

MASARYKOVA UNIVERZITA
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
ÚSTAV TEORETICKÉ FYZIKY A ASTROFYZIKY

Autoreferát disertační práce

BRNO 2015

JIŘÍ LIŠKA



MASARYKOVA UNIVERZITA
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
ÚSTAV TEORETICKÉ FYZIKY A ASTROFYZIKY



Změny period dvojhvězd

Autoreferát disertační práce

Jiří Liška

Školitel: doc. RNDr. Miloslav Zejda, Ph.D. Brno 2015

Bibliografický záznam

Autor: Mgr. Jiří Liška
Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Název práce: Změny period dvojhvězd

Studijní program: PřF D-FY4 Fyzika (čtyřleté)

Studijní obor: PřF TEFY Teoretická fyzika a astrofyzika

Školitel: doc. RNDr. Miloslav Zejda, Ph.D.
Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Akademický rok: 2015/2016

Klíčová slova: hvězda; dvojhvězda; RR Lyr; fotometrie; perioda; zákryt

Bibliographic Entry

Author: Mgr. Jiří Liška
Faculty of Science, Masaryk University
Department of Theoretical Physics and Astrophysics

Title of Thesis: Changes of orbital periods in binary systems

Degree Programme: PřF D-FY4 Physics (4-years)

Field of Study: PřF TEFY Theoretical Physics and Astrophysics

Supervisor: doc. RNDr. Miloslav Zejda, Ph.D.
Faculty of Science, Masaryk University
Department of Theoretical Physics and Astrophysics

Academic Year: 2015/2016

Keywords: star; binary star; RR Lyr; photometry; period; eclipse

Abstrakt

V této disertační práci se převážně věnuji změnám period dvojhvězd a vícenásobných hvězdných systémů. Změny pulzačních period u osamocených hvězd sloužily k prokázání jejich dvojhvězdnosti. Jsou zde prezentovány různé způsoby klasifikace dvojhvězd a důvody změn period. Z největšího katalogu proměnných hvězd (VSX) byla vytvořena statistika známých proměnných hvězd. Analýza VSX odhalila několik stovek duplicitních výskytů z celkového počtu 325 000 hvězd.

Pro výzkum byly vybrány dvě desítky proměnných hvězd (dvojhvězdy, vícenásobné systémy, dvojhvězdní kandidáti). Pro některé z nich byla získána nová fotometrická měření. Pro analýzu dat byly vytvořeny nástroje založené převážně na nelineární metodě nejmenších čtverců.

U zákrytového systému AV CMi byl odhalen apsidální pohyb s periodou 196(86) yr. Z měření radiálních rychlostí (RV) byl určen poměr hmotností hlavních složek $q = 0,67$.

Byly potvrzeny poklesy jasnosti odpovídající tranzitům očekávaného 3. tělesa. Nepodařilo se však určit jeho mateřskou hvězdu. Alternativní hypotézu blendu dvojice zákrytových systémů se nepodařilo potvrdit ani astrometrickým testem, ani skvrnkovou interferometrií.

Analýza CL Aur potvrdila publikované parametry na základě změn způsobených efektem rozdílné dráhy světla (LiTE). U zákrytové dvojhvězdy V2294 Cyg bylo nalezeno třetí těleso s orbitální periodou 8 yr. Nalezené parametry vylučují publikované hodnoty určené jen na základě dat z dalekohledu Kepler.

Gravitační vazba vizuálního páru dvou zákrytových systémů BV Dra a BW Dra byla potvrzena. Byla zjištěna souvislost celkových hmotností obou párů a jejich orbitálních period (poměr 6:5 pro BV vůči BW). U obou systémů byly zaznamenány tvarově podobné antiparalelní změny v $O-C$ diagramu lišící se amplitudou.

Pro trojhvězdu ϕ Dra s primární CP složkou byly určeny orbitální elementy vnitřního spektroskopického páru z RV. U vnějšího vizuálního páru s nejistou periodou (přibližně 300 yr) byla předložena fakta podporující přítomnost jejich gravitační vazby. Na základě známých vlastností byly stanoveny některé fyzikální parametry všech tří hvězd (hmotnost, spektrální typ).

U pulzujících hvězd typu RR Lyrae byla studována dvojhvězdnost, která je předpokládána jen u několika z nich – vytvořený seznam *RRLyrBinCan* obsahuje 61 kandidátů (25. 9. 2015). Nová analýza LiTE u TU UMa, nejpravděpodobnějšího dvojhvězdného kandidáta, umožnila zpřesnit orbitální parametry dvojhvězdy. Byly testovány i variace RV, které přibližně odpovídají našemu modelu. Užité postupy byly aplikovány na další nově nalezené nebo z literatury převzaté kandidáty. Hlavními výsledky jsou určené orbitální parametry očekávaných dvojhvězd. Nová analýza historických měření také zpochybnila zaznamenané zákryty u čtyř RR Lyrae hvězd.

Abstract

This thesis is focused on period changes of binaries and multiple stellar systems. Pulsation period changes of individual stars served as proof of their binarity. Several ways in which binary stars can be classified and the reasons for period changes are presented. Statistical analysis was performed on known variable stars based on the largest catalogue of variable stars (VSX). The analysis of the VSX revealed several hundreds of duplicate occurrences among 325 000 stars.

Two dozen variable stars were selected for this research project (binaries, multiple systems, binary candidates). New photometric measurements were obtained for the selected objects and new tools for data analysis were created based on the non-linear least-squares method.

Apsidal motion with a 196(86)yr period was discovered in the eclipsing binary system AV CMi. Radial velocity (RV) measurements helped to determine the mass ratio of the main components $q = 0,67$. Decreases in brightness that correspond with transits of an expected third body were confirmed. However, the host star was not determined. An alternative hypothesis of a blend of double eclipsing systems was not confirmed by either astrometric testing or speckle interferometry.

The analysis of CL Aur confirmed published parameters based on changes caused by the Light Time Effect (LiTE). A third body was found in the eclipsing system V2294 Cyg with an orbital period of 8 yr. The determined parameters exclude published values based only on measurements from the Kepler Space Telescope.

The gravitational bond of the visual pair of two eclipsing systems, BV Dra and BW Dra, was confirmed. A connection between the total masses of both systems and their orbital periods (ratio 6:5 for BV versus BW) was discovered. Similar shapes of antiparallel changes which differ in amplitude were detected for both systems in $O-C$ diagrams.

Orbital elements were determined from the RV of the inner spectroscopic pair of the triple system ϕ Dra (with the primary CP component). Analysis of the given data proved the existence of a gravitational bond of the outer visual binary pair with an uncertain orbital period (around 300 yr). Several physical parameters (masses, spectral types) for all three stars were established.

Studied binarity among pulsating RR Lyrae stars is expected in only some cases – the created list, *RRLyrBinCan*, contains 61 candidates (25th September 2015). The new analysis of LiTE in TU UMa, the best candidate, allowed us to determine more accurate orbital parameters for the binary system. Variations in RV roughly correspond to our model. The same procedures were applied to both newly found candidates or others taken from the literature. The main results are determined orbital parameters of expected binary systems. Observed eclipses of four RR Lyrae stars were found to be questionable by the new analysis of historical data.

Obsah

Úvod	vi
Kapitola 1. Dvojhvězdy a proměnné hvězdy	1
Kapitola 2. Pozorování	1
Kapitola 3. Použité matematické metody a jejich aplikace	2
Kapitola 4. Analýza zákrytové dvojhvězdy AV CMi	3
Kapitola 5. Vybrané zákrytové dvojhvězdy se změnami period	3
Kapitola 6. Analýza vícenásobného systému φ Draconis	5
Kapitola 7. Dvojhvězdy s pulzující komponentou typu RR Lyrae	7
7.1 Úvod	7
7.2 Přehled dvojhvězdných systémů mezi RR Lyrae hvězdami	7
7.3 Změny period RR Lyrae hvězd v $O-C$ diagramech	8
7.4 Nová analýza efektu rozdílné dráhy světla u TU UMa	8
7.5 Cyklické variace v $O-C$ diagramech RR Lyrae hvězd galaktického pole jako výsledek LiTE	9
7.6 Analýza vybraných zákrytových systémů mezi RR Lyrae hvězdami	10
Závěr	11
Seznam publikací	14

Úvod

Hvězdy jsou jedním ze základních objektů pozorovaného vesmíru. Když pomíneme vliv naší nejbližší hvězdy Slunce, který je zásadní pro život na Zemi, hvězdy ovlivňují lidstvo po celou dobu jeho existence. Studium hvězdného záření, chemického složení, hvězdné stavby i dynamiky, výrazně pomohlo při vývoji nejen fyziky, ale i matematiky, chemie a technologického pokroku obecně.

Ukazuje se, že ze změn v měřitelných charakteristikách hvězd lze zjistit mnohem více informací o povaze objektů než v případě neměnnosti. Obzvláště důležité jsou při tomto druhu výzkumu děje, které jsou periodické, protože umožňují opakovaně ověřovat původní závěry a zpřesňovat naměřené údaje prostřednictvím lepší měřicí techniky. Proto je zcela zásadní studovat hvězdy, které jsou proměnné, a zvláště pak proměnné periodicky.

Velká část hvězd se nachází ve dvojhvězdách či vícenásobných hvězdných soustavách. Tyto systémy jsou pro astrofyziku významné, protože umožňují určit s velkou přesností základní fyzikální charakteristiky samotných hvězd. Periodicita je zde spojena s oběhem hvězd kolem společného středu hmotnosti. Ani oběžné periody však nejsou konstantní a mění se z mnoha odlišných příčin.

Tato práce byla zaměřena na studium změn orbitálních (zákrytových) period u dvojhvězd a vícenásobných soustav, kterému je věnována velká část textu. Postupy vyvinuté k analýze těchto změn u dvojhvězd však lze s výhodou využít i k rozboru změn period samotných hvězd (periody rotační, pulzační), jak bylo ukázáno u pulzujících hvězd typu RR Lyrae. U těchto proměnných hvězd byla na základě cyklických variací v pulzačních periodách hledána podvojnost.

Hlavní motivací bylo získat celkové povědomí o způsobech změn period hvězd a dvojhvězd a vytvořit nástroje pro výzkum alespoň některých astrofyzikálních problémů spojených se změnami period, které byly následně použity u několika vybraných objektů. Mezi dvěma desítkami hlavních objektů se u několika z nich podařilo objevit dvojhvězdnost, u některých trojhvězdnost, a zpřesnit nebo nově určit orbitální a další fyzikální parametry systémů. Některé z prezentovaných výsledků naopak vylučují dříve navržené scénáře.

V tomto autoreferátu jsou stručně zmíněny nejdůležitější body disertace. Číslo částí uvedená v textu autoreferátu odpovídají číslováním jednotlivých částí v mé disertaci.

1 Dvojhvězdy a proměnné hvězdy

V úvodní části této kapitoly disertace (Část 1.1) jsou popsány dvojhvězdy a vícenásobné systémy a různé způsoby klasifikace dvojhvězd (dle detekovaných jevů, detekčních metod, fyzikální klasifikace nebo klasifikace dle tvaru světelných křivek).

V Části 1.2 je proveden rozbor změn orbitálních period dvojhvězd založených na tvarech $O-C$ diagramů. Jak je uvedeno, s podobnými tvary se lze setkat i při studiu orbitálních či pulzačních period samotných hvězd. Kromě nejčastěji uváděných změn byl jejich seznam doplněn o další způsoby, které v české odborné literatuře (např. [Zejda et al., 1994](#); [Mikulášek & Zejda, 2013](#); [Harmanec & Mayer, 2003–2015](#)) chybí. Uvedené příklady byly doplněny o reálné $O-C$ diagramy objektů z $O-C$ brány ([Paschke & Brát, 2006](#)), vybrané na základě prohlídky této databáze v roce 2010, a také o modelové diagramy.

Nejvýznamnější výsledky týkající se dvojhvězd, které vyplývají z projektu Kepler (statistika měřených dvojhvězd, detekce třetích těles a terciárních zákrytů, změny ve tvarech $O-C$ diagramů způsobené povrchovou aktivitou hvězd), jsou prezentovány v Části 1.3.

Vzhledem k tomu, že v této práci jsou studovány objekty, které jsou proměnnými hvězdami (zákrytové dvojhvězdy, pulzující RR Lyrae hvězdy, CP hvězda), je jim věnována Část 1.4. Statistický pohled na současný stav proměnných hvězd na základě největšího katalogu proměnných hvězd VSX ([Watson et al., 2006](#)) je uveden v Části 1.4.2.

Byla také provedena analýza tohoto katalogu za účelem nalezení duplicitních výskytů na základě podobných souřadnic a period proměnnosti (Část 1.4.3). Tato studie, publikována v práci [Liška et al. \(2015c\)](#), vznikla prověřením 325 061 hvězd (VSX z 9. 2. 2015). Podařilo se odhalit 1 487 párů hvězd jevících se jako duplicitní, 354 z nich lze považovat za téměř jisté duplikáty. Přičemž se některé objekty vyskytují i několikanásobně. Bylo upozorněno na možnou souvislost s přehlídkou Catalina Sky Survey ([Drake et al., 2014](#)). Publikací bylo dosaženo opravení záznamů v katalogu u hvězd tvořících duplikát k CI CrB (3 hvězdy s CSS jmény) a stejně tak u V2083 Cyg (3 hvězdy s KIC a KID jmény).

Část 1.4.4 byla věnována katalogům CzeV, SvkV a RafV spojeným se Sekcí proměnných hvězd a exoplanet ČAS. Do CzeV jsem přispěl 5 objevenými proměnnými hvězdami.

2 Pozorování

Tato kapitola je věnována praktickým pozorováním, která byla vykonána pro dosažení vybraných dílčích vědeckých cílů. Během doktorského studia bylo využito několika pozorovacích metod (fotoelektrická fotometrie, CCD fotometrie, skvrnková interferometrie, astrometrie, spektroskopie), které jsou individuálně rozebrány v Části 2.1. Přehledy získaných měření pro jednotlivé metody jsou prezentovány v Části 2.2 a v Přílohách A.

V této kapitole jsou zmíněna pozorování, která jsem sám pořídil nebo byla pořízena na mou žádost během přípravy této práce. Některá měření již byla zahrnuta do analýzy vybraných hvězd a výsledky byly zveřejněny v několika publikacích, např. měření hvězdy CU Vir ([Mikulášek et al., 2011](#)), AV CMi ([Liška et al., 2012](#); [Liška et al., 2013](#)), CzeV503 Her ([Liška & Skarka, 2013](#)), CzeV615 Ser ([Liška & Lišková, 2014](#)), TU UMa ([Liška et al., 2015a](#)), VX Her, AT Ser a S Com ([Liška et al., 2015b](#)), φ Dra ([Prvák et al., 2015](#)). V následujících letech budou publikovány další studie založené na získaných měřeních.

Během doktorského studia jsem se v rámci několika projektů podílel na pozorování vybraných hvězd (poměrově velká část měření se proto netýká této disertace). Fotometrická pozorování jsem vykonal s 19 pozorovacími přístroji na 11 místech přibližně ve 200 nocích. Převážně jsem měřil v Brně – Observatoř Masarykovy univerzity (MUO), Hvězdárna a planetárium Brno (HaP) a soukromá observatoř MFO.

S fotoelektrickým fotometrem jsem měřil zákrytové dvojhvězdy a CP hvězdy (např. CU Vir) na observatoři SAAO (Sutherland) v Jihoafrické republice (přibližně 22 nocí).

V disertaci využítá CCD pozorování zákrytových dvojhvězd (AV CMi, BV a BW Dra, V2294 Cyg), RR Lyrae hvězd (TU UMa, VX Her, AT Ser, S Com, RW Ari, V80 UMi) i CP hvězdy (φ Dra), pochází převážně z Brna, ale i z observatoře na hoře Suhora v Polsku.

K analýze blendu zákrytových systémů TW Dra (poskytl dr. Chrastina, blend detekován) a AV CMi (blend nedetekován) byly použity CCD snímky z MUO. V případě AV CMi byla provedena měření metodou skvrnkové interferometrie (dr. Orlov, Národní astronomická observatoř v Mexiku). Spektroskopická měření AV CMi mi poskytl prof. Iliev (observatoř Rozhen, Bulharsko) a dr. Mkrtichian (Thajská národní observatoř, Thajsko).

3 Použité matematické metody a jejich aplikace

V této kapitole je uveden rozbor hlavních matematických metod, které v disertaci byly použity ke studiu hvězd, dvojhvězd a vícenásobných hvězdných systémů.

V Části 3.1 jsou uvedeny způsoby určování časů extrémů světelných křivek. Mezi metody určení okamžiků minim dvojhvězd patří: metoda detekce zeslabení, zrcadlového obrazu, metoda Hertzsprungova neboli Kweeova–van Woerdenova, proložení fenomenologickým modelem zákrytu, proložení template křivkou (šablonou), výpočtu derivací.

Pro určení okamžiků maxim (přednostně RR Lyrae hvězd) se používá: detekce zjasnění, metoda zrcadlového obrazu, metoda Hertzsprungova neboli Kweeova–van Woerdenova, proložení splajn funkcí, proložení polynomem, proložení template křivkou.

Část 3.2 je věnována použití metody nejmenších čtverců (LSM) a zvláště její nelineární varianty (NLSM) při řešení nejrůznějších astrofyzikálních úkolů (výpočet modelů):

Harmonický polynom (Část 3.2.3) – objevová analýza proměnné hvězdy CzeV503 Her (Liška & Skarka, 2013), modely světelných změn (okamžiky maxim) a změn RV (systematické RV) u RR Lyrae hvězd (template křivky, Liška et al., 2015a,b)

Fenomenologický model světelné křivky zákrytu dvojhvězdy (Část 3.2.4) – použito v on-line fitovacím nástroji – web Sekce proměnných hvězd a exoplanet ČAS (Brát et al., 2012; Mikulášek, 2015), časy minim (AV CMi, BV a BW Dra, V2294 Cyg)

Fenomenologický model světelné křivky zákrytové dvojhvězdy (Část 3.2.5) – objevová analýza proměnné hvězdy CzeV615 Ser (Liška & Lišková, 2014)

Efekt rozdílné dráhy světla (LiTE) (Část 3.2.6) – výpočet LiTE u V2294 Cyg (Liška, 2014), LiTE u CL Aur a RR Lyrae hvězd (Liška et al., 2015a,b)

Křivky radiálních rychlostí dvojhvězdy (Část 3.2.7) – analýza RV u SB1 páru Aab φ Dra (Liška, 2015e, in prep.), analýza RV u SB2 dvojhvězdy AV Mi

Popis spektrálních čar Gaussovou funkcí (Část 3.2.8) – určení RV u AV CMi

Statistická metoda Bootstrap-resampling (Část 3.3) byla použita k odhadu nejistot parametrů např. u modelů LiTE či variací v RV.

V Části 3.4 byl proveden rozbor vlivu expoziční doby na tvar světelné křivky RR Lyrae hvězdy (pro učení přesných časů maxim z fotografických měření). Bylo ukázáno, jak se liší celková amplituda i časy minimální a maximální jasnosti pro různé expoziční doby. Bylo navrženo konkrétní řešení pro hvězdu TU UMa.

4 Analýza zákrytové dvojhvězdy AV CMi

Motivací výzkumu systému AV CMi (EA, $P = 2,277750(4)$ d) je jeho zařazení mezi kandidáty na dvojhvězdy obsahující exoplanetu či hnědého trpaslíka (Část 4.1). Toto třetí těleso, které se projevuje tranzity s periodou $\sim 0,52$ d, by mělo obíhat jednu ze složek na dráze blízké oběma hvězdám (Liakos & Niarchos, 2010).

Část 4.2 obsahuje informace o hlavním zákrytovém systému a Část 4.3 o předpokládaném třetím tělese, studovaném v pracích (Liakos & Niarchos, 2010; Liakos et al., 2012).

Během doktorského studia byly ověřeny poklesy jasnosti (tranzity) ve světelné křivce. V Části 4.4 je popsán námi navržený způsob určení mateřské hvězdy třetího tělesa za pomoci vzájemných zákrytů/přechodů všech tří těles (tranzit by měl být zákrytem deformován). Získaná měření však nevedla k úspěchu a téměř vylučují přítomnost třetího tělesa na vnitřní dráze. Proto bylo navrženo další pravděpodobnější vysvětlení pozorovaných změn (blend dvojice zákrytových systémů – zákrytový systém na pozadí, BGEB).

V Části 4.5 je přehled našich pozorování (fotometrie, spektroskopie, astrometrie, skvrnková interferometrie) a pozorovacích výsledků. Astrometrická analýza ani skvrnková interferometrie nedala jednoznačnou odpověď na přítomnost BGEB.

V Části 4.6 je popsán další výzkum AV CMi. Analýza $O-C$ diagramu programem dr. Zaslachy (2008) (Část 4.6.1) odhalila apsidální pohyb s periodou $U = 196(86)$ yr (Obr. 4.1) a s excentricitou dráhy $0,11(4)$ srovnatelnou s $e = 0,11(1)$ (Liakos et al., 2012).

V rámci disertace byla získána první spektroskopická pozorování AV CMi, která odhalila dvojitě čáry $H\alpha$ (typ SB2). Analýzou RV (Část 4.6.2) byl určen poměr hmotností složek $q = M_2/M_1 = 0,67(10)$. V Části 4.7 je provedena diskuze a souhrn výsledků.

Předběžné výsledky z naší analýzy byly již publikovány (Liška et al., 2012; Liška et al., 2013) a byly prezentovány na dvojhvězdných konferencích v Chile¹ a v Chorvatsku².

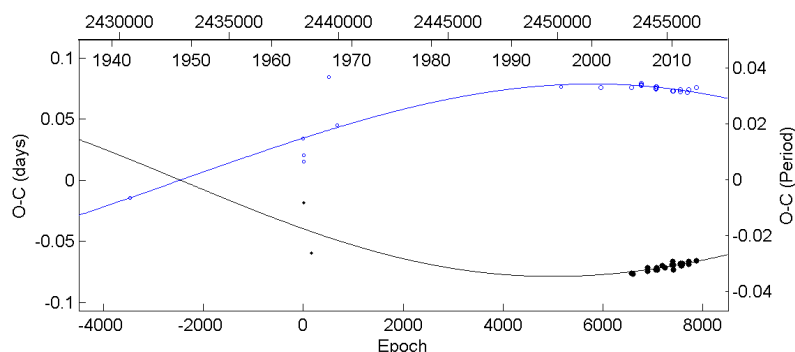
5 Vybrané zákrytové dvojhvězdy se změnami period

V této kapitole se zabývám zákrytovými systémy, které mě zaujaly tvary $O-C$ diagramů.

V Části 5.1 je popsána analýza systému CL Aur, který projevuje známky LiTE (třetí těleso) a přenosu hmoty – prodlužování orbitální periody (Obr. 5.1, vlevo). Systém CL Aur byl testovacím objektem mého nového programu na výpočet LiTE. Za posledních 15 let

¹Liška, J., Zejda, M., Lomoz, F., et al., AV CMi – binary star with surprise, Viña del Mar – Valparaíso, Chile, 10. březen 2011, přednáška.

²Liška, J., Zejda, M., Lomoz, F., et al., New photometric study of a possible three-body system AV CMi, Hvar, Chorvatsko, 4. červenec 2012, poster.

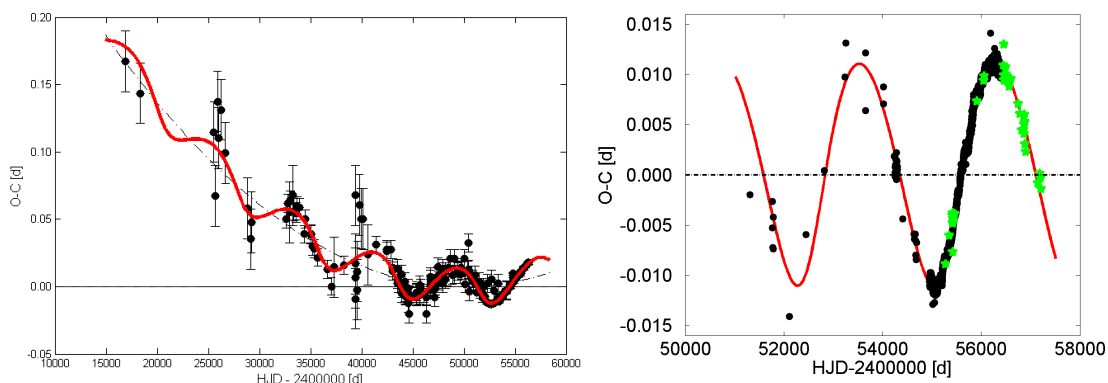


Obrázek 4.1: $O-C$ diagram zákrytového systému AV CMi s modelem apsidálního pohybu se 196 yr dlouhou periodou (černá kolečka jsou primární minima, modré kroužky jsou sekundární minima).

byl CL Aur stejným způsobem studován třikrát (Wolf et al., 1999, 2007; Lee et al., 2010), je tedy ideální pro porovnání. Můj program dává srovnatelné výsledky.

Nahodilé změny v $O-C$ diagramu zákrytového kontaktního systému V2294 Cyg jsem v Části 5.2 vysvětlil cyklickými variacemi periody (LiTE, třetí těleso). Na základě 20 okamžiků minim z $O-C$ brány jsem spočítal předběžný model (Liška, 2014).

Využitím dalších fotometrických měření (počet okamžiků minim: 38 – vlastní pozorování, 33 – SuperWASP, 3 710 – Kepler, 20 – $O-C$ brána) byl vypočten nový model LiTE. Tato 190krát větší datová sada umožnila výrazně zpřesnit parametry (zákrytové elementy, orbitální parametry třetího tělesa), např. 7,6 let dlouhá orbitální perioda (Obr. 5.1, vpravo).

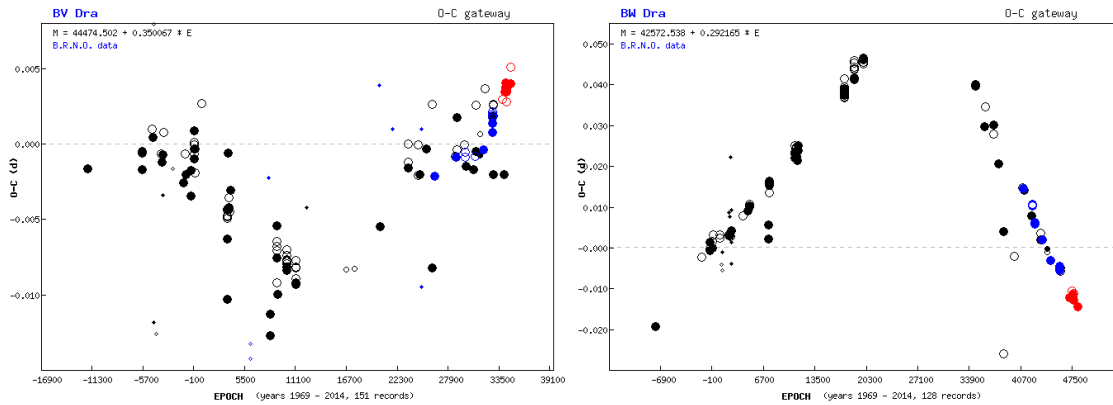


Obrázek 5.1: $O-C$ diagram zákrytové dvojhvězdy CL Aur (panel vlevo) sestavený z okamžiků minim převzatých z $O-C$ brány (černá kolečka), minima nejsou rozlišena na primární a sekundární (pro lepší přehlednost). Změny v hodnotách $O-C$ vykazují znaky přítomnosti LiTE a prodlužování periody. Celkový model změn je vyznačen červenou čarou, parabolický trend šedou čerchovanou čarou. $O-C$ diagram systému V2294 Cyg (panel vpravo) s 7,6 yr trvajícím LiTE zrekonstruovaným na základě přesnějších parametrů. Jsou zde vyneseny okamžiky minim z vlastních pozorování (zelené hvězdy), z $O-C$ brány, z měření z Kepleru a ze SuperWASPU (černá kolečka).

Moje výsledky navíc ukázaly, že krátká časová základna měření (i z dalekohledu Kepler) může vést ke špatné interpretaci výsledků, jak se stalo v případě V2294 Cyg. Conroy et al. (2014) určili periodu LiTE jen $P_3 = 2,980(95)$ yr. Čtyřletý interval dat z Kepleru byl nedostatečný k pokrytí téměř osmiletého cyklu LiTE. K chybnému určení délky P_3 zde přispělo i proměření nevhodné části cyklu (od minima do maxima $O-C$).

V Části 5.3 bylo ukázáno, že vizuální pár tvořený dvěma zákrytovými soustavami BV a BW Dra je opravdu vázaným čtyřhvězdným systémem, přesto, že jejich orbitální dráha patří k nejširším známým dráhám ($a_{\text{BV,BW}} = 1150 \text{ au}$, $P_{\text{orbit,BV,BW}} = 22000 \text{ yr}$, [Batten & Lu, 1986](#)). Svědčí o tom hodnoty obou parallax, středních RV i rychlostí vlastních pohybů. Mimoto je poměr hmotností, stejně jako poměr orbitálních period obou systémů blízky poměru 6:5 pro BV vůči BW. Poměr hmotností je 6,22(15):5 (dopočteno ze studie [Kaluzny & Rucinski, 1986](#)) a poměr period 5,990979(5):5 (pozorování vykonaná v této práci).

$O-C$ diagramy z $O-C$ brány (Obr. 5.2) s novými okamžiky minim ukazují, že oba systémy prodělávají tvarově stejné změny (písmeno V, skoková změna periody), které se dějí v antifázi a s rozdílnou amplitudou (u BV Dra je přibližně 6krát menší než u BW Dra).



Obrázek 5.2: $O-C$ diagramy zákrytových systémů BV Dra (vlevo) a BW Dra (vpravo), které tvoří vizuální pár s úhlovou vzdáleností přibližně $16''$. Červená kolečka označují pozorování z této práce.

Pro vysvětlení pozorovaných variací byla navržena hypotéza vzájemného LiTE (BW Dra způsobuje pozorovaný LiTE u BV Dra a naopak). Z modelu dvojhvězdného pohybu a ze známého poměru hmotností vyplývá, že by pozorované amplitudy LiTE měly být opět v poměru 6:5. V $O-C$ diagramech byl zaznamenán mnohem větší poměr amplitud změn. Vysvětlení pozorovaných variací bude ponecháno pro další studii.

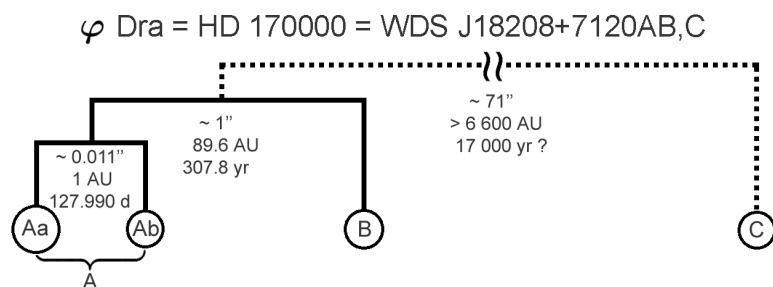
V relativních astrometrických měřeních z WDS ([Mason et al., 2001](#)) nebyly zjištěny trendy. Pozici hvězdy BW vůči BV lze popsat středními hodnotami úhlové vzdálenosti $\bar{\rho} = 16,1(3)''$ a pozičního úhlu $\bar{\theta} = 353,5(8)^\circ$. Měření potvrzují dlouhou orbitální periodu.

6 Analýza vícenásobného systému φ Draconis

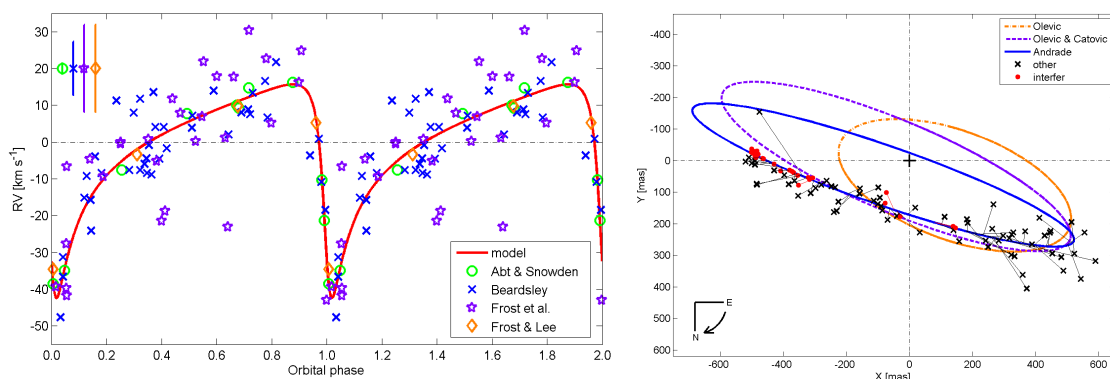
V této kapitole byla provedena kompletní analýza vícenásobného systému φ Dra (očekávaná podoba je na Obr. 6.1) pro odhad vlivu složek na modelování světelných změn hlavní CP složky (detaily v práci [Prvák et al., 2015](#)). Celá motivace je rozebrána v Části 6.1.

V Části 6.2 byla provedena analýza dostupných měření RV pro získání správných orbitálních parametrů vnitřního dvojhvězdného systému Aab. Použitím 4 zdrojů měření RV (Obr. 6.2, vlevo) byla nalezena perioda $P_{\text{Aaborbit}} = 127,9902_{-30}^{+37} \text{ d}$ a další orbitální parametry. Tyto výsledky vylučují v literatuře často přejímané řešení z práce [Abt & Snowden \(1973\)](#) s periodou 26,768(7) d. Nalezená perioda je blízka 127,85 d ([Beardsley, 1969](#)).

Model oběhu vnějšího vizuálního páru AB (Část 6.3) byl spočten již třikrát. Pomocí relativních pozičních měření B složky vůči A složce z WDS bylo ukázáno, že orbitální parametry z prací [Olevic \(1975\)](#) a [Olevic & Catovic \(1990\)](#) nejsou podporovány novými



Obrázek 6.1: Schéma („mobile diagram“) vícenásobného hvězdného systému φ Dra.



Obrázek 6.2: Variace v RV pro vnitřní spektroskopický systém Aab (panel vlevo) získané ze čtyř datových sad (jednotlivé γ -rychlosti byly odečteny) doplněné o náš model. Vypočtené střední nejistoty měření jsou v levém horním rohu. Relativní oběh vizuálního systému φ Dra AB rekonstruovaný z relativních pozičních měření uvedených ve WDS (panel vpravo). Měření jsou doplněna modelovými křivkami založenými na publikovaných orbitálních parametrech.

měření. Nejnovější řešení (Andrade, 2005) dobře popisuje poziční měření a také relativní pohyb (Obr. 6.2, vpravo). Důkazy podporující vázanost systému AB (podobné vlastní pohyby, složky v HR diagramu leží na blízkých izochronách) jsou rozebrány v Části 6.3.2.

Pozorované variace mohou být dobře popsány i pomocí gravitačně nevázaného páru (pohyb po přímce, Část 6.3.3). V současnosti je rozdíl mezi modelem vázaného a nevázaného páru stále velice malý, gravitačně nevázané vysvětlení nelze zatím zcela vyloučit.

V Části 6.4 je diskutována složka C (optická složka) a její nepravděpodobná gravitační vazba k hlavnímu systému φ Dra (např. rozdílný vlastní pohyb).

V Části 6.5 je rozebrán celý trojhvězdný systém (kombinace výsledků z analýzy RV, vizuální dráhy, HR diagramu a modelových izochron). Byly určeny hmotnosti složek ($M_{Aa} \sim 3,28 M_{\odot}$, $M_{Ab} \sim 1,91 M_{\odot}$ a $M_B \sim 2,40 M_{\odot}$) a určeny případně dohledány hvězdné velikosti, spektrální typy a dále poloviční amplitudy změn v RV a v $O-C$ diagramu.

Výsledky jsou shrnuty a diskutovány v Části 6.6 a v Liška (2015e, in prep.). Detailní diskuze, se zaměřením na rotační periodu CP složky Aa a její světelné či spektroskopické změny, byla provedena v práci Prvák et al. (2015), na které jsem se podílel jako spoluautor. Současné pozorovací přístroje by měly být dostatečné k úhlovému rozlišení a také k detekci všech tří složek ve spektru (kvůli CP proměnnosti je to stále velká výzva).

7 Dvojhvězdy s pulzující komponentou typu RR Lyrae

7.1 Úvod

Tato část disertační práce se nezabývá přímo změnami period u dvojhvězd (zákrytových dvojhvězd), ale postupy, které byly vytvořeny pro jejich studium, byly s výhodou uplatněny ke studiu změn pulzačních period u několika RR Lyrae hvězd. Cílem bylo odhalit u nich dvojhvězdnost, případně ji ověřit a prokázat. Z literatury (např. katalog dvojhvězd s pulzujícími komponentami, [Zhou, 2010](#)) je totiž známo jen několik málo kandidátů na dvojhvězdy mezi RR Lyrae hvězdami (situace se mírně změnila v posledních dvou letech, kdy jsme na tomto výzkumu naplno pracovali a připravovali naše publikace). Jen u systémů TU UMa a OGLE-BLG-RRLYR-02792 (neobsahuje klasickou RR Lyrae hvězdu, Binary Evolution Pulsators – BEP) byla dvojhvězdnost prokázána na základě alespoň dvou nezávislých metod a lze je tedy považovat za skutečné dvojhvězdy.

V této části jsou uvedeny obecné informace o aktuálním stavu výzkumu dvojhvězdných systémů se složkami typu RR Lyrae, včetně naší motivace. Základní důvody nedostatku dvojhvězd mezi touto početnou skupinou proměnných hvězd naznačuje např. [Smith \(1995\)](#). RR Lyrae jsou obří horizontální větve (velký poloměr a zářivý výkon). Z vývojových důvodů lze čekat, že většina možných společníků bude přezářena (červení nebo bílí trpaslíci, neutronové hvězdy). Pulzace jsou výrazné v RV i ve fotometrických změnách.

Části 7.1 až 7.5 byly zveřejněny v sérii dvou publikací [Liška et al. \(2015a,b\)](#) a byly prezentovány na YNAO kolokviu v Kunmingu¹. Po odevzdání disertační práce byly taktéž prezentovány 2 příspěvky na konferenci o RR Lyrae hvězdách ve Vyšehradě v Maďarsku².

7.2 Přehled dvojhvězdných systémů mezi RR Lyrae hvězdami

V textu jsou diskutovány různé typy dvojhvězdných systémů s RR Lyrae složkou včetně známých kandidátů (zákrytové systémy, systémy s LiTE, spektroskopické dvojhvězdy, vizuální dvojhvězdy a další typy dvojhvězd). Byl vytvořen seznam těchto kandidátů (včetně referencí), který dosud v současné literatuře chyběl. Seznam je pojmenovaný zkratkou *RR-LyrBinCan*, je pravidelně aktualizován a je dostupný v on-line verzi³. Na webu je umístěna i druhá tabulka s falešně pozitivními nálezy. V textu je prezentována statistika kandidátů.

¹Liška, J., Skarka, M., Zejda, M., & Mikulášek, Z., RR Lyrae stars in binary systems, Yunnan Observatories, Kunming, Čína, 9. červen, 2015, prezentoval doc. Zejda.

²Skarka, M., Liška, J., Zejda, M., & Mikulášek, Z., Review of candidates of binary systems with RR Lyrae component, Visegrád, Maďarsko, 21. říjen, 2015, prezentoval dr. Skarka; Liška, J., & Skarka, M., Database of candidates for RR Lyrae stars in binary systems, poster.

³<http://rrlyrbincan.physics.muni.cz/> verze z 25. 9. 2015 obsahuje 85 záznamů pro 61 objektů.

7.3 Změny period RR Lyrae hvězd v $O-C$ diagramech

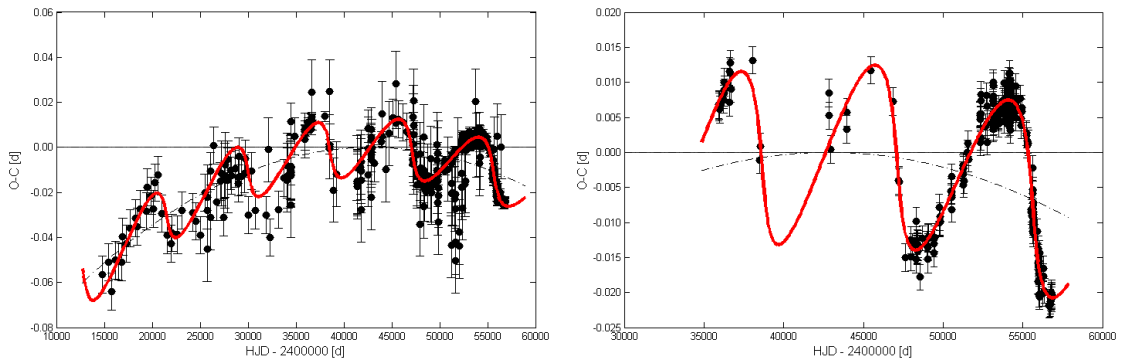
Tento úsek textu je věnován rozboru změn pulzačních period u hvězd typu RR Lyrae a efektům za změny zodpovědných. Znalost typů změn je stěžejní, protože se v dalších částech snažíme na základě analýzy $O-C$ diagramů (detekce LiTE) prokázat u vybraných objektů dvojhvězdot. Lze se setkat s vývojovými efekty (převážně rovnoměrné zkracování/prodlužování pulzační periody, hodnoceno parametrem $\beta = \dot{P}_{\text{puls}}$ v jednotkách ms yr^{-1} nebo d Myr^{-1}), Blažkovým jevem (amplitudová i fázová modulace světelných křivek, obvykle cyklická, může být i vícenásobná), LiTE, nepravidelné a jiné změny.

7.4 Nová analýza efektu rozdílné dráhy světla u TU UMa

V této části je prezentována naše nová analýza LiTE u systému TU UMa (jediný důkladně studovaný a téměř potvrzený dvojhvězdný systém s klasickou RR Lyrae složkou). Náš výzkum je založen na přibližně 5krát větším vzorku $O-C$ hodnot ve srovnání s poslední publikací zabývající se LiTE (Wade et al., 1999).

V Části 7.4.1 je diskutována pozorovací historie TU UMa s důrazem na dvojhvězdnost. V Části 7.4.2 jsou shrnuty charakteristiky použitého datového souboru (okamžiky maxim z GEOS RR Lyr databáze (Boninsegna et al., 2002; Le Borgne et al., 2007), nové časy maxim z přehlídkových měření – SuperWASP, Pi of the Sky, Hipparcos, NSVS a DASCH). Pořídil jsem i vlastní měření v letech 2013 – 2014.

Aplikace mého programu na výpočet LiTE je popsána v Části 7.4.3. Provedli jsme výpočet dvou modelů (Obr. 7.1): model 1, který popisuje celou datovou sadu a model 2, který popisuje pouze velmi přesná fotoelektrická, CCD a DSLR maxima (výrazně kratší časový rozsah než model 1). Výsledné modely pro systém TU UMa jsou prezentovány v Části 7.4.4. Díky velké datové sadě jsme určili kvadratickou efemeridu pulzací a orbitální elementy dvojhvězdného systému s mnohem vyšší přesností než předchozí studie.



Obrázek 7.1: $O-C$ diagram hvězdy TU UMa. Model 1 se všemi použitými měřeními (panel vlevo), model 2 pouze s fotoelektrickými, CCD a DSLR pozorováními (pravý panel). Náš model LiTE včetně zkracování pulzační periody (červená čára), zkracování periody (čerchovaná čára).

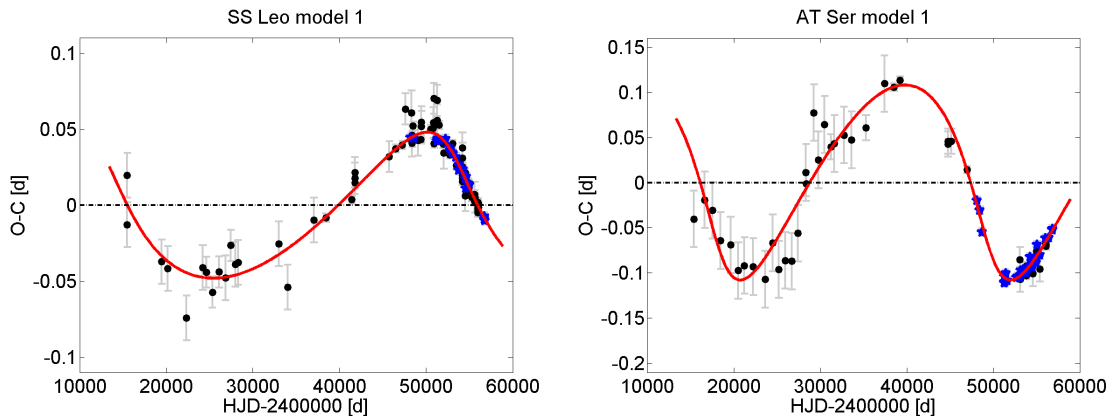
Druhý model dává menší hodnotu rychlosti zkracování pulzační periody ($\beta \sim -1,5 \text{ ms yr}^{-1}$), což se pravděpodobně projeví na excentricitě, která je vyšší ($e \sim 0,67$) než v případě prvního modelu ($\beta \sim -2,3 \text{ ms yr}^{-1}$, $e \sim 0,63$). Oba naše modely mají mnohem menší hodnoty excentricity, velké poloosy pulzující složky $a_1 \sin i$ (2,9 au resp. 3,0 au)

a minimální hmotnosti sekundární složky ($0,33 M_{\odot}$ resp. $0,34 M_{\odot}$) než byly uvedeny v předchozích studiích. Naše hodnoty orbitální periody (23,4 yr resp. 23,3 yr), argumentu periastra ω (181° resp. 185°) a očekávané hodnoty poloviční amplitudy variací v RV u pulzující složky K_1 ($4,8 \text{ km s}^{-1}$ resp. $5,2 \text{ km s}^{-1}$) jsou srovnatelné s hodnotami určenými předchozími autory.

Další důkazy pro dvojhvězdnost (dva víceméně úspěšně způsoby analýzy RV a neúspěšná detekce možného ale málo pravděpodobného zákrytu) jsou diskutovány v Části 7.4.5. Všechny výsledky jsou shrnuty v Části 7.4.6.

7.5 Cyklické variace v $O-C$ diagramech RR Lyrae hvězd galaktického pole jako výsledek LiTE

V naší studii jsme se zaměřili na RR Lyrae hvězdy galaktického pole. Na základě literatury a GEOS RR Lyr databáze jsme vybrali kandidáty s tvary $O-C$ diagramů, které lze interpretovat jako LiTE (příp. doplněné o parabolický trend). Okamžiky maxim z GEOS databáze byly doplněny u vybraných cílů o maxima určená z dat z celooblohových přehlídek a z našich pozorování (Část 7.5.1). Pro modelování LiTE jsme použili nový výše zmíněný kód. Rozlišovali jsme dva typy modelů – model 1 (pouze LiTE), model 2 (LiTE a parabolický trend). Výsledky pro náš výběr 11 hvězd (a 3 speciálních hvězd) jsou jednotlivě rozebrány v Části 7.5.2 (příklad $O-C$ diagramů u hvězd SS Leo a AT Ser, Obr. 7.2).



Obrázek 7.2: $O-C$ diagramy SS Leo (vlevo) a AT Ser (vpravo) s naším modelem 1 (červená čára). Černá kolečka a modré hvězdy označují maxima z GEOS databáze resp. nová maxima určená v této práci (z přehlídek a z vlastních pozorování). Parametry SS Leo jsou: $P_{\text{orbit}} \sim 111 \text{ yr}$, $a_1 \sin i \sim 9 \text{ au}$, $e \sim 0,48$, $M_{2,\text{min}} \sim 0,38 M_{\odot}$, pro AT Ser: $P_{\text{orbit}} \sim 86 \text{ yr}$, $a_1 \sin i \sim 20 \text{ au}$, $e \sim 0,46$, $M_{2,\text{min}} \sim 1,9 M_{\odot}$.

Diskuze našich výsledků je provedena v Části 7.5.3 a celá Část 7.5 je posléze shrnuta v Části 7.5.4. Orbitální periody hypotetických dvojhvězd byly nalezeny v intervalu od 47 yr (AV Peg) do 147 yr u RS Boo (model 1) a jsou mnohem delší než u současných prací Li & Qian (2014) a Hajdu et al. (2015) s periodami v řádu let. Náš výběr navíc upřednostňuje variace s velkou amplitudou změn v $O-C$. Projekce velkých poloos pulzující složky $a_1 \sin i$ byly určeny od 1 au u AV Peg do zhruba 20 au u AT Ser. Byly také odhadnuty minimální hmotnosti společníků, buď jsou velmi malé (setiny až desetiny M_{\odot}) nebo jsou větší než M_{\odot} . Všechny navrhované systémy mají eliptické dráhy, ale žádný nemá excentricitu $e > 0,9$. Další podezřelé hvězdy RR Lyr, AQ Lyr a AE Peg se v mnoha ohledech odlišují.

Parametry nám umožnily předpovědět variace v RV, které jsme srovnávali s naměřenými hodnotami RV. Bohužel nedostatečné množství RV navíc často s nedostatečnou kvalitou neumožnilo dvojhvězdnost prozatím potvrdit.

Ačkoli jsme u mnoha cílů nemohli s jistotou rozhodnout, který model $O-C$ variací je správný (pouze LiTE nebo LiTE překrývající se s parabolou) a zda se jedná skutečně o LiTE, naše modely dávají předpovědi pro vývoj pulzační periody v následujících letech a stejně tak i pro RV. V každém případě jsme výrazně rozšířili skupinu RR Lyrae hvězd podezřelých z dvojhvězdnosti, které mají určené předběžné orbitální parametry.

7.6 Analýza vybraných zákrytových systémů mezi RR Lyrae hvězdami

Hledání zákrytových systémů mezi RR Lyrae hvězdami je komplikované (velký poloměr a zářivý výkon RR Lyrae hvězd, pulzace, vývojové důvody upřednostňující široké dráhy a orbitální periody o délce alespoň několika stovek dní).

Jediným bezpečně prokázaným zákrytovým systémem je objekt OGLE-BLG-RRLYR-02792 (Pietrzyński et al., 2012; Smolec et al., 2013), který je ovšem značně anomální (BEP). V literatuře se podařilo dohledat několik RR Lyrae hvězd podezřelých ze zákrytů; VX Her (Fitch et al., 1966), RW Ari (Wiśniewski, 1971) a V80 UMi (Kholopov, 1971).

U hvězd VX Her (Část 7.6.1), RW Ari (Část 7.6.2) a V80 UMi (Část 7.6.3) jsem provedl analýzu původních fotometrických měření, na jejichž základě byly hvězdy podezřívány ze zákrytů. U všech tří hvězd jsem navíc získal vlastní pozorování a analyzoval jsem i další dostupná data. Bohužel novější pozorování nenasvědčují zákrytům. Do kandidátů na zákrytové systémy jsem zařadil i hvězdu RZ Cet (Část 7.6.4), jejíž měření z práce Bookmeyer et al. (1977) také obsahují podezřelý pokles jasnosti. U tří těchto hvězd (VX Her, RW Ari, RZ Cet) byly zaznamenány zákryty s velkou amplitudou (0,7 mag, 0,6 mag a 0,4 mag) jednou pozorovací skupinou kolem Wiśniewského (Fitch et al., 1966; Wiśniewski, 1971; Bookmeyer et al., 1977), a to v letech 1966–1967, což je značně podezřelé. Navíc by tyto systémy byly spíše netypické (hluboké zákryty, společníci s velkými poloměry a s velkými zářivými výkony).

V případě VX Her byla v jedné noci pravděpodobně měřena jiná hvězda (prakticky žádná změna jasnosti, odlišné barevné indexy). U RW Ari a RZ Cet se už tak snadné vysvětlení nenabízí. Data pro RW Ari byly předběžně analyzovány v SOČ (Hájková, 2015). Byly odhaleny cyklické variace v $O-C$ diagramu (perioda nejistá, 16,1 yr nebo 25,7 yr) a možná přítomnost Blažkova jevu. U objektu V80 UMi je potřeba získat nová přesná měření, aby se potvrdila jeho proměnnost.

Závěr

V této disertační práci věnované změnám period dvojhvězd byla provedena analýza několika zákrytových systémů (AV CMi, CL Aur, V2294 Cyg, BV Dra a BW Dra), trojhvězdného systému ϕ Dra, a RR Lyrae hvězd, u kterých byla očekávána dvojhvězdnost.

V úvodní části byl uveden přehled typů změn proměnnosti u zákrytových dvojhvězd na základě tvarů $O-C$ diagramů. Ten je značně rozšířen ve srovnání s přehledy uvedenými v české literatuře. Byly vysvětleny i tvarově podobné změny period osamocených hvězd (např. rotačních period CP hvězd nebo pulzačních period hvězd typu RR Lyrae).

Byl proveden statistický přehled vzorku známých proměnných hvězd na základě VSX, současného největšího katalogu proměnných hvězd. Náhodně zjištěné duplicitní výskyty některých záznamů byly motivací k důkladné analýze celého VSX. V analyzované verzi (z 9. 2. 2015, cca 325 000 hvězd) bylo zaznamenáno 1 487 párů možných duplicitních výstupů. Z toho 354 párů je možné považovat za téměř jisté duplikáty. V současné verzi VSX je už na základě naší publikace opraveno několik zaznamenaných problémů.

Mezi další výsledky práce patří získání nových fotometrických měření pro 11 hlavních cílů – 4 zákrytové dvojhvězdy, 6 RR Lyrae hvězd a 1 CP hvězdu. Systém V2294 Cyg byl dokonce měřen v 54 nocích v průběhu 5 let. Na snímcích byly měřeny i další proměnné hvězdy. Během mého doktorského studia bylo objeveno 5 nových proměnných hvězd.

Matematické postupy, založené převážně na nelineární metodě nejmenších čtverců (NLSM), byly použity na řešení několika astrofyzikálních problémů. K modelování tvaru světelných změn RR Lyrae hvězd a k vytvoření tzv. template křivek byla použita modelová funkce ve tvaru harmonického polynomu. Tyto template křivky sloužily k určování okamžiků maxim vybraných hvězd v různých sadách měření. Byl také studován problém vlivu expoziční doby na tvar křivky a s tím související posuv času maxima. Byl navržen postup, kterým lze získat přesné časy maxim z měření ze starých fotografických desek s typickou expoziční dobou 60 min. Harmonický polynom byl také použit k modelu změn RV hvězd typu RR Lyrae a k určení systematických RV pro objekt TU UMa.

Metoda NLSM byla dále použita u mnoha hvězd k analýze efektu rozdílné dráhy světla (LiTE). U zákrytových dvojhvězd byly takto studovány třetí složky a jejich oběh, u pulzujících RR Lyrae hvězd to byli navržení dvojhvězdní společníci. Modely změn v RV způsobené dvojhvězdností byly u ϕ Dra a AV CMi počítány také pomocí NLSM.

V případě systému AV CMi byla potvrzena přítomnost tranzitů na světelné křivce. Na základě pozorování současných zákrytů a tranzitů se nepodařilo detekovat změny ve tvaru tranzitu, což spolu s malým poměrem oběžných dob $\sim 1 : 4,4$ prakticky vylučuje přítomnost třetího tělesa na vnitřní dráze navrženého Liakosem & Niarchosem (2010). Byla proto navržena alternativní hypotéza, ve které se předpokládá přítomnost dvojice zákrytových systémů, které tvoří blend. Pokusy o prokázání zákrytové dvojhvězdy na pozadí pomocí astrometrického testu či skvrnkové interferometrie však nebyly úspěšné.

U hlavního dvojhvězdného páru AV CMi byl objeven apsidální pohyb eliptické dráhy s $e \sim 0,11$, který má z důvodu krátké časové základny pozorování poměrně nepřesně určenou periodu 196(86) yr. V rámci této práce byla pořízena první spektroskopická měření, která potvrdila domněnku, že AV CMi je spektroskopická dvojhvězda typu SB2. Na základě malého množství RV se podařilo odhadnout poměr hmotností hlavních složek.

Systém CL Aur byl testovacím objektem pro ověření správnosti našich výpočtů LiTE a prodloužování/zkracování orbitální (případně pulzační) periody způsobem založeným

na NLSM. Podařilo se dosáhnout výborné shody s předešlými publikovanými výsledky, zvláště s poslední prací [Lee et al. \(2010\)](#). Byly určeny orbitální parametry vnějšího systému, např. orbitální perioda třetího tělesa s délkou 21,6 yr.

V $O-C$ diagramu zákrytové dvojhvězdy V2294 Cyg byly v r. 2010 odhaleny nahodilé změny, které byly správně vysvětleny cyklickými změnami periody způsobené LiTE, a tedy přítomností třetí složky. Od té doby byl proto systém systematicky pozorován. Z 20 okamžiků minim dostupných v $O-C$ bráně byly spočítány předběžné orbitální parametry, např. 8,0 yr dlouhá oběžná doba třetího tělesa. Vlastní pozorování z období 2010–2015 byla použita k určení nových časů minim. Ty byly doplněny o časy z měření dalekohledu Kepler (2009–2013) převzatých z práce ([Conroy et al., 2014](#)) a také o nově určená minima založená na měřeních z projektu SuperWASP. Tato 190krát větší datová sada než u mého předběžného řešení byla použita ke spočtení modelu LiTE a výraznému zpřesnění orbitálních parametrů třetího tělesa (přesnější perioda je 7,6 yr). Naše analýza ukázala, že model 3,0 yr dlouhého LiTE založeného pouze na měřeních z dalekohledu Kepler (publikováno v práci [Conroy et al., 2014](#)) není správný z důvodu krátké časové základy dat z Kepleru.

Dvojice kontaktních systémů BV Dra a BW Dra tvoří jeden z nejširších vázaných dvojhvězdných párů (vzdálenost 1 150 au, orbitální perioda 22 000 yr, [Batten & Lu, 1986](#)). Odhadovaná vzájemná vzdálenost znamená, že světlo urazí dráhu mezi systémy za 6,6 dne. Přesto jsou poměry oběžných period obou dvojhvězd téměř přesně v poměru malých celých čísel (6:5). Potvrzují to i naše pozorování. Oba systémy byly simultánně měřeny na brněnských pozorovatelnách ve 23 nocích. Byly určeny velmi přesně jejich aktuální periody ($P_{BV} = 0,3500679(2)$ d, $P_{BW} = 0,2921625(2)$ d), vzájemný poměr period je tedy 5,990979(5):5. Tento poměr překvapivě potvrzují i hmotnosti složek BV vůči BW 6,22(15):5 dopočtené z hmotností převzatých ze studie [Kaluzny & Rucinski \(1986\)](#).

Tento zajímavý systém na sebe upozornil zejména tvary $O-C$ diagramů, které jsou až na amplitudy (u BW Dra přibližně 6krát větší než u BV Dra) a antifázi identické. Průběhy hodnot $O-C$ naznačují skokovou změnu periody. Nejvhodnějším vysvětlením se zdál být vzájemný LiTE, ale pozorovaná amplituda je přibližně 5krát větší než by měla být. Astrometrická poziční měření jen dokumentují, že se systémy BV a BW Dra vůči sobě za posledních 180 let viditelně neposunuly.

φ Dra tvoří vícenásobný systém s hlavní složkou, která je proměnnou CP hvězdou. Současná studie ([Prvák et al., 2015](#)) se snažila o vysvětlení světelných změn pomocí výpočtu modelu atmosféry na základě abundančních map známých ze spektroskopie. Pro tento druh výzkumu je nezbytné znát vliv dalších složek. U vnitřního dvojhvězdného páru (Aa, Ab) byly publikovány nekonzistentní hodnoty orbitálních period 26,768(7) d ([Abt & Snowden, 1973](#)) a 127,85 d ([Beardsley, 1969](#)) založené na měřeních RV hlavní složky. Vnější pár (A, B), který je vizuální dvojhvězdou, má dlouhou periodu s prozatím nedokončeným oběhem a z pozičních změn není jisté, zda se vůbec jedná o vázaný systém.

Byla proto provedena důkladná analýza celého systému. U vnitřního systému byla určena orbitální perioda 127,99 d, která je podpořena dokonce 4 datovými sadami RV. U vnějšího systému byl hledán důkaz pro gravitační vazbu. Vzhledem k tomu, že nejsou k dispozici měření paralaxy ani spektroskopická pozorování složky B, jedinými známkami podporujícími vázanost jsou podobné vlastní pohyby a blízkost složek A a B na HR diagramu (blízké izochrony). Z orbitálních parametrů i z hvězdných velikostí složek byly odhadnuty hmotnosti a spektrální typy všech tří složek.

Nejvýznamnější a také nejrozsáhlejší částí celé disertace je kapitola věnovaná RR Ly-

rae hvězdám ve dvojhvězdách. Byl vytvořen seznam známých kandidátů na dvojhvězdy mezi RR Lyrae hvězdami, který je navíc roztríděn podle detekčních metod. U každé z metod je vždy provedena diskuze o její účinnosti a o problémech při odhalování těchto systémů. Seznam je k dispozici on-line jako databáze pojmenovaná *RRLyrBinCan*. Verze z 25. 9. 2015 obsahuje 85 záznamů pro 61 kandidátů. V práci je krátce zmíněna statistika těchto objektů. Další 13 záznamů pro 6 objektů je zahrnuto v druhém seznamu, do kterého byly zařazeny hvězdy mylně označené jako dvojhvězdy s RR Lyrae složkou.

Dále byla provedena nová analýza dvojhvězdné povahy objektu TU UMa, která je prakticky jedinou prokázanou dvojhvězdou s RR Lyrae složkou klasického typu, t.j. takovou, u které se nepředpokládá výrazné ovlivnění druhou složkou během společného vývoje. Na základě přibližně pětkrát větší sady okamžiků maxim, než bylo použito v předchozí publikaci ([Wade et al., 1999](#)), jsme zpřesnili hodnoty orbitálních parametrů (např. 23,4 yr dlouhou periodu) pomocí modelování LiTE. Použitím dostupných RV jsme provedli dva testy na prokázání dvojhvězdnosti, výsledky přibližně korespondují s navrženým modelem. Pokusili jsme se také detekovat možný, ale značně nejistý zákryt. Z důvodu malého množství měření jsme však neuspěli.

Postupy použité u hvězdy TU UMa byly aplikovány pro analýzu 11 kandidátů a 3 dalších podezřelých RR Lyrae hvězd, které by mohly v $O-C$ diagramech vykazovat LiTE. Spočítali jsme orbitální parametry včetně odhadu minimální hmotnosti možného společníka. Nedostatek měření RV neumožnil potvrdit binaritu. U řady z nich by mělo být snadné současnými měřeními RV binaritu potvrdit, jak diskutujeme v textu.

Poslední část kapitoly o RR Lyrae hvězdách patřila rozboru historických kandidátů na zákrytové systémy s RR Lyrae složkami, jmenovitě RW Ari, VX Her a V80 UMi. U RW Ari i VX Her, u kterých byly poklesy jasnosti zaznamenány stejnou pozorovací skupinou kolem Wiśniewskiho ([Fitch et al., 1966](#); [Wiśniewski, 1971](#)), lze dvojhvězdnost téměř vyloučit. V měřeních této skupiny se nám podařilo objevit zákryty u další hvězdy RZ Cet. Zřejmě u všech těchto hvězd došlo k problémům při pozorování nebo zpracování. Naše nová měření, stejně jako výsledky z jiných studií, tyto zákryty nepotvrzují.

Tvrzení o dvojhvězdnosti u objektu V80 UMi je založeno jen na fotografických měřeních. Poklesy byly zaznamenány během tří po sobě jdoucích nocí, zatímco ostatní měření poklesy neprokazují. Pulzační a orbitální perioda navržená v práci [Kholopov \(1971\)](#) je navíc podezřele blízká 2 a 0,5 dni.

Výsledky shrnuté výše byly prezentovány na několika konferencích a v člancích, jejichž přehled následuje. V některých případech se nepodařilo navržené otázky jednoznačně vyřešit a tak zůstávají výzvou a motivací pro další práci.

Seznam publikací

Recenzované publikace

- Mikulášek, Z., Krtička, J., Henry, G. W., Janík, J., Zverko, J., Žižňovský, J., Zejda, M., **Liška, J.**, et al., 2011, *Surprising variations in the rotation of the chemically peculiar stars CU Virginis and V901 Orionis*, A&A, 534, L5
- Zhu, L.-Y., Zejda, M., Mikulášek, Z., **Liška, J.**, et al., 2012, *The Photometric Study of a Neglected Near Contact Binary: BS Vulpeculae*, AJ, 144, 37
- Zejda, M., Paunzen, E., Baumann, B., Mikulášek, Z., & **Liška, J.**, 2012, *Catalogue of variable stars in open cluster fields*, A&A, 548, A97
- **Liška, J.**, & Skarka, M., 2013, *Discovery of a new periodic variable star CzeV503*, Information Bulletin on Variable Stars, 6077, 1
- **Liška, J.**, 2014, *Light time effect in the system V2294 Cyg*, Information Bulletin on Variable Stars, 6119, 1
- **Liška, J.**, & Lišková, Z., 2014, *CzeV615 – a new eclipsing binary*, Information Bulletin on Variable Stars, 6124, 1
- Zasche, P., Wolf, M., Vraštil, J., **Liška, J.**, et al., 2014, *Apsidal motion and a light curve solution for eighteen SMC eccentric eclipsing binaries*, A&A, 572, A71
- **Liška, J.**, Skarka, M., Mikulášek, Z., Zejda, M., & Chrastina, M., 2015, *New Analysis of the Light Time Effect in TU Ursae Majoris*, arXiv:1502.03331, odesláno do A&A
- **Liška, J.**, Skarka, M., Zejda, M., & Mikulášek, Z., 2015, *Cyclic changes in O-C diagrams of field RR Lyrae stars as a result of LiTE*, arXiv:1504.05246, odesláno do MNRAS
- **Liška, J.**, 2015, *Analysis of the multiple system ϕ Draconis*, v přípravě (před odesláním do MNRAS)
- Prvák, M., **Liška, J.**, Mikulášek, Z., Krtička, J. & Lüftinger, T., 2015, *Modelling of variability of the CP star ϕ Draconis*, arXiv:1510.01192, přijato pro publikaci v A&A

Konferenční sborníky a ostatní nerecenzované publikace

- **Liška, J.**, & Zejda, M., 2011, *Restoration of the project PROSPER*, in Proceedings of the 42nd Conference on Variable Stars Research, Open European Journal on Variable Stars, 139, 18
- Zejda, M., Mikulášek, Z., **Liška, J.**, Svoboda, P., & de Villiers, S. N., 2011, *Binary Star Research Using Micro-Telescopes*, in Proceedings of the 9th Pacific Rim Conference on Stellar Astrophysics, ASPC 451, 33
- **Liška, J.**, Zejda, M., Lomoz, F., et al., 2012, *AV CMi preliminary results from photometric study*, in Proceedings of the 43rd Conference on Variable Stars Research, Open European Journal on Variable Stars, 154, 4

- Zejda, M., Mikulášek, Z., Zhu, L., Qian, S., & **Liška, J.**, 2012, *The Photometric Study of Neglected Short-Period Eclipsing Binary BS Vulpeculae*, in Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, 282, 83
- **Liška, J.**, Zejda, M., Lomoz, F., et al., 2013, *The New Photometric Study of a Possible Three-body System AV CMi*, Central European Astrophysical Bulletin, 37, 201
- Mikulášek, Z., Zejda, M., Zhu, L., Qian, S.-B., **Liška, J.**, et al., 2013, *Visual Minima Timings of Eclipsing Binaries: To Use or not to Use?*, Central European Astrophysical Bulletin, 37, 145
- Zejda, M., Paunzen, E., Mikulášek, Z., Janík, J., **Liška, J.**, et al., 2013, *The role of eclipsing binaries in open cluster research*, in proceedings of the conference Setting a New Standard in the Analysis of Binary Stars, EAS Publications Series, 64, 433
- Hladík, B., Skarka, M., & **Liška, J.**, 2014, *A new delta scuti variable CzeV616 Cyg*, Open European Journal on Variable Stars, 166, 1
- Paunzen, E., Zejda, M., Mikulášek, Z., **Liška, J.**, et al., 2014, *Variable stars in open clusters*, in Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, 301, 471
- Zejda, M., Mikulášek, Z., Zhu, L.-Y., Qian, S.-B., **Liška, J.**, et al., 2014, *V1010 Oph investigated by a cm-class telescope*, Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso, 43, 462
- Prvák, M., Krtička, J., Mikulášek, Z., Lüftinger, T., & **Liška, J.**, 2014, *Modelling the variability of the CP star varphi Dra*, in proceedings of the conference Putting A Stars into Context: Evolution, Environment, and Related Stars, 214
- **Liška, J.**, & Skarka, M., 2015, *O-C diagrams and period changes in stellar systems*, in Proceedings of the 46th Conference on Variable Stars Research, Open European Journal on Variable Stars, 169, 38
- **Liška, J.**, Skarka, M., Auer, R. F., Prudil, Z., & Juráňová, A., 2015, *Possible candidates for multiple occurrence of variable stars in the VSX catalogue*, Open European Journal on Variable Stars, 170, 1
- **Liška, J.**, & Skarka, M., 2015, *Period analysis of a Blazhko star V0346 Draconis*, Open European Journal on Variable Stars, 173, 1
- Mikulášek, Z., Chrastina, M., **Liška, J.**, et al., 2014, *Kwee-van Woerden method: To use or not to use?*, Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso, 43, 382
- Skarka, M., **Liška, J.**, Dřevěný, R., & Auer, R. F., 2015, *Observing RR Lyrae type stars*, in Proceedings of the 46th Conference on Variable Stars Research, Open European Journal on Variable Stars, 169, 36
- Skarka, M., **Liška, J.**, Šmelcer, L., & Brát, L., 2015, *Variable Star and Exoplanet Section of the Czech Astronomical Society*, in proceedings of the conference Living Together: Planets, Host Stars and Binaries, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 496, 307
- Zejda, M., Mikulášek, Z., Qian, S.-B., Zhu, L.-Y., Wolf., M., Zasche, P., Janík, J., **Liška, J.**, et al., 2015, *Near-Contact Binaries in the Small Magellanic Cloud*, in proceedings of the conference Living Together: Planets, Host Stars and Binaries, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 496, 223

Seznam použité literatury

- Abt, H. A., & Snowden, M. S. 1973, *ApJS*, 25, 137
Andrade, M. 2005, *IAUDS*, 157, 1
Batten, A. H., & Lu, W. 1986, *PASP*, 98, 92
Beardsley, W. R. 1969, *PALIO*, 8, 91
Boninseigna, R., Vandebroere, J., Le Borgne, J. F., & Geos Team 2002, *IAU Colloq. 185: Radial and Nonradial Pulsations as Probes of Stellar Physics*, 259, 166
Bookmeyer, B. B., Fitch, W. S., Lee, T. A., et al. 1977, *Rev. Mexicana Astron. Astrofis.*, 2, 235
Brát, L., Mikulášek, Z., Pejcha, O. 2012, http://var2.astro.cz/library/1350745528_ebfit.pdf
Conroy, K. E., Prša, A., Stassun, K. G., et al. 2014, *AJ*, 147, 45
Drake, A. J., Graham, M. J., Djorgovski, S. G., et al. 2014, *ApJS*, 213, 9
Fitch, W. S., Wiśniewski, W. Z., & Johnson, H. L. 1966, *Communications of the LPL*, 5, 3
Hajdu, G., Catelan, M., Jurcsik, J., et al. 2015, *MNRAS*, 449, L113
Hájková, P., 2015, Fotometrická měření pulzující proměnné hvězdy RW Arietis, Středoškolská odborná činnost, Gymnázium Řečkovice, Brno, Odborný konzultant J. Liška
Harmanec, P., & Mayer, P. 2003–2015, *Dvojhvězdy*, Praha: Astron. ústav Univerzity Karlovy
Kaluzny, J., & Rucinski, S. M. 1986, *AJ*, 92, 666
Kholopov, P. N. 1971, *Peremennye Zvezdy*, 18, 117
Le Borgne, J. F., Paschke, A., Vandebroere, J., et al. 2007, *A&A*, 476, 307
Lee, J. W., Kim, Ch.-H., Kim, D. H., et al. 2010, *AJ*, 139, 2669
Li, L.-J., & Qian, S.-B. 2014, *MNRAS*, 444, 600
Liakos, A., & Niarchos, P. 2010, 9th International Confer. of the Hellenic Astron. Soc., 424, 208
Liakos, A., Mislis, D., & Niarchos, P. 2012, *IAU Symposium*, 282, 57
Liška, J., Zejda, M., Lomoz, F., et al. 2012, in *Proceedings of the 43rd Conference on Variable Stars Research*, Open European Journal on Variable Stars, 154, 4
Liška, J., Zejda, M., Lomoz, F., et al. 2013, *Central European Astrophysical Bulletin*, 37, 201
Liška, J., & Skarka, M. 2013, *Information Bulletin on Variable Stars*, 6077, 1
Liška, J. 2014, *Information Bulletin on Variable Stars*, 6119, 1
Liška, J., & Lišková, Z. 2014, *Information Bulletin on Variable Stars*, 6124, 1
Liška, J., Skarka, M., Mikulášek, Z., Zejda, M., & Chrástina, M. 2015a, arXiv:1502.03331
Liška, J., Skarka, M., Zejda, M., & Mikulášek, Z. 2015b, arXiv:1504.05246
Liška, J., Skarka, M., Auer, et al. 2015c, *Open European Journal on Variable Stars*, 170, 1
Liška, J., 2015e, in preparation (before submitting to *MNRAS*)
Mason, B. D., Wycoff, G. L., Hartkopf, W. I., Douglass, G. G., Worley, C. E. 2001, *AJ*, 122, 3466
Mikulášek, Z., Krtička, J., Henry, G. W., et al. 2011, *A&A*, 534, L5
Mikulášek, Z., & Zejda, M. 2013, *Úvod do studia proměnných hvězd*, Brno: Masarykova univ.
Mikulášek, Z. 2015, arXiv:1508.04827
Olevic, D. 1975, *BOBeo*, 126, 49
Olevic, D., & Catovic, Z. 1990, *IAUDS*, 112, 1
Paschke, A., & Brát, L. 2006, *Open European Journal on Variable Stars*, 23, 13
Pietrzyński, G., Thompson, I. B., Gieren, W., et al. 2012, *Nature*, 484, 75
Prvák, M., Liška, J., Mikulášek, Z., Krtička, J. & Lüftinger, T. 2015, arXiv:1510.01192
Smith, H. A. 1995, *RR Lyrae Stars*, [book], UK: Cambridge University Press, Cambridge
Smolec, R., Pietrzyński, G., Graczyk, D., et al. 2013, *MNRAS*, 428, 3034
Wade, R. A., Donley, J., Fried, R., et al. 1999, *AJ*, 118, 2442
Watson, C. L., Henden, A. A., & Price, A. 2006, *Society for Astron. Sciences Ann. Symp.*, 25, 47
Wiśniewski, W. Z. 1971, *Acta Astron.*, 21, 307
Wolf, M., Šarounová, L., Brož, M., Horan, R., 1999, *Information Bulletin on Variable Stars*, 4683, 1
Wolf, M., Kotková, L., Brát, L., et al. 2007, *Information Bulletin on Variable Stars*, 5780, 1
Zasche, P. 2008, arXiv:0801.4258
Zejda, M., Borovička, J., Hájek, P., et al. 1994, *Contrib. of the Public Obs. and Plan. in Brno*, 30,
Zhou, A. -Y. 2010, arXiv:1002.2729v6