

MASARYKOVA UNIVERZITA

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

# Bakalářská práce

Jakub Kolář

Brno 2019

MASARYKOVA UNIVERZITA  
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

Bakalářská práce  
Fotometrie těsných dvojhvězd

Jakub Kolář



Vedoucí práce:  
doc. RNDr. Miloslav Zejda, Ph.D.

Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Brno 2019

# Bibliografický záznam

**Autor:** Jakub Kolář  
Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita  
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

**Název práce:** Fotometrie těsných dvojhvězd

**Studijní program:** Fyzika

**Studijní obor:** Astrofyzika

**Vedoucí práce:** doc. RNDr. Miloslav Zejda, Ph.D.

**Akademický rok:** 2018/2019

**Počet stran:** VIII + 37

**Klíčová slova:** Zákrytové dvojhvězdy, CCD fotometrie, světelná křivka, *O-C* diagram

# Bibliographic entry

**Author:** Jakub Kolář  
Faculty of Science, Masaryk University  
Department of Theoretical Physics and Astrophysics

**Title of Thesis:** Photometry of close binaries

**Degree Programme:** Physics

**Field of Study:** Astrophysics

**Supervisor:** doc. RNDr. Miloslav Zejda, Ph.D.

**Academic Year:** 2018/2019

**Number of Pages:** VIII + 37

**Keywords:** Eclipsing binaries, CCD photometry, light curve, *O-C* diagram



# Abstrakt

Tato práce pojednává o studiu zákrytové dvojhvězdy GX Lac. Analýzou fotometrických pozorování, která byla provedena v pásmech  $B$ ,  $V$  a  $R$  na Observatoři Masarykovy univerzity v Brně, byla získána fázová křivka. S přidáním ostatních dostupných měření byla křivka pokryta téměř kompletně. Pomocí robustní regrese byla zpracována všechna dohledatelná data  $O-C$  diagramu. Tím byly získány přesnější hodnoty efemerid. Nakonec byl v programu PHOEBE vypočten doposud jediný model této soustavy, pomocí kterého byly stanoveny některé fyzikální parametry. Systematický posun sekundárních minim v  $O-C$  diagramu a drobné odchylky na fázové křivce v oblastech zákrytu naznačují excentrickou povahu tohoto systému.

# Abstract

This thesis deals with the study of eclipsing binary star GX Lac. A phase curve was obtained by analyzing photometric observations made in the passbands  $B$ ,  $V$  and  $R$  at Masaryk University Observatory in Brno. With the addition of other available measurements, the curve was covered almost completely. All traceable data of  $O-C$  diagram were processed using robust regression. This gave more accurate ephemeris values. Finally, so far the only model of this system was calculated in the program PHOEBE to determine some physical parameters. The systematic shift of secondary minima in the  $O-C$  diagram and small deviations in the phase curve in the parts of eclipse indicate the eccentric nature of this system.



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Akademický rok: 2018/2019

**Ústav:** Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

**Student:** Jakub Kolář

**Program:** Fyzika

**Obor:** Astrofyzika

Ředitel *Ústavu teoretické fyziky a astrofyziky* PŘF MU Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu MU určuje bakalářskou práci s názvem:

**Název práce:** Fotometrie těsných dvojhvězd

**Název práce anglicky:** Photometry of close binaries

### Oficiální zadání:

Zákrytové dvojhvězdy patří mezi nejdéle známé proměnné hvězdy. Přesto však zůstává řada otázek jejich vzniku a vývoje nezodpovězená. Cílem bakalářské práce je fotometrické sledování vybraných zákrytových dvojhvězd, analýza a interpretace získaných dat. Student získá kompletní fázovou křivku alespoň dvou zákrytových dvojhvězd, provede analýzu případných změn periody a vypočítá model studovaných dvojhvězd.

### Literatura:

HILDITCH, Ronald W. *An introduction to close binary stars*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. x, 381. ISBN 0521798000.

KALLRATH, Josef a E. F. MILONE. *Eclipsing binary stars : modeling and analysis*. 2nd ed. New York, N.Y.: Springer, 2009. xxxv, 427. ISBN 9781441906984.

**Jazyk závěrečné práce:** čeština

**Vedoucí práce:** doc. RNDr. Miloslav Zejda, Ph.D.

**Datum zadání práce:** 3. 10. 2018

**V Brně dne:** 23. 4. 2019

Souhlasím se zadáním (podpis, datum):

.....  
Jakub Kolář  
student

.....  
doc. RNDr. Miloslav Zejda, Ph.D.  
vedoucí práce

.....  
prof. Rikard von Unge, Ph.D.  
ředitel Ústavu teoretické fyziky a  
astrofyziky

# Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat svému školiteli doc. RNDr. Miloslavu Zejdovi, Ph.D. za cenné rady, ochotu a vstřícný přístup při konzultacích. Děkuji také Ing. Reinholdu Auerovi za poskytnutí dat ke zpracování.

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracoval samostatně s využitím informačních zdrojů, které jsou v práci citovány.

V Brně dne 21. května 2019

.....

Jakub Kolář

# Obsah

<b>1</b>	<b>Proměnné hvězdy</b>	<b>1</b>
1.1	Definice proměnných hvězd . . . . .	1
1.2	Historie výzkumu proměnných hvězd . . . . .	1
1.3	Dvojhvězdy . . . . .	3
1.3.1	Zákrytové dvojhvězdy . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Metody zpracování</b>	<b>8</b>
2.1	CCD fotometrie . . . . .	8
2.1.1	Princip CCD . . . . .	8
2.1.2	Korekční snímky . . . . .	9
2.2	Fotometrické systémy . . . . .	10
2.2.1	Barevný index . . . . .	11
2.3	Světelná křivka . . . . .	12
2.4	$O-C$ diagram . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Analýza získaných dat</b>	<b>18</b>
3.1	Výběr objektů . . . . .	18
3.2	Pořízení a zpracování snímků . . . . .	18
3.3	Určení minim . . . . .	20
3.4	Sestrojení $O-C$ diagramu . . . . .	21
3.5	Model systému . . . . .	24
3.6	Diskuze výsledků . . . . .	26
	<b>Závěr</b>	<b>28</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>29</b>
	<b>Literatura</b>	<b>36</b>

# Kapitola 1

## Proměnné hvězdy

### 1.1 Definice proměnných hvězd

Proměnné hvězdy jsou objekty, u kterých dochází k časovým změnám jejich jasnosti. Tyto světelné změny nastávají ve velkém rozpětí ( $10^{-3}$ – $10^1$  mag) a rovněž na široké časové škále (od desetitisícin sekundy až po miliardy let). V podstatě každá hvězda je v průběhu svého života proměnná.

Důvody proměnnosti jsou různé. Fyzické proměnné hvězdy se vyznačují změnou fyzikálních vlastností, v jejichž důsledku se mění jejich zářivý výkon. Dále se dělí na pulzující, eruptivní a explozivní. U geometrických proměnných hvězd nedochází ke změnám zářivého výkonu. Mezi geometrické proměnné se řadí hvězdy zákrytové (kapitola 1.3.1) a hvězdy rotační, kde proměnnost vyvolávají skvrny na povrchu hvězd.

Proměnné hvězdy o sobě mohou sdělit podstatně více informací než hvězdy neproměnné. Ze studia těchto objektů lze získat nové poznatky o stavbě a vývoji hvězd i vesmíru.

### 1.2 Historie výzkumu proměnných hvězd

Hvězdná obloha upoutala člověka již od pravěku. Pohledy na sféru hvězd byly během vývoje lidstva odlišné. Ve starověku byla tato sféra považována za stálou kulisu, na které nebyly připouštěny žádné změny. Původcem této myšlenky byl Aristoteles (Mikulášek & Zejda 2013), který byl v tehdejší době považován za největší vědeckou autoritu. Tělesa Sluneční soustavy měnila nejen svoji polohu vůči hvězdám, ale také jasnost. Proto byla hlavní pozornost věnována právě těmto tělesům, nikoliv hvězdné klenbě za nimi.

V roce 1572 pozoroval dánský astronom Tycho Brahe vzplanutí supernovy v blízkosti hvězdy  $\kappa$  Cas. Měnící se jasnost této doposud neznámé hvězdy po-

rovnal s jasnostmi okolních hvězd a sestavil tak první světelnou křivku. Brahe pro další výzkum použil mimo jiné pozorování českého astronoma Tadeáše Hájka z Hájku. Důkladným rozbořem poté zjistil, že se nová hvězda nachází dále než Měsíc. Tímto byla Aristotelova myšlenka definitivně vyvrácena.

David Fabricius roku 1596 objevil světelné změny u objektu o Ceti, tuto hvězdu sledoval opětovně v roce 1609. Střídavě se objevovala a mizela. Podle tohoto chování ji Fabricius nazval Mira (latinsky Podivuhodná). Nezávisle na Fabriciovi Miru objevili také další astronomové, mezi nimi i v roce 1638 Johann Holwarda, který ji pečlivě studoval po celý rok. Byl vůbec prvním, kdo se začal systematicky zabývat pozorováním proměnné hvězdy. Periodu o Ceti prvně určil Ismael Boulliau. Jeho výsledek činil 333 dní, což se ukázalo jako obdivuhodně přesné oproti dnešním výsledkům (332 dní).

Algol ( $\beta$  Per) byla další hvězda s prokázanou proměnností (1669). Perioda byla však stanovena mnohem později Angličanem Johnem Goodrickeem na necelé tři dny. Goodricke (1764–1786) vysvětlil rovněž příčiny světelných změn Algolu a objevil další dvě proměnné hvězdy:  $\beta$  Lyr a  $\delta$  Cep. Goodrickův kolega, Edward Pigott, vydal v roce 1786 první katalog proměnných hvězd. Bylo v něm zahrnuto dvanáct tehdy známých objektů.

Zájem o studium proměnných hvězd se výrazně zvýšil díky činnosti Friedricha W. A. Argelandera, německého astronoma a ředitele hvězdárny v Bonnu (Štefl & Krtička 2008). Argelander vytvořil poměrně jednoduchou a přesnou metodu vizuálního odhadu jasnosti proměnné hvězdy. Sledovaná hvězda se porovnává se dvěma blízkými hvězdami, přičemž jedna je jasnější, druhá méně jasná. Tuto metodu začala užívat řada amatérských pozorovatelů, kteří ji v menší míře používají dodnes. S přibývajícím počtem známých proměnných hvězd bylo zapotřebí zavést jednotný systém v jejich pojmenování. Argelander ke značení použil třípísmennou zkratku souhvězdí a písmena abecedy. Označování začalo postupně písmeny R až Z, poté kombinacemi písmen RR až ZZ. Později bylo nutné přidat kombinace AA až QZ. Písmeno J bylo vynecháno z důvodu možné záměny. Ani toto rozšíření však nebylo dostačující. Nově objeveným proměnným hvězdám bylo přiděleno číslo větší než 334 (písmenná označení zahrnovala 334 možných kombinací) a na začátku názvu písmeno V, značící proměnnost (z anglického variable).

Na konci 19. století narostl počet proměnných hvězd natolik, že již bylo možné rozpoznat jednotlivé skupiny hvězd s podobným chováním. Tyto skupiny jako první klasifikoval Edward Pickering v roce 1880. Jeho původní klasifikace je velice blízká té dnešní. V 19. století se také uskutečnila řada nových objevů, která vedla ke vzniku astrofyziky jako vědního oboru.

S rozvojem techniky ve 20. století se měření stále zpřesňovala. Do popředí se dostala CCD fotometrie (kapitola 2.1). Začaly též vznikat organizace pozorova-

telů. Největší z nich je Americká asociace pozorovatelů proměnných hvězd, která spravuje dnes nejrozsáhlejší katalog proměnných hvězd VSX. Databáze aktuálně obsahuje přes 600 000 objektů [e1].

## 1.3 Dvojhvězdy

Dvojhvězdou se nazývají dvě hvězdy, které se nacházejí v blízké úhlové nebo absolutní vzdálenosti. Jasnější složka bývá většinou označena jako primární neboli primár, méně jasná jako sekundární (Harmanec et al. 2017). Existují také vícenásobné hvězdné systémy.

V případě optické dvojhvězdy si jsou hvězdy blízké pouze úhlově z pohledu pozorovatele. Jejich reálná vzdálenost přesahuje limit pro pevnou gravitační vazbu. Astronomové zpočátku nebrali v potaz myšlenku existence hvězdných dvojic a veškeré dvojhvězdy byly považovány za optické. Rostoucí počet objevených hvězd v blízké úhlové vzdálenosti však ukazoval, že toto rozložení není pouze náhodné.

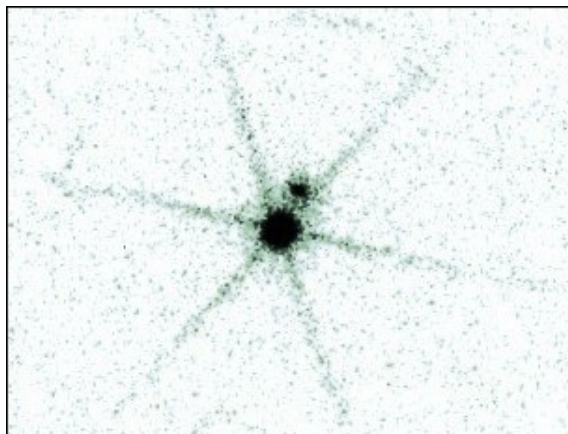
Dvojice blízkých hvězd, které jsou spolu gravitačně vázány a obíhají kolem společného těžiště, se nazývají fyzické dvojhvězdy. Pro stabilitu takového hvězdného systému je nutné, aby se hvězdy nacházely v podvojných soustavách. Například pro trojhvězdu, dvě hvězdy tvoří jednu těsnou dvojhvězdu a společně se třetí složkou vytvářejí stabilní podvojný systém (Mikulášek & Krτίčka 2005). Fyzika dvojhvězd se tedy výrazně uplatňuje nejen u samotných dvojhvězd, ale také u vícenásobných hvězdných soustav.

Dvojhvězdy jsou mezi hvězdami znatelně zastoupené, přičemž se jich nejvíce vyskytuje u červených trpaslíků. Jejich nejdůležitější význam spočívá v tom, že představují hlavní zdroj informací o základních vlastnostech hvězd. Přímé určení hmotnosti daného zkoumaného objektu vyžaduje gravitační interakci mezi dvěma tělesy. Gravitační působení složek dvojhvězdy mohou být v některých případech dobře detekovatelné. Parametry studovaného systému tak mohou být stanoveny důkladnou analýzou pozorovaných dat. Metodika pozorování dvojhvězdné soustavy silně závisí na způsobu rozlišitelnosti hvězd. Dle toho lze dvojhvězdy klasifikovat do čtyř druhů: vizuální, astrometrické, spektroskopické a zákrytové.

U vizuálních dvojhvězd jsou obě složky pozorovány opticky pomocí dalekohledu, případně interferometru. Teoretická rozlišovací schopnost pozorovacích přístrojů dosahuje až k tisícínám úhlových vteřin. Při pozorování se ovšem takového rozlišení nedosahuje. Výsledný obraz je ovlivněn působením zemské atmosféry tzv. seeingem. V důsledku nehomogenity atmosféry dochází k rychlým změnám indexu lomu. Obraz pozorovaného objektu proto není stabilní. Na většině pozemských observatoří tak rozlišení nedosahuje hodnoty 1". Řešením je kupříkladu použití adaptivní optiky, nebo interferometru. Moderní matematická

metoda skvrnkové interferometrie umožňuje objev nových vizuálních dvojhvězd díky rozlišovací schopnosti dosahující až kolem hranice  $0,03''$  (Harmanec et al. 2017). Atmosférické vlivy se zcela eliminují u pozorování kosmickými dalekohledy.

Složky astrometrické dvojhvězdy nelze rozlišit opticky. Primární složka je mnohem jasnější než složka sekundární, a proto se světlo sekundární složky nepozoruje. Její přítomnost lze zjistit díky gravitačnímu působení. Samostatná hvězda má přímočarý vlastní pohyb. Pokud je zde přítomno další těleso, vlastní pohyb již bude vlnitý. Detekce těchto objektů je možná pouze u blízkých hvězd s velmi přesně určeným vlastním pohybem. U vzdálených hvězd se odchylky od přímočarého vlastního pohybu ztrácejí v nejistotě měření. Příkladem astrometrické dvojhvězdy může být Síríus, nejjasnější hvězda v souhvězdí Velkého psa. Sekundární složka zde byla objevena astrometricky. Vývoj pozorovací techniky však v roce 1862 umožnil A. Clarkovi, aby sekundární složku (Síríus B) pozoroval vizuálně (Štefl & Krტიčka 2008).



Obrázek 1.1: Fotografie dvojhvězdy Síríus ( $\alpha$  CMa) v rentgenové oblasti spektra pořizená družicí Chandra, převzato a upraveno ze zdroje [e2].

Spektroskopické dvojhvězdy jsou charakteristické periodickými změnami poloh spektrálních čar. Vlivem oběžného pohybu dochází k Dopplerovu efektu. V ideálním případě jsou ve spektru zastoupeny čáry obou složek. Jedná se o typ SB2. Pokud jsou jasnosti složek dvojhvězdy výrazně rozdílné, je pozorováno pouze spektrum jasnější hvězdy (typ SB1). Dvojhvězdnost soustavy je poté odhalena periodickou změnou radiální rychlosti jasnější složky.



### 1.3.1 Zákrytové dvojhvězdy

Složky dvojhvězdy společně obíhají kolem těžiště. Sklon roviny oběhu k pozorovateli je vyjádřen inklináčním úhlem  $i$ . Při hodnotách blízkých  $90^\circ$  dochází k zákrytům, které se projevují periodicky se opakujícími poklesy jasnosti pozorované dvojhvězdy. Pro vzdáleného pozorovatele obě složky splývají a je pozorován celkový zářivý tok z dvojhvězdy. Hilditch (2001) uvádí podmínku viditelnosti zákrytu pro sférické hvězdy s poloměry  $R_1$  a  $R_2$  a vzdáleností  $a$  mezi hvězdami:

$$\sin\left(\frac{\pi}{2} - i\right) \leq \frac{R_1 + R_2}{a}. \quad (1.1)$$

Graf časové závislosti změny jasnosti se nazývá *světelná křivka*. Na vodorovnou osu je zpravidla vynesena čas (většinou udávaný v juliánském datování) a na svislé ose se nachází hvězdná velikost, často vztažená na srovnávací hvězdu. Důležitý je zde předpoklad o konstantní jasnosti srovnávací hvězdy, v opačném případě by mohlo dojít ke zkreslení měření. Rozdíl hvězdných velikostí  $\Delta m$  zkoumané a srovnávací hvězdy je obvykle stanoven z poměru jejich jasností  $j_v$  (zkoumaná proměnná hvězda) a  $j_c$  (srovnávací hvězda):

$$\Delta m = -2,5 \log \frac{j_v}{j_c}. \quad (1.2)$$

Ve světelné křivce zákrytové dvojhvězdy se nacházejí dva typy minim. Primárním minimem se označuje hlubší z nich a sekundárním mělké. Při znalosti oběžné periody  $P$  je možné více pozorování uspořádat do *fázové světelné křivky*. Na vodorovné ose se místo času  $t$  nachází fáze  $\varphi$ . K výpočtu fáze je důležité definovat základní okamžik  $M_0$ , od kterého se bude fáze počítat. Fáze nabývá hodnot od 0 do 1, což je zajištěno pomocí funkce frac:

$$\varphi = \text{frac}\left(\frac{t - M_0}{P}\right). \quad (1.3)$$

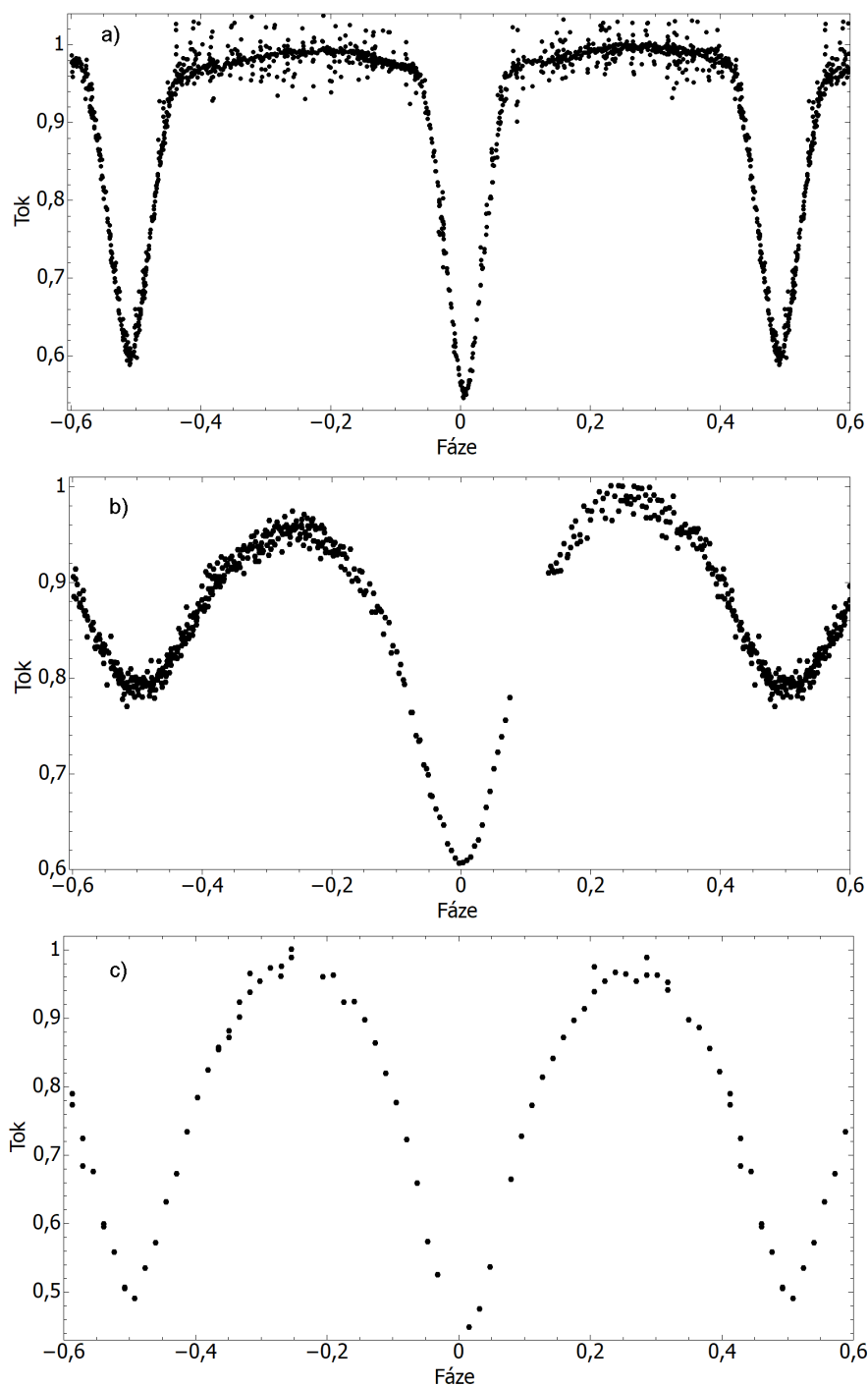
Ze světelné křivky lze vyčíst některé informace o daném systému, jako jsou kupříkladu úhel inklinace a relativní rozměry a zářivé výkony obou složek. Se znalostmi radiálních rychlostí lze odvodit hmotnost jednotlivých složek, základní charakteristiku hvězd. Na základě tvaru světelné křivky se rozlišují tři typy zákrytových dvojhvězd. Jejich pojmenování se odráží od nejznámějších představitelů daného typu.

Hvězdy typu Algol (též algolidy) mají zpravidla konstantní jasnost mimo oblasti zákrytu. Obě minima jsou poměrně úzká a přechod z konstantního jasno do zákrytu je ostrý. Sekundární minimum bývá často výrazně mělké než primární.

Světelné křivky druhu  $\beta$  Lyrae se naopak vyznačují plynulou změnou jasnosti v celé své fázi, což naznačuje interagující elipsoidální hvězdy. Většinou se jedná o objekty s periodou delší než 1 den.

Světelné změny dvojhvězdy typu W UMa jsou podobně jako u předchozího typu plynulé. Obě minima dosahují podobné hloubky. Hvězdy této soustavy se nacházejí blízko sebe a většinou mají podobnou teplotu, někdy také společnou obálku. Periody zákrytových dvojhvězd tohoto typu bývají kratší než 1 den.

Tvar složek dvojhvězdy je ovlivněn jejich vzájemným gravitačním působením a také slapovými jevy. Významnou ekvipotenciální plochou mezi oběma hvězdami je Rocheova plocha, která kolem složek dvojhvězdy vytváří Rocheův lalok. Ten obklopuje hvězdu a vymezuje tak její objem. Dle míry vyplnění Rocheova laloku lze zavést klasifikaci dvojhvězd (Kopal 1955). Základní Kopalova klasifikace zahrnuje oddělené systémy, u kterých ani jedna složka zcela nezaplňuje svůj Rocheův lalok, polodotykové, kde je lalok vyplněn právě u jedné hvězdy, a dotykové neboli kontaktní, pro něž obě složky vyplňují, nebo dokonce přesahují Rocheovy laloky. Při přesahu obou laloků mají hvězdy společnou atmosféru. Příkladem kontaktního systému je hvězda W UMa.



Obrázek 1.2: Typy zákrytových dvojhvězd na základě tvaru fázové světelné křivky, a) CO Lac (typ Algol), b) V474 Lac (typ  $\beta$  Lyrae), c) BM UMa (typ W UMa), CCD pozorování J. Koláře z Observatoře Masarykovy univerzity ve filtru V.

# Kapitola 2

## Metody zpracování

### 2.1 CCD fotometrie

Jednou z nejstarších a nejdůležitějších pozorovacích metod v astronomii je fotometrie. Úkolem fotometrických pozorování je měření světelného toku přicházejícího od kosmických těles. První pozorování byla prováděna pomocí lidského zraku, který je ovšem velmi subjektivní. Objektivními detektory záření se staly fotografie, fotonásobiče a také CCD kamery, které se v současné době ve fotometrii uplatňují nejvíce.

#### 2.1.1 Princip CCD

Prvek CCD (charge-coupled devices) neboli zařízení s vázanými náboji je součástka, která byla vynalezena roku 1969 v Bellových laboratořích v USA (Boyle & Smith 1970). CCD čip je tvořen křemíkovou destičkou složenou z matice obrazových elementů (pixelů). Rozměry těchto elementů činí řádově jednotky mikrometru. Přicházející fotony elektromagnetického záření dopadají na povrch čipu. Díky fotoelektrickému jevu se v atomech křemíku uvolní záporně nabitá částice (elektrony). Ty jsou následně udržovány v pixelech, které za pomoci soustavy elektrod fungují jako potenciálové bariéry. Během expozice je každý pixel schopen pojmout desítky až stovky tisíc elektronů. Po dokončení expozice se zachycený náboj převádí na elektrický signál.

Pořízená data se ukládají jako snímky ve formátu FITS (Flexible Image Transport System). Kromě samotných dat obsahuje soubor také hlavičku, kde jsou v tabulce uloženy informace o snímku (kupříkladu teplota čipu, začátek a délka expozice). Množství signálu v každém pixelu se udává v jednotkách ADU (Analog to Digital Unit). Dynamický rozsah CCD kamery je dán A/D převodníkem. Pro nejčastěji používaný, šestnáctibitový převodník, činí dynamický rozsah 65 536 ADU.

Při přesvícení pixelu dochází k přetečení elektronů v potenciálové jámě. Elektronů, které se již do této jámy nedostanou, ovlivňují okolní jámy (blooming). Tento efekt lze odstranit pomocí elektrod, které přetečené elektrony odvádějí (anti-blooming).

Fotometrie CCD kamerou představuje řadu výhod. Během jednoho pozorování je možné nasnímat velký počet hvězd najednou, což při měření jasnosti proměnné hvězdy poskytuje možnost použít více srovnávacích hvězd. Tato výhoda se především uplatňuje u slabších hvězd, protože na snímku bývá obvykle velké množství hvězd s podobnou jasností, jakou má studovaná hvězda. Podobně jasná hvězda ke srovnání hvězdných velikostí většinou chybí při pozorování velmi jasných hvězd. Při snímání hvězdy s vyšším jasnem je zapotřebí volit kratší expoziční doby, čímž se ovšem může snížit přesnost měření.

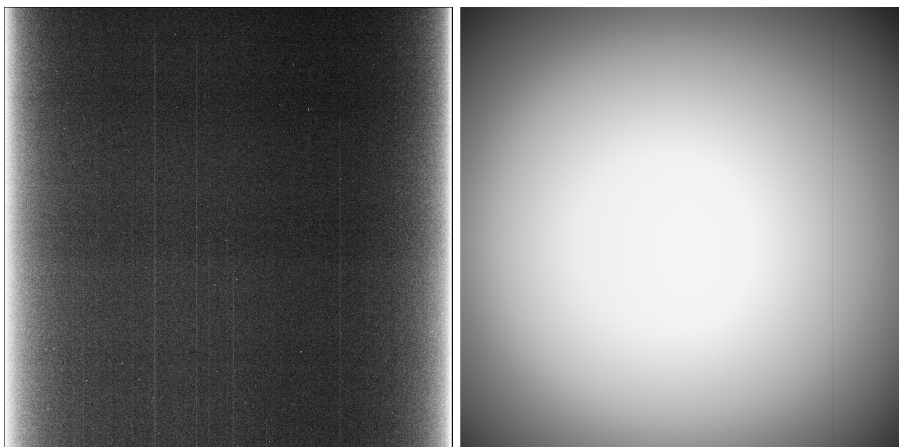
Důležitou vlastností čipu je jeho linearita. Počet elektronů, a tedy i výstupní signál, je přímo úměrný množství dopadajících fotonů. Kvantová účinnost, poměr mezi přicházejícími a registrovanými fotony, je pro CCD detektory mnohonásobně vyšší, než u jiných fotometrických přístrojů. Nejcitlivější CCD kamery mohou zaznamenat přes 90 % dopadajících fotonů (Howell 2006).

### 2.1.2 Korekční snímky

Surové snímky je nutné před jejich analýzou upravit. Vlivem tepelného pohybu elektronů vzniká termální šum, který způsobuje vznik temného proudu. Signál z CCD kamery je díky temnému proudu nenulový, i když na čip nedopadá žádné světlo. Kamera se z těchto důvodů musí chladiť. Přes chlazení není temný proud zanedbatelný. Kromě tepelného šumu je obraz zatížen také vyčítacím šumem vzniklým během vyčítání elektronů z jednotlivých pixelů a následného přenosu dat do počítače.

Pro korekci šumu se pořizuje *temný snímek* (dark frame). Ten se vytváří při zakryté optice se stejnou teplotou a expoziční dobou jako surové snímky. V průběhu pozorování se obvykle vytváří více temných snímků, které se poté prostřednictvím mediánu složí do jednoho výsledného. Odstranění šumu se provede odečtením temného snímku od dat s objekty.

Přicházející záření nedopadá na čip vždy rovnoměrně. V důsledku toho může být obraz zatížen například vinětací, kdy jsou okraje snímku tmavší než střed. Pixely CCD kamery nemají obecně vzato stejnou citlivost. Nehomogenita obrazových elementů vznikne při výrobě čipu. Rozdíl citlivostí mezi pixely může dosahovat až několika procent (Janík 2017). K eliminaci těchto vad slouží snímek rovnoměrně osvětlené plochy tzv. *flat field*. Vytvoření kvalitního flat fieldu je obtížnější než u temného snímku. Ideální doba pro jeho pořízení je krátce před východem nebo po západu Slunce, kdy na nebi ještě nejsou viditelné hvězdy. Snímá se rovnoměrně osvětlená část oblohy. Alternativou k tomuto postupu jsou



Obrázek 2.1: Ukázka temného snímku a flat fieldu, vytvořených na Observatoři Masarykovy univerzity.

tzv. dome flats. Při jejich pořízení je dalekohled namířen na rovnoměrně osvětlenou plochu v kopuli (např. bílé plátno). Při používání více barevných filtrů musí být pořízeny kalibrační snímky zvlášť pro každý filtr, jelikož se citlivost kamery liší v různých oblastech spektra. Na filtru se také mohou objevit nečistoty, které pro konkrétní filtr změní obraz. Samotný flat field obsahuje šum, který je odstraněn pomocí temných snímků, vytvářených přímo pro flat field. Série snímků pro rovnoměrné osvětlení se rovněž skládá do jednoho výsledného obrazu. Tímto obrazem jsou poté poděleny snímky s hvězdami.

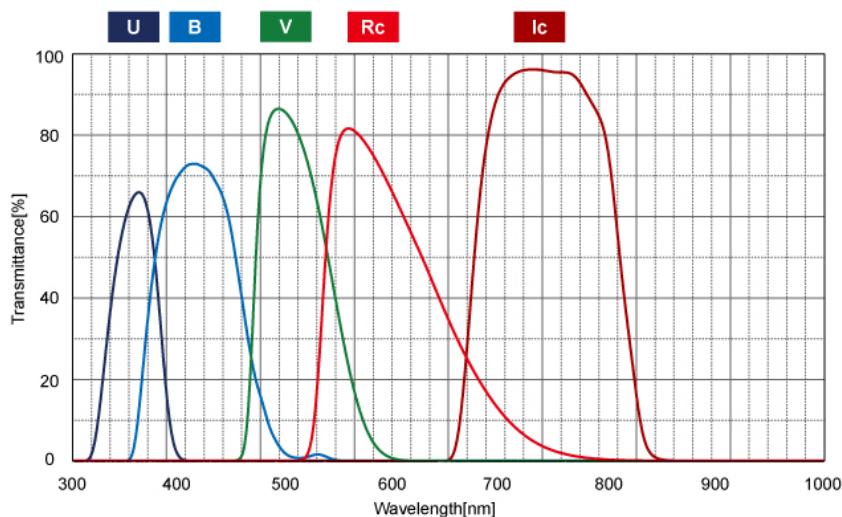
## 2.2 Fotometrické systémy

Detektory záření nejsou schopny pozorovat kosmické objekty v celé šíři elektromagnetického spektra. Byly zavedeny barevné filtry, které propouštějí záření pouze o daném intervalu vlnových délek. Jejich zavedení umožnilo získat alespoň přibližnou představu o spektru hvězd. Soustavy těchto filtrů tvoří fotometrické systémy. Velikost intervalu neboli šířka pásma propustnosti umožňuje rozdělit systémy do tří kategorií: širokopásmové s rozsahem propustnosti větším než 30 nm, středněpásmové s typickou šířkou mezi 10 a 30 nm a úzkopásmové, které propouští oblast jen několika nanometrů (např. OIII, H $\alpha$ ).

Johnson & Morgan (1953) zavedli první standardizovaný systém, zahrnující filtry *U* (maximum propustnosti 365 nm), *B* (440 nm) a *V* (540 nm). Tato sada byla rozšířena o filtry *R* (700 nm) a *I* (900 nm), později také *J*, *K*, *L*, *M* a *N*. Dnes je Johnsonův *UBVRI* systém nejrozšířenější a nejpoužívanější. Jeho značnou nevýhodou je velká šířka pásem propustnosti, díky které se filtry zčásti

překrývají (obrázek 2.3). Částečné překrytí filtrů  $U$  a  $B$  zabraňuje určení výšky Balmerova skoku. Strömngren (1956) navrhl nový středněpásmový systém  $ubvy$ , u něhož jsou filtry vlivem užšího pásu propustností lépe definovány.

Kromě již zmíněných existuje řada dalších systémů, jako jsou kupříkladu ženevský či systém astrometrické družice Hipparcos. V databázi ADPS je zmíněno 226 známých fotometrických systémů [e3].



Obrázek 2.2: Propustnosti filtrů Johnsonova systému v závislosti na vlnové délce, převzato ze zdroje [e4].

### 2.2.1 Barevný index

Barevný index  $CI$  určitého objektu je definován jako rozdíl hvězdných velikostí  $m_{\lambda_1}$  a  $m_{\lambda_2}$  ve dvou různých fotometrických filtrech:

$$CI = m_{\lambda_1} - m_{\lambda_2}. \quad (2.1)$$

Pro vlnové délky  $\lambda_1$  a  $\lambda_2$ , ve kterých se nachází maxima propustnosti filtrů, platí:  $\lambda_1 < \lambda_2$ . Barevné indexy mohou vypovídat o některých charakteristikách hvězd. Z indexu  $(B - V)$  lze určit povrchovou teplotu hvězd. Takto odvozená teplota se označuje jako *barevná teplota*  $T_b$  (Mikulášek & Zejda 2013) a platí pro ni následující vztah:

$$T_b = \frac{7300}{(B - V) + 0,52}. \quad (2.2)$$

*Efektivní teplota*  $T_{\text{ef}}$  se v obecném pojetí odlišuje od barevné teploty. Hodnota barevného indexu může být, především pro vzdálenější objekty, ovlivněna mezihvězdnou extinkcí, kdy je záření zeslabeno při průchodu mezihvězdnou látkou. V optickém oboru spektra extinkce způsobuje zčervenání objektů. Při odhadu teploty pomocí barevného indexu takto zčervenalé hvězdy bude spočtená hodnota menší, než jaká je skutečná efektivní teplota. Při korekci o mezihvězdnou extinkci se uplatňuje *bolometrická korekce*  $BC$ . Je definována jako rozdíl bolometrické a vizuální hvězdné velikosti, tento vztah platí jak pro pozorovanou hvězdnou velikost, tak absolutní:

$$BC = m_{\text{bol}} - m_{\text{v}} = M_{\text{bol}} - M_{\text{v}}. \quad (2.3)$$

Bolometrická korekce je zhruba nulová pro hvězdy spektrální třídy F s efektivní teplotou kolem 7000 K. Pro všechny hvězdy jiného spektrálního typu hodnota korekce klesá. V určitých případech činí až jednotky magnitud (Mikulášek & Zejda 2013).

## 2.3 Světelná křivka

K měření jasů objektů na snímcích se nejčastěji využívá aperturní fotometrie. Na snímku se kolem objektu vytvoří umělá clona (apertura). Výsledná informace o záření objektu je dána sečtením signálu, nacházejícího se uvnitř clonky. Použitím apertury se zajistí, aby byl měřen pouze jas hvězdy, která je pro pozorování důležitá. Kolem clonky je vytvořeno mezikružší, ve kterém se nenacházejí žádné objekty. V této oblasti se měří pozadí snímku, které se následně odečte od signálu z prvního měření. Tato metoda není matematicky příliš náročná a poskytuje spolehlivé výsledky. Lze ji uplatnit na většinu případů. Pro výzkum hustých hvězdných polí však není příliš výhodná, jelikož se v clonce mohou objevit také sousední hvězdy a zkreslit tak výsledky měření. Proto se využívá profilové fotometrie, která stanovuje signál z proloženého profilu hvězdy.

Z mnoha hodnot hvězdných velikostí v různých časových okamžicích lze sestavit světelnou, případně fázovou křivku daného tělesa. Při pozorování může být zaznamenán extrém světelné křivky. Přesná znalost času minima hraje důležitou roli ve studiu zákrytových dvojhvězd. Slouží k určení či zpřesnění periody, popřípadě k odhalení jejích časových změn. Pozorování samotného okamžiku ovšem nestačí. Aby byl okamžik určen s dostatečnou přesností, měří se jas objektu v časové škále kolem času extrému. V nejlepším možném případě je zaznamenán celý průběh světelných změn.

Existuje mnoho odlišných způsobů, jak stanovit čas minima. Kwee & van Woerden (1956) přišli s metodou založenou na symetrii a velmi dobrém pokrytí křivek v části poklesu a nárůstu hvězdné velikosti během zákrytu. Kweeova-van



Woerdenova metoda však selhává, neboť světelné křivky bývají často asymetrické. Před aplikací tohoto způsobu výpočtu je proto nutné pečlivě zvážit jeho použití.

## 2.4 $O-C$ diagram

Jedním ze způsobů detekce změn v chování zákrytových dvojhvězd je analýza  $O-C$  diagramu. Tento graf ukazuje rozdíl mezi pozorovaným ( $O$  – observed) a vypočítaným ( $C$  – calculated) okamžikem extrému. Na vodorovnou osu se vynáší čas, převážně však epocha  $E$ . Epocha vyjadřuje počet cyklů, které nastaly od základního okamžiku minima  $M_0$ . Vychází z podobného vztahu jako rovnice (1.3). V tomto případě je důležitá celočíselná část, kterou zajistí funkce floor:

$$E = \text{floor}\left(\frac{t - M_0}{P}\right). \quad (2.4)$$

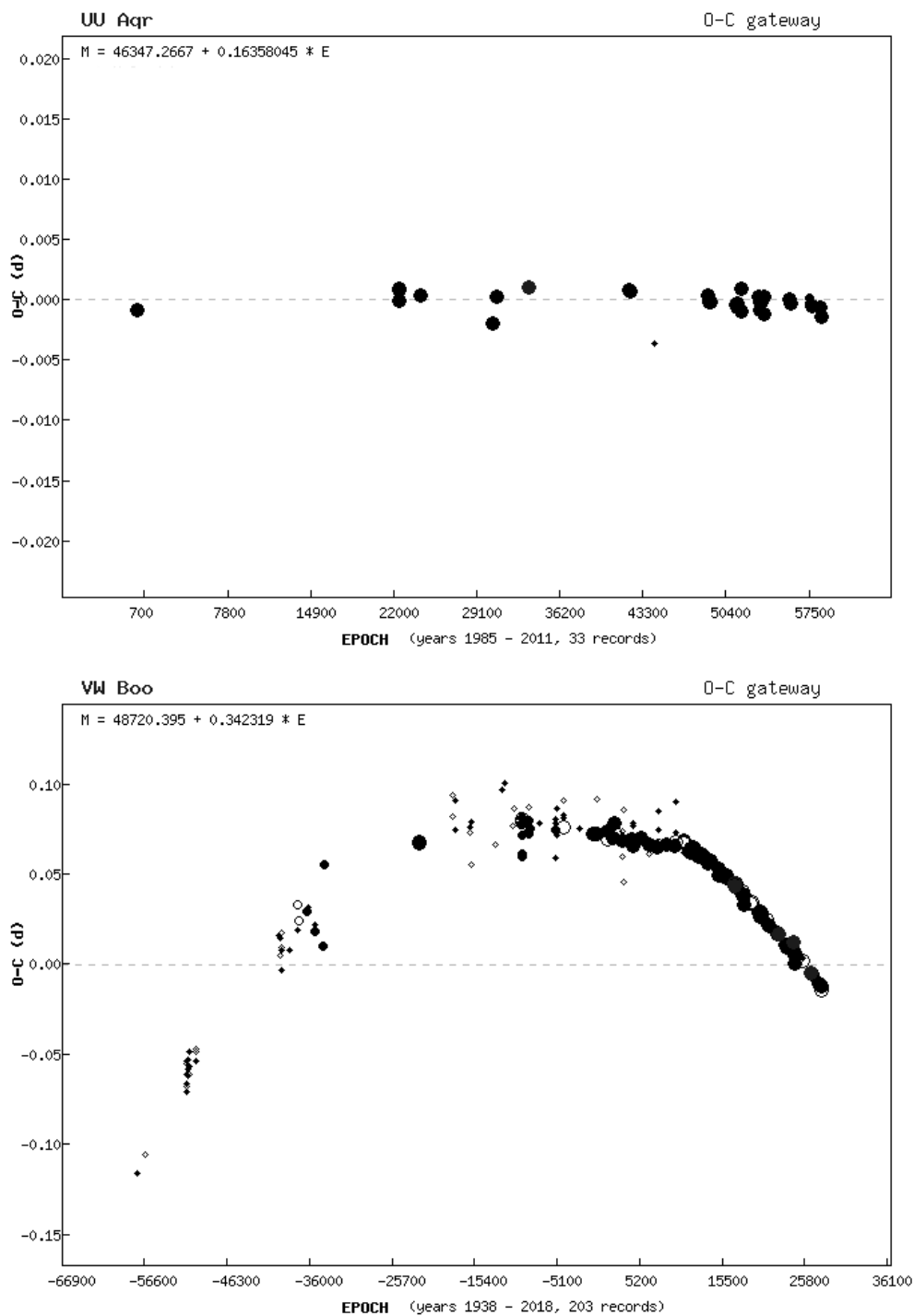
Ze znalosti periody  $P$  daného systému a předpokladu, že je tato perioda konstantní, lze spočít předpovězený čas minima:

$$C = M_0 + PE. \quad (2.5)$$

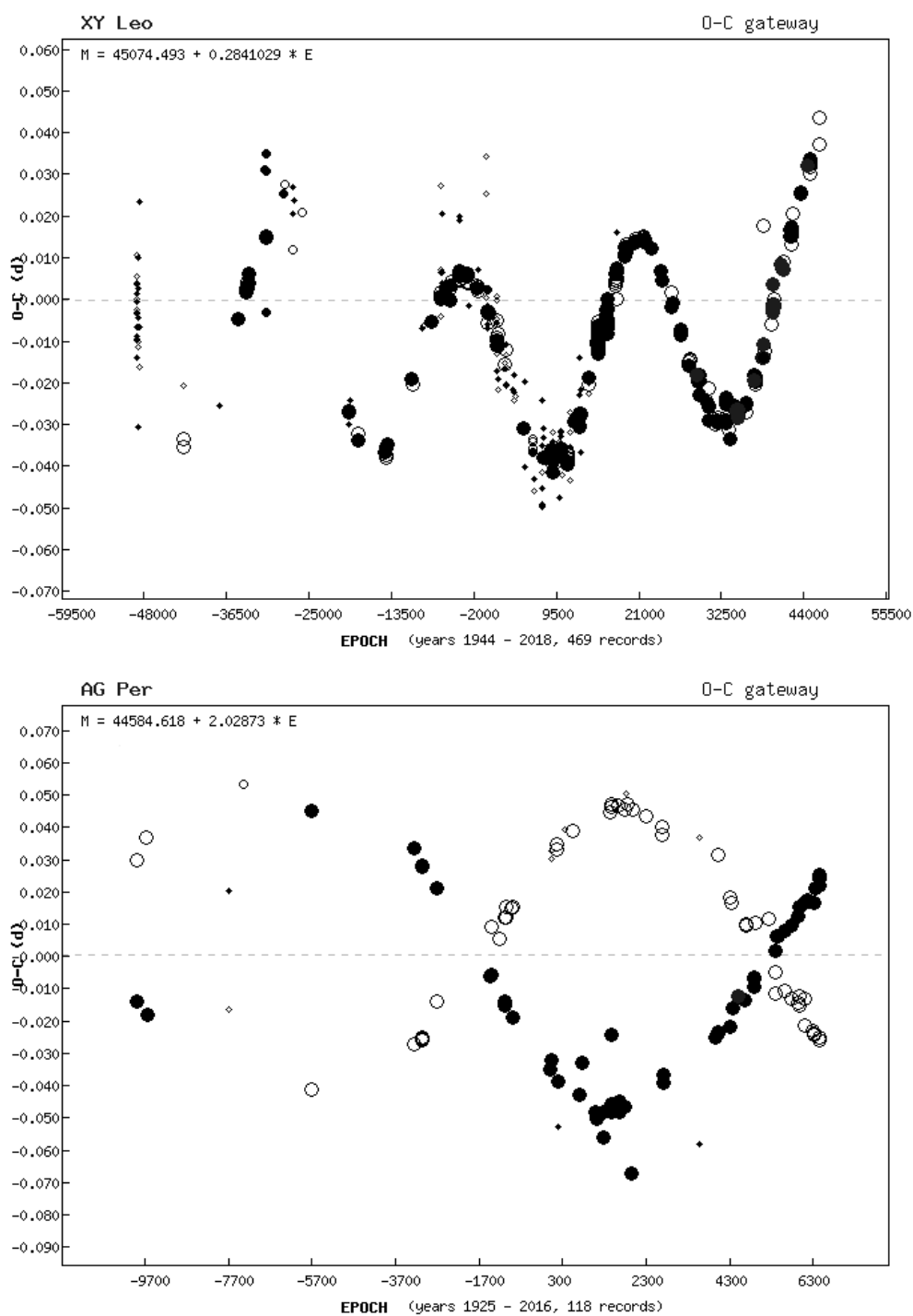
V praxi může nastat situace, kdy čas základního minima nebo perioda nejsou určeny správně.  $O-C$  diagram slouží k přesnějšímu stanovení těchto elementů. Rovněž lze z jeho tvaru odhalit složitější strukturu zákrytových systémů. Nastává několik možných případů (Mikulášek & Zejda 2013, Harmanec et al. 2017):

- přímka s nulovou směrnici, průměrná hodnota  $O-C$  je rovna 0: perioda a také základní minimum se správnými hodnotami, perioda je konstantní (obrázek 2.3 nahoře),
- přímka s nulovou směrnici, průměrná hodnota  $O-C$  není nulová: správná a konstantní hodnota periody, čas základního minima je ovšem potřeba opravit,
- přímka s nenulovou směrnici: perioda je konstantní, avšak nesprávně určena, u takového grafu je zapotřebí provést opravu o směrnici přímky, případně opravit základní okamžik, pokud přímka neprochází nulovým bodem,
- parabola: lineární změna periody (obrázek 2.3 dole),
- skoková změna periody (obrázek 2.5 nahoře),

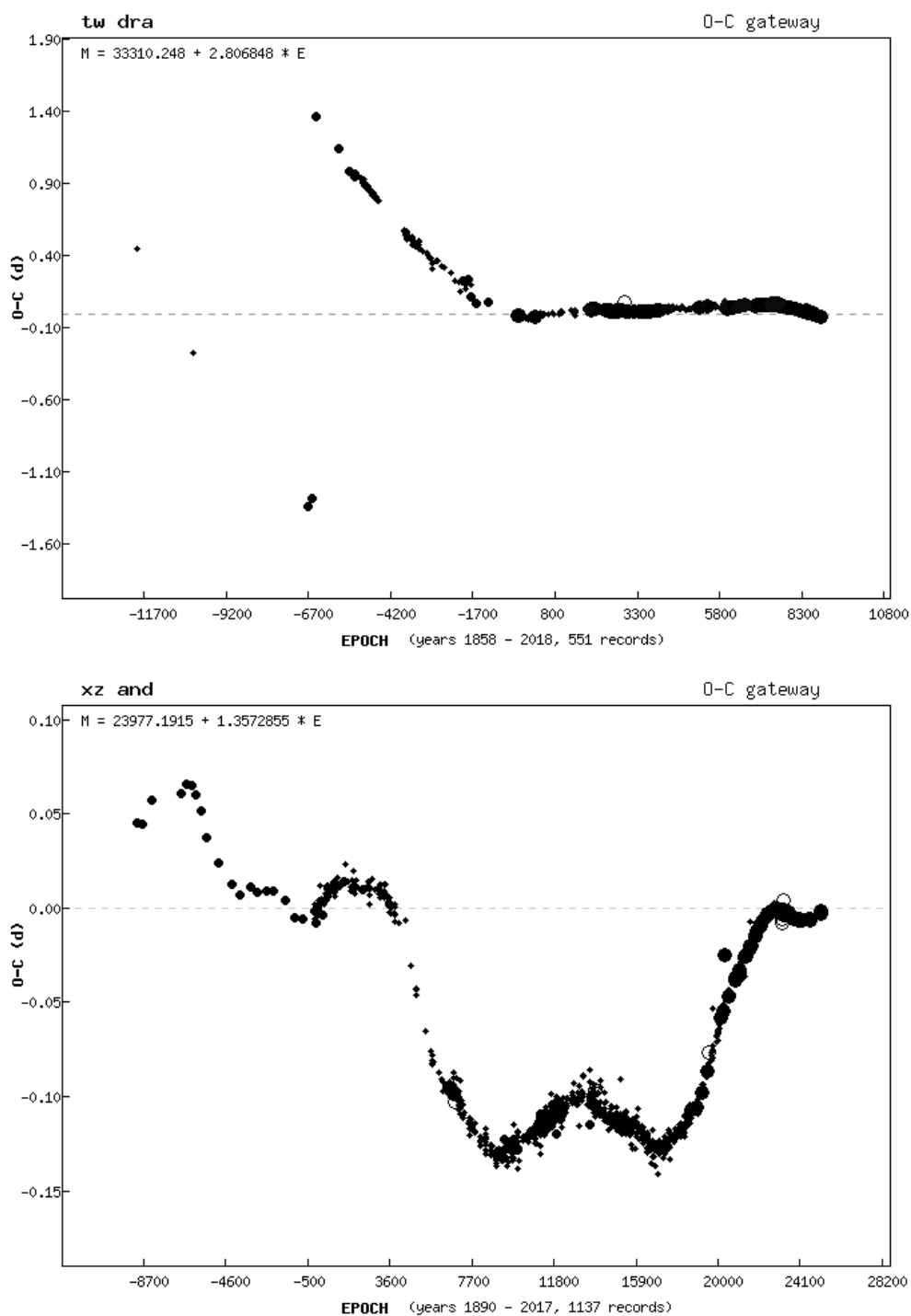
- sinusoidální změny: nejčastěji se jedná o tzv. light-time effect (dále LiTE), kdy kolem zákrytové dvojhvězdy obíhá třetí těleso, které způsobuje kolísání těžiště studovaného systému,
- sinusoida, primární minimum s opačnou fází než sekundární: stáčení přímký apsid (spojnice mezi periastrum a apoastrem) (obrázek 2.4 nahoře),
- kombinace několika efektů (obrázek 2.4 dole),
- chaotické změny (obrázek 2.5 dole).



Obrázek 2.3: Ukázky  $O-C$  diagramů, nahoře konstantní perioda, dole zkracování periody, vyplněné body znázorňují primární minimum, kroužky sekundární minimum, převzato a upraveno z  $O-C$  brány [e5].



Obrázek 2.4: Ukázky  $O-C$  diagramů, nahoře kombinace prodlužování periody a LiTE, dole apsidální pohyb, vyplněné body znázorňují primární minimum, kroužky sekundární minimum, převzato a upraveno z  $O-C$  brány [e5].



Obrázek 2.5: Ukázky  $O-C$  diagramů, nahoře skoková změna periody, dole chaotické změny, vyplněné body znázorňují primární minimum, kroužky sekundární minimum, převzato a upraveno z  $O-C$  brány [e5].

# Kapitola 3

## Analýza získaných dat

### 3.1 Výběr objektů

Hlavním objektem, na který se tato práce zaměřuje, je těsný zákrytový systém GX Lac, nacházející se v souhvězdí Ještěrky. Tato hvězda byla vybrána pro výzkum především z důvodu malé prozkoumanosti, která je zapříčiněna hlavně delší oběžnou periodou. Základní informace o tomto objektu jsou shrnuty v tabulce 3.1. V blízkém okolí ve vzdálenosti přibližně 2,4' se nachází těsná dvojhvězda CO Lac. Tato soustava již byla v minulosti několikrát zkoumána, přesto však pro svůj apsidální pohyb zůstává zajímavým objektem ke studiu. Toto hvězdné pole obsahuje také další zákrytový systém V474 Lac. Vzhledem k malé úhlové vzdálenosti těchto objektů bylo možné všechny proměnné hvězdy snímat současně. Tento fakt přináší značnou výhodu. V průběhu jedné noci lze měřit jasnost jednotlivých hvězd v různých fázích a zvyšuje se tak pravděpodobnost zachycení minima.

### 3.2 Pořízení a zpracování snímků

Vlastní snímky byly pořízeny na Observatoři Masarykovy univerzity v Brně na zeměpisných souřadnicích  $16^{\circ}35'00,16''$  v.d.,  $49^{\circ}12'16,20''$  s.š. a nadmořské výšce 305 m [e8]. Pro pozorování byl využit zrcadlový dalekohled typu Newton s průměrem primárního zrcadla 0,60 m a ohniskovou vzdáleností 2,78 m, jako snímací element sloužila CCD kamera G4-16 000.

Určité množství snímků bylo zatíženo vadami (oblačnost, letadla, kosmické záření, rozmazání obrazu), kvůli kterým je nebylo možné použít. V rámci každého pozorování byly vytvořeny temné snímky. Pořízení flat fieldů bylo možné pouze za příznivého počasí. V opačném případě byly vzaty korekční snímky z nejbližší možné pozorovací noci na observatoři. Fotometrická data byla sbírána

Tabulka 3.1: Základní parametry GX Lac.

Parametr	Hodnota	Zdroj
Rektascenze	22 <sup>h</sup> 46 <sup>m</sup> 16,78 <sup>s</sup>	[e6]
Deklinace	+56°51′07,74″	[e6]
Spektrální typ	B8	[e1]
Vizuální hvězdná velikost [mag]	10,1	[e1]
Maximum poklesu hvězdné velikosti [mag]	0,3	[e1]
Čas základního minima v HJD [dny]	2 452 504,3728	minimum [e7] z měření od Kreiner
Perioda [dny]	6,3549	Häussler (1980)
Vzdálenost [pc]	1150	Gaia-Collaboration (2018)

ve filtrech  $B$ ,  $V$  a  $R$ . Kalibrace na standardní systém nebyla provedena z důvodu absence korekčních fotometrických snímků, které by bylo možno pořídit pouze za velmi kvalitních podmínek. Provedení kalibrace však není nezbytné, jelikož se práce věnuje čistě změně jasnosti hvězd a nikoliv měření absolutních hvězdných velikostí.

Hvězdné pole s těmito objekty lze díky své poloze na hvězdné obloze efektivně pozorovat od druhé poloviny jara až téměř do konce podzimu. Vlivem odlišné délky noci během tohoto období se měnilo také množství získaných snímků. Jednotlivé počty u každého pozorování z roku 2018 ukazuje tabulka 3.4.

Oblast studovaných hvězd umožňuje použití aperturní fotometrie, jelikož nejde o příliš husté hvězdné pole. Ke zpracování dat byl zvolen program CMunipack verze 2.1, který aperturní fotometrii obsahuje. Program je primárně určen k analýze snímků a vytvoření světelné křivky proměnných hvězd. Prvotním krokem je kontrola snímků s hvězdami a jejich oprava o korekční snímky. Dále je provedena fotometrie, při které jsou na každém obraze určeny polohy hvězd. Poté dochází ke srovnání snímků, jehož cílem je zjistit, které hvězdy si na jednotlivých snímcích odpovídají. Hvězdy mohou být například rozmazané či zdeformované, tyto snímky nemohou být použity. Po této redukci je vybrána proměnná hvězda (*var*). Volí se rovněž srovnávací (*comp*) a kontrolní hvězda (*check*). Kontrolní hvězdy se používají pro případné zjištění proměnnosti srovnávací hvězdy. Svě-

Tabulka 3.2: Základní parametry CO Lac.

Parametr	Hodnota	Zdroj
Rektascenze	$22^{\text{h}}46^{\text{m}}30,00^{\text{s}}$	[e6]
Deklinace	$+56^{\circ}49'31,63''$	[e6]
Spektrální typ	B8,5	[e1]
Vizuální hvězdná velikost [mag]	10,28	[e1]
Největší pokles hvězdné velikosti [mag]	0,61	[e1]
Čas základního minima v HJD [dny]	2 453 651,34418	Švaříček et al. (2008)
Perioda [dny]	1,5422075	Švaříček et al. (2008)
Vzdálenost [pc]	980	Gaia-Collaboration (2018)

telná křivka vzniká po výběru optimální velikosti apertury, která se volí tak, aby chyby měření byly co nejmenší.

Pro fotometrii GX Lac a CO Lac byla zvolena jedna společná srovnávací (*comp*) a kontrolní hvězda (*check1*). V474 Lac měla samostatnou srovnávací a kontrolní hvězdu. Pro každou proměnnou hvězdu byla také určena druhá kontrolní hvězda (*check2*). Tyto hvězdy byly vybrány v blízkém okolí proměnných hvězd. Důležitými údaji k jejich výběru byly co možná nejpodobnější hvězdné velikosti a hodnoty barevného indexu ( $B - V$ ). Tyto údaje jsou zapsány v tabulce 3.5, mapy s vyznačenými hvězdami jsou ukázány na obrázcích P.1, P.2 a P.3. U srovnávacích, ani u žádné z kontrolních hvězd nebyla prokázána proměnnost (z databáze VSX [e1]).

### 3.3 Určení minim

Všechna měření byla nahrána do databáze AMPER [e9]. V tomto archivu pozorování proměnných hvězd byly také určeny okamžiky minim. Profily extrémů lze popsat pomocí modelové funkce, která byla vytvořena z již vložených pozorování. Tato funkce závisí hlavně na geometrii systému a relativní jasnosti složek. Modelovou funkci navrhl a popsal Mikulášek (2015). Tento postup nelze v databázi



Tabulka 3.3: Základní parametry V474 Lac.

Parametr	Hodnota	Zdroj
Rektascenze	$22^{\text{h}}45^{\text{m}}30,69^{\text{s}}$	[e6]
Deklinace	$+56^{\circ}28'31,76''$	[e6]
Vizuální hvězdná velikost [mag]	12,48	[e1]
Největší pokles hvězdné velikosti [mag]	0,53	[e1]
Čas základního minima v HJD [dny]	2 453 294,988	[e5]
Perioda [dny]	0,765333	[e5]
Vzdálenost [pc]	650	Gaia-Collaboration (2018)

AMPER aplikovat na příliš neprozkoumané objekty, kde není fáze zákrytu dobře známa. V případě obou studovaných proměnných hvězd však byly tyto fáze dostatečně pokryty. Vyjma vlastních byla použita také pozorování Miloslava Zejdy a Reinholda F. Auera.

### 3.4 Sestrojení $O-C$ diagramu

Při analýze  $O-C$  diagramu GX Lac byla použita již zmíněná pozorování. Také se použily časy minim z několika dostupných zdrojů:  $O-C$  brána [e5], Nelson Database of Eclipsing Binary  $O-C$  Files [e7] a Lichtenknecker Database of the BAV [e10]. Cílem vyhledávání těchto minim bylo získat co největší počet bodů do diagramu a tím zvýšit přesnost určení efemerid.

Uitterdijk (1934) uvádí okamžik primárního minima na 2 420 753,536 dne v heliocentrickém juliánském datu. Světelná křivka je ovšem tvořena pouhými čtyřmi body na sestupné větvi, z nichž je ten s největším poklesem jasnosti považován za minimum. V uvedeném čase je zaznamenán pokles 0,24 mag, nicméně maximální pokles hvězdné velikosti GX Lac činí zhruba 0,30 mag, tudíž skutečné minimum nebylo pozorováno. Proto byly body proloženy přímkou a okamžik tohoto minima byl stanoven jako čas, při kterém pokles dosáhl očekávatelné hodnoty. Původní měření tak bylo opraveno na čas  $(2\,420\,753,57 \pm 0,01)$  dne. Ne-

Tabulka 3.4: Počet snímků v jednotlivých filtrech.

Pozorovací noc	Filtr $B$	Filtr $V$	Filtr $R$
30.4./1.5	31	31	33
7./8.5.	27	33	33
30./31.5.	44	42	44
19./20.7.	27	27	28
5./6.9.	28	28	29
8./9.9	76	75	71
11./12.9.	53	61	62
12./13.9.	66	65	66
20./21.9.	82	81	76
24./25.9.	51	61	49
27./28.9.	88	85	81
16./17.10.	26	20	11
17./18.10.	23	27	25

jistota byla určena pouze odhadem, vzhledem k malému množství bodů nebylo realizovatelné aplikovat jiný způsob proložení světelné křivky.

Data, která shrnuje Häussler (1980), nejsou zveřejněna kompletně, k dispozici jsou pouze časy extrémů. Zde se však nejedná o cílenou fotometrii jednoho objektu, nýbrž o systematická pozorování větší části hvězdné oblohy. V publikaci je uvedeno, že jeden bod světelné křivky vznikl v průměru zhruba jednou za měsíc. S největší pravděpodobností se nejedná o minima, ale o body na sestupné či vzestupné větvi křivky. Hodnoty  $O-C$  z těchto pozorování se výrazně odlišují od ostatních bodů v diagramu.

Časy minim u pozorování, která byla provedena ve více filtrech, byly zprůměrovány. Celkově bylo zachyceno dvacet primárních a šest sekundárních minim. Z důvodů menšího množství minim byla použita veškerá dostupná data. Nejistoty dat jsou ve většině případů nedohledatelné, nebo diskutabilní. Při analýze  $O-C$  diagramu byla z těchto důvodů použita metoda robustní regrese, kterou popisují Mikulášek & Zejda (2013). V potaz nebyla brána sekundární minima, jelikož jsou mělká a určené okamžiky jsou pravděpodobně hůře určeny než u primárních minim.

Tvar  $O-C$  grafu GX Lac je přímka s kladnou směrnici  $a_1$ , která neprochází počátkem, tudíž zde nastane oprava periody o směrnici přímky a zpřesní se čas základního minima o posunutí  $a_0$  vůči počátku. Na počátku byly body proloženy přímkou, přičemž bylo předpokládáno, že váhy všech bodů jsou stejné. Následně

Tabulka 3.5: Přehled hvězdných velikostí ve filtru  $V$  a barevných indexů  $(B - V)$  vybraných hvězd, převzato z [e6].

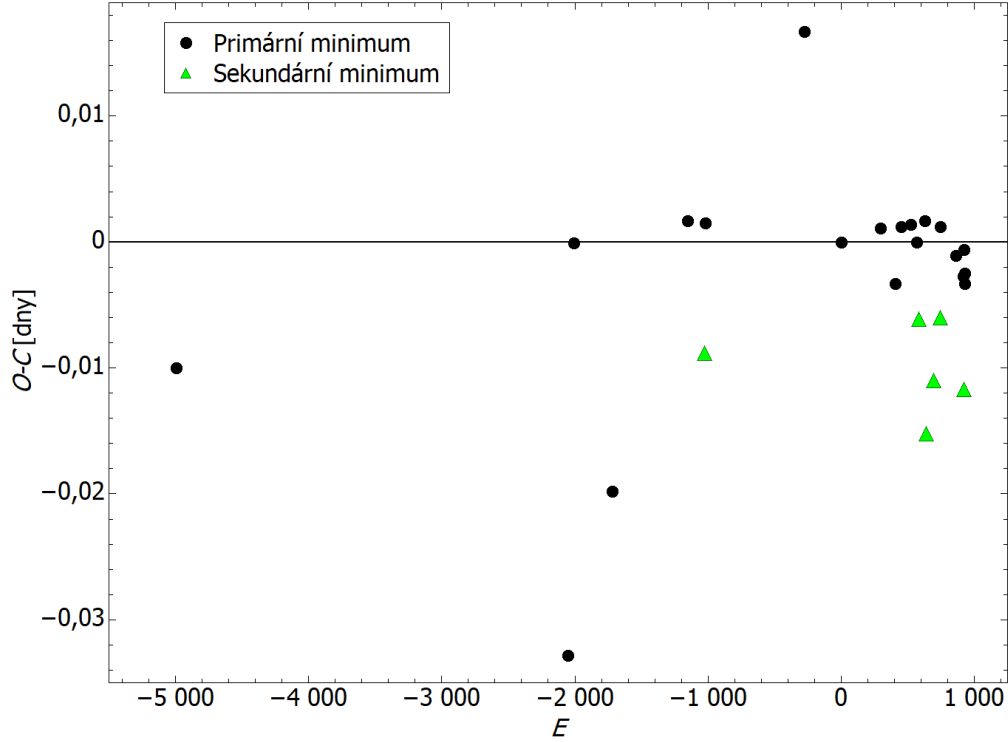
Ty hvězdy	Název hvězdy	$V$ [mag]	$(B - V)$ [mag]
Proměnná	GX Lac	10,18	0,17
Proměnná	CO Lac	10,40	0,06
Proměnná	V474 Lac	12,48	0,83
Srovnávací pro GX a CO Lac	TYC 3992-1927-1	11,35	0,16
Srovnávací pro V474 Lac	TYC 3992-2222-1	11,64	0,11
Kontrolní pro GX a CO Lac	TYC 3992-2252-1	11,41	0,38
Kontrolní pro GX Lac	TYC 3992-1844-1	12,32	0,27
Kontrolní pro CO Lac	TYC 3992-1741-1	10,90	0,63
Kontrolní pro V474 Lac	TYC 3992-2099-1	11,58	0,56
Kontrolní pro V474 Lac	HD 240056	9,73	0,49

byly stanoveny nejistoty  $\sigma$  bodů jako odchylky od modelové přímky. Váhy  $w$  byly spočteny z těchto nejistot a koeficientu  $K = 10^{-5}$ , který byl volen tak, aby se hodnoty vah pohybovaly kolem jednotek až stovek, pomocí vztahu:

$$w = \frac{K}{\sigma^2}. \quad (3.1)$$

Tímto byly získány váhy pro jednotlivé časy minim a dále byl diagram proložen přímkou se započtením těchto vah. Tento výsledek nemusí být sám o sobě dostatečně přesný. Aby se zpřesnily hodnoty vah, byly provedeny čtyři postupné iterace, po kterých byly získány tyto parametry:  $a_0 = (-0,0053 \pm 0,0001)$  dne,  $a_1 = (0,0003417 \pm 0,0000001)$  dne.

Nejistoty určení směrnice a posunutí přímky představují rovněž nejistoty nových hodnot efemerid, které po opravě činí:  $P = (6,3552417 \pm 0,0000001)$  dne a  $M_0(\text{HJD}) = (2\,452\,504,3675 \pm 0,0001)$  dne. Pro nové parametry byl sestaven  $O-C$  diagram, znázorněný na obrázku 3.1. Primární minima se celkem dobře pohybují kolem vodorovné osy, novější časy minim ukazují lehký trend k záporným hodnotám  $O-C$ . Pro sekundární minima byl zaznamenán jistý systematický posun zhruba o  $-0,01$  dne.

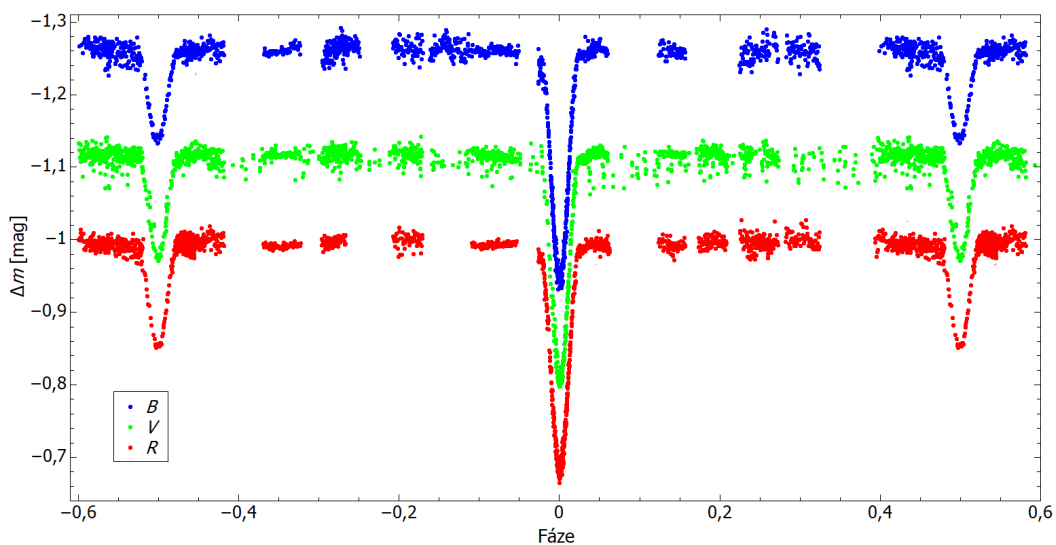


Obrázek 3.1:  $O-C$  diagram dvojhvězdy GX Lac.

### 3.5 Model systému

Po korekci efemerid GX Lac bylo možné sestavit její fázovou křivku (obrázek 3.2). Z efemerid, uvedených v tabulkách 3.2 a 3.3, byly sestaveny fázové diagramy také pro CO Lac a V474 Lac (obrázek P.6 a P.7). Jednoduchá modelace systému GX Lac byla provedena v programu PHOEBE (PHysics Of Eclipsing BinariEs) verze 0.32, který představili Prša & Zwitter (2005). Funkcí tohoto programu je analýza světelných křivek různých druhů zákrytových dvojhvězd pomocí WD kódu (Wilson & Devinney 1971). Do programu byla vložena data ve filtru  $V$ , která byla rozšířena o pozorování z ASAS-SN Sky Patrol [e11]. Díky těmto datům obsahovalo pásmo  $V$  nejvíce bodů a byla v něm pokryta téměř celá fáze.

Po nahrání dat do programu následovalo zafixování známých údajů. Pomocí informací ze zdroje [e12] byla ze spektrálního typu GX Lac odhadnuta efektivní teplota  $T_{\text{ef1}}$  primární složky na 12 500 K. Dále byly jako neměnné veličiny nastaveny efemeridy určené z  $O-C$  diagramu. Systém byl díky tvaru světelné křivky považován za oddělený s kruhovou dráhou obou hvězd. Postupným fito-



Obrázek 3.2: Fázová křivka GX Lac.

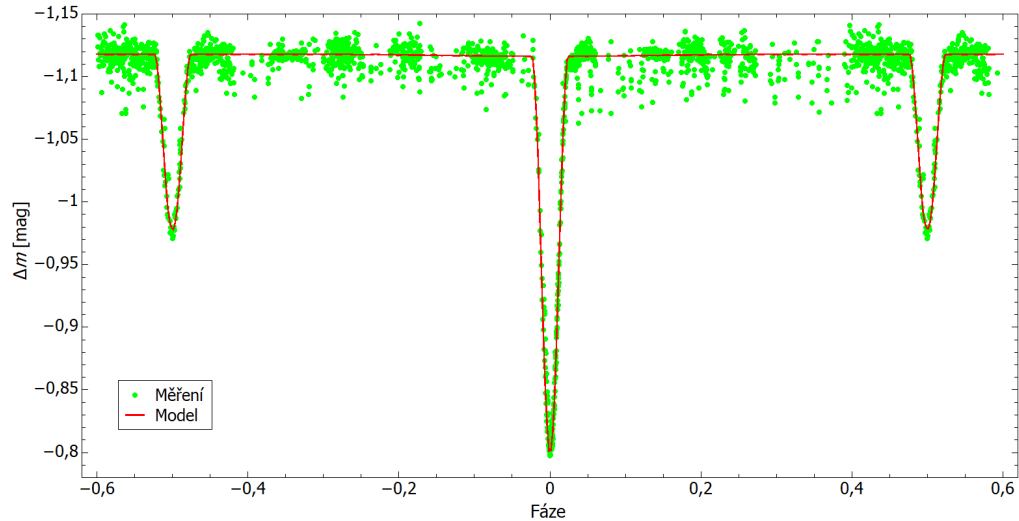
váním parametrů se dospělo k modelové křivce, která dává přibližnou představu o vlastnostech této hvězdné soustavy.

Výsledný model, vzniklý v programu PHOEBE, je ukázán na obrázku 3.3. Z modelu lze vyčíst některé parametry, jako jsou poloměry  $R_{1,2}$  obou hvězd, vztahené k velké poloose  $a$ , poměr hmotností  $q$  sekundární vůči primární složce, absolutní hvězdné velikosti  $M_{\text{bol}1,2}$ , efektivní teplota  $T_{\text{ef}2}$  sekundáru a inklinací úhel  $i$ . Hodnoty těchto veličin jsou shrnuty v tabulce 3.6. Některé z charakteristik nebyly určovány přímo a program nedokáže určit jejich nejistoty. Pro ostatní veličiny byly nejistoty stanoveny při fitování.

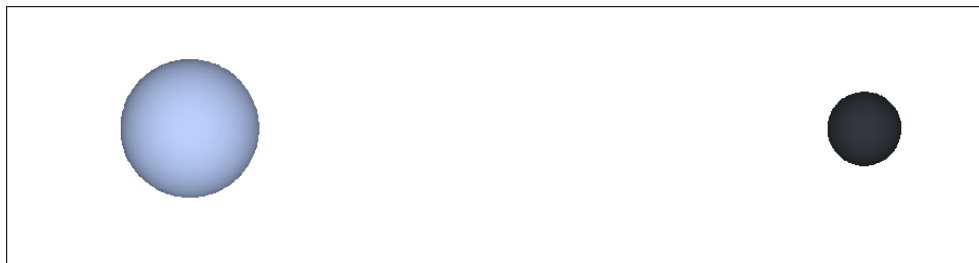
Tabulka 3.6: Vypočtené veličiny systému GX Lac.

Veličina	Hodnota	Nejistota
$R_1/a$	0,102	0,001
$R_2/a$	0,056	0,001
$q$	0,49	—
$M_{\text{bol}1}$ [mag]	1,35	—
$M_{\text{bol}2}$ [mag]	4,19	—
$T_{\text{ef}2}$ [K]	8 790	10
$i$ [°]	86,88	0,01

Fit dobře vystihuje tvar fázové křivky, rezidua se většinou nacházejí pod hranicí 0,02 mag, jak je vidět na křivce reziduí (obrázek P.8). V oblastech konstantní jasnosti se jedná o přirozený rozptyl hodnot vzniklý šumem. Primární a sekundární minimum se nemusí zcela přesně shodovat s modelem, náznaky drobné systematické chyby se projevují na sestupných i vzestupných větvích.



Obrázek 3.3: Výsledný model fázové křivky GX Lac.



Obrázek 3.4: Grafické znázornění modelu GX Lac ve fázi 0,75, obraz byl vytvořen v programu StarLight Pro verze 2.1.39.

### 3.6 Diskuze výsledků

Vlastní fotometrická měření spolu s dalšími použitými pozorováními zaplňují téměř celou fázi oběhu GX Lac. Modelace v programu PHOEBE se shoduje s pozorováním. Přes nízkou hodnotu reziduí však model nemusí být správný.

Efektivní teplota primární složky byla pouze odhadnuta pomocí spektrálního typu. V místech zákrytu dochází k jistým drobným nepřesnostem, které by mohly dokazovat excentrickou povahu systému. Tyto odchylky jsou ovšem na hranici detekovatelnosti a nemohou být z dostupných dat jednoznačně prokázány. Jiná modelace této dvojhvězdy nebyla doposud provedena a tudíž nelze parametry určené modelem porovnat s jinými pracemi. Pro zpřesnění modelu a určení dalších fyzikálních parametrů je potřeba provést další fotometrická a spektroskopická měření.

Analýza  $O-C$  diagramu GX Lac vedla k výpočtu nových efemeridových hodnot. Některé okamžiky minim, zejména u starších pozorování (Uitterdijk 1934, Häussler 1980), nebyly určeny zcela přesně. Historická měření jsou však velice cenná a jejich vyloučení z datových souborů by nebylo nejvhodnější možností. Robustní regrese při analýze diagramu zajistila, aby byl v grafu zohledněn každý bod s odpovídající vahou. Použití odlišného postupu by nemuselo být účinné, zvláště pak pokud by měl jeden či malý počet nepřesně určených bodů výrazně ovlivnit výsledky měření.

U koncových bodů primárních minim nastává mírný trend, který by mohl znamenat změnu periody. Případná chyba mohla nastat během výpočtu okamžiků těchto minim v databázi AMPER. Odchýlení oproti očekávaným hodnotám však není příliš výrazné a nastává v krátkém časovém období. K objasnění trendu je zapotřebí více nasnímaných minim. Možným vysvětlením posunu sekundárních minim oproti nulové hodnotě  $O-C$  může být nenulová excentricita systému. V modelaci není její vliv jasně rozpoznatelný, ovšem v diagramu  $O-C$  se projevuje zřetelněji. Potvrzení excentricity systému však vyžaduje další fotometrická měření.

# Závěr

V této práci byla studována proměnná hvězda GX Lac, jedná se o těsný zákrytový systém typu Algol. Fotometrická měření byla provedena během roku 2018 na Observatoři Masarykovy univerzity v Brně. K pozorování byly použity zrcadlový dalekohled s průměrem 0,60 m a CCD kamera G4-16 000. Kromě GX Lac byly snímány také zákrytové dvojhvězdy CO Lac a V474 Lac. Snímky ve fotometrických filtrech  $B$ ,  $V$  a  $R$  byly zpracovány v programu CMunipack. Z pozorování byla sestrojena fázová křivka GX Lac. Díky přidání dalších dostupných dat byla pokryta téměř celá fáze.

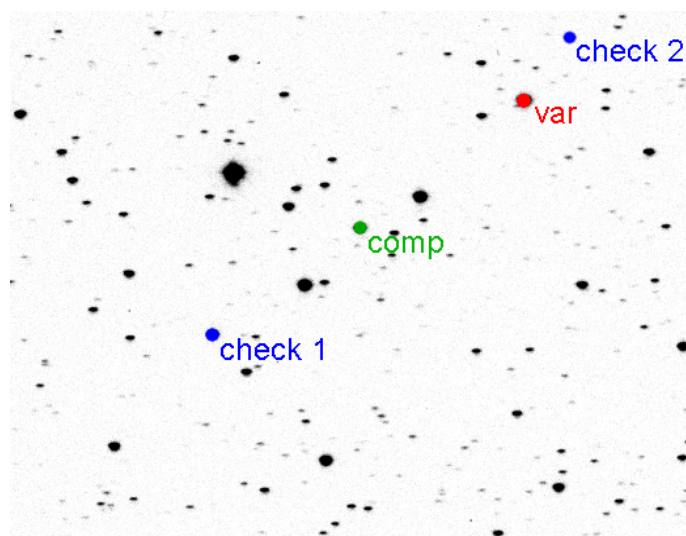
Okamžiky zachycených extrémů byly určeny na základě modelové křivky v databázi AMPER. Následně byl sestaven  $O-C$  diagram. Po pečlivém vyhledávání všech zaznamenaných extrémů obsahoval tento graf dvacet bodů pro primární minimum a šest pro sekundární. Tvar diagramu ukazoval na nesprávné stanovení oběžné periody systému a času základního minima. Analýza proběhla metodou robustní regrese, při které byla každému bodu přiřazena odpovídající váha. Jelikož u většiny okamžiků minim nebyly stanoveny jejich nejistoty, nebo byly pouze odhadnuty, bylo použítí robustní regrese zcela namístě. Body byly proloženy přímkou a z parametrů přímky byly získány nové hodnoty efemerid. Oběžná perioda byla opravena na hodnotu  $(6,3552417 \pm 0,0000001)$  dne a okamžik základního minima na  $(2\,452\,504,3675 \pm 0,0001)$  dne.

Nově sestrojený  $O-C$  diagram ukazuje, že nové hodnoty efemerid jsou přesnější než původně použité. U novějších primárních minim je patrný mírný trend. S ohledem na malé odchýlení a krátkou dobu trvání nelze trend zatím objasnit. Okamžiky sekundárních minim jsou systematicky posunuty do záporných hodnot  $O-C$ . Tento pokles může být projevem excentricity systému.

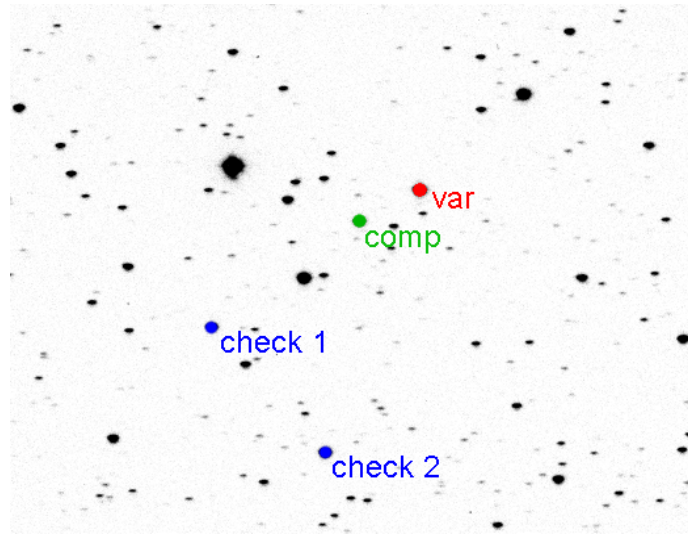
V programu PHOEBE byla provedena jednoduchá modelace fázové křivky. Fitovaná křivka dobře odpovídá měření a z modelu tak bylo možné určit několik fyzikálních parametrů, které dávají přinejmenším rámcovou představu o vlastnostech této dvojhvězdy. Lehké odchylky v oblastech zákrytu mohou být způsobeny excentricitou systému, což je naznačeno již u sekundárních minim v  $O-C$  diagramu. Jedná se zřejmě o vůbec první model GX Lac, a proto se jeho konzistentnost musí potvrdit dalšími pozorováními a modelováním.



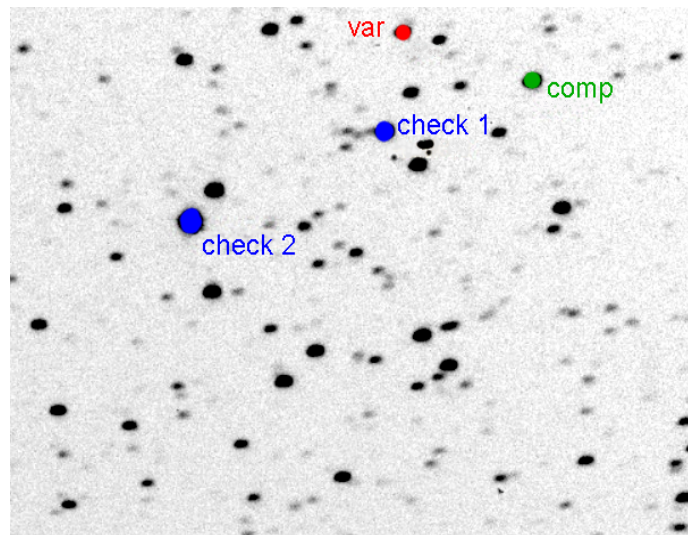
# Přílohy



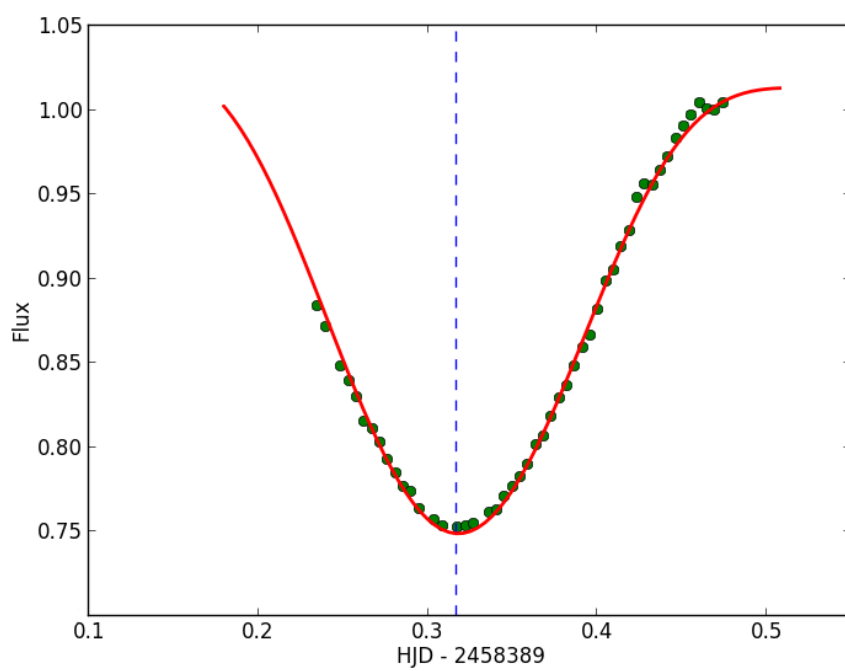
Obrázek P.1: Mapa GX Lac.



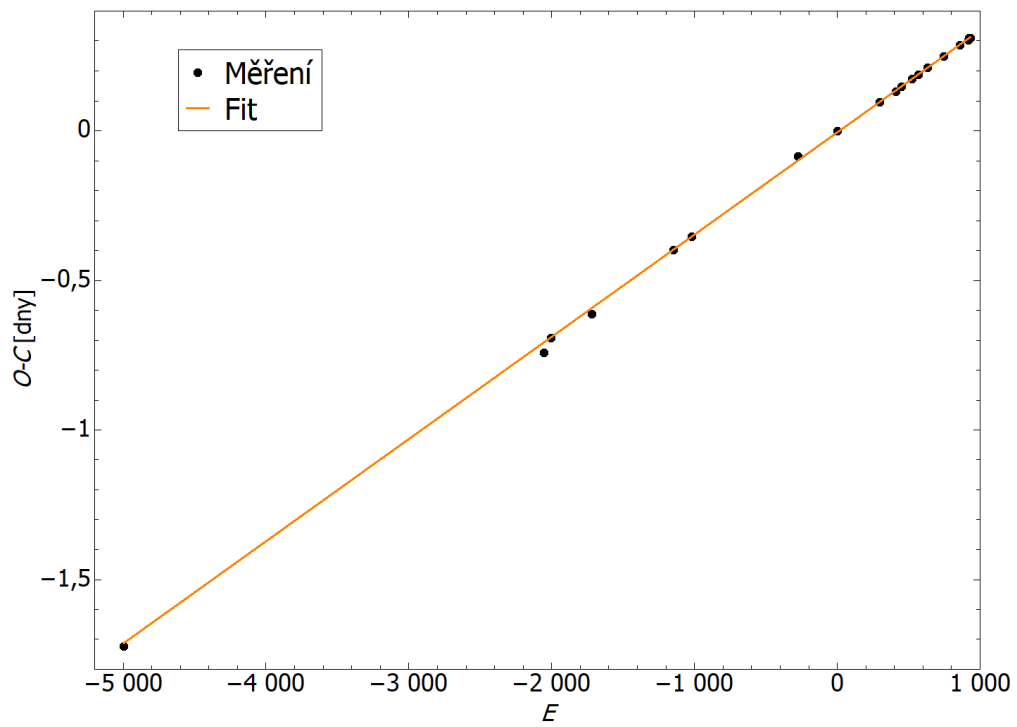
Obrázek P.2: Mapa CO Lac.



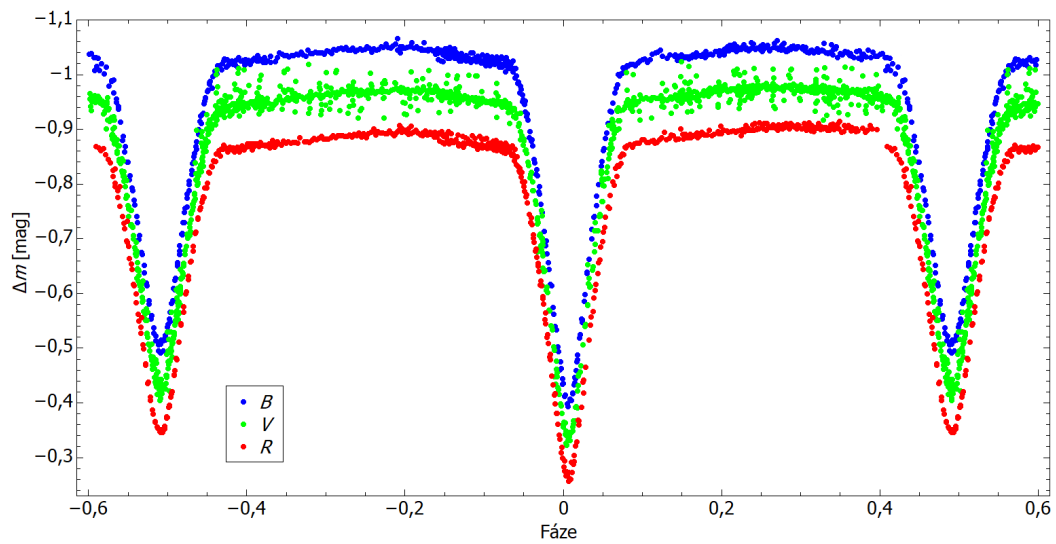
Obrázek P.3: Mapa V474 Lac.



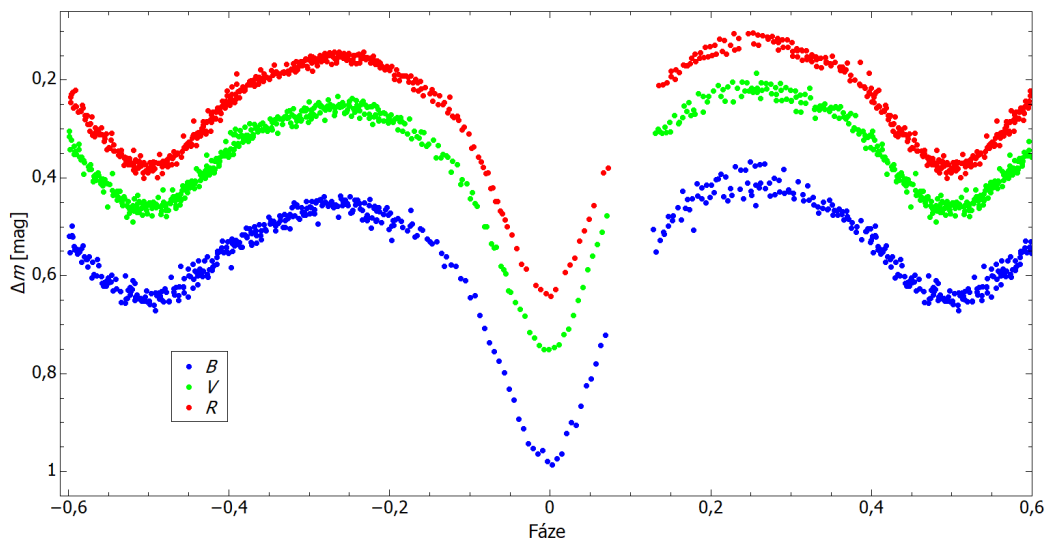
Obrázek P.4: Určení času primárního minima GX Lac v databázi AMPER.



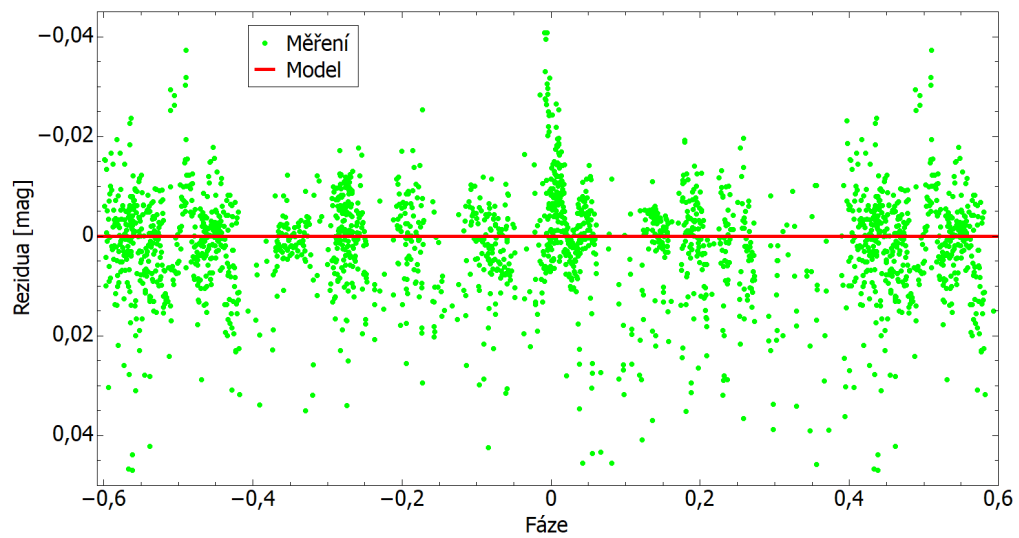
Obrázek P.5:  $O-C$  diagram GX Lac s původními efemeridami.



Obrázek P.6: Fázová křivka CO Lac.



Obrázek P.7: Fázová křivka V474 Lac.



Obrázek P.8: Křivka reziduí modelu GX Lac.

Tabulka P.1: Epoque, hodnoty  $O-C$  a druhy použitých minim po opravě efemerid pro GX Lac.

$E$	$O-C$ [dny]	Druh minima
-4996	-0,0100	p
-2055	-0,0328	p
-2007	-0,0001	p
-1720	-0,0198	p
-1151	0,0017	p
-1022	0,0015	p
293	0,0011	p
408	-0,0033	p
524	0,0014	p
566	0,0002	p
628	0,0017	p
746	0,0012	p
-278	0,0167	p
0	0,0000	p
915	-0,0027	p
926	-0,0033	p
929	-0,0025	p
923	-0,0006	p
859	-0,0011	p
448	0,0012	p
-1025	-0,0088	s
586	-0,0061	s
639	-0,0152	s
695	-0,0110	s
746	-0,0060	s
923	-0,0117	s

# Literatura

- Boyle, W. & Smith, G. (1970), *Charge coupled semiconductor devices*, Bell System Technical Journal.
- Gaia-Collaboration (2018), *VizieR Online Data Catalog: Gaia DR2*, VizieR Online Data Catalog: I/345.
- Harmanec, P., Mayer, P. & Zásche, P. (2017), *Dvojhvězdy*, Astronomický ústav UK.
- Hilditch, R. W. (2001), *An introduction to close binary stars*, Cambridge University Press.
- Howell, S. B. (2006), *Handbook of CCD astronomy*, Cambridge University Press.
- Häussler, K. (1980), *Mitteilungen der Bruno-H.-Bürgel-Sternwarte Hartha*, Heft 15.
- Janík, J. (2017), *Astronomické pozorování*, ÚTFA PřF MU, Brno.
- Johnson, H. & Morgan, W. (1953), *Fundamental stellar photometry for standards of spectral type on the revised system of the Yerkes spectral atlas*, ApJ.
- Kopal, Z. (1955), *The classification of close binary systems*, ÚTFA PřF MU, Brno.
- Kwee, K. & van Woerden, H. (1956), *A method for computing accurately the epoch of minimum of an eclipsing variable*, Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands.
- Mikulášek, Z. (2015), *Phenomenological modelling of eclipsing system light curves*, A&A.
- Mikulášek, Z. & Krtička, J. (2005), *Základy fyziky hvězd*, ÚTFA PřF MU, Brno.
- Mikulášek, Z. & Zejda, M. (2013), *Úvod do studia proměnných hvězd*, ÚTFA PřF MU, Brno.

- Prša, A. & Zwitter, T. (2005), *A computational guide to physics of eclipsing binaries. I. Demonstrations and perspectives*, ApJ.
- Strömgren, B. (1956), *Two-dimensional spectral classification of F stars through photoelectric photometry with interference filters*, Vistas in Astronomy.
- Švaříček, P., Wolf, M., Claret, A., Kotková, L., Brát, L., Šmelcer, L. & Zejda, M. (2008), *Rapid apsidal motion in eccentric eclipsing binaries: OX Cassiopeia, PV Cassiopeia, and CO Lacertae*, A&A.
- Štefl, V. & Krtička, J. (2008), *Historie astronomie*, ÚTFA PřF MU, Brno.
- Uitterdijk, J. (1934), *The eclipsing star 62.1933 Lacertae, a binary with apsidal motion*, Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands.
- Wilson, R. E. & Devinney, E. J. (1971), *Realization of accurate close-binary light curves: application to MR Cygni*, ApJ.



# Elektronické zdroje

[e1]: <https://www.aavso.org/vsx/index.php>

[e2]: <http://chandra.harvard.edu/photo/2000/0065/>

[e3]: <http://ulisse.pd.astro.it/Astro/ADPS/Systems/index.html>

[e4]: [https://www.asahi-spectra.com/opticalfilters/johnson\\_bessell.html](https://www.asahi-spectra.com/opticalfilters/johnson_bessell.html)

[e5]: <http://var2.astro.cz/ocgate/>

[e6]: <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

[e7]: <https://www.aavso.org/bob-nelsons-o-c-files>

[e8]: <https://astro.physics.muni.cz/observatory/>

[e9]: <https://amper.physics.muni.cz/>

[e10]: <https://www.bav-astro.de>

[e11]: <https://asas-sn.osu.edu/>

[e12]: <https://sites.uni.edu>

Dostupné ke dni 21. 5. 2019.