



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Rebecca Szabó

**Studium změn periody u pulzujících
hvězd**

Astronomický ústav UK

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Petr Zasche, Ph.D.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: FP

Praha 2024

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

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

V dne

Podpis autora

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucímu této práce, doc. RNDr. Petru Zaschemu, za odborné vedení, velmi užitečné konzultace ohledně zpracování dat a poznámky k práci.

Název práce: Studium změn periody u pulzujících hvězd

Autor: Rebecca Szabó

Katedra: Astronomický ústav UK

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Petr Zasche, Ph.D., Astronomický ústav UK

Abstrakt: V této práci byly analyzovány světelné křivky dvou pulzujících proměnných hvězd, BL Cam a BO Lyn, které byly naměřeny družicí *TESS*. Z těchto naměřených dat bylo identifikováno celkem 705 nových okamžiků maxima pro BL Cam a 333 pro BO Lyn. Pro hvězdu BL Cam se navíc zpracovala fotometrická data naměřená na Mayerově 65 cm dalekohledu na Ondřejově, která přidala 6 nových okamžiků maxima. Data byla vykreslena do O-C diagramů a porovnána s publikovanými daty od jiných autorů. Prokázalo se, že nově zpracovaná data navazují na dlouhodobá publikovaná zjevně sinusoidální závislosti. Pro hvězdu BL Cam byla určena nová lineární efemerida vyhovující novým datům, s periodou $P = 0,0390979079(4)$ dní. Byly zkoumány změny periody i na krátkodobé škále v O-C diagramech pro obě hvězdy, kde se uvažovala pouze data z *TESS*. Na krátkodobé škále změny periody pro hvězdu BO Lyn jsou v souladu s dlouhodobou škálou, ale pro hvězdu BL Cam se pravděpodobně pozoroval další cyklický efekt.

Klíčová slova: fotometrie, hvězdy, pulzace, změny periody

Title: A study of period changes in pulsating stars

Author: Rebecca Szabó

Department: Astronomical Institute of Charles University

Supervisor: doc. RNDr. Petr Zasche, Ph.D., Astronomical Institute of Charles University

Abstract: In this thesis, light curves measured by the satellite *TESS* were analysed for pulsating variable stars BL Cam and BO Lyn. In total, 705 new times of maximum light were identified for BL Cam and 333 for BO Lyn. Additionally, photometric data measured from the Mayer 65 cm telescope at Ondřejov yielded 6 new times of maximum light for the star BL Cam from the past year. The new times of maximum light were compared to already published data in an O-C diagram for both stars. The new data clearly connects to the long-term data with possible sinusoidal behaviour. A new linear ephemeris was determined for the star BL Cam, with a period of $P = 0,0390979079(4)$ days. The short-term scale data from the satellite *TESS* was also investigated in O-C diagrams for both stars. These short-term changes of period length were found to be consistent with long-term changes for BO Lyn, but another cyclical effect was likely observed for BL Cam.

Keywords: photometry, stars, pulsations, period changes

Obsah

Úvod	3
1 Teoretická část	4
1.1 Základní pojmy	4
1.1.1 Proměnné hvězdy	4
1.1.2 SX Phe	5
1.1.3 Delta Scuti	5
1.2 Struktura hvězd	5
1.2.1 H-R diagram a pás nestability	5
1.2.2 Hvězdná fotometrie	8
1.2.3 Barevné systémy	9
1.3 Pulzace hvězd	10
1.3.1 Podmínky pro vznik pulzací	10
1.3.2 Opacitní mechanismus pulzací	11
2 Metodika	13
2.1 Grafy světelných křivek	13
2.2 Fázové diagramy	13
2.3 O-C diagramy	14
2.4 Převod HJD na BJD	15
3 Výběr zkoumaných hvězd	16
3.1 Kritéria výběru	16
3.2 Výběr z databází	16
4 Zpracování dat získaných z družice <i>TESS</i>	19
4.1 Družice <i>TESS</i>	19
4.2 BL Cam	20
4.2.1 Sektor 59	20
4.2.2 Sektor 19	25
4.2.3 Porovnání s daty z publikovaných článků	28
4.3 BO Lyn	30
4.3.1 Sektor 47	30
4.3.2 Sektor 21	34
4.3.3 Porovnání s daty z publikovaných článků	37
5 Zpracování fotometrických dat z Ondřejova	39
5.1 Popis aparatury	39
5.2 Zpracování dat	39
6 Diskuse výsledků	43
6.1 BL Cam	43
6.2 BO Lyn	44
6.3 Porovnání obou hvězd	45
Závěr	46

Seznam použité literatury	47
Seznam obrázků	51
Seznam tabulek	53
A Přílohy	54
A.1 Příloha 1: Script v <i>Pythonu</i> na stažení dat z <i>TESS</i>	54
A.2 Příloha 2: Dodatečné O-C diagramy pro hvězdu BO Lyn	55

Úvod

Cílem této práce bylo studovat, jak se vyvíjí délka periody proměnných pulzujících hvězd v čase. Analýza se provedla pro dvě hvězdy, BL Cam a BO Lyn, které jsou typu SX Phe a Delta Scuti respektive. Data byla pro obě hvězdy zpracována z měření družice *TESS*. Pro BL Cam byla zároveň zpracována fotometrická data naměřená na Ondřejově.

Studováním změn v periodě hvězd metodou fitování polynomů na data naměřená *TESS* je možno získat několik set nových okamžiků světelného maxima. Odtud lze poté v O-C diagramu zkoumat jak se délka periody vyvíjí na krátkodobé a dlouhodobé škále. Na dlouhodobé škále lze určit lepší efemeridu pro další pozorování. Porovnáním rozptylu *TESS* dat s rozptylem publikovaných dat se může zjistit, do jaké míry je metoda fitování polynomů na světelné křivky efektivní.

Lze zároveň vyvodit některé parametry hvězdy při analýze její proměnlivosti periody v čase. Z rychlosti změny délky periody je možno predikovat, zda se hvězda nachází na hlavní posloupnosti, nebo ji už opustila [1]. Stelární evoluce způsobuje změny v poloměru hvězdy, odkud lze odhadnout evoluční stav hvězdy, jelikož perioda je úměrná mocnině ($\sim 1,5$) poloměru [2]. Na délku periody jsou také vázány parametry luminozita a barva hvězdy.

Změny nejsou ale pouze charakterizovány stelární evolucí. Zejména pro hvězdy s vysokou amplitudou změn periody a jednou dominantní periodou může z analýzy O-C diagramu být predikována existence dalšího tělesa, který ovlivňuje délku periody hvězdy [1]. V této práci se dokonce přispělo k již publikované domněnce, že BL Cam je v binárním systému. Přítomnost další hvězdy by totiž mohlo vysvětlovat, proč změna periody na krátkodobé škále nutně nebyla v souladu se změnou na dlouhodobé škále.

1. Teoretická část

1.1 Základní pojmy

1.1.1 Proměnné hvězdy

Proměnné hvězdy jsou nebeské objekty, kterým se jasnost nebo radiální rychlost mění v průběhu času. Tento pojem je velmi obecný a zavádí se různé skupiny, třídy, a typy proměnných hvězd, které zařazují hvězdy specifitěji.

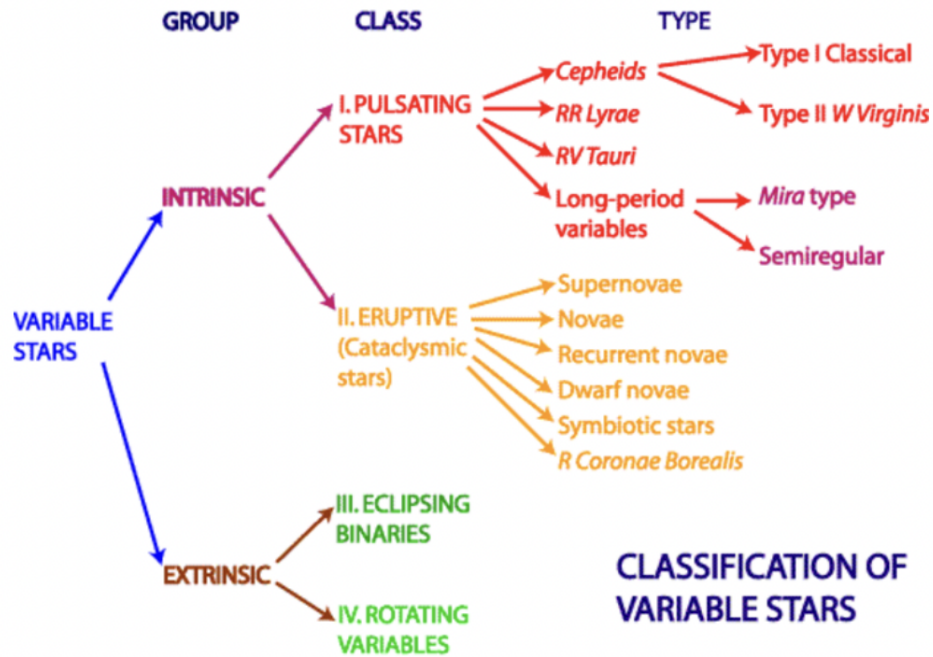
Proměnné hvězdy lze dělit na dvě skupiny: geometrické a fyzické. U geometrických hvězd se mění jejich zdánlivá jasnost detekovaná na Zemi. Příčinou může být rotace hvězdy se skvrnami na povrchu nebo obíhání dvou hvězd kolem společného těžiště. U fyzických hvězd se naopak mění jejich světelný tok. Zdroj jejich změn může být kdekoliv v blízkém okolí hvězdy, na jejím povrchu, i pod povrchem [3].

Skupina fyzických hvězd se dále dělí na třídy kataklyzmických, eruptivních, a pulzujících hvězd. U kataklyzmických neboli explozivních hvězd dochází k výronům způsobené termionukleárními procesy buď na povrchu hvězdy nebo hluboko pod jejím povrchem. Při těchto výronech dochází také ke změně ve světelné amplitudě. Příčinou změn světelných amplitud eruptivních hvězd jsou procesy odehrávající se v jejich chromosférách a korónách. Změny v amplitudě jsou většinou doprovázeny odtokem hmoty prostřednictvím hvězdných větrů a interakcí s okolním mezihvězdným prostředím [4]. Pulzující hvězdy pulzují v důsledku změn v jejich povrchových charakteristikách. Když se mění jejich poloměr, znamená to, že dochází k radiálním pulzacím. Když se nesymetricky mění jejich tvar, dochází naopak k neradiálním pulzacím. Největší amplituda světelných změn, tedy pulzace, se pozoruje při radiálních pulzacích, kdy se cyklicky mění poloměr hvězdy [5].

Třída pulzujících proměnných hvězd obsahuje několik dalších typů hvězd. Mezi hlavními typy patří klasické Cefeidy, W Virginis, RR Lyrae, Delta Scuti, Gamma Doradus, Beta Cephei, a Mira [3]. Kde se jednotlivé typy hvězd nachází na Hertzsprung-Russellově diagramu a vzhledem k pásu nestability je popsáno v následující podkapitole.

K znázornění jak se dělí proměnné hvězdy na skupiny, třídy, a typy ilustruje obrázek 1.1.

Tato práce se zabývá hvězdami typu Delta Scuti a také méně známého typu SX Phe. Rozdílem mezi nimi je ten, že Delta Scuti hvězdy jsou součástí hvězd 1. populace a SX Phe hvězdy jsou součástí hvězd 2. populace [6]. Hvězdy 1. populace jsou mladší, bohaté na těžké prvky a nachází se v galaktickém disku. Hvězdy 2. populace jsou starší s nízkým obsahem těžších prvků a nachází se ve výduti a halu galaxie a v kulových hvězdokupách [7]. Fenomenologicky jsou si tyto dva typy velmi podobné a popisují se detailněji níže.



Obrázek 1.1: Rozdělení proměnných hvězd, převzato z [3]

1.1.2 SX Phe

Proměnné hvězdy typu SX Phe jsou pulzující podtrpaslíci, kteří mohou nabývat spektrálních typů v rozmezí A2-F5. Typicky pulzují s periodou v rozmezí 0,04-0,08 dní a jejich amplituda změn dokáže dosáhnout 0,7 mag ve filtru V. [4]

1.1.3 Delta Scuti

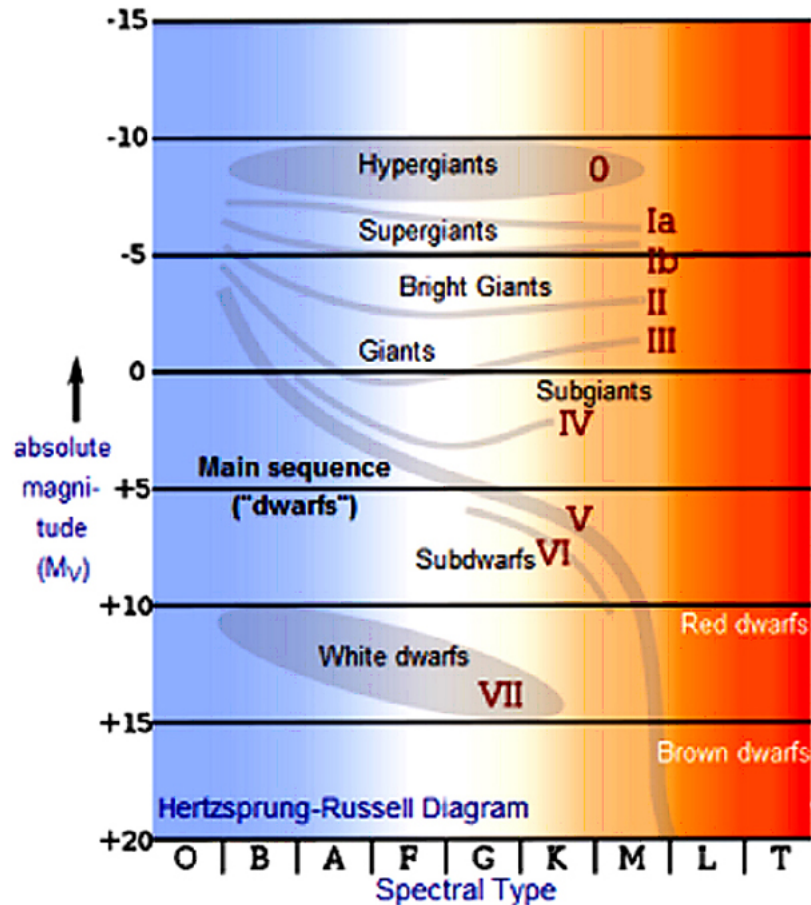
Delta Scuti hvězdy se původně nazývaly trpasličí Cefeidy [8]. Tyto hvězdy se nachází ve spodní části pásu nestability na Hertzsprung-Russellově diagramu, těsně nad hlavní posloupností, nebo v některých případech i na ní. Mohou nabývat spektrálních typů mezi A0-F5, a luminozitní třídy mezi III a V. Mají také krátké periody, typicky v rozmezí 0,01-0,2 dne. Jejich amplituda světelných změn je v rozsahu 0,003-0,9 mag ve filtru V [4]. Hvězdy tohoto typu lze dále dělit podle jejich velikosti amplitudy, na HADS a LADS.

1.2 Struktura hvězd

1.2.1 H-R diagram a pás nestability

Velmi užitečný diagram pro porovnání charakteristik různých typů hvězd je Hertzsprung-Russellův diagram. H-R diagram s důrazem na polohy luminozitních tříd je přiložen jako obrázek 1.2. Také poslouží k představení, kde na něm leží již zmíněné typy proměnných pulzujících hvězd, SX Phe a Delta Scuti.

Spektrální typy se označují písmeny: O, B, A, F, G, K, M. Posloupnost těchto spektrálních typů je od hvězd zleva s nejvyšší efektivní teplotou k hvězdám s nejnižší efektivní teplotou. Spektrální typy s vysokou efektivní teplotou se nazývají



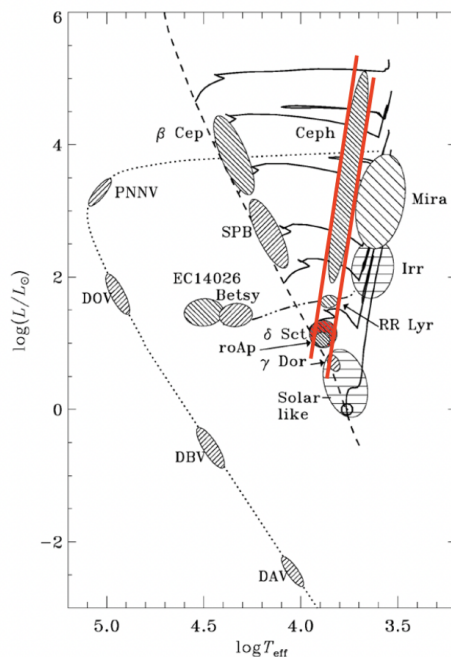
Obrázek 1.2: Hertzsprung-Russellův diagram, převzato z [9]

rané, kdežto spektrální typy s nízkou efektivní teplotou se nazývají pozdní. Spektrální typy kromě efektivní teploty také souvisí přímo se spektrálními čarami, které lze pozorovat.

Zkoumané hvězdy jsou typu Delta Scuti a SX Phe, které nabývají spektrálních typů buď A nebo F. Hvězdám patřícím do spektrálního typu A chybí spektrální čáry He I, naopak dominantní jsou spektrální čáry H I. Vyskytují se také jednou ionizované čáry kovů, kupříkladu Fe II, Ti II, V II, a Cr II. Hvězdy patřící do spektrálního typu F mají slabší spektrální čáry H I, ale na rozdíl od spektrálního typu A se u nich vyskytují spektrální čáry různorodější zastoupení kovů [10].

Každý spektrální typ je dále dělen na 10 spektrálních podtypů, nabývajících mezi čísly 0-9. Následně lze hvězdy dělit i na luminozitní třídy, které se značí římskými číslicemi 0-VII. Hvězdy s menší římskou číslicí mají typicky menší absolutní magnitudu, zatímco hvězdy s větší římskou číslicí mají větší absolutní magnitudu.

H-R diagram 1.2 dobře přispívá k obecné představě o charakteristikách různých hvězd. Specificky pro porovnání hvězd typu Delta Scuti s jinými častými typy (jak bylo avizováno na začátku práce) lépe poslouží následující H-R diagram 1.3, který má však na osách jiné veličiny. Jejich převod je rozvinut v oddíle o hvězdné fotometrii.



Obrázek 1.3: H-R diagram s důrazem na hvězdy typu Delta Scuti s červeně vyznačeným pásem nestability. Převzato z [3] a upraveno.

Na obrázku 1.3 vyznačuje přerušovaná čára polohy hvězd na hlavní posloupnosti nulového stáří neboli ZAMS (anglicky zero age main sequence). Plné čáry značí cestu vývoje hvězd z hlavní posloupnosti záleží na jejich hmotnosti. Vývojové cesty jsou vyznačeny pro hmotnosti hvězd 1, 2, 3, 4, 7, 12, 20 M_{\odot} (solární hmotnost, přičemž Slunce je nejnižší na čáře ZAMS a 20 M_{\odot} je nejvyšší).

Jak už bylo zmíněno při definici Delta Scuti hvězd, tyto hvězdy se nachází ve spodní části pásu nestability. Hvězdy stráví výraznou většinu svého života na hlavní posloupnosti a jelikož jsou hvězdy Delta Scuti tak blízko hlavní posloupnosti, tráví více času jako tento typ pulzujících hvězd, než jako pulzující hvězdy jiných typů, které se nachází výše na pásu nestability. To má za důsledek, že většina známých pulzujících hvězd jsou typu Delta Scuti. Z digramu lze zároveň vyčíst, že Delta Scuti hvězdy mívají skoro až 2 M_{\odot} .

Zbylé dvě čáry už nejsou pro tuto práci podstatné, ale je vhodné je zmínit. Čerchovaná čára značí horizontální větev a tečkovaná čára značí chladnutí bílých trpaslíků.

Na pás nestability se dostanou hvězdy, které splní podmínku pro vznik pulzací, která se odvodí později v podkapitole o pulzacích hvězd. Ve hvězdě na pásu nestability se rozvinou radiální pulzace a ty se udrží po celou dobu, po kterou se daná hvězda nachází na pásu nestability. Až hvězda z pásu nestability odejde, jsou tyto radiální pulzace v ní utlumeny [3].

1.2.2 Hvězdná fotometrie

Pogsonova rovnice 1.1 je důležitý vzorec, který má široké využití v hvězdné fotometrii. Udává vztah mezi zdánlivou magnitudou a tokem zářivé energie.

$$m_2 - m_1 = 2,5 \log \left(\frac{\mathcal{F}_1}{\mathcal{F}_2} \right) \quad (1.1)$$

kde m_i je hvězdná velikost příslušné i -té hvězdy a \mathcal{F}_i je tok zářivé energie příslušné i -té hvězdy měřený na Zemi. Hvězdné velikosti tvoří sestupnou škálu jasnosti, tedy hvězda označená s 2. hvězdnou velikostí bude méně jasná než hvězda označená s 1. hvězdnou velikostí. Hvězdné velikosti se také rozlišují na absolutní a zdánlivé. Zdánlivá hvězdná velikost je ta, která je měřena ze Země. Absolutní hvězdná velikost je hvězdná velikost, kterou by měla hvězda ve vzdálenosti 10 parseků od Země. Přepočet mezi nimi je následující.

$$M_V - V = 5 - 5 \log d \quad (1.2)$$

kde M_V je absolutní hvězdná velikost ve V filtru (také občas nazývána vizuální velikost), přičemž V filtr je filtr žluté barvy v Johnsonově UBV systému, který je podrobněji popsán v následujícím oddílu o barevných systémech. d určuje vzdálenost v parsecích. Navíc k určení bolometrické absolutní hvězdné velikosti M je potřeba bolometrická korekce BC .

$$M = M_V + BC \quad (1.3)$$

Tok zářivé energie se definuje poněkud složitěji. Nejprve se zavede monochromatický tok \mathcal{F}_ν s frekvencí ν

$$\mathcal{F}_\nu = \int_0^{4\pi} I_\nu \cos \theta d\omega \quad (1.4)$$

kde I_ν je monochromatická intenzita s frekvencí ν , což je množství zářivé energie procházející v daném místě prostoru v daném směru kolmo jednotkovou ploškou do jednotkového prostorového úhlu v dané frekvenci za jednotku času. Dále θ je úhel, pod kterým záření dopadá vůči normále na předpokládanou jednotkovou plošku a $d\omega$ je infinitezimální prostorový úhel, přes který se integruje. Odtud se vyjádří bolometrický neboli celkový tok. [10]

$$\mathcal{F} = \int_0^\infty \mathcal{F}_\nu d\nu \quad (1.5)$$

Z Pogsonovy rovnice 1.1 lze odvodit vztah mezi absolutní magnitudou M a luminozitou (neboli zářivého výkonu) hvězdy L , vyjádřený následovně.

$$M = -2,5 \log \left(\frac{L}{L_0} \right) \quad (1.6)$$

kde L_0 je nulový bod luminozity s hodnotou stavenou IAU jako $3,0128 \cdot 10^{28} \text{W}$ [11]. Neboli hvězda s touto luminozitou má odpovídající absolutní magnitudu $M = 0$.

Přímý převod mezi spektrálním typem a logaritmem efektivní teploty nelze vyloženě vyjádřit numerickým vztahem, jelikož spektrální typ je diskrétní a efektivní teplota je kontinuální. Efektivní teplota hvězdy je definována jako teplota

absolutně černého tělesa, které má stejný rozměr a tok záření. Vztah mezi lumenozitou L a efektivní teplotou T_{eff} lze vyjádřit následovně.

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{eff}^4 \quad (1.7)$$

kde R je poloměr hvězdy a σ je Stefan-Boltzmannova konstanta s hodnotu $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$. [10]

1.2.3 Barevné systémy

Barevné systémy byly zavedeny, jelikož žádný detektor není schopen změřit tok záření se stejnou účinností pro různé vlnové délky. Navíc každý detektor má jinou křivku citlivosti světla. Když se před detektor vloží barevný filtr, dokáže tuto křivku citlivosti ovlivnit, a výsledkem je, že jsou naměřená data univerzální. Jak bude ještě vysvětleno později, určitý rozsah pozorované magnitudy hvězd, která může být změřena s různými filtry, je jedním z kritérií při výběru hvězd na podrobné zkoumání. Má tedy smysl zabývat se těmito barevnými systémy.

Nejrozšířenějším barevným systémem je Johnsonův UBV systém. Je složen ze tří širokopásmových barevných filtrů. V následujících bodech je popsáno, v jakém rozsahu jednotlivé filtry propouští světlo a v jaké jeho části jsou nejcitlivější. [10]

- U - propouští světlo v rozsahu 300 nm až 420 nm, přičemž maximum citlivosti má okolo 360 nm
- B - propouští světlo v rozsahu 360 nm až 560 nm, přičemž maximum citlivosti má okolo 420 nm
- V - propouští světlo v rozsahu 460 nm až 740 nm, přičemž maximum citlivosti má okolo 535 nm

Johnsonův UBV systém byl později rozšířen o další širokopásmové filtry, které působí v červeném až blízkém infračerveném spektru. Jednotlivé rozsahy propustnosti pro každý filtr jsou v bodech níže. Rozsahy filtrů R a I se převzaly ze zdroje [12] a rozsah zbývajících filtrů ze zdroje [13].

- R - propouští světlo v rozsahu 550 nm až 800 nm
- I - propouští světlo v rozsahu 700 nm až 900 nm
- J - propouští světlo v rozsahu 1100 nm až 1400 nm
- H - propouští světlo v rozsahu 1500 nm až 1800 nm
- K - propouští světlo v rozsahu 2000 nm až 2400 nm
- L - propouští světlo v rozsahu 3000 nm až 4000 nm
- M - propouští světlo v rozsahu 4600 nm až 5000 nm

1.3 Pulzace hvězd

Během tvoření této podkapitoly (zahrnující sekce Podmínky pro vznik pulzací a Opacitní mechanismus pulzací) se výhradně čerpalo ze skript *Stavba a vývoj hvězd* od Harmance a Brože [14].

1.3.1 Podmínky pro vznik pulzací

Pulzace hvězd lze popsat z hlediska termodynamického procesu. Termodynamický stav elementu hmoty hvězdy se periodicky mění, přičemž po uplynutí celého cyklu je stav stejný jako na jeho výchozí pozici. Platí první věta termodynamiky:

$$dU = dQ - dW \quad (1.8)$$

kde U je vnitřní energie, Q teplo dodané do systému, a W práce vykonaná systémem. Vnitřní energie U je stavová veličina, takže její změna při cyklickém ději je nulová. Z toho se dá usoudit, že práce W je integrálem změn tepla Q .

$$W = \oint dQ \quad (1.9)$$

K pulzacím bude docházet, pokud bude vykonaná práce $W > 0$. S tím souvisí entropie S , pro kterou lze definovat její změnu v závislosti na přírůstku tepla.

$$\oint dS = \oint \frac{dQ}{T} = 0 \quad (1.10)$$

kde T je teplota. Dále se bude předpokládat, že teplota je cyklicky závislá na čase t podle výrazu

$$T(t) = T_0 + \delta T(t) \quad (1.11)$$

kde $\delta T(t)$ je malá cyklická změna kolem střední hodnoty T_0 . Tento výraz se dosadí do rovnice 1.10, čímž se získá vztah

$$\oint dS = \oint \frac{dQ(t)}{T_0 + \delta T(t)} = \oint \frac{1}{1 + \frac{\delta T(t)}{T_0}} \frac{dQ(t)}{T_0} = 0 \quad (1.12)$$

Vztah lze aproximovat Taylorovým rozvojem, přičemž členy vyšších řádů se zanedbají a zbyde

$$\oint \left(1 - \frac{\delta T(t)}{T_0}\right) \frac{dQ(t)}{T_0} \approx 0 \quad (1.13)$$

Přeskládáním vztahu do intuitivnějšího tvaru a pokrácením $\frac{1}{T_0}$ vychází podmínka pro udržení pulzací.

$$W = \oint dQ(t) \approx \oint \frac{\delta T(t)}{T_0} dQ(t) > 0 \quad (1.14)$$

Jelikož je T_0 vždy kladné číslo, lze vyvodit, že teplo bude pohlcováno ($dQ > 0$) když bude změna $\delta T(t)$ kladná, tedy při teplotním růstu hvězdy. Výsledkem je, že aby byla hvězda schopná pulzace, musí být teplo pohlceno při kompresi, a vydané při expanzi.

1.3.2 Opacitní mechanismus pulzací

Opacitní mechanismus je nejčastější mechanismus, který vyvolává pulzační nestabilitu. Vyskytuje se v oblastech, kde se mění ionizace některého iontu, který je ve hvězdě dostatečně zastoupený. Většinou se jedná o vodík nebo helium.

Aby se mohlo pokračovat dále v odvozování tohoto mechanismu, je potřeba se seznámit s definicí opacity. Předpokládejme obecnou situaci, v níž záření o intenzitě I prochází nějakou vrstvou plynu. Při průchodu se část tohoto záření může rozptýlit nebo být absorbována plynem. Nejdříve se zavádí lineární koeficient opacity neboli absorpční koeficient ξ , který popisuje relativní úbytek intenzity poté, co záření projde látkou jednotkové vzdálenosti. Tento pojem lze také vystihnout rovnicí:

$$I(z + dz) - I(z) = dI = -\xi I dz \quad (1.15)$$

kde z značí jistou vzdálenost a dI značí infinitesimální rozdíl v intenzitě reprezentující průchod záření vrstvou plynu infinitesimální vzdálenosti označené dz . Odtud lze ještě zavést absorpční koeficient na jednotku hustoty neboli hmotnostní absorpční koeficient.

$$\kappa = \frac{\xi}{\rho} \quad (1.16)$$

kde ρ značí již zmíněnou hustotu. Nyní je možné pokračovat v odvozování opacitního mechanismu pulzací. V prvním případě se bude předpokládat, že plyn ve hvězdě je úplně ionizovaný. Pro hvězdnou látku lze přibližně popsat její opacitu následujícím vztahem, nazývaným Kramersova opacita.

$$\kappa = c\rho T^{-3,5} \quad (1.17)$$

Během adiabatického děje nedochází k výměně energie ve formě tepla mezi systémem a okolím, tedy $dQ = 0$. Při uvažování tohoto děje lze využít úměrnosti $P \sim \rho^{\frac{5}{3}}$, což vede na $T \sim \frac{P}{\rho} \sim \rho^{\frac{2}{3}}$, a to lze dosadit do vztahu 1.17.

$$\kappa = c\rho^{-\frac{4}{3}} \quad (1.18)$$

Fyzikálně toto znamená, že když roste hustota, čehož lze docílit třeba kompresí, tak klesá opacita, a tedy i méně tepla je pohlceno. Když je tedy plyn úplně ionizovaný, tak v něm nedochází k pulzacím a je stabilní.

V dalším případě se bude uvažovat situace, kdy plyn není úplně ionizovaný, a dokonce se jeho ionizace v jistých oblastech mění. Energie je spotřebována především na růst ionizace tohoto plynu. Tudíž jeho teplota bude růst mnohem pomaleji, než v případě zcela ionizovaného plynu. Následující vztah přibližně vystihuje závislost mezi teplotou a hustotou.

$$T \sim \rho^\lambda \quad (1.19)$$

kde parametr λ je malý. Opět dosazením do vztahu pro Kramersovu opacitu 1.17 se získá

$$\kappa = c\rho^{1-3,5\lambda} \quad (1.20)$$

Odtud lze vyjádřit podmínku pro vznik pulzací jako nerovnost

$$1 - 3,5\lambda > 0 \tag{1.21}$$

Záleží také na tom, kde se ionizační zóna nachází ve hvězdě. Pro příliš chladné hvězdy se ionizační zóna nachází hluboko v jejich nitru, kde dochází k utlumení pulzací disipací. Naopak pro příliš horké hvězdy je ionizační zóna moc blízko povrchu a její tepelná kapacita příliš malá, aby mohlo docházet k globálním pulzacím. Odtud také vzniká pás pulzační nestability, který byl popsán v podkapitole o struktuře hvězd.

2. Metodika

Tato kapitola popisuje, jaké kroky se uskutečňovaly k analyzování získaných fotometrických dat vybraných hvězd. Metody využití k samotnému výběru hvězd jsou popsány v kapitole 3.

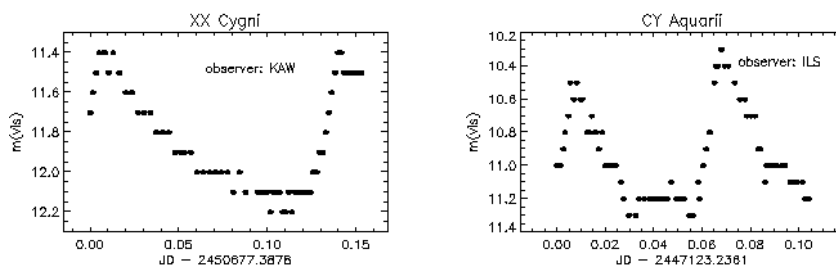
2.1 Grafy světelných křivek

Světelné křivky vystihují jak a kdy dochází ke světelným změnám hvězdy v čase. Specificky v této práci se pracuje se zářivým tokem, který byl definován v předchozí kapitole. Křivky jsou užitečné vykreslovat pro pulzující hvězdy, jelikož analýzou lze posoudit povahu proměnnosti, často využívané k zjištění periody pulzací.

Typický příklad hvězdy typu HADS pulzující s jedním módem je XX Cyg, jejíž světelná křivka je znázorněna na obrázku 2.1 nalevo.

Na obrázku je vidět jedna celá perioda. Lze také vidět, že peak pulzu je nesymetrický, takže při vyhodnocování polohy maxima se body proloží polynomem třetího nebo vyššího stupně. Závislost křivky také lépe popisují sudé funkce než liché. Specifický stupeň polynomu se vhodně zvolí dle počtu naměřených datových bodů v jednom cyklu.

U proměnné hvězdy pulzující s jedním módem se lépe identifikuje jejich dominantní perioda a okamžiky maxima. Při výběru hvězd pro analýzu byl upřednostňován. Ne všechny hvězdy ale mají pouze jeden mód. Další typický příklad hvězdy typu HADS, která naopak pulzuje s více než jedním módem, je hvězda CY Aqr. Její světelná křivka je přiložena jako obrázek 2.1 napravo.



Obrázek 2.1: Dvě světelné křivky typických HADS hvězd. Nalevo je XX Cyg, která pulzuje s jedním módem. Napravo je CY Aqr, která pulzuje s více než jedním módem. Převzato z [8].

2.2 Fázové diagramy

K porovnání jednotlivých pulzací slouží fázové diagramy, na které lze vynést tyto jednotlivé pulzy na jednotné škále. Toho lze dosáhnout, když je známa perioda pulzací. Provede se to převedením z časových jednotek na fázi. Očekávalo by se, že například všechna naměřená maxima zářivého toku budou ve stejném jistém okolí hodnot fáze, a analogicky pro minima.

$$\sigma = \frac{t - t_0}{P} - E \quad (2.1)$$

kde σ je fáze a t_0 zafixovaný časový bod, ke kterému se budou vztahovat všechny ostatní časové body. Většinou je zvolen výrazný bod, buď maximum nebo minimum. Dále t je uplynulý čas od toho zafixovaného a P je perioda pulzací. Odečtení počtu uplynulých cyklů E zaručuje, že se všechny hodnoty budou nacházet mezi 0 a 1. V této fázi analýzy se délka periody převezme z článků, které již zkoumaly danou hvězdu.

2.3 O-C diagramy

O-C digramy znázorňují časový rozdíl maxima toku záření pozorované hodnoty (anglicky observed) a očekávané hodnoty (anglicky calculated). Typicky se vynáší tento rozdíl na svislé ose, přičemž na vodorovné je počet cyklů, který uplynul od času změření prvního publikovaného maxima. Předpokládá se, že je známa alespoň přibližná hodnota periody, protože hraje klíčovou roli při dopočítávání počtu cyklů i očekávané hodnoty.

Libovolný cyklus lze vypočítat pomocí následujícího vzorce:

$$E = \frac{O - O_0}{P} \quad (2.2)$$

kde E je epocha neboli cyklus, O je čas, ve kterém bylo pozorované maximum, které se váže na čas O_0 , ve kterém se pozorovalo první maximum. Většinou nevychází celé číslo, ale nemá fyzikální smysl uvažovat desetinná čísla, takže se výsledná hodnota zaokrouhlí na celé číslo.

Libovolný očekávaný okamžik C , kdy by mělo dojít k maximu lze vypočítat navíc pomocí známého cyklu.

$$C = O_0 + EP \quad (2.3)$$

O-C diagramy jsou užitečné pro zkoumání jestli se perioda mění časem a jakým způsobem. Jelikož se počet cyklů a tudíž i očekávaná hodnota vztahuje na délku periody, musí být již známý přibližný odhad periody a pak se může dokorigovat k hodnotě lépe popisující vynesenu závislost. Rostoucí závislost vyjadřuje, že rozdíl pozorované hodnoty oproti očekávané roste. Délka periody tedy byla podhodnocena a ve skutečnosti je delší. Analogicky při klesající závislosti, délka periody je skutečně kratší než uvažovaná hodnota.

Při takovéto analýze se datové body na O-C diagramu proloží přímkou, která se nazývá lineární efemerida. Než je však efemerida definitivně určena, je většinou nutno lehce upravit délku periody a očekávanou hodnotu změření prvního publikovaného maxima. To může být provedeno například metodou nejmenších čtverců. Obecný tvar efemeridy je

$$BJD_{max} = C_0 + PE \quad (2.4)$$

kde BJD_{max} udává čas, kdy by mělo být pozorováno maximum podle pořadového počtu cyklu E . Čas je vztažen k BJD (barycentric Julian date), tedy k těžišti sluneční soustavy, jelikož je přesnější než čas HJD (heliocentric Julian

date) [15], využívaný před ním. To je více rozvinuto v následujícím oddílu. C_0 je již zmíněná očekávaná hodnota změření prvního publikovaného maxima.

Když se porovnávají různá měření stejné hvězdy od různých pozorovatelů na stejném O-C diagramu, je vhodné upravit efemeridu určenou ze staršího měření. Očekává se totiž, že se délka periody bude měnit v průběhu času. Postup je takový, že se na O-C diagram vynesou všechna data tak, aby se vztahovala na předchozí efemeridu. Proveďte se lineární regrese a ze získaných konstant lze upravit efemeridu, aby vyhovovala i nově naměřeným datům. Směrnice určuje, jak se změnila perioda, tak že se tato hodnota přičte k hodnotě periody ze starší efemeridy. Bod, kde příčka protíná svislou osu určuje, jak se změnila očekávaná hodnota změření prvního publikovaného maxima, což se také přičte k té v původní efemeridě. Tímto postupem se získá nová efemerida, která bere v úvahu i naměřené hodnoty z novějšího měření.

2.4 Převod HJD na BJD

Jak již bylo zmíněno, čas se současně vztahuje k BJD. Některá měření byla ale stále provedená v HJD. Bylo by nevhodné porovnávat tyto dva způsoby časování ve stejném O-C diagramu, takže se všechna data naměřená v HJD převedla do BJD. Pro převod byla využila kalkulačka ze zdroje [16].

3. Výběr zkoumaných hvězd

3.1 Kritéria výběru

Kritéria výběru hvězd se stanovila takovým způsobem, aby byla zaručena možnost naměření vlastních fotometrických dat. Prvotní kritéria výběru zní:

- Magnituda: 9-13 mag
- Amplituda změn (magnitudy): $>0,02$ mag
- Délka periody: několik desítek minut
- Souřadnice polohy na obloze:
 - Deklinace (DE): mezi 00:00 a +90:00
 - Rektascenze (RA): mezi 22:00 a 06:00

V této fázi výběru se nekladla další podmínka na to, v jakém barevném filtru byla určena odpovídající magnituda. Souřadnice polohy na obloze jsou vyjádřeny v sexigesimálním systému.

3.2 Výběr z databází

Prostřednictvím bibliografického databázového rozhraní ADS byly vybrány vhodné články k tématu práce, které měly odkaz na tabulky katalogů hvězd v databázovém rozhraní Vizier. Zadáním dříve popsanych kritérií se v tabulkách objevily hvězdy z katalogu, které tyto podmínky splňovaly. V tabulkách 3.1, 3.2, a 3.3 jsou uvedeny všechny hvězdy nalezené tímto způsobem.

Tabulka 3.1 zahrnuje hvězdy pozorované pomocí TMTS (Tsinghua University-Ma Huateng Telescopes for Survey) z práce Lin et al. [17], které splňují kritéria uvedená výše. Jsou identifikovány systémem TMTSJHHMMSSs+DDMMSSs podle svých souřadnic rektascenze a deklinace v sexigesimálním systému, jak je vidět v prvním sloupci. V druhém a třetím sloupci jsou jejich souřadnice rektascenze a deklinace respektive. V této i v ostatních tabulkách jsou rektascenze a deklinace vztaheny na J2000, tedy 1.1.2000 ve 12:00. Ve čtvrtém sloupci je délka periody jednotlivých hvězd v minutách. Jelikož v tomto katalogu bylo mnoho hvězd, délka periody se omezila na hodinu. V pátém sloupci se nachází amplituda změn v jednotkách magnitud. V posledním šestém sloupci je změřená magnituda v infračerveném filtru L.

Tabulka 3.1: Hvězdy splňující kritéria ze zdroje Lin et al. [17]

ID	RAJ2000 "h:m:s"	DEJ2000 "h:m:s"	Per min	Amp mag	L_0 mag
TMTSJ00304869+5717054	00 30 48,69	+57 17 05,4	44,68	0,022	12,568
TMTSJ01304786+4659298	01 30 47,86	+46 59 29,8	56,26	0,071	12,570
TMTSJ01341133+4629239	01 34 11,33	+46 29 23,9	43,04	0,024	12,890
TMTSJ02135696+4628363	02 13 56,96	+46 28 36,3	59,57	0,024	12,901
TMTSJ02363651+5104188	02 36 36,51	+51 04 18,8	45,74	0,036	12,746
TMTSJ02371028+5001026	02 37 10,28	+50 01 02,6	28,68	0,033	12,089
TMTSJ02402133+5238011	02 40 21,33	+52 38 01,1	54,92	0,021	12,914
TMTSJ02420627+4934534	02 42 06,27	+49 34 53,4	41,06	0,022	11,992
TMTSJ03074493+2916304	03 07 44,93	+29 16 30,4	43,80	0,032	12,455
TMTSJ03091850+5355118	03 09 18,50	+53 55 11,8	57,90	0,021	12,228
TMTSJ03184997+4521365	03 18 49,97	+45 21 36,5	43,86	0,025	12,973
TMTSJ03530517+4204057	03 53 05,17	+42 04 05,7	59,39	0,039	12,545
TMTSJ04275345+4314058	04 27 53,45	+43 14 05,8	57,03	0,021	12,537
TMTSJ04452487+2926439	04 45 24,87	+29 26 43,9	40,95	0,023	12,916
TMTSJ04490646+4608036	04 49 06,46	+46 08 03,6	34,69	0,032	12,785
TMTSJ05164993+4056049	05 16 49,93	+40 56 04,9	57,81	0,053	11,858
TMTSJ05522666+1024528	05 52 26,66	+10 24 52,8	55,08	0,021	12,200

Tabulka 3.2: Hvězdy splňující kritéria ze zdroje Chang et al. [18]

Star	m	RAJ2000 "h:m:s"	DEJ2000 "d:m:s"	V_{mag} mag	B_{mag} mag	Per d	DV_{mag} mag
69	0	01 36 15	+54 14 07		13,8	0,0198	0,024
253	0	05 15 19	+22 53 41	11,927	12,331	0,0388	0,035
1489	0	22 01 08	+24 44 33	12,9	13,09	0,0303	0,037

Chang et al. [18] zkoumali statistické vlastnosti více než 1500 Delta Scuti hvězd z publikované literatury. Z jejich práce vznikla tabulka hvězd 3.2. Hvězdy jsou označeny pořadovým číslem, uvedené v prvním sloupci. V druhém sloupci m jsou všechny hvězdy označeny 0, což indikuje, že to jsou samostatné hvězdy, a nenachází se v binárním nebo vícehvězdném systému. Rektascenze a deklinace jsou ve třetím a čtvrtém sloupci respektive. V pátém a šestém sloupci jsou naměřené magnitudy hvězd ve filtrech V a B. V předposledním sloupci je uvedena délka periody ve dnech a v posledním sloupci je amplituda změn magnitudy ve filtru V.

Tabulka 3.3: Hvězdy splňující kritéria ze zdroje Samus et al. [19]

GCVS	n	RAJ2000 "h:m:s"	DEJ2000 "d:m:s"	VarType	magMax mag	Period d
BL Cam	*	03 47 19,82	+63 22 42,6	SXPHE	12,92	0,03909844
V0459 Per	*	03 21 58,62	+49 12 53,5	DSCTC	9,14	0,037

Tabulka 3.3 obsahuje známější hvězdy, které mají dokonce názvy podle *GCVS* (anglicky General Catalogue of Variable Stars), uvedené v prvním sloupci. Práce Samus et al. [19] se přímo zaměřovala na kompilování páté edice katalogu proměnných hvězd. V druhém sloupci n jsou obě hvězdy označeny hvězdičkou *, čímž se uvádí, že se jedná právě o proměnné hvězdy. Ve třetím a čtvrtém sloupci jsou opět souřadnice rektascenze a deklinace respektive. V pátém sloupci je uveden typ proměnných pulzujících hvězd. Hvězdy jsou typu SX Phe a Delta Scuti respektive, jejichž typy se detailně popsaly v první kapitole práce. Specificky druhá hvězda je představitelkou hvězd typu Delta Scuti s nižší amplitudou (LADS). V předposledním sloupci jsou magnitudy hvězd bez uvedením filtru. Poslední sloupec uvádí délku periody ve dnech.

Tato poslední tabulka neuvádí amplitudu změn magnitudy. Specificky hvězda BL Cam se vyskytla v katalogu z práce Rodríguez et al. [20], kde je uvedena její amplituda změn magnitudy ve filtru V jako 0,330. Jelikož byla v tomto katalogu jediným členem splňující požadované kritéria, není nutné ji uvádět v samostatné tabulce. BL Cam je zároveň hvězdou, na které byla provedena detailnější analýza, jelikož jako jediná hvězda z těchto tabulek pulzuje s jednou dominantní periodou.

Je také vhodné v této kapitole zmínit, že se v pozdějším stádiu výběru hvězd rozhodlo, že se zpracuje i proměnná hvězda BO Lyn. Ta se původně zavrhlá už díky prvotním kritériím, jelikož má delší periodu, než bylo požadováno. Přesto bylo několik důvodů, proč se ke zpracování zvolila právě tato hvězda.

Hlavním důvodem je, že má vysokou amplitudu změn, 0,24 mag ve filtru V podle Li et al. [21]. Nahlédnutím do tabulek 3.1 a 3.2 si lze povšimnout, že amplituda změn magnitudy pro hvězdy BL Cam a BO Lyn je o řád větší, než pro všechny ostatní hvězdy. Vysoká amplituda změn je preferovaná, jelikož se šum ve změřených světelných křivkách bude projevovat mnohem méně, než pro hvězdy s nižší amplitudou změn. Dalším klíčovým důvodem, proč se hvězda BO Lyn vybrala je, že pulzuje s jednou dominantní periodou, stejně jako BL Cam. Neméně důležitou výhodou také je, že pro ni existují dlouhodobá data, se kterými je možno porovnávat data zpracovaná z družice *TESS*. Analýza této hvězdy bude zároveň sloužit jako porovnání, jak jsou metody zpracování hvězdy BL Cam efektivní na jiné hvězdě.

4. Zpracování dat získaných z družice *TESS*

4.1 Družice *TESS*

Transiting Exoplanet Survey Satellite (*TESS*) je družice vyslaná v roce 2018, jejímž hlavním cílem je objevit exoplanety [22]. Exoplanetou se nazývá jakákoliv planeta mimo náš solární systém. Většinou obíhají kolem hvězdy, ale existují i toulavé exoplanety, které neobíhají kolem hvězdy, ale místo toho kolem galaktického centra [23].

Exoplanety mohou být objeveny tranzitní metodou, přičemž tranzit se odehraje, když exoplaneta projde mezi pozorovatelem a svou hvězdou. Tím poklesne intenzita světla pozorované hvězdy, což lze identifikovat při vykreslení světelné křivky hvězdy [24].

Jelikož družice měří změny intenzity přicházejícího světla z dané hvězdy, znamená to i tato data o proměnných hvězdách, jejichž intenzita světla se mění i bez přítomnosti obíhající planety.

Detektor *TESS* je složen ze čtyř CCD kamer, které společně dokáží monitorovat proužek oblohy o rozměrech 24x29 stupňů. Dohromady obsahují 4096x4096 px, přičemž každý pixel odpovídá 0,35 úhlovým minutám [25]. Každý tento sektor pozoruje po dobu 27 dní. Pracuje se s vlnovými délkami v rozsahu 600-1000 nm [26], což zhruba odpovídá oranžovým a červeným barvám světla až do poloviny blízkého infračerveného světla.

Tyto proužky se označují sektory a se vzestupnými čísly podle toho kdy se měřily. V prvním a druhém roce měření (mezi červencem 2018 a červencem 2020) se změřily sektory 1-26 s kadencí 1426s. Ve třetím a čtvrtém roce měření (červenec 2020 až září 2022) se změřily sektory 27-55 s kadencí 475s. V pátém a šestém roce (od září 2022 plánované do října 2024) se měří sektory 56-83 s kadencí 158s. Měření stále probíhá, je dokonce i plánováno na delší dobu a naměřená data jsou zveřejněná vždy po čtyřech měsících. [27]

Ke stažení dat na vykreslení světelné křivky se využil skript v *Pythonu*, který je vložen do práce jako příloha A.1. Byl zkompileován pomocí několika příkazů ze zdroje [28]. Má několik výstupů, přičemž první zobrazuje sektory obsahující data dané hvězdy, jejíž souřadnice rektascenze a deklinace se zadala do skriptu. Na základě toho si uživatel může vybrat sektor, ze kterého chce stáhnout data. V programu se vykreslí TPF (target pixel file), což je soubor obsahující pozorování z CCD pixelů dané hvězdy [29]. Zobrazí se plocha o velikosti 20x20 px, kde jsou pixely zbarveny dle toho, jak moc jimi prochází tok elektronů. Uživatel si poté vybere plošku pixelů, která obsahuje požadovanou hvězdu. Odečte se tok z pozadí a konečný výstup je vykreslení světelné křivky a stažení dat do csv souboru.

4.2 BL Cam

Na základě naměřených dat z *TESS* byla pro podrobnější analýzu vybrána hvězda BL Camelopardalis. BL Cam je představitelkou pulzujících proměnných hvězd typu SX Phe [30]. Dříve se také označovala názvem GD 428.

Družicí *TESS* byla zachycena v sektoru 19, který byl měřen v prosinci 2019 a v sektoru 59, který byl měřen v prosinci 2022. Další její pozorování je plánováno v prosinci 2024. Tabulka 4.1 udává bližší podrobnosti k těmto měřením.

Tabulka 4.1: Technické podrobnosti o měření hvězdy BL Cam družicí *TESS*. Výstup z internetového zdroje [31]

RA	Dec	Sec.	Cam.	CCD	ColPix	RowPix	Sec. Midpoint
56.8328	63.3784	19	2	2	957.2845	2030.0727	Dec. 2019
56.8328	63.3784	59	2	3	1381.0308	1917.8721	Dec. 2022
56.8328	63.3784	86	2	3	1986.3844	1881.0366	Dec. 2024

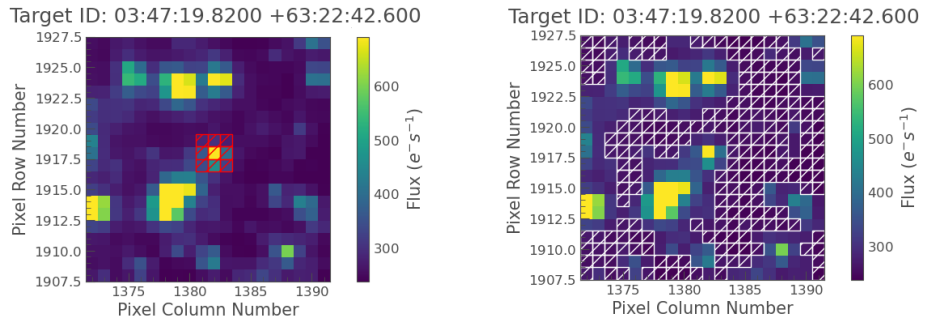
Jelikož byla během měření sektoru 59 kadence zhruba desetkrát lepší než během měření sektoru 19, začalo se se zpracováním sektoru 59.

4.2.1 Sektor 59

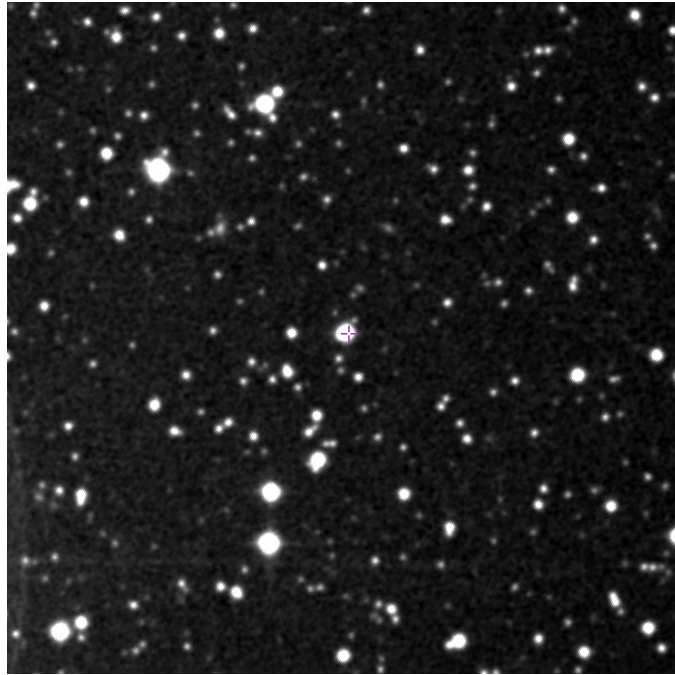
Grafy světelných křivek

V tomto oddíle budou demonstrovány kroky, které se uskutečňovaly pomocí skriptu v *Pythonu* v příloze A.1. Pro sektor 19 se postup nebude rozebírat detailně, protože je prakticky stejný.

Na levém obrázku 4.1 lze vidět plocha červeně ohraničených pixelů, která byla zvolena ke stažení dat. Mnohem výraznější je samotný prostřední pixel, ale typicky je lepší označit více pixelů než pouze jeden. Tato volba může být obhájena tím, že ve vybrané ploše nebyla žádná další podobně jasná hvězda a také že vnější označené pixely nejsou součástí pozadí. Pixely, které patří do pozadí jsou bíle ohraničeny, jak lze vidět v pravé části obrázku 4.1. Pro porovnání je přiložen obrázek 4.2, který zobrazuje přibližně stejný úsek sedmi úhlových minut z přehlídky oblohy *DSS2 red*, prostřednictvím programu *Aladin*, který byl vygenerován pomocí databázového rozhraní *CDS*.

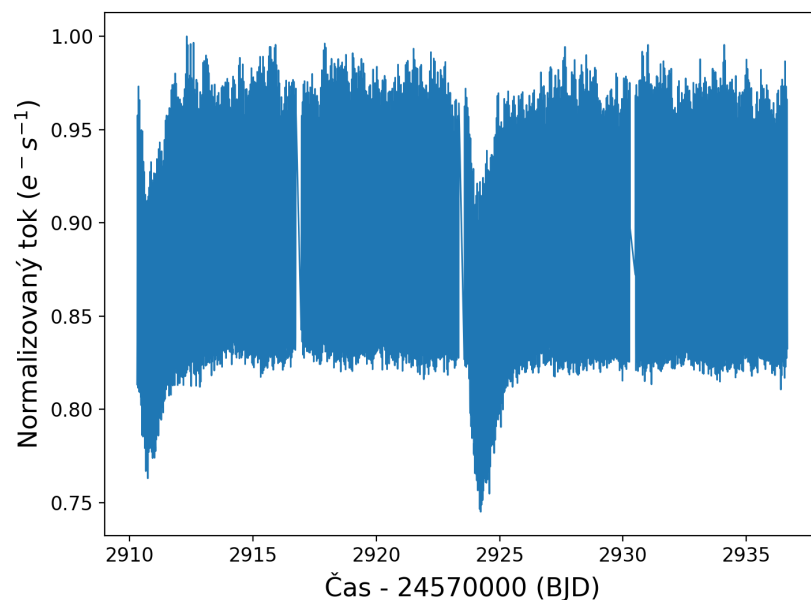


Obrázek 4.1: TPF. Obrázek nalevo znázorňuje ze které plochy pixelů se stáhla data. Obrázek napravo znázorňuje pozadí, které se odečetlo.



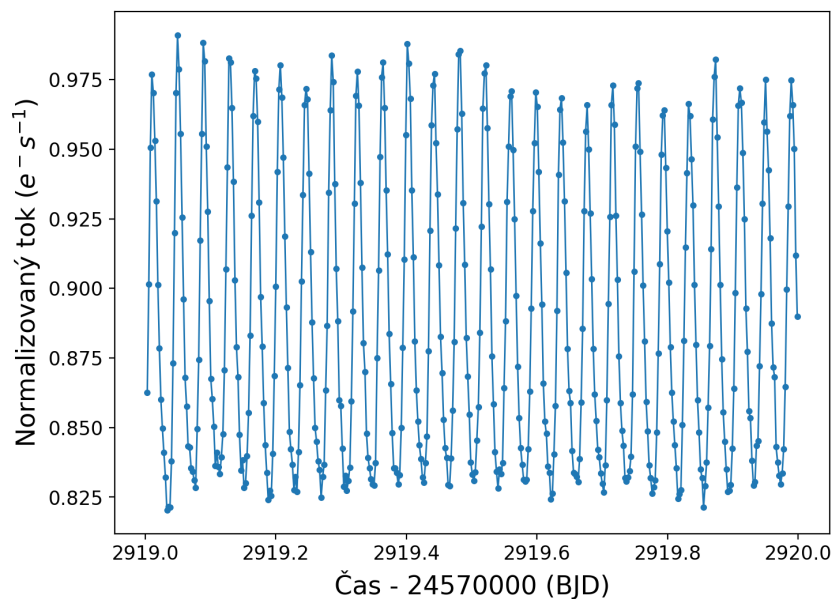
Obrázek 4.2: Úsek přibližně 7' kolem hvězdy BL Cam z přehlídky oblohy *DSS2 red*, vygenerovaný pomocí programu *Aladin*

Světelnou křivku BL Cam přes celé období 27 dnů lze vidět na obrázku 4.3. Původní výstup dat ze skriptu neobsahoval normalizovaný tok elektronů. Normalizace byla provedena po stažení dat.



Obrázek 4.3: Světelná křivka hvězdy BL Cam přes období 27 dnů ze sektoru 59 družice *TESS*

Lze vidět, že amplituda je po většinu času konstantní. Jednotlivé pulzy se lépe pozorují na menší časové škále, proto je světelná křivka přiložena jako obrázek 4.4 přes rozsah jednoho dne vybraného z naměřeného období.



Obrázek 4.4: Světelná křivka hvězdy BL Cam přes období jednoho dne ze sektoru 59 družice *TESS*

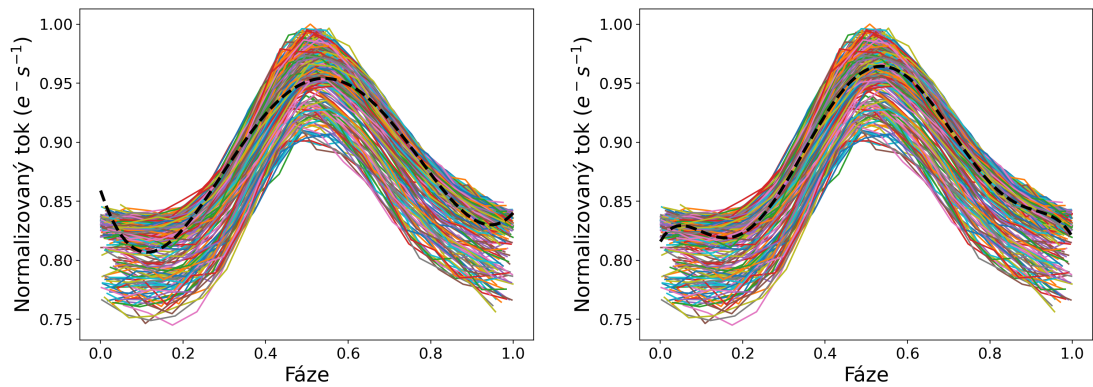
Body jsou nejen propojeny čarou, ale i vyznačeny značkou. To slouží k představení četnosti průměrně naměřených bodů v pulzu a že je jasně vidět jedna dominantní perioda.

Fázové diagramy

Stažená data světelné křivky se upravila do fázového diagramu, pomocí vzorce 2.1, který byl popsán v metodice. Do vzorce se dosadila délka periody s hodnotou $P = 0,03909844$ dní, která byla získána z tabulky 3.3. Jako referenční zafixovaný časový bod bylo vybráno první naměřené minimum, které bylo zvoleno tak, aby byla jasně vidět maxima uprostřed fáze a nebyla rozpůlena na hranici mezi dvěma sousedními cykly.

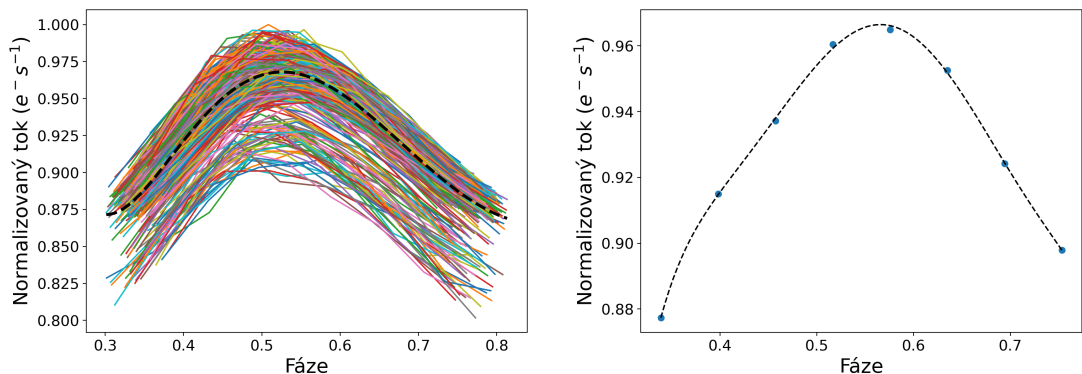
Přestože byla stažena data ze sektoru 59, který má desetkrát lepší kadenci jak sektor 19, v jednotlivých cyklech nebylo příliš mnoho naměřených bodů. V každém cyklu se jich nacházelo přibližně sedmnáct. Jak již bylo popsáno v metodice, nemůže se předpokládat, že peaky jsou symetrické, takže se na ně musí fitovat polynom vyššího než druhého stupně, přičemž sudé polynomy popisovaly peaky lépe. Obrázek 4.5 demonstruje aproximaci bodů proložených polynomy čtvrtého a šestého stupně na fázovém diagramu.

Porovnáním obou obrázků 4.5 naznačuje, že v okolí maxima oba polynomy relativně dobře popisují průběh cyklu, ale polynom 6. stupně napravo sedí lépe. Obě fitované závislosti se také na krajích u polohy minima odchyľují od naměřených bodů, zejména u polynomu 4. stupně nalevo. Rozhodlo se tedy pokračovat s analýzou když je na pulzu nafitován polynom 6. stupně.



Obrázek 4.5: Fázový diagram pro data ze sektoru 59, přičemž nalevo jsou pulzy proloženy průměrným polynomem 4. stupně, a napravo jsou pulzy proloženy průměrným polynomem 6. stupně.

Dále se také rozhodlo, že se bude uvažovat jen horní polovina peaku, jelikož nás zajímá pouze poloha peaku. Polynom 6. stupně se totiž na krajích diagramu u minim odchyľuje od skutečné závislosti. Jak sedí polynom na pouze horní polovinu peaku je vidět na obrázku 4.6. Jelikož se tímto krokem odstranila polovina bodů v každém cyklu, na každý cyklus se navíc stanovila podmínka, že jeho horní polovina musí obsahovat minimálně 8 bodů, jinak nebude dále zpracována. Cykly, které neobsahovaly dostatečný počet bodů, byly například první a poslední naměřený, a takové, do kterých zasahovala přestávka v měření, jak lze vidět na obrázku světelné křivky 4.3.



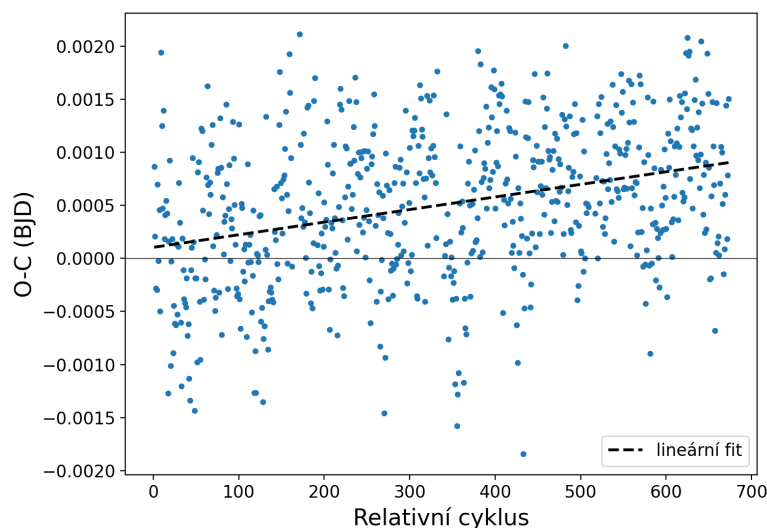
Obrázek 4.6: Fázový diagram pouze horní poloviny peaků pro data ze sektoru 59, proloženy polynomem 6. stupně. Nalevo je graf pro všechna data, napravo je graf zobrazující typický pulz.

O-C diagramy

Nyní se pro všechny pulzy našel bod, kde dochází k maximu, pomocí metody zderivování příslušného polynomu odpovídající danému pulzu a položení rovno nule. Fitování polynomů a následné určení bodů pro každý pulz bylo provedeno pomocí programu *Python*. Tím se získaly naměřené hodnoty okamžiků, kdy dochází k maximu vzhledem k fázi. Inverzí vztahu 2.1 se z fáze zpětně dopočítají okamžiky, kdy dochází k maximu v systému BJD. Využila se stejná perioda

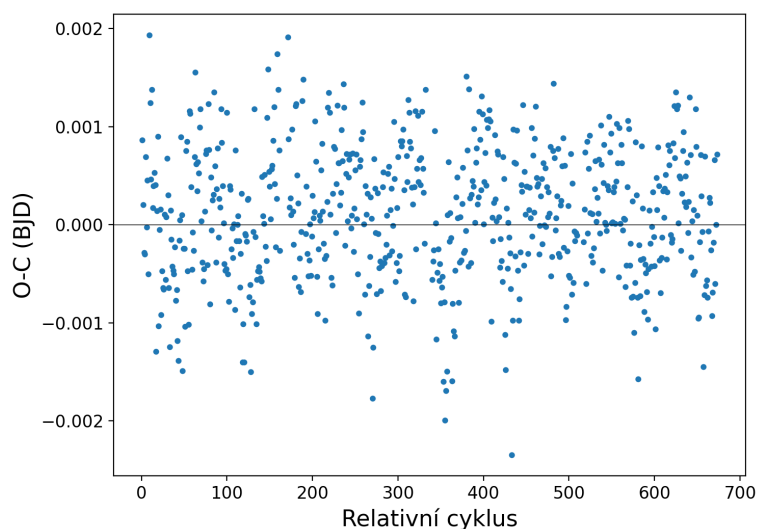
$P = 0,03909844$ dní, jako u zpracování pulzů do fázového diagramu.

Jelikož se takto získalo přes 600 okamžiků maxima, rozhodlo se nejdřív vykreslit O-C diagram pouze na základě těchto dat, přičemž porovnání s již publikovanými daty se provedlo později. Očekávané okamžiky maxima byly dopočítány dle vzorce 2.3. Čas očekávaných okamžiků maxima se odečetl od času pozorovaných okamžiků maxima a tento rozdíl byl vynesena v závislosti na příslušném cyklu. To lze vidět na obrázku 4.7.



Obrázek 4.7: O-C diagram pro zpracovaná data ze sektoru 59 před korekcí délky periody

Přímka je proložena závislostí, aby bylo lépe vidět, že závislost je rostoucí. Skutečná perioda je tedy delší než bylo uvažováno. Metodou nejmenších čtverců se minimalizovala směrnice, čímž se získala ideální hodnota periody popisující závislost, která má hodnotu $P = 0,039099074(13)$ dní. O-C diagram po úpravě periody je přiložen jako obrázek 4.8.

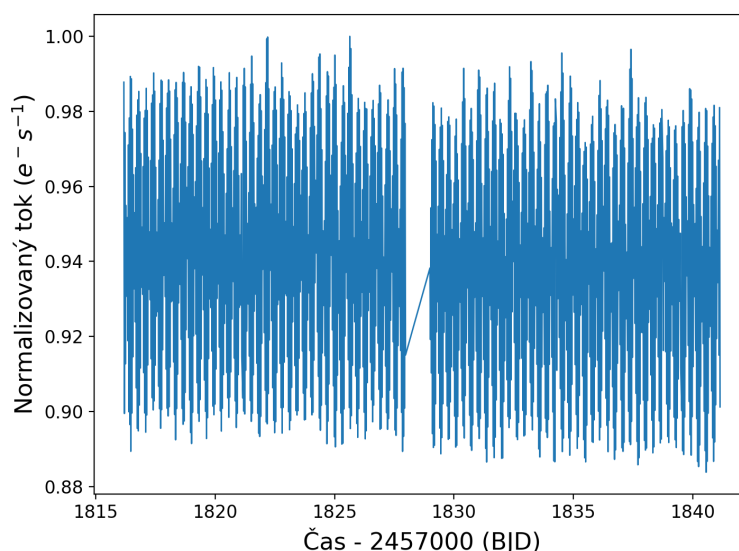


Obrázek 4.8: O-C diagram pro zpracovaná data ze sektoru 59 po korekcí délky periody

4.2.2 Sektor 19

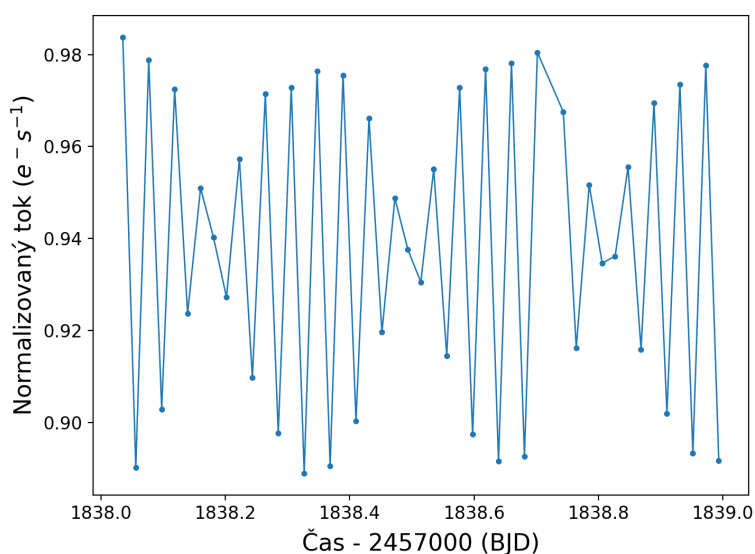
Grafy světelných křivek

Stejný postup zpracování pro sektor 59 se využil i pro sektor 19. Označená plocha v TPF také obsahovala 9 pixelů. Světelná křivka na obrázku 4.9 je měřena přes stejný interval jako u sektoru 59, tedy 27 dní. Jelikož byla kadence desetkrát delší, ve světelné křivce je desetkrát méně bodů, čímž je mnohem řidší než světelná křivka ze sektoru 59 na obrázku 4.3.



Obrázek 4.9: Světelná křivka hvězdy BL Cam přes období 27 dnů ze sektoru 19 družice *TESS*

Absence naměřených bodů je lépe vidět na kratším časovém úseku. Tak jako u sektoru 59 byl vykreslen úsek jednoho dne světelné křivky (viz obrázek 4.4), to stejné se provedlo pro sektor 19, což je ukázáno na obrázku 4.10.



Obrázek 4.10: Světelná křivka hvězdy BL Cam přes období jednoho dne ze sektoru 19 družice *TESS*

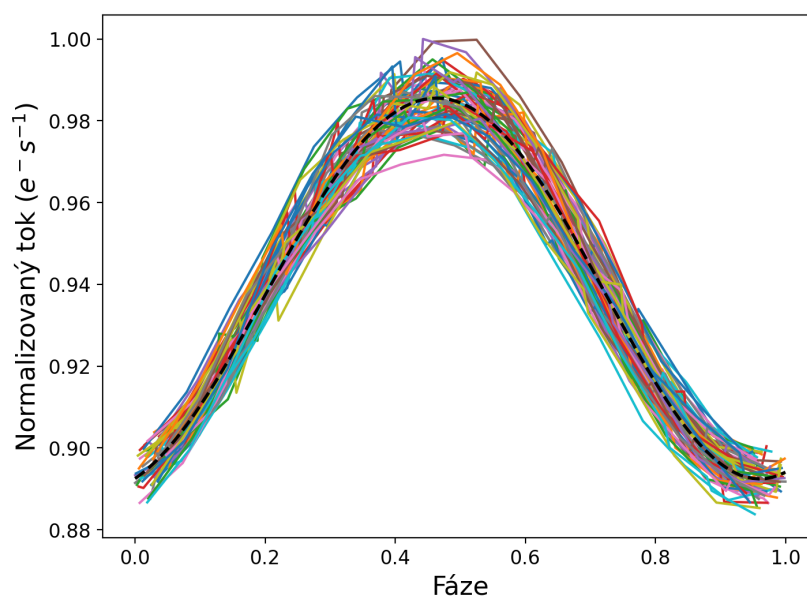
Jak je vidět na obrázku světelné křivky ze sektoru 19 4.10, ve většině pulzů jsou pouze dva body. Kdyby nebyly nezobrazily tyto body, mohlo by to mylně přispět k iluzi, že hvězda nepulzuje s jednou dominantní periodou, ale že má více pulzačních módů.

Fázové diagramy

Aby bylo možné zpracovat i data ze sektoru 19 do fázového diagramu a následně implementovat do O-C diagramu, bylo třeba přidat dodatečný krok v postupu zpracování oproti postupu u sektoru 59.

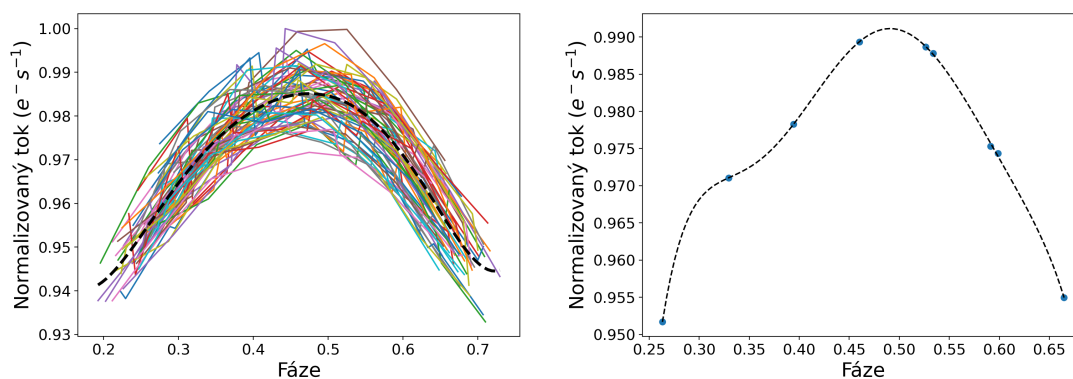
Jelikož byl sektor 19 naměřen s kadencí zhruba desetkrát horší než sektor 59, všechny body v každých 10-ti cyklech naměřených v sektoru 19 se zkombinovaly do jednoho průměrného cyklu. Tímto krokem se také zachovává přibližný počet bodů v jednom cyklu naměřeném v sektoru 59 a v jednom zprůměrovaném cyklu z deseti naměřených v sektoru 19.

Po tomto kroku se už postup zpracování pro tento sektor neliší od sektoru 59. Fázové diagramy pro celé cykly a pro horní polovinu peaků jsou na obrázcích 4.11 a 4.12 respektive, přičemž křivky jimiž procházejí jsou také polynomiální fity 6. stupně. Na obrázku 4.12 nalevo je fázový diagram všech fitovaných horních polovin peaků a napravo je jednoho typického peaku.



Obrázek 4.11: Fázový diagram pro data ze sektoru 19, proložený průměrným polynodem 6. stupně

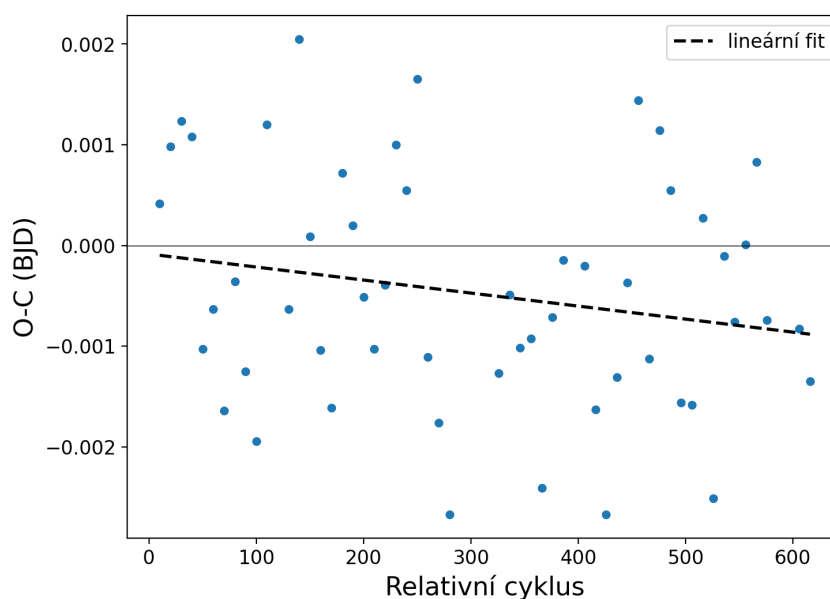
Přestože byl úmyslně nastaven podobný počet bodů v cyklech ze sektoru 19 i 59, jsou v jejich fázových diagramech jisté rozdíly. Porovnáním obrázků 4.6 a 4.12, lze vidět, že pro sektor 19 byl mezi všemi cykly menší rozptyl, ale samostatné body v cyklech na sebe tak hladce nenasazují.



Obrázek 4.12: Fázový diagram pouze horní poloviny peaků pro data ze sektoru 19, proložený polynomem 6. stupně. Nalevo je graf pro všechna data, napravo je graf zobrazující typický pulz.

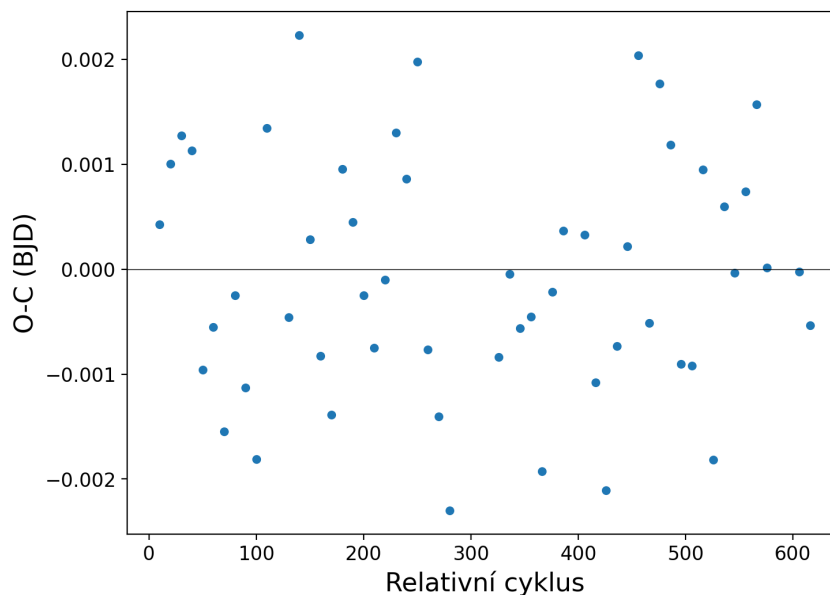
O-C diagramy

Stejným postupem jako u sektoru 59 se pro všechny zprůměrované cykly našel bod, kde dochází k maximu vzhledem k fázi. K získání těchto bodů vzhledem k BJD byla fáze vždy vztažena k pátému pulzu, tedy uprostřed deseti pulzů, které byly aproximovány do jednoho cyklu. O-C diagram při uvažování periody $P = 0,03909844$ dní je znázorněn na obrázku 4.13.



Obrázek 4.13: O-C diagram pro zpracovaná data ze sektoru 19 před korekcí délky periody

O-C diagram na obrázku 4.7 uvažuje stejnou délku periody jako pro sektor 59. Závislost je klesající, což indikuje, že v tomto časovém úseku je uvažovaná perioda příliš dlouhá a skutečná je kratší. Opět, provedením úpravy délky periody pomocí metody nejmenších čtverců vychází hodnota $P = 0,03909712(8)$ dní a O-C diagram uvažující tuto periodu je znázorněn na obrázku 4.14.



Obrázek 4.14: O-C diagram pro zpracovaná data ze sektoru 19 po korekci délky periody

4.2.3 Porovnání s daty z publikovaných článků

Zpracováním dat z *TESS* se nahlédlo, jak vypadají O-C diagramy na časové škále necelého měsíce, což je relativně krátká doba. Pro tuto hvězdu existují dlouhodobá data, se kterými je možno na O-C diagramu vykreslit nově zpracovaná data z *TESS* a zjistit, jak se od posledního publikovaného článku změnila délka periody pulzací. Následně je popsáno, ze kterých článků se čerpala data.

Nejstarší naměřené okamžiky maxima, které byly uvažovány v této práci, byly naměřeny v roce 1976 a publikovány v roce 1977 Bergem a Duthiem [32]. Další články, odkud se čerpala data, jsou od autorů McNamara a Feltz [33] z roku 1978, Hintz et al. [34] z roku 1997, Zhou et al. [35] z roku 1999, Kim et al. [36] z roku 2003, Fauvaud et al. [37] z roku 2010, a Conidis a Delaney [38] z roku 2013. Dosud nejnovější publikovaná data pochází z článku napsaná autory Zong et al. [39] z roku 2019.

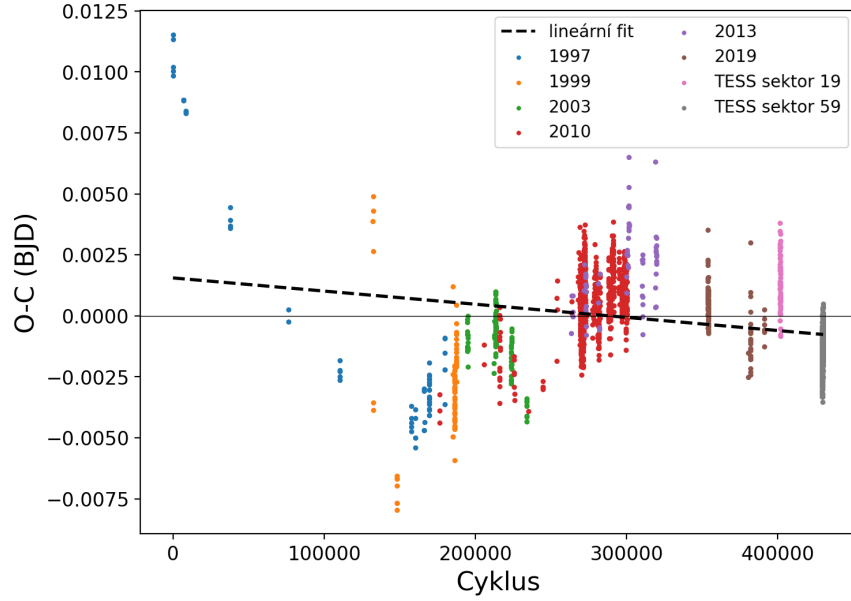
Nejstarší naměřená data ze článků publikovaných autory Berg a Duthie [32], a McNamara a Feltz [33] byla zmíněná dále v článku publikovaném Hintzem et al. [34]. Jelikož v prvním článku se naměřilo pouze 6 okamžiků maxima a v druhém pouze 13, rozhodlo se je nezpracovávat samostatně, ale včetně dat v třetím článku, kde jsou data všech tří měření souhrnně zpracována.

Mezi různými články se lišily časové systémy pozorování. Starší články pracovaly především v HJD, zatímco novější v BJD. Jelikož čas v BJD je přesnější, rozhodlo se měření provedené v HJD přepočítat do BJD. Jak již bylo popsáno v kapitole o metodice, byla použita kalkulačka ze zdroje [16]. Články, které pracovaly s časovým systémem HJD a byly převedeny na systém BJD, jsou ze zdrojů [34, 35, 36, 38, 39]. Celá analýza dat z *TESS* byla provedena v BJD.

Po převedení všech dat do systému BJD, byl vykreslen graf s nejnovější publikovanou efemeridou ze zdroje Zong et al. [39]. Graf je přiložen jako obrázek 4.15

a efemerida, která byla původně v HJD a převedená do BJD, je ve tvaru

$$BJD_{max} = 244312,7943(4) + 0,0390979135(9)E \quad (4.1)$$

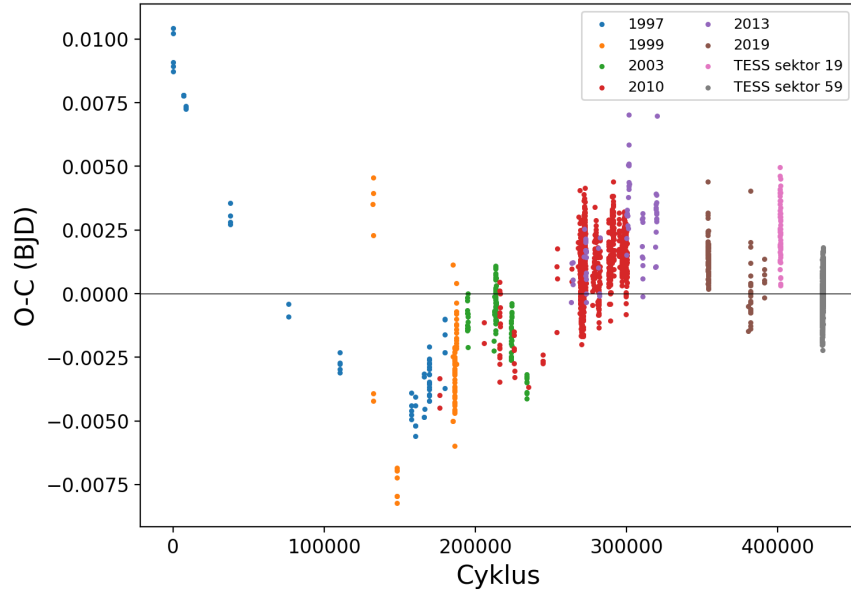


Obrázek 4.15: O-C diagram pro všechna naměřená data vzhledem k poslední publikované efemeridě

Odtud se mohla provést analýza k zjištění, jak se od té doby změnila délka periody s přispěním nových dat z *TESS*. Jak lze vidět na obrázku 4.15, připočtením *TESS* dat se perioda zkrátila. Provedla se lineární regrese k zjištění hodnot parametrů přímky. Směrnice měla hodnotu $-5,6 \pm 0,4 \cdot 10^{-9}$, což indikuje, o kolik se změnila délka periody od té uvažované v efemeridě 4.1. Bod, kde přímka protíná svislou osu, je $1,1 \pm 0,2 \cdot 10^{-3}$, což indikuje, o kolik se změnila očekávaná hodnota prvního naměřeného maxima. Tímto postupem se získala nová efemerida, která uvažuje i nová data z *TESS*.

$$BJD_{max} = 2443125,7954(2) + 0,0390979079(4)E \quad (4.2)$$

Graf vykreslený s novou efemeridou je na obrázku 4.16.



Obrázek 4.16: O-C diagram pro všechna naměřená data vzhledem k nové efemeridě

4.3 BO Lyn

Hvězda BO Lyncis se vybrala na základě znalostí, že pulzuje s jednou dominantní periodou a že má vysokou amplitudu světelných změn. BO Lyn je představitelkou pulzujících hvězd typu Delta Scuti [33].

Družicí *TESS* byla zachycena v sektoru 21, který byl měřen v únoru 2020 a v sektoru 47, který byl měřen v lednu 2022. Tabulka 4.2 udává technické podrobnosti o jejím změření. Kadence měření sektoru 47 přibližně třikrát lepší než kadence měření sektoru 21. Nejdříve byl zpracován sektor 47 a poté sektor 21. Zpracování hvězdy BO Lyn slouží k porovnání metod využitých na hvězdě BL Cam.

Tabulka 4.2: Technické podrobnosti o měření hvězdy BO Lyn družicí *TESS*. Výstup z internetového zdroje [31]

RA	Dec	Sec.	Cam.	CCD	ColPix	RowPix	Sec. Midpoint
130.7551	40.9977	21	1	2	2077.6808	1317.6437	Feb. 2020
130.7551	40.9977	47	1	1	761.8826	1379.8894	Jan. 2022

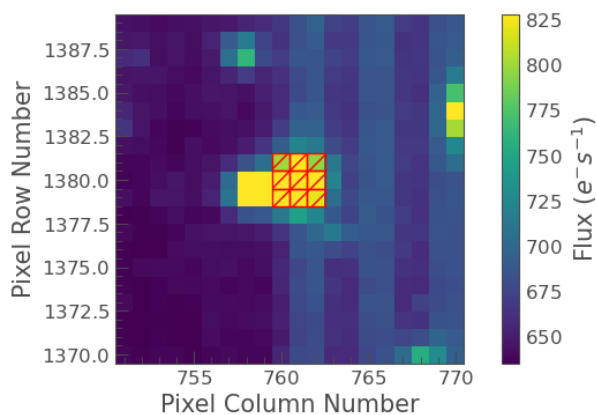
4.3.1 Sektor 47

Světelné křivky

Stažení dat z *TESS* pomocí skriptu v *Pythonu* (viz příloha A.1) bylo provedeno obdobným způsobem jako pro BL Cam. Jeden rozdíl byl v TPF obrázcích. BL Cam neměla kolem sebe žádné jiné výrazné hvězdy, což ale není případ pro BO Lyn. Její TPF s vyznačením plochy, ze které byla stažena data, je na obrázku

4.17. Pro porovnání je přiložen i obrázek 4.18 z přehlídky oblohy *DSS2 red*, který byl získán prostřednictvím programu *Aladin*.

Target ID: 08:43:01.2122317272 +40:59:51.769189608

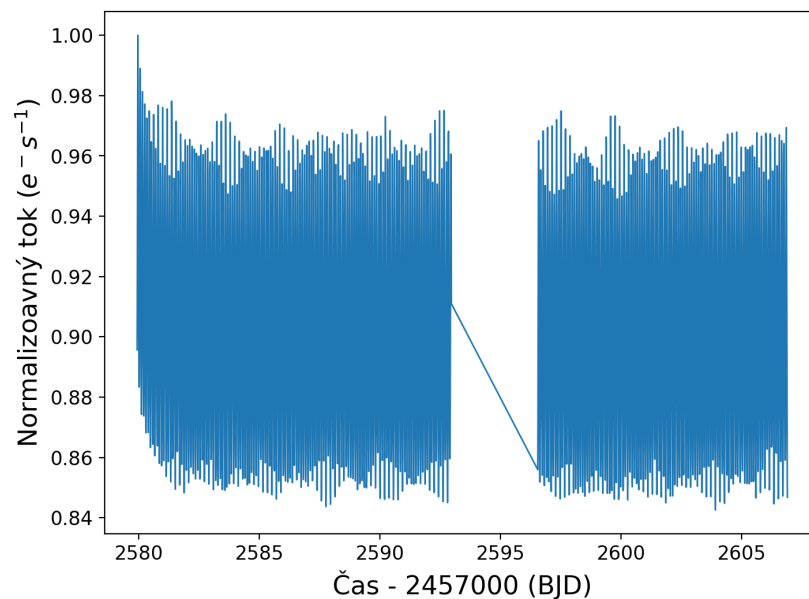


Obrázek 4.17: TPF s červeně vyznačenou ploškou označených pixelů pro hvězdu BO Lyn ze sektoru 47

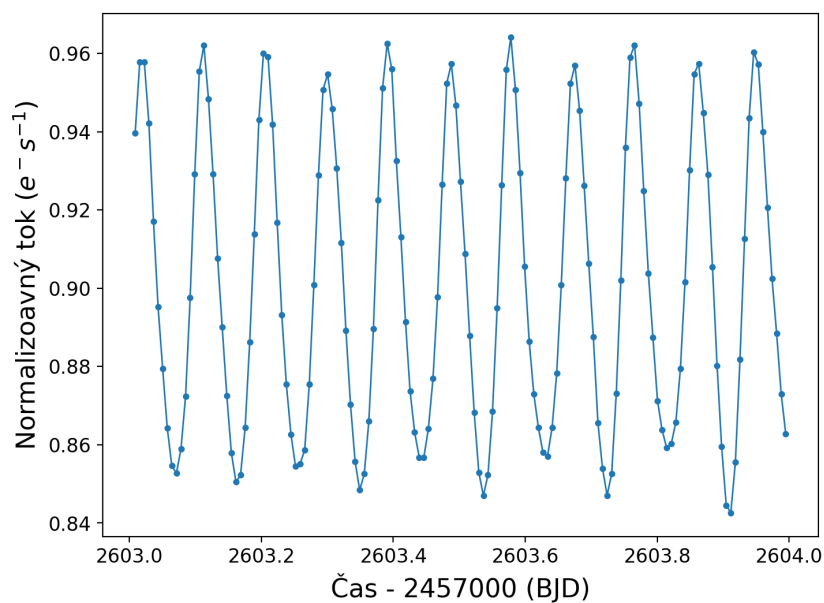


Obrázek 4.18: Úsek přibližně 7' kolem hvězdy BO Lyn z přehlídky oblohy *DSS2 red*, vygenerovaný pomocí programu *Aladin*

Postup stahování dat probíhal obdobně jako u hvězdy BL Cam. Světelná křivka BO Lyn z celého měřeného období je na obrázku 4.19. Světelná křivka z vybraného dne měřeného období k znázornění jednotlivých pulzů včetně počtu naměřených bodů v každém pulzu je na obrázku 4.20.



Obrázek 4.19: Světelná křivka hvězdy BO Lyn přes období 27 dnů ze sektoru 47 družice *TESS*



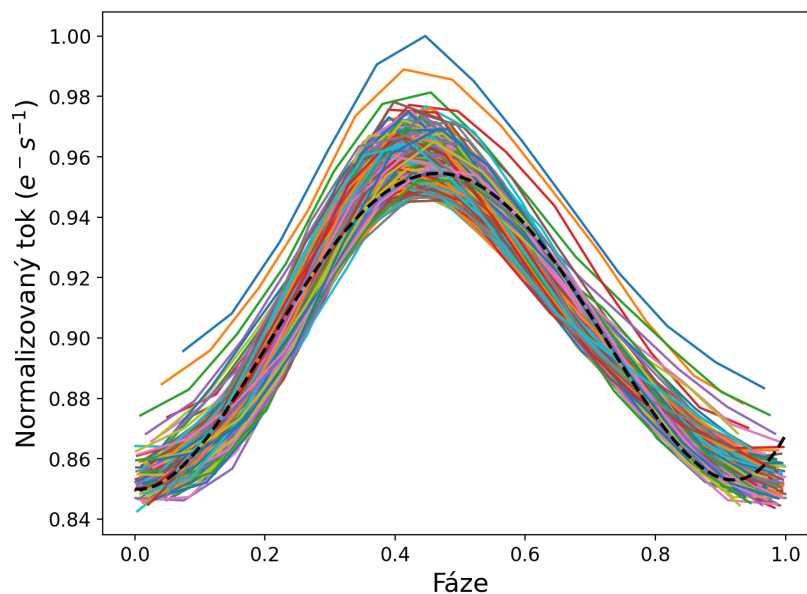
Obrázek 4.20: Světelná křivka hvězdy BO Lyn přes období jednoho dne ze sektoru 47 družice *TESS*

Fázové diagramy

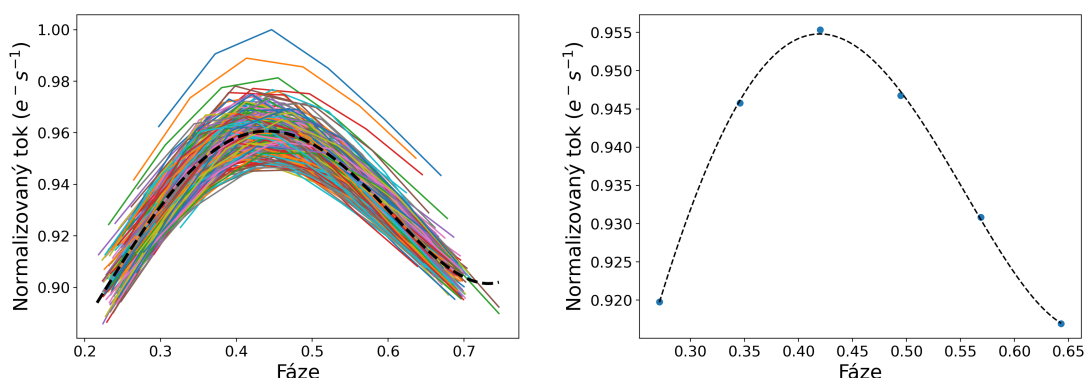
Podobným postupem, jako u zpracování hvězdy BL Cam, se u BO Lyn pokračovalo s vytvořením fázových diagramů. Zásadní krok bylo prokládání polynomů 6. stupně na příslušný cyklus, odkud se mohla identifikovat poloha maxima. Pro sektor 59, ve kterém byla změřena BL Cam, se požadovalo minimálně 8 bodů v horní polovině cyklu (kde se nachází peak), aby se dále zpracoval. Tato podmínka nebyla u BO Lyn splněna. Sice má více než dvakrát delší periodu, ale kadence byla přibližně třikrát delší pro sektor 47 oproti sektoru 59. Rozhodlo se

tedy pulzy naměřené v sektoru 47 proložit polynomy 4. stupně místo 6. stupně. Podmínka alespoň osmi bodů v každém cyklu byla pro další zpracování hvězdy BO Lyn snížena na minimálně šest bodů. Ve vzorci vyjadřující fázi 2.1, se dosadila délka periody s hodnotou $P = 0,09335811(7)$ dní, která se převzala z článku publikovaném Li et al. [21].

Fázový diagram pro celé cykly je proložen průměrným polynorem 4. stupně je na obrázku 4.21 a pro horní polovinu peaků proložen průměrným polynorem 4. stupně viz obrázek 4.22 vlevo. Na pravém je pro porovnání zobrazeno, jak byl proložen jeden typický peak.



Obrázek 4.21: Fázový diagram pro data ze sektoru 47, proložený průměrným polynorem 4. stupně

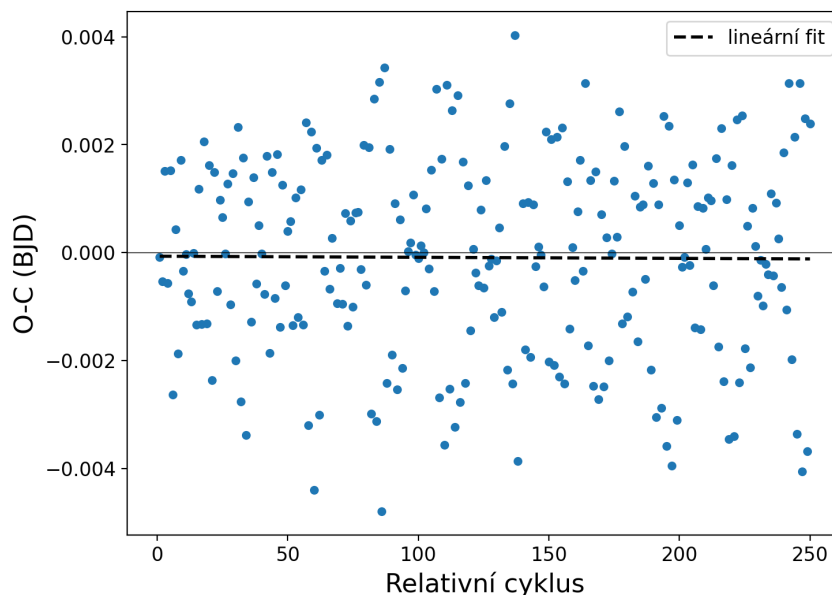


Obrázek 4.22: Fázový diagram pouze horní poloviny peaků pro data ze sektoru 47, proložený polynorem 4. stupně. Nalevo je graf pro všechna data, napravo je graf zobrazující typický pulz.

O-C diagramy

Dalším krokem po zkonstruování fázových diagramů bylo nalezení polohy maxima vzhledem k fázi. Odtud, jako u zpracování hvězdy BL Cam, se pomocí inverze vztahu 2.1 naleznou polohy maxim vzhledem k BJD a tím se mohou dopočítat očekávané polohy maxim. Odečtením očekávané hodnoty od pozorované se získá O-C diagram, přičemž je známý relativní cyklus vzhledem k prvnímu zpracovanému cyklu z tohoto sektoru dat.

O-C diagram zahrnující pouze zpracovaná data ze sektoru 47 a uvažující periodu z článku publikovaném Li et al. [21] s délkou $P = 0,09335811(7)$ dní je na obrázku 4.23. V tomto případě se délka periody převzatá z tohoto zdroje velmi dobře shodovala s daty, ale přesto se provedla úprava pomocí metody nejmenších čtverců. Upravená délka periody je $P = 0,09335752(16)$ dní. Jelikož O-C diagram vykreslený po korekci periody se skoro vůbec nelišil od O-C diagramu před korekcí periody 4.23, rozhodlo se, že by bylo vhodnější ho vložit do přílohy A.2.

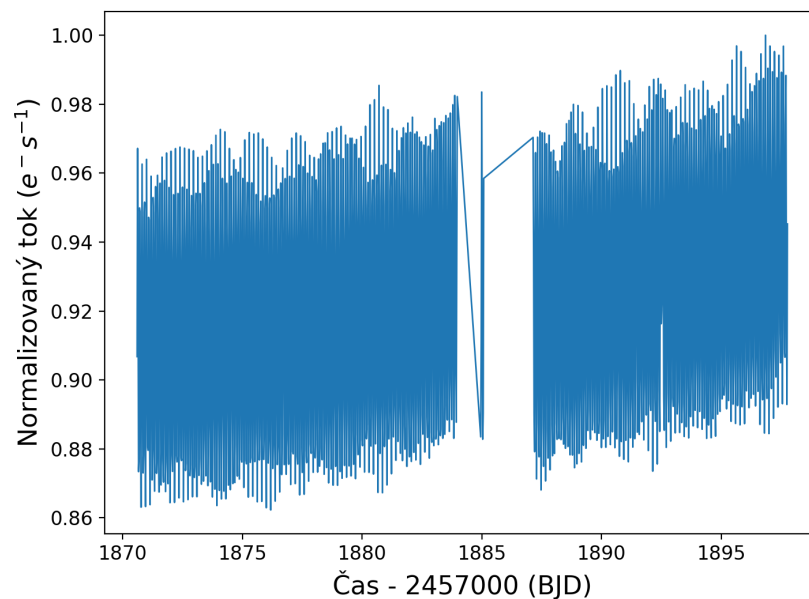


Obrázek 4.23: O-C diagram pro zpracovaná data ze sektoru 47 před korekcí délky periody

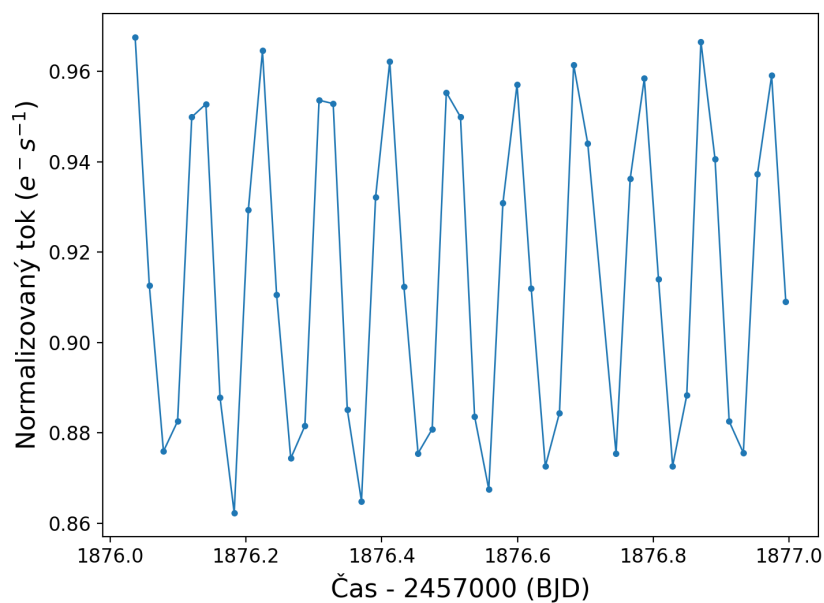
4.3.2 Sektor 21

Světelné křivky

Předešlý postup stahování dat z *TESS* se aplikoval i na data ze sektoru 21 pro hvězdu BO Lyn. Tento sektor má kadenci 1475s, což je přibližně třikrát delší než u sektoru 47. Příslušná světelná křivka na obrázku 4.24 je opět řidší než u světelné křivky na obrázku 4.19 pro sektor 47, kde bylo ve stejně dlouhém časovém úseku naměřeno zhruba třikrát více bodů.



Obrázek 4.24: Světelná křivka hvězdy BO Lyn přes období 27 dnů ze sektoru 21 družice *TESS*



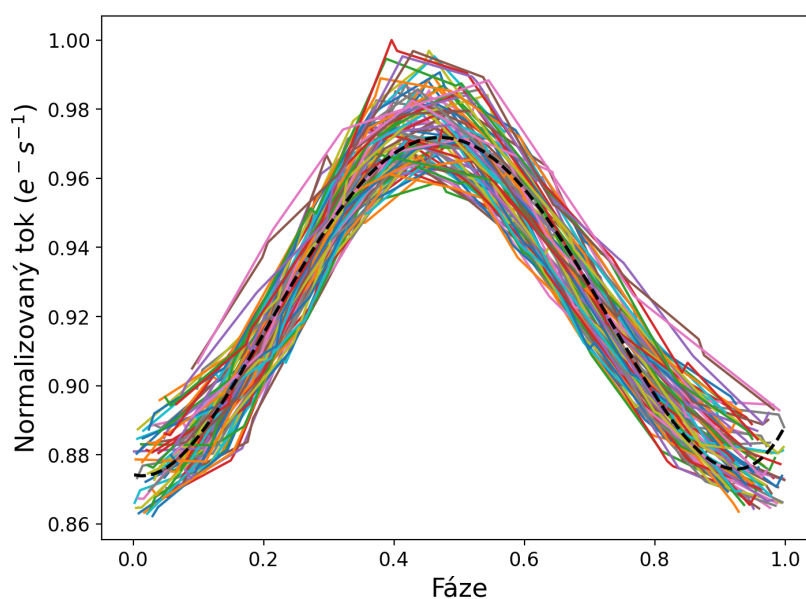
Obrázek 4.25: Světelná křivka hvězdy BO Lyn přes období jednoho dne ze sektoru 21 družice *TESS*

Světelná křivka u hvězdy BL Cam na úseku jednoho dne ze sektoru 19 nepopisovala skutečnou povahu pulzací, protože v každém cyklu byly většinou naměřeny pouze dva body. Naopak u hvězdy BO Lyn světelná křivka na úseku jednoho dne z tohoto sektoru (viz obrázek 4.25) se tolik nelišila od obrázku 4.20 ze sektoru 47. Přesto z důvodů méně naměřených bodů v každém cyklu na sebe body navazují méně spojitě a minima i maxima jsou velmi ostré. Většinou se v každém cyklu nacházely 4 naměřené body.

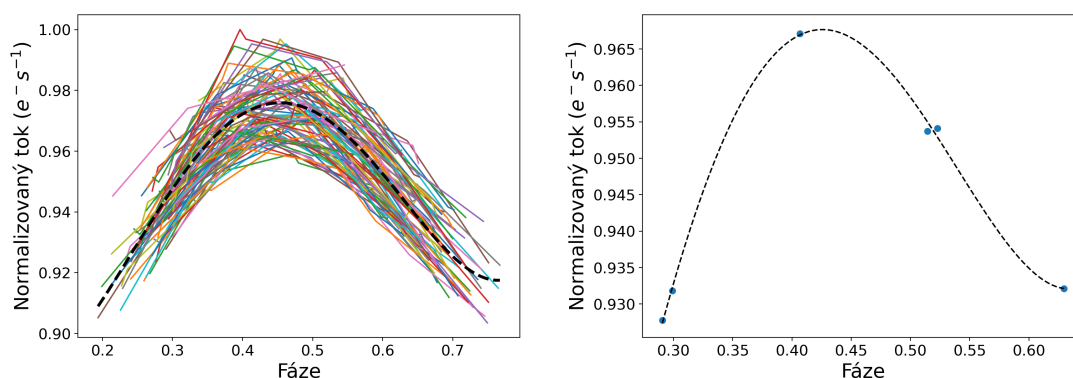
Fázové diagramy

Analogicky jako vykreslování fázových diagramů pro BL Cam ze sektoru 19, kde se body z každých deseti cyklů zprůměrovaly do jednoho cyklu, byla data BO Lyn ze sektoru 21 zprůměrována z více cyklů do jednoho. Aby se zachoval zhruba stejný počet bodů v jednom cyklu ze sektoru 47 jako z jednoho zprůměrovaného cyklu ze sektoru 21, byly zprůměrovány body z každých tří cyklů do jednoho. Jak již bylo zmíněno, kadence byla přibližně třikrát delší při měření sektoru 21 oproti měření sektoru 47, čímž se získala pouze třetina naměřených hodnot.

Fázový diagram celých (již zprůměrovaných) pulzů je vykreslen na obrázku 4.26 a fázový diagram pouze horní poloviny peaků je na levém obrázku 4.27. Na pravém obrázku 4.27 je zobrazen jeden typický pulz. U všech grafů jsou pulzy proloženy průměrným polynomem 4. stupně.



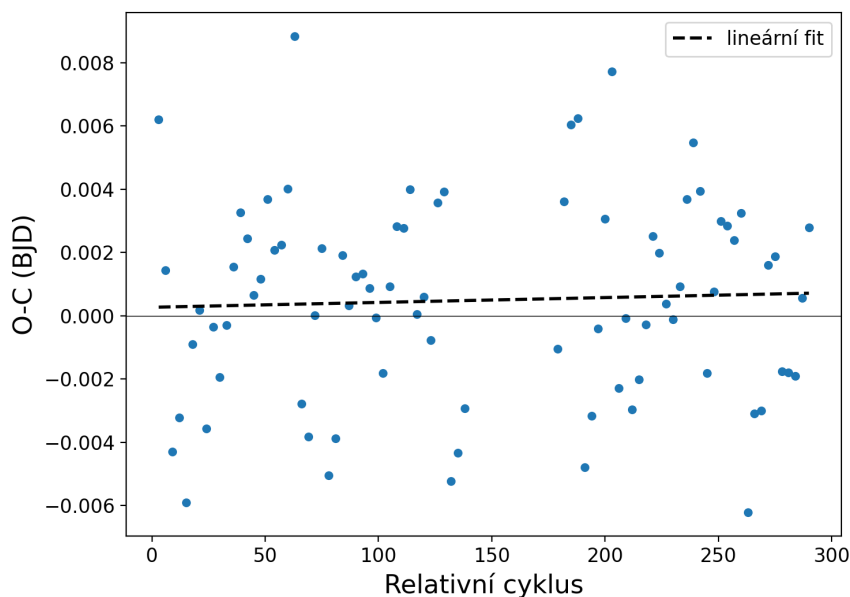
Obrázek 4.26: Fázový diagram pro data ze sektoru 21, proložený průměrným polynomem 4. stupně



Obrázek 4.27: Fázový diagram horní poloviny peaků pro data ze sektoru 21, proložený polynomem 4. stupně. Nalevo je graf pro všechna data, napravo je graf zobrazující typický pulz.

O-C diagramy

O-C diagram pro samostatný sektor 21 uvažující periodu $P = 0,09335811(7)$ dní ze článku publikovaný Li et al. [21] je vykreslen na obrázku 4.28. Situace je velmi podobná jako při zpracování sektoru 47, z proložené přímky lze vidět, že se ideální délka periody pro data z tohoto sektoru liší jen velmi málo od uvažované délky periody. Opět se však provedla korekce k určení té ideální periody. Upravená délka periody je $P = 0,0933609(4)$ dní. O-C diagram vykreslený s upravenou periodou je v příloze A.2.



Obrázek 4.28: O-C diagram pro zpracovaná data ze sektoru 21 před korekcí délky periody

4.3.3 Porovnání s daty z publikovaných článků

Publikovaných dat naměřených okamžiků maxim je výrazně méně pro BO Lyn než pro BL Cam. Čerpalo se ze tří článků, které se zabývaly zpracováním této hvězdy, přičemž všechny pracovaly s daty v HJD. Jelikož se BL Cam také nakonec zpracovala v BJD a data z *TESS* jsou také v BJD, rozhodlo se data pro BO Lyn převést z HJD do BJD.

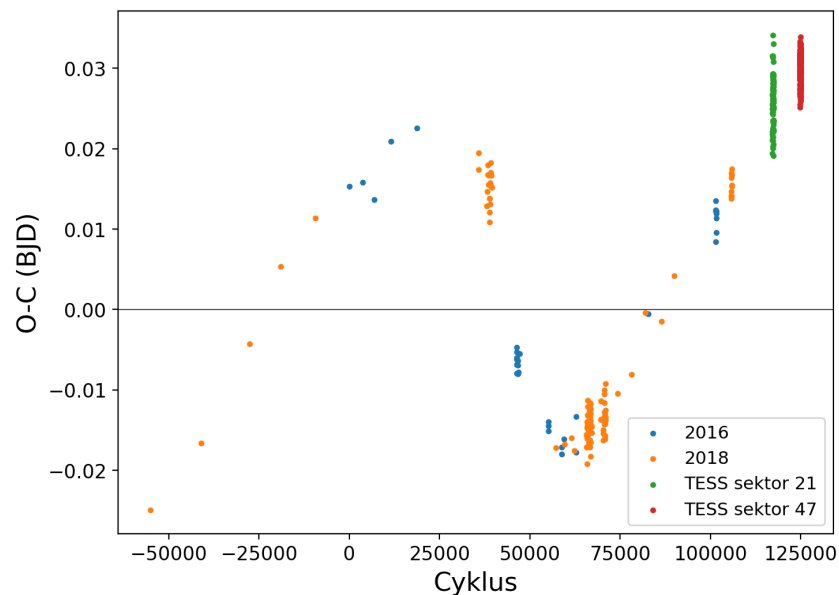
První publikovaný článek napsán Hintzem et al. [40] je z roku 2005. Další článek publikovaný autory Peña et al. [41] z roku 2016 však převzal všechna data prvního článku, a tedy v O-C diagramu pro porovnání všech dat nejsou data z prvního článku uvažována samostatně. Poslední článek publikovaný autory Li et al. [21] je z roku 2018. Z tohoto posledního článku se také čerpala délka periody, která se uvažovala při zpracování dat ze sektorů 21 a 47.

O-C diagram se všemi publikovanými daty včetně těch zpracovaných z *TESS*, je na obrázku 4.29. Uvažovaná efemerida pochází z článku publikovaném Li et al. [21] a její tvar po převedení z HJD do BJD je

$$BJD_{max} = 2447933,785(5) + 0,09335811(7)E \quad (4.3)$$

Další zpracování se pro BO Lyn již neprovádělo. Pro BL Cam se sice ještě prováděla analýza k zjištění nové efemeridy, která vyhovuje všem datům, ale tam byla situace jednodušší.

Komplikace by byla v tom, že poměr dat zpracovaných z *TESS*, oproti již publikovaných dat, je mnohem větší pro BO Lyn než pro BL Cam. To by mohlo způsobit, že by upravená efemerida, ve snaze vyhovět převažujícímu počtu dat z *TESS*, zanedbala dříve publikovaná data.



Obrázek 4.29: O-C diagram pro všechna naměřená data vzhledem k nejnovější efemeridě

5. Zpracování fotometrických dat z Ondřejova

Vlastní pozorování hvězdy BL Cam bylo plánováno distančně z teleskopu na Ondřejovské hvězdárně noci 3.4.2024. Počasí nebylo příznivé, takže místo vlastních pozorovaných dat bylo využito již naměřených, avšak dosud nevyužitých dat z různých nocí mezi roky 2023 a počátkem 2024. Souřadnice hvězdárny na Ondřejově jsou $49^{\circ}54'32,98''$ s. š. a $14^{\circ}46'54,8''$ v. d. [42].

Zpracování *TESS* dat hvězdy BO Lyn bylo zvoleno jako porovnání metod využitých při zpracování hvězdy BL Cam. Nebylo v úmyslu pro ni měřit fotometrická data z Ondřejova, protože má více jak dvakrát delší periodu než BL Cam, a její měření by vyžadovalo mnohem více času.

5.1 Popis aparatury

Všechna měření proběhla na Mayerově dalekohledu, jehož průměr objektivu činí 0,65 m a ohnisková vzdálenost je 23,42 m. Součástí dalekohledu je CCD kamera G2-3200 s čipem značky Kodak KAF-3200ME. Čip má plochu obsaženou 2184×1472 px. Každý pixel má rozměr $6,8 \mu\text{m}$, a dohromady tvoří plochu $14,9 \times 10,0$ mm. Během měření se použil binning, tedy že signál z plošky 2×2 pixelů se sečetl do jednoho pixelu. Po sečtení má pixel úhlovou velikost $1,05''$ a celkové zorné pole je $19,0' \times 12,8'$. Dalekohled má dosah až $\sim 21,5$ mag při expozici 180s [43].

5.2 Zpracování dat

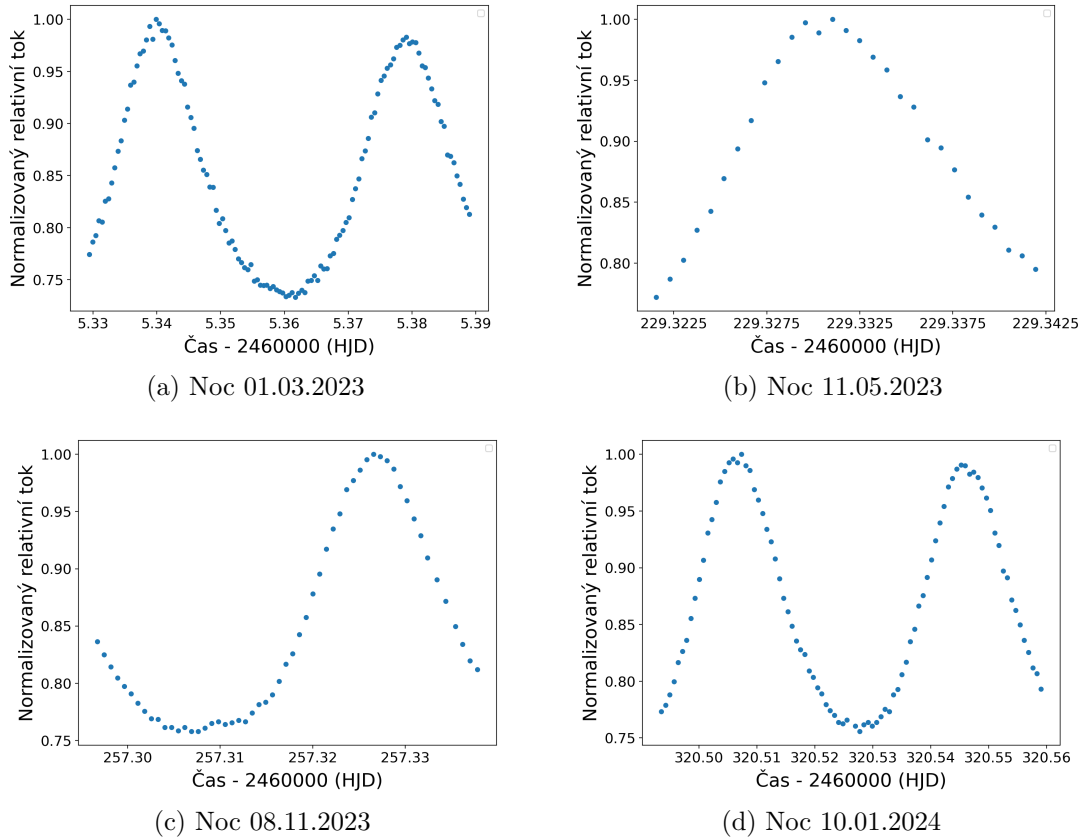
Hvězda BL Cam byla měřena 4 noci. Všechna měření byla provedena ve filtru V a v HJD čase. V tabulce 5.1 je dále uvedena expoziční doba a podmínky měření, které se pro různé noci lišily.

Tabulka 5.1: Podrobnosti o měření během jednotlivých nocí

Datum noci měření	Expoziční doba (s)	Podmínky měření
01.03.2023	40	jasno, měsíc ve 1/4 úplňku
11.05.2023	60	cirrus
08.11.2023	60	mraky
10.01.2024	60	jasno

TESS měřil světelné křivky v toku elektronů, ale data z Ondřejova byla naměřená v magnitudě. Magnituda se tedy musela převést na tok dle Pogsonovy rovnice 1.1. Poté se pro každou noc zvláště normalizoval tok vzhledem k největší hodnotě v každé noci. Světelné křivky ze všech čtyř nocí měření jsou na obrázku 5.1. Data se zatím ponechala v HJD, převod k BJD se provedl až po nalezení poloh maxim.

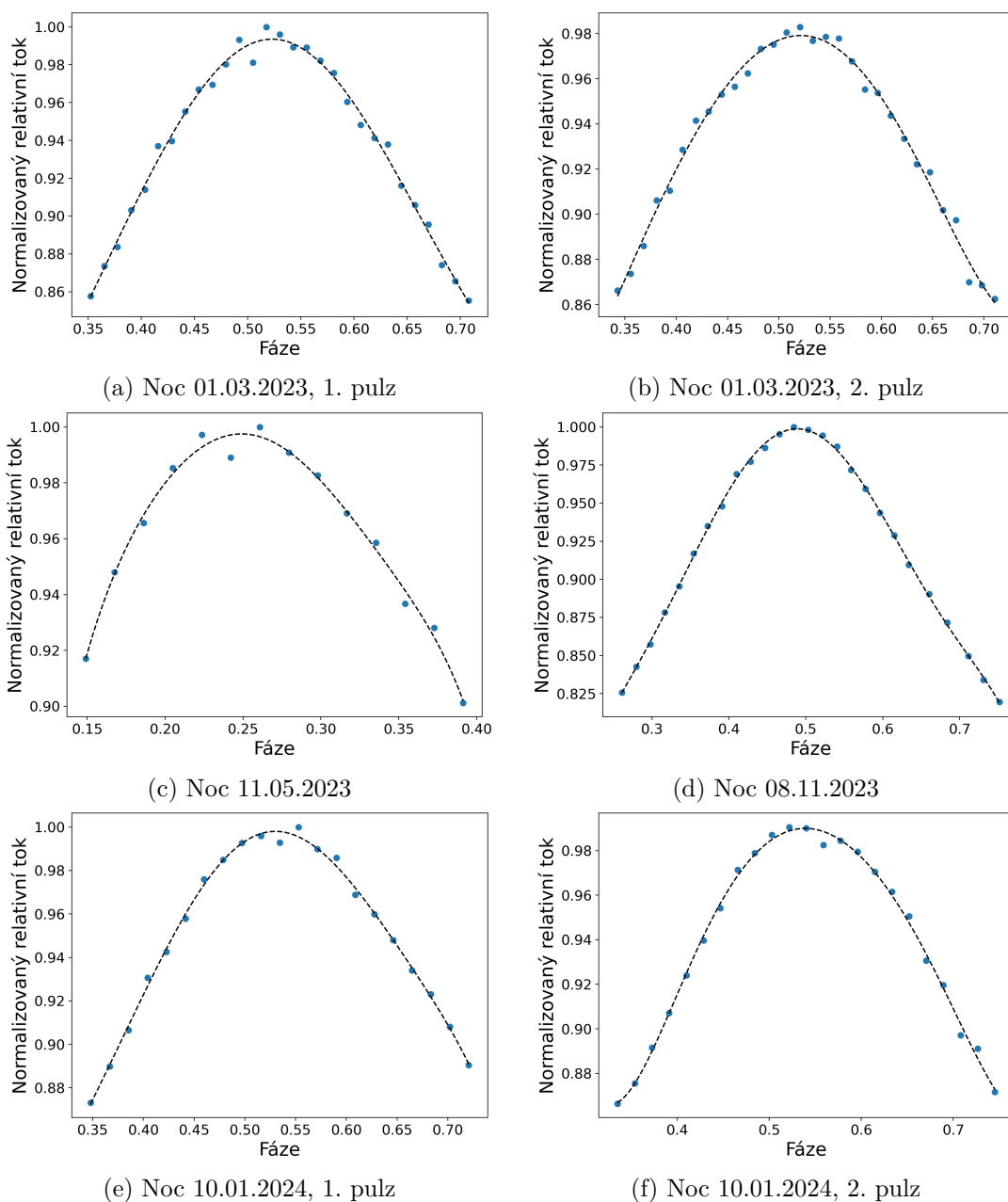
Na obrázku 5.1 lze vidět, že během čtyř nocí bylo naměřeno celkem šest pulzů. Pro všechny noci se provedla analýza stejným postupem jako u dat z *TESS*.



Obrázek 5.1: Světelné křivky naměřené z Ondřejova

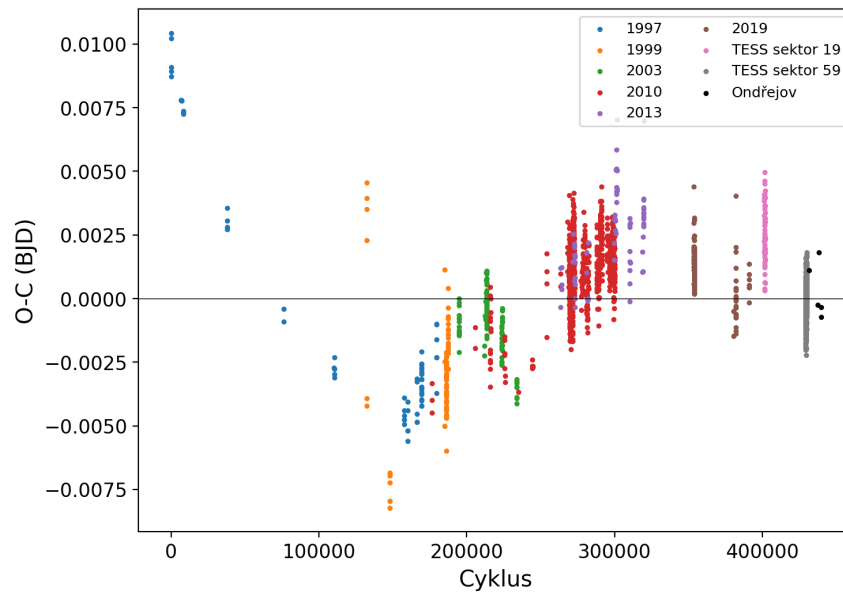
Světelné křivky se přepočítaly do fázových diagramů. Předtím se jako začátek fáze zvolilo první minimum, ale jelikož u těchto dat nejsou naměřené celé cykly, pro každou noc se počátek fáze zvolil jinde. U nocí 01.03.2023 a 10.01.2024, kde byly naměřeny dva pulzy se zvolil prostřední bod v datech, tak aby v každém pulzu byl stejný počet bodů. Pro data z noci 11.05.2023 se vybral první bod a pouze pro data z noci 08.11.2023 se vybralo minimum.

Následně byly proloženy polynomy 6. stupně na horní polovinu všech pulzů. U noci 11.05.2023 není na první pohled jasné, zda byl naměřen celý cyklus nebo pouze polovina. Přihlédnutím k původním naměřeným hodnotám magnitudy se ověřilo, že rozdíl v magnitudě je skoro 0,3 mag, což odpovídá téměř celému cyklu. V kapitole o výběru hvězd bylo uvedeno, že amplituda světelných změn pro hvězdu BL Cam je 0,330 mag. Fázové diagramy všech samostatně zpracovaných pulzů jsou na obrázku 5.2, kde jsou proloženy polynomem 6. stupně.



Obrázek 5.2: Fázové diagramy horní poloviny peaků ze všech pulzů naměřené z Ondřejova, proloženy polynomy 6. stupně

Nalezené polohy maxim jednotlivých pulzů byly přidány do společného O-C diagramu 4.16, který byl vytvořen v rámci kapitoly o zpracování dat z *TESS*. O-C diagram včetně nově zpracovaných dat z Ondřejova je na obrázku 5.3. Body se nachází v očekávané oblasti dlouhodobých změn periody.



Obrázek 5.3: O-C diagram pro všechna naměřená data vzhledem k nové efemeridě, včetně zpracovaných dat z Ondřejova

Korekce efemeridy se už neprováděla, jelikož se přidalo pouze šest nových okamžiků maxima. Změna v periodě, kterou by způsobily, by byla zanedbatelná vzhledem k tomu, že starších naměřených okamžiků je několik tisíc.

6. Diskuse výsledků

6.1 BL Cam

Na začátku zpracování hvězdy BL Cam byla vykreslena její světelná křivka ze sektoru 59 (viz obrázek 4.3) naměřená družicí *TESS*. Amplituda je po většinu času konstantní, ale ve dvou okamžicích prudce klesne tok. Podobný pokles není vidět pro světelnou křivku ze sektoru 19 (viz obrázek 4.9), takže se pravděpodobně jedná pouze o instrumentální efekt. Nemá však vliv na zpracování, jelikož se v oblastech poklesu toku nemění amplituda a v O-C diagramu 4.8 není v těchto oblastech pozorován větší rozptyl.

Při převádění všech pulzů do fázového diagramu byla použita perioda, která je viditelně delší než ta, která byla určena Zong et al. [39] v nejnovějším článku pomocí dlouhodobých dat na O-C diagramu. Bylo již zmíněno, že délka periody, která se využila na tvoření fázových diagramů, pocházela z práce Samus et al. [19] a je uvedena v tabulce 3.3 s hodnotou $P = 0,03909844$ dní. Délka periody publikovaná v nejnovějším článku, se kterou byl vykreslen O-C diagram 4.15, má hodnotu $P = 0,0390979135(9)$ dní.

Rozdíl v těchto dvou délkách period je však malý a tudíž měl zanedbatelný vliv na přepočtení polohy maxima vzhledem k fázi zpátky do BJD. V nejhorším případě by se mohl mylně zvažovat nějaký bod do sousedícího cyklu při převodu do fáze, což bylo prováděno pomocí vzorce 2.1. Toto by však teoreticky ovlivnilo pouze body v bezprostřední blízkosti minima, odkud se fáze počítala. Jelikož se dále ve fázových diagramech analyzovaly pouze horní poloviny peaků, nebyly krajní hodnoty vůbec zahrnovány při fitování jednotlivých polynomů. Větší rozdíl mezi délkami period by měl tendenci k postupnému posouvání pozdějších peaků k menším hodnotám fáze, tedy blíž k počátku. To však analýza nenaznačovala, takže lze říci, že rozdíl v délkách period byl v tomto kroku zpracování zanedbatelný.

Později ve zpracování, respektive při fitování polynomů na jednotlivé pulzy, bylo diskutováno, zda použít polynomy 4. nebo 6. stupně. Na obrázku 4.5 je porovnání průměrných polynomů obou stupňů ve fázových diagramech. Ze statistického hlediska nízkého počtu bodů by bylo lepší prokládat polynomy nižšího stupně. Ve zpracování ale bylo klíčové co nejpřesněji určit polohy maxima, což v tomto konkrétním případě lépe prováděl polynom vyššího stupně.

O-C diagram na obrázku 4.8 samostatných dat ze sektoru 59 má rozptyl 0,0043 dní. To je 10,9% délky periody. O-C diagram na obrázku 4.14 samostatných dat ze sektoru 19 má rozptyl 0,0045 dní, což je 11,6% délky periody. Rozptyl z *TESS* dat je srovnatelný s rozptylem samostatných publikovaných dat ze zdrojů [35, 37, 38, 39], takže fitování polynomů 6. stupně bylo oprávněné.

Nahlédnutím na celkový O-C diagram všech nashromážděných dat včetně těch zpracovaných v této práci na obrázku 5.3 je vidět spojitost mezi daty z různých zdrojů. Zdá se, že data publikovaná roku 2019 autory Zong et al. [39] nenavazují plynule na sousední data publikovaná roku 2013 autory Conidis a Delaney [38], a na zpracovaná *TESS* data ze sektoru 19 měřená koncem roku 2022.

Klesající závislost reprezentovaná zpracovanými daty z *TESS* oproti již publikovaným datům, byla předpovězena autory Zong et al. [39], kteří publikovali

nejnovější článek. U ostatních článků [34, 35, 36, 37, 38] ještě nebylo dostatek dlouhodobých dat, aby se mohla předpovědět taková závislost. Je pravděpodobné, že závislost bude nabývat sinusoidálního tvaru, ale na definitivní určení je potřeba ji sledovat dál.

Naopak závislosti na krátkodobých škálách necelého měsíce neodpovídají dlouhodobé závislosti. Sice zpracovaná data z *TESS* na obrázku 4.16 poukazují, že dlouhodobá závislost je nyní klesající, to však neindikuje, že v samotných sektorech bude závislost také klesající. Jejich periody by měly být kratší než v nové efemeridě s periodou $P = 0,0390979079(4)$ dní. Očekávalo by se, že obě závislosti budou klesající, přičemž data ze sektoru 59 by měly klesat strměji, jelikož se nachází blíže teoretickému inflexnímu bodu. Délky upravených period pro samostatné sektory, včetně upravené periody všech dat, jsou pro porovnání uvedeny v tabulce 6.1.

Tabulka 6.1: Délky period po korekci pro uvažované úseky

Úsek dat	Délka periody (dny)
<i>TESS</i> sektor 19	0,03909712(8)
<i>TESS</i> sektor 59	0,039099074(13)
vše	0,0390979079(4)

Upravená perioda pro samostatný sektor 19 je kratší než upravená perioda pro dlouhodobá data, což odpovídá očekáváním. Na obrázcích 4.13 a 4.14 lze vidět přechod z uvažované periody $P = 0,03909844$ dní. Naopak pro data ze samostatného sektoru 59 vychází perioda delší než by se očekávalo. Na obrázcích 4.7 a 4.8 lze opět vidět přechod ze stejné uvažované periody jako pro sektor 19.

Možné vysvětlení tohoto jevu je, že v O-C diagramu je nějaká další cyklická závislost, avšak s malou amplitudou, což mimo jiné zkoumali Fauvaud et al. [38]. Existence této závislosti by také mohla vysvětlovat, proč je perioda v tabulce 3.3 určená Samus et al. [19] delší než ta v posledním publikovaném článku od Zong et al. [39] s hodnotou $P = 0,0390979135(9)$ dní. Není tedy nutně špatně změřena, ale spíše byla mměřena po krátký časový interval. Tento pozorovaný efekt by také mohl vysvětlit, proč publikovaná data autory Zong et al. tak dobře nenavazují na sousední data, jak bylo popsáno výše.

Několik publikovaných článků s autory Kim et al. [36], Fauvaud et al. [37], a Zong et al. [39] navrhuje, že by hvězda BL Cam mohla být v binárním systému, přičemž druhá hvězda by byla hnědý trpaslík. Fauvaud et al. dokonce navrhuje, že by mohla být v systému tří hvězd. Obecně do změn v délce periody pravděpodobně přispívá existence další hvězdy, a to právě na krátkodobé škále.

6.2 BO Lyn

K porovnání efektivity metod zpracování dat z *TESS* hvězdy BL Cam sloužilo zpracování dat hvězdy BO Lyn. Největší rozdíl v metodách zpracování byl ten, že se jednotlivé horní poloviny peaků prokládaly polynomy 4. stupně místo 6. stupně.

Rozptyl v O-C diagramu A.1 pro sektor 47 je 0,0089 dní. To je 9,5% délky periody. Rozptyl v O-C diagramu A.2 pro sektor 21 je 0,016 dní. To je více než

pro sektor 47, a je to 16,7% délky periody. Tyto rozptyly jsou větší než ta pro publikovaná data, jak lze vidět v celkovém O-C diagramu 4.29, ale dat z *TESS* je více a také se všechny nachází v rozmezí dvou necelých měsíců. Také nejsou rozprostřeny přes několik dekád, jako ostatní naměřená data.

Ke zkoumání jak se vyvíjí délka periody na krátkodobé škále opět slouží O-C diagramy samostatných sektorů. Původní O-C diagramy obou sektorů byly vykresleny s délkou periody $P = 0,09335811(7)$ dní, kterou publikovali Li et al. [39]. Korekce délky period v samostatných sektorech jsou uvedeny v tabulce 6.2.

Tabulka 6.2: Délky period po korekci pro uvažované úseky jednotlivých sektorů. Pro úsek uvažující všechna data byla použita perioda z článku [39], která se dále neupravila.

Úsek dat	Délka periody (dny)
<i>TESS</i> sektor 21	0,0933609(4)
<i>TESS</i> sektor 47	0,09335752(16)
vše	0,09335811(7)

Data ze sektoru 21 jsou v O-C diagramu vykreslena se starou periodou (viz obr. 4.28). Nová perioda má délku $P = 0,0933609(4)$ a je o trochu delší než předchozí uvažovaná. Data ze sektoru 47 jsou zobrazena na O-C diagramu se starou periodou (viz obr. 4.23). V tomto případě jsou si délky periody ještě blíže, přičemž ta nová je trochu kratší. O-C diagramy vykreslené s upravenou periodou pro sektory 21 a 47 respektive, se nacházejí v příloze A.2.

Autoři Peña et al. [41] a Li et al. [39] předpovídají, že se dlouhodobá závislost na O-C diagramu bude dále vyvíjet přibližně sinusoidálně. Data získaná z *TESS* tuto předpověď podporují, jak lze vidět na O-C diagramu 4.29 všech dat, kde spojitě navazují na předchozí data. Z chování *TESS* dat v O-C diagramech na krátkodobé škále je pravděpodobné, že se v období mezi nimi vyskytl peak a nyní by mělo dojít ke zkracování délky periody. Důvodem k této předpovědi je, že na krátkodobé škále dat ze sektoru 21 je perioda delší, než se kterou byl vykreslen O-C diagram všech dat. Pro krátkodobou škálu sektoru 47 data naopak vykazují kratší periodu. Navíc jsou tyto upravené periody délkou velmi blízko délky periody v O-C diagramu všech dat.

6.3 Porovnání obou hvězd

Zpracování dat z *TESS* obou hvězd vynesly relativně podobné výsledky. Z celkových O-C diagramech (4.16 pro BL Cam a 4.29 pro BO Lyn) lze vyčíst, že data z *TESS* spojitě navazují na publikovaná starší data. Také jejich relativní rozptyl vůči délce periody je podobný, pohybuje se mezi 10-15%. Největší rozdíl mezi nimi je, že u hvězdy BO Lyn se závislost zdá být jednoznačně sinusoidální, ale u hvězdy BL Cam je závislost komplikovanější tím, že ho pravděpodobně ovlivňuje další cyklický efekt. Je také možné, že tento rozdíl vznikl tím, že publikovaných dat pro BO Lyn je řádově méně než pro BL Cam. Na definitivní rozhodnutí je potřeba obě hvězdy pozorovat dále.

Závěr

Pro obě hvězdy, BL Cam i BO Lyn, se prokázalo, že zpracovaná data z družice *TESS* spojitě navazují na již publikovaná data vykreslená v O-C diagramech a je predikován sinusoidální průběh. Zpracovaná data z Ondřejova pro BL Cam se také shodují s dlouhodobými daty. Vykreslením O-C diagramů pro samostatné sektory bylo pozorováno, jak se krátkodobě vyvíjí délka periody pulzací. V těchto O-C diagramech se pozoroval relativní rozptyl hodnot zhruba mezi 10%-15% délky periody.

Metoda fitování polynomů na jednotlivé pulzy ve světelných křivkách hvězd z *TESS* dat je efektivní. K tomuto závěru lze dospět, jelikož je zřejmé, že zpracovaná data celkově zapadají do dlouhodobých změn periody. Rozptyl těchto dat je srovnatelný s daty z publikovaných článků pro hvězdu BL Cam. Pro hvězdy BO Lyn rozptyl *TESS* dat větší než pro data z publikovaných článků, což mohlo být způsobeno velkou hustotou zpracovaných dat z *TESS* oproti ostatním datům.

V sektorech 19 a 59 se naměřila světelná křivka hvězdy BL Cam. Z dat v sektoru 19 se zjistilo, že perioda je kratší než poslední publikovaná, s délkou $P = 0,03909712(8)$ dní. Z dat v sektoru 59 se naopak zjistilo, že perioda je delší, s délkou $P = 0,039099074(13)$ dní. Krátkodobé změny délky periody se neshodují přesně s dlouhodobou změnou za několik dekád, takže je pravděpodobné, že délku periody na krátkodobé škále ovlivňuje další efekt, což by mohlo být způsobeno další hvězdou v systému.

Pro hvězdu BL Cam se navíc provedla korekce lineární efemeridy nejenom na krátkodobé škále jednotlivých sektorů, ale i včetně publikovaných dat. Upravená efemerida má tvar

$$BJD_{max} = 2443125,7954(2) + 0,0390979079(4)E \quad (6.1)$$

V sektorech 21 a 47 se naměřila světelná křivka hvězdy BO Lyn. Z dat v sektoru 21 se zjistilo, že perioda je delší než poslední publikovaná, s délkou $P = 0,0933609(4)$ dní. Z dat v sektoru 47 se zjistilo, že perioda je kratší, s délkou $P = 0,09335752(16)$ dní. Krátkodobé změny délky periody se shodují s dlouhodobou změnou za několik dekád.

Seznam použité literatury

1. RODRIGUEZ, E. High Amplitude Delta Scuti-type variables. *Communications in Asteroseismology*. 2004, roč. 145, s. 42–47. Dostupné z DOI: 10.1553/cia145s40.
2. PERCY, J. R.; MATTHEWS, J. M.; WADE, J. D. Period changes in dwarf Cepheids. 1980, roč. 82, s. 172–176.
3. Z. MIKULÁŠEK, M. Zejda. *Úvod do studia proměnných hvězd*. Brno: Masarykova univerzita, 2013. ISBN 978-80-210-6241-2.
4. N.N. SAMUS, O.V. Durlevich. *GCVS Variability Types*. Dostupné také z: <http://www.sai.msu.su/gcvs/gcvs/vartype.htm>. [cit. 2024-03-15].
5. Z. MIKULÁŠEK, J. Krůčka. *Základy fyziky hvězd*. 2005.
6. HANDLER, G. Delta Scuti Variables. *Institut für Astronomie*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://arxiv.org/pdf/2110.09806.pdf>.
7. SRBA, J. První generace hvězd ve vesmíru konečně pozorována. *Česká astronomická společnost*. 2015. Dostupné také z: <https://www.astro.cz/clanky/vzdaleny-vesmir/prvni-generace-hvezd-ve-vesmiru-konecne-pozorovana.html>.
8. AMERICAN ASSOCIATION OF VARIABLE STAR OBSERVERS. *Delta Scuti and the Delta Scuti variables*. Dostupné také z: https://www.aavso.org/vsots_delsct. [cit. 2024-03-06].
9. CHANDRA X-RAY OBSERVATORY. *Pulsating Variable Stars and the Hertzsprung-Russell (H-R) Diagram*. Dostupné také z: https://chandra.harvard.edu/edu/formal/variable_stars/bg_info.html. [cit. 2024-03-27].
10. HARMANEC, P. *Základy astronomie a astrofyziky*. Matfyzpress, 2021. Verze 11.
11. IAU. *RESOLUTION B1*. Dostupné také z: https://www.iau.org/static/resolutions/IAU2015_English.pdf. [cit. 2024-03-30].
12. THE UNIVERSITY OF TEXAS MCDONALD OBSERVATORY. *UBVRI filters*. Dostupné také z: <https://mcdonaldobservatory.org/research/instruments/ubvri-filters>. [cit. 2024-04-09].
13. *UBV photometric system*. Dostupné také z: <http://astro.vaporia.com/start/ubvphotometricssystem.html>. [cit. 2024-04-03].
14. HARMANEC, P.; BROŽ, M. *Stavba a vývoj hvězd*. Matfyzpress, 2011.
15. EASTMAN, J. *Barycentric Julian Date*. Dostupné také z: www.astroutils.astronomy.osu.edu/time/bjd_explanation.html. [cit. 2024-04-09].
16. EASTMAN, J. *HJD to BJD conversion*. Dostupné také z: www.astroutils.astronomy.osu.edu/time/hjd2bjd.html. [cit. 2024-04-09].

17. LIN, J.; WANG, X.; MO, J.; XI, G.; FILIPPENKO, A. V.; YAN, S.; BRINK, T. G.; YANG, Y.; WU, C.; NÉMETH, P.; LI, G.; GUO, F.; GUO, J.; CAI, Y.; XIONG, H.; ZHENG, W.; LIU, Q.; ZHANG, J.; JIANG, X.; CHEN, L.; XIA, Q.; PENG, H.; CHEN, Z.; LI, W.; LIN, W.; XIANG, D.; MA, X.; LIU, J. Minute-cadence observations of the LAMOST fields with the TMTS: II. Catalogues of short-period variable stars from the first 2-yr surveys. 2023, roč. 523, č. 2, s. 2172–2192. Dostupné z DOI: 10.1093/mnras/stad994.
18. CHANG, S. -W.; PROTOPAPAS, P.; KIM, D. -W.; BYUN, Y. -I. Statistical Properties of Galactic δ Scuti Stars: Revisited. 2013, roč. 145, č. 5, s. 132. Dostupné z DOI: 10.1088/0004-6256/145/5/132.
19. SAMUS', N. N.; KAZAROVETS, E. V.; DURLEVICH, O. V.; KIREEVA, N. N.; PASTUKHOVA, E. N. General catalogue of variable stars: Version GCVS 5.1. *Astronomy Reports*. 2017, roč. 61, č. 1, s. 80–88. Dostupné z DOI: 10.1134/S1063772917010085.
20. RODRÍGUEZ, E.; LÓPEZ-GONZÁLEZ, M. J.; LÓPEZ DE COCA, P. A revised catalogue of delta Sct stars. 2000, roč. 144, s. 469–474. Dostupné z DOI: 10.1051/aas:2000221.
21. LI, L.; QIAN, S.; ZHANG, J.; ZHU, L.; LIAO, W. High amplitude δ Scuti star BO Lyn with evidence of a late A-type companion in an elliptical orbit. *Research in Astronomy and Astrophysics*. 2018, roč. 18, č. 1, s. 011. Dostupné z DOI: 10.1088/1674-4527/18/1/11.
22. NASA. *Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS)*. Dostupné také z: <https://exoplanets.nasa.gov/tess/>. [cit. 2024-03-17].
23. NASA. *What is an Exoplanet?* Dostupné také z: <https://exoplanets.nasa.gov/what-is-an-exoplanet/overview/>. [cit. 2024-03-17].
24. NASA. *What's a Transit?* Dostupné také z: <https://exoplanets.nasa.gov/faq/31/whats-a-transit/>. [cit. 2024-03-17].
25. NASA. *Characteristics of the TESS space telescope*. Dostupné také z: <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/tess/the-tess-space-telescope.html>. [cit. 2024-04-19].
26. MIT. *TESS Mission*. Dostupné také z: <https://tess.mit.edu/science/>. [cit. 2024-03-26].
27. MIT. *TESS Observations*. Dostupné také z: <https://tess.mit.edu/observations/>. [cit. 2024-03-26].
28. MIT. *Data Analysis Tools*. Dostupné také z: <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/tess/data-analysis-tools.html>. [cit. 2024-04-19].
29. NASA. *Target Pixel Files*. Dostupné také z: <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/tess/Target-Pixel-File-Tutorial.html#>. [cit. 2024-04-19].
30. AAVSO. *BL Camelopardalis*. Dostupné také z: <https://www.aavso.org/lcotw/bl-camelopardalis>. [cit. 2024-03-26].
31. NASA. *TESS-point Web Tool*. Dostupné také z: https://heasarc.gsfc.nasa.gov/wsgi-scripts/TESS/TESS-point_Web_Tool/TESS-point_Web_Tool/wtv_v2.0.py/. [cit. 2024-04-18].

32. BERG, R. A.; DUTHIE, J. G. GD 428: an Extreme Dwarf Cepheid. 1977, roč. 215, s. L25. Dostupné z DOI: 10.1086/182469.
33. MCNAMARA, D. H.; FELTZ K. A., Jr. GD 428 and the nature of the dwarf cepheids. 1978, roč. 90, s. 275–284. Dostupné z DOI: 10.1086/130325.
34. HINTZ, E. G.; JONER, M. D.; MCNAMARA, D. H.; NELSON, K. A.; MOODY, J. W.; KIM, C. Time-Series Ensemble Photometry of SX Phoenicis Stars. I. BL Camelopardalis. 1997, roč. 109, s. 15–20. Dostupné z DOI: 10.1086/133854.
35. ZHOU, A.; RODRÍGUEZ, E.; JIANG, S.; ROLLAND, A.; COSTA, V. Multiple frequency analysis of the large-amplitude SX Phoenicis star BL Camelopardalis. 1999, roč. 308, č. 3, s. 631–639. Dostupné z DOI: 10.1046/j.1365-8711.1999.02708.x.
36. KIM, C.; JEON, Y. -B.; KIM, S. -L. Differential Time-Series CCD Photometry of BL Camelopardalis Revisited. 2003, roč. 115, č. 808, s. 755–760. Dostupné z DOI: 10.1086/375032.
37. FAUVAUD, S.; SAREYAN, J. -P.; RIBAS, I.; RODRÍGUEZ, E.; LAMPENS, P.; KLINGENBERG, G.; FARRELL, J. A.; FUMAGALLI, F.; SIMONETTI, J. H.; WOLF, M.; SANTACANA, G.; ZHOU, A. -Y.; MICHEL, R.; FOX-MACHADO, L.; ALVAREZ, M.; NAVA-VEGA, A.; LÓPEZ-GONZÁLEZ, M. J.; CASANOVA, V. M.; ACEITUNO, F. J.; SCHEGGIA, I.; RIVES, J. -J.; HINTZ, E. G.; VAN CAUTEREN, P.; HELVACI, M.; YESILYAPRAK, C.; GRAHAM, K. A.; KRÁL, L.; KOCIÁN, R.; KUČÁKOVÁ, H.; FAUVAUD, M.; GRANSLO, B. H.; MICHELET, J.; NICHOLSON, M. P.; VUGNON, J. -M.; KOTKOVÁ, L.; TRUPAROVÁ, K.; ULUSOY, C.; YASARSOY, B.; AVDIBEGOVIC, A.; BLAĚEK, M.; KLINER, J.; ZASCHKE, P.; BARTOŠÍKOVÁ, S.; VILÁŠEK, M.; TRONDAL, O.; VAN DEN ABBEEL, F.; BEHREND, R.; WÜCHER, H. The field high-amplitude SX Phe variable BL Cam: results from a multisite photometric campaign. II. Evidence of a binary - possibly triple - system. 2010, roč. 515, A39. Dostupné z DOI: 10.1051/0004-6361/201014243.
38. CONIDIS, G. J.; DELANEY, P. A. Period Changes in SX Phoenicis Stars: IV. BL Camelopardali. 2013, roč. 125, č. 928, s. 639. Dostupné z DOI: 10.1086/671239.
39. ZONG, P.; ESAMDIN, A.; FU, J. N.; BIAO NIU, H.; JIE FENG, G.; ZHI YANG, T.; HAI BAI, C.; ZHANG, Y.; LIU, J. Z. Pulsations of the SX Phe Star BL Camelopardalis. 2019, roč. 131, č. 1000, s. 064202. Dostupné z DOI: 10.1088/1538-3873/ab0a1a.
40. HINTZ, E. G.; BUSH, T. C.; ROSE, M. B. Monitoring Three Less-Studied δ Scuti Variables: GW Ursae Majoris, BO Lyncis, and AN Lyncis. 2005, roč. 130, č. 6, s. 2876–2883. Dostupné z DOI: 10.1086/497392.
41. PEÑA, J. H.; VILLARREAL, C.; PIÑA, D. S.; RENTERÍA, A.; GUILLEN, J.; SONI, A. A.; HUEPA, H. A Study of BO Lyn, a neglected HADS star. 2016, roč. 52, s. 385.
42. ASTRONOMICKÝ ÚSTAV AV ČR. *Kontaktní údaje*. Dostupné také z: <https://www.asu.cas.cz/cz/kontakty/kontakt>. [cit. 2024-04-28].

43. ŽĎÁRSKÁ, J. *Mayerův dalekohled*. Dostupné také z: <https://users.math.cas.cz/~krizek/cosmol/pdf/J27.pdf>. [cit. 2024-04-20].

Seznam obrázků

1.1	Rozdělení proměnných hvězd, převzato z [3]	5
1.2	Hertzsprung-Russellův diagram, převzato z [9]	6
1.3	H-R diagram s důrazem na hvězdy typu Delta Scuti s červeně vyznačeným pásem nestability. Převzato z [3] a upraveno.	7
2.1	Dvě světelné křivky typických HADS hvězd. Nalevo je XX Cyg, která pulzuje s jedním módem. Napravo je CY Aqr, která pulzuje s více než jedním módem. Převzato z [8].	13
4.1	TPF. Obrázek nalevo znázorňuje ze které plochy pixelů se stáhla data. Obrázek napravo znázorňuje pozadí, které se odečetlo.	20
4.2	Úsek přibližně 7' kolem hvězdy BL Cam z přehlídky oblohy <i>DSS2 red</i> , vygenerovaný pomocí programu <i>Aladin</i> .	21
4.3	Světelná křivka hvězdy BL Cam přes období 27 dnů ze sektoru 59 družice <i>TESS</i> .	21
4.4	Světelná křivka hvězdy BL Cam přes období jednoho dne ze sektoru 59 družice <i>TESS</i> .	22
4.5	Fázový diagram pro data ze sektoru 59, přičemž nalevo jsou pulzy proloženy průměrným polynomem 4. stupně, a napravo jsou pulzy proloženy průměrným polynomem 6. stupně.	23
4.6	Fázový diagram pouze horní poloviny peaků pro data ze sektoru 59, proložený polynomem 6. stupně. Nalevo je graf pro všechna data, napravo je graf zobrazující typický pulz.	23
4.7	O-C diagram pro zpracovaná data ze sektoru 59 před korekcí délky periody	24
4.8	O-C diagram pro zpracovaná data ze sektoru 59 po korekci délky periody	24
4.9	Světelná křivka hvězdy BL Cam přes období 27 dnů ze sektoru 19 družice <i>TESS</i> .	25
4.10	Světelná křivka hvězdy BL Cam přes období jednoho dne ze sektoru 19 družice <i>TESS</i> .	25
4.11	Fázový diagram pro data ze sektoru 19, proložený průměrným polynomem 6. stupně	26
4.12	Fázový diagram pouze horní poloviny peaků pro data ze sektoru 19, proložený polynomem 6. stupně. Nalevo je graf pro všechna data, napravo je graf zobrazující typický pulz.	27
4.13	O-C diagram pro zpracovaná data ze sektoru 19 před korekcí délky periody	27
4.14	O-C diagram pro zpracovaná data ze sektoru 19 po korekci délky periody	28
4.15	O-C diagram pro všechna naměřená data vzhledem k poslední publikované efemeridě	29
4.16	O-C diagram pro všechna naměřená data vzhledem k nové efemeridě	30
4.17	TPF s červeně vyznačenou ploškou označených pixelů pro hvězdu BO Lyn ze sektoru 47	31

4.18	Úsek přibližně 7' kolem hvězdy BO Lyn z přehlídky oblohy <i>DSS2 red</i> , vygenerovaný pomocí programu <i>Aladin</i>	31
4.19	Světelná křivka hvězdy BO Lyn přes období 27 dnů ze sektoru 47 družice <i>TESS</i>	32
4.20	Světelná křivka hvězdy BO Lyn přes období jednoho dne ze sektoru 47 družice <i>TESS</i>	32
4.21	Fázový diagram pro data ze sektoru 47, proložený průměrným polynomem 4. stupně	33
4.22	Fázový diagram pouze horní poloviny peaků pro data ze sektoru 47, proložený polynomem 4. stupně. Nalevo je graf pro všechna data, napravo je graf zobrazující typický pulz.	33
4.23	O-C diagram pro zpracovaná data ze sektoru 47 před korekcí délky periody	34
4.24	Světelná křivka hvězdy BO Lyn přes období 27 dnů ze sektoru 21 družice <i>TESS</i>	35
4.25	Světelná křivka hvězdy BO Lyn přes období jednoho dne ze sektoru 21 družice <i>TESS</i>	35
4.26	Fázový diagram pro data ze sektoru 21, proložený průměrným polynomem 4. stupně	36
4.27	Fázový diagram horní poloviny peaků pro data ze sektoru 21, proložený polynomem 4. stupně. Nalevo je graf pro všechna data, napravo je graf zobrazující typický pulz.	36
4.28	O-C diagram pro zpracovaná data ze sektoru 21 před korekcí délky periody	37
4.29	O-C diagram pro všechna naměřená data vzhledem k nejnovější efemeridě	38
5.1	Světelné křivky naměřené z Ondřejova	40
5.2	Fázové diagramy horní poloviny peaků ze všech pulzů naměřené z Ondřejova, proloženy polynomy 6. stupně	41
5.3	O-C diagram pro všechna naměřená data vzhledem k nové efemeridě, včetně zpracovaných dat z Ondřejova	42
A.1	O-C diagram pro zpracovaná data ze sektoru 47 po korekci délky periody	55
A.2	O-C diagram pro zpracovaná data ze sektoru 21 po korekci délky periody	55

Seznam tabulek

3.1	Hvězdy splňující kritéria ze zdroje Lin et al. [17]	17
3.2	Hvězdy splňující kritéria ze zdroje Chang et al. [18]	17
3.3	Hvězdy splňující kritéria ze zdroje Samus et al. [19]	17
4.1	Technické podrobnosti o měření hvězdy BL Cam družicí <i>TESS</i> . Výstup z internetového zdroje [31]	20
4.2	Technické podrobnosti o měření hvězdy BO Lyn družicí <i>TESS</i> . Výstup z internetového zdroje [31]	30
5.1	Podrobnosti o měření během jednotlivých nocí	39
6.1	Délky period po korekci pro uvažované úseky	44
6.2	Délky period po korekci pro uvažované úseky jednotlivých sektorů. Pro úsek uvažující všechna data byla použita perioda z článku [39], která se dále neupravila.	45

A. Přílohy

A.1 Příloha 1: Script v *Pythonu* na stažení dat z *TESS*

```
import lightkurve as lk
search_results = lk.search_tesscut('hh:mm:ss +dd:mm:ss')
print(search_results)

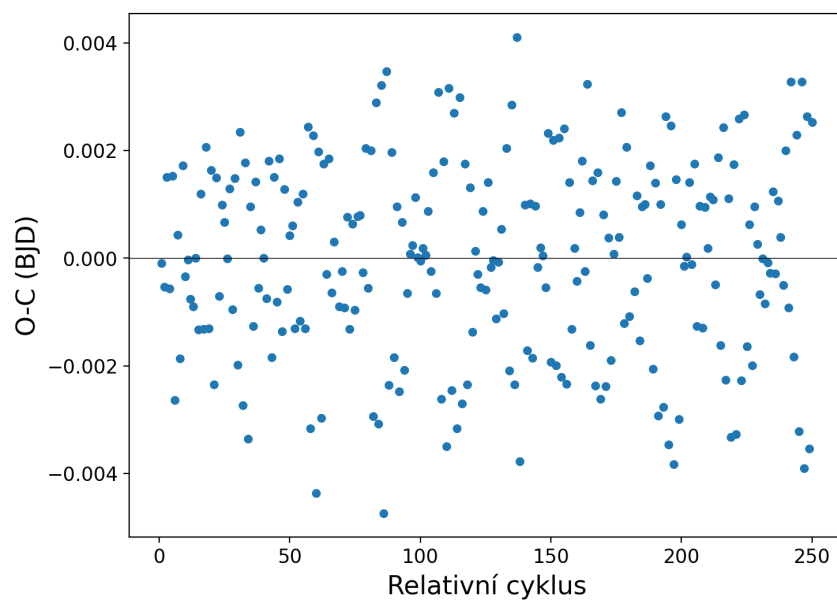
tpfs = search_results.download_all(cutout_size=20,quality_bitmask='hardest')
tpfs[].plot()

target_mask=tpfs[].create_threshold_mask(threshold=150, reference_pixel='center')
target_mask [10:11,10:11] = 1
tpfs[].plot(aperture_mask = target_mask, mask_color = 'r')
n_target_pixels = target_mask.sum()
n_target_pixels

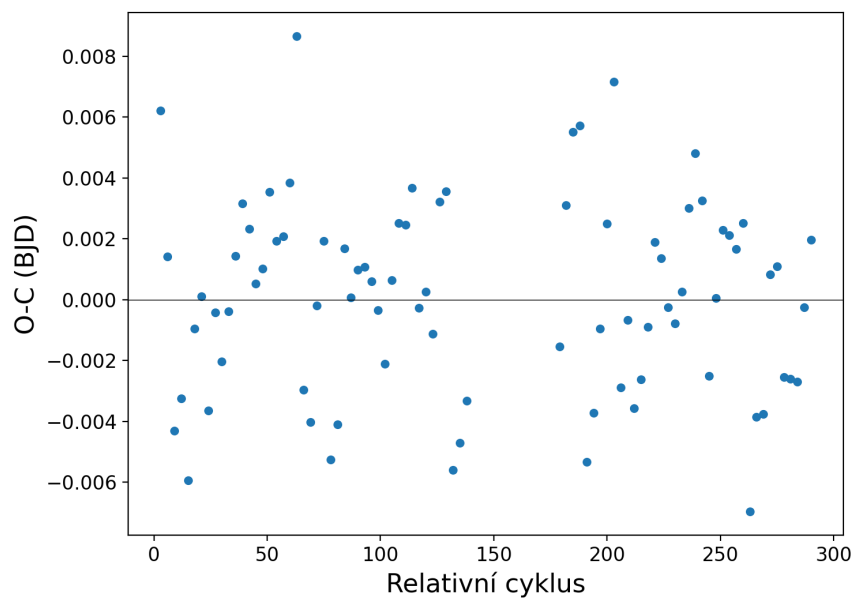
target_lc = tpfs[].to_lightcurve(aperture_mask = target_mask)
bg_mask=~tpfs[].create_threshold_mask(threshold=0.001, reference_pixel=None)
tpfs[].plot(aperture_mask = bg_mask, mask_color = 'w')

n_bg_pixels = bg_mask.sum()
n_bg_pixels
bg_lc_per_pixel = tpfs[].to_lightcurve(aperture_mask=bg_mask)/n_bg_pixels
bg_estimate_lc = bg_lc_per_pixel * n_target_pixels
corr_lc = target_lc - bg_estimate_lc.flux
corr_lc.plot()
corr_lc.to_csv("output_original.csv")
```

A.2 Příloha 2: Dodatečné O-C diagramy pro hvězdu BO Lyn



Obrázek A.1: O-C diagram pro zpracovaná data ze sektoru 47 po korekci délky periody



Obrázek A.2: O-C diagram pro zpracovaná data ze sektoru 21 po korekci délky periody