek.

Felésemnek és egyben kolléganőmnek, Bognár Zsófinak csak ő tudja, mennyi mindent köszönök. Köszönöm továbbá az egész családomnak, szüleimnek és testvéreimnek is azt a támogatást ami elengedhetetlen volt, hogy belőlem végül csillagász váljak.



# Irodalomjegyzék

- Alcock, C., Allsman, R., Alves, D. R., . . . , Kovács, G. et al. 2000, *ApJ*, 542, 257
- Almár, I. 1961, *Communications of the Konkoly Observatory*, No. 51
- Alonso, A., Arribas, S., Martínez-Roger, C. 1999, *A&A Suppl. Ser.*, 140, 261
- Baker, E. A. 1938, *MNRAS*, 98, 65
- Balázs-Detre, J. 1960, *Kleine Veröffentlichungen der Remeis-Sternwarte Bamberg*, 27, 26
- Balázs-Detre, J., Detre, L. 1962, *Kleine Veröffentlichung der Remeis-Sternwarte Bamberg*, 27, 26
- Baldwin, M. E., Samolyk, G. 2003, *Observed Maxima Timings of RR Lyrae stars*, Number 1 (Cambridge: AAVSO)
- Barcza, Sz. 2003, *A&A*, 403, 683
- Bessel, M. S., Castelli, F., and Plez, B. 1998, *A&A*, 333, 231
- Blazhko, S. 1907, *Astron. Nachr.*, 173, 325
- Bono, G., Caputo, F., Stellingwerf, R. F. 1995, *ApJS*, 99, 263
- Bono, G., Caputo, F., Castellani, V., Marconi, M., Storm, J. et al. 2003, *MNRAS*, 344, 1097
- Castelli, F., Kurucz, R. L. 2003, *IAUS*, 210, 20
- Cacciari, C., Clementini, G., Prevot, L., Lindgren, H., Lolli, M., Oculi, L. 1987, *A&AS*, 69, 135
- Cacciari, C., Clementini, G., Prevot, L., Buser, R. 1989, *A&A*, 209, 141
- Cacciari, C., Clementini, G., Fernley, J. A. 1992, *ApJ*, 396, 219
- Catelan, M., Pritzl, B. J., Smith, H. A. 2004, *ApJS*, 154, 633
- Chadid, M., Chapellier, E. 2006, *A&A*, 456, 305
- Chevalier, C., Ilovaisky, S. A. 1991, *A&AS*, 90, 225

- Chis, D., Chis, G. and Mihoc, I., 1975, IBVS, 960
- Clementini, G., Cacciari, C., Lindgren, H. 1990, A&AS, 85, 865
- Cousens, A. 1983, MNRAS, 203, 1171
- Cox, J. P. 1980, Theory of Stellar Pulsation (Princeton University Press)
- Deeming, T. J. 1975, Ap&SS, 36, 137
- Demarque, P., Woo, J.-H., Kim, Y.-Ch., Yi, S. K. 2004, ApJS, 155, 667
- Detre, L. 1970, Transactions of the IAU XIV A. Reports on Astronomy, 259
- Dotter, A., Chaboyer, B., Jeremović, D., Baron, E., Ferguson, J. W., Sarajedini, A., Anderson, J. 2007, AJ, 134, 376
- Dziembowski, W. A., Mizerski, T. 2004, AcA, 54, 363
- Eddington, A. S. 1926, Internal Constitution of the Stars, Cambridge
- ESA 1997, The Hipparcos and Tycho catalogues, ESA SP-1200
- Fernie, J. D. 1995, AJ, 110, 2361
- Fernley, J. A. 1994, A&A, 284, L16
- Gessner H. 1966, VSS, 7, 61
- Hoffmeister, C. 1958, AN, 284, 165
- Hoffmeister, C. 1960, VSS, 4, 315, (H5)
- Hurta, Zs., Jurcsik, J., Szeidl, B., **Sódor, Á.** 2008, AJ, 135, 957
- Husar, D. 2004, BAV Rundbrief, 53, 1
- Jones, R. V., Carney, B. W., Storm, J., Latham, D. W. 1992, ApJ, 386, 646
- Jurcsik, J., & Kovács, G. 1996, A&A, 312, 111
- Jurcsik, J. 1998, A&A, 333, 571
- Jurcsik, J., Clement, C., Geyer, E. H., & Domsa, I. 2001, AJ, 121, 951
- Jurcsik, J., Benkő, J. M., & Szeidl, B. 2002a, A&A, 390, 133
- Jurcsik, J., Benkő, J. M., & Szeidl, B. 2002b, A&A, 396, 539
- Jurcsik, J., Szeidl, B., Nagy, A., **Sódor, Á.** 2005, AcA, 55, 303
- Jurcsik, J., **Sódor, Á.**, Váradi, M., 2005a, IBVS, 5666

- Juresik, J., **Sódor, Á.**, Váradi, M., Szeidl, B., Washüetl, A., et al. 2005b, *A&A*, 430, 1049
- Juresik, J., **Sódor, Á.**, Váradi, M., Vida, K., Posztobányi, K., Szing, A., Hurta, Zs., Dékány, I., Washüttl, A., Vityi, N. 2006, *IBVS*, 5709
- Juresik, J., Szeidl, B., **Sódor, Á.**, Dékány, I., Hurta, Zs., Posztobányi, K., Vida, K., Váradi, M., Szing, A. 2006, *AJ*, 132, 61
- Juresik, J., **Sódor, Á.**, Hurta, Zs., Váradi, M., Szeidl, B., et al. 2008a, *MNRAS*, 391, 164
- Juresik, J., **Sódor, Á.**, Hurta, Zs., Kővári, Zs., Vida, K., Hajdu, G., Nagy, I., Dékány, I., Posztobányi, K., Koponyás, B., Váradi, M., Vityi, N. 2008b, *IBVS*, 5844
- Juresik, J., **Sódor, Á.**; Hurta, Zs., Kővári, Zs., Posztobányi, K., Vida, K., Hajdu, G., Nagy, I., Koponyás, B. 2008c, *IBVS*, 5846
- Juresik, J., **Sódor, Á.**, Szeidl, B., Kolláth, Z., Smith, H. A., Hurta, Zs., Váradi, M., Henden, A., Dékány, I., Nagy, I., Posztobányi, K., Szing, A., Vida, K., Vityi, N. 2008, *MNRAS*, közlésre elfogadva
- Juresik, J., Hurta, Zs., **Sódor, Á.**, Szeidl, B., Nagy, I., Posztobányi, K., Vida, K., Dékány, I., Váradi, M., Hajdu, G., Kővári, Zs., Kun, E. 2009, *MNRAS*, beküldve
- Kholopov, P. N., et al. 1985, *General Catalogue of Variable Stars*, Moszkva, Nauka, szerk: Kholopov P. N.
- Kolláth, Z. 1990, *Occ. Techn. Notes Konkoly Obs.*, No. 1,  
<http://www.konkoly.hu/staff/kollath/mufran.html>
- Kolláth, Z., Buchler, J. R., Szabó, R., Csabry, Z. 2002, *A&A*, 385, 932
- Kovács, G. 2003, *MNRAS*, 342, L58
- Kovács, G., Walker, A. R. 2001, *A&A*, 371, 579
- Kun, E., **Sódor, Á.**, Juresik, J., Hurta, Zs., Nagy, I., Kővári, Zs., Posztobányi, K., Kovács, G., Vida, K., Belucz, B. 2008, *IBVS*, 5859
- LaCluzé, A., Smith, H. A., Gill, E.-M., Hedden, A., Kinemuchi, K. et al. 2004, *AJ*, 127, 1653
- Layden, A. 1994, *AJ*, 108, 1016
- Liu, T., Janes, K. A. 1989, *ApJS*, 69, 593
- Liu, T., Janes, K. A. 1990, *ApJ*, 354, 273

- Liu, T. 1991, *PASP*, 103, 205
- Lourakis, M. I. A. 2004, *levmar: Levenberg-Marquardt nonlinear least squares algorithms in C/C++*, <http://www.ics.forth.gr/~lourakis/levmar/>
- Lysova, L., Firmanjuk, V. 1980, *Astr. Circ.*, 1123, 3
- Mandel, O. E. 1969, *Peremennye Zvezdy*, 16, 628
- Mandel, O. E. 1970, *Peremennye Zvezdy*, 17, 335
- Marconi, M., Caputo, F., Di Criscienzo, M., Castellani, M. 2003, *ApJ*, 596, 299
- Meinunger, L. 1968, *MVS*, 4, 7, 19
- McNamara, D. H., Feltz, K. A. 1977, *PASP*, 89, 699
- Moskalik, P. & Poretti, E. 2003, *A&A*, 398, 213
- Nagy, A., Kovács, G. 2006, *A&A*, 454, 257
- Nardetto, N., Mourard, D., Mathias, Ph., Fokin, A., Gillet, D. 2007, *A&A*, 471, 661
- Nowakowski, R. M., & Dziembowski, W. A. 2001, *Acta Astronomica*, 51, 5
- Nowakowski, R. M., & Dziembowski, W. A. 2003, *AP&SS*, 284, 273
- Preston, G. W., Smak, J., Paczyński, B. 1965, *ApJS*, 12, 99
- Roberts, D. H., Lehár, J., Dreher, J. W. 1987, *AJ*, 93, 968
- Rozhavski, P. G. 1964, *Peremennye Zvezdy*, 15, 208
- Sabbey, C. N., Sasselov, D. D., Fieldus, M. S., Lester, J. B., Venn, K. A., Butler, R. P. 1995, *ApJ*, 446, 250
- Salasnich, B., Girardi, L., Weiss, A., Chiosi, C. 2000, *A&A*, 361, 1023
- Sandage, A., Tammann, G. A. 2006, *Ann.Rev.A&A*, 44, 93
- Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P., Davis, M. 1998, *ApJ*, 500, 525
- Schmidt, E. G., Seth, A. 1996, *AJ*, 112, 2769
- 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
- Skillen, I., Fernley, J. A., Stobie, R. S., Jameson, R. F. 1993, *MNRAS*, 265, 301

- Smith, H. A., Matthews, J. M., Lee, K. M., Williams, J., Silbermann, N. A., Bolte, M. 1994, *AJ*, 107, 679
- Smith, H. A. 1995, *RR Lyrae Stars* (Cambridge University Press)
- Smith, H. A., Barnett, M., Silbermann, N. A., Gay, P. 1999, *AJ*, 118, 572
- Sódor, Á.** 2006, *PADEU*, 17, 115
- 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.** 2007, *AN*, 328, 829
- Sódor, Á.**, Jurcsik, J. 2005, *IBVS*, 5641
- Sódor, Á.**, Jurcsik, J., Nagy, I., Váradi, M., Dékány, I., Vida, K., Hurta, Zs., Posztobányi, K., Vityi, N., Szing, A., Dobos, V., Kuti, A. 2007, *IBVS*, 5793
- Sódor, Á.**, Szeidl, B., Jurcsik, J. 2007, *A&A*, 469, 1033
- Sódor, Á.**, Jurcsik, J., Szeidl, B. 2008, *MNRAS*, közlésre elfogadva
- Sódor, Á.** 2009, *Communications in Asteroseismology*, JENAM 2008 proc., elfogadva
- Szeidl, B. 1976, in *IAU Coll. 29, Multiple Periodic Variable Stars*, ed. W. S. Fitch (Dordrecht: Reidel), 133
- Szeidl, B. 1988, in *Multimode Stellar Pulsation*, eds., G. Kovács, L. Szabados and B. Szeidl, (Kultúra, Budapest), p. 45
- Stothers, R. B. 2006, *ApJ*, 652, 643
- Suntzeff, N. B., Kraft, R. P., Kinman, T. D. 1994, *ApJSS*, 93, 271
- Taylor, P. O. 1977, *JAASO*, 6, 56
- Ureche, V. 1965, *Babes-Bolyai Stud. fasc.*, 1, 73
- Ureche, V. 1971, *IBVS*, 532
- Wilson, T. D., Carter, M. W., Barnes, T. G., Van Citters, G. W., Moffett, T. J. 1989, *ApJS*, 69, 951
- Zhevakin, S. A. 1963, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, 1, 367





# Összefoglalás

Az RR Lyrae típusú pulzáló változócsillagok fénygörbemodulációját, a Blazhko-effektust több mint 100 éve ismerjük, ám a jelenség fizikai magyarázata ma még hiányzik. A Konkoly Blazhko Survey (KBS) programunkat a modulációt mutató RR Lyrae csillagok részletes tanulmányozásának céljából indítottuk 2004-ben a sváb-hegyi 60 cm-es automata távcsővel. A programban annak kezdetétől részt veszek. A KBS során eddig 30 RRab csillagot figyeltünk meg, közülük 14 bizonyult moduláltnak. Dolgozatomban egyes megfigyelt Blazhko-csillagok vizsgálatának eredményeiről számolok be.

**Az RR Geminorum:** Erről az RRab csillagról a Konkoly Observatóriumban az 1935–2005 időszakot átfogó jelentős fotometriai anyag (fotografikus, fotoelektromos és CCD) gyűlt össze, ami lehetővé tette a csillag modulációjában és pulzációjában ez idő alatt végbement változások vizsgálatát. Megállapítottam, hogy az RR Gem modulációja az említett időszakban erős változásokat mutatott. A modulációs amplitúdó 0.2 mag és a kimutathatatlanul alacsony szint között változott. A legerősebb moduláció idején a fázismoduláció is jelentős volt, míg jelenleg 0.1 mag maximumfényesség-moduláció mellett csak elhanyagolható fázismoduláció figyelhető meg. Ez az első bizonyíték egy RR Lyrae csillag modulációjának temporális voltára. Elsőként mutattam ki egy, a pulzáció közepes amplitúdójában végbement igen gyors változást is. A moduláció periódusa a korábban gondolt kb. 40 nap helyett az észlelések során, amikor megfigyelhető volt, mindvégig 7.2 nap körül maradt.

**Fénygörbe-moduláció további Blazhko-csillagoknál:** További négy Blazhko-csillag modulációjának vizsgálata zárult le. Az SS Cnc az RR Gem-hez hasonlóan gyenge modulációt mutat a ma ismert legrövidebb 5.3 nap periódussal, ám itt a felszálló ág fázisa is modulált. Az UZ UMa modulációja nem írható le kielégítő pontossággal egyetlen modulációs periódussal, a moduláció minden bizonnyal multiperiodikus. Az MW Lyrae erősen modulált fénygörbéjének Fourier-spektruma a triplétt komponensek mellett kvintuplett és szeptuplett komponenseket is tartalmaz, valamint  $12.5f_m$  szeparációjú modulációs csúcsokat is találtunk. A DM Cyg a KBS során megfigyelt leggyengébb modulációjú RRab csillag, mindössze 0.07 mag maximumfényesség-változással.

**Az Inverz Fotometriai Baade–Wesselink-analízis:** Az IP módszernek nevezet eljárás egy új módszer melyet RRab csillagok globális fizikai paramétereinek ( $T_{\text{eff}}, R, L$ ) pulzációs és modulációs változásainak vizsgálatára fejlesztettem ki. A módszer használatához csupán többszín-fotometriai megfigyelések szükségesek. Megmutattam, hogy az IP módszer a spektroszópiai Baade–Wesselink-analízishez hasonlóan jó eredményeket ad jó minőségű bemenő fénygörbék használata mellett, anélkül hogy spektroszkópiai mérésekre volna szükség.

Az IP módszer modulálatlan RR Lyrae-k mellett Blazhko-csillagok vizsgálatára is alkalmas. Segítségével első ízben sikerült egy modulált RR Lyrae – az MW Lyr – átlagos fizikai paramétereinek a Blazhko-ciklus során bekövetkező változásait kimutatni. Az IP módszerrel még a KBS minta leggyengébben modulált tagját, a DM Cyg-et is sikeresen analizáltuk. A fizikai paraméterek változásának módja itt is az MW Lyr-hez hasonló, csak a gyenge modulációnak megfelelően sokkal gyengébb.

# Summary

The phenomenon of light curve modulation of RR Lyrae stars is known for more than a century, but its physical explanation is yet unknown. We launched the Konkoly Blazhko Survey (KBS) in 2004 to study modulated RR Lyrae stars in details with the 60-cm automatic telescope of Konkoly Observatory at Sváb-hegy. Up to now, we observed 30 RRab stars of which 14 are Blazhko modulated. In my thesis, I report on the results of my investigations of some of the Blazhko stars observed.

**RR Geminorum:** The RRab star RR Gem was regularly observed in the Konkoly Observatory between 1935 and 2005. During this interval, a significant amount of photometric observations (photographic, photoelectric and CCD) were collected, which allowed us to study the long term changes in the pulsation and in the modulation of the star. I have found that the modulation of RR Gem showed significant changes during this interval. The modulation amplitude changed between an undetectably low level and 0.2 mag. When the modulation was the strongest, phase modulation was also significant, while the present maximum brightness modulation of 0.1 mag is accompanied by only negligible modulation in phase. This is the first evidence that the modulation of an RR Lyrae star might be temporal. I have pointed out an abrupt change in the mean pulsation amplitude for the first time also. The modulation period, when it was detectable, remained around the 7.2 d value during the observations instead of the  $\sim 40$  d claimed earlier.

**Light curve modulation of other Blazhko stars:** We completed studies on light curve modulation of four other Blazhko stars. SS Cnc shows a similarly weak modulation as RR Gem does, with the shortest modulation period of 5.3 d ever known. The phase of the rising branch of this star is, however, also modulated. The modulation of UZ UMa cannot be satisfactorily described with taking only one modulation period into account. This star is probably modulated multiperiodically. The Fourier spectrum of the light curve of the strongly modulated MW Lyr contains not only triplet components but shows quintuplet and septuplet components also. Moreover, modulation peaks with a separation of  $12.5f_m$  are also detected. DM Cyg, a Blazhko variable of the KBS sample with the weakest modulation, shows only 0.07 mag maximum brightness variation.

**The Inverse Photometric Baade–Wesselink-analysis:** I developed a new method for deriving variations of global physical quantities ( $T_{\text{eff}}, R, L$ ) of RRab stars during the pulsation and modulation cycles, named IP method. This method requires multicolour photometric observations exclusively. I showed that, for good quality light curves, this method gives similarly good results as the spectroscopic Baade–Wesselink analysis does, without the need for any spectroscopic measurements.

The IP method is capable not only to study unmodulated RR Lyrae stars but is applicable for Blazhko stars as well. For the first time we derived changes in the average physical parameters during the modulation cycle of a Blazhko star, MW Lyr. The IP method is capable even to detect changes in the physical parameters of DM Cyg, the Blazhko star with the weakest modulation in the KBS sample. Here the physical parameters change similarly to that of MW Lyr but with a much lower amplitude, in line with its much weaker modulation.