

Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Proměnné hvězdy v otevřených hvězdokupách

Habilitační práce

Miloslav Zejda

Abstrakt

Poslední výzkumy naznačují, že většina hvězd v naší Galaxii vznikla v otevřených hvězdokupách. Výzkum těchto hvězdných soustav tak má zcela zásadní význam pro celou astrofyziku. Účinným nástrojem k jejich poznávání jsou proměnné hvězdy, zejména ty, které jsou přímo členy hvězdokup.

V předkládané habilitační práci jsou stručně představeny otevřené hvězdokupy a prezentovány jejich hlavní astrofyzikální charakteristiky. Nástrojem k hlubšímu poznávání hvězdokup mohou být i proměnné hvězdy. Nejvhodnější jsou k tomuto účelu zejména zákrytové dvojhvězdy, pulzující proměnné hvězdy a chemicky peculiární hvězdy. V době masivního využití CCD techniky je navíc tento způsob studia hvězdných soustav vysoce efektivní.

V práci i přílohách jsou ukázky výsledků konkrétních studií otevřených hvězdokup i proměnných hvězd. Pozornost je věnována nejen dosaženým výsledkům, ale i správné metodice jejich dosažení, která je uplatňována i při výchově a vzdělávání nové generace astronomů.

Abstract

Recent studies indicate that the majority of stars in our Galaxy apparently originated in open clusters. Consequently open cluster research is of substantial astrophysical importance. Variable stars, especially those that are members of open clusters, are a very effective tool for the study of open clusters.

Open clusters and their fundamental astrophysical characteristics are briefly introduced in the presented habilitation thesis. Current CCD techniques enable very efficient studying of open clusters by means of variable stars. Eclipsing binaries, pulsating variables stars and chemically peculiar stars are the most suitable types of variable stars for the study of open clusters. The thesis and its appendices include examples of their study. Attention is given to obtained results as well as the way and methodology by means of which the results were obtained. The results are utilised for the training and cultivation of a new generation of astronomers.

Obsah

1	Úvod	3
2	Stručný nástin problematiky	4
2.1	Otevřené hvězdokupy	4
2.1.1	Počátky výzkumu	5
2.1.2	Astrofyzika otevřených hvězdokup	6
2.1.2.1	Počáteční funkce hmotnosti hvězd	6
2.1.2.2	Izochrony	7
2.1.2.3	Metalicita otevřených hvězdokup	9
2.2	Proměnné hvězdy	10
2.2.1	Počátky výzkumu	10
2.2.2	Charakteristiky a vybrané typy proměnnosti	11
2.2.2.1	Zákrytové dvojhvězdy	11
2.2.2.2	Chemicky pekuliární hvězdy	11
2.2.2.3	Pulsující proměnné hvězdy	12
3	Metodika výzkumu	13
3.1	Pořizování a sběr dat	13
3.2	Čas	16
3.3	Zpracování a analýza dat	17
4	Vlastní studium proměnných hvězd	21
4.1	Proměnné hvězdy	22
4.1.1	Zákrytové dvojhvězdy	23
4.1.2	Hvězdy typu RR Lyrae	28
4.1.3	Rotující a chemicky pekuliární hvězdy	29
	Závěrem	31
	Seznam použité literatury	32
	Přílohy	36

1 Úvod

Hvězdné objekty, jejichž jasnost se v průběhu času mění, označujeme jako proměnné hvězdy. Jenže v takto široce pojaté definici by proměnnými byly vlastně všechny hvězdy, neboť vznikají, vyvíjejí se a zanikají. Běžně ale máme na mysli změny, které probíhají na časové škále od zlomků sekundy až po desítky nebo stovky let a které jsou běžně detekovatelné, tedy řekneme s amplitudami změn řádově tisíci magnitudy.

Nicméně je zřejmé, že s vývojem pozorovací a detekční techniky se posouvá i práh detekce změn jasnosti hvězd. Dnes jsme schopni zaznamenat změny hvězdné velikosti řádu mikromagnitud. Fotometrická pozorování této přesnosti odhalí i nepatrné oscilace hvězdné fotosféry a ukazují tak, že se mění v podstatě každá hvězda. Prozatím jsou však taková měření jen výjimečnou záležitostí. Běžně z pozemských observatoří měříme s přesností milimagnitud. I tak to znamená, že počet odhalených proměnných hvězd stoupá geometrickou řadou. Zatímco na počátku 20. století jich bylo známo jen několik set (Pickering, 1903), v roce 2013 je jich katalogizováno přes 223 000 (VSX, 2013). V takovém počtu lze nalézt desítky typů proměnnosti. Najdeme zde skupiny hvězd stejných vlastností čítající i několik tisíc členů a naproti tomu skupiny čítající jen několik málo hvězd nebo dokonce skupiny jen s jedním unikátním členem.

Příčiny proměnnosti jsou rozmanité, ale v zásadě jde o změny způsobené v důsledku změny geometrie, polohy, postavení hvězd(y), například u rotujících hvězd se skvrnami nebo vzájemně se zakrývajících se složek dvojhvězdy a změny související přímo se změnou jistých fyzikálních parametrů hvězdy, kdy se například u pulsujících hvězd mění jejich rozměry a povrchová teplota. Všeobecně platí, že proměnné hvězdy na sebe prozrazují více než hvězdy s konstantní jasností. Pokud jsou takové objekty navíc členy seskupení hvězd, jakými jsou otevřené hvězdokupy, může výzkum proměnných hvězd v nich přinést také informace o samotných hvězdokupách.



Obrázek 1.1: Jedna z nejznámějších otevřených hvězdokup, Plejády v souhvězdí Býka. Zdroj: <http://apod.nasa.gov/apod/ap071118.html>. Autor: Antonio Fernandez-Sanchez.

2 Stručný nástin problematiky

Stelární astronomie se dlouhou dobu opírala takřka výhradně o studie jednotlivých hvězdných objektů, zejména proměnných hvězd, a pak o statistiku hvězd v okolí Slunce, případně v celé Galaxii. Moderní CCD technika ale nabízí cestu, jak velmi efektivně studovat najednou větší množství jednotlivých hvězd a kromě toho získávat i informace o uskupeních hvězd jako celku.

Při výzkumu jediné hvězdy získáme zpravidla omezené množství informací o objektu našeho zájmu a možná také o mezihvězdném prostředí mezi námi a studovaným objektem. Jestliže je ale cílový objekt členem skupiny hvězd, které mají určité vlastnosti společné, můžeme získané údaje vztáhnout i na celé seskupení hvězd.

V naší Galaxii jsou takovými skupinami hvězd hvězdokupy. Kulové hvězdokupy jsou větší, početnější a starší, jenže v jejich případě není zcela zřejmé, jak vznikaly, a stáří pozorovaných hvězd nemusí vždy souhlasit se stářím hvězdokupy. Z tohoto pohledu tedy nejde o homogenní skupiny hvězd. Pro naše účely jsou mnohem vhodnější nepravidelné otevřené hvězdokupy, kde mají hvězdy stejné počáteční chemické složení a stejný věk a v řadě případů zde můžeme přímo sledovat vznik a raná stádia vývoje hvězd.

2.1 Otevřené hvězdokupy

Otevřené hvězdokupy jsou relativně málo početné skupiny hvězd s řádově stovkami až tisíci členů, které drží pohromadě vzájemná gravitační přitažlivost jejich členů. V prostoru zaujímají poměrně malý objem, vzhledem k jejich střední průměr je jen přibližně 10 parseků (30 světelných let). Jejich rozměr je tak nutné brát v úvahu jen pro velmi blízké hvězdokupy do zhruba 300 parseků. Přestože jsou otevřené hvězdokupy nepravidelného tvaru, je možné v nich najít jádro o středním průměru 0.6 až 2.0 pc obklopené řídkší oblastí hvězd, jakousi korónou hvězdokupy o zhruba pětikrát větším průměru (Nilakshi et al., 2002). Jako celek hvězdokupa zvolna obíhá kolem galaktického středu. Slapové působení jiných skupin hvězd i samotného centra galaxie ale způsobuje postupný rozpad hvězdokupy. K tomu samozřejmě přispívají i děje uvnitř hvězdokupy, například vzájemná přiblížení členů mohou vést až k vypuzení některé hvězdy ze systému. Dynamické simulace ukazují, že v běžných otevřených hvězdokupách vydrží hvězdy pospolu několik set milionů let. Velmi velké aglomerace (např. M67, NGC 188, NGC 6791, Be17) však mohou stářím až deseti miliard let konkurovat kulovým hvězdokupám (Salaris et al., 2004).

Na druhou stranu, proces vzniku hvězd a samotné hvězdokupy je vůči jejímu stáří poměrně krátký. Dá se tedy vcelku oprávněně uvažovat, že všechny hvězdy ve hvězdokupách mají stejné stáří. Délku procesu vytváření hvězdokupy a vzniku jejích členů je nutné uvažovat jen u velmi mladých otevřených hvězdokup, mladších než deset milionů let.

Po počátečním vzniku se jednotlivé hvězdy hvězdokupy vyvíjejí dále víceméně samostatně dle svých hmotností. Zatímco nejhmotnější hvězdy s hmotnostmi nad $100 M_{\odot}$ ve velmi mladých otevřených hvězdokupách žijí jen řádově miliony let, délka života nejmenších hvězd o hmotnostech několika setin hmot slunečních dosahuje až bilionů let. Řada studií z poslední doby se věnuje i substelárním objektům ve hvězdokupách, zejména

hnědým trpaslíkům a jejich zastoupení a významu pro vývoj otevřených hvězdokup (např. Baker et al., 2010).

Přestože se každá hvězda ve hvězdokupě vyvíjí individuálně dle své počáteční hmotnosti, ještě jednu věc mají členové hvězdokupy společnou. Vznikaly z mračna plynu a prachu v relativně malém prostoru pospolu, takže pocházejí ze stejného materiálu a mají stejné počáteční chemické složení. Informaci o něm nám poskytuje spektrální analýza vnějších vrstev hvězd, které nejsou vývojem v centrálních oblastech hvězd nijak dotčeny. Spektroskopická pozorování potvrzují, že přirozený rozptyl, resp. odlišnost chemického složení je mnohem menší než přesnost určení zastoupení jednotlivých prvků v atmosférách hvězd. Zcela jasně se pak ukazuje, že jednotlivé otevřené hvězdokupy se liší zastoupením kovů, tzv. metalicitou, někdy až o jeden řád.

Aktuální vydání katalogu otevřených hvězdokup DAML02 verze 3.3 z 10. ledna 2013¹ udává 2174 otevřených hvězdokup v naší Galaxii. Předpokládá se ale, že v Galaxii existuje mnoho tisíc dalších otevřených hvězdokup, které dosud nebyly objeveny. Jsou totiž příliš daleko a většinou ukryté v materiálu galaktického disku, takže jsou příliš slabé, abychom je mohli pozorovat. Nicméně i z těch známých je detailně prozkoumána jen menší část.

Pro teorii hvězdné stavby a vývoje představují hvězdy v otevřených hvězdokupách unikátní studijní materiál, protože se liší jen svými hmotnostmi. Ve velmi mladých otevřených hvězdokupách a uskupeních horkých, zářivých hvězd (tzv. OB, případně T asociací) můžeme navíc sledovat vývoj hvězdných batolat a zárodečný materiál pro vznik hvězd v podobě nezkondenzované mezihvězdné látky. Význam studia otevřených hvězdokup zvyšuje i fakt, že dle současných předpokladů většina nebo dokonce všechny hvězdy v naší Galaxii i dalších galaxiích vznikly a vznikají v otevřených hvězdokupách.

2.1.1 Počátky výzkumu

Pravděpodobně prvním, kdo zjistil, že otevřené hvězdokupy, pozorované do té doby jen jako mlhavé obláčky, jsou ve skutečnosti tvořeny hvězdami, byl Galileo Galilei v roce 1609. V letech 1758 až 1782 sestavil Charles Messier seznam stovky difúzních objektů, který obsahoval i 26 otevřených hvězdokup. V téže době (1767) zkoumal John Michell, zda tyto hvězdokupy nejsou jen důsledkem náhodné projekce nesouvisejících hvězd do stejného místa hvězdné oblohy. Zjistil ale, že se s mnohem větší pravděpodobností jedná o fyzické skupiny hvězd. Studium vlastního pohybu členů Plejád a dalších hvězdokup a také pohybové hvězdokupy Ursa Major v polovině 19. století pak skutečně prokázalo, že se jedná o gravitačně vázané systémy. Počátkem 20. století se zjistilo, že otevřené hvězdokupy se vyskytují zejména poblíž roviny Galaxie (Trumpler, 1925). Z jeho detailní studie také vyplynula existence mezihvězdné extinkce.

Před 1. světovou válkou byly představeny první diagramy, které pro hvězdy v Plejádách (Rosenberg, 1910) a Hyádách (Hertzsprung, 1911) ukazovaly závislost hvězdné velikosti na barvě hvězd, tedy diagram známý dnes jako Hertzsprungův-Russellův (dále HRD). V roce 1929 si pak Hertzsprung povšiml, že se podoba HR diagramů pro Hyády a Jesličky liší HRD Plejád, což správně interpretoval jako důsledek jejich rozdílného stáří.

¹<http://www.astro.iag.usp.br/~wilton>

2.1.2 Astrofyzika otevřených hvězdokup

Délka lidského života je ve srovnání s celkovou dobou vývoje hvězd jen letmý okamžik. Naše pozorování hvězd tak představují jen jakési momentky ve velmi dlouhém období hvězdného života. V okolním vesmíru ale pozorujeme různé hvězdy, které se liší rozměry, teplotami, hmotnostmi a dalšími parametry. Jak odlišíme hvězdné důchodce od adolescentů, předškoláky od hvězd v nejlepších letech? Na základě platných fyzikálních zákonů byly sestaveny naše představy o vývoji hvězd do podoby matematicko-fyzikálních modelů, v nichž se počítají parametry hvězd určité hmotnosti pro různé vývojové etapy.

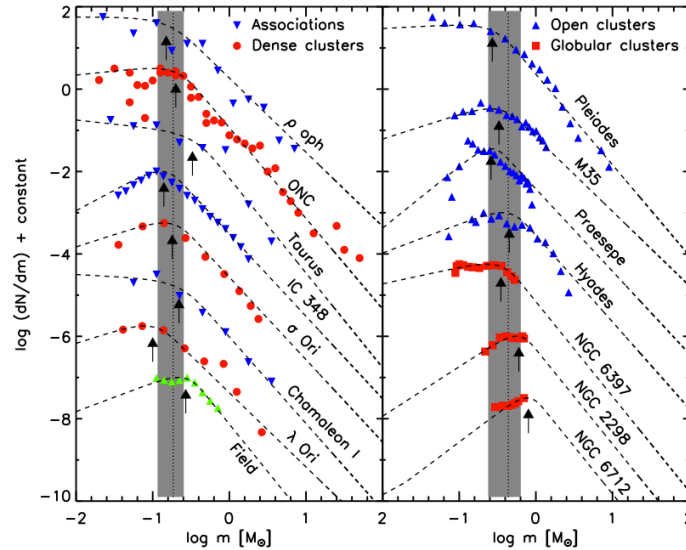
Každou hvězdu charakterizuje navenek její efektivní teplota a zářivý výkon, které rozhodují o poloze hvězdy v HRD nebo v diagramu barva-hvězdná velikost (dále CMD, z angl. colour-magnitude diagram). V průběhu hvězdného vývoje se tyto parametry samozřejmě mění a tím se mění i poloha hvězdy v HRD. Hvězda „putuje“ HR diagramem po tzv. vývojové stopě, jejíž podoba je diktována počáteční hmotností hvězdy a jejím složením. Rychlost vývoje je přitom dána počáteční hmotností hvězdy.

Pro ověření správnosti našich představ o stavbě a vývoji hvězd nyní stačí porovnat parametry hvězd získané z pozorování s parametry spočtenými v našich modelech, tedy porovnávat polohy skutečných hvězd v HRD s polohami hvězd stejné hmotnosti, metalicity, stáří získanými modelovými výpočty. Dá se říci, že v hrubých rysech HRD většiny hvězdokup odpovídají platné teorii hvězdného vývoje, naše představy jsou tak v zásadě správné. Případná odchylka HRD od teoretických předpovědí by byla samozřejmě důležitým podnětem k jejich revizi a vylepšení té části našich teoretických modelů, která odchylku způsobuje. Srovnáním HRD s teoretickými modely lze získat odhad stáří hvězdokup a tím i věk jejich členů. Můžeme ale také zjistit vzdálenost hvězdokupy a odhadnout její střední metalicitu.

2.1.2.1 Počáteční funkce hmotnosti hvězd

Hvězdy vznikají dělením a dalším vývojem částí obřích molekulových mračen. Pro mechanismus fragmentace počátečního molekulárního oblaku a formování a vývoje hvězdných soustav (včetně dvojhvězd) je klíčová podoba počáteční funkce hmotnosti hvězd (Initial mass function, IMF). Ta totiž popisuje pravděpodobnost vzniku hvězdy s určitou hmotností a její tvar určuje kolik z galaktického materiálu se nachází ve hvězdách rozličných hmotností (Kroupa, 2001, 2002). Přitom „porodní“ hmotnost každé hvězdy je pro její další život rozhodující. Určuje jak délku života, tak jeho průběh, dokonce i to, jak po svém zániku obohatí mezihvězdné prostředí těžšími prvky. Z toho plyne, že také chemický a fotometrický vývoj galaxií je velmi citlivý vzhledem k jejich IMF.

První pokus o určení IMF pro hvězdy pole o hmotnostech větších než $0.3 M_{\odot}$ provedl Salpeter (1955). Ukázal, že pokud se omezíme na určitý interval hmotností, pak je možné vyjádřit IMF ve zjednodušené podobě jako: $d \log [N(m)] \approx m^{\Gamma} d \log m$. Pro okolí Slunce také stanovil hodnotu $\Gamma = -1.35$. Pozdější výzkum řady autorů ukázal, že IMF má malý sklon u nízkých hmotností a naopak je podstatně strmější u velkých hmotností, pro hvězdy hmotnější než polovina Slunce ($m \geq 0.5 M_{\odot}$). Všeobecně se soudí, že IMF hvězdokup, zejména v části od středních po velké hmotnosti je „univerzální“, takže je vzhledem k Salpeterově hodnotě Γ v mezích statistických nejistot a je nezávislá na prostředí a vlastnostech oblaku, z něhož hvězdokupa vzniká.



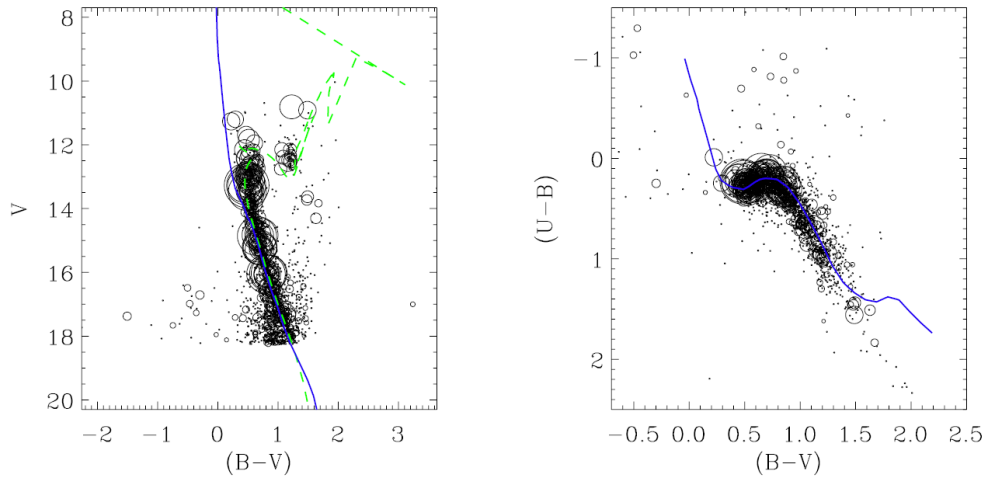
Obrázek 2.1: Současné určené funkce hmotnosti několika mladých uskupení s probíhající tvorbou hvězd, otevřených hvězdokup v širokém rozmezí stáří a starých kulových hvězdokup (De Marchi et al., 2010). Navíc je uvedena také odvozená IMF pro hvězdy pole. Čárkované čáry ukazují nejlepší proložení, fit získaných dat. Šipky ukazují charakteristickou hmotnost pro každý fit (m_p), tečkovaná čára označuje střední charakteristickou hmotnost kupy v každém panelu a šedá oblast je vyznačením standardní odchylky charakteristické hmotnosti v daném panelu (IMF hvězd pole nebyla zahrnuta do výpočtu standardní odchylky). Pozorování souhlasí s jednotlivými základními průběhy IMF, ale je zde evidentní rozptyl u spodního okraje pro objekty nízké hmotnosti, který vyžaduje další výzkum. Posun charakteristických hmotností kulových hvězdokup k vyšším hodnotám je očekávaný, jestliže uvážíme, že jejich dynamický vývoj. Detaily viz Bastian et al. (2010). Převzato z Bastian et al. (2011).

Analýze IMF pro otevřené hvězdokupy se dosud věnovalo jen několik prací. Například Sanner & Geffert (2001) zjistil analýzou dat katalogu Tycho-2, že Γ se mění v intervalu -0.69 až -2.27 . Novější CCD pozorování užili k určení sklonu hmotnostní funkce např. Sagar et al. (2001) u 7 otevřených hvězdokup (NGC 3105, NGC 3603, Melotte 105, Hogg 15, NGC 4815, Pismis 20 a NGC 6253). Pro podobné studie je k dispozici obrovské množství dat, které doposud nebylo z pohledu určení IMF zpracováno.

2.1.2.2 Izochrony

Hvězdy otevřené hvězdokupy se v HR diagramu koncentrují do poměrně úzké oblasti kolem tzv. izochrony (viz obr. 2.2, křivky stejného stáří. Místo hvězdy na izochroně hvězdokupy je dáno počáteční hmotností hvězdy. Teoretické izochrony, resp. jejich celé sítě vycházejí z modelů hvězdné stavby a hvězdného vývoje. Na nich pracuje řada týmů, které poskytují síť vývojových stop hvězd v HRD v širokém rozmezí metalicit a stáří hvězd. Jmenujme například Padovskou databázi² (Girardi et al., 2004; Bertelli et al., 2008, 2009), výsledky skupiny v Ženevě (Meynet & Maeder, 2003; Lejeune & Schaerer, 2001) nebo nové sítě vývojových modelů, které už berou v úvahu rotaci a astroseismo-

²<http://pleiadi.pd.astro.it/>



Obrázek 2.2: *UBV* pozorování otevřené hvězdokupy NGC 2477. Modrou plnou čarou je vyznačena ZAMS a čárkovanou zelenou čarou fitovaná isochrona. Velikost bodů je úměrná pravděpodobnosti členství hvězdy ve hvězdokupě. Převzato z Dias et al. (2012).

logická omezení vyplývající z dat družic COROT a KEPLER³ (Mowlavi et al., 2012; Ekström et al., 2012; Georgy et al., 2012; Lagarde et al., 2012) nebo projekt Y2⁴ (Demarque et al., 2004) případně pro hvězdy nízké hmotnosti sítě Baraffe et al. (1998)⁵. V ideálním případě bychom z některého modelu převzali bolometrickou hvězdnou velikost hvězdy a její efektivní teplotu, vynesli do HRD a porovnali s napozorovanými hodnotami. Jenže většinou nemáme z pozorování k dispozici bolometrickou hvězdnou velikost, ale jen fotometrická měření prováděná v různých širokých částech spektra, v různých fotometrických filtrech. Bohužel všechny izochrony, které z výše uvedených modelů dosud vycházejí, nelze pro přímé srovnání v běžně používaných fotometrických systémech použít a potřebný přechod k žádoucím jednotkám není jednoduchý.

Řada autorů (například Grocholski et al., 2003; Bonato et al., 2004) pak poukazuje na to, že mezi sítěmi různých skupin jsou nezanedbatelné rozdíly, způsobené zřejmě různou definicí fyziky modelu, zejména použitými modely hvězdných atmosfér, ale také chybějícími „standardními otevřenými hvězdokupami“. Ty jsou definovány jako uskupení hvězd s přesně známými parametry (vzdálenost, zčervenání, věk a metalicita) a velkým množstvím přesných kinematických, spektroskopických a fotometrických měření. Takových testovacích případů je ale bohužel poskrovnu a navíc poskytují jen omezený rozsah parametrů hvězdokup (Stetson, 2000).

V praxi to znamená, že pokud budu hledat v dostupných modelech tu izochronu, která nejlépe odpovídá poloze hvězd zkoumané hvězdokupy, nebude toto běžně používané fitování na nejlepší izochronu příliš důvěryhodné. Uspokojivě malé chyby fitování jsou u otevřených hvězdokup velmi vzácné (Paunzen & Netopil, 2006).

Pro zlepšení stávajícího stavu je nutné rozšířit síť vývojových modelů a zejména zpřesnit modely hvězdných atmosfér, které používají. Pak bude možné korektně spočítat

³<http://obswww.unige.ch/~mowlavi/evol/denseGrids/>

⁴<http://www.astro.yale.edu/demarque/yyiso.html>

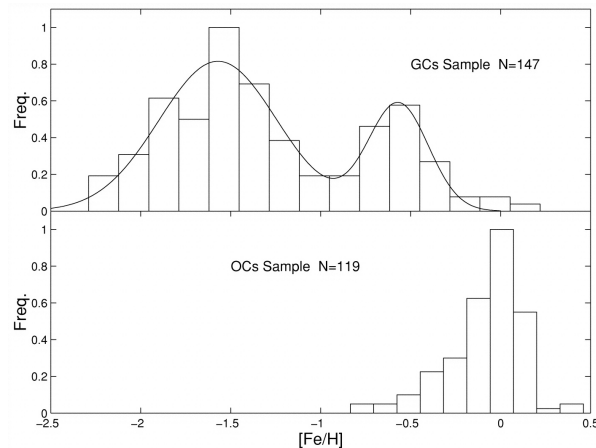
⁵<http://cdsweb.u-strasbg.fr/viz-bin/Cat?J/A%2bA/337/403>

modelové hodnoty pro všechny běžné fotometrické systémy a využít všechna dostupná fotometrická dostatečně kvalitní pozorování pro srovnání modelů hvězdného vývoje, hvězdných atmosfér a správnou interpretaci z nich získat hmotnosti, stáří (Jorgensen & Lindegren, 2005) a celkové složení hvězd ve hvězdokupách.

2.1.2.3 Metalicita otevřených hvězdokup

Prvotní fáze vývoje hvězdokupy jako ochlazování a kolaps ionizovaného plynu během prvních fází tvorby hvězd jsou zásadním způsobem ovlivňovány obsahem těžších prvků v zárodečném materiálu (Jappsen et al., 2007). Hvězdokupy se tak formují a vyvíjejí jinak v odlišných prostředích – například v naší Galaxii a v Magellanových mračnecích (Johnson et al., 1999). Ukazuje se, že oblaka s menší metalicitou se budou dělit s větší pravděpodobností (Machida, 2008), což mimo jiné znamená, že výskyt dvojhvězd by měl klesat s rostoucí metalicitou zárodečného oblaku. Metalicita ale má vliv i na další vývoj hvězd, což se projevuje například odlišnými izochronami v HRD pro hvězdy s různým zastoupením kovů.

V naší Galaxii se podařilo odhalit gradient metalicity v galaktickém disku, což poskytuje poměrně silné omezení pro naše představy o mechanismu vzniku galaxií. (Ne)přítomnost gradientu abundancí vzhledem ke vzdálenosti od středu galaxie přitom silně ovlivňuje proces tvorby hvězd (Chiappini et al., 2001). Pro pochopení vzniku hvězd v Galaxii je tedy nezbytné znát rozložení metalicity v prostoru, ale i čase. Jenže všechny indikátory metalicity a jejího gradientu jsou mladé objekty, tedy kromě otevřených hvězdokup. V praxi to znamená, že gradient v časných obdobích Galaxie není znám příliš dobře. Naše modely chemického vývoje celkem dobře popisují a vysvětlují současný gradient metalicity Galaxie, ale pokusy o výklad raného gradientu a jeho vývoje se od sebe dost liší dle použitých scénářů pro vznik a vývoj Galaxie (Tosi, 1996). Jedinými objekty, které jsou schopny podávat svědectví o metalicitě hvězd různých časů a v různých vzdálenostech od středu Galaxie, jsou otevřené hvězdokupy. Jejich výzkum v této oblasti může být velmi přínosný jak ukázali například Chen et al. (2003) či Tadross (2003).



Obrázek 2.3: Srovnání distribuce metalicity pro kulové (horní část) a otevřené hvězdokupy (spodní část) v naší Galaxii. Převzato z Chen et al. (2003).

2.2 Proměnné hvězdy

Význačná část hvězd vykazuje změny hvězdných velikostí od mikromagnitud až do více než 14 magnitud v optické části spektra na časových škálách od 10^{-4} s až po stovky let. Proměnné hvězdy tvoří mimořádně pestrou skupinu osamocených hvězd, dvojhvězd a vícenásobných hvězdných soustav, velice rozmanité jsou i projevy pozorovaných změn a jejich příčiny⁶. Čím více se zjemňují diagnostické metody, tím vyšší je zastoupení odhalených proměnných hvězd v náhodném vzorku hvězd. V katalogích proměnných hvězd například GCVS⁷ (Samus et al., 2012), VSX⁸ (Watson et al., 2012) jsou uváděny hvězdy se změnou hvězdné velikosti alespoň 1 mmag.

Proměnné hvězdy jsou v určitém smyslu hvězdnými laboratořemi. Prozrazují o sobě a svém okolí mnohem více než neproměnné hvězdy s konstantní jasností. Výzkumem proměnných hvězd tak získáváme často unikátní informace o výkonech, hmotnostech i o vnitřní stavbě hvězd, které bychom jinak jen stěží dokázali získat (zákrytové dvojhvězdy, pulzující hvězdy aj.). Navíc mohou hodně prozradit i o své poloze. Supernovy typu Ia, pulzující proměnné hvězdy nebo zákrytové dvojhvězdy mohou velmi dobře posloužit i pro nezávislé určování vzdáleností ve vesmíru.

2.2.1 Počátky výzkumu

Proměnné hvězdy byly pravděpodobně pozorovány už v dávných dobách. Staré čínské, korejské nebo japonské kroniky obsahují informace o „hvězdách–hostech“, které byly později ztotožněny se supernovami. První (periodicky) proměnnou hvězdu v novodobé historii, Miru Ceti, objevil v roce 1596 David Fabricius. John Goodricke v letech 1782–3 objevil světelné změny Algolu, hvězdu systematicky pozoroval, určil periodu jejích změn a správně vysvětlil, že ke změnám dochází v důsledku zakrývání složek při oběhu kolem společného těžiště. Až do poloviny 19. století narůstal počet nově objevených proměnných hvězd zvolna, zejména v důsledku chybějící metodiky pozorování. Argerlander (1844) publikoval metodu vizuálního pozorování proměnných hvězd, kterou pak převzaly stovky pozorovatelů, a také katalog známých proměnných hvězd s 44 objekty.

Ke konci 19. století do oboru výrazně promluvila fotografie a začínající fotografické přehledky, které na počátku 20. století přinesly tisíce nových proměnných hvězd. Výrazný posun znalostí ale přinesla spektroskopie. Bylo možné nejen určovat radiální rychlost objektu dle Dopplerova jevu (poprvé William Huggins, 1868), případně radiální rychlosti složek dvojhvězdy (Vogel, 1890), ale také určovat chemické složení atmosféry hvězd a další vlastnosti. V polovině 20. století se podařilo standardizovat měření jasnosti hvězd pomocí fotoelektrického fotometru, zejména zavedením fotometrických systémů (Johnson & Morgan, 1953). Krátce nato se podařilo zahájit i pozorování v kosmickém prostoru bez omezení atmosférou.

K revoluční změně dochází v 70. letech 20. století, kdy se začaly prosazovat CCD čipy, které postupně nahradily jiné detektory světla. CCD kamera je dnes běžnou součástí výbavy i pokročilých astronomů amatérů, kteří běžně produkují měření na profesionální

⁶Detailní informace o rozdílných typech proměnných hvězd jsou uvedeny ve skriptech Mikulášek, Zejda: Proměnné hvězdy, které jsou přílohou tohoto habilitačního řízení.

⁷<http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/Cat?B/gcvs>

⁸<http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/Cat?B/vsx>

úrovni. Výsledkem značného rozšíření CCD kamer je nárůst počtu proměnných hvězd až na statisíce.

2.2.2 Charakteristiky a vybrané typy proměnnosti

Proměnné hvězdy jsou charakterizovány zejména časovými změnami jasnosti. Uspořádanou dvojici (čas, naměřená veličina) označujeme jako časová řada⁹ a grafickou závislost hvězdné velikosti, případně intenzity na čase pak jako světelná křivka. Tyto změny mohou být aperiodické i periodické. Aperiodické světelné změny mohou být způsobeny například eruptivní aktivitou, nebo i výbuchy v podobě nov, supernov, hypernov. Takové děje jsou do značné míry nepředvídatelné. Víme, že k nim u jistých typů hvězd dojde, ale nemůžeme předpovědět kdy. Periodické změny jasnosti proměnných hvězd naproti tomu jsou matematicky popsatelné a předvídatelné. Příčinou těchto periodických změn může být rotace hvězdy, oběh složek dvojhvězdy kolem společného těžiště nebo pulzace hvězdy. Někdy také vše dohromady.

Pro studium otevřených hvězdokup prostřednictvím proměnných hvězd jsou vhodné jisté typy periodicky proměnných hvězd, které vymezují interval možných hodnot určitých charakteristik té které hvězdokupy, například stáří, vzdálenost a podobně. Vybrali jsme proto z geometricky proměnných hvězd zákrytové dvojhvězdy a rotující proměnné hvězdy (zejména chemicky pekulární hvězdy), a z fyzicky proměnných pak pulzující proměnné hvězdy, zejména cefeidy a hvězdy typu RR Lyrae.

2.2.2.1 Zákrytové dvojhvězdy

Některé těsné dvojhvězdy mají rovinu oběžných trajektorií složek kolem těžiště orientovanou tak, že v této rovině nebo velmi blízko ní je i Země. Při pohledu ze Země se nám pak složky dvojhvězdy v určitých časech zakrývají. Většinou je ale dvojhvězdný systém tak daleko, že vidíme jen společné světlo obou složek, jehož intenzita v době zákrytu poklesne. Ve spektru se taková dvojhvězda projevuje pozorovanou periodickou změnou polohy spektrálních čar jedné nebo obou složek. Jestliže máme k dispozici jak fotometrická pozorování, tak i radiální rychlosti složek dvojhvězdy během celé fázové křivky, můžeme určit přímo absolutní hodnoty hmotností, rozměrů, teplot, zářivých výkonů atd. obou složek. Pozorování zákrytových dvojhvězd s přesností 1 % (Andersen, 1991) poskytují nejpřesnější údaje o hmotnosti hvězd, které jsou zásadní pro testování správnosti našich představ o vývoji a stavbě hvězd. Pokud je taková dvojhvězda členem otevřené hvězdokupy, můžeme pomocí těchto dat určit vzdálenost hvězdokupy, metalicitu a vymezit přesněji také její stáří.

2.2.2.2 Chemicky pekulární hvězdy

Povrch některých hvězd je pokryt skvrnami, které se mohou od okolního hvězdného povrchu lišit teplotou (jako u Slunce) nebo chemickým složením jako v případě chemicky pekulárních (CP) hvězd, které mají na svém povrchu atypické rozložení určitých prvků například hélia, křemíku, železa, chromu, vzácných zemin a dalších. Koncentrace těchto prvků tam překračuje i o několik řádů výskyt na Slunci. Takové skvrny se vyvinou

⁹Je vhodné a žádoucí pro zpracování doplnit tuto dvojici ještě o třetí údaj – nejistotu daného měření.

u hvězd s mimořádně klidnými povrchovými vrstvami. Pokud z pozorovaných změn jasnosti určíme periodu světelných změn, získáme i periodu rotace. Vzhledem k všeobecně přijímanému předpokladu, že osamocená hvězda rotuje nejrychleji při svém vzniku a pak po dobu výskytu na hlavní posloupnosti zvolna zpomaluje v důsledku pozvolné expanze způsobené jaderným vývojem v nitru, případně magnetickým bržděním, lze z empirických vztahů *rotace – hmotnost – věk* určit věk hvězdy a tím i celé hvězdokupy.

2.2.2.3 Pulsující proměnné hvězdy

V nitru části hvězd se periodicky mění opacita určité vrstvy. U cefeid nebo hvězd typu RR Lyrae jde o vrstvu s částečně nebo zcela ionizovanými atomy hélia He II/He III. Jejich výskyt v Galaxii je ale odlišný. Zatímco klasické cefeidy (cefeidy 1. typu) se vyskytují se spirálních ramenech Galaxie a tedy i v otevřených hvězdokupách, RR Lyrae hvězdy jsou zpravidla spojovány se staršími kulovými hvězdokupami a jejich výskytem v galaktickém halu. K určení vzdálenosti lze využít závislost perioda – svítivost objevenou H. S. Leavittovou před více než sto lety pro cefeidy. Tím je samozřejmě možné stanovit i vzdálenosti „mateřských“ otevřených hvězdokup. Hvězdy typu RR Lyr lze nalézt i v otevřených hvězdokupách nebo jejich blízkosti. Katalog proměnných hvězd v otevřených hvězdokupách (Zejda et al., 2012a,b) jich obsahuje několik set. Bohužel dostupné údaje neumožnily dosud jednoznačně určit, zda se jedná o členy otevřených hvězdokup nebo jde jen o projekci do jejich blízkosti. Právě určení či vyloučení členství u těchto hvězd je jeden z dalších úkolů studia otevřených hvězdokup. Některé extrémně staré otevřené hvězdokupy ale konkurují svým stářím kulovým hvězdokupám a výskyt hvězd typu RR Lyrae v nich je z tohoto úhlu pohledu velmi pravděpodobný.

3 Metodika výzkumu proměnných hvězd a otevřených hvězdokup

Nástrojem studia otevřených hvězdokup mohou být samotné proměnné hvězdy, ale platí to i opačně. Otevřené hvězdokupy lze využít ke studiu proměnných hvězd, které v nich leží. Ať je již prvotním cílem našeho výzkumu proměnná hvězda nebo celá hvězdokupa, výsledky se budou vzájemně ovlivňovat, budou korelované. Zlepšení parametrů na jedné straně pomůže ke zpřesnění výsledků na straně druhé.

V každém případě k dosažení smysluplných výsledků je třeba využít vhodné vskutku fundamentální nástroje. Řada z nich má zcela obecnou využitelnost. Například část nástrojů může sloužit jak pro výzkum proměnných hvězd, tak třeba i pro studium exoplanet. Řada postupů v základním zpracování dat je v těchto oblastech shodná. O to více se v poslední době s rostoucím počtem proměnných hvězd i exoplanet ale i v jiných oblastech astronomie stále tíživěji ukazuje problém metodologický. Metody, které používá naprostá většina badatelů, byly vyvinuty před desítkami let a většinou doznaly jen drobných úprav po zavedení počítačů. U výzkumu exoplanet je tento problém vidět velmi zřetelně. Astronomové tam často „objevují“ metody, které jsou v oblasti výzkumu proměnných hvězd využívány už dlouho. Metody jsou to spolehlivé, ověřené léty praxe. Učí se na univerzitách a předávají z generace na generaci. Bohužel se ukazuje, že tyto metody se jen velmi obtížně vypořádávají s přílivem velmi přesných dat, která jsou v současné době k dispozici. Jeden příklad za všechny. Jedním z opravdu fundamentálních problémů je určení okamžiku extrému (maxima nebo minima) jasnosti proměnné hvězdy. Metodu, kterou používá valná většina astronomů poprvé popsal Hertzsprung (1928). Známější je v mírně upravené verzi dvojice Kwee & van Woerden (1956). Sami autoři vymezili podmínky používání této metody, které však prakticky nikdo nebere v úvahu a používá metodu jako černou skříňku, do které vhodí svoje data a vypadne z ní požadovaný okamžik extrému, dokonce i s nějakou chybou. Výsledkem takového principiálně špatného postupu jsou ale chyby ve vyhodnocení dat, které mohou vést k chybným astrofyzikálním závěrům.

Astronomické oddělení Ústavu teoretické fyziky a astrofyziky je jedním z mála pracovišť, které se otázkám metodiky základního zpracování dat cíleně věnuje. Na problémy spojené s nevhodným používáním archaických metod nebo i nových postupů v podobě černé skříňky upozorňujeme na nejrůznějších fórech. Protože konzervatismus je u „hotových“ astronomů poměrně silný, směřujeme naše prezentace v tomto směru na konference, setkání, jichž se účastní mladí astronomové, např. Zejda (2009a,b, 2010), Zejda & Mikulášek (2010, 2011). Samozřejmě zde nabízíme i alternativní postupy, kromě výše uvedených viz například (Mikulášek et al., 2006). V přípravě jsou další práce, které na reálných datech i simulacích ukazují nedostatky archaických a chybných přístupů ke zpracování dat a nabízejí nové možnosti.

3.1 Pořizování a sběr dat

Jednou ze stěžejních činností astronoma je sběr dat. Přestože se celkový objem astronomických dat zdvojnásobuje každého půl roku, dat popisujících chování zvoleného

konkrétního objektu zpravidla není nikdy dost. V astronomické praxi potřebujeme analyzovat časové řady dat různé kvality i obsahu. Pro pochopení dějů probíhajících u studovaného objektu je často zcela zásadní mít časovou řadu co nejdélejší. Prvotní úkol je tedy shromáždit všechna dostupná data. V současné době úkol usnadňuje tzv. virtuální observatoř, která prostřednictvím sjednocených protokolů propojuje rozdílné databáze astronomických dat. Bohužel ani zdaleka nejde o přístup ke všem astronomickým datům. Zejména starší, velmi cenná pozorování, často kompletní přehledy pozorovacích dat, bývají „ukryta“ na stránkách lokálních časopisů různých observatoří. Nejsou dostupné v elektronické podobě a často ani v moderních bibliografických přehledech. Léty jsem v tomto ohledu získal značnou zkušenost a již jsem odhalil řadu skutečných pokladů v podobě pozapomenutých starých autentických astronomických dat v oblasti stelární astronomie.

Zcela jiná je situace u moderních zdrojů dat. K nim se v naprosté většině dostaneme online využitím počítače a internetu. A nejde jen o zmiňovanou virtuální observatoř. Tento gigantický projekt není dokončen a tak například ne všechny zdroje fotometrických dat jsou do projektu zapojeny. Při našem studiu se tedy obracíme nejen na virtuální observatoř, ale i na jednotlivé přehlídkové fotometrické projekty jako ASAS¹, SuperWASP², 2MASS³, Pi of the sky⁴, UKIDSS GPS⁵, DENIS⁶, NSVS⁷, SDSS/SEGUE⁸, CRTS⁹, AAVSO Archive¹⁰, LINEAR¹¹, OGLE¹², MACHO¹³, INTEGRAL OMC¹⁴, HIPPARCOS¹⁵. Analýzou dat z těchto jednotlivých přehlídek lze získat významné studie proměnných hvězd i otevřených hvězdokup, ale v případě hvězdokup jde spíše o jednotlivé práce než záplavu článků, například Bonatto & Bica (2007), Baker et al. (2010), Turner (2011), případně Ryu & Lee (2011), Bukowiecki et al. (2011) nebo Alves et al. (2012). Jednu z takových prací založených na datech z těchto přehlídkových projektů, konkrétně katalog pulzujících proměnných hvězd typu RR Lyrae vykazujících Blažkův jev, publikoval pod mým vedením doktorand Marek Skarka (2013).

Kromě databází s původními naměřenými daty používáme pro náš výzkum i databáze, které obsahují již publikované výsledky nejrůznějších studií. Příkladem může být databáze CALEB fotometrických dat a parametrů zákrytových dvojhvězd určených programem Binary Maker 3 (<http://caleb.eastern.edu/>) nebo databáze fotometrických měření magnetických chemicky pekuliárních hvězd mCPod (Mikulášek et al., 2007) <http://astro.physics.muni.cz/mcpod/>. Pro zvýšení efektivity našeho výzkumu jsem se roz-

¹<http://www.astrouw.edu.pl/asas/>

²<http://www.wasp.le.ac.uk/public/>

³<http://www.ipac.caltech.edu/2mass/>

⁴<http://grb.fuw.edu.pl/index.html>

⁵<http://www.ukidss.org/>

⁶<http://cdsweb.u-strasbg.fr/denis.html>

⁷<http://skydot.lanl.gov/>

⁸<http://www.sdss.org/segue/>

⁹<http://crts.caltech.edu/>

¹⁰<http://www.aavso.org>

¹¹<https://astroweb.lanl.gov/lineardb/>

¹²<http://ogle.astrouw.edu.pl/>

¹³<http://macho.anu.edu.au/>

¹⁴<https://sdc.cab.inta-csic.es/omc/>

¹⁵<http://archive.ast.cam.ac.uk/hipp/hipparcos.html>

hodl vybudovat zcela novou databázi MECA fotometrických měření zákrytových dvojhvězd, které získáme z vlastních pozorování i jako výsledek data-miningu. V databázi tedy budou uložena nejen data z našich vlastních fotometrických měření, ale také data z publikací nebo přehlídkových projektů. Datové úložiště bude doplněno také nástroji na zpracování dat, korektní určování okamžiků minim, periodovou analýzu a jiné. Zákrytových dvojhvězd je dnes známo několik tisíc, ale jen u malého počtu soustav jsou jejich parametry určeny s přesností 1 % nezbytnou pro testy hvězdného vývoje (Andersen, 1991). V mnoha případech byla v minulosti získána přesná měření, ale byla zpracována tehdejšími, dnes neadekvátními metodami, takže přesnost a spolehlivost výstupních dat z modelu dvojhvězdy nedosáhla požadované úrovně. Na druhé straně jsou mezi dvojhvězdami i aktivní systémy, kde se světelná křivka nebo její markanty mění i během jediného cyklu nebo sezóny. Pak je velmi žádoucí zpracovat, analyzovat a porovnat všechna dostupná data i z minulosti, nejen ta současná pořízená během krátkého úseku přiděleného času na dalekohledu. Tyto důvody jsou natolik závažné, že vedly k založení databáze MECA, která bude odborné veřejnosti představena na podzim roku 2013.

Posledním typem databází, které využíváme, jsou komplexní databáze, které umožňují nejen stáhnout data, ale nabízí i nástroje pro jejich vyhodnocení. Takovou databází je v principu i virtuální observatoř, ale pro otevřené hvězdokupy je takovou nejjobsáhlejší specializovanou databází databáze WEBDA (Mermilliod & Paunzen, 2003), obsahující astrometrická data (souřadnice členů, jejich pravoúhlé polohy x, y , vlastní pohyby), fotometrická měření, spektroskopická data (spektrální klasifikace hvězd, radiální rychlosti, rotační rychlosti, metalicity) a další údaje jako pravděpodobnost příslušnosti ke hvězdokupě, elementy dvojhvězd (členů hvězdokupy), periody proměnných hvězd nebo bibliografické údaje. Nyní je tato databáze umístěna na serveru *astro* ÚTFA Masarykovy univerzity. Přestože je WEBDA nejkomplexnější databází otevřených hvězdokup, není příliš důvod ke spokojenosti, protože zhruba polovina známých otevřených hvězdokup není blíže prostudována nebo je zcela opomíjena. Na druhou stranu ani ten potenciál ukrytý v archivech přehlídkových fotometrických projektů není dosud využit beze zbytku. Jedním z cílů pracovníků Astronomického oddělení ÚTFA je proto doplňování a další vývoj databáze WEBDA.

Samozřejmě se nespolehneme jen na cizí zdroje dat, ale provádíme i vlastní pozorování. Do poloviny 90. let jsem pozoroval proměnné hvězdy vizuálně, což mi později umožnilo posuzovat kvalitu a (ne)použitelnost vizuálních pozorování různých pozorovatelů se značnou znalostí věci. Vizuální pozorování mohou být mnohdy jediným zdrojem informací o chování studované hvězdy. Většina profesionálních astronomů v současné době využití vizuálních pozorování striktně odmítá, s poukazem na jejich nevěrohodnost. Řada autorů však vizuální pozorování úspěšně použila. Spolu s kolegou prof. Mikuláškem jsme se tomuto tématu věnovali při studiu dat zákrytové soustavy BS Vul (Zhu, Zejda et al., 2012). Výsledek naší analýzy podporuje tvrzení, že využití vizuálních pozorování spolu s objektivnějšími daty např. ze CCD měření je možné i v moderní epoše, ale vždy po důkladném rozboru a zvážení situace. Další diskusi na toto téma lze najít v Mikulášek, Zejda et al. (2012). Vizuální pozorování jsou dnes sice na ústupu a jsou takřka výhradně nahrazena CCD měřeními, ale jde zejména o správné zhodnocení a využití starších vizuálních dat z doby, kdy jiná pozorování studovaného objektu nebyla k dispozici.

Také já jsem přešel v polovině 90. let minulého století k fotometrickým pozorováním většinou se CCD kamerami. Do jara roku 2013 jsem získal přes 310 000 CCD snímků a více než 56 000 fotometrických měření s fotoelektrickým fotometrem na domácích i zahraničních observatořích. Pro své potřeby jsem vybudoval archiv pořízených CCD snímků. Jednou z obrovských výhod CCD snímků je jejich snadné ukládání, archivace a snadná možnost nového zpracování, při pochybnostech o správnosti předchozího postupu, vylepšení metody, softwarového vybavení nebo při objevu nové proměnné hvězdy zachycené jaksí mimochodem na snímku původně sledované proměnné hvězdy.

S rozšířením CCD techniky i do řad amatérů výrazně vzrostlo množství fotometrických dat. CCD snímky umožňují při správném zpracování získávat velmi kvalitní fotometrická data bez ohledu na to, zda je pořídil nadšený amatér nebo placený profesionál. V každém případě je velmi žádoucí archivovat původní CCD snímky. Vzhledem k dlouholeté práci v Sekci pozorovatelů proměnných hvězd a exoplanet České astronomické společnosti jsem došel k přesvědčení, že problém s archivací dat ze CCD pozorování má většina pozorovatelů v ČR a je třeba jej řešit komplexně. Spolu se studentem doktorského studia Markem Chrastinou jsme odhadli množství dat ze CCD pozorování za 15 let v ČR a dospěli k překvapivému objemu dat 10 TB, který je srovnatelný například s velkým projektem Sloan Digital Sky Survey. Vzhledem k rozmanitosti zdrojů těchto snímků bylo nutné sjednotit jejich formu a údaje obsažené v hlavičkách souborů. K tomu vyvinul M. Chrastina sadu skriptů v jazyce Python (Chrastina et al., 2010). Ve spolupráci s Fakultou informatiky jsme v rámci projektu CERIT připravili uživatelské rozhraní pro archiv CCD snímků, který umožní pozorovatelům nahrávat na úložiště i stahovat vlastní snímky. Při uploadu bude provedena kontrola správnosti a úplnosti dat v hlavičkách CCD snímků, které budou ukládány ve formátu FITS. Uživatelsky příjemné rozhraní je výsledkem diplomové práce Fotometrický archiv astronomických snímků studenta Petra Kunčara, jíž jsem konzultantem. V dalším kroku hodláme všechny snímky zpracovat jednotným způsobem a zveřejnit astrometrii a fotometrii všech hvězd na jednotlivých snímcích, včetně propojení našeho úložiště a databáze do virtuální observatoře.

3.2 Čas

Velkým problémem a nedostatkem mnoha studií proměnných hvězd je rezignace na kvalitu časových údajů a někdy doslova ignorance autorů v tomto smyslu. Zatímco snaha o co nejpřesnější určení hvězdných velikostí je zřejmá a takřka všudypřítomná, na přesnost a korektnost časových značek, která pozorování popisují, se často zapomíná. Přitom jde o základní požadavek v oblasti studia proměnných hvězd. Zatímco v minulosti byla přesnost (profesionálních) vizuálních nebo fotografických pozorování v čase 10 až 30 sekund, dnes s fotometry a CCD kamerami se jedná o přesnost řádově sekunda. Nejde ale jen o přesnost časových údajů při vlastním pozorování. Ta je v dnešní době většinou zajištěna synchronizací času v počítači, který řídí kameru nebo fotometr přes NTP servery vůči atomovému času. Jenže, pozorovatelé často neuvedou, jaký časový standard použili. Nejčastěji uvádějí časový standard UT a časové údaje k pozorování pouze převedou na juliánské datum. Jenže definovaných variant světového času UT je několik, takže uvést jen UT nestačí. Ti pečlivější uvedou UTC, což je sice v pořádku, ale je nutné si následně při zpracování pozorovacích řad uvědomit, že čas definovaný

jako UTC bohužel není v důsledku přestupných sekund spojitý! Za dobu existence už rozdíl UTC oproti plynule běžícímu času narostl na více než půl minuty, což se při analýze dlouhodobých časových řad nutně projeví. Navíc při dnešní přesnosti nestačí pro podobné analýzy vztáhnout časy pozorování ke středu Slunce (provést heliocentrickou korekci), ale je časy přepočítat vůči barycentru Sluneční soustavy. Neprovedení barycentrické korekce může vést i k „objevu“ falešných změn period. Rozdíl mezi heliocentrickou a barycentrickou korekcí může dosáhnout až $6 \cdot 10^{-5}$ dne, což znamená ovlivnění 4. desetinného místa v juliánském datování. K publikovaným okamžikům minim nebo maxim jasnosti, která udávají čas přesněji, by měli autoři přesně popsat, jak k tomuto výsledku došli. Například výše zmíněná Kweeova-van Woerdenova metoda určení okamžiku extrému světelné křivky je typickým příkladem falešných výsledků s neodpovídající, nereálně malou chybou určení okamžiku extrému. Přípravovaná studie změn periody zákrytového systému AR Aur je z tohoto pohledu náš pilotní projekt, v němž veškeré časy pozorování vztahujeme k barycentru Sluneční soustavy a ukazujeme, jak metodicky správně s časovými značkami pracovat.

Časovým údajům je však třeba věnovat velkou pozornost i při přebírání dat z literatury, případně z přehlídkových projektů. Každý z projektů má jinak definovaný a jinak užívaný časový formát, což může vést k chybám. Například v sérii článků využívajících data z kamery OMC družice INTEGRAL byly chybně zpracovány časové údaje. Výsledkem byl větší rozptyl dat a systematický posun údajů až o několik minut. Proto jsem inicioval sepsání článku pro uživatele dat z tohoto projektu o používaných časových údajích (Zejda & Domingo, 2011). Problematice přesnosti časových značek pozorování se hodlám nadále věnovat.

3.3 Zpracování a analýza dat

Dnes a denně je publikována řada prací zabývajících se analýzou pozorovacích řad proměnných hvězd, případně hvězd v otevřených hvězdokupách. Jejich autoři využívají celou řadu klasických nástrojů jako například programy Period04 (Lenz & Breger, 2004) nebo Peranso (Vanmunster, 2012) při periodové analýze světelných křivek. Mohli bychom se spokojit s prošlapanými cestičkami a připojit další podobné práce. Ambice pracovníků Astronomického oddělení ÚTFA jsou však vyšší. Jsem členem týmu, v němž se řadu let zabýváme vývojem vlastních metod a aplikací nových postupů ve zpracování dat. Principy a základní aplikace jsou popsány například ve skriptech Mikulášek & Zejda (2013), konkrétní využití je dokumentováno v sérii článků. Některé v dalším textu zmíním podrobněji a jsou i zahrnuty v příloze. Filozofie našich metod spočívá v tom, že využíváme všechna dostupná měření, včetně dat i rozdílného typu, která pak zpracováváme simultánně. K podobnému názoru dospěli i přední odborníci na problematiku dvojhvězd například Wilson (2012), Van Hamme & Wilson (2007) nebo Hadrava (2004a), ale konzervatismus zatím vítězí, takže k masivnímu rozšíření tohoto přístupu ke zpracování dat dosud nedošlo. Úkolem naší skupiny, i mě samotného, je tedy vychovat novou generaci astronomů, která již bude tyto pokrokové metody běžně používat.

Analýzy změn periody zákrytových dvojhvězd nebo pulzujících proměnných hvězd běžně využívají okamžiků minim resp. maxim jasnosti, které jsou běžně publikovány.

Řadu takových souborů dat jsem také publikoval jako editor či autor, např. Zejda (2004), Zejda et al. (2006) a další. Existuje také několik databází, které všechna publikovaná data tohoto typu sbírají a uchovávají. Na přípravě vzniku jedné z dnes celosvětově používaných (<http://var.astro.cz/ocgate/>) jsem se také podílel. Změny periody jsou pak snadno patrné v tzv. $O - C$ diagramu, kde je zobrazen rozdíl mezi předpovězeným okamžikem extrému na světelné křivce C a odpovídajícím napozorovaným okamžikem O v závislosti na čase t nebo počtu cyklů, epoch E uběhlých od zvoleného okamžiku extrému M_0 . Z průběhu funkce $(O-C)(t)$ lze detekovat změny a případně i možné příčiny změn periody. Prostým proložením například metodou nejmenších čtverců je možné případné změny periody popsat i matematicky. Jenže takový postup je poplatný polovině minulého století. Při něm se autoři dopouští jednak nepatřičného zjednodušení, kdy váhy jednotlivým měřením přidělují jaksi ze zvyku bez jejich důkladné analýzy, a jednak v podstatě zahazují část informací obsažených v datech nepoužitých pro určení okamžiků minima nebo maxima jasnosti. I tato data ale mohou přinášet důležité informace. Síla, přínos a efektivnost našeho přístupu spočívá v tom, že využíváme veškerá dostupná data, kterým po provedení prvotní analýzy spočteme příslušné váhy dle použitého modelu, jímž data popíšeme. Ukazuje se, že je navíc výhodné nezatěžovat prvotní analýzu dat fyzikálními podmínkami a používat čistě matematický, fenomenologický model, kterým daný datový soubor popíšeme. Tento přístup pomáhá řešit nejrůznější problémy zpracování časových sérií dat a odhalit i případné skryté závislosti.

Takto lze řešit například i problém s korektním určováním okamžiku extrému na světelné křivce včetně nejistoty určení (např. Mikulášek et al., 2006). V tomto směru je ale zásadní naléhat na pozorovatele, aby jako výsledek své práce nepublikovali jen okamžik minima nebo maxima jasnosti, ale všechna jednotlivá měření! Okamžik extrému pak může být uveden jen jako doplňkový údaj nebo nemusí být uveden vůbec. Takto v principu již postupují přehlídkové projekty, které zveřejňují všechna fotometrická data. Okamžiky extrémů neurčují. Stejně by měli postupovat i jednotliví pozorovatelé a místo tabulky okamžiků minim a maxim jasnosti publikovat seznam pozorovaných hvězd, období pozorování a odkaz, kde je možné získat kompletní data. Je zřejmé, že prosazení takové revoluční změny si ještě vyžádá značné úsilí. V tomto směru jde ještě dále naše snaha archivovat i všechny originální snímky, které je pak možné kdykoli použít k opětovnému (kontrolnímu) zpracování individuálních pozorování.

Pokud studuji nějakou konkrétní proměnnou hvězdu, snažím se shromáždit všechna dostupná měření různého typu. To znamená, že budu soubor obsahující uspořádané n -tice čas, měřená veličina, váha, zdroj. U periodicky proměnných s periodou P si mohou vykreslit závislost měřené veličiny na tzv. fázi $\varphi(t) = \text{frac}[(t - M_0)/P]$, tedy fázovou křivku. Zásadním příspěvkem naší skupiny k teorii zpracování časových řad proměnných hvězd je zavedení tzv. „fázové funkce“ $\vartheta(t)$, která je jednoduše definována takto:

$$\vartheta = E + \varphi = \frac{t - M_0}{P}. \quad (3.1)$$

Obrovskou výhodou této funkce je to, že jde o monotónně rostoucí hladkou funkci procházející počátkem v okamžiku $t = M_0$, tedy $\vartheta(M_0) = 0$, přičemž platí

$$\frac{d\vartheta(t)}{dt} = \frac{1}{P(t)} = f(t), \quad (3.2)$$

kde f je okamžitá frekvence. Fázová funkce se pak uplatní například při tvorbě matematických modelů světelných křivek (Mikulášek et al., 2008b; Mikulášek et al., 2011). Vzhledem k tomu, že se u proměnných hvězd často mění i délka periody, je vhodné zavést ještě okamžitou periodu $P(E)$, která udává délku periody v epoše E . Konkrétní příklady, které poukazují na výhody a příklady využití lze nalézt ve skriptech Mikulášek & Zejda (2013).

Jako jeden z příkladů nesnadné analýzy změny periody lze uvést studium astrofyzikálně zajímavého systému TW Draconis. Soustavou jsem se začal zabývat už v polovině 80. let 20. století. Jde o poměrně jasnou zákrytovou proměnnou hvězdu. Za více než 150 let pozorování se orbitální perioda zákrytového páru změnila o více než tři dny. V době 2. světové války došlo ke skokové změně periody a po ní jsou zřejmé menší cyklické změny. Vzhledem k tomu, že soustava má hluboké (až 2 mag) a dlouho trvající (11,5 hod) zákryty, využili jsme v tomto případě jen okamžiky minim jasnosti. V období po zmíněné velké změně periody (1942 – 2007) jsme průběh změn popsali pomocí fenomenologického modelu

$$\begin{aligned} \text{Pri.Min.} = & M_0 + \bar{P} E' + B_1 \left[1 + \dot{\Theta}_0 \frac{E' - E_{01}}{\Theta_0} \right]^2 \cos \left[\frac{2\pi}{\dot{\Theta}_0} \ln \left(1 + \dot{\Theta}_0 \frac{E' - E_{01}}{\Theta_0} \right) \right] \\ & + B_2 \cos \left[\frac{2\pi (E' - E_{02})}{P_2} \right] + B_2 b_2 \left\{ \sin \left[\frac{2\pi (E' - E_{02})}{P_2} \right] - \frac{1}{2} \sin \left[\frac{4\pi (E' - E_{02})}{P_2} \right] \right\}, \end{aligned} \quad (3.3)$$

kde $E' = E - \bar{E}$ a který popisuje jak hlavní „tlumené“ oscilace systému (index 1), tak i drobné periodické změny působené zřejmě přítomností třetího tělesa (index 2). Třetí těleso by mělo zákrytový pár obíhat s periodou 6,5 roku. Hlavní oscilace jsou pravděpodobně důsledkem magnetické aktivity a Applegateova mechanismu (Applegate, 1992). Podrobnosti ke studiu této soustavy lze nalézt v Zejda et al. (2008, 2010) a v příloze. Nicméně poslední pozorování ukazují, že v soustavě došlo k další výrazné změně periody. Monitorování chování této soustavy pokračuje.

Na druhou stranu, pokud má sledovaná soustava nevýrazná minima jasnosti a máme k dispozici i jednotlivá měření, je skutečně mnohem výhodnější využít pro studium změn periody všechna dostupná fotometrická i jiná měření. Příkladem jsou práce o zákrytové soustavě IM Mon v OB asociaci Ori OB1a (Bakis et al., 2011) nebo takřka dotykovém systému BS Vul (Zhu, Zejda et al., 2012), zařazené v příloze. V druhém případě už byl použit fenomenologický model, který je obecný a lze jej aplikovat na většinu světelných křivek zákrytových dvojhvězd

$$\begin{aligned} F_{jb}(t) \simeq & \bar{m}_{jb} + \sum_{i=1}^2 a_{ib} \left\{ 1 - \left[1 - \exp \left(-\frac{\varphi_i^2}{d_i^2} \right) \right]^C \right\} + a_3 \cos(4\pi \vartheta) \\ & + a_4 \exp \left[-\frac{(\varphi_1 - \varphi_s)^2}{d_4^2} \right], \end{aligned} \quad (3.4)$$

přičemž $\varphi_1(t) = \vartheta(t) - \text{round}(\vartheta)$ a $\varphi_2(t) = \vartheta(t) - \text{floor}(\vartheta) - 0.5$. Koeficienty a_1, a_2 popisují hloubky primárního, resp. sekundárního minima v barvách $b = B, V, R, I$, \bar{m}_{jb} je střední hvězdná velikost mimo zákryt pro j -tou sadu dat (například j -tého pozorovatele). Šířky minim jsou popsány parametry d_1 , resp. d_2 a tvar světelné křivky určuje parametr C .

Světelné změny vyvolané příliš malou vzájemnou vzdáleností složek (proximity effect) lze popsat jednoduchou kosinusovou dvojnou s amplitudou a_3 . Poslední člen ve vztahu (3.4) popisuje změny vyvolané přítomností skvrny na povrchu sekundární složky. Jestliže známe fázovou funkci $\vartheta(t)$, můžeme spočítat fázi pro libovolný čas. Předpovědi okamžiků primárních minim lze získat řešením inverzní funkce $\theta(\vartheta)$ k funkci fázové. V případě BS Vul byla změna periody \dot{P} velmi malá, takže bylo možné nahradit funkce $\vartheta(t)$ a $\theta(\vartheta)$ jejich Maclaurinovým rozvojem

$$\vartheta(t) = \frac{1}{\dot{P}} \ln \left(1 + \dot{P} \frac{t - M_0}{P_0} \right) \doteq \frac{t - M_0}{P_0} - \frac{\dot{P}}{2} \left(\frac{t - M_0}{P_0} \right)^2 + \frac{\dot{P}^2}{3} \left(\frac{t - M_0}{P_0} \right)^3 - \dots; \quad (3.5)$$

$$\theta(\vartheta) = M_0 + \frac{P_0}{\dot{P}} \left(e^{\dot{P}\vartheta} - 1 \right) \doteq M_0 + P_0 \vartheta + \frac{1}{2!} P_0 \dot{P} \vartheta^2 + \frac{1}{3!} P_0 \dot{P}^2 \vartheta^3 + \dots \quad (3.6)$$

Všechny volné parametry včetně M_0 , P_0 a \dot{P} byly získány jako výsledek řešení standardní váhované nelineární metody nejmenších čtverců, přičemž váhy jednotlivých měření byly uvažovány jako převrácená hodnota čtverce standardní odchylky σ příslušné podmnožiny pozorovacích dat vzhledem ke zvolenému modelu. Řešení je pak dílem několika desítek iterací. Konkrétní hodnoty lze nalézt v příloženém článku. Předpovědi okamžiků primárních minim lze pak počítat podle vztahu:

$$\text{JD}_{\text{hel,I}}(E) = M_0 + P_0 \times E + \frac{1}{2} P_0 \dot{P} \times E^2. \quad (3.7)$$

V právě popsaném postupu jsme nepoužili žádné okamžiky minim jasnosti, ani hodnoty $O - C$ nebo klasický $O - C$ diagram. Místo klasického $O - C$ diagramu postačí pro vizualizaci problému prezentovat hodnoty $O - C$ za jednotlivé sezóny, případně pro jednotlivé pozorovatele nebo skupiny pozorovatelů, druhy pozorování atd. Využitím rozdílů pozorovaných hodnot a modelové funkce $\Delta y_i = m_i - F(t_i)$ v čase t a fázových derivací modelové funkce v okamžicích individuálních pozorování t_i dostaneme individuální hodnoty fázových posunů vyjádřené ve dnech v podobě $O - C$, přičemž pro každé datum pozorování je $(O - C)_j$ je použita váha W_j

$$\text{O-C}_j = -P(t_j) \Delta y_j \left(\frac{\partial F}{\partial \vartheta} \right)^{-1}; \quad W_j = \left(\frac{\partial F}{\partial \vartheta} \right)^2 w_j. \quad (3.8)$$

Průměrná hodnota fázového posunu pro danou skupinu měření $\overline{\text{O-C}}_k$ je pak dána jako

$$\overline{\text{O-C}}_k = \frac{\sum_{j=1}^{n_k} \text{O-C}_j W_j}{\sum_{j=1}^{n_k} W_j}. \quad (3.9)$$

Ve vývoji, testování a aplikaci nových nástrojů pro studium proměnných hvězd samozřejmě pokračujeme. Nové postupy se objevují nejen v odborných publikacích, ale snažíme se je také bez odkladu předávat studentům. Příkladem je i nová verze učebních textů *Proměnné hvězdy* (Mikulášek & Zejda, 2013).

4 Vlastní studium proměnných hvězd, otevřených hvězdokup a OB asociací

Můj profesní zájem byl nejprve orientován na zákrytové dvojhvězdy. S rozšířením CCD detektorů jsem si ale také uvědomil jejich obrovský potenciál ve výzkumu hvězdokup, jak už jsem uvedl v úvodu. Na jednom snímku je možné zachytit najednou desítky až desítky tisíc hvězd dle parametrů dalekohledu a CCD kamery a všechny zachycené objekty lze studovat najednou. Přestože přehlídkových projektů už existuje celá řada, jejich využití pro výzkum otevřených hvězdokup je zcela neodpovídající (viz kapitola 3.1). Samostatných projektů věnovaných výhradně otevřeným hvězdokupám je také poskrovnu. Jmenujme například projekt WIYN Open Cluster Survey (University of Wisconsin, Indiana University, Yale University and National Optical Astronomy Observatories), jehož výsledkem je zatím série článků zaměřených na několik desítek severních hvězdokup, projekt SOCS (Southern Open Cluster Study) zahrnující podobně jižní otevřené hvězdokupy nebo projekt EVRENA zkoumající mladé otevřené hvězdokupy a shluky hmotných zářivých hvězd spektrálních typů O a B, tzv. OB asociace prostřednictvím zákrytových dvojhvězd. Naopak starých otevřeným hvězdokupám se věnuje projekt BOCCE (The Bologna Open Clusters Chemical Evolution)¹ (Ahumada et al., 2011). Výše uvedené projekty blíže prozkoumaly několik desítek otevřených hvězdokup. Nejkomplexnější databáze informací o otevřených hvězdokupách WEBDA² disponuje údaji zhruba k jedné tisícovce otevřených hvězdokup a připomínám, že katalog DAML02 (Dias et al., 2002) uvádí přes dva tisíce těchto objektů. Zatím jsou tedy naše znalosti o otevřených hvězdokupách postaveny jen na prozkoumání malé části těchto objektů. Proto jsem inicioval vznik prvního katalogu proměnných hvězd v otevřených hvězdokupách a jejich okolí (Zejda et al., 2012a, viz příloha), který je nyní dostupný i online v celosvětovém Centru astronomických dat CDS ve Štrasburku (Zejda et al., 2012b). Domníváme se, že katalog může být impulsem pro intenzivnější pozorování a studium otevřených hvězdokup a proměnných hvězd. Bohužel zatím nebylo možné pro nedostatek vhodných dat určit pro všechny proměnné hvězdy v katalogu, zda a s jakou pravděpodobností jsou členy příslušné otevřené hvězdokupy. Součástí katalogu je i nové určení vlastního pohybu pro 879 otevřených hvězdokup.

Nedostatečné zmapování otevřených hvězdokup a určení hvězdných členů jednotlivých hvězdokup, případně pravděpodobnosti členství jsou dnes hlavním nedostatkem v této oblasti astronomie a astrofyziky. Problémem zde není absence vhodné metody, ale nedostatek vhodných dat. K tomu, abychom s vysokou statistickou pravděpodobností rozhodli, zda hvězda je nebo není členem nějaké hvězdokupy, potřebujeme homogenní fotometrická, spektroskopická a kinematická data (např. Javakhishvili et al., 2006). Kumulativní metoda, kterou tam autoři uvádějí je výhodná z hlediska algoritmizace a snadné aplikace na pravoúhlé nebo rovňkové souřadnice dvou epoch, vlastní pohyby, radiální rychlosti nebo přímo fotometrická data. Bohužel chybí data. Například pro vlastní pohyby můžeme nyní použít kromě katalogu PPMXL i nový katalog UCAC4. Ten ale obsahuje údaje jen pro hvězdy zhruba mezi 8 až 16 mag, někdy jen do 14 mag.

¹<http://www.bo.astro.it/~angela/bocce.html>

²<http://webda.physics.muni.cz/>

Pro slabší objekty lze použít PPMXL, ale je často nutné je doplnit údaji z jiných zdrojů, abychom získali delší časovou základnu a ani pak není pokrytí daty dostatečné. Globálně tedy problém zatím řešit nelze. Nicméně z vícebarevné fotometrie lze konstruovat pro jednotlivé hvězdokupy barevné diagramy (závislost hvězdné velikosti na barevném indexu) a na základě izochron alespoň vyloučit hvězdy, které do hvězdokupy nepatří. Obdobně diagramy barva-barva, například $(B - V)/(U - B)$ umožňují vyloučit z příslušnosti ke hvězdokupě hvězdy odlišného zčervenání. Takové diagramy pro konkrétní otevřené hvězdokupy lze získat i pozorování na observatoři Masarykovy univerzity, případně dalekohledech spolupracujících institucí v rámci studentských prací. Určení členů, resp. vyloučení nečlenů zejména u vzdálených hvězdokup a zásadní upgrade katalogu a databáze WEBDA je tedy jedním ze zásadních úkolů, který hodlám s kolegy a se studenty v následujících letech řešit.

Data, která takto získáme z vlastních pozorování nebo z otevřených zdrojů, jsou přitom nezbytná pro zodpovězení řady zásadních otázek, případně vylepšení stávajících znalostí o otevřených hvězdokupách. Jedná se zejména o oblasti:

- Rozdělení vzniku hvězd v čase v Galaxii a určení počáteční a dnešní funkce hmoty.
- Význam metalicity při zrodu a vývoji hvězd, výzkum gradientu metalicity v Galaxii.
- Korelace mezi věkem hvězd a jejich polohou v Galaxii.
- Přesnější určení závislosti perioda–zářivý výkon pro pulzující proměnné hvězdy, které jsou standardními svíčkami na kosmologických škálách.
- Statistická analýza astrofyzikálních procesů pro různé skupiny hvězd jako chemicky pekuliární hvězdy, hvězdy spektrálního typu B s emisními čarami a další.
- Detailní analýza kritérií členství hvězd ve jednotlivých otevřených hvězdokupách.
- Vývoj gravitačně vázaných seskupení hvězd.
- Struktura a dynamika Galaxie.

4.1 Proměnné hvězdy

Přestože můj hlavní zájem se nyní soustřeďuje na výzkum proměnných hvězd v otevřených hvězdokupách a případně OB asociacích, věnuji se i studiu zajímavých proměnných hvězd, které nejsou s hvězdokupami nijak svázané. Jedná se zejména o tři skupiny proměnných hvězd - zákrytové dvojhvězdy, pulzující proměnné hvězdy typu RR Lyrae a chemicky pekuliární hvězdy.

Příprava studia konkrétní soustavy probíhá trochu odlišně od většiny kolegů. Nelze se spokojit jen s daty, které předkládá virtuální observatoř, archivy přehlídkových projektů nebo o nichž referují moderní bibliografické přehledy. Prohledávám i lokální astronomická periodika staršího data z míst, kde se studiu vybraných typů hvězd v minulosti věnovali. U moderních pozorování, pokud nejsou k dispozici jednotlivá měření, kontaktuji autory okamžiků minim nebo maxim jasnosti s žádostí o poskytnutí dat a v případě potřeby provádím vlastní pozorování, případně iniciuji pozorovací kampaň více pozorovatelů, tak aby bylo vzhledem k různým pozorovacím stanovištím, časovým posunům a pozorovacím podmínkám dosaženo, co nejrychlejší pokrytí fázové křivky dostatkem kvalitních dat. Jde o časově náročnou činnost, ale výsledkem jsou studie využívající všechna nebo alespoň většinu dat, která jsou k danému objektu k dispozici.

Další základní zpracování dat se řídí víceméně standardními postupy. Pro zpracování všech shromážděných CCD snímků využívám program C-Munipack (Motl, 2013) pro aperturní fotometrii založený na procedurách DAOPHOT. V naprosté většině případů jde u CCD pozorování bohužel jen o tzv. diferenciální fotometrii, což se může projevit tím, že výsledná fotometrická data jsou poznamenána různými trendy. Tyto trendy, doložené například v připravované práci o AR Aurigae, ukazují na to, že je třeba vyvinout sofistikovanější metody zpracování časových sekvencí a zásadně provádět standardizaci těchto měření, jak je to běžné u fotoelektrické fotometrie. Pozorování fotoelektrickým fotometrem jsou zpracována převážně pomocí programu HEC22 (Harmanec & Horn, 2002). Ke zpracování spektroskopických pozorování používám zejména programové nástroje IRAF³, SPEFO (Horn et al., 1996) a Splat⁴. Po tomto základním zpracování surových dat následuje jejich analýza a využití našich nově vyvíjených metod, velmi stručně představených v předchozí kapitole.

4.1.1 Zákrytové dvojhvězdy

Zákrytové dvojhvězdy mají v astrofyzice zcela zásadní a nezastupitelnou roli. Už za studentských let mě uchvátilo, že je možné z relativně jednoduchých fotometrických pozorování těchto vzdálených světů určovat poměry velikostí složek, jejich svítivosti, sklon oběžné trajektorie. Od roku 1995, kdy jsem začal pozorovat proměnné hvězdy a zejména zákrytové dvojhvězdy pomocí CCD techniky nebo fotoelektrického fotometru, jsem pozoroval přes 1100 zákrytových soustav. Zpočátku bylo cílem monitorování velkého počtu zanedbaných, dlouho nesledovaných systémů a následné jednoduché opravy tzv. světelných elementů, tedy základních okamžiků minim jasnosti a period. Výsledky těchto pozorování byly publikovány například v pracích Zejda et al. (2006), Zejda (2004) a dalších. Každoročně jsem připravoval i dle výsledků z publikací aktualizovaný katalog těchto elementů pro zhruba 1500 tisíce hvězd. Díky této práci jsem získal přehled o zajímavých soustavách, na které bylo vhodné se dále soustředit, ale také si uvědomil, že je nutné tuto práci přenechat přehlídkovým projektům a věnovat se hlubšímu studiu jednotlivých soustav také za pomoci spektroskopie. Současným zpracováním fotometrických dat s křivkou radiálních rychlostí složek systému mohou určovat parametry hvězd v těchto soustavách v absolutních hodnotách. Astrofyzika dosud nenašla jiný, stejně spolehlivý a přesný způsob, jak určovat zejména hmotnosti hvězd spolu s jejich rozměry, efektivními teplotami a zářivými výkony. Přínos zákrytových dvojhvězd je ale mnohem rozsáhlejší. Prostřednictvím zákrytů a přesným proměřením poklesu jasnosti lze studovat okrajové ztemnění a gravitační zjasnění pro různé spektrální typy hvězd a ověřovat tak teorii hvězdných atmosfér. Dlouhodobé sledování dvojhvězd, v nichž složky obíhají po excentrických trajektoriích, a studium jejich apsidálního pohybu odhalí i údaje o nitru hvězd. V těsných dvojhvězdách nelze považovat složky systému za hmotné body, ale je třeba brát v úvahu i deformace složek v důsledku rotace nebo slapových sil. Pak lze ale vyjádřit závislost konstant interní struktury na pozorovaných veličinách (Hejlesen,

³<http://iraf.noao.edu/>

⁴<http://star-www.dur.ac.uk/~pdraper/splat/splat.html>

1987), např. na stáčení přímky apsid, délce periastra ω

$$\omega = 2\pi \sum_{i=1}^2 \sum_{j=2}^{\infty} c_{ij} k_{ij}, \quad (4.1)$$

kde index i rozlišuje složky dvojhvězdy, j je harmonický řád. Koeficienty c_{ij} jsou známé funkce pozorovaných hvězdných a orbitálních parametrů (Kopal, 1978). Obecně jsou členy vyššího řádu než 2 velmi malé a vztah 4.1 tak dává empirické váhované střední hodnoty k_2 , které lze srovnávat s teoretickými koeficienty. U excentrických soustav není možné získat individuální koeficienty interní struktury k_2 pro jednotlivé složky, ale pouze střední hodnotu

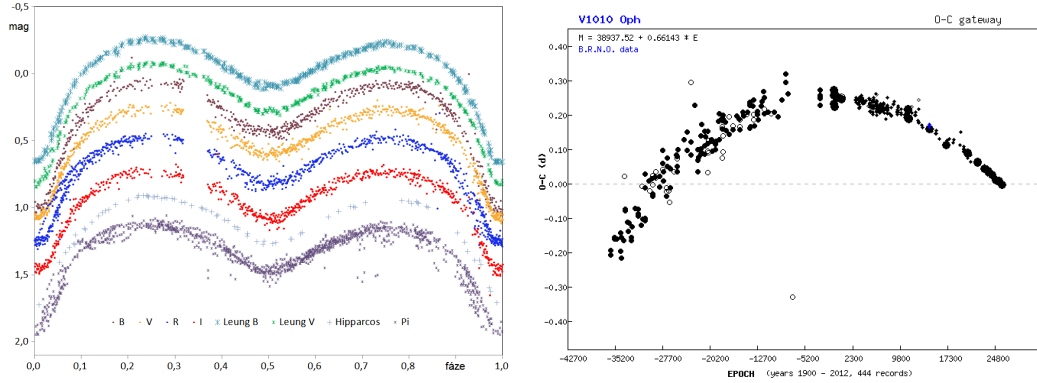
$$\bar{k}_{2,\text{obs}} = \frac{1}{c_{21} + c_{22}} \frac{P_a}{U} = \frac{1}{c_{21} + c_{22}} \frac{\dot{\omega}}{360^\circ}, \quad (4.2)$$

kde U je perioda apsidálního pohybu, P_a anomalistická perioda a $\dot{\omega}$ změna délky periastra (Wolf & Šarounová, 1995). Koeficienty interní struktury jsme pak určili pro řadu soustav, například V539 Ara, GG Lup, V526 Sgr, AO Vel (Wolf & Zejda, 2005), GL Car, QX Car, NO Pup, V366 Pup (Wolf et al., 2008), V785 Cas, V821 Cas, V796 Cyg, V398 Lac, V871 Per (Wolf et al., 2013) a řadu dalších. Všechny dosud získané hodnoty odpovídají současným představám o stavbě hvězd. Ve výše uvedených studiích hvězd s apsidálním pohybem jsme se věnovali i další oblasti. Obecná teorie relativity vysvětlila stáčení perihelia Merkuru, ale podobný efekt samozřejmě platí i v těsných dvojhvězdách. Relativistický příspěvek ke stáčení periastra $\dot{\omega}_{rel}$ lze spočítat dle

$$\dot{\omega}_{rel} = 0.000545 \frac{1}{1 - e^2} \left(\frac{M_1 + M_2}{P} \right)^{2/3}, \quad (4.3)$$

kde M_1, M_2 jsou hmotnosti složek a e excentricita trajektorie (Gimenez, 1985). Všechny námi určené hodnoty relativistického příspěvku pro studované soustavy se pohybují v jednotkách procent a jsou v souladu s obecnou teorií relativity. Je ale třeba poznamenat, že námi studované soustavy nepatří mezi extrémní dvojhvězdy jako soustavy kataklyzmické dvojhvězdy nebo soustavy s černou dírou. Ale i na tomto příkladu je vidět, že dvojhvězdy mohou přispívat i poznání v oblasti relativistické fyziky a kosmologie. Nesmírně zajímavé bude porovnat výsledky studia těchto hvězd v naší Galaxii se systémy v sousedních galaxiích Malém a Velkém Magellanově mračnu. Pro tyto účely získávám v rámci projektu INGO LG12001, kde jsem spoluřešitelem, nová fotometrická měření pomocí dalekohledu Dk154 na observatoři ESO na La Silla, Chile.

Jednou z dalších oblastí, kde těsné dvojhvězdy slouží jako obrovské kosmické laboratoře, jsou fyzika plazmatu a studium magnetického pole. Nejmarkantnější jsou tyto projevy u kataklyzmických a rentgenovských dvojhvězd, ale objevují se prakticky u všech těsných soustav, zejména systému typu Algol s přetokem hmoty. Přestože takových soustav uvádí katalog VSX několik tisíc, přesné parametry jsou známy jen pro desítky až stovky z nich. Jednou z pozoruhodných algolid, jejímuž studiu se s přestávkami věnuji již 30 let je objekt TW Draconis. O komplikovaných změnách periody soustavy jsem se zmínil v předchozí kapitole. Ty jsou mimo jiné vysvětlovány Appelgatovým mechanismem (Applegate, 1992), později Lanza et al. (1998) či Rüdiger et al. (2002), kdy dochází vlivem magnetického pole ke změnám v diferenciální rotaci, mírné deformaci tvaru hvězd



Obrázek 4.1: Světelná křivka takřka dotykové zákrytové dvojhvězdy V1010 Oph (ukázka z připravované studie). Pozorování *BVRI* byla provedena autorem s pomocí kamery G2-402 na dalekohledu o průměru 4 cm(!), zatímco Leungova pozorování (1974) byla získána fotoelektrickým fotometrem na dalekohledu desetkrát většího průměru. Dále jsou uvedena měření z družice Hipparcos a fotometrické přehlídky Pi of the Sky. Fáze pozorování byla spočtena podle světelných elementů platných pro střed epochy pozorovacího intervalu dané série dat. Pro lepší zobrazení jsou křivky vůči sobě ve hvězdných velikostech posunuty. Vpravo je uveden graf O-C pro pozorování z let 1900-2012 s přímo ukázkovým parabolickým průběhem svědčícím o přenosu hmoty mezi složkami.

a tím následně ke přerozdělení gravitačního kvadrupólového momentu soustavy, které se projeví střídavými změnami periody. Změnu periody ΔP v závislosti na kvadrupólovém momentu ΔQ lze vyjádřit jako

$$\frac{\Delta P}{P} = -9 \left(\frac{R_2}{a} \right)^2 \frac{\Delta Q}{M_2 R_2^2}, \quad (4.4)$$

kde M_2 a R_2 jsou hmotnost a poloměr sekundární složky, a je vzdálenost složek dvojhvězdy (Applegate & Patterson, 1987). V případě TW Dra jsem spočítal hodnoty ΔQ pro šest intervalů s dobrým pokrytím změn periody daty (Zejda et al., 2008). Získané hodnoty odpovídají typickým hodnotám kvadrupólového momentu pro algolidy, například u XX Cep (Lee et al., 2007), nebo hvězdy typu RS CVn (Lanza, 2006). Pro jednoznačné potvrzení, zda se opravdu jedná o popsáný mechanismus, by bylo zapotřebí ověřit tři podmínky (Applegate, 1992):

- světelná křivka a graf O–C se mění v cyklech stejné délky,
- extrémy ve změnách jasnosti nastávají ve stejnou dobu jako extrémy v O–C diagramu,
- hvězda by měla být nejvíce modrá, když je nejjasnější.

Bohužel, nejen v případě TW Dra, ale zcela obecně není pro takové ověření dostatek přesných fotometrických dat v dlouhém časovém úseku.

Na jiné vysvětlení podobných střídavých změn periody působené magnetickým polem poukázal Hall (1989). Ukázal, že pokud je sekundární složka pozdnějšího spektrálního typu než F5, je možné tyto změny periody interpretovat jako důkaz přítomnosti proměnné magnetické aktivity hvězd s konvektivní vnější obálkou. Tuto závislost později potvrdili

Šimon (1999) a Zavala et al. (2002). Podobné hvězdy pozdního spektrálního typu jsou členy dvojhvězd s výraznou chromosférickou aktivitou typu RS CVn. Jednou z hvězd tohoto typu, které se věnujeme dlouhodobě je V361 Lyr, kde se v důsledku skvrnové aktivity na obou složkách mění tvar světelné křivky i na krátkých časových škálách. Detailní studii proměnnosti připravujeme.

Velkou aktivitu v chromosférách představují také systémy s nízkou hmotností s plně konvektními složkami. Parametry odvozené z pozorování se zatím rozcházejí s teoretickými hodnotami z modelů hvězdného vývoje. Zatímco pozorovaný celkový zářivý výkon s teorií souhlasí, teoretické rozměry složek jsou o 10 % menší a efektivní teploty o 5 % větší než pozorujeme. Možným vysvětlením je působení magnetického pole, které brání přenosu energie konvekcí. Dosud známé dvojhvězdy s nízkou hmotností mají orbitální periody kratší než 10 dní a tudíž i velmi krátké rotační periody, což znamená velmi silný dynamový efekt a vysokou úroveň magnetické aktivity. Ta se projevuje mimo jiné i tím, že tyto soustavy jsou zpravidla velmi silným rentgenovským zdrojem. Tato hypotéza je ale schopna dobře vysvětlit odchylky jen pro hvězdy o hmotnosti větší než $0,6 M_{\odot}$ (Chabrier et al., 2007). Druhá hypotéza interpretuje rozdíly mezi pozorováním a teorií jako důsledek masivního pokrytí přibližně poloviny povrchu hvězd skvrnami s teplotou nižší o 15 % (nebo 500 K) než okolí (Chabrier et al., 2007; Ribas et al., 2008). K řešení problémů bychom rádi přispěli. Už řadu let monitorujeme chování několika vybraných zákrytových soustav nízké hmotnosti jako např. NSVS 01653195 (Wolf, Zejda et al., 2010), NSVS 01031772 (Wolf et al., 2012), NSVS 14256825, HS2231+2441 a další a na jejich studium jsem vypsál i několik témat studentských prací.

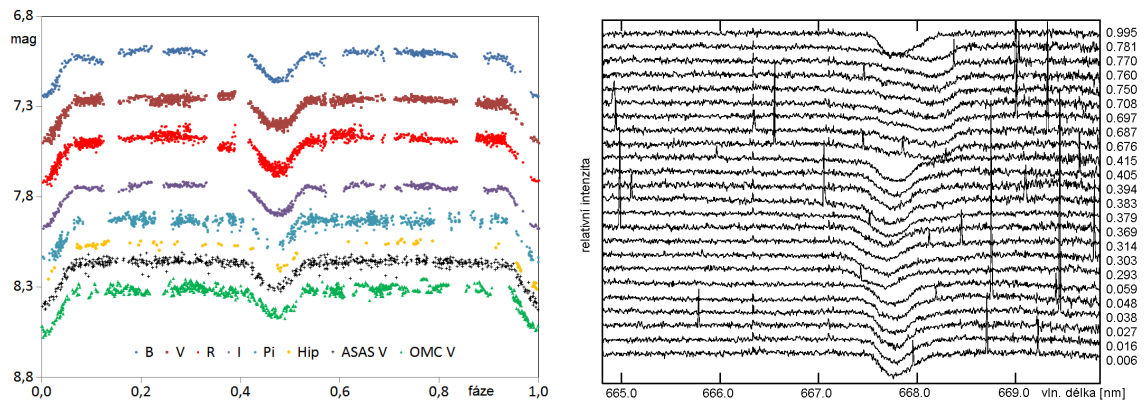
Ukazuje se, že problém nesouladu teoretických představ a výsledků pozorování se týká všech hvězd nízké hmotnosti (nejen těch ve dvojhvězdách) a je zvláště kritický při studiu otevřených hvězdokup nebo hvězd v oblastech tvorby hvězd, kde mohou hvězdy nízké hmotnosti vykazovat zvláště vysokou úroveň magnetické aktivity. Mezi hvězdnou aktivitou a věkem hvězd totiž existuje jasná souvislost – mladší hvězdy rotují rychleji než ty starší a generují tak intenzivnější magnetické pole a aktivity s ním spojené (Hartmann et al., 1984). Hvězdy spektrálního typu M (pod $0,6 M_{\odot}$) ale zůstávají aktivní po dlouhou dobu (miliardu let i více) a tak rozdíl mezi pozorováními a modely může ovlivnit náš pohled na celou mladou hvězdnou populaci.

Významnou skupinu zákrytových dvojhvězd tvoří soustavy typu W UMa. Patří mezi často sledované soustavy, ale přesto je za maskou jejich relativně jednoduchých světelných křivek skryto velké tajemství. Dosud totiž není známo, jakým způsobem tyto soustavy vznikají. Jejich složky jsou sobě tak blízko, že se prakticky dotýkají a mají společnou atmosférickou obálku. Bývají označovány jako dotykové (v angl. contact, resp. overcontact) systémy. Jednou z posledních studií na téma původu dvou podtypů hvězd typu W UMa je práce Yildiz & Doğan (2013). Problém ale stále není vyřešen.

Zatímco u dotykových soustav typu W UMa doslova přepřlňují složky své Rocheovské laloky tak, že hmota uniká do okolního prostoru a podílí se na tvorbě společné obálky, existuje skupina takřka dotykových (v angl. near contact) systémů, kde obě složky své Rocheovské laloky vyplnily téměř beze zbytku. Jakmile dojde k vyplnění laloků, nastartuje se přetok hmoty, který vede ke vzniku detekovatelné horké skvrny na příjenci a následně změně orbitální periody. Systém se pak může vyvinout v oddělenou nebo polodotykovou soustavu. Podle teorie tepelných relaxačních oscilací (TRO) je ale možné,

že těsná dotyková soustava po nějaký čas osciluje mezi kontaktní a polodotykovou fází (Flannery, 1976; Lucy, 1976; Lucy & Wilson, 1979). Takřka dotykové soustavy jsou tak z vývojového hlediska důležitým mezičlánkem a jejich bližší poznání je velmi důležité pro pochopení vývoje těsných dvojhvězd. Jsou ale poměrně vzácné, protože toto vývojové období netrvá příliš dlouho. Na studium těchto systémů jsme se zaměřili spolu s čínskými kolegy. Podařilo se nám shromáždit unikátní pozorovací materiál, které postupně analyzujeme. Ukázali jsme, že DD Com je dle teorie TRO v expanzní fázi, kdy se vyvíjí z kontaktní do takřka dotykové fáze. Takové systémy jsou známy zatím pouze čtyři (Zhu et al., 2010). Naopak systém BS Vul se právě vyvíjí směrem ke kontaktní fázi (Zhu, Zejda et al., 2012). Obě zmíněné práce jsou uvedeny v příloze. V přípravě jsou studie dalších soustav (RW Com, PW Her, UX Com a další).

Z výše uvedeného je zřejmé, že těsné dvojhvězdy a zejména ty zákrytové hrají zcela klíčovou roli pro celou astrofyziku. Poskytují údaje nezbytné pro testování a verifikaci našich představ o vzniku, vývoji a zániku hvězd a hvězdných soustav. Jejich využití jako bohatých zdrojů informací při studiu otevřených hvězdokup a asociací se tedy přímo nabízí a bylo by velkou chybou této šance nevyužít.



Obrázek 4.2: Světelné křivky a část spektrogramů hvězdy FM CMA, pravděpodobného člena asociace CMA OB1 z připravované studie. Fotometrická data vlevo zobrazují světelné křivky *BVRI* spolupracujícího amatérského pozorovatele S. N. de Villierse z Jihoafrického republiky, data z pozemských přehlídkových projektů Pi of the sky a ASAS a družicová pozorování – Hipparcos a OMC Integral. Pro dobré zobrazení jsou křivky vůči sobě ve hvězdných velikostech posunuty. Spektroskopická pozorování byla pořizena na turecké observatoři TUBITAK v letech 2009-2011.

První přehledy známých zákrytových dvojhvězd v otevřených hvězdokupách byly sestaveny v 80. letech minulého století (Popova & Kraicheva, 1984; Clausen & Giménez, 1987). Detailní studii zákrytových fenoménů v jedné otevřené hvězdokupě provedli Miller et al. (2008) i s ohledem na výskyt exoplanet a objevili přes 100 zákrytových dvojhvězd. Většinou je ale přítomnost zákrytových dvojhvězd jen zmíněna. Jen málokdy je využita k detailnímu studiu hvězdokupy. Výjimkou je projekt turecký EVRENA, kterého se od počátku účastní (Bakış et al., 2012). Jeho cílem je sestavení katalogu zákrytových dvojhvězd, členů mladých otevřených hvězdokup a OB asociací a studium vlastností těchto uskupení prostřednictvím přesného určení parametrů jejich dvojhvězd. V připravovaném katalogu jsou téměř dvě stovky systémů, pro něž postupně získáváme

fotometrická i spektroskopická data. Dosud byla publikována studie IM Mon (Bakis et al., 2011) uvedená také v příloze a odeslána k publikaci studie tří soustav V443 Cyg, V456 Cyg a V2107 Cyg. Dále se připravují analýzy DV Cam, FM CMa, GU CMa, MQ Cen, MP Cen, FV Sco a další. Výstupem projektu jsou přesnější parametry zákrytových soustav a mateřských OB asociací a otevřených hvězdokup a jejich katalog, první svého druhu. (Bukowiecki et al., 2012) zveřejnili nedávno studii závislosti orbitální periody a věku pro zákrytové dvojhvězdy ve hvězdokupách. Bohužel, přestože zahrnuli do studie veškeré ověřené dvojhvězdné systémy ve hvězdokupách, je zcela zřetelný nedostatek dat pro mladé soustavy typu W UMa. Doufáme, že projekt EVRENA přispěje k zacelení této mezery.

4.1.2 Hvězdy typu RR Lyrae

Pulzující proměnné hvězdy typu RR Lyrae jsou známy už od konce 19. století, ale jejich výzkum ve 20. století probíhal v určitých vlnách. Nyní na počátku 21. století se zájem o tyto objekty vrací. A to je jistě dobře. Hvězdy typu RR Lyrae totiž slouží jako jisté indikátory chemických a dynamických vlastností starší hvězdné populace v naší i sousedních galaxiích. Jejich fotometrická data lze využít ke stanovení jejich vzdálenosti, odhadům metalicity či testům hvězdného vývoje a pulzací pro hvězdy sluneční a nižší hmotnosti. Navíc je tu fenomén sekulárních změn světelné křivky, tzv. Blažkův jev, který ani po sto letech od objevu nebyl dosud objasněn.

Na zvýšený zájem o tyto hvězdy jsem reagoval vypsáním několika témat studentských prací. V současné době vedu jako školitel M. Skarky doktorskou práci *Charakteristiky pulzujících hvězd typu RR Lyrae*. Doktorand navázal na svou předchozí práci o výskytu Blažkova jevu u tohoto typu pulzujících proměnných hvězd, jehož příčina není ani století od objevu jednoznačně vysvětlena. Rozborem dat z přehlídky ASAS a SuperWASP vybral takové hvězdy, u nichž se Blažkův jev vyskytuje a sestavil jejich první katalog⁵ (Skarka, 2013). U vybraných hvězd pak provádí vlastní pozorování, která spolu s daty z přehlídkových projektů poskytují dobrý obraz o chování hvězdy. Tak se podařilo například detailně popsat Blažkův jev u hvězdy TV Boo (Skarka & Zejda, 2013). Unikátnost této studie spočívá v tom, že hlavní pulzační křivka je modulována dvěma postupnými vlnami, z nichž ta kratší je jednou z nejkratších zjištěných Blažkových period u hvězdy typu RRc. V dalším kroku se pokusíme zjistit, zda existuje závislost mezi parametry hvězdy s Blažkovým jevem a bez něj.

RR Lyrae hvězdy jsou typické pro kulové hvězdokupy, ale mohli bychom je najít i ve starých otevřených hvězdokupách. V katalogu proměnných hvězd v otevřených hvězdokupách (Zejda et al., 2012a,b) se jich v oblasti otevřených hvězdokup nachází 2081. I kdybychom předpokládali, že jen 10 % hvězd z našeho výběru dle souřadnic je opravdu členem nějaké otevřené hvězdokupy, zůstává stále významný počet členů. V nejbližším období se pokusíme shromáždit pro uvedené dva tisíce hvězd dostatek informací, abychom mohli jednotlivě rozhodnout, zda je ta která hvězda členem příslušné hvězdokupy či nikoli a určit z fotometrických dat její vzdálenost a metalicitu. V případě potvrzeného členství porovnáme parametry hvězdy typu RR Lyrae s parametry hvězdokupy zjištěnými jinými postupy, například u vzdálenosti získané statistickým fitováním

⁵<http://physics.muni.cz/~blasgalf/>

izochron. Systematické posuny nebo možné korelace s jinými parametry jako metalicita nebo zčervenání mohou být snadno detekovány a odstraněny. Takový postup povede k obecnému zlepšení a zpřesnění metody fitování izochron.

Další oblast mého zájmu se soustřeďuje na studium těchto proměnných hvězd i sousedních galaxií - Malém (SMC) a Velkém Magellanově mračnu (LMC). Pozorování vybraných polí v SMC i LMC pomocí dalekohledu Dk154 obsahuje kromě primárních cílů i mnoho hvězd typu RR Lyrae. To nám umožní provést spolu s daty přehlídkových projektů OGLE, MACHO a EROS vytvořit srovnávací studii hvězd typu RR Lyrae pro různé galaxie.

4.1.3 Rotující a chemicky pekulární hvězdy

Jednou z hlavních oblastí astrofyzikálního výzkumu na našem Ústavu teoretické fyziky a astrofyziky je od poloviny 90. let minulého století studium chemicky pekulárních hvězd. V roce 2006 vznikla v rámci tohoto výzkumu databáze fotometrických měření magnetických chemicky pekulárních hvězd mCPod⁶ (Mikulášek et al., 2007), k jejímuž vzniku jsem přispěl. Tím jsem se zapojil do práce týmu zkoumající chemicky pekulární hvězdy na ÚTFA. Právě vznik této databáze a využití fotometrických měření ke studiu period i interpretaci povrchových útvarů pro tyto hvězdy je zcela unikátní v celosvětovém měřítku. Do té doby byly změny period těchto hvězd studovány výhradně spektroskopicky případně pomocí měření magnetického pole.

V roce 2008 jsem se podílel na studii hvězdy V901 Ori (Mikulášek et al., 2008a,b). Kromě vyhledání dat v dostupných zdrojích jsem pořizoval nová fotometrická měření objektu. Fotometrická měření jsme doplnili spektroskopickými pozorováními z let 1986 a 1994-2002. Simultánním zpracováním všech 1895 měření bylo zjištěno prodloužení periody o 17.7(0.7) s za 31 let, které jsme interpretovali jako zpomalení rotace povrchových vrstev hvězdy v důsledku ztráty momentu hybnosti v rozsáhlé hvězdné magnetosféře.

Další detailně studovanou chemicky pekulární hvězdou byla HR7355 (= HD 182180) (Mikulášek et al., 2010) s hvězdnou velikostí 6.0 mag (V). Pro ni jsem získal nová pozorování a shromáždil dostupná měření. Jde o jednu z nejrychleji rotujících chemicky pekulárních hvězd. Analýza dat ukázala možné prodlužování periody $\dot{P}/P = 2.4(8) \cdot 10^{-6}$ za rok. Nicméně později byla revidována data, zveřejněná v rámci přehlídkového projektu ASAS. Tato revize postihla zejména jasné hvězdy na horním limitu dostupnosti. Nové zpracování dat pro HR7355 pak prodlužování periody neprokázalo. Na tomto příkladu se opět ukázal nedostatek dat pro velmi jasné hvězdy. Na jedné straně pokračuje honba na fotony u slabých a velmi slabých objektů a na straně druhé jsou opomíjeny velmi jasné objekty do zhruba 6 mag, pro něž je obtížné získat nová přesná a spolehlivá měření. Jednou z cest je využití jednoduchých mikrodalekohledů, které jsem několikrát propagoval při různých příležitostech (Zejda et al., 2011). Podobný mikrodalekohled je nyní i v kosmickém prostoru na palubě dvou miniaturních satelitů v rámci projektu BRITE⁷. Do projektu jsem se zapojil a jsem členem mezinárodního týmu zajišťujícího podpůrná pozemní spektroskopická a fotometrická pozorování.

V rámci spolupráce s jinými skupinami astronomů věnujících se CP hvězdám jsem se

⁶<http://astro.physics.muni.cz/mcpod/>

⁷<http://www.brite-constellation.at/>

podílel vlastními pozorováními nebo sběrem dat na přípravě dalších publikací, například Hubrig et al. (2010, 2011).

V roce 2011 se skupina vrátila k proměnné hvězdě V901 Ori s cílem otestovat stabilitu periody, resp. potvrdit předchozí řešení z Mikulášek et al. (2008a,b). Zjistili jsme, že rotační perioda hvězdy rostla během čtvrtstoletí do roku 2003, kdy dosáhla maxima 1.538771 d a poté začala klesat. Současně jsme zkoumali chování hvězdy CU Vir. Z mých nových měření a z dat posbíraných v literatuře vyplynulo, že rotační perioda hvězdy se zkracovala do roku 1968, kdy dosáhla minimální hodnoty 0.52067198 d. Pak se perioda prodlužovala až do roku 2005 a hodnoty 0.5207163 d, aby se opět začala zkracovat (Mikulášek et al., 2011). Jedná se o první případy chemicky pekuliárních hvězd, u nichž byly prokázány střídavé změny rotační periody. Dosud převládal názor, že periody těchto hvězd jsou konstantní nebo se pouze zvolna prodlužují. Náš výsledek má tudíž zásadní význam pro teorii stavby a vývoje magnetických hvězd horní části hlavní posloupnosti.

Protože hvězdokupy poskytující vskutku unikátní prostředí pro testy vývoje rotačních rychlostí horkých hvězd, byla už v 80. letech na Vídeňské univerzitě zahájena fotometrická přehlídka CP hvězd ve hvězdokupách v tzv. Δa fotometrii (Maitzen, 1993). Ukázalo se, že prakticky všechny pekuliární hvězdy s magnetickým polem mají kladné hodnoty Δa až do +100 mmag, zatímco Be/Ae hvězdy a tzv. metal-weak hvězdy mají naopak záporné hodnoty (Paunzen et al., 2005). Výskyt CP hvězd v otevřených hvězdokupách mapovala vídeňská skupina (Netopil et al., 2007). Podařilo se jim nalézt 152 CP hvězd v 83 otevřených hvězdokupách. Bohužel celá skupina se rozpadla. Nicméně s pomocí jednoho z členů a nynějšího pracovníka ÚTFA doc. Paunzena se nám podařilo zachránit cenné papírové záznamy dosud nepublikovaných fotometrických pozorování Δa fotometrie z 80. a 90. let minulého století, které v současné době převádíme do elektronické podoby a postupně zpracováváme. Výsledky hodláme postupně ověřovat novými pozorováními.

Vzhledem k probíhajícímu projektu LG12001 máme vynikající příležitost studovat chemicky pekuliární hvězdy i v sousedních galaxiích, zejména LMC a SMC. Během prvního pozorovacího období jsem s kolegy pořídil sadu měření vybraného pole v LMC, v němž se na základě předchozí práce (Paunzen et al., 2006) nacházejí čtyři kandidáti CP hvězd LMC190.1.15527, LMC190.1.2822, LMC190.1.1445, LMC190.1.1581. Nová studie týkající se těchto hvězd byla odeslána k publikaci.

Závěrem

Z předchozího textu je zřejmé, že problematika výzkumu otevřených hvězdokup pomocí proměnných hvězd je velmi komplexní. Je zde doslova ještě spousta „bílých míst“. Během uplynulých let se mi ve spolupráci s kolegy podařilo připravit cestu k jejich zaplnění. Nyní už víme jak na to a čeho se vyvarovat. Závěrečná kapitolka tak není typickým závěrem, ale spíše přehledem toho, do jakých pomyslných dveří v našem výzkumu je třeba vstoupit a kudy se dát.

Jeden ze stěžejních úkolů je práce na katalogu proměnných hvězd v otevřených hvězdokupách. Je třeba určit pravděpodobnost členství pro všechny hvězdy ve stávající i nově připravované verzi katalogu a vyloučit všechny hvězdy, které do otevřených hvězdokup nepatří. Rozbíhají se nové přehlídkové projekty, které by měly poskytnout potřebná data. U hvězd s potvrzenou příslušností k otevřeným hvězdokupám posbírat všechna dostupná data a výše popsanými metodami zkoumat vlastnosti proměnných hvězd i jejich mateřských hvězdokup. Zde počítám s výrazným zapojením studentů na všech úrovních studia od bakalářů po doktorandy. V současné době na výzkumu participují dva mí studenti doktorského studia, Mgr. Liška a Mgr. Skarka a Bc. Tomáš Sezima. Pro bakalářské a magisterské studenty jsou vypsány témata závěrečných prací zaměřených na studium zanedbaných otevřených hvězdokup i určitých skupin proměnných hvězd.

Získaná data o otevřených hvězdokupách budou doplněna do celosvětové databáze WEBDA a pomohou zodpovědět nevyřešené otázky počátečních stádií hvězdného vývoje a potvrdit, případně vyvrátit naše představy o hvězdné stavbě a hvězdném vývoji jako celku. To vše pro hvězdy a uskupení naší Galaxie. Díky projektu LG12001 ale máme nyní jedinečnou příležitost také studovat otevřené hvězdokupy v sousedních galaxiích, kde panují odlišné podmínky. Aplikací stejných postupů doufáme, že získáme údaje o proměnných hvězdách a otevřených hvězdokupách v Malém a Velkém Magellanově mračnu a budeme moci provést srovnávací studii s naší Galaxií.

Literatura

- Ahumada, A. V., Bragaglia, A., Tosi, M., & Marconi, G. 2011, *RMxAC* 40, 265
- Alves, V. M., Pavani, D. B., Kerber, L. O., & Bica, E. 2012, *New Astr.* 17, 488
- Andersen, J. 1991, *Astronomy and Astrophysics Review* 3, 91
- Applegate, J. H., Patterson, J., 1987, *ApJ* 322, L99
- Applegate, J. H., 1992, *ApJ* 385, 621
- Argelander, F. W. A. 1844, *Aufforderung an Freunde der Astronomie, Jahrbuch für 1844*, ed. H. Ch. Schumacher, Stuttgart a Tübingen
- Baker, D. E. A., Jameson, R. F., Casewell, S. L., et al. 2010, *MNRAS*, 408, 2457
- Bakis, H., Bakis, V., Bilir, S., Mikulášek, Z., Zejda, M. et al. 2011, *PASJ* 63, 1079
- Bakış, V., Hensberge, H., Zejda, M., et al. 2012, *IAUS*, 282, 71
- Baraffe I., Chabrier G., Allard F., Hauschildt P. 1998, *A&A* 337, 403
- Bastian, N., Covey, K. R., & Meyer, M. R. 2010, *ARA&A*, 48, 339
- Bastian, N., Covey, K. R., & Meyer, M. R. 2011, 16th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun, 448, 361
- Bertelli, G., Girardi, L., Marigo, P., & Nasi, E. 2008, *A&A* 484, 815
- Bertelli, G. et al. 2009, *A&A* 508, 355
- Bonatto, Ch., & Bica, E. 2007, *MNRAS*, 377, 1301
- Bonatto, Ch., Bica, E., & Girardi, L. 2004, *A&A*, 415, 571
- Bukowiecki, L., Maciejewski, G., Konorski, P., & Strobel, A. 2011, *Acta Astr.* 61, 231
- Bukowiecki, L., Maciejewski, G., Konorski, P., & Errmann, R. 2012, *Information Bulletin on Variable Stars*, 6021, 1
- Clausen, J. V., & Giménez, A. 1987, *Publications of the Astronomical Institute of the Czechoslovak Academy of Sciences*, 69, 185
- Demarque, P., Woo, J.-H., Kim, Y.-C., & Yi, S. K. 2004, *ApJS*, 155, 667
- De Marchi, G., Paresce, F., & Portegies Zwart, S. 2010, *ApJ*, 718, 105
- Dias, W. S., Alessi, B. S., Moitinho, A., & Lépine, J. R. D. 2002, *A&A*, 389, 871
- Dias, W. S., Monteiro, H., Caetano, T. C., & Oliveira, A. F. 2012, *A & A*, 539, A125
- Ekström, S., Georgy, C., Eggenberger, P., et al. 2012, *A&A*, 537, A146
- Flannery, B. P. 1976, *ApJ*, 205, 217
- Georgy, C., Ekström, S., Meynet, G., et al. 2012, *A&A*, 542, A29
- Gimenez, A. 1985, *ApJ*, 297, 405
- Girardi, L., Grebel, E. K., Odenkirchen, M., & Chiosi, C. 2004, *A&A*, 422, 205
- Grocholski, A. J., & Sarajedini, A. 2003, *MNRAS*, 345, 1015
- Hadrava, P., 2004a, *Publ. of Astron. Inst. of Acad. of Sci. of Czech Rep.*, No. 92, 1
- Hadrava, P., 2004b, *Publ. of Astron. Inst. of Acad. of Sci. of Czech Rep.*, No. 92, 15
- Hall, D. S., 1989, *Space Science Reviews* 50, 219
- Harmanec, P., Horn, J., 2002, *HEC* 22, *VYPAR*, user's manual
- Hartmann, L., Soderblom, D. R., Noyes, R. W. et al. 1984, *ApJ*, 276, 254
- Hejlesen, P. M. 1987, *A & AS*, 69, 251
- Hertzsprung, E. 1911, *Publikationen des Astrophys. Observatoriums zu Potsdam*, 63,
- Hertzsprung, E. 1928, *Bull. of Astron. Inst. of the Netherlands*, 4, 178
- Horn, J., Kubát, J., Harmanec, P., Koubský, P., Hadrava, P. et al. 1996, *A & A* 309, 521
- Hubrig, S., Mikulášek, Z., Schöller, M., et al. 2010, *Binaries - Key to Comprehension of the Universe*, Proceedings of a conference held June 8-12, 2009 in Brno, Czech Republic. Edited by A. Prša & M. Zejda. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 435, 343
- Hubrig, S., Mikulášek, Z., González, J. F., et al. 2011, *A & A*, 525, L4

- Chabrier, G., Gallardo, J., & Baraffe, I. 2007, *A & A*, 472, L17
- Chen, L., Hou, J. L., & Wang, J. J. 2003, *AJ*, 125, 1397
- Chiappini, C., Matteucci, F., & Romano, D. 2001, *ApJ*, 554, 1044
- Chrastina, M., Zejda, M., & Mikulášek, Z. 2010, *Binaries - Key to Comprehension of the Universe*, Proceedings of a conference held June 8-12, 2009 in Brno, Czech Republic. Edited by A. Prša & M. Zejda. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 435, 83
- Jappsen, A.-K., Glover, S. C. O., Klessen, R. S., & Mac Low, M.-M. 2007, *ApJ*, 660, 1332
- Javakhishvili, G., Kukhianidze, V., Todua, M., Inasaridze, R. 2006, *A&A*, 447, 915
- Johnson, H. L., Morgan, W.W., 1953, *ApJ* 117, 313
- Johnson, J.A., Bolte, M., Stetson, P.B., Hesser, J.E., Somerville, R.S. 1999, *ApJ*, 527, 199
- Jorgensen, B. R., & Lindegren, L. 2005, *A&A* 436, 127
- Kopal, Z. 1978, *Astrophysics and Space Science Library*, 68,
- Kroupa, P. 2001, *MNRAS*, 322, 231
- Kroupa, P. 2002, *Science*, 295, 82
- Kwee, K. K., & van Woerden, H. 1956, *Bull. of Astron. Inst. of the Netherlands*, 12, 327
- Lagarde, N., Decressin, T., Charbonnel, C., et al. 2012, *A & A*, 543, A108
- Lanza, A. F., Rodono, M., Rosner, R., 1998, *MNRAS* 296, 893
- Lanza, A. F. 2006, *MNRAS* 369, 1773
- Lenz, P., & Breger, M. 2004, *The A-Star Puzzle*, 224, 786
- Lee, J. W., Kim, C.-H., Koch, R. H., 2007, *MNRAS* 379, 1665
- Leung, K.-C. 1974, *AJ*, 79, 852
- Lejeune, T., & Schaerer, D. 2001, *A&A* 366, 538
- Lucy, L. B. 1976, *ApJ*, 205, 208
- Lucy, L. B., & Wilson, R. E. 1979, *ApJ*, 231, 502
- Machida, M. N. 2008, *ApJ*, 628, L1
- Maitzen, H. M. 1993, *A&AS*, 102, 1
- Mermilliod, J.-C., & Paunzen, E. 2003, *A & A*, 410, 511
- Meynet, G., & Maeder, A. 2003, *A&A* 404, 975
- Mikulášek, Z., Janík, J., Zverko, J., Žižňovský, J., Zejda, M., Netolický, M., Vaňko, M. 2007, *Astron. Nachr.*, 328, 10
- Mikulášek, Z., Wolf, M., Zejda, M., & Pecharová, P. 2006, *Ap&SS*, 304, 363
- Mikulášek, Z., Krtička, J., Zverko, J., et al. 2008a, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, 38, 429
- Mikulášek, Z., Krtička, J., Henry, G. W., et al. 2008b, *A & A*, 485, 585
- Mikulášek, Z., Krtička, J., Henry, G. W., et al. 2010, *A & A*, 511, L7
- Mikulášek, Z., Krtička, J., Henry, G. W., Janík, J., Zverko, J., Žižňovský, J., Zejda, M., Liška, J., Zvěřina, P., Kudrjavtsev, D. O., Romanyuk, I. I., Sokolov, N. A., Lüftinger, T., Triglio, C., Neiner, C., de Villiers, S. N., 2011, *A&A* 534, L5
- Mikulášek, Z., Zejda, M., Zhu, L., Qian, S., Liška, J., de Villiers, S.N. 2012, arXiv:1212.5519
- Mikulášek, Z., Zejda, M. 2013, *Proměnné hvězdy, učební text*, MU Brno
- Miller, A. A., Irwin, J., Aigrain, S., Hodgkin, S., & Hebb, L. 2008, *MNRAS*, 387, 349
- Motl, D., 2013, *C-Munipack*, <http://c-munipack.sourceforge.net/>
- Mowlavi, N., Eggenberger, P., Meynet, G. et al. 2012, *A&A*, 541, A41
- Netopil, M., Paunzen, E., Maitzen, H. M. et al. 2007, *A&A*, 462, 591
- Nilakshi, Sagar, R., Pandey, A. K., & Mohan, V. 2002, *A & A*, 383, 153
- Paunzen, E., Stütz, Ch., Maitzen, H. M. 2005, *A&A*, 441, 631
- Paunzen, E., & Netopil, M. 2006, *MNRAS*, 371, 1641
- Paunzen, E., Netopil, M., Iliev, I. Kh. et al. 2006, *A&A*, 454, 171

- Paunzen, E., Heiter, U., Netopil, M., Soubiran, C. 2010, A&A, 517, 32
- Pickering, E. C. 1903, Annals of Harvard College Observatory, 48, 91
- Popova, M., & Kraicheva, Z. 1984, Astrofizicheskie Issledovaniia Izvestiya Spetsial'noj Astrofizicheskoy Observatorii, 18, 64
- Ribas, I., Morales, J. C., Jordi, C., et al. 2008, Mem.Soc.Spett.Ital., 79, 562
- Rosenberg, H. 1910, Astronomische Nachrichten, 186, 71
- Rüdiger, G., Elstner, D., Lanza, A.F., Granzer, Th., 2002, A & A 390, 673
- Ryu, J., & Lee, M. G. 2011, Journal of Korean Astr. Soc., 44, 177
- Sagar, R., Munari, U., & de Boer, K. S. 2001, MNRAS, 327, 23
- Salaris, M., Weiss, A., & Percival, S. M. 2004, A & A, 414, 163
- Salpeter, E. E. 1955, ApJ, 121, 161
- Samus, N. N., Durlevich, O. V., & et al. 2012, VizieR Online Data Catalog, 1, 2025 (Version 2012 Mar)
- Sanner, J., & Geffert, M. 2001, A&A, 370, 87
- Skarka, M. 2013, A & A, 549, A101
- Skarka, M., & Zejda, M. 2013, MNRAS, 428, 1442
- Stetson, P. B. 2000, PASP, 112, 925
- Šimon, V., 1999, A & A Suppl. 134, 1
- Tadross, A. L. 2003, New Astronomy 8, 737
- Tosi, M. 1996, ASPC, 98, 299
- Trumpler, R. J. 1925, PASP, 37, 307
- Turner, D. G. 2011, RMxAA 47, 127
- Van Hamme, W., & Wilson, R. E. 2007, ApJ, 661, 1129
- Vanmunster, T. 2012, www.peranso.com
- Vogel, H. C. 1890, Astronomische Nachrichten, 123, 289
- Variable Star indeX, Version 2013-01-27, VizieR On-line Data Catalog: B/vsx
- Watson, C., Henden, A. A., & Price, A. 2012, VizieR Online Data Catalog, 1, 2027
- Wilson, R. E. 2012, AJ, 144, 73
- Wolf, M., & Šarounová, L. 1995, A & AS, 114, 143
- Wolf, M., & Zejda, M. 2005, A & A, 437, 545
- Wolf, M., Zejda, M., & de Villiers, S. N. 2008, MNRAS, 388, 1836
- Wolf, M., Zejda, M., Mikulášek, et al. 2010, Binaries - Key to Comprehension of the Universe, Proceedings of a conference held June 8-12, 2009 in Brno, Czech Republic. Edited by A. Prša & M. Zejda. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 435, 441
- Wolf, M., Zasche, P., Hornoch, K., Chrastina, M., Janík, J., Zejda, M. 2012, IAU Symposium, 282, 490
- Wolf, M., Zasche, P., Kučáková, H., et al. 2013, A & A, 549, A108
- Yildiz, M., & Doğan, T. 2013, MNRAS, 430, 2029
- Zavala, R. T., McNamara, B. J., Harrison, T. E., Galvan, E., Galvan, J., Jarvis, T., Killgore, G.A., Mireles, O. R., Olivares, D., Rodriguez, B. A., Sanchez, M., Silva, A. L., Silva, A. L., Silva-Velarde, E., 2002, AJ 123, 450
- Zejda, M. 2004, Information Bulletin on Variable Stars, 5583, 1
- Zejda, M., Mikulášek, Z., & Wolf, M. 2006, Information Bull. on Variable Stars, 5741, 1
- Zejda, M., Mikulášek, Z., & Wolf, M. 2008, A & A, 489, 321
- Zejda, M. 2009a, *Determination of minima timings*, workshop Binarity - a tool for study of stellar characteristics, 9. 10. 2009, Krakow, Polsko
- Zejda, M. 2009b, *Timings of Minimum. Estimation or Determination?*, conference KOLOS, Snina, Slovensko, 3.-5. 12. 2009

- Zejda, M., Wolf, M., Šlechta, M., et al. 2010, arXiv:1012.5679
- Zejda, M. 2010, *Timings of Minimum. Estimation or Determination? II*, seminář Yunnanské astronomické observatoře, 18. 11. 2010, Kunming, Čína
- Zejda, M., Mikulášek, Z., *Timings of Minimum. Estimation or Determination? II*, International Conference on Education in Astronomy, KOLOS 2010, December 02 – 04, 2010, Snina, Slovensko
- Zejda, M., Mikulášek, Z., *Timings of Minima. Estimation or Determination? III*, Konference o výzkumu proměnných hvězd, HaP Ostrava, 11. 11. 2011
- Zejda, M., & Domingo, A. 2011, *Information Bulletin on Variable Stars*, 5996, 1
- Zejda, M., Mikulášek, Z., Liška, J., Svoboda, P., & de Villiers, S. N. 2011, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 451, 33
- Zejda, M., Paunzen, E., Baumann, B., Mikulášek, Z., & Liška, J. 2012a, *A & A*, 548, A97
- Zejda, M., Paunzen, E., Baumann, B., Mikulášek, Z., & Liška, J. 2012b, *VizieR Online Data Catalog*, 354, 89097
- Zhu, L., Qian, S.-B., Mikulášek, Z., et al. 2010, *AJ*, 140, 215
- Zhu, L.-Y., Zejda, M., Mikulášek, Z., et al. 2012, *AJ*, 144, 37

Přílohy

1. Skarka, M., Zejda, M., 2013, MNRAS 428, 1442-1448, Photometric study of the star with changing Blazhko effect: TV Bootis (odhadovaný podíl na publikaci 25 %)
2. Zejda, M., Paunzen, E., Baumann, B., Mikulášek, Z., & Liška, J. 2012, A & A, 548, A97 Catalogue of variable stars in open cluster fields (60 %)
3. Zhu, L.-Y., Zejda, M., Mikulášek, Z., Liška, J., Qian, S.-B., de Villiers, S. N., 2012, AJ 144, 37, The Photometric Study of a Neglected Near Contact Binary: BS Vulpeculae (35 %)
4. Mikulášek, Z., Zejda, M., Janík, J., 2012, Period Analyses Without O-C Diagrams, From Interacting Binaries to Exoplanets: Essential Modeling Tools, Proceedings of the International Astronomical Union. Edited by M. T. Richards and I. Hubeny, IAU Symposium, Volume 282, p. 391-394 (40 %)
5. Bakis, H., Bakis, V., Bilir, S., Mikulášek, Z., Zejda, M., Yaz, E., Demircan, O., Bulut, I., 2011, PASJ 63, 1079, Study of Eclipsing Binary and Multiple Systems in OB Associations. I. Orion OB1a - IM Monocerotis (20 %)
6. Mikulášek, Z., Krtička, J., Henry, G. W., Janík, J., Zverko, J., Žižňovský, J., Zejda, M., Liška, J., Zvěřina, P., Kudrjavtsev, D. O., Romanyuk, I. I., Sokolov, N. A., Lüftinger, T., Trigilio, C., Neiner, C., de Villiers, S. N., 2011, Astronomy & Astrophysics, Volume 534, L5, Surprising variations in the rotation of the chemically peculiar stars CU Virginis and V901 Orionis (10 %)
7. Zejda, M., Wolf, M., Šlechta, M., Mikulášek, Z., Zverko, J., Svoboda, P., Krtička, J., Janík, J., Božić, H. 2010, arXiv:1012.5679, Photometric and spectroscopic investigation of TW Draconis (80 %)
8. Zhu, L., Qian, S.-B., Mikulášek, Z., Zejda, M., Zvěřina, P., Diethelm, R., 2010, AJ 140, 215, Photometric Study of the Very Short Period Shallow Contact Binary DD Comae Berenices (30 %)
9. Mikulášek, Z., Žižňovský, J., Hubrig, S., Zejda, M., Zverko, J., Dubovský, P. A., Kreiner, J. M., Albayrak, B., Zoła, S., Ogoza, W., Janík, J., Gráf, T., Kudzej, I., 2010, v Binaries - Key to Comprehension of the Universe. Proceedings of a conference held June 8-12, 2009 in Brno, Czech Republic. Edited by Andrej Prša and Miloslav Zejda. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 337, Phenomenological ephemeris of the HgMn CP eclipsing variable AR Aurigae (20 %)
10. Zejda, M., Mikulášek, Z., Wolf, M. 2008, A & A, 489, 321, Period study of TW Draconis (60 %)
11. Bakis, V., Zejda, M., Bulut, I., Wolf, M., Bilir, S., Bakis, H., Demircan, O., Lee, J. W., Šlechta, M., Kučerová, B., 2008, MNRAS 390, 399, Absolute dimensions and apsidal motion of the eccentric binary V731 Cephei (40 %)
12. Wolf, M., Zejda, M., de Villiers, S. N., 2008, Apsidal motion in southern eccentric eclipsing binaries: GL Car, QX Car, NO Pup and V366 Pup, MNRAS 388, 1836 (30 %)