



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

BAKALÁRSKA PRÁCA

Jozef Lipták

**Nová štúdia časovej premennosti
hviezdy so závojom LQ And**

Astronomický ústav UK

Vedúci bakalárskej práce: prof. RNDr. Petr Harmanec, DrSc.

Študijný program: Fyzika (B1701)

Študijný obor: FOF (1701R026)

Praha 2020

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů. Tato práce nebyla využita k získání jiného nebo stejného titulu.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V dne

Podpis autora

Chcel by som sa poďakovať vedúcemu práce prof. Harmancovi za pomoc, podporu a cenné pripomienky pri tvorbe práce a ďalej za sprostredkovanie dát, programov a postupov pri práci použitých.

Ďakujem pozorovateľom, ktorý získali použité spektrá na Ondřejovskom observatóriu: N. Dvořáková, A. Kawka, L. Kotková, P. Koubský, D. Korčáková, P. Németh, L. Rezba, M. Šlechta, J. Sloup P. Škoda, A. Tlamicha, K. Sejnová, V. Votruba a M. Wolf. S. Yang poskytol spektrá z Dominion Astrophysical Observatory. Táto práca použila spektrá z databázy BeSS, udržiavanej laboratóriom LESIA pri Observatóriu de Meudon, Francúzsko, dostupná na adrese <http://basebe.obspm.fr>, použité boli spektrá získané na Observatoire de Haute-Provence a spektrá nasledujúcich (mnohých amatérskych) pozorovateľov: E. Barbotin, E. Bryssinck, C. Buil, S. Charbonnel, V. Desnoux, O. Garde, K. Graham, J. Guarro, A. Halsey, F. Houpert, T. Lemoult, B. Mauclaire, M. Pujol, O. Thizy a J.-N. Terry.

Ďalej by som sa chcel poďakovať J. Labadie-Bartz za poskytnutú fotometriu KELT, tímu pri družici Hipparcos a ďalej za použitú UBV fotometriu nasledujúcim pozorovateľom: H. Božić, D. Cikotić, Wei-Shi Gao, Zi-He Guo, P. Hadrava, P. Harmanec, J. Havelka, J. Honsa, L. Huang, K. Jůza, V. Kocourek, J. Libich, P. Mayer, K. Pavlovski, J. R. Percy, Ž. Ružić, S. Štefl, P. Zasche, F. Žďárský a J. Žižňovský.

Pri práci som využíval nasledujúce internetové zdroje: databázu SIMBAD a službu Vizier pod CDS, Strasbourg, France a službu NASA's Astrophysics Data System Bibliographic Services. Použil som dáta družice Gaia agentúry ESA (<https://www.cosmos.esa.int/gaia>), spracované Gaia Data Processing and Analysis Consortium (DPAC; <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium>). Financovanie DPAC poskytujú národné inštitúcie, najmä inštitúcie spolupracujúce v Gaia Multilateral Agreement.

Názov práce: Nová štúdia časovej premennosti hviezd so závojom LQ And

Autor: Jozef Lipták

Katedra: Astronomický ústav UK

Vedúci bakalárskej práce: prof. RNDr. Petr Harmanec, DrSc., Astronomický ústav UK

Abstrakt: Podarilo sa nám vyvrátiť dvojhviezdnu povahu LQ And. Radiálne rýchlosti krídel H α emisie nevykazujú zmeny väčšie ako 2 km/s. Periodická premennosť v radiálnych rýchlostiach krídel a jadra H α emisie a čiary He I 6678 Å nebola detekovaná, presnejšiemu meraniu bráni prítomnosť telurických čiar v emisnom profile a vysoká rotačná rýchlosť hviezd. V pomere intenzít emisie I_V/I_R sme detekovali periódu 0,415 d, ktorú je potrebné overiť na vhodnom súbore nových dát. Pozorovali sme prudký nárast intenzity emisie sprevádzaný zjasnením hviezd a zkrátením fotometrickej periódy z 0,3094 d na 0,3083 d. Odhadli sme rotačnú periódu hviezd, ktorá pravdepodobne leží medzi fotometrickou periódou a jej dvojnásobkom, čo naznačuje, že rotácia hviezd nemusí byť príčinou fotometrickej premennosti.

Kľúčové slová: hviezd so závojom - LQ And - spektrálne zmeny - zmeny jasnosti

Title: A new study of time variability of the Be star LQ And

Author: Jozef Lipták

Department: Astronomical Institute of Charles University

Supervisor: prof. RNDr. Petr Harmanec, DrSc., Astronomical Institute of Charles University

Abstract: We contradict binary nature of LQ And. Radial velocities of H α emission are bound to changes less than 2 km/s. We were not able to detect any periodic variability in radial velocities of core and wings of H α emission nor of line He I 6678 Å. We discuss effect of telluric line movement on precision of our measurement. Detected period of 0,415 d in intensity ratio I_V/I_R needs additional confirmation. The star overcame striking increase in intensity of the emission accompanied by increase in overall brightness and shortening of photometric period from 0,3094 d to 0,3083 d. Our estimated interval of rotational periods of the star lies in between this photometric period and double of it, which shows that rotation might not be responsible for the photometric changes.

Keywords: Be stars - LQ And - spectral changes - light variability

Obsah

1	Úvod	2
1.1	Be hviezdy	2
1.2	LQ And	3
2	Spektroskopia	4
2.1	Radiálne rýchlosti	6
2.2	Intenzita emisie	6
2.3	Periodicita	8
2.4	Vplyv telurických čiar	9
3	Fotometria	11
3.1	Dlhodobé zmeny	11
3.2	Rýchla premennosť a jej vývoj	13
3.3	Súvislosť rýchlych zmien medzi farebnými kanálmi	16
4	Vlastnosti systému	18
4.1	Prítomnosť sprievodcu	18
4.2	Zmeny súvisiace s nárastom intenzity emisie	19
4.3	Vlastnosti hviezdy	20
	Záver	22
	Zoznam použitej literatúry	23
	Zoznam obrázkov	26
	Zoznam tabuliek	27
A	Prílohy	28
A.1	Namerané spektroskopické veličiny	28
A.2	Fitové parametre fotometrie	32

1. Úvod

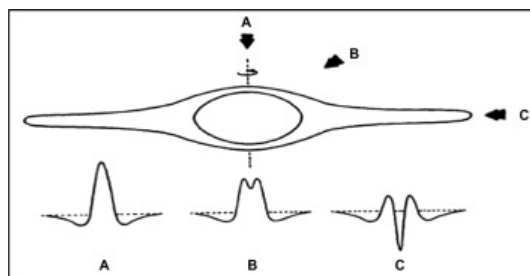
1.1 Be hviezdy

Prvými identifikovanými hviezdami triedy Be boli hviezdy γ Cas a β Lyr, ktorých emisné čiary odpovedajúce čiare $H\beta$ popísal A. Secchi v článku Secchi (1866). Dnes používaná definícia tejto triedy objektov znie nasledovne:

Be hviezdy sú hviezdy hlavnej postupnosti až obri spektrálnej triedy B Harvardskej klasifikácie vykazujúce v niektorom bode v čase emisiu na aspoň jednej čiare Balmerovej série vodíka.

V spektrách týchto hviezd sú teda prítomné najmä spektrálne čiary vodíka a neutrálneho hélia, v menšej miere slabé čiary ionizovaných ľahkých prvkov ako kyslíka, kremíka, horčíka či neónu. Jedná sa o hviezdy s efektívnou povrchovou teplotou $10\,000\text{ K} - 30\,000\text{ K}$, hmotnosťami $M = 2,5 M_{\odot} - 15 M_{\odot}$, polomerami $R = 2 R_{\odot} - 6 R_{\odot}$ a absolútnou bolometrickou magnitúdou v rozsahu $M = 1^m - -6^m$, viď práca Harmanec (1988). Tieto hviezdy disponujú rotačnou rýchlosťou na úrovniach blízkyh kritickéh rýchlosti s odpovedajúcimi rotačnými periódami okolo 1 dňa, vďaka ktorej nadobúdajú tvar rotačného elipsoidu. Na podobnej časovej škále sa môžu odohrávať aj pulzácie hviezdy. Tieto procesy sú obvykle pozorovateľné ako rýchla fotometrická premennosť hviezdy. Častým javom pre hviezdy spektrálnej triedy B je prítomnosť sprievodcu, obvykle sa jedná o trpasličiu hviezdu, alebo kompaktný objekt. Veľké množstvo rentgenových dvojhviezd je práve pár neutrónovej hviezdy s Be hviezdou.

Túto triedu však definuje najmä prítomnosť cirkumstelárneho disku ionizovaného plynu, ktorý je vlastnou príčinou pozorovanej emisie v spektre. Sklon disku voči pozorovateľovi a jeho hustota priamo ovplyvňujú tvar a intenzitu emisného profilu, ako pre široký rozsah parametrov disku nasimulovali Silaj a kol. (2010). Základnú predstavu poskytuje obrázok 1.1. V asymetrii profilu je možné detekovať štruktúry v disku, či už inherentné, alebo spôsobené gravitačnou interakciou so sprievodcom. Disk má pravdepodobne pôvod v hviezde samotnej a postupne sa rozptyľuje do okolia (ide o tzv. dekréčný disk), presný mechanizmus jeho vzniku však dosiaľ nie je známy. Kandidátmi sú hlavne pulzácia, lokálne magnetické polia a binárna interakcia, ktoré umožnia prekonať gravitáciu materskej hviezdy v blízkosti jej rovníka. Hviezdy tejto triedy preto vykazujú fotometrickú a spektroskopickú premennosť na rôznych časových škálach. Obsiahly popis vlastností hviezd triedy Be poskytuje napríklad práca Rivinius a kol. (2013).



Obrázok 1.1: Súvis tvaru emisného profilu a uhlu pohľadu na sústavu hviezda-disk
Prevzaté z práce Saad a kol. (2012).

1.2 LQ And

Hviezda LQ And (HD 224559, HR 9070, HIP 118214) je hviezda spektrálnej triedy B4Vne vykazujúca veľmi výraznú emisiu v spektre prvý krát popísanú v práci Merrill a kol. (1925) a premennosť vo viditeľnom svetle objavenú v práci Provin (1953). Hviezde sa naposledy obsiahlo venovali po fotometrickej aj spektroskopickú stránku Matthews a kol. (1991). Autori naznačujú, že by sa mohlo jednať o spektroskopickú dvojhviezdu s obežnou dobou $P = 7,413$ d s amplitúdou priemetu rýchlosti primárnej zložky okolo 20 km/s. Hviezda bola skúmaná intenzívne fotometricky v rade prácí (Percy (1979), Percy a kol. (1981), Harmanec (1984), Hildebrandt (1985), Stagg a kol. (1988), Alvarez a kol. (1990), Harmanec a kol. (1991) a Percy a kol. (2002)), ktoré identifikovali periódy o dĺžkach približne 0,310 a 0,619 dňa o amplitúde $0,025^m$, pričom dosiaľ nie je jasné, ktorá z týchto periód je skutočnou fyzikálnou periódou, a nie je jasný ani jej fyzikálny pôvod (pulzácie, rotácia, či dvojhviezdnosť). Perióda o dĺžke 0,619 dňa by mohla zodpovedať práve rotačnej perióde.

Hviezda nedisponuje silným magnetickým polom, podľa práce Bychkov a kol. (2009) stredná kvadratická efektívna hodnota magnetickej indukcie nadobúda hodnotu $B_e = (890 \pm 920)$ G. Z interferometrických pozorovaní sa podarilo vylúčiť sprievodcu v práci Mason a kol. (1997) vo vzdialenosti väčšej ako $\theta = 55$ mas, čo zodpovedá približne vzdialenosti 23 au. Disk plynu okolo hviezdy sa pokúšali pozorovať v dlhovlnnej oblasti Bodensteiner a kol. (2018), z tvaru emisie v spektre plynový disk okolo hviezdy modelovali autori prác Silaj a kol. (2010) a Vieira a kol. (2017). Niektoré základné vlastnosti hviezdy sú zhrnuté v tabuľke 1.1.

V práci uvádzame čas pomocou redukovaného heliocentrického dátumu

$$\text{RHJD} = \text{HJD} - 2\,400\,000,00. \quad (1.1)$$

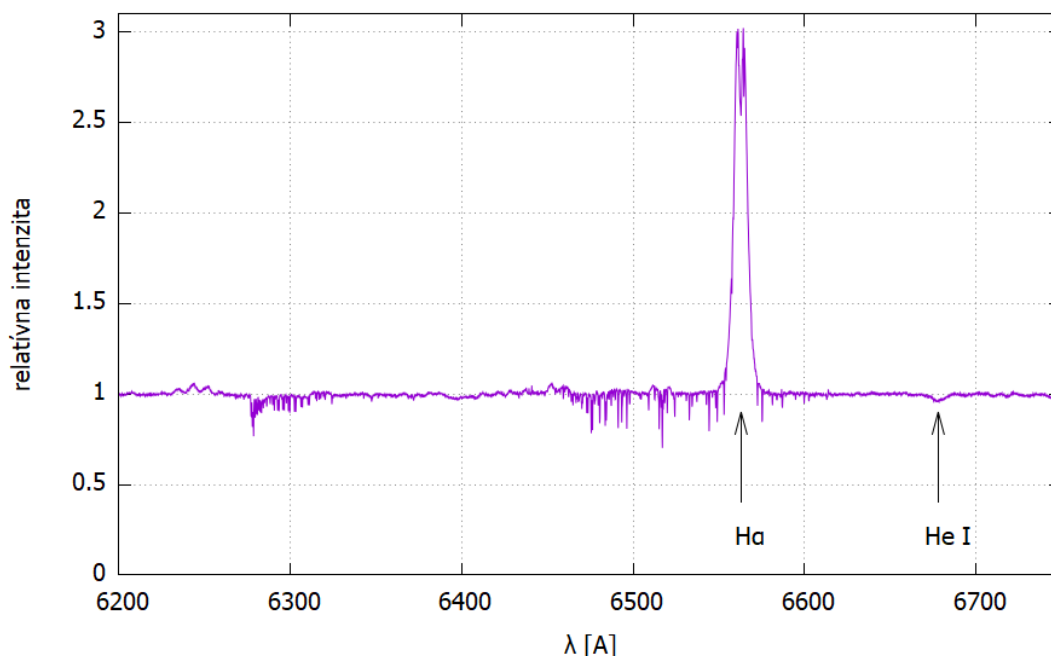
Tabuľka 1.1: Vybrané vlastnosti LQ And

rektascenzia (J2000.0)	$\alpha = 23^h58^m46^s$	[1]
deklinácia (J2000.0)	$\delta = +46^\circ24'48''$	[1]
paralaxa	$\pi = (2,42 \pm 0,05)$ mas	[1]
vzdialenosť	$d = (413 \pm 9)$ pc	[1]
vlastný pohyb v α	$\mu_\alpha = (15,42 \pm 0,08)$ mas/y	[1]
vlastný pohyb v δ	$\mu_\delta = (0,57 \pm 0,06)$ mas/y	[1]
efektívna povrchová teplota	$T_{ef} = (20\,350 \pm 750)$ K	[2]
gravitačné zrýchlenie na povrchu	$\log g = 3,83 \pm 0,38$	[2]
priemet rotačnej rýchlosti	$v \sin i = (316 \pm 37)$ km/s	[2]
sklon rotačnej osi	$i = (72 \pm 18)^\circ$	[2]
polomer	$R = (3,4 \pm 1,0) R_\odot$	[3]
hmotnosť	$M = (5,2 \pm 0,5) M_\odot$	[4]
svietivosť	$\log L = 3,57 \pm 0,14$	[2]

[1] Gaia Collaboration (2018) [2] Zorec a kol. (2016) [3] Harmanec a kol. (1991) [4] Harmanec (1988)

2. Spektroskopia

V tejto práci boli použité spektrá získané na observatóriu v Ondřejove, na Dominion Astrophysical Observatory (ďalej DAO) v Kanade, spektrá z databázy amatérskych a profesionálnych spektier BeSS a článkov Silaj a kol. (2010), Balle-reau a kol. (1987) a Andrillat (1983). Zamerali sme sa na oblasť okolo čiary $H\alpha$, v ktorej hviezda vykazuje silnú emisiu. Ukážku spektra LQ And v červenej oblasti môžeme vidieť na obrázku 2.1. Vidíme výrazný emisný profil na čiare $H\alpha$ s dvomi vrcholmi a plytkú absorpčnú čiaru neutrálneho hélia na $6678,151 \text{ \AA}$. V spektre je taktiež prítomné množstvo telurických čiar. Na obrázku 2.2 vidíme detail absorpčného profilu pre spektrum z Ondřejova (prerušovane) s rozlíšením 12 700 a ešletové spektrum s rozlíšením 50 000 pre podobnú heliocentrickú korekciu. Je zrejmé, že v spektrách s nižším rozlíšením sú telurické čiary rozmazané, čo komplikuje meranie.



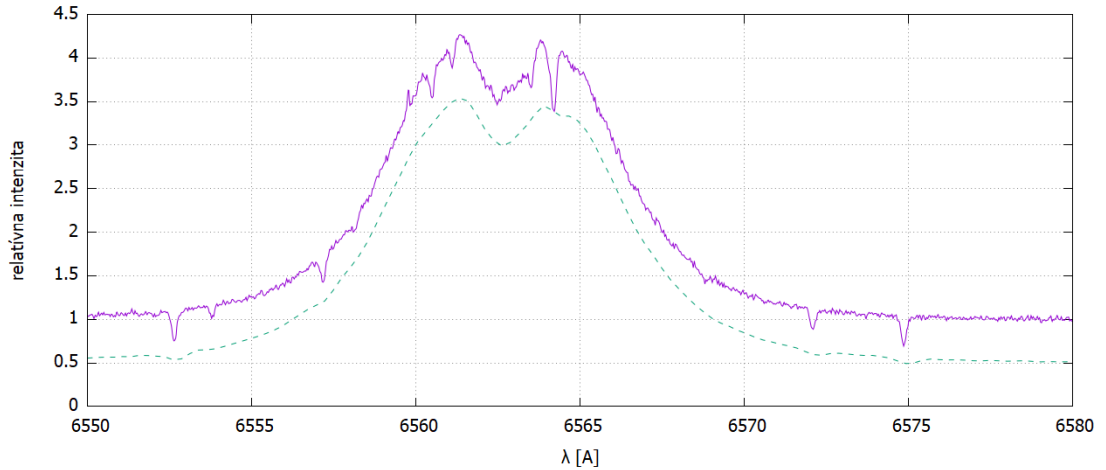
Obrázok 2.1: Ukážka spektra LQ And

Spektrum bolo získané na Dominion Astrophysical Observatory pre RHJD=55 954,650.

V spektrách sme merali nasledovné veličiny

- radiálnu rýchlosť $v(H\alpha_k)$ krídel emisie na čiare $H\alpha$ $\lambda = 6562,817 \text{ \AA}$,
- radiálnu rýchlosť $v(H\alpha_j)$ jadra emisie na čiare $H\alpha$,
- radiálnu rýchlosť $v(\text{HeI})$ pre čiaru HeI $\lambda = 6678,151 \text{ \AA}$;
- intenzitu emisie I_V pre fialové maximum emisného profilu čiary $H\alpha$,
- intenzitu emisie I_R pre červené maximum emisného profilu čiary $H\alpha$.

Z intenzít emisie I_V a I_R sme následne určili strednú intenzitu emisie $I = \frac{I_V + I_R}{2}$ a hodnoty pomeru I_V/I_R .



Obrázok 2.2: Porovnanie spektier rôznych disperzií, detail emisie Ešeletové spektrum LQ And získané amatérom Ch. Buil-om, RHJD=56 944,398 je znázornené plnou čiarou, lineárne spektrum z Ondřejova pre podobnú heliocentrickú korekciu, HJD=55 838,485 v intenzitách posunuté o 0,5 nižšie je znázornené prerušovane.

Prehľad použitých spektier môžeme vidieť v tabuľke 2.1 a v tabuľke 2.2 je uvedené, na koľkých zo spektier boli spomenuté veličiny merané. Spektrá s nízkou disperziou sme na meranie radiálnych rýchlostí nepoužívali z dôvodu príliš malej zmeny meraných radiálnych rýchlostí. Kalibrácia spektier bola vykonaná na jednotlivých observatóriách s výnimkou spektier z DAO (redukcia, prevod na 1D spektrá a kalibrácia v intenzite S. Yang, kalibrácia vo vlnových dĺžkach P. Harmanec) a z Ondřejova (redukcia a kalibrácia spektier v programe *IRAF* M. Šlechta). Spektrá zo skupiny A boli použité len na meranie intenzít, v prípade spektra Andrillat (1983) boli intenzity premerané pravítkom, intenzity pre spektrá Ballereau a kol. (1987) boli prevzaté priamo z článku a pre spektrum Silaj a kol. (2010) boli vybraté maximá z priloženého dátového súboru. Ostatné spektrá sme jednotlivo rektifikovali pomocou programu *ReSpefo* autora Harmanec (2020) nástrojom *Rectify* preložením Hermitových polynómov vybranými bodmi kontinua a následným vydelením touto závislosťou.

Tabuľka 2.1: Prehľad použitých spektier

Ozn.	Observatórium	Počet	Časové pokrytie RHJD	Rozlíšenie R/1 000
O	Ondřejov, ČR	25	55 470-56 180	12,7
D	DAO, Kanada	12	52 772-55 955	21,7
A	Lowell O., Arizona	1	53 630	?
	SPM, Mexiko	9	45 609-45 623	?
	OHP, Francúzsko	1	44901	?
E	BeSS, ešeletové	10	54 726-58 795	50(1ks), 10
B	BeSS, lineárne	15	51 574-57 671	11-17
N	BeSS, lineárne	13	52 128-58 704	5-6

Tabuľka 2.2: Počty spektier použitých na meranie jednotlivých veličín

Ozn.	$v(\text{H}\alpha_j)$	$v(\text{H}\alpha_k)$	$v(\text{HeI})$	Intenzity
O	25	25	25	25
D	12	12	12	12
A	-	-	-	11
E	10	10	2	10
B	15	15	-	15
N	-	-	-	13

2.1 Radiálne rýchlosti

Celé meranie prebiehalo v programe *ReSpefo*. Na spektrá bola aplikovaná heliocentrická korekcia nástrojom *Apply HelCorr*. Radiálne rýchlosti boli merané nástrojom *Measure RV* metódou zrkadlového obrazu. Každá čiara hviezdy bola v danom spektre meraná trikrát, ďalej boli premerané všetky dostupné telurické čiary dostatočnej kvality (obvykle 15-20 čiar). Následne bol programom vypočítaný robustný priemer radiálnych rýchlostí čiar pre jednotlivé čiary hviezdy a spoločný priemer pre telurické čiary spolu so štandardnými chybami týchto hodnôt.

Nástrojom *RV Results* bol vytvorený výsledný súbor nameraných radiálnych rýchlostí s nulovým bodom korigovaným na polohu telurických čiar v závislosti na HJD. Namerané dáta môžeme vidieť na obrázku 2.3. Priemerné hodnoty \bar{v} , priemery vážené odchýlkami jednotlivých meraní \bar{v}' a štandardná odchýlka súboru σ_v radiálnych rýchlostí na jednotlivých čiarach sú uvedené v tabuľke 2.3. Tabuľku A.1 s jednotlivými nameranými hodnotami je možné nájsť v prílohe.

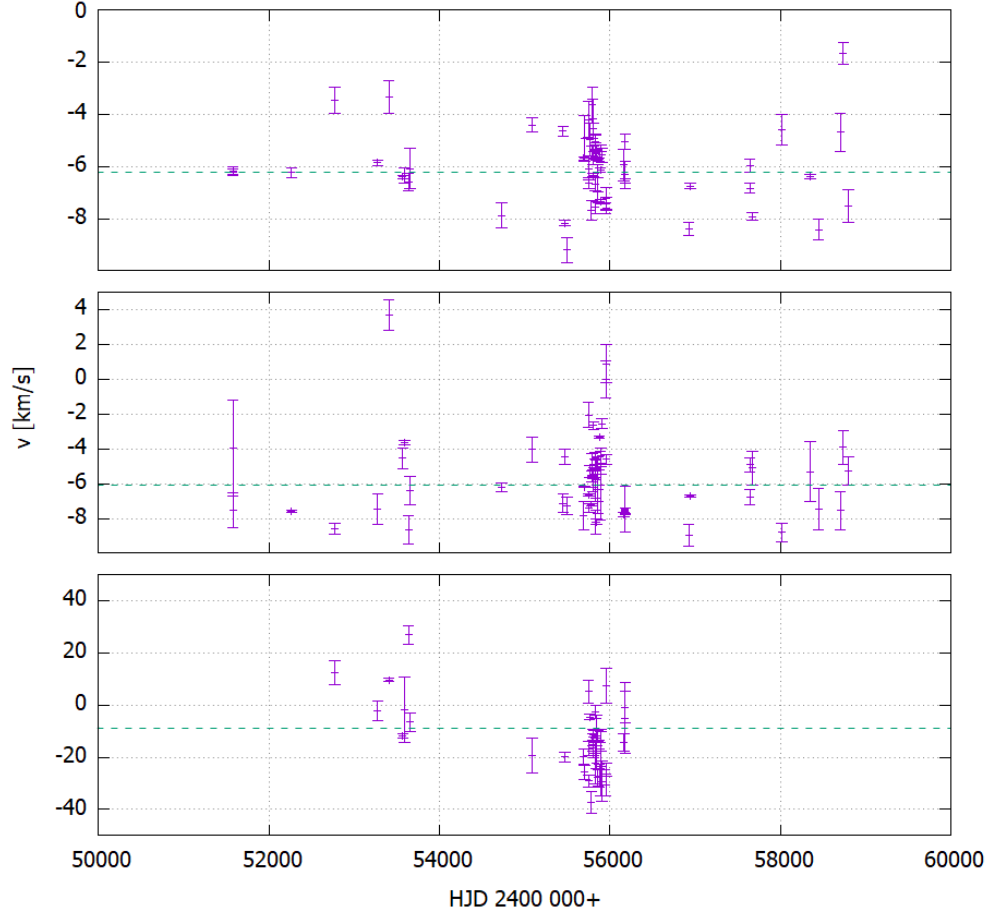
Veľký rozptyl hodnôt pre čiara hélia je spôsobený najmä šumom v spektrách, táto čiara je totiž pomerne plytká ($I_c \approx 0,97$) a značne rozšírená rotáciou hviezdy (FWHM $\approx 10 \text{ \AA}$). Pomer signál/šum v spektrách z Ondřejova a DAO sa pohybuje okolo $S/N \approx 150$, čo implikuje chybu v meraní radiálnej rýchlosti čiary hélia niekoľko desiatok km/s . Meranie polohy jadra emisie je ovplyvnené voči profilu sa pohybujúcimi telurickými čiarami, najväčší problém spôsobuje čiara vody na $\lambda = 6564,21 \text{ \AA}$, ktorá sa pohybuje okolo červeného vrcholku emisie. Radiálnu rýchlosť na krídlach emisie považujeme za najreprezentatívnejšiu. Vplyvu telurických čiar na meranie sa venujeme neskôr.

Tabuľka 2.3: Štatistické vlastnosti nameraných radiálnych rýchlostí, všetky hodnoty v km/s .

čiara	\bar{v}	\bar{v}'	σ_v
$\text{H}\alpha_j$	-6,0(2)	-6,23(11)	1,4
$\text{H}\alpha_k$	-5,6(3)	-6,10(15)	2,4
He I	-12,8(22)	-8,7(20)	13,5

2.2 Intenzita emisie

Intenzita emisie pre červené I_R a fialové I_V maximum bola z rektifikovaných spektier určená ako maximálna nameraná hodnota relatívnej intenzity. Určenie



Obrázok 2.3: Namerané radiálne rýchlosti

Hore: krídla emisie $H\alpha$, v strede: jadro emisie $H\alpha$, dole: čiara HeI. Prerušovanou čiarou je znázornený vážený priemer nameraných hodnôt radiálnych rýchlostí jednotlivých čiar.

polohy červeného vrcholku však výrazne komplikovala už spomínaná čiara vody. Namerané hodnoty strednej intenzity emisie I a pomeru I_V/I_R sú znázornené v grafe 2.4. Namerané intenzity I_V , I_R , stredná intenzita I a pomer intenzít I_V/I_R sú uvedené v tabuľke A.2 v prílohe.

Môžeme vidieť, že intenzita emisie je premenná medzi hodnotami 2,5 a 4,5, pričom je viditeľný dlhodobý trend v závislosti. V období RHJD 51 000 – 54 000 nadobúda intenzita emisie hodnoty okolo 2,8 a následne zosilňuje na hodnoty okolo 4,2 pre RHJD 56 000 – 59 000. V období pred RHJD 51 000 nemáme dostatočné pokrytie dát na dobrý popis závislosti. Závislosťou bola preložená funkcia tvaru

$$I(x) = a \arctan(bx + c) + d,$$

kde $x = \text{HJD} - 2\,450\,000$. Získali sme hodnoty parametrov

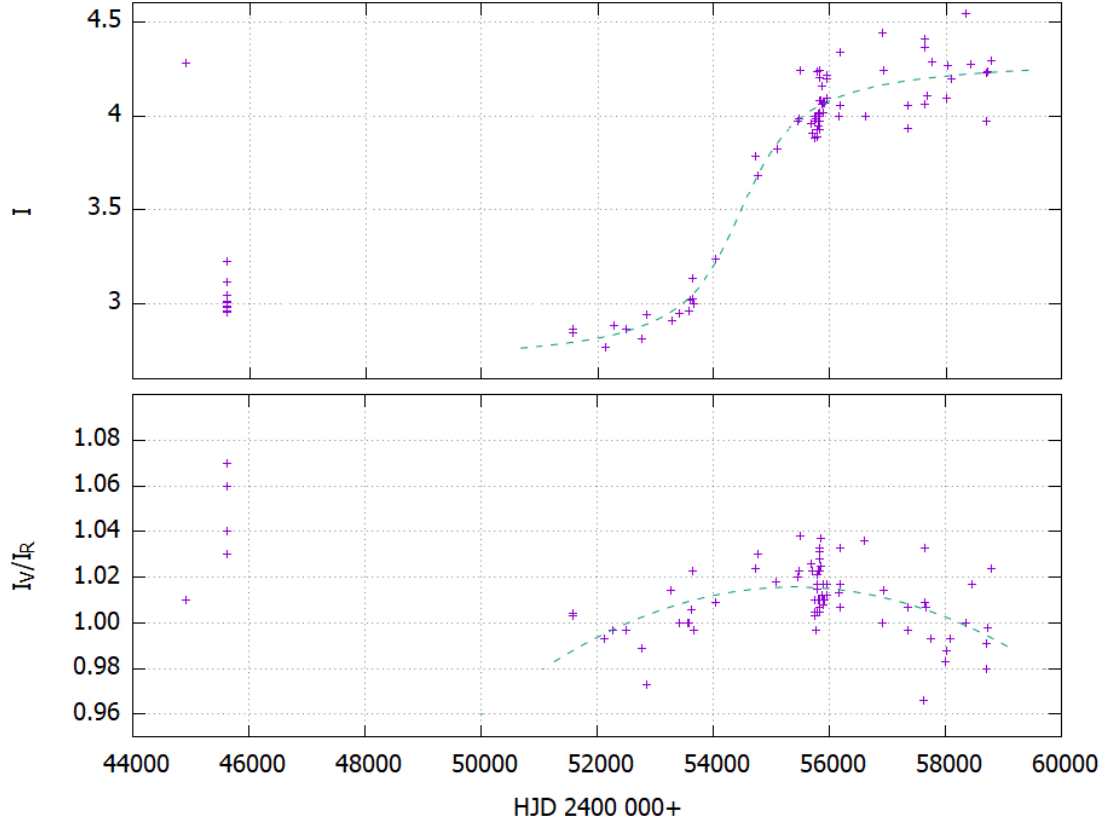
$$a = 0,529073, \quad b = 0,001\,331\,22 \text{ d}^{-1}, \quad c = -5,94573, \quad d = +3,49051.$$

Pomer intenzít sa pohybuje do niekoľkých stotín okolo jedničky, oblasť dobrého pokrytia dát 51 000 – 59 000 naznačuje dlhodobú závislosť, týmito dátovými bodmi bola preložená kvadratická funkcia, pričom sme ako najlepší fit dostali

$$f(x) = 0,96011 + x \cdot 2,063 \cdot 10^{-5} \text{ d}^{-1} - x^2 \cdot 1,9148 \cdot 10^{-9} \text{ d}^{-2}.$$

Taktiež sme na tomto intervale určili priemernú hodnotu $\overline{I_V/I_R} = 1,0104 \pm 0,0016$ a štandardnú odchýlku $\sigma_{I_V/I_R} = 0,014$.

Dáta po odčítaní dlhodobej závislosti boli prehľadávané na prípadnú periodickú zložku.



Obrázok 2.4: Namerané spektrofotometrické parametre emisie

Hore: stredné intenzity I , dole: hodnoty pomeru I_V/I_R . Čiarkovane sú preložené fitové krivky pre popis dlhodobej závislosti, pre intenzity ide o posunutú a škálovanú funkciu arkustangens, v prípade pomeru ide o kvadratickú závislosť.

2.3 Periodicita

Namerané hodnoty radiálnych rýchlostí po vynechaní odľahlých meraní v počte 60 meraní pre $H\alpha$ a 38 meraní pre He boli prehľadávané na periodickú zložku metódou popísanou Stellingwerfom (Stellingwerf (1978)) pomocou programu *HEC27*, Harmanec (2010). Vzhľadom na pomerne malý počet dátových bodov sme pre prehľadávanie volili 5 binov a 2 reprezentácie. Prehľadávanie sme vykonali v troch intervaloch periód $1000\text{ d} - 1\text{ d}$, $1\text{ d} - 0,5\text{ d}$ a $0,5\text{ d} - 0,2\text{ d}$. Zvolený fázový rozdiel medzi testovacími frekvenciami na celej časovej základni bol zvolený 0,1, čo dalo krok v testovacích frekvenciách $\Delta f = 0,000\,014\text{ d}^{-1}$ s výnimkou čiary hélia, kde pre kratšiu časovú základňu $\Delta f = 0,000\,03\text{ d}^{-1}$. Tieto hodnoty preto určujú nepresnosť určených frekvencií. Rovnako sme postupovali aj pre reziduá po odčítaní dlhodobej závislosti z nameraných stredných intenzít a pomeru intenzít I_V/I_R . Najvýraznejšie frekvencie a k nim prislúchajúce hodnoty θ pre

jednotlivé veličiny vidíme v tabuľke 2.4. Vyberali sme 1-3 najvýraznejšie minimá z jednotlivých prehľadávaných intervalov.

Spolu s nameranými dátami sme analyzovali aj súbor náhodných dát vybra- tých z normálneho rozdelenia, čo nám umožní odhadnúť štatistickú významnosť nájdených minim θ -štatistiky pre merané dáta. Toto bolo vykonané pre 12 ná- hodných súborov pre každú časovú základňu. Z výsledkov θ -štatistiky sme určili priemer minimálnych hodnôt v jednotlivých prehľadávaných intervaloch, z kto- rých prostrednú hodnotu berieme ako štatistický ukazovateľ významnosti. Získali sme tak hodnoty $\theta_c = 0,76$ pre spektrofotometrické veličiny, $\theta_c = 0,71$ pre čiaru vodíka a $\theta_c = 0,60$ pre čiaru hélia. Porovnaním hodnôt θ s tabuľkou 2.4 môžeme usúdiť, že sme nedetekovali žiadnu signifikantnú periodicitu, nanajvýš niekoľko kandidátnych frekvencií. Tieto potenciálne frekvencie však nie sú súčasne dete- gované vo viacerých veličinách. Najvýznamnejšie z nich boli prezreté vo fázovom diagrame, no žiadna z nich nebola dostatočne presvedčivá.

Tabuľka 2.4: Frekvencie f nájdené Stellingwerfovou metódou v nameraných ra- diálnych rýchlostiach a reziduách intenzity emisie a pomeru I_V/I_R po odstránení dlhodobého trendu

$v(\text{H}\alpha_j)$		$v(\text{H}\alpha_k)$		$v(\text{HeI})$		reziduá I_V/I_R		reziduá I	
f [d^{-1}]	θ	f [d^{-1}]	θ	f [d^{-1}]	θ	f [d^{-1}]	θ	f [d^{-1}]	θ
0,02748	0,66	0,00133	0,71	0,10421	0,60	0,65154	0,71	0,96898	0,84
0,50138	0,66	0,53728	0,75	0,10515	0,60	0,99384	0,74	0,00279	0,84
0,99737	0,68	1,69679	0,71	0,67282	0,66	0,57834	0,76	0,53969	0,85
1,97808	0,70	4,61757	0,73	1,73299	0,55	1,40396	0,77	1,40570	0,74
3,05195	0,67	3,73970	0,73	3,00918	0,60	4,69876	0,75	1,72853	0,83
2,04249	0,69	2,18169	0,73	2,67173	0,61	2,63781	0,77	3,02504	0,80
3,20856	0,70	2,21660	0,73	3,21047	0,61	4,49159	0,77	2,91357	0,80

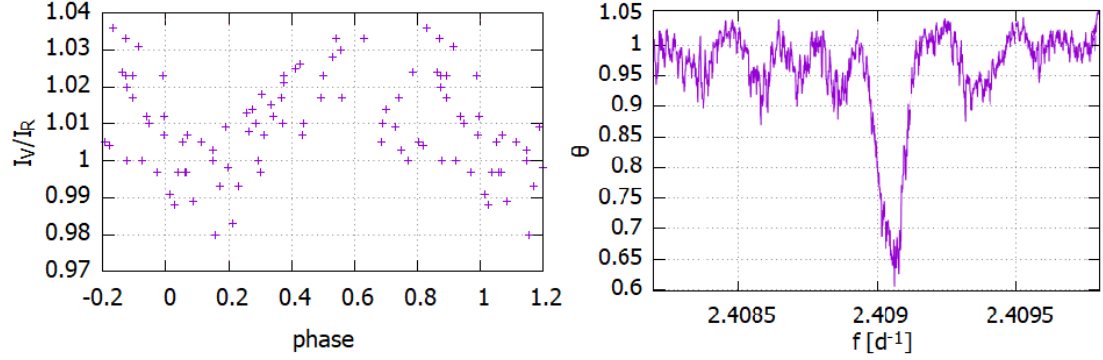
Na koniec sme prehľadali aj pôvodné hodnoty pomeru I_V/I_R . Nájdené periódy sú uvedené v tabuľke 2.5, krok vyhľadávania bol $\Delta f = 0,000\,004\,\text{d}^{-1}$, hranicu sig- nifikancie sme určili ako $\theta_c = 0,72$. Najvýznamnejšej frekvencii $f = 2,409\,063\,\text{d}^{-1}$ odpovedá perióda $P = 0,415\,099\,\text{d}$. Príslušný fázový diagram môžeme vidieť na obrázku 2.5. Po vyradení trojice odľahlých bodov a jemnejšom prehľadaní sme dostali $f = (2,409\,05 \pm 0,000\,05)\,\text{d}^{-1}$ s príslušnou hodnotou $\theta = 0,604$ a periódou $P = (0,415\,10 \pm 0,000\,01)\,\text{d}$, kde chyby boli určené z šírky v polovici minima roz- delenia θ -štatistiky na obrázku 2.5. Táto perióda je však menšia ako vzorkovanie dát, počas jednej noci nebolo získané viac ako jedno spektrum. Pre jej potvrde- nie je teda potrebné získať niekoľkodňovú radu celonočných pozorovaní. Navyše sa tým podarí vylúčiť vplyv polohy telurických čiar v profile, keďže budú mať jednotlivé pozorovania približne rovnakú heliocentrickú korekciu.

2.4 Vplyv telurických čiar

Pre posúdenie vplyvu pohybu telurických čiar voči spektru hviezdy sme vy- niesli graf 2.6 závislosti pomeru I_V/I_R a radiálnej rýchlosti na krídlach čiar $\text{H}\alpha$ v_k na heliocentrickej korekcii. V prípade pomeru intenzít pozorujeme nárast okolo hodnoty korekcie $-5\,\text{km/s}$ a postupný pokles pre jej kladné hodnoty so

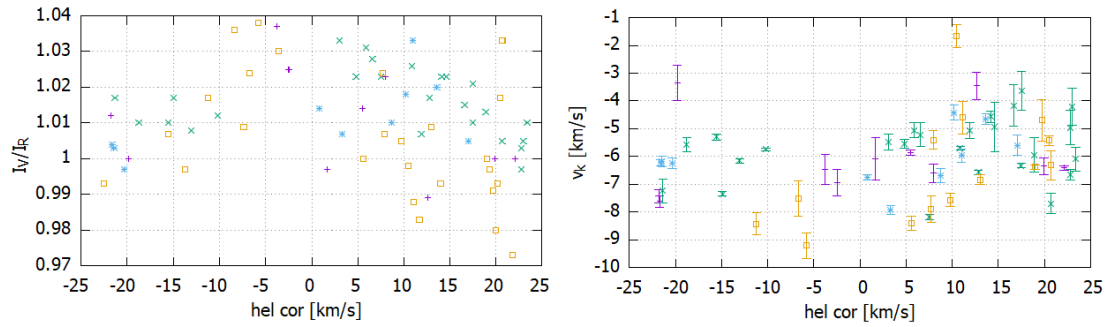
Tabuľka 2.5: Frekvencie f nájdené Stellingwerfovou metódou v nameraných pomeroch I_V/I_R pred odstránení dlhodobého trendu

f [d ⁻¹]	θ
2,409063	0,70
1,002584	0,72
3,086836	0,73
1,406293	0,73
0,999861	0,74



Obrázok 2.5: Periodická závislosť pre pomer I_V/I_R , $P = 0,415$ 10 d.
vľavo: fázový diagram pre namerané hodnoty pred odstránením trendu pre periódu $P = 0,415$ 10 d, vpravo: θ -štatistika v okolí príslušného minima

značným rozptylom hodnôt pomeru. Toto je následok najmä posunu silnej čiary vody $\lambda = 6564,21$ Å cez červený vrchol emisie. Rozptyl pre kladné hodnoty korekcie je spôsobený rôznou disperziou spektier. Vidíme, že napr. pre Ondřejovské spektrá (zelenou), je šírka závislosti menšia. V meraniach radiálnych rýchlostí na krídlach emisie pozorujeme vlnu o amplitúde asi 2 km/s – 3 km/s, tentokrát sa jedná pravdepodobne o vplyv čiary vody na 6557,17 Å a ďalších slabších čiar. V prípade radiálnej rýchlosti pre jadro emisie je vplyv zrejmy už z problémov pri samotnom meraní, v okolí čiary hélia sa telurické čiary nevyskytujú. Vplyv pohybu telurických čiar na merania v okolí čiary H α je demonštrovaný v prípade hviezdy β CMi v práci Harmanec a kol. (2019). Nájdené frekvencie okolo $f \approx 0,00274$ d⁻¹ a $f \approx 0,00137$ d⁻¹ sú teda spôsobené práve posunom telurických čiar.



Obrázok 2.6: Závislosť meraných veličín na heliocentrickej korekcii
Vľavo pomer I_V/I_R , vpravo radiálne rýchlosti na krídlach čiary H α ;
Body znázornené farebne podľa skupiny dát: fialová-D, zelená-O, modrá-E, žltá-B.

3. Fotometria

Znovuspracujeme fotometriu použitú v článkoch Percy a kol. (1981) a Harmanec a kol. (1991) spolu s fotometriou získanou družicou Hipparcos, prehliadky KELT (Labadie-Bartz a kol. (2017)) a doteraz nespracovanou farebnou fotometriou. Prehľad použitej fotometrie je uvedený v tabulke 3.1. Fotometria družice Hipparcos bola prevedená do V a B kanálu pomocou transformácie podľa článku Harmanec (1998)

$$V = H_p - 0,2964(B - V) + 0,0050(U - B) + 0,1110(B - V)^2 + 0,0157(B - V)^3 + 0,0072$$

$$B = V + (B - V),$$

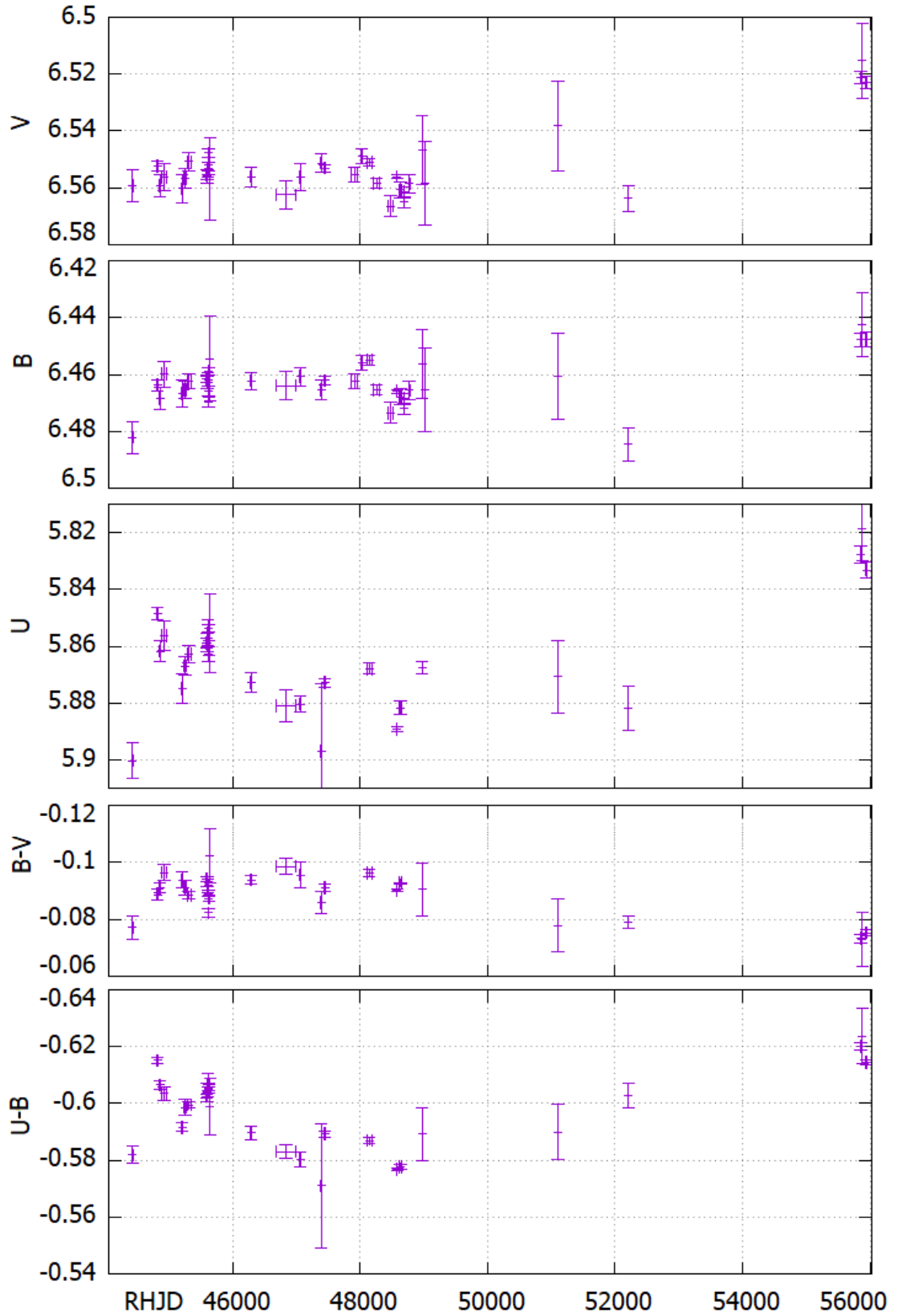
za použitia hodnôt farebných indexov $B - V = -0,093^m$ a $U - B = -0,596^m$. Následne sme tieto dátové body pridali k farebnej fotometrii. Získaná fotometria KELT už má odstránené dlhodobé trendy, navyše nemáme prekryv medzi dátami KELT a farebnou fotometriou, čo znemožňuje ich vzájomnému porovnaniu/prevodu.

Tabuľka 3.1: Prehľad použitej fotometrie

Observatórium	Počet	Časové pokrytie RHJD	Kanál
Hvar, Chorvátsko	376	44433-55945	V, B, U
Skalnaté Pleso, SR	3+4	45605, 45621	V, B, U
Ondřejov, ČR	4	45646	V, B, U
McDonald, USA	85	45618-45632	$V, B, (U)$
Xing-Long, Čína	204	45619-48973	V, B, U
KPNO-0.4, Kitt Peak, USA	18	45614-45618	V, B, U
Toronto, Canada	13	47389-47393	V, B
San Pedro Mártir, Mexiko	8	52205-52212	V, B, U
Hipparcos	155	47865-49014	H_p
KELT, Winer Observatory, USA	1084	56068-57003	R_{KELT}

3.1 Dlhodobé zmeny

Pre štúdiu dlhodobých zmien jasnosti a farby hviezdy sme spojenú fotometriu rozdelili na menšie úseky. Dĺžku úsekov sme sa snažili voliť tak, aby v každom intervale bolo viac ako 10 dátových bodov a jeho dĺžka bola približne 6 dní. Vzhľadom na nepravidelné pokrytie dátami to však nebolo vždy možné, v takých prípadoch sme obmedzovali dĺžkou intervalu dĺžkou niekoľkých mesiacov aj za cenu málo dátových bodov v miestach väčších medzier dátového pokrytia. V každom intervale sme vypočítali aritmetický priemer a štandardnú odchýlku jasností a farebných indexov, ktoré boli k dispozícii. Týmto sme sa snažili odstrániť vplyv krátkodobej premennosti hviezdy. V niektorých prípadoch sme v danom intervale disponovali len pozorovaniami z jednej noci, v tomto prípade bola štandardná odchýlka zväčšená umelo o 0.01^m .

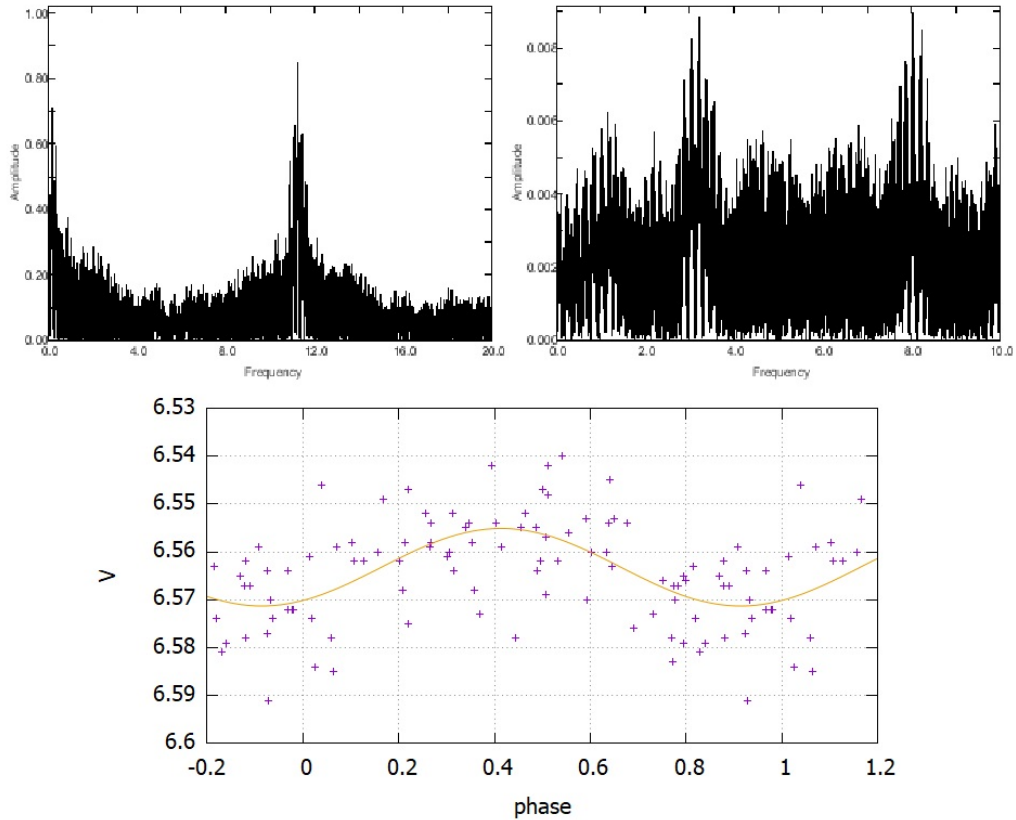


Obrázok 3.1: Dlhodobý vývoj fotometrických veličín
 Z hora postupne magnitúdy v kanáloch V , B , U a farebné indexy $B - V$, $U - B$

Naše výsledky sú vynesené v grafe 3.1. Môžeme vidieť, že v období pred RHJD = 52 000 sa jasnosti v kanáloch V, B, U pohybujú v blízkosti hodnôt $V = 6,56^m$, $B = 6,46^m$ a $U = 5,87^m$ a príslušné farebné indexy majú hodnoty približne $B - V = -0,09^m$ a $U - B = -0,59^m$. Novšie pozorovania pre RHJD = 56 000 poukazujú na nárast jasnosti v kanále V o asi $0,04^m$, kanále B o $0,02^m$ a kanále U o asi $0,04^m$ a zodpovedajúce zmeny vo farebných indexoch. Táto zmena odpovedá času konca nárastu intenzity emisie v spektre.

3.2 Rýchla premennosť a jej vývoj

Následne sme skúmali rýchlu premennosť hviezdy. Dobrú predstavu o premennosti hviezdy ponúka fotometria Hipparcos v rozmedzí RHJD = 48 442 – 48 780, ktorá je v čase rozmiestnená nepravidelne a poskytuje teda pomerne čisté fourierovské spektrum. Pomocou programu *Period04* sme najprv určili spektrálne okno, v ktorom sa nachádza výrazný pík pri $f_0 = 11,25 \text{ d}^{-1}$ s amplitúdou až $A = 0,85$. Spektrom určenému z dát dominuje frekvencia $f = (3,2316 \pm 0,0003) \text{ d}^{-1}$ o amplitúde $A = (0,0081 \pm 0,0014) \text{ m}$ a jej alias na rozdielovej frekvencii $f' = f_0 - f = 8,02 \text{ d}^{-1}$. Príslušné spektrogramy a fázový diagram môžeme vidieť na obrázku 3.2.



Obrázok 3.2: Periodická závislosť fotometrie Hipparcos

hore vľavo: spektrálne okno, hore vpravo: fourierovské spektrum dát,
dole: fázový diagram pre frekvenciu $f = (3,2316 \pm 0,0003) \text{ d}^{-1}$

Ďalej sme sa zamerali na dlhodobú premennosť tejto periódy. Použili sme kanál V spojenej fotometrie a fotometriu KELT, ktoré sme rozdelili do podsúborov

Tabuľka 3.2: Rozdelenie fotometrie podľa sezón

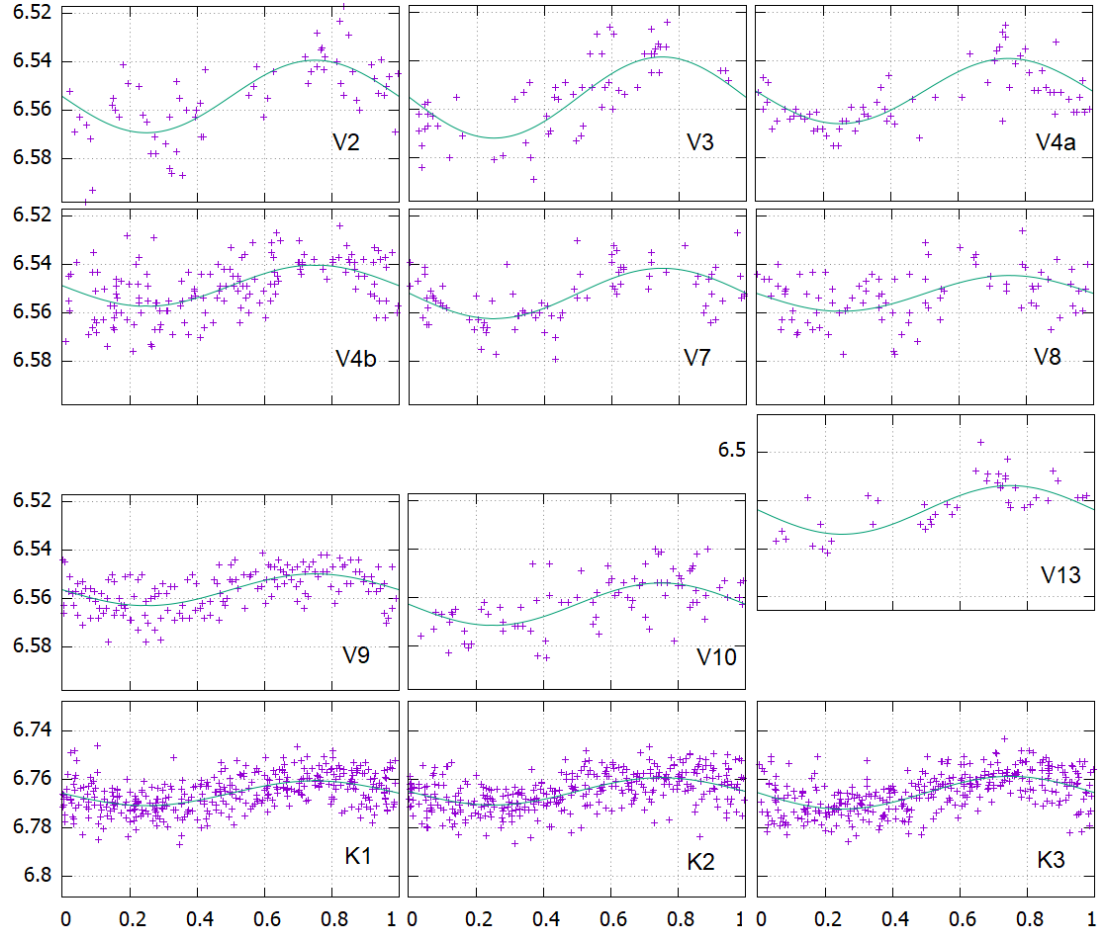
Označenie	Počet	Stred intervalu RHJD	Dĺžka intervalu d
V1	7	44434	2
V2	67	44885	148
V3	62	45250	143
V4a	71	45599	15
V4b	158	45628	35
V5	9	46289	3
V6	15	46740	119
V7	86	47258	398
V8	91	48086	442
V9	158	48511	139
V10	71	48809	205
V11	3	51102	1
V12	8	52209	7
V13	44	55898	95
K1	374	56171	205
K2	355	56540	194
K3	355	56903	201

podľa jednotlivých sezón. Rozdelenie, stredný Juliánsky dátum, rozsah intervalov pokrytý bodmi a počet dátových bodov v jednotlivých intervaloch je zanesený v tabuľke 3.2. Pre súbory dát o počte väčšom ako 40 sme pomocou programu *Period04* (Lenz a Breger (2005)) prehľadávali oblasti frekvencií $3 \text{ d}^{-1} - 3,5 \text{ d}^{-1}$ odpovedajúcej najvýznamnejšej premennosti a vykonali fit dvojitej sínusovky vzťahom

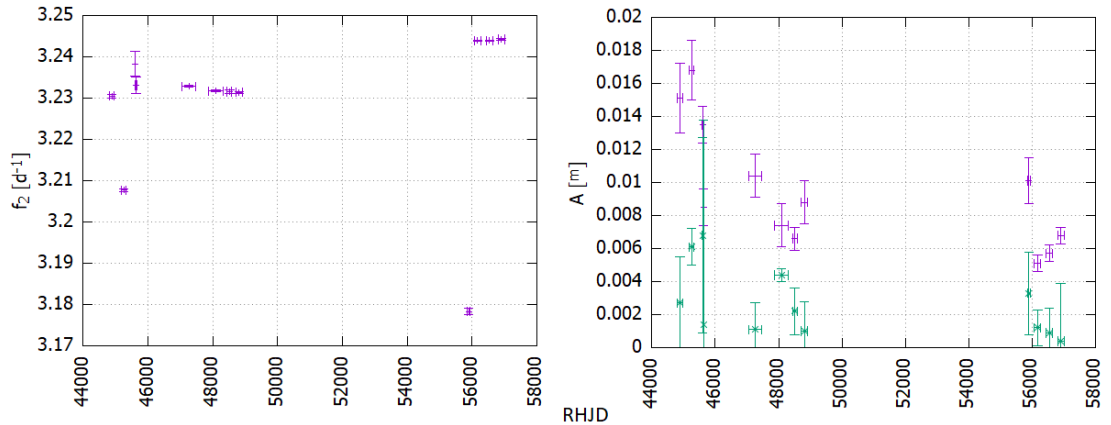
$$V = Z + A_1 \sin(2\pi(f_1 t + p_1)) + A_2 \sin(2\pi(f_2 t + p_2)), \quad (3.1)$$

s väzbou $f_1 = f_2/2$, kde f_1, f_2 sú frekvencie, A_1, A_2 amplitúdy a p_1, p_2 fázy. Chyby týchto parametrov boli určené programom analyticky podľa vzťahov v prílohe článku Breger a kol. (1999). Fázové diagramy príslušných intervalov dát môžeme vidieť na obrázku 3.3, výsledné fitové parametre sú znázornené na obrázku 3.4 a zanesené v prílohách v tabuľke A.3 spolu s časmi T_0 v blízkosti stredu skúmaného intervalu, kedy bol argument príslušného sínusového členu celočíselným násobkom 2π , jeho príspevok bol teda nulový a číselne narastal.

Frekvencia premennosti hviezdy je v čase pred RHJD $< 50\,000$ pomerne stála s hodnotou okolo $f_2 = 3,232 \text{ d}^{-1}$, čo odpovedá perióde $P = 0,3094 \text{ d}$. Táto hodnota je podľa očakávania zhodná s polovicou periódy $P = 0,619 \text{ d}$ získanej z podmnožiny použitých dát v článku Harmanec a kol. (1991). Výnimkou je len prípad sady V3, tá však poskytovala v danej oblasti spektrogramu pomerne široký interval prípustných hodnôt. Máme za to, že nepresnosť určenia tejto frekvencie je rádovo väčšia, ako bolo odvodené z analytických vzťahov. V tomto období amplitúda premennosti postupne klesala. Bod pre sadu V13 odpovedá obdobiu nárastu emisie. Po prechode systému do nového stabilizovaného stavu pre RHJD $> 56\,000$ môžeme pozorovať zmenu frekvencie na $f_2 = 3,244 \text{ d}^{-1}$. Tejto frekvencii odpovedá perióda $P = 0,3083 \text{ d}$. Autori prehliadky KELT v práci Labadie-Bartz a kol. (2017) identifikovali periódu $P = 1,311\,92 \text{ d}$, jedná sa prav-



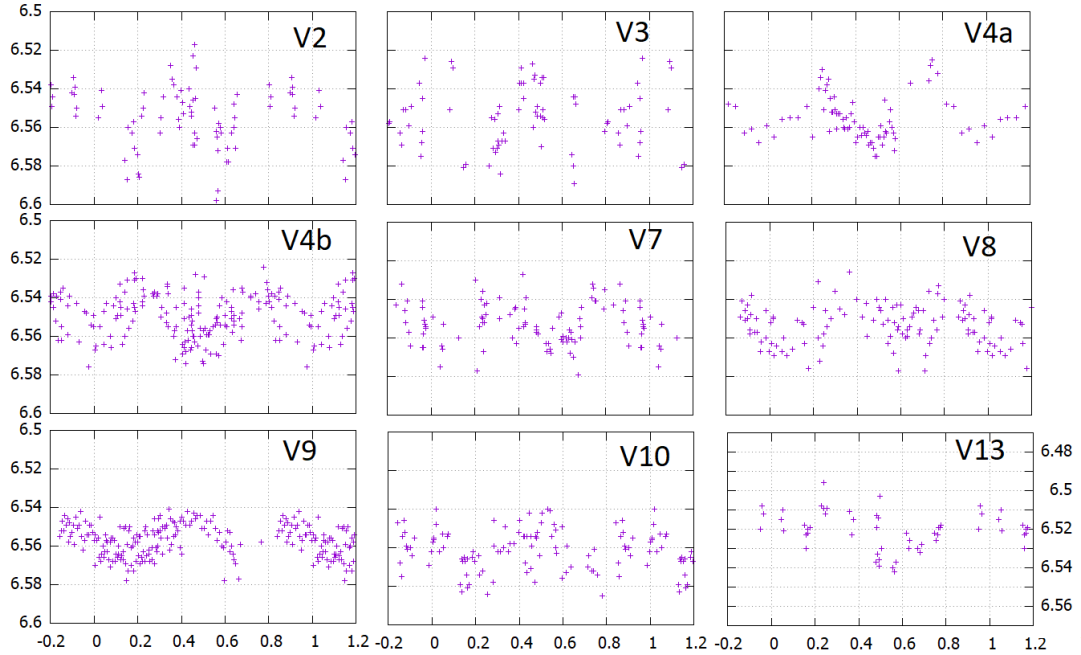
Obrázok 3.3: Fázové diagramy pre fotometriu pre jednotlivé frekvencie f_2 . Horné tri rady: V kanál farebnej fotometrie, spodný rad: KELT R fotometria, preložené jednoduchou sínusovou závislosťou, popisky určujú dátový súbor podľa tabuľky 3.2



Obrázok 3.4: Vývoj amplitúdy a frekvencie fotometrickej premennosti vľavo: hlavná frekvencia f_2 , vpravo: amplitúdy A_2 fialovou a A_1 zelenou

depodobne o alias $4 \text{ d}^{-1} - (1,31192 \text{ d})^{-1} \approx 3,244 \text{ d}^{-1}$. Dáta naznačujú pomalý nárast amplitúdy premennosti. Pre polovičnú frekvenciu f_1 môžeme vo všeobecnosti konštatovať, že jej prítomnosť sa podarilo preukázať v súboroch V3 a V8. V ostatných súboroch sa nachádza na hranici detekcie v použitých dátach. Jej amplitúda je pravdepodobne ako v prípade hlavnej periódy premenná v čase.

Vzhľadom na pomernú stabilitu hlavnej frekvencie pre $\text{RHJD} < 50\,000$ sme vyniesli fázový diagram 3.5 so spoločnou lineárnou efemeridou s frekvenciou $f = 3,232\text{ d}^{-1}/2 = 1,616\text{ d}^{-1}$ a počiatkom v $\text{RHJD} = 0$, aby bolo možné identifikovať prípadnú polovičnú frekvenciu premennosti. Závislosť s dvomi maximami a minimami v intervale fáz $0 - 1$ je dobre viditeľná s výnimkou súborov V2, V3, v ktorých sa hlavná perióda dá zviditeľniť pridaním dát posunutých o pol periódy, a súboru V13. V prípade súboru V13 má závislosť komplikovanejší tvar s jedným silnejším a jedným nevystredovaným slabším minimom, je však možné, že sa jedná len o sínusovku jednoduchú.



Obrázok 3.5: Fázové diagramy pre fotometriu pre frekvenciu $f = 1,616\text{ d}^{-1}$ popisky určujú dátový súbor podľa tabuľky 3.2

3.3 Súvislosť rýchlych zmien medzi farebnými kanálmi

Nakoniec sme sa pozreli na súvislosť zmien jasnosti hviezdy v kanále V v kontexte zmien v ostatných kanáloch. Pre tento účel sme použili farebnú fotometriu z medzinárodnej kampane v rozmedzí $\text{RHJD} = 45\,590 - 45\,650$, pričom súbor približne 220 meraní sme rozdelili na dva podsúbory o približne polovičnom rozsahu - fotometriu z Hvarského observatória a ostatné. Následne sme analyzovali kanály V, B, U (v tomto poradí) metódou hlavných komponent, pričom sme pracovali v jednotkách mmag . Vypočítali sme korelačnú maticu \mathbf{C} meraní a následne našli jej vlastné čísla σ_i a normalizované vlastné vektory \mathbf{v}_i . Naše dáta sa následne dajú približne charakterizovať ako výber z normálneho rozdelenia

$$f(\mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sqrt{|\det \mathbf{C}|}} \exp\left(-\frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{x}\right). \quad (3.2)$$

Toto rozdelenie sa dá následne znázorniť pomocou trojosého elipsoidu o osiach daných vektormi $\mathbf{u}_i = \sigma_i \mathbf{v}_i$. Získané boli korelačné matice

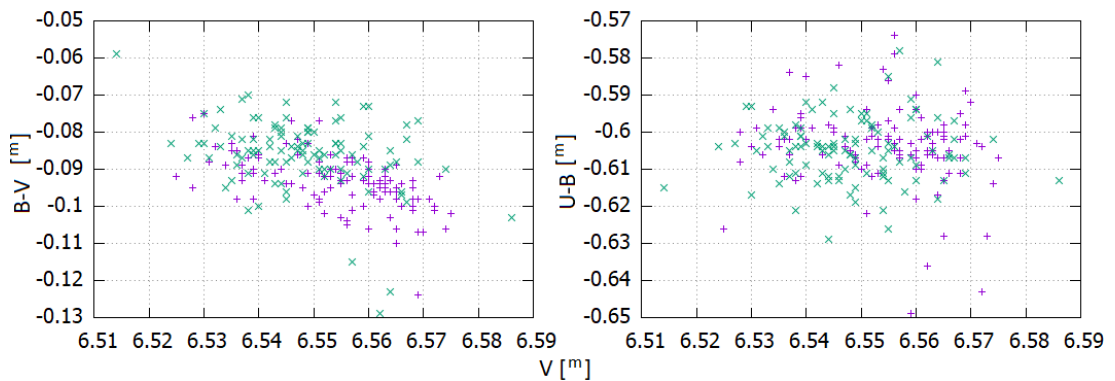
$$\mathbf{C}^{Hvar} = \begin{bmatrix} 141.50 & 91.62 & 71.84 \\ 91.62 & 94.99 & 69.39 \\ 71.84 & 69.39 & 158.33 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}^{ost} = \begin{bmatrix} 137.17 & 99.09 & 100.95 \\ 99.09 & 151.61 & 122.09 \\ 100.95 & 122.09 & 167.11 \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

a z nich vlastné čísla a príslušné osy elipsoidov

$$\sigma_i^{Hvar} = \{288.68, 83.77, 22.37\}, \quad \sigma_i^{ost} = \{368.26, 51.14, 36.50\};$$

$$\mathbf{u}_i^{Hvar} = \begin{bmatrix} 10.39 \\ 8.61 \\ 10.32 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} -5.15 \\ -2.39 \\ 7.18 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} 2.63 \\ -3.89 \\ 0.59 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_i^{ost} = \begin{bmatrix} 10.02 \\ 11.27 \\ 11.89 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} -5.99 \\ 1.53 \\ 3.60 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} 0.98 \\ -4.72 \\ 3.65 \end{bmatrix}.$$

Môžeme vidieť, že dáta neposkytujú rovnaké výsledky. Rozdiel medzi dvomi sadami vo veľkosti hodnôt korelačných koeficientov a vlastných čísel je najmä dôsledkom rôznej presnosti jednotlivých observatórií, rozdiel v ich vzájomných pomeroch a v získaných smeroch je však signifikantný a pripisujeme ho faktu, že v druhom súbore sa vyskytujú pozorovania z viacerých observatórií, ktoré môžu byť medzi sebou systematicky posunuté. Pre interpretáciu výsledkov preto použijeme prvú sadu z observatória Hvar, zaujíma nás predovšetkým smer hlavnej osi elipsoidu. V prípade, ak by nedochádzalo k farebným zmenám hviezdy, by mala mať smer pozdĺž diagonály, teda priemety do osí V , B , U by mali mať rovnaké hodnoty. Vidíme však, že priemet do osi B je menší o asi 16% ako priemet do zvyšných dvoch osí. To naznačuje menšiu amplitúdu premennosti v kanále B a súbežnú zmenu vo farebných indexoch. Graf 3.6 závislosti farebných indexov na jasnosti v kanále V tento výsledok potvrdzuje pre prípad indexu $(B - V)$, v prípade indexu $(U - B)$ môže byť výsledok spôsobený množstvom odľahlých bodov. Taktiež vidíme aj graficky systematický rozdiel medzi súbormi dát v grafe pre index $B - V$.



Obrázok 3.6: Farebné zmeny súvisiace s rýchlou premennosťou

vľavo: závislosť farebného indexu $B - V$ na kanále V fotometrie v rozmedzí RHJD = 45 590 – 45 650, vpravo: pre farebný index $U - B$;

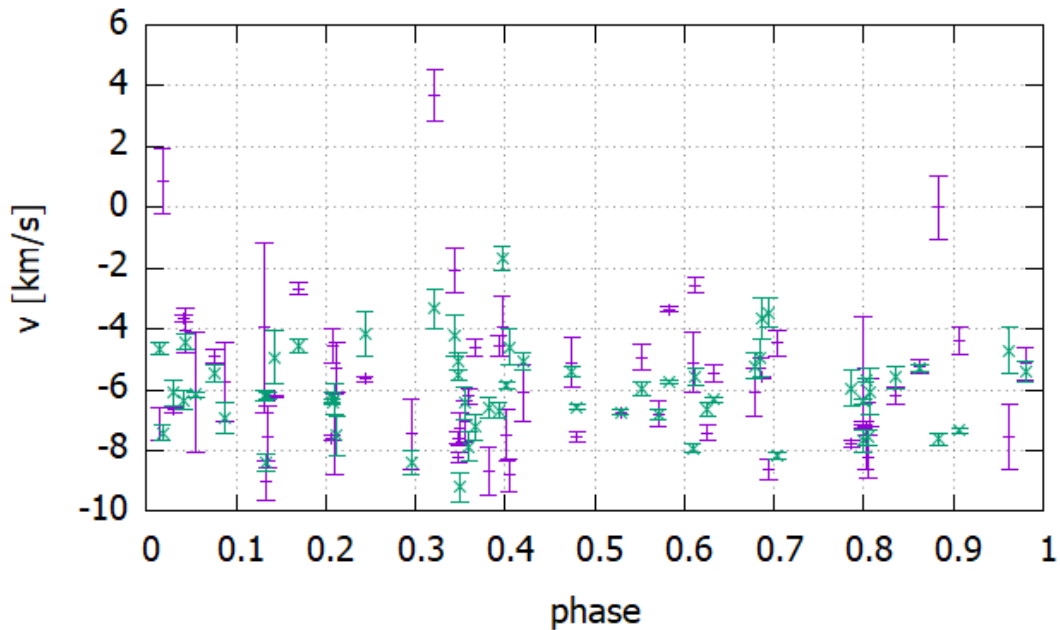
fialovou Hvarské observatórium, zelenou ostatné observatóriá

4. Vlastnosti systému

4.1 Prítomnosť sprievodcu

Matthews a kol. (1991) v 62 spektrách z modrej oblasti z obdobia RJHD = 47 375 – 47 397 pre spektrálne čiary $H\gamma$, $\text{HeI } \lambda = 4387 \text{ \AA}$, $\text{HeI } \lambda = 4471 \text{ \AA}$ a $\text{MgII } \lambda = 4481 \text{ \AA}$ namerali radiálne rýchlosti, ktoré poukazovali na sprievodcu s obežnou dobou $P = 7,41324 \text{ d}$. Na čiarach $H\gamma$ a $\text{HeI } \lambda = 4387 \text{ \AA}$ dostali súhlasné dráhové elementy so semiampplitúdou radiálnych rýchlostí $K = (11,2 \pm 0,7) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ a radiálnou rýchlosťou ťažiska $\gamma = (-0,2 \pm 0,4) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, čo naznačovalo trpasličieho sprievodcu.

Naše merania tomuto jasne kontradiujú. V tabuľke 2.3 si hodnoty pre jednotlivé čiary (teda pre emisiu disku aj absorbciu vo fotosfére hviezdy) navzájom súhlasia a ďalej môžeme usúdiť, že v prípade dvojhviezdneho systému má radiálna rýchlosť ťažiska hodnotu $\gamma = (6,19 \pm 0,13) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, s prihliadnutím na možný vplyv telurických čiar $\gamma = (6,2 \pm 1,5) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, a semiampplitúda je určite menšia ako $K < K_m \approx 2\sigma_v \approx 3,0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, pravdepodobne menšia ako $K'_m = 1,5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Na fázovom diagrame pre periódu $P = 7,41324 \text{ d}$ pre radiálne rýchlosti na čiare $H\alpha$ na obrázku 4.1 tiež nie je viditeľná významná závislosť, pričom je fázový interval rovnomerne pokrytý.



Obrázok 4.1: Radiálne rýchlosti na čiare $H\alpha$ fázované periódou $P = 7,41324 \text{ d}$. fialovou pre jadro emisie, zelenou pre krídla emisie

Pre určenie limitov na prípadného sprievodcu môžeme za predpokladu približnej kolmosti rotačnej osi primárnej hviezdy na rovinu obehu s využitím hodnoty inklinácie rotačnej osi z tabuľky 1.1 položiť absolútnu hornú hranicu priestorovej obežnej rýchlosti primárnej hviezdy na $v_1 < 4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ a pravdepodobnú hranicu na $v'_1 < 2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Doba pokrytia dátami $\Delta T \approx 7000 \text{ d}$ dáva odhad dĺžky najdlhšej periódy, ktorú by sme s touto amplitúdou boli schopný detekovať. Prevezmeme

ešte hranicu $a < 23$ au z interferometrických pozorovaní Mason a kol. (1997).

Medzi hmotnosťou zložiek M_1 , M_2 , obežnou periódou P a veľkou polosou dráhy a platí podľa tretieho Keplerovho zákona

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G(M_1 + M_2)}{4\pi^2}, \quad (4.1)$$

pre orbitálnu rýchlosť primárnej zložky máme so zjednodušením pre kruhovú orbitu

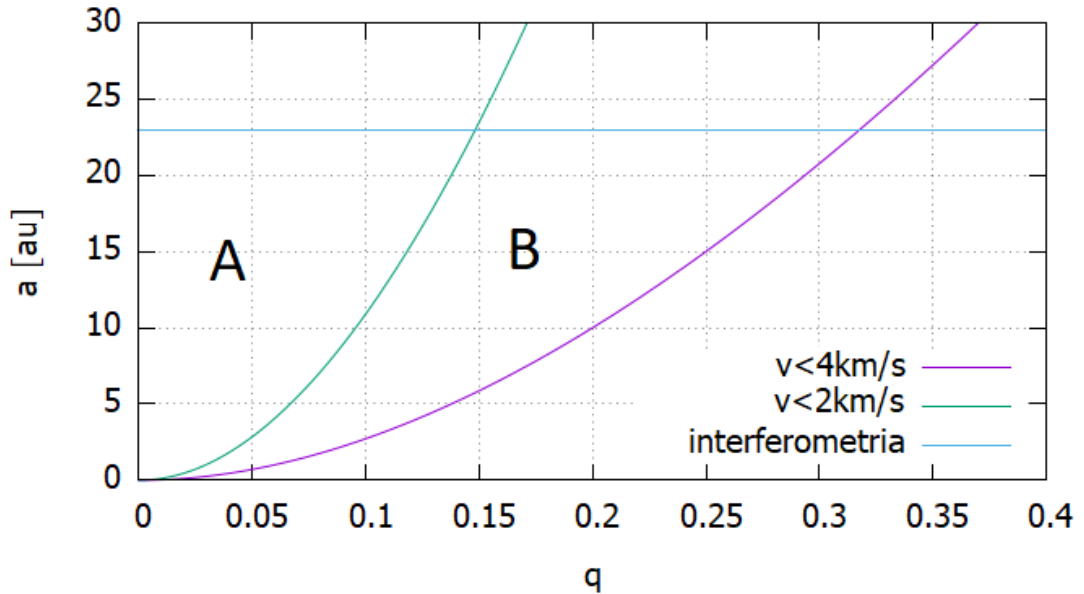
$$v_1 = \frac{2\pi a}{P} \frac{M_2}{M_1 + M_2}. \quad (4.2)$$

Dosadením periódy z 4.1 do 4.2 a vyjadrením veľkej polosy dostávame

$$a = \frac{M_1 G}{v_1^2} \frac{q^2}{1+q} > \frac{q^2}{1+q} \cdot 300 \text{ au} \quad (1200 \text{ au}). \quad (4.3)$$

kde $q = M_2/M_1$ je hmotový pomer, číselný výsledok je po dosadení pre absolútny limit obežnej rýchlosti a v zátvorke pre pravdepodobný limit.

Hranice pre dvojicu parametrov q , a určené z pozorovaní sú znázornené na obrázku 4.2. Vidíme, že pre maximálnu separáciu zložiek danú interferometrickými pozorovaniami, dostávame krajné hodnoty hmotového pomeru $q < q_m = 0,32$, respektíve $q < q'_m = 0,15$. Sekundárna zložka teda musí mať hmotnosť určite menšiu ako $M_2 < 1,7 M_\odot$, pravdepodobne menšiu ako $M_2 < 0,8 M_\odot$.



Obrázok 4.2: Hranice priestoru parametrov veľkej polosy a a hmotového pomeru q . Prípustná oblasť parametrov je zjednotenie oblastí A a B, v oblasti B je výskyt značne nepravdepodobný.

4.2 Zmeny súvisiace s nárastom intenzity emisie

V období RHJD = 53 000 – 56 000 došlo k nárastu intenzity emisie o takmer 50%. Bohužiaľ toto obdobie nemáme pokryté veľkým množstvom meraní na popis

priebehu zmeny samotnej. Farebnou fotometriou disponujeme len v období cca 100 dní na konci intervalu, v ktorej pozorujeme nárast o asi $0,04^m$ v kanáloch V a U a o $0,02^m$ v kanále B . Vzhľadom na šírky priepustnosti filtrov Johnsonovho systému

$$U \approx 300 \text{ nm} - 400 \text{ nm}, \quad B \approx 400 \text{ nm} - 500 \text{ nm}, \quad V \approx 500 \text{ nm} - 650 \text{ nm}$$

je táto zmena konzistentná so zvýšením intenzity emisie na čiarach vodíku: $H\alpha$ je na okraji priepustnosti filtra V , pričom na tejto čiare je intenzita emisie výrazne najvyššia, čiary $H\beta$ a $H\gamma$ ležia v oblasti priepustnosti filtra B a koniec Balmerovej série s množstvom čiar je pozorovaný vo filtri U . Taktiež sme v tomto súbore farebnej fotometrie pozorovali zmenu tvaru svetelnej krivky z dvojitej sínusovky na jednoduchú. Po ustálení nového stavu sme vo fotometrii KELT opäť detekovali dvojitú sínusovku. Perióda premennosti sa však zmenila z $0,3094$ d pre nízku intenzitu emisie na $0,3083$ d, čo je zkrátenie o $0,36\%$. Tieto zmeny sa teda dajú súhrnne vysvetliť postupným odhodením veľkého množstva plynu z povrchu hviezdy.

4.3 Vlastnosti hviezdy

Pokúsme sa najprv určiť absolútnu bolometrickú jasnosť hviezdy M . Nameované hodnoty musíme najprv opraviť o medzihviezdnu extinkciu. Využijúc pozorované hodnoty magnitúdy v kanále $V = (6,555 \pm 0,010)^m$ a hodnôt farebných indexov $B - V = (-0,090 \pm 0,008)^m$ a $U - B = (-0,59 \pm 0,02)^m$ dostávame nesčervenaný farebný index postupom podľa elektronických skrípt Harmanec (2012) na základe práce Johnson (1958)

$$(B - V)_0 = \frac{0,332(U - B) - 0,239(B - V) - 0,0166(B - V)^2}{1 - 0,0166(B - V)}, \quad (4.4)$$

$$(B - V)_0 = (-0,174 \pm 0,008)^m.$$

To nám umožňuje určiť farebný exces

$$E(B - V) = (B - V) - (B - V)_0 = (0,084 \pm 0,011)^m$$

a následne aj absorpciu svetla v kanále V

$$A_V = 3,2 E(B - V) = (0,27 \pm 0,03)^m.$$

Pre nesčervenanú jasnosť V_0 potom dostávame

$$V_0 = V - A_V = (6,29 \pm 0,03)^m.$$

Ostáva vykonať bolometrickú korekciu o hodnotu $BC = (-1,7 \pm 0,2)^m$ odhadnutú pre spektrálnu triedu B4 podľa práce Popper (1980) dostávajúc zdanlivú bolometrickú jasnosť

$$m = V_0 + BC = (4,59 \pm 0,20)^m.$$

Využijúc Pogsonov vzťah a paralaxu určenú družicou Gaia $\pi = (2,42 \pm 0,05)$ mas dostávame absolútnu bolometrickú jasnosť LQ And

$$M = m + 5 + 5 \log \pi = (-3,49 \pm 0,20)^m.$$

Na tomto mieste je ďalej nutné poznamenať, že nami vykonaný proces je dobre kalibrovaný pre štandardné hviezdy hlavnej postupnosti. V prípade hviezdy LQ And môže proces odčervenania narúšať výskyt intenzívnej emisie v spektre.

Využívajúc efektívnej povrchovej teploty hviezdy $T_{eff} = (20\,350 \pm 750)$ K môžeme určiť efektívny polomer hviezdy ako

$$5 \log \left(\frac{R_{eff}}{R_{\odot}} \right) = 42,369 - M - 10 \log T_{eff} = 2,77 \pm 0,25, \quad (4.5)$$

čo po vyjadrení polomeru dáva $R_{eff} = (3,6 \pm 0,4) R_{\odot}$, bežný pre spektrálnu triedu B4. Pre určenie rovníkového polomeru predpokladajme, že vzhľadom na vysokú rotačnú rýchlosť je hviezda blízko dosiahnutiu kritickej rýchlosti rotácie a vyplňa svoj Rocheho lalok. Pre vzťah medzi rovníkovým polomerom R_e a polárnym polomerom R_p potom platí $R_e = 1,5R_p$. Z efektívneho polomeru potom môžeme určiť rovníkový za predpokladu pohľadu sponad rovníka (pre $i \approx 90^\circ$)

$$\pi R_{eff}^2 = \pi R_p R_e \quad R_e = \sqrt{\frac{3}{2}} R_{eff} = (4,4 \pm 0,5) R_{\odot}. \quad (4.6)$$

Zo znalosti priemetu rotačnej rýchlosti $v \sin i$ a sklonu rotačnej osi $i = 72^\circ$ dostávame rotačnú rýchlosť $v = (450 \pm 40)$ km/s. Zohľadnením krajných hodnôt sklonu a neurčitosti v určení priemetu rotačnej rýchlosti môže rotačná rýchlosť nadobúdať hodnoty v pomerne širokom rozsahu $v = 400$ km/s – 560 km/s. Tento interval je navyše zhora ohraničený kritickou rotačnou rýchlosťou

$$v_c = \sqrt{\frac{GM}{R_e}} = (480 \pm 40) \text{ km/s}, \quad (4.7)$$

ak využijeme nami určený rovníkový polomer a hmotnosť $M = (5,2 \pm 0,5) M_{\odot}$ pre spektrálnu triedu B4. Z krajných hodnôt rotačnej rýchlosti $v = 400$ km/s – 520 km/s a rovníkového polomeru môžeme určiť interval pre rotačnú periódu hviezdy ako

$$P = \frac{2\pi R_e}{v} = 0,38 \text{ d} - 0,62 \text{ d}. \quad (4.8)$$

Nami určená hodnota frekvencie hlavnej fotometrickej premennosti $f = 3,232 \text{ d}^{-1}$ odpovedajúca perióde $P = 0,3094 \text{ d}$ nespadá do tohto intervalu, jej dvojnásobok leží na jeho hranici a nadobúdala by sa len v prípade výrazne väčšej hodnoty hmotnosti a polomeru hviezdy rotujúcej kritickou rýchlosťou. Príčina rýchlej premennosti teda asi nie je rotácia hviezdy, aj keď túto možnosť nemôžeme úplne vylúčiť.

Záver

Preskúmanie množstva spektier v červenej oblasti spektra vyvracia záver práce Matthews a kol. (1991), že sa jedná o dvojhviezdnu sústavu, čo bolo potvrdené z radiálnych rýchlostí čiary HeI a krídel a jadra emisie na čiare H α . V získaných radiálnych rýchlostiach na krídlach emisie sa nenachádza premenná zložka so semiamplitúdou väčšou ako $K < 2$ km/s, pričom väčšina tohto rozsahu je pravdepodobne spôsobená posunom telurických čiar cez emisný profil.

Na periodickú zložku sme preskúmali aj strednú intenzitu emisie I a pomer intenzít fialového a červeného vrcholu emisie I_V/I_R . Ako jediný kandidát sa ukazuje perióda $P = 0,41510$ d pre pomer I_V/I_R , avšak vzhľadom na prítomnosť telurických čiar v profile a časové rozlíšenie použitých dát je pre potvrdenie tejto periódy nutné získať sériu celonočných spektier v období s podobnou heliocentrickou korekciou.

Hviezda v období RHJD = 53 000 – 56 000 prekonala nárast intenzity emisie z hodnôt okolo $I = 2,8$ na hodnotu až $I = 4,2$. Táto zmena bola sprevádzaná zmenou jasnosti hviezdy vo všetkých kanáloch a poklesom hodnoty rýchlej fotometrickej periódy z 0,3094 d na 0,3083 d. Tieto periódy sú v obdobiach konštantnej emisie stabilné, mení sa však amplitúda premennosti. V niekoľkých súboroch sa nám podarilo dokázať prítomnosť dvojnásobnej periódy okolo 0,619 d.

Z hodnôt jasností, farebných indexov a efektívnej teploty sme sa pokúsili určiť polomer hviezdy a jej rotačnú periódu, ktorej hodnota sa pravdepodobne nachádza medzi periódou rýchlej premennosti a jej dvojnásobkom, čo naznačuje, že príčinou premennosti nie je rotácia hviezdy.

Pre lepšie pochopenie zmien súvisiacich so zmenou intenzity emisie a odhadov parametrov hviezdy navrhujeme získať nové dáta farebnej UBV fotometrie.

Zoznam použitej literatúry

- ALVAREZ, M., SAREYAN, J. P. a MICHEL, R. (1990). Short period variations of LQ And. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, **21**, 391.
- ANDRILLAT, Y. (1983). Deuxieme catalogue du profil de la raie H alpha dans 55 etoiles Be. *Astronomy and Astrophysics Supplements*, **53**, 319–338.
- BALLEREAU, D., ALVAREZ, M., CHAUVILLE, J. a MICHEL, R. (1987). H α echelle spectroscopy of Be stars: an atlas. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, **15**, 29–52.
- BODENSTEINER, J., BAADE, D., GREINER, J. a LANGER, N. (2018). Infra-red nebulae around bright massive stars as indicators for binary interactions. *Astronomy and Astrophysics*, 618:A110. doi: 10.1051/0004-6361/201832722.
- BREGER, M., HANDLER, G., GARRIDO, R., AUDARD, N., ZIMA, W., PAPARÓ, M., BEICHBUCHNER, F., LI, Z.-P., JIANG, S.-Y., LIU, Z.-L., ZHOU, A.-Y., PIKALL, H., STANKOV, A., GUZIK, J. A., SPERL, M., KRZESINSKI, J., OGLOZA, W., PAJDOSZ, G., ZOLA, S., THOMASSEN, T., SOLHEIM, J. E., SERKOWITSCH, E., REEGEN, P., RUMPF, T., SCHMALWIESER, A. a MONTGOMERY, M. H. (1999). 30+ frequencies for the delta Scuti variable 4 Canum Venaticorum: results of the 1996 multisite campaign. *Astronomy and Astrophysics*, **349**, 225–235.
- BYCHKOV, V. D., BYCHKOVA, L. V. a MADEJ, J. (2009). Catalogue of averaged stellar effective magnetic fields - II. Re-discussion of chemically peculiar A and B stars. *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, **394**(3), 1338–1350. doi: 10.1111/j.1365-2966.2008.14227.x.
- GAIA COLLABORATION (2018). VizieR Online Data Catalog: Gaia DR2 (Gaia Collaboration, 2018). *VizieR Online Data Catalog*, art. I/345.
- HARMANEC, A. (2020). User documentation for the program reSpefo (v1.0.6). <https://astro.troja.mff.cuni.cz/projects/respefo/documentation.html>, 1.4.2020. Program je voľne dostupný na adrese <https://astro.troja.mff.cuni.cz/projects/respefo/>.
- HARMANEC, P. (1984). Studies in Be-Star Variability. 1. A Remarkable Similarity of the Rapid Periodic Light Variations of EM Cep, σ ORI E, and Possibly LQ And. *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia*, **35**, 193.
- HARMANEC, P. (1998). A reliable transformation of HIPPARCOS H $_p$ magnitudes into Johnson V and B magnitudes. *Astronomy and Astrophysics*, **335**, 173–178.
- HARMANEC, P. (2010). HEC27. <https://astro.troja.mff.cuni.cz/ftp/hec/HEC27/hec27.inf>, 1.4.2020. Program je voľne dostupný na adrese <https://astro.troja.mff.cuni.cz/ftp/hec/HEC27/>.

- HARMANEC, P., MATTHEWS, J. M., BOŽIĆ, H., PAVLOVSKI, K., HUANG, L., GUO, Z. H., PERCY, J. R., PLUME, R., WEHLAU, Ž. RUŽIĆ, W. H., BOHLENDER, D. A., HORN, J., KOUBSKÝ, P., WALKER, G. A. H. a YANG, S. (1991). Properties and Nature of Be Stars. 15. Light Variations of LQ And and Its Check Stars Revisited. *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia*, **42**, 1.
- HARMANEC, P., ŠVANDA, M., KORČÁKOVÁ, D., CHINI, R., NASSERI, A., YANG, S., BOŽIĆ, H., ŠLECHTA, M. a VANZI, L. (2019). A new look into putative duplicity and pulsations of the be star β CMi. *Astrophysical Journal*, **875**(1), 13. doi: 10.3847/1538-4357/ab0828.
- HARMANEC, P. (1988). Stellar Masses and Radii Based on Modern Binary Data. *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia*, **39**, 329.
- HARMANEC, P. (2012). AST007: Základy astronomie a astrofyziky II. pages 45–47. elektronické skriptá, dostupné online <https://astro.troja.mff.cuni.cz/vyuka/AST007/ast007.pdf>, 20.3.2020.
- HILDEBRANDT, G. (1985). The Variability of HD 224559. *Information Bulletin on Variable Stars*, **2824**, 1.
- JOHNSON, H. L. (1958). The intrinsic colors of early-type stars. *Lowell Observatory Bulletin*, **4**(90), 37–46.
- LABADIE-BARTZ, J., PEPPER, J., MCSWAIN, M. V., BJORKMAN, J. E., BJORKMAN, K. S., LUND, M. B., RODRIGUEZ, J. E., STASSUN, K. G., STEVENS, D. J., JAMES, D. J., KUHN, R. B., SIVERD, R. J. a BEATTY, T. G. (2017). Photometric Variability of the Be Star Population. *Astronomical Journal*, **153**(6):252. doi: 10.3847/1538-3881/aa6396.
- LENZ, P. a BREGER, M. (2005). Period04 User Guide. *Communications in Asteroseismology*, **146**, 53–136. doi: 10.1553/cia146s53.
- MASON, B. D., TEN BRUMMELAAR, T., GIES, D. R., HARTKOPF, W. I. a THALLER, M. L. (1997). ICCD Speckle Observations of Binary Stars. XVIII. An Investigation of Be Stars. *Astronomical Journal*, **114**, 2112. doi: 10.1086/118630.
- MATTHEWS, J. M., HARMANEC, P., WALKER, G. A. H., YANG, S. a WEHLAU, W. H. (1991). Spectroscopic variations of the Be star LQ And: binarity and rotation. *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, **248**, 787.
- MERRILL, P. W., HUMASON, M. L. a BURWELL, C. G. (1925). Discovery and Observations of Stars of Class Be. *Astrophysical Journal*, **61**, 389–417. doi: 10.1086/142899.
- PERCY, J. R. (1979). The Light Variations of HR 9070. *Information Bulletin on Variable Stars*, **1530**, 1.

- PERCY, J. R., JAKATE, S. M. a MATTHEWS, J. M. (1981). Short-period light variations in Be stars. *Astronomical Journal*, **86**, 53–61. doi: 10.1086/112855.
- PERCY, J. R., HOSICK, J., KINCAIDE, H. a PANG, C. (2002). Autocorrelation Analysis of Hipparcos Photometry of Short-Period Be Stars. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, **114**(795), 551–558. doi: 10.1086/341680.
- POPPER, D. M. (1980). Stellar masses. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, **18**, 115–164. doi: 10.1146/annurev.aa.18.090180.000555.
- PROVIN, S. S. (1953). Light-Variations of Peculiar a Stars. *Astrophysical Journal*, **118**, 489. doi: 10.1086/145777.
- RIVINIUS, T., CARCIOFI, A. C. a MARTAYAN, C. (2013). Classical Be stars. Rapidly rotating B stars with viscous Keplerian decretion disks. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 21:69. doi: 10.1007/s00159-013-0069-0.
- SAAD, S., HAMDY, M. a ABOLAZM, M. (2012). An overview investigation of be/shell stars. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, **1**, 97–105. doi: 10.1016/j.nrjag.2012.12.004.
- SECCHI, A. (1866). Schreiben des Herrn Prof. Secchi, Directors der Sternwarte des Collegio Romano, an den Herausgeber. *Astronomische Nachrichten*, **68**, 63. doi: 10.1002/asna.18670680405.
- SILAJ, J., JONES, C. E., TYCNER, C., SIGUT, T. A. A. a SMITH, A. D. (2010). A Systematic Study of H α Profiles of Be Stars. *Astrophysical Journal Supplements*, **187**(1), 228–250. doi: 10.1088/0067-0049/187/1/228.
- STAGG, C. R., BOZIC, H., FULLERTON, A. W., GAO, W. S., GUO, Z. H., HARMANEC, P., HORN, J., HUANG, L., ILIEV, L. H., KOUBSKY, P., KOVACHEV, B. Z., PAVLOVSKI, K., PERCY, J. R., SCHMIDT, F., STEFL, S., TOMOV, N. A. a ZIZNOVSKY, J. (1988). A photometric campaign on the Be stars omicron And, KX And, KY And, LQ And and EW Lac. *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, **234**, 1021–1049. doi: 10.1093/mnras/234.4.1021.
- STELLINGWERF, R. F. (1978). Period determination using phase dispersion minimization. *Astrophysical Journal*, **224**, 953–960. doi: 10.1086/156444.
- VIEIRA, R. G., CARCIOFI, A. C., BJORKMAN, J. E., RIVINIUS, T., BAADE, D. a RÍMULO, L. R. (2017). The life cycles of Be viscous decretion discs: time-dependent modelling of infrared continuum observations. *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, **464**(3), 3071–3089. doi: 10.1093/mnras/stw2542.
- ZOREC, J., FRÉMAT, Y., DOMICIANO DE SOUZA, A., ROYER, F., CIDALE, L., HUBERT, A. M., SEMAAN, T., MARTAYAN, C., COCHETTI, Y. R., ARIAS, M. L., AIDELMAN, Y. a STEE, P. (2016). Critical study of the distribution of rotational velocities of Be stars. I. Deconvolution methods, effects due to gravity darkening, macroturbulence, and binarity. *Astronomy and Astrophysics*, 595: A132. doi: 10.1051/0004-6361/201628760.

Zoznam obrázkov

1.1	Súvis tvaru emisného profilu a uhlu pohľadu na sústavu hviezda-disk	2
2.1	Ukážka spektra LQ And	4
2.2	Porovnanie spektier rôznych disperzií, detail emisie	5
2.3	Namerané radiálne rýchlosti	7
2.4	Namerané spektrofotometrické parametre emisie	8
2.5	Periodická závislosť pre pomer I_V/I_R , $P = 0,415$ 10 d.	10
2.6	Závislosť meraných veličín na heliocentrickej korekcii	10
3.1	Dlhodobý vývoj fotometrických veličín	12
3.2	Periodická závislosť fotometrie Hipparcos	13
3.3	Fázové diagramy pre fotometriu pre jednotlivé frekvencie f_2	15
3.4	Vývoj amplitúdy a frekvencie fotometrickej premennosti	15
3.5	Fázové diagramy pre fotometriu pre frekvenciu $f = 1,616$ d ⁻¹	16
3.6	Farebné zmeny súvisiace s rýchlou premennosťou	17
4.1	Radiálne rýchlosti na čiare H α fázované periódou $P = 7,413$ 24 d. . . .	18
4.2	Hranice priestoru parametrov veľkej polosy a a hmotového pomeru q	19

Zoznam tabuliek

1.1	Vybrané vlastnosti LQ And	3
2.1	Prehľad použitých spektier	5
2.2	Počty spektier použitých na meranie jednotlivých veličín	6
2.3	Štatistické vlastnosti nameraných radiálnych rýchlostí, všetky hodnoty v km/s.	6
2.4	Frekvencie f nájdené Stellingwerfovou metódou v nameraných radiálnych rýchlostiach a reziduách intenzity emisie a pomeru I_V/I_R po odstránení dlhodobého trendu	9
2.5	Frekvencie f nájdené Stellingwerfovou metódou v nameraných pomeroch I_V/I_R pred odstránení dlhodobého trendu	10
3.1	Prehľad použitej fotometrie	11
3.2	Rozdelenie fotometrie podľa sezón	14
A.1	Namerané hodnoty radiálnych rýchlostí	28
A.2	Namerané hodnoty intenzitných veličín	30
A.3	Fitové parametre dvojitej sínusovky pre V a KELT fotometriu	32

A. Prílohy

A.1 Namerané spektroskopické veličiny

Tabuľka A.1: Namerané hodnoty radiálnych rýchlostí

RHJD	$v(\text{HeI})$ $v \pm \Delta v$ [km/s]		$v(\text{H}\alpha_k)$ $v \pm \Delta v$ [km/s]		$v(\text{H}\alpha_j)$ $v \pm \Delta v$ [km/s]		hel cor v [km/s]
<i>Dominion Astrophysical Observatory</i>							
53406.7469	9.68	0.67	-3.34	0.63	3.68	0.86	-19.81
55953.6532	-30.62	4.05	-7.62	0.21	0.00	1.06	-21.73
55954.6500	-24.75	2.62	-7.42	0.24	0.87	1.09	-21.79
52771.9723	12.40	4.45	-3.46	0.50	-8.60	0.34	12.62
53568.9906	-11.70	0.78	-6.41	0.08	-4.55	0.57	22.13
53590.0038	-1.95	12.55	-6.35	0.30	-3.66	0.13	19.92
55858.7920	-11.82	2.22	-6.93	0.48	-5.75	1.29	-2.50
55860.7744	-27.73	3.11	-6.45	0.54	-7.04	0.70	-3.77
53637.0012	26.88	3.60	-6.60	0.33	-8.66	0.80	7.98
53654.9797	-6.43	3.52	-6.08	0.76	-6.40	0.79	1.69
53273.9068	-2.21	3.89	-5.86	0.11	-7.49	0.87	5.48
<i>Observatórium Ondřejov</i>							
55470.4580	-19.83	1.83	-8.17	0.10	-4.45	0.43	7.52
55693.5880	-19.88	2.99	-5.70	0.06	-7.83	0.81	10.87
55703.5284	-25.71	2.65	-4.93	0.89	-6.20	0.03	14.60
55749.4968	5.12	4.36	-4.20	0.67	-2.07	0.73	23.00
55751.5871	-16.79	2.76	-6.65	0.20	-7.42	0.26	22.81
55754.5842	-29.02	2.35	-6.09	0.43	-6.65	0.08	23.36
55759.4390	-4.67	1.06	-4.96	0.62	-5.28	0.34	22.79
55782.5264	-37.29	4.28	-7.69	0.37	-7.22	0.05	20.72
55796.5117	-12.24	1.07	-3.64	0.69	-5.60	0.04	17.51
55800.6451	-11.33	1.95	-4.16	0.75	-5.64	0.09	16.65
55803.5316	-18.50	0.87	-6.33	0.08	-5.46	0.27	17.47
55807.5110	-14.99	5.39	-4.56	0.21	-2.67	0.20	14.15
55831.6034	-22.26	7.95	-5.05	0.28	-6.11	0.94	5.89
55833.5196	-2.59	2.53	-5.22	0.43	-6.07	0.80	6.58
55836.4664	-18.61	5.95	-5.48	0.29	-4.88	0.23	3.07
55838.4891	-9.69	5.96	-5.53	0.16	-8.21	0.16	4.81
55877.2980	-27.11	4.45	-5.74	0.05	-3.35	0.07	-10.19
55888.2029	-24.55	10.39	-6.15	0.08	-6.10	1.98	-13.05
55894.1909	-16.85	6.49	-5.30	0.11	-5.24	0.23	-15.56
55894.5248	-13.48	4.36	-7.34	0.09	-4.40	0.46	-14.93
55907.1658	-29.23	7.85	-5.57	0.26	-2.56	0.26	-18.78
55957.2314	7.31	6.60	-7.24	0.44	-4.60	0.29	-21.36
56160.5056	-14.26	3.23	-5.94	0.61	-7.79	0.11	18.88
56179.4907	-4.97	13.61	-5.06	0.28	-7.58	0.19	11.90
56180.4764	-0.82	5.93	-6.57	0.08	-7.54	0.16	12.81

Tabuľka A.1, pokračovanie

RHJD	$v(\text{HeI})$ $v \pm \Delta v$ [km/s]		$v(\text{H}\alpha_k)$ $v \pm \Delta v$ [km/s]		$v(\text{H}\alpha_j)$ $v \pm \Delta v$ [km/s]		hel cor v [km/s]
<i>Databáza BeSS, ešletové spektrá</i>							
51574.2690	–	–	-6.18	0.18	-3.96	2.77	-21.47
51574.2982	–	–	-6.21	0.11	-7.55	0.99	-21.62
52264.2578	–	–	-6.24	0.18	-7.60	0.08	-20.38
55087.4913	-19.27	6.56	-4.42	0.27	-4.05	0.72	10.21
55450.5252	–	–	-4.65	0.18	-7.13	0.53	13.66
55797.6231	-16.58	1.07	-5.59	0.36	-6.20	0.28	17.03
55831.4062	–	–	-6.69	0.26	-4.55	0.33	8.75
56944.3978	–	–	-6.75	0.09	-6.73	0.08	0.81
57641.4221	–	–	-5.97	0.24	-4.93	0.42	10.99
57671.4916	–	–	-7.92	0.16	-5.11	0.99	3.33
<i>Databáza BeSS, spektrá s rozlíšením $R > 10000$</i>							
54726.5859	–	–	-7.88	0.48	-6.22	0.26	7.73
55497.4872	–	–	-9.21	0.46	-7.28	0.53	-5.80
55787.5307	–	–	-5.42	0.18	-5.10	0.80	20.50
55828.3471	–	–	-5.41	0.33	-5.13	0.53	7.93
55834.4639	–	–	-7.57	0.24	-8.22	0.70	9.77
56178.4723	–	–	-6.31	0.52	-7.47	1.34	20.69
56926.6413	–	–	-8.40	0.26	-8.99	0.63	5.58
57641.5541	–	–	-6.83	0.17	-6.79	0.42	13.04
58018.3969	–	–	-4.60	0.59	-8.81	0.55	11.14
58347.5094	–	–	-6.38	0.09	-5.31	1.73	18.98
58447.5556	–	–	-8.42	0.39	-7.46	1.18	-11.23
58704.5523	–	–	-4.70	0.75	-7.56	1.07	19.72
58737.4220	–	–	-1.67	0.40	-3.93	0.99	10.50
58795.3639	–	–	-7.52	0.63	-5.28	0.83	-6.72

Tabuľka A.2: Namerané hodnoty intenzitných veličín

RHJD	I_V	I_R	I_V/I_R	I	hel cor v [km/s]
<i>Dominion Astrophysical Observatory</i>					
53406.7469	2.95	2.95	1.000	2.950	-19.81
55953.6532	4.24	4.19	1.012	4.215	-21.73
55954.6500	4.22	4.17	1.012	4.195	-21.79
52771.9723	2.80	2.83	0.989	2.815	12.62
53568.9906	2.96	2.96	1.000	2.960	22.13
53590.0038	3.02	3.02	1.000	3.020	19.92
55858.7920	4.13	4.03	1.025	4.080	-2.50
55860.7744	4.23	4.08	1.037	4.155	-3.77
53637.0012	3.06	2.99	1.023	3.025	7.98
53654.9797	2.99	3.00	0.997	2.995	1.69
53273.9068	2.93	2.89	1.014	2.910	5.48
<i>Observatórium Ondřejov</i>					
55470.4580	4.03	3.94	1.023	3.985	7.52
55693.5880	4.01	3.91	1.026	3.960	10.87
55703.5284	3.95	3.86	1.023	3.905	14.60
55749.4968	3.89	3.87	1.005	3.880	23.00
55751.5871	3.98	3.97	1.003	3.975	22.81
55754.5842	4.02	3.98	1.010	4.000	23.36
55759.4390	3.98	3.99	0.997	3.985	22.79
55782.5264	3.94	3.92	1.005	3.930	20.72
55796.5117	3.93	3.85	1.021	3.890	17.51
55800.6451	4.00	3.94	1.015	3.970	16.65
55803.5316	4.02	3.98	1.010	4.000	17.47
55807.5110	3.99	3.90	1.023	3.945	14.15
55831.6034	4.03	3.91	1.031	3.970	5.89
55833.5196	3.98	3.87	1.028	3.925	6.58
55836.4664	4.08	3.95	1.033	4.015	3.07
55838.4891	4.04	3.95	1.023	3.995	4.81
55877.2980	4.09	4.04	1.012	4.065	-10.19
55888.2029	4.03	4.00	1.008	4.015	-13.05
55894.1909	4.09	4.05	1.010	4.070	-15.56
55894.5248	4.11	4.04	1.017	4.075	-14.93
55907.1658	4.09	4.05	1.010	4.070	-18.78
55957.2314	4.13	4.06	1.017	4.095	-21.36
56160.5056	4.02	3.97	1.013	3.995	18.88
56179.4907	4.07	4.04	1.007	4.055	11.90
56180.4764	4.09	4.02	1.017	4.055	12.81

Tabuľka A.2, pokračovanie

RHJD	I_V	I_R	I_V/I_R	I	hel cor v [km/s]
<i>Databáza BeSS, ešeletové spektrá</i>					
51574.2690	2.87	2.86	1.003	2.865	-21.47
51574.2982	2.85	2.84	1.004	2.845	-21.62
52264.2578	2.88	2.89	0.997	2.885	-20.38
55087.4913	3.86	3.79	1.018	3.825	10.21
55450.5252	4.01	3.93	1.020	3.970	13.66
55797.6231	4.02	4.00	1.005	4.010	17.03
55831.4062	4.10	4.06	1.010	4.080	8.75
56944.3978	4.27	4.21	1.014	4.240	0.81
57641.4221	4.13	4.00	1.033	4.065	10.99
57671.4916	4.12	4.09	1.007	4.105	3.33
<i>Databáza BeSS, spektrá s rozlíšením $R > 10000$</i>					
54726.5859	3.83	3.74	1.024	3.785	7.73
55497.4872	4.32	4.16	1.038	4.240	-5.80
55787.5307	4.27	4.20	1.017	4.235	20.50
55828.3471	4.22	4.19	1.007	4.205	7.93
55834.4639	4.25	4.23	1.005	4.240	9.77
56178.4723	4.41	4.27	1.033	4.340	20.69
56926.6413	4.44	4.44	1.000	4.440	5.58
57641.5541	4.43	4.39	1.009	4.410	13.04
58018.3969	4.24	4.29	0.988	4.265	11.14
58347.5094	4.54	4.54	1.000	4.540	18.98
58447.5556	4.31	4.24	1.017	4.275	-11.23
58704.5523	4.21	4.25	0.991	4.230	19.72
58737.4220	4.23	4.24	0.998	4.235	10.50
58795.3639	4.34	4.24	1.024	4.290	-6.72
<i>Databáza BeSS, spektrá s rozlíšením $R < 10000$</i>					
52128.6030	2.76	2.78	0.993	2.770	20.22
52500.4865	2.86	2.87	0.997	2.865	19.30
52842.5929	2.90	2.98	0.973	2.940	21.82
54043.2761	3.25	3.22	1.009	3.235	-7.33
54763.4034	3.74	3.63	1.030	3.685	-3.56
56602.4094	4.07	3.93	1.036	4.000	-8.39
57349.2602	3.93	3.94	0.997	3.935	-13.79
57354.4065	4.07	4.04	1.007	4.055	-15.55
57760.2652	4.27	4.30	0.993	4.285	-22.53
58009.3415	4.06	4.13	0.983	4.095	11.76
58080.3314	4.18	4.21	0.993	4.195	14.04
58704.6112	3.93	4.01	0.980	3.970	19.99

A.2 Fitové parametre fotometrie

Súbory podľa tabuľky 3.2, fitované funkciou

$$V = Z + A_1 \sin(2\pi(f_1 t + p_1)) + A_2 \sin(2\pi(f_2 t + p_2)), \quad (\text{A.1})$$

s väzbou $f_1 = f_2/2$. Ako čas T_0 uvádzame čas v blízkosti stredu skúmaného intervalu, kedy bol argument príslušného sínusového člena celočíselným násobkom 2π , jeho príspevok bol teda nulový a číselne narastal.

Tabuľka A.3: Fitové parametre dvojitej sínusovky pre V a KELT fotometriu

Dáta	f_1 [d ⁻¹]	A_1 [m]	p_1	$T_{0,1}$ [RHJD]	Z	reziduá pôv. σ
	f_2 [d ⁻¹]	A_2 [m]	p_2	$T_{0,2}$ [RHJD]		
V2	1.615(3)	0.003(2)	0.12(12)	44885.57(7)	6.554	0.012
	3.2305(5)	0.015(2)	0.41(2)	44885.204(7)		0.016
V3	1.6038(11)	0.006(2)	0.84(5)	45250.61(3)	6.555	0.010
	3.2077(4)	0.017(2)	0.504(16)	45250.038(5)		0.016
V4a	1.619(6)	0.0068(11)	0.35(3)	45599.018(15)	6.552	0.007
	3.238(3)	0.0135(11)	0.018(12)	45599.229(4)		0.012
V4b	1.616(12)	0.0014(11)	0.32(13)	45628.27(8)	6.549	0.010
	3.233(2)	0.0085(11)	0.48(2)	45628.010(6)		0.011
V7	1.6164(16)	0.0011(13)	0.6(2)	47258.27(12)	6.552	0.008
	3.2328(2)	0.0104(13)	0.841(19)	47258.049(6)		0.011
V8	1.6158(4)	0.0044(13)	0.96(5)	48086.47(3)	6.552	0.009
	3.2317(2)	0.0074(13)	0.45(3)	48086.004(9)		0.010
V9	1.6158(14)	0.0022(7)	0.92(5)	48511.58(3)	6.556	0.007
	3.2316(4)	0.0066(7)	0.215(18)	48511.158(6)		0.008
V10	1.6157(18)	0.0010(13)	0.2(2)	48809.14(13)	6.563	0.009
	3.2314(2)	0.0088(13)	0.30(2)	48809.166(7)		0.011
V13	1.589(3)	0.0033(14)	0.40(7)	55898.34(4)	6.524	0.007
	3.1783(8)	0.0101(14)	0.85(2)	55898.010(7)		0.010
K1	1.6219(11)	0.0012(5)	0.79(6)	56171.61(4)	6.766	0.006
	3.2439(2)	0.0051(5)	0.943(14)	56171.184(4)		0.007
K2	1.6219(15)	0.0009(5)	0.87(8)	56540.39(5)	6.765	0.007
	3.2439(2)	0.0057(5)	0.531(14)	56540.144(4)		0.008
K3	1.622(3)	0.0004(5)	0.4(2)	56903.23(13)	6.765	0.007
	3.2442(2)	0.0068(5)	0.330(19)	56903.053(6)		0.008