

**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ  
FAKULTA**  
Univerzita Karlova

**BAKALÁRSKA PRÁCA**

Filip Smorada

**Pulzující hvězdy z databáze TESS**

Astronomický ústav UK

Vedúci bakalárskej práce: doc. RNDr. Petr Zasche, Ph.D.

Študijný program: Fyzika

Študijný odbor: FP

Praha 2024

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

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

V ..... dne .....

Podpis autora

Týmto by som rád poďakoval môjmu vedúcemu práce doc. RNDr. Petrovi Zashchemu, Ph.D. za mnohé rady a vedenie pri tvorbe tejto práce. Taktiež ďakujem mojej rodine za podporu počas celého štúdia.

Názov práce: Pulzujúce hviezdy z databázy TESS

Autor: Filip Smorada

Ústav: Astronomický ústav UK

Vedúci bakalárskej práce: doc. RNDr. Petr Zasche, Ph.D., Astronomický ústav UK

Abstrakt: Pulzujúce hviezdy majú premennú veľkosť, teplotu, farbu, atď. Tieto faktory zapríčiňujú zmenu množstva vyžarovaného svetla. Zmena je zvyčajne periodická a často sa skladá z viacerých frekvencií s rôznymi amplitúdami. Cieľom tejto práce je určenie frekvencií pulzácií hviezd a následne porovnanie výsledkov získaných z rôznych meraní.

Kľúčové slová: Pulzujúce premenné hviezdy, hviezdy typu delta Scuti, TESS satelit

Title: Pulsating stars from TESS database

Author: Filip Smorada

Institute: Astronomical institute UK

Supervisor: doc. RNDr. Petr Zasche, Ph.D., Astronomical institute UK

Abstract: Pulsating stars undergo changes, i.e. perpetual expansion and contraction, temperature changes, color changes. These changes result in variations of emitted light. Variation is usually periodical and often consists of several distinct processes with their respective frequencies and amplitudes. This thesis focuses on identifying pulsation frequencies of studied stars and comparing results acquired from data from different sources.

Keywords: Pulsating variable stars, delta Scuti stars, TESS satellite

# Obsah

Úvod	2
<b>1 Teoretický úvod</b>	<b>3</b>
1.1 Premenné hviezdy . . . . .	4
1.2 $\delta$ Scuti . . . . .	5
1.3 Zdroj energie . . . . .	6
1.4 Rovnica zachovania hmoty a rovnica hydrostatickej rovnováhy . . . . .	7
1.5 Závislosť veľkosti na tepelnej bilancii . . . . .	8
1.6 Opacitný mechanizmus . . . . .	8
1.7 Pogsonova rovnica . . . . .	9
1.8 Družica TESS . . . . .	9
<b>2 Spracovanie dát</b>	<b>11</b>
2.1 Stahovanie dát z databázy TESS . . . . .	11
2.2 CCD detektory . . . . .	12
2.3 Offset, dark a flat . . . . .	12
2.4 Muniwin . . . . .	13
2.5 Výpočet frekvencií . . . . .	13
<b>3 Analýza dát</b>	<b>14</b>
3.1 SZ Lyncis . . . . .	14
3.2 LW UMa . . . . .	19
3.3 GSC 02980-01600 . . . . .	27
<b>Záver</b>	<b>32</b>
<b>Zoznam použitej literatúry</b>	<b>33</b>

# Predslov

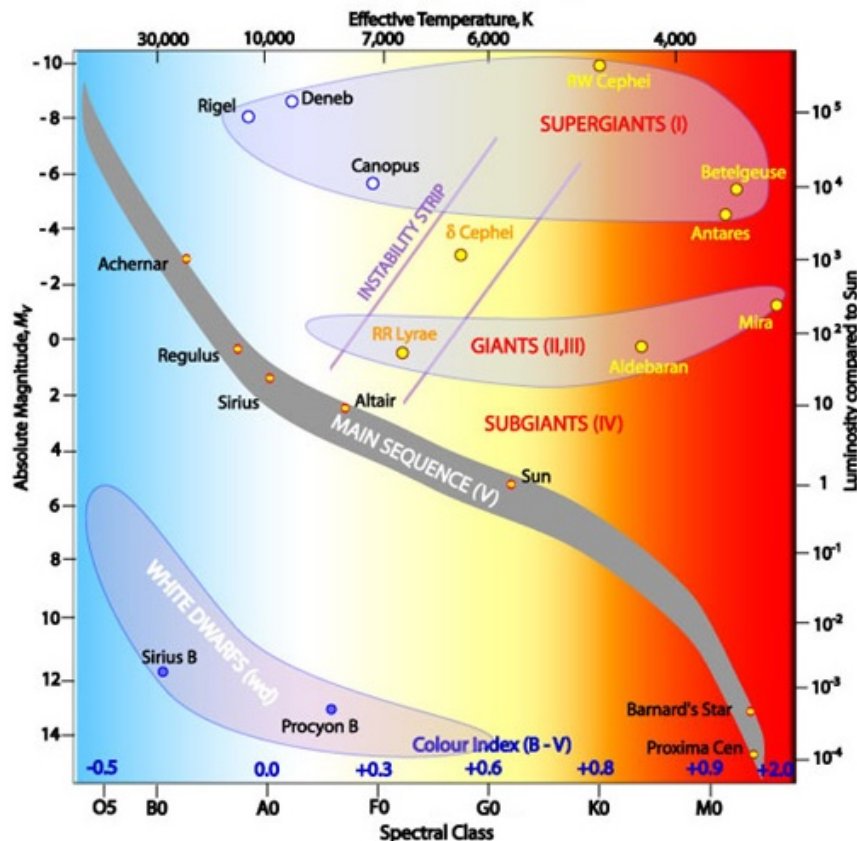
Prvý záznam o premennej hviezde je z konca 16. storočia, kedy David Fabricius v roku 1596 pozoroval novú hviezdu v súhvezdí Velryby (Cet). V priebehu pár mesiacov pozorovaní sa jej jasnosť zmenšila a, aj keď už nebola až tak výrazná, stále ju bolo možné vidieť voľným okom. Niekoľko rokov neskôr túto hviezdu pozoroval Johann Bayer a nazval ju (o) Ceti. V roku 1609 Fabricius na túto hviezdu pri pozorovaní znova narazil a bol prekvapený, že bola znova jasná ako kedysi. V roku 1638 Johannes Holwarda túto hviezdu znovuobjavil a taktiež, ako Fabricius, pozoroval, ako z oblohy pomaly mizla a znovu sa objavovala. V roku 1662 ju Johannes Hevelius detailne študoval a pomenoval ju Mira. Nakoniec prispel Ismael Bullialdus tým, že si všimol, že každý rok je Mira najjasnejšia vždy o jeden mesiac skôr a tým bola potvrdená periodická zmena v jasnosti hviezdy. Týmto bola objavená prvá hviezda, ktorá bola periodicky premenná. V dnešnej dobe je známych cez milión premenných hviezd [1].

Periodicky premenné hviezdy delíme na dva hlavné typy. Prvým sú geometrické premenné hviezdy, kde je zmena jasnosti zapríčinená napríklad rotáciou hviezdy. Pozorovanú jasnosť ovplyvňujú napríklad tmavé škvrny na hviezde, ktoré je miestami možné pri jej rotovaní pozorovať. Okrem rotácie môže byť geometrická premennosť jasnosti zapríčinená zákrytom hviezdy. Jasnosť sa v tomto prípade mení tým, že hviezdu zakryje iný, menej jasný objekt. Ich celkový žiarivý tok sa teda nemení, ale ide o vonkajšiu zmenu, ktorá zapríčiňuje viditeľnú zmenu hviezdy pozorovanej na oblohe. Druhým typom sú fyzicky premenné hviezdy, ktorých jasnosť sa mení kvôli zmene vnútornej štruktúry hviezdy, napríklad periodickou zmenou veľkosti - rozpínanie a zmršťovanie.

Cieľom tejto práce je detailná analýza pulzujúcich hviezd a porovnanie výsledkov analýzy rôznych meraní. Práca sa zameriava na hviezdy typu  $\delta$  Scuti, čo je typ pulzujúcej hviezdy s krátkou periódou.

# 1. Teoretický úvod

Hlavné rozdelenie hviezd je vykreslené v grafe závislosti magnitúdy na efektívnej teplote hviezdy. Táto závislosť sa označuje ako Hertzsprung-Russelov (HR) diagram. Z historických dôvodov má diagram pomenovanie po dvoch navzájom nezávislých tvorcoch, Ejnar Hertzsprung (1911) a Norris Russel (1913) [2]. Niekedy sa miesto magnitúdy uvádza luminozita hviezdy  $L$  a miesto číselného vyjadrenia efektívnej teploty sa používa spektrálny typ hviezdy vyjadrený písmenami, ktoré reprezentujú určitý interval teplôt.



**Obr. 1.1:** HR diagram s hlavným rozdelením hviezd v závislosti na efektívnej teplote  $T_{\text{eff}}$  (horná os) a absolútnej magnitúde (ľavá os). Na pravej strane je os, vyjadrujúca luminozitu v tvare  $L/L_{\odot}$  a dolná os vyjadruje spektrálnu triedu hviezdy. Prevzané z [3]

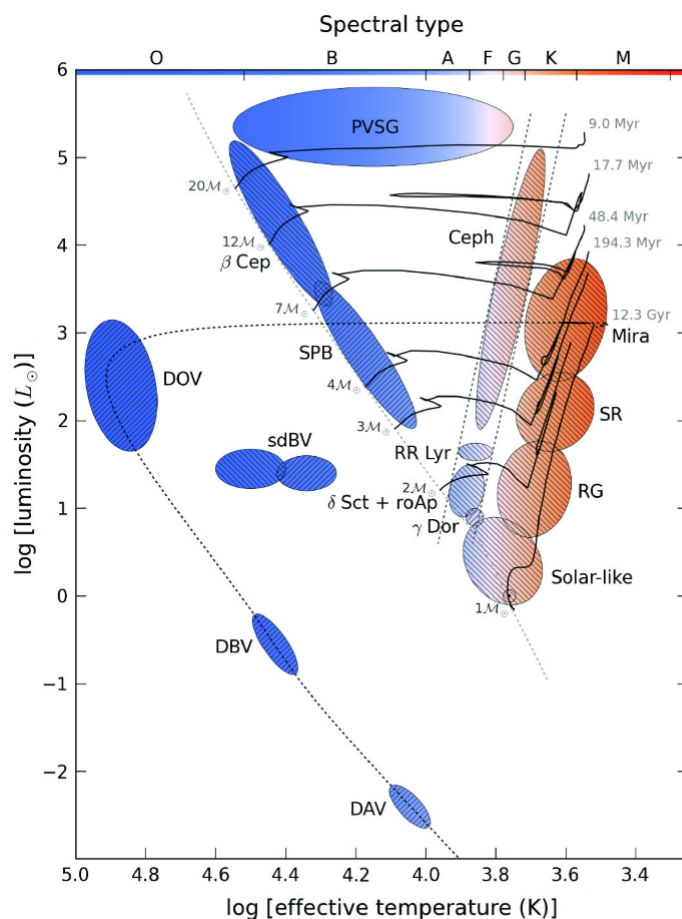
V diagrame na obr. 1.1 je možné vidieť triedy hviezd - hviezdy hlavnej postupnosti, obry, superobry a biele trpaslíky. Hviezdy hlavnej postupnosti sú hviezdy, ktoré generujú energiu v jadre nukleárnymi reakciami vodíku a hélia. Jadro hviezdy je v tomto štádiu v hydrostatickej rovnováhe a tlak pôsobiaci od stredu je vyrovnávaný gravitačnou silou vonkajších vrstiev pôsobiacou smerom do vnútra hviezdy [4]. Obor je štádium hviezdy, ktoré nastáva po odklone z hlavnej postupnosti. Tento odklon nastáva po vyčerpaní veľkého množstva vodíka prostredníctvom fúzy reakcií. Obry majú jadro tvorené héliom, obklopené vrstvou vodíka a energia je v hviezde tvorená jadrovou fúziou prostredníctvom CNO cyklu [5]. Superobry sú najväčšie hviezdy, ktoré zároveň vyžarujú najviac svetla. Ich ab-

solútna magnitúda je (-3, -10) mag. Biele trpaslíky sú hviezdy s vysokou teplotou (od 6 000 K viac). Veľkosťou sú porovnateľné so Zemou a ich hmotnosť sa pohybuje približne okolo hmotnosti Slnka. Sú typické malým množstvom vyžarovaného svetla, ktoré je tvorené zostatkovou termálnou energiou a v týchto hviezdach už nedochádza ku žiadnym jadrovým reakciám. Ide o štádium, v ktorom hviezda chladne [6].

## 1.1 Premenné hviezdy

Na obr. 1.2 sú naznačené skupiny premenných hviezd. Premenné hviezdy sa delia na geometricky premenné a fyzicky premenné. Podstatou geometricky premenných hviezd je zmena jasnosti hviezdy vonkajšími vplyvmi. Fyzicky premenné hviezdy majú jasnosť premennú z dôvodu zmeny vnútornej štruktúry hviezdy.

Hviezdy hlavnej postupnosti nultej éry (ZAMS), sú hviezdy, v ktorých začína dochádzať k fúzií vodíka. Fúzia prebieha v jadre hviezdy a je hlavným zdrojom jej energie.



**Obr. 1.2:** Skupiny pulzujúcich hviezd vykreslené v HR diagrame. Prevzané z [7]

Hviezdy môžu všeobecne meniť jasnosť. Ich premennosť je ale podobná v rámci jednotlivých oblastí nachádzajúcich sa v HR diagrame. Preto ich môžeme rozdeliť na mnoho typov. Pre príklad uvedieme niektoré typy:



- (i) Vzplanujúce hviezdy - na obr. 1.2 sa nachádzajú na hlavnej postupnosti mierne pod Solar-like oblasťou. Ide o hviezdy, ktorých vývoj je ťažko predvídateľný. Ich premennosť je zapríčinená rôznymi faktormi, kde jedným z najpodstatnejších je jav nazývaný "solárne dynamo". Ide o cyklus, pri ktorom sa periodicky mení priebeh magnetického poľa hviezdy. Táto periodická zmena magnetického poľa je sprevádzaná s vystrelovaním plazmy do okolia. Do tejto skupiny patria hviezdy, ktoré sú dostatočne malé na to, aby tento efekt (ktorý sa deje len na malej časti povrchu hviezdy) menil charakteristiku celej hviezdy natolko, že je možné jej zmenu výrazne pozorovať [8].
- (ii) ZZ Ceti hviezdy (DAV) - patria medzi biele trpaslíky (na obr. 1.2 sa nachádzajú vľavo dole). Sú to hviezdy, ktorých magnitúda štandardne osciluje len veľmi málo, presnejšie v rozsahu (0.05, 0.30) mag. Ich pulzácie majú periodický priebeh [9].
- (iii) Pás nestability - v HR diagrame sa nachádzajú v oblasti vymedzenej paralelnými čiarami. Ide o periodicky pulzujúce obry. Do tejto oblasti patria skupiny ako Cefeidy, hviezdy RR Lyrae alebo hviezdy typu  $\delta$  Scuti. V astrofyzike sa hviezdy patriace do pásu nestability využívajú na meranie vzdialeností.
- (iv) Premenné hviezdy typu Mira - ide o hviezdy pomenované podľa hviezdy Mira (spomínaná v predslove). Sú to hviezdy, ktoré pulzujú s dlhou periódou (v rade desiatok dní až jednotiek rokov). Jedná sa o červené obry, teda hviezdy s veľkým polomerom a nízkou teplotou.
- (v)  $\beta$  Cefeidy - sú masívne hviezdy, ktoré sa neradia medzi superobry. Sú to hviezdy spektrálneho typu B s hmotnosťou (7, 20)  $M_{\odot}$ . Tieto hviezdy pulzujú s krátkou periódou (0.1, 0.3) dňa a amplitúdou (0.01, 0.3) magnitúd [10].

## 1.2 $\delta$ Scuti

Hviezdy typu  $\delta$  Scuti sú hviezdy spektrálneho typu A2-F5, so strednou hmotnosťou (1.4, 3.0)  $M_{\odot}$ . Ich pulzačná perióda spadá do intervalu (0.02, 0.25) dní. Len zriedkavo ide o radiálne pulzácie, oveľa častejšie pulzujú neradiálne s veľkým množstvom módov. Štandardne majú jednu dominantnú pulzačnú frekvenciu a niekoľko vedľajších. Príčinou pulzácie tohto typu hviezd je ionizácia He II a H, ktorá zapríčiňuje zmenu opacity hviezdy.

Väčšina hviezd patriacich do skupiny  $\delta$  Scuti sú premenné hviezdy s malou amplitúdou.  $\delta$  Scuti môžeme rozdeliť na podskupiny [11]:

- (i)  $\delta$  Scuti hviezdy s veľkou amplitúdou (High-Amplitude  $\delta$  Scuti) - tento typ hviezd dostal pomenovanie podľa veľkej variácie v jasnosti hviezdy. Hodnota osciluje s amplitúdou od 0.30 magnitúd vyššie. Štandardne pulzujú s jednou dominantnou radiálnou frekvenciou, ktorá býva niekedy doplnená jednou alebo dvoma vedľajšími.

- (ii) Hviezdy typu SX Phe - sú hviezdy populácie II, teda hviezdy tvorené hlavne ľahkými prvkami ako vodík a hélium. Najčastejšie sa vyskytujú v guľových hviezdokopách a galaxiách s nízkym zastúpením kovov.

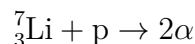
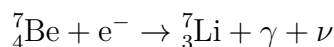
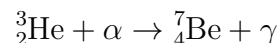
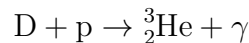
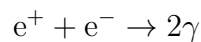
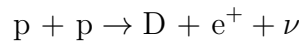
### 1.3 Zdroj energie

Hlavným zdrojom energie hviezdy sú jadrové reakcie a fúzia. Najčastejšie dochádza k jednému z troch fúzných cyklov. Proton-protonový reťazec prevažne prebieha za dvoch rôznych sledov interakcií. Prvý protón-protónový reťazec (p-p I) je nasledovný [12]:



Proton-protonový reťazec I je hlavným zdrojom energie vyžarovanej Slnkom. Interakciou (1.1) dvoch protónov vzniká deutérium, pozitron a neutríno, kde následne dochádza k interakcii (1.2) uvoľneného pozitronu s elektrónom za vzniku 2 fotónov. Následne interakciou (1.3) protónu a deutéria vzniká hélium-3 a dochádza k uvoľneniu fotónu. Tieto interakcie sa zopakujú a v závere dojde k interakcii (1.4) medzi dvoma izotopami hélia za vzniku  $\alpha$ -častice a jedného páru protónov. Celkovo dochádza pri jednom reťazci k uvoľneniu energie o veľkosti  $E = 26.20$  MeV.

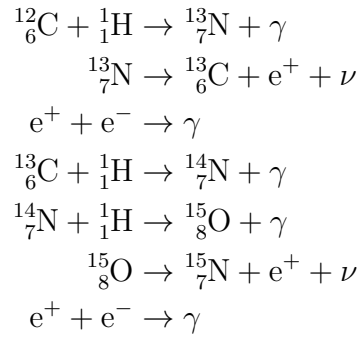
Druhým fúznym cyklom je reťazec protón-protón II (p-p II), ktorý je nasledovný [12]:



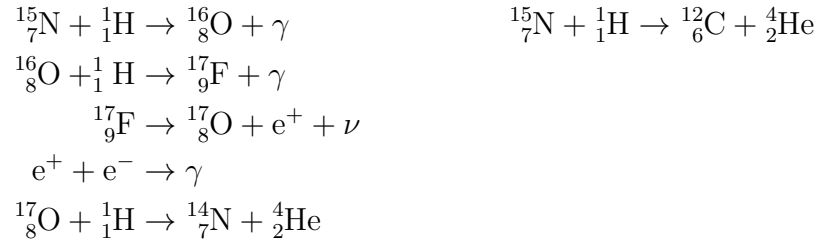
Reťazec p-p II sa v prvých troch interakciách zhoduje s prvým reťazcom, no následne dôjde k interakcii medzi héliom-3 a  $\alpha$ , ktoré vzniklo z prvého p-p reťazca a vzniká izotop berília, ktorý je použitý v ďalších interakciách, kde vo výsledku vznikajú dve  $\alpha$ -častice. Pri tejto interakcii sa do okolia uvoľňuje energia  $E = 25.66$  MeV.

Posledným spôsobom vzniku energie v hviezde je CNO cyklus. Jeho uplatnenie nastáva až pre vyššie teploty ako p-p cykly. CNO cyklus je dominanty pri hviezdach s hmotnosťou  $M > 1.3 M_\odot$  a nemôže prebiehať v hviezdach, ktoré sú zložené len z vodíka a hélia z dôvodu, že vstupným elementom reakcie je uhlík

alebo dusík. Cyklus prebieha nasledovne [12]:



Následne môže prebehnúť jedná z dvoch vetiev. Prvou je vznik dusíka prostredníctvom sérií reakcií. Druhou je priamy vznik hélia a uhlíka z atómov dusíka a vodíka. Obe možnosti sú uvedené nižšie [12]:



## 1.4 Rovnica zachovania hmoty a rovnica hydrostatickej rovnováhy

Uvažujme sféricky symetrickú hviezdu s hmotnosťou  $M_R$ , hustotou  $\rho(R)$  a polomerom  $R$ . Rovnica zachovania hmoty má tvar [12]

$$\frac{dR}{dM_R} = \frac{1}{4\pi R^2 \rho}. \quad (1.5)$$

Pre infinitizimálne tenkú guľovú vrstvu o hmotnosti  $dM_R$  o hrúbke  $dR$  dostávame pohybovú rovnicu z 2. Newtonovho zákona

$$\frac{d^2 R}{dt^2} = -\frac{GM_R}{R^2} - 4\pi R^2 \frac{dp}{dM_R}, \quad (1.6)$$

kde na pravej strane vystupuje gravitačná a tlaková sila pôsobiaca na infinitizimálny element. Pri zanedbaní členu na ľavej strane dostávame rovnicu hydrostatickej rovnováhy

$$\frac{dp}{dM_R} = -\frac{GM_R}{4\pi R^4}. \quad (1.7)$$

Táto rovnica hovorí, že zmena tlaku od miesta k miestu je vyrovnaná gravitačnou silou. Pri malej kontrakcii alebo expanzii hviezdy dôjde kvôli lokálnej zmene teploty k zmene tlaku. Následne hviezda expanduje aby dosiahla rovnovážny stav.

Čas, za ktorý sa hviezda vráti do rovnovážneho stavu (v zmysle hydrostatickej rovnováhy), je vyjadrený vzťahom [13]

$$t = \left( \frac{R^3}{GM} \right)^{1/2} \propto (G\bar{\rho})^{-1/2}, \quad (1.8)$$

kde  $G$  je gravitačná konštanta a  $\bar{\rho}$  je stredná hustota hviezdy. Pre hviezdy typu  $\delta$  Scuti s hmotnosťou  $M \sim (1.5, 2.5) M_{\odot}$  vychádza perióda pulzácií v rozmedzí  $t \sim (0.02, 0.3)$  d.

## 1.5 Závislosť veľkosti na tepelnej bilancii

Pulzáciu hviezd môžeme skúmať z hľadiska termodynamiky. Z 1. termodynamického zákona, za predpokladu, že ide o cyklický proces, sa celková vnútorná energia po vykonaní cyklu nemení. Jej celková práca pri jednom cykle je daná vzťahom

$$W = \oint \dot{d}Q. \quad (1.9)$$

Entropia je pri malej zmene teploty v čase  $\delta T(t)$  určená ako

$$\oint dS = \oint \frac{\dot{d}Q(t)}{T(t)} = \oint \frac{\dot{d}Q(t)}{T_0 + \delta T(t)} = \oint \frac{\dot{d}Q(t)}{T_0} \frac{1}{1 + \frac{\delta T(t)}{T_0}} = 0. \quad (1.10)$$

Z toho dostávame taylorovým rozvojom posledného zlomku vyjadrenie  $\dot{d}Q$ , ktoré dosadíme naspäť do rovnice (1.9) a dostávame výsledný vzťah

$$W = \oint \dot{d}Q(t) \doteq \oint \frac{\delta T(t)}{T_0} \dot{d}Q(t) > 0.$$

Z tejto rovnice vychádza, že pri pohlcovaní tepla ( $\dot{d}Q > 0$ ) hviezda spotrebuje prácu (hviezda sa zmenšuje) a naopak pri uvoľňovaní tepla hviezda prácu koná (dochádza k expanzii).

## 1.6 Opacitný mechanizmus

Opacitný mechanizmus ( $\kappa$  mechanizmus) je proces, ktorý stojí za zmenou luminozity mnohých pulzujúcich hviezd. Kompresia atmosféry hviezdy je sprevádzaná zvýšením jej teploty a hustoty, čo má za následok zníženie opacity. Tento mechanizmus je zastúpený len v oblasti meniacej sa ionizácie pri dostatočne veľkom zastúpení jedného iónu. Pre opacitu všeobecne platí závislosť [12]

$$\kappa = c\rho^k T^{-m}, \quad (1.11)$$

kde  $c$  je konštanta a  $k$  a  $m$  sú kladné čísla. Pre prípady, kde dochádza k pohlteniu žiarenia pri ionizácii viazaného elektrónu alebo pri absorpcii svetla pri rozptyle voľného iónu, je vhodné použiť Kramerov opacitný vzťah

$$\kappa = c\rho T^{-3.5}. \quad (1.12)$$

Ďalej pre adiabatické deje platí  $T \propto \rho^{2/3}$ , čím dostávame rovnicu

$$\kappa = c\rho^{-4/3}. \quad (1.13)$$

Výsledná rovnica hovorí, že s rastúcou hustotou dochádza k pohlcovaniu tepla a k poklesu opacity. V miestach, kde sú úplne ionizované časti hviezdy, teda k stabilným pulzáciám nedochádza.

V oblastiach, kde sa mení ionizácia, rastie teplota s tlakom omnoho pomalšie a zo vzťahu (1.12) plynie

$$\kappa = c\rho^{1-3.5\lambda} \quad (1.14)$$

, kde bola použitá aproximácia  $T \approx \rho^\lambda$ , pričom  $\lambda \ll 1$ . Pulzácie teda vznikajú pri splnení podmienky

$$1 - 3.5\lambda > 0. \quad (1.15)$$

## 1.7 Pogsonova rovnica

Prvú klasifikáciu hviezd na základe jasnosti vytvoril Hipparchos, ktorý najjasnejšie objekty na oblohe definoval ako hviezdy prvej magnitúdy. Jeho škála mala 6 stupňov, teda hviezdy usporiadal tak, aby hviezdy šiestej magnitúdy boli tie najmenej jasné objekty. Do 18. storočia sa nazbieralo oveľa viac dát o hviezdach a bolo treba túto pomyselnú škálu vylepšiť. V roku 1856 Norman Pogson navrhol, aby magnitúda odpovedala radiálnemu množstvu toku žiarenia vychádzajúceho z hviezdy. Vytvorenie tejto škály bolo inšpirované Hipparchom a jeho škálou. Keďže hviezdy prvej magnitúdy vyžarovali približne stokrát viac žiarenia ako hviezdy šiestej magnitúdy, rovnica bola prispôbena tak, aby sa táto závislosť zachovala [14].

Magnitúda  $m$  je miera jasnosti hviezdy alebo iného astronomického objektu. Závisí na množstve elektromagnetického žiarenia prichádzajúceho z hviezdy prostredníctvom svetelného toku  $\mathcal{F}$ . Neintuitívne platí, že čím vyššia je hodnota magnitúdy, tým menej jasný je sledovaný objekt. Vzťah na výpočet magnitúdy  $m$  je

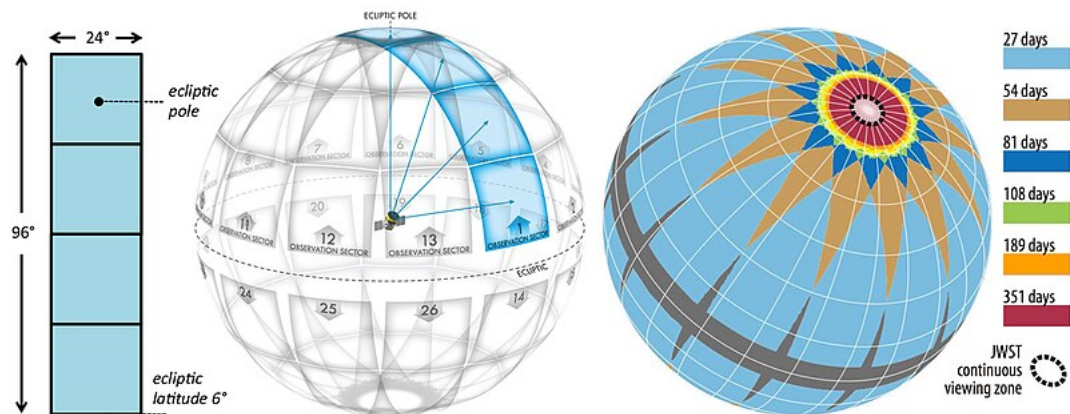
$$m_1 - m_2 = -2.5 \log_{10} \frac{\mathcal{F}_1}{\mathcal{F}_2}, \quad (1.16)$$

kde  $m_{1,2}$  a  $\mathcal{F}_{1,2}$  odpovedajú magnitúde a toku dvoch rozdielnych hviezd.

## 1.8 Družica TESS

TESS je teleskop spoločnosti NASA, ktorý bol do vesmíru vyslaný 18. Apríla 2018. Jeho hlavnou misiou je objavovanie exoplanét obiehajúcich okolo jasných hviezd v blízkom okolí solárneho systému. Teleskop pozoruje celú oblohu tým, že ju rozdelí na 26 sektorov (znázornené na obr. 1.3), z ktorých každý má parametre približne  $24^\circ \times 96^\circ$ . Každý sektor je pozorovaný aspoň 27 dní. V priebehu prvých dvoch rokov zmonitoroval satelit najprv južnú a následne aj celú severnú hemisféru oblohy.

Satelit je vybavený štyrmi identickými, kvalitne optimalizovanými fotoaparátmi. Každý z nich zaznamenáva oblasť  $24^\circ \times 24^\circ$  a spoločne sú zosynchronizované tak, aby monitorovali plochu o veľkosti  $24^\circ \times 96^\circ$  a teda zaznamenávajú jeden celý sektor. Družica zaznamenáva prichádzajúce svetlo s vlnovými dĺžkami  $\lambda = 600 - 1000 \text{ nm}$  [15].



**Obr. 1.3:** Sektory pozorované družicou TESS. Každý jeden sektor je obdĺžnikovej plochy so šírkou  $24^\circ$  začínajúci mierne nad ekliptikou a končiaci pár stupňov za pólom ekliptiky. Každý sektor je snímaný 27 dní. Sektory sa so zvyšujúcou deklináciou prekrývajú a teda v určitých miestach dochádza k tomu, že je oblasť pozorovaná dlhšie ako 27 dní. Dĺžka pozorovania je znázornená na obrázku napravo s farebným rozlíšením. Obrázok prevzatý z [16].

## 2. Spracovanie dát

Motivácia tejto práce je spracovanie dát získaných z rôznych zdrojov a ich následné porovnanie. Hlavný spôsob získavania dát pri tejto práci bolo priame stiahnutie časovej závislosti toku žiarenia nameranej družicou TESS. Dáta sú v tomto prípade sťahované prostredníctvom knižnice *lightkurve* v programovacom jazyku *Python*.

### 2.1 Sťahovanie dát z databázy TESS

Celý proces sťahovania dát z archívu TESS je detailne popísaný na stránke <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/tess/data-analysis-tools.html>. Pre stiahnutie svetelnej krivky hviezdy je potrebné vedieť jej súradnice na nebeskej oblohe. Program využíva ekvatoriálny súradnicový systém, teda údaje rektascenzie a deklinácie hviezdy. Následne program vyhledá všetky jednotlivé merania, ktoré boli na danom objekte vykonané (ukážka na obr. 2.1).

#	mission	year	author	exptime s	target_name	distance arcsec
0	TESS Sector 20	2019	TESScut	1426	08 09 35.748 +44 28 17.600	0.0
1	TESS Sector 47	2021	TESScut	475	08 09 35.748 +44 28 17.600	0.0
2	TESS Sector 60	2022	TESScut	158	08 09 35.748 +44 28 17.600	0.0

**Obr. 2.1:** Ukážka meraní konkrétneho objektu vykonávaná prostredníctvom knižnice *lightkurve*. Prvý stĺpec uvádza číslo merania. V druhom stĺpci je názov TESS sektoru, v ktorom bola oblasť meraná. V treťom stĺpci je uvedený rok merania. Štvrtý stĺpec obsahuje názov archívu, v ktorom sú dáta uložené. Ďalej sú uvedené súradnice objektu a vzdialenosť objektu od zadaných súradníc hľadania.

Užívateľ má možnosť vybrať si v prípade, že bolo vykonaných viacero meraní, ktoré je to vhodné pre jeho spracovávanie. Program ponúka možnosť zmeny počtu vykresľovaných pixelov pomocou premennej *cutout\_size*, čo môže byť vhodné pre väčšie objekty alebo pri skúmaní väčšieho počtu objektov. Štandardne je nastavená vykresľovaná oblasť na 10×10 pixelov. Ďalej program ponúka možnosť vybrať si z daných pixelov podoblasť, z ktorej chceme získať údaje o časovej závislosti toku žiarenia.

Výstupom z tohto programu je *.csv* súbor, v ktorom sú dáta zoradené nasledovne: *time*, *flux*, *flux err*, *centroid col*, *centroid row*, *cadenceno*, *quality* a štyri grafy. V prvom grafe je vykreslená celá závislosť toku na čase. V druhom je vykreslená oblasť zvolených pixelov so zafarbením podľa množstva prichádzajúceho toku, v treťom (viď obr. 3.2) je predchádzajúci obrázok, v ktorom je navyše farebne odlíšená oblasť, z ktorej bola vytvorená závislosť toku na čase a vo štvrtom grafe (viď obr. 3.3) sú v tej istej oblasti farebne vyznačené pixely, v ktorých je tok zanedbateľný a považovaný za šum. Pri tejto práci budú potrebné len prvé dva stĺpce zo súboru s dátami, teda čas a tok. Pre spracovanie dát je potrebné prepočítať svetelný tok na jednotky magnitúdy. Podľa pokynov je pre prevod vykonaná úprava Pogsonovej rovnice pripočítaním hodnoty 20.44 k magnitúde určenej vzťahom (1.16). Čas je udávaný v jednotkách BTJD (Barycentric TESS

Julian Date).

Pre jednu hviezdu boli dáta získané aj iným spôsobom, ako priame stiahnutie svetelnej krivky z archívu TESS. Dáta získané z Ondřejovskej hviezdárne sú vo forme snímok oblohy vykonaných CCD detektormi. Snímky je potrebné samostatne upraviť a vyextrahovať z nich svetelnú krivku. Na toto spracovávanie je možné použiť program *Muniwin*.

## 2.2 CCD detektory

Najčastejšie sú informácie o jasnosti astronomických objektov získavane použitím CCD detektorov (z anglického Charged-Coupled Device). Pri tvorení snímok je využívaný fotoelektrický jav. Snímač je rozdelený na malé sekcie (pixely) vysoko senzitivne na dopadajúce žiarenie. Jednotlivé pixely sú oddelené bariérou, pre zaistenie toho, aby uväznené elektróny neprechádzali samovoľne v celej oblasti. Po dokončení expozície sa uväznené elektróny dostávajú do obvodu, v ktorom sa vytvorí časovo premenný elektrický prúd, ktorý vchádza do AD prevodníku a konvertuje sa na snímku [17].

## 2.3 Offset, dark a flat

Po vytvorení snímku je potrebné vykonať jeho úpravu o efekty, ktoré s pozorovanou oblasťou nesúvisia. Týmito efektmi sú *offset*, *dark* a *flat*.

- Efekt *offsetu* sa vynuluje tým, že sa vykoná snímok s časom expozície  $t = 0$  s pri zakrytí objektívu.
- *Dark* je zapríčinený tým, že polovodič emituje elektróny prostredníctvom tepelného signálu bez vonkajšieho žiarenia. Tento efekt sa vynuluje zakrytím objektívu a vytvorenie tmavého snímku po expozícii rovnako dlhej ako doba expozície tvorenia snímok oblohy. Z tmavého snímku sa následne spraví medián hodnôt a vytvorí sa *master dark*, o ktorý sa následne upravujú ďalšie vytvorené snímky.
- *Flat* (taktiež *flat field*) je efekt spôsobený nerovnomernou citlivosťou pixelov, znečistením objektívu atď. Tento efekt sa pri tvorení snímok zamedzí tým, že sa vykoná snímok rovnomerne osvetlenej oblohy (napr. pri západe slnka).

Z vytvorených snímok máme teda štyri matice  $A$  (snímok oblohy),  $O$  (offset),  $D$  (dark frame) a  $F$  (flat field). Výsledný snímok  $A_E$  upravený o tieto tri efekty je následne vykonaný pomocou rovnice

$$A_E = \frac{A - O - D}{F - O - D} \quad (2.1)$$

v rovnici je v menovateli od matice  $F$  odčítaná  $O$  a  $D$ , pretože dané dva efekty majú vplyv aj na snímok rovnomerne osvetlenej oblohy [18].



## 2.4 Muniwin

Z vytvorených snímok je následne potrebné previesť úpravu na dáta, z ktorých bude zostrojená svetelná krivka. Na to slúži program *Muniwin* [19]. Snímky je potrebné najskôr upraviť o efekty zapríčinené CCD kamerou a následne je možné získať informácie o priebehu magnitúdy objektu na snímku. Z programu bude používaný výstup svetelnej krivky, teda časovej závislosti magnitúdy. Priebeh magnitúdy je uvedený veličinou  $V - C$  ako vizuálna magnitúda, od ktorej je odpočítaná magnitúda vybranej hviezdy zo snímku (teda porovnanie priebehu magnitúdy v závislosti od inej okolitej hviezdy).

Po získaní časovej závislosti magnitúdy už môžeme zo získaných dát extrahovať frekvencie z ktorých je periodická závislosť zložená.

## 2.5 Výpočet frekvencií

Na určenie frekvencií bol pri tejto práci použitý program *Period04* (verzia 1.2.9.3) [20], ktorý je vhodný na analýzu svetelných kriviek v astronómii a všeobecne na hľadanie periodických signálov z ktorých je tvorená určitá závislosť. Program vykonáva diskretnú formu fourierovej transformácie. Predpis funkcie je nasledovný

$$\mathcal{F}_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-2\pi i k n / N}, \quad (2.2)$$

kde  $N$  je počet hodnôt v dátach,  $n$  je poradie konkrétnej hodnoty v dátach,  $k$  je daná frekvencia,  $x_n$  je hodnota odpovedajúca  $n$ -tému členu v dátach a  $\mathcal{F}_k$  je výsledok diskretnéj fourierovej transformácie, ktorý nosí informáciu o amplitúde a fáze odpovedajúce frekvencií  $k$ .

Program teda slúži na rozloženie svetelnej krivky na jednotlivé signály, z ktorých sú dáta zložené. Užívateľ zvolí interval, na ktorom hľadá frekvencie a má možnosť voliť veľkosť kroku medzi skúmanými frekvenciami. Pre relatívne malý počet dát je vhodné použiť najmenší krok, keďže jednotlivé výpočty nezaberajú veľa času.

Po vypočítaní fourierovej transformácie program ukladá frekvenciu, pre ktorú bola zistená najväčšia amplitúda. Opakovaním transformácie program už uložené frekvencie zo spektra vynecháva a zameriava sa na nové. Program ponúka vykreslenie grafov fázy, fourierovho spektra a tiež pre vizuálne porovnanie program ponúka vykreslenie dát spolu s fitom tvoreným zistenými frekvenciami.

## 3. Analýza dát

### 3.1 SZ Lyncis

SZ Lyncis (skrátene SZ Lyn) sa radí medzi premenné hviezdy typu  $\delta$  Scuti s veľkou amplitúdou. Ide o hviezdu vzdialenú 1 700 svetelných rokov a jej poloha v ekvatoriálnych súradniciach je:

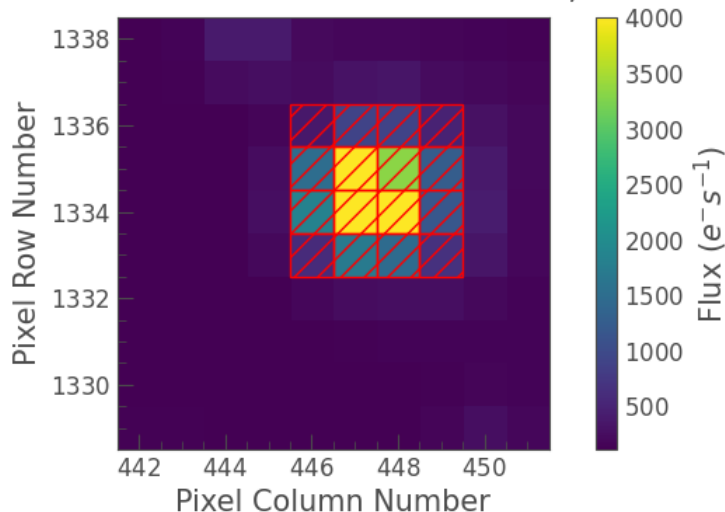
$$\begin{aligned} \text{RA} &: 08^h 09^m 35.75^s \\ \text{DEC} &: +08^\circ 06' 06.28'' \end{aligned}$$



**Obr. 3.1:** Hviezda SZ Lyn a jej okolie. Obrázok bol prevzaný z katalógu 2MASS [21].

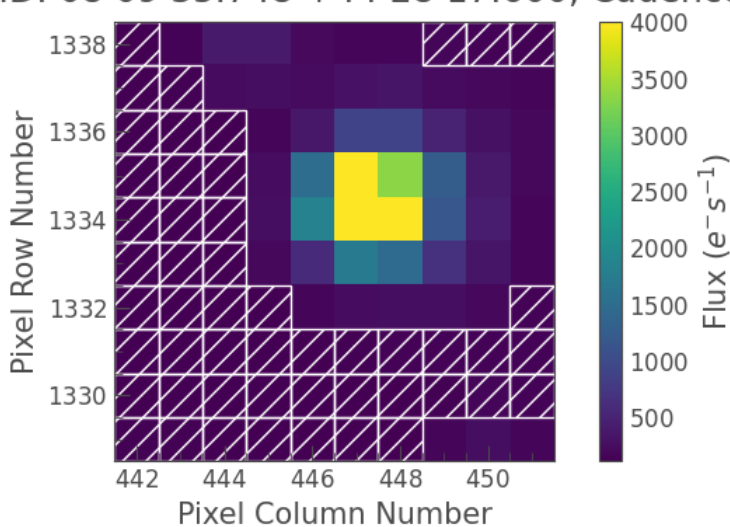
Pre analýzu boli stiahnuté dáta prostredníctvom knižnice *lightkurve*. Výstup z programu ponúka súbor s dátami a okrem neho 4 obrázky. Pre názornosť uvedieme 2 obrázky. Oba obrázky vykresľujú oblasť  $10 \times 10$  pixelov skúmanej hviezdy a jej okolia. Na obr. 3.2 je červenou farbou znázornená oblasť, z ktorej boli zbierané údaje o časovej závislosti toku dopadajúceho žiarenia. Na obr. 3.3 je bielou farbou vyznačená oblasť, v ktorej je z nášho nastavenia dopadajúce žiarenie považované len za šum a žiadny jasný objekt sa v nej nenachádza.

Target ID: 08 09 35.748 +44 28 17.600, Cadence: 0



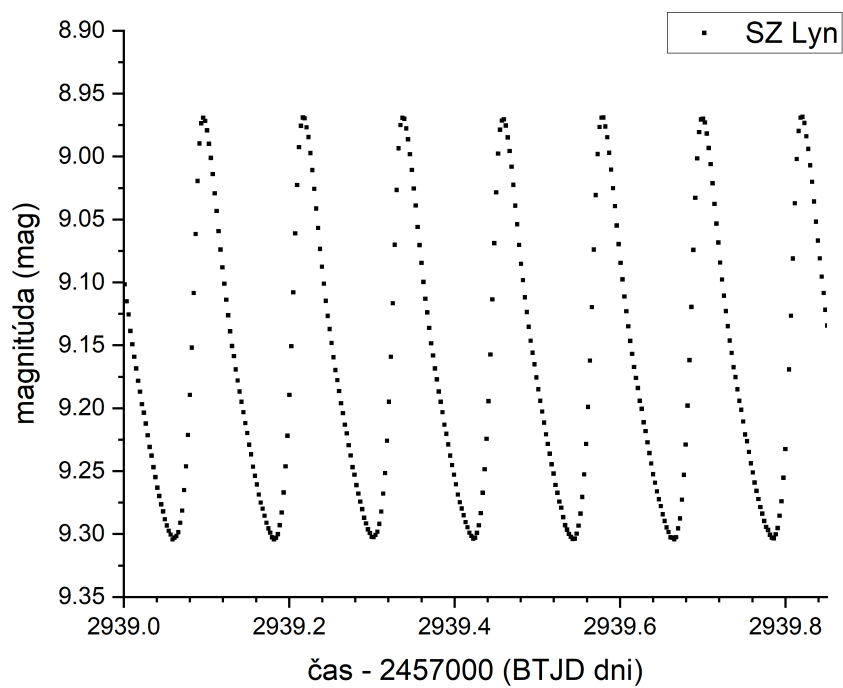
**Obr. 3.2:** Vykreslenie pixelov objektu SZ Lyn a okolia spolu s podoblastou, z ktorej boli zbierané dáta.

Target ID: 08 09 35.748 +44 28 17.600, Cadence: 0

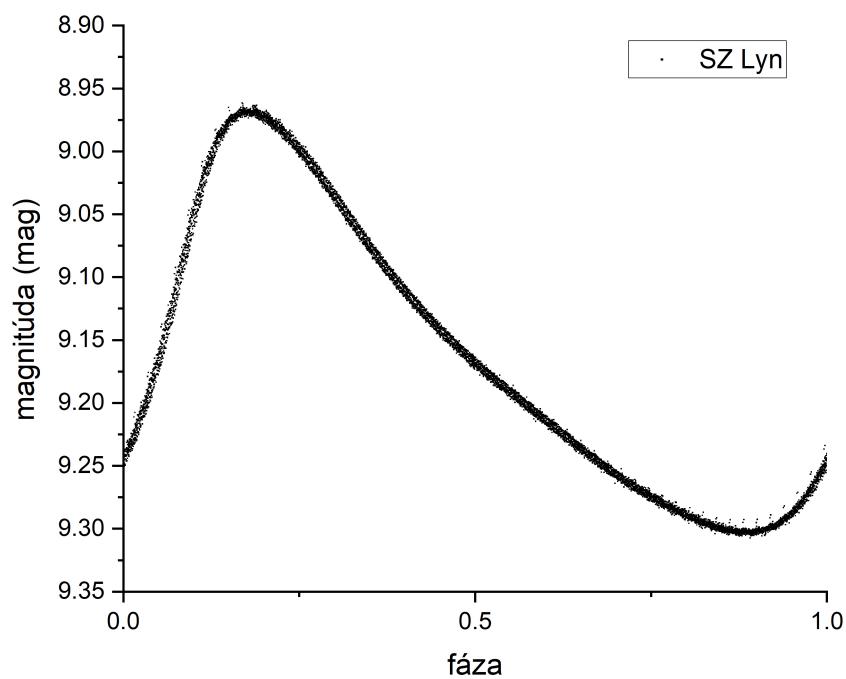


**Obr. 3.3:** Vykreslenie pixelov objektu SZ Lyn a okolia spolu s podoblastou, kde tok je zanedbateľný a považovaný za šum.

Po prechode z toku žiarenia prichádzajúceho od hviezdy na magnitúdu je výsledná časová závislosť magnitúdy hviezdy SZ Lyn vykreslená na obr. 3.4 a na obr. 3.5 je vykreslená fáza.

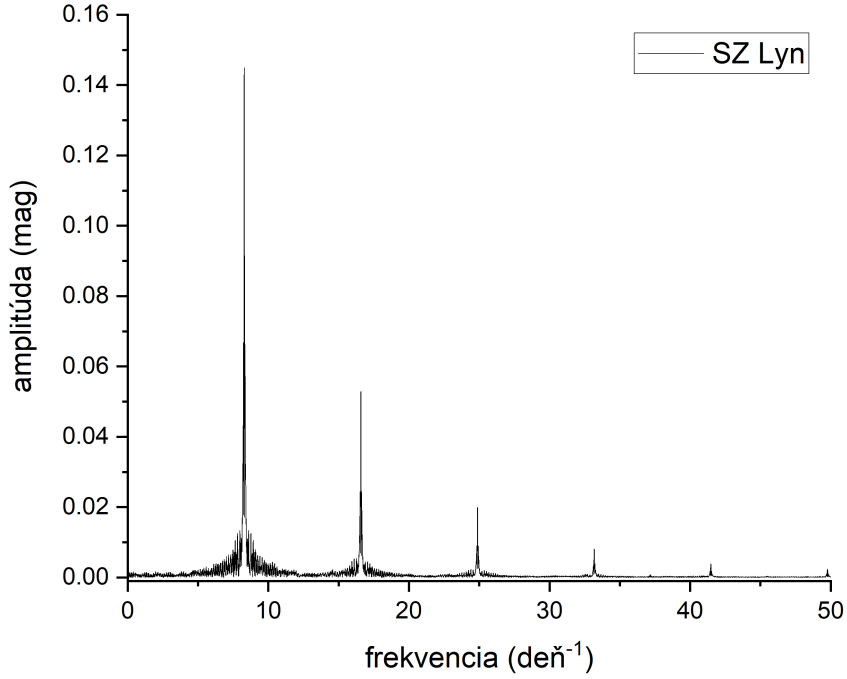


Obr. 3.4: Náhlad svetelnej krivky hviezdy SZ Lyn.



Obr. 3.5: Fáza hviezdy SZ Lyn získana z frekvencie  $f = 8.269 \text{ deň}^{-1}$

Následne vykonáme v programe *Period04* fourierovú analýzu na zistenie frekvencií. Keďže sa v práci zameriavame na hviezdy, ktorých pulzácie sú na úrovni dní, môžeme frekvencie hľadať na intervale  $f = 0 - 50 \text{ deň}^{-1}$ . Spektrum frekvencií je uvedené na obr. 3.6.



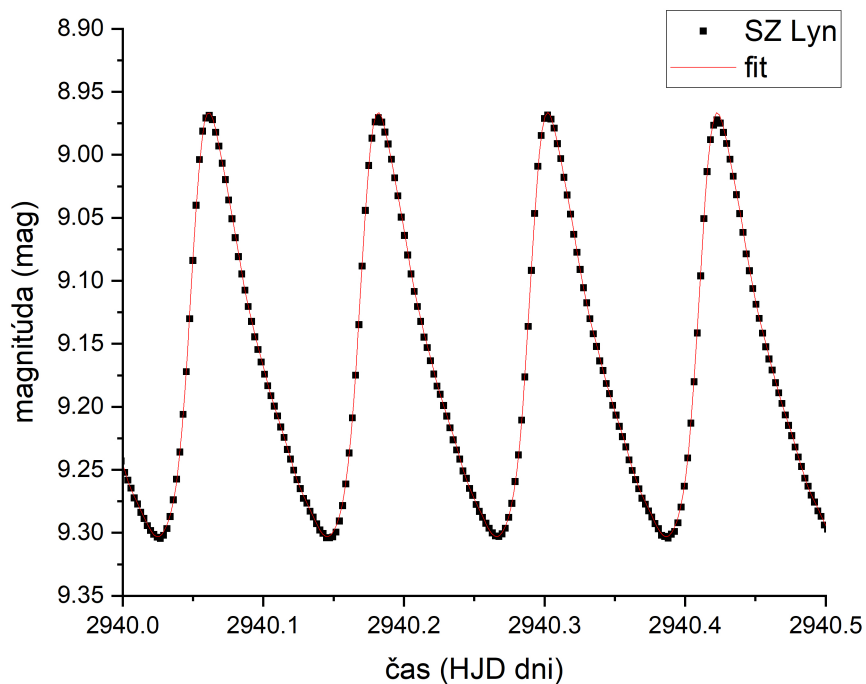
**Obr. 3.6:** Spektrum frekvencií pulzácie hviezdy SZ Lyn

Programom *Period04* teda boli zistené hlavné frekvencie, v ktorých pulzuje hviezda SZ Lyn. Spolu s amplitúdami sú uvedené v tabulke Tab. 3.1. Na porovnanie sú uvedené frekvencie zistené nezávisle na tejto práci z merania na Mt. Abu Infrared Observatory (MIRO) [22].

**Tab. 3.1:** Porovnanie hlavných frekvencií pulzácií hviezdy SZ Lyncis. Prvé spracovanie odpovedajú dátam z databázy TESS. Druhé spracovanie odpovedá frekvenciám zisteným z merania na Mt. Abu Infrared Observatory. Dáta prevzané z [22]

TESS			MIRO		
—	$f$	$A$	—	$f$	$A$
—	( $\text{deň}^{-1}$ )	(mmag)	—	( $\text{deň}^{-1}$ )	(mmag)
$f_1$	8.296	145.148	$f_1$	8.296	229.0
$2f_1$	16.593	53.236	$2f_1$	16.590	76.0
$3f_1$	24.889	20.048	$3f_1$	24.890	32.0
$4f_1$	33.186	8.261	$4f_1$	33.186	11.0
$5f_1$	41.482	4.037	$5f_1$	41.483	9.0
$6f_1$	49.778	2.374	$6f_1$	49.849	3.0

Porovnaním spracovaní týchto dvoch nezávislých meraní vidíme, že zistené frekvencie sa zhodujú na veľkú presnosť. Pre hviezdu SZ Lyn bola nájdená jedna hlavná frekvencia  $f_1 = 8.296 \text{ deň}^{-1}$ . Ďalšie nájdené frekvencie sú len násobkom hlavnej frekvencie. Porovnávanie amplitúd v tomto prípade nie je potrebné ani prínosné, keďže druhé meranie prebiehalo na Zemi a teda dopadajúce žiarenie je ovplyvnené atmosférou a inými faktormi. Pre overenie správnosti zistených frekvencií z dát od TESS-u si môžeme ešte svetelnú krivku preložiť fitom zostrojeným z daných frekvencií (viď obr.3.7).



**Obr. 3.7:** Svetelná krivka hviezdy SZ Lyn preložená fitom zostrojeným z frekvencií získaných analýzou.

Vidíme, že krivka sa s dátami ukážkovo prekrýva, teda nájdené frekvencie postačujú na zostrojenie nami hľadanej závislosti a nie je potrebné hľadať ďalšie frekvencie, lebo ich vplyv je pre nás zanedbateľný.

## 3.2 LW UMa

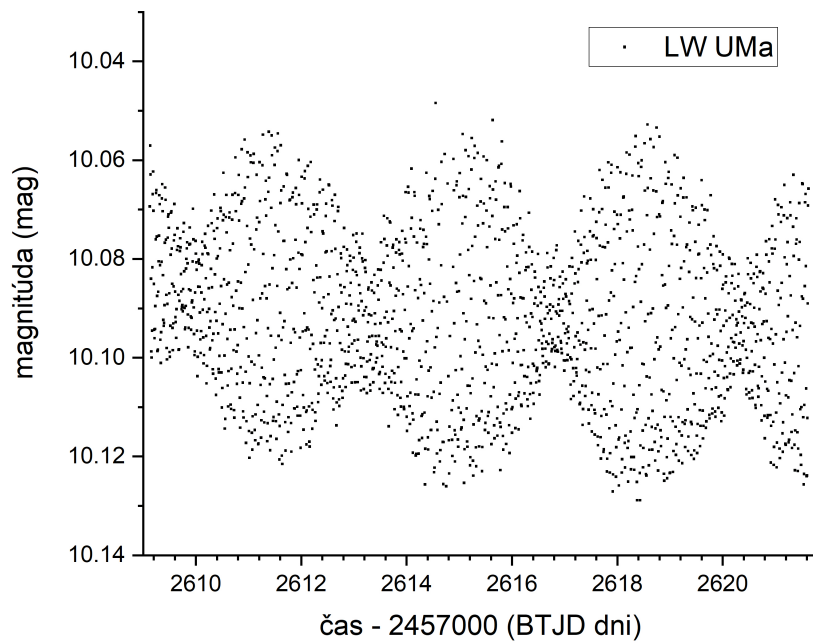
Ďalším objektom je hviezda LW UMa. Ide o hviezdu, ktorá sa radí medzi  $\delta$  Scuti premenné. Jej ekvatoriálne súradnice sú:

$$\begin{aligned} \text{RA} &: 09^h 56^m 56.15^s \\ \text{DEC} &: +41^\circ 26' 41.38'' \end{aligned}$$

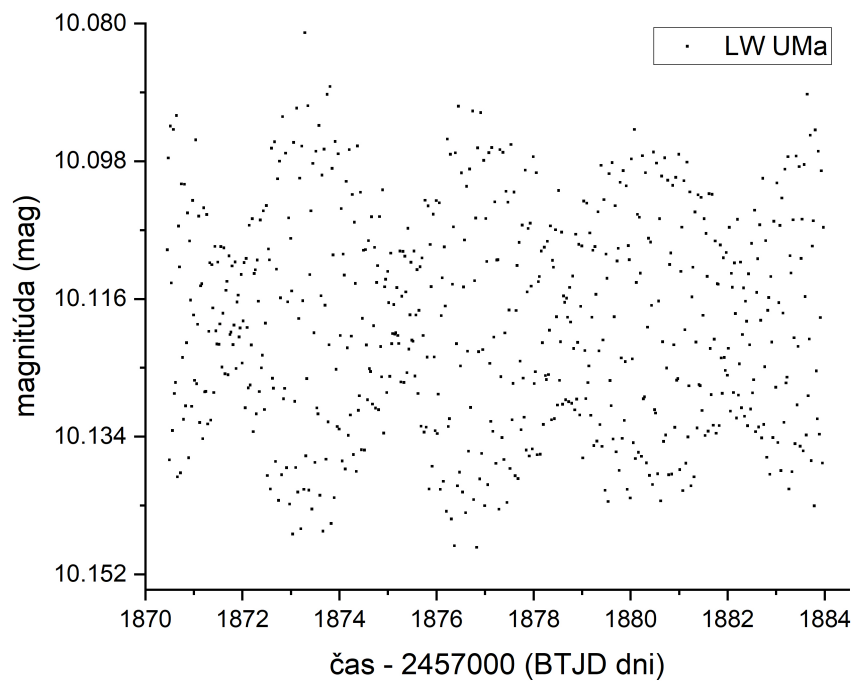


**Obr. 3.8:** Hviezda LW UMa a jej okolie. Obrázok bol prevzatý z katalógu 2MASS [21].

Pre túto hviezdu boli najprv spracované dvojce dáta z databázy TESS rovnakým spôsobom ako pre hviezdu SZ Lyn. Prvé dáta boli volené s kadenciou dát 1 snímka za 475 sekúnd. Na obr. 3.9 je pre názornosť vykreslený jeden nepre-rušovaný úsek merania. Ďalej boli spracované dáta z TESS-u, kde je vykonaný jedna snímka za 1 426 sekúnd. Svetelná krivka je vykreslená v obr. 3.10. Ďalej pre porovnanie uvedieme spracovanie dát z archívu SWASP [23]. Svetelná krivka je zobrazená v obr. 3.11. Posledné dáta, ktoré boli pre hviezdu LW UMa spracované, boli namerané v hvezdárni na Ondřejove. Meranie prebehlo z dňa 10. Apríla na 11. Apríla 2024. V priebehu noci bolo nameraných necelých 6 periód. Expozičná doba každého snímku je 10 sekúnd. Dáta boli v programe *Muniwin* upravené o chyby, ktoré pri meraní vznikli, uvedené v sekcií Offset, dark a flat. Následne z nich bola v programe vytvorená svetelná krivka. Táto závislosť je vykreslená v obr. 3.12.

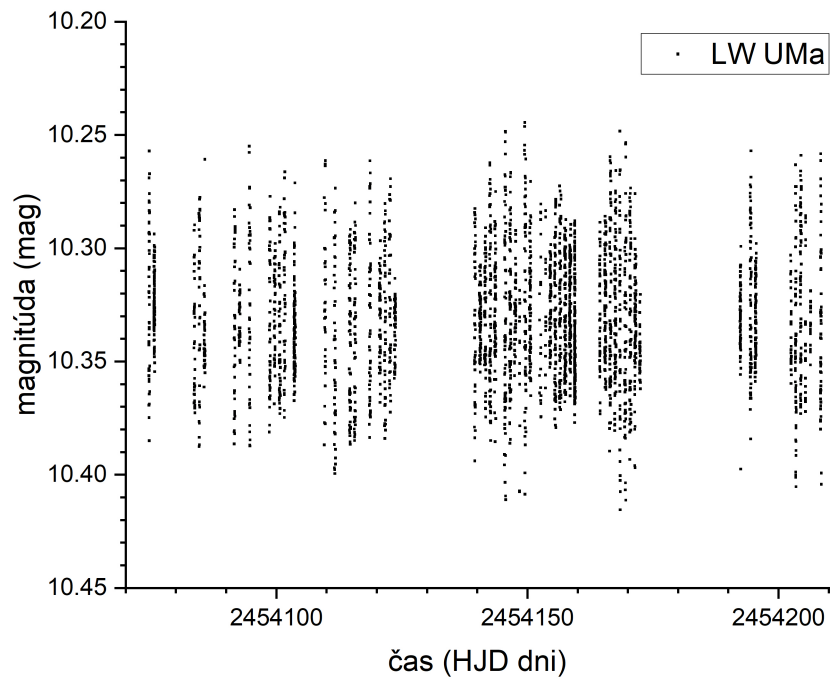


Obr. 3.9: Časová závislosť magnitúdy hviezdy LW UMa z dát z TESS-u.

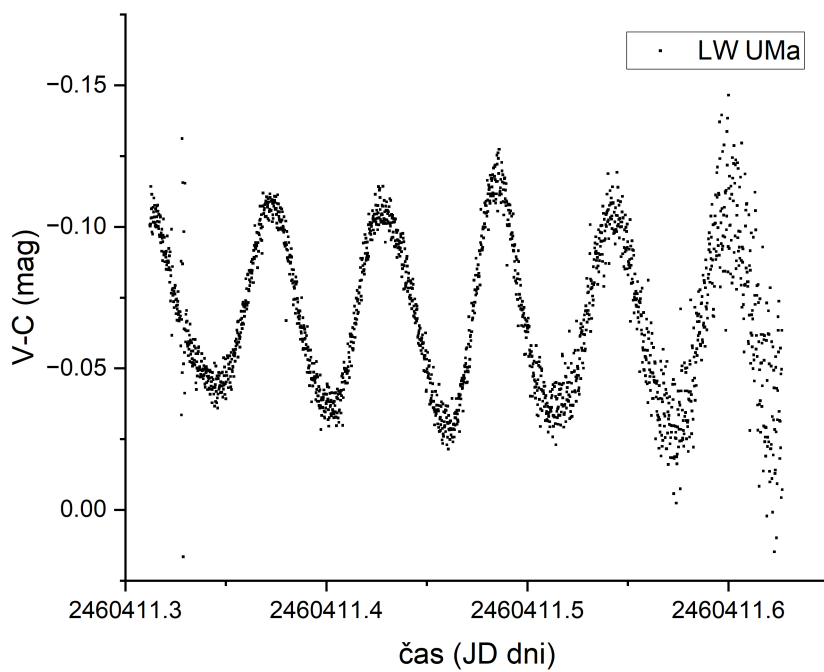


Obr. 3.10: Svetelná krivka hviezdy LW UMa z dát z TESS-u s horšou kadenciou.



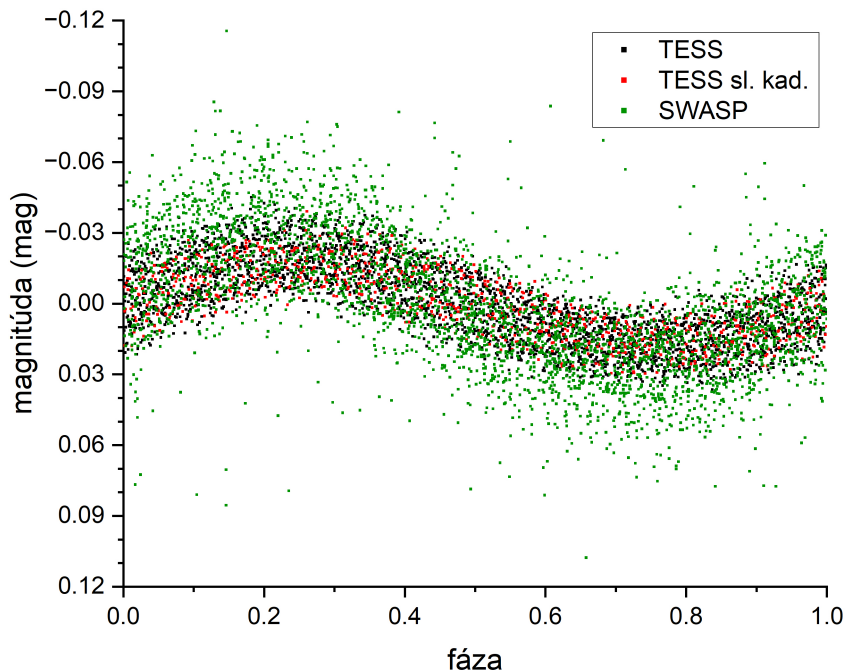


Obr. 3.11: Svetelná krivka hviezdy LW UMa z dát zo SWASP-u.



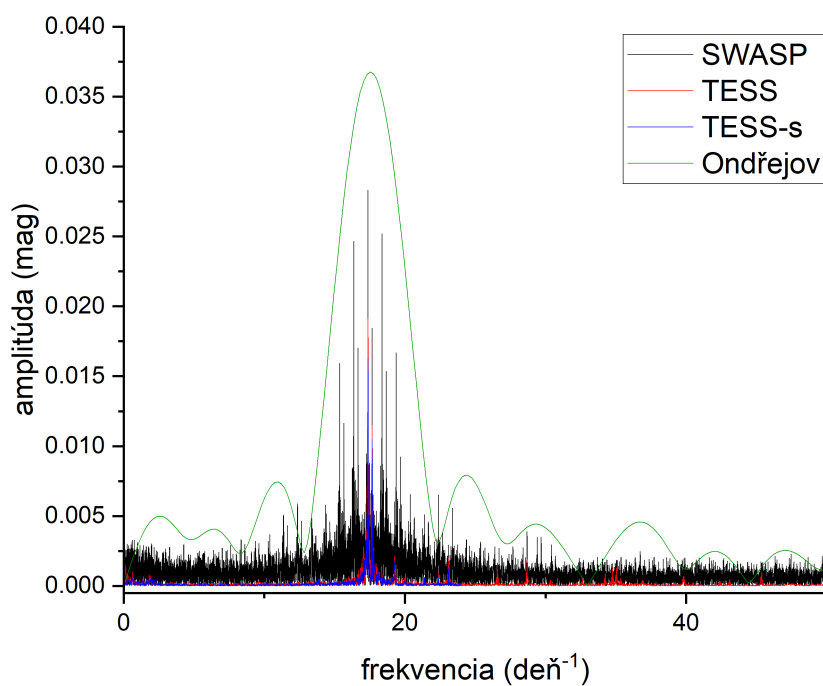
Obr. 3.12: Svetelná krivka hviezdy LW UMa z dát nameraných v Ondřejovskej hviezdárni.

V obr. 3.13 sú uvedené fázové diagramy svetelnej krivky pre dáta z TESS-u, TESS-u so slabšou kadenciou a pre dáta z SWASP-u vzhľadom k hlavnej frekvencii  $f_1 = 17.384 \text{ deň}^{-1}$ .



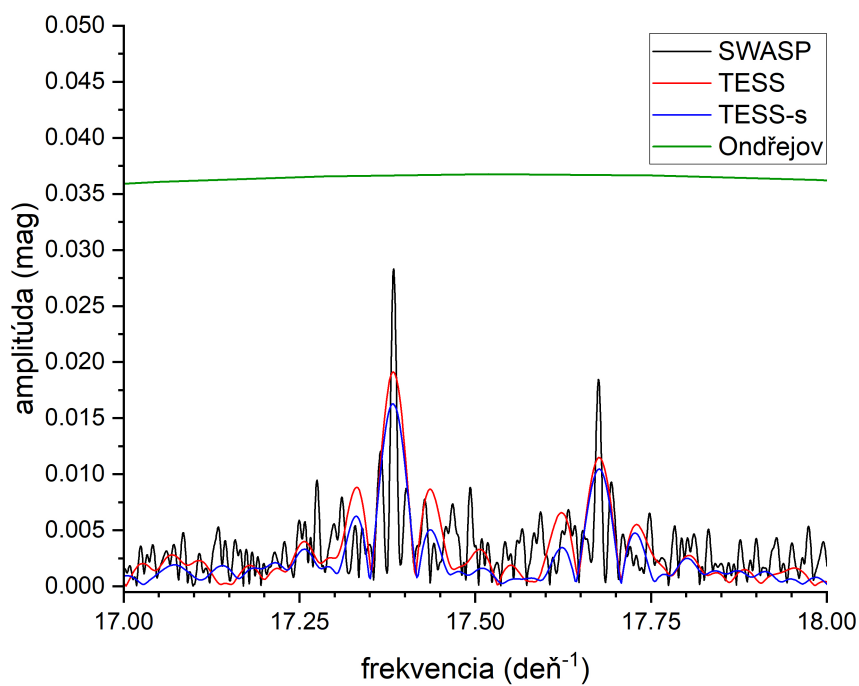
**Obr. 3.13:** Fázový diagram svetelnej krivky hviezdy LW UMa z dát z TESS-u, TESS-u so slabšou kadenciou a zo SWASP-u

Po získaní dát bola prevedená analýza jednotlivých svetelných kriviek prostredníctvom programu *Period04*. Spektrá frekvencií získane zo všetkých dát pre hviezdu LW UMa sú vykreslené v obr. 3.14.



**Obr. 3.14:** Spektrum frekvencií hviezdy LW UMa zo štyroch rôznych meraní.

V obr. 3.15 je uvedené priblíženie spektra na interval frekvencií (17, 18) deň<sup>-1</sup>.



**Obr. 3.15:** Priblíženie spektra frekvencií hviezdy LW UMa zo štyroch rôznych meraní.

Hodnoty hlavných frekvencií pulzácie hviezdy LW UMa získaných zo štyroch rôznych dátových súborov sú uvedené v tab. 3.2.

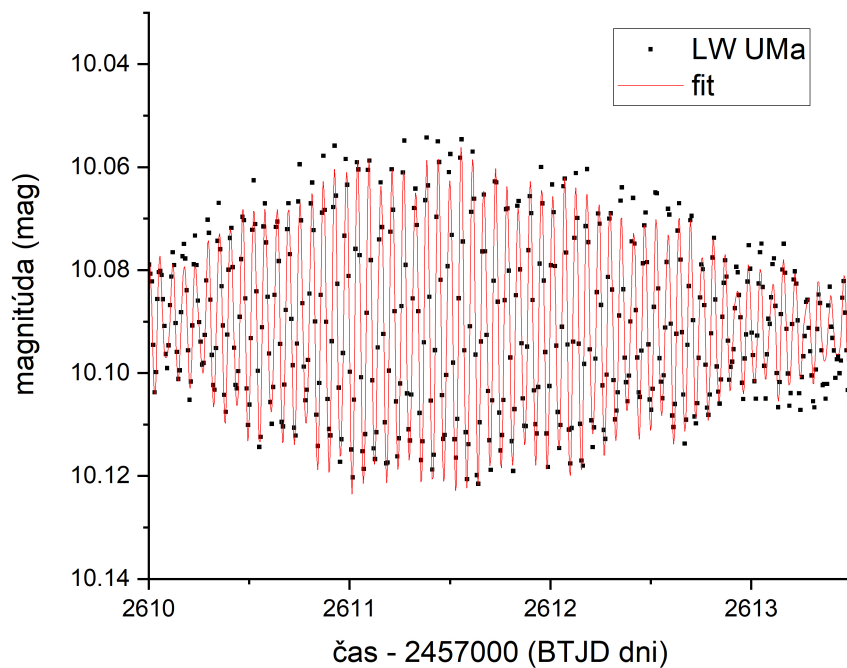
**Tab. 3.2:** Porovnanie hlavných frekvencií pulzácií hviezdy LW UMa s ich amplitúdami zo štyroch rôznych meraní (TESS, TESS so slabšou kadenciou, SWASP a dáta namerané v Ondřejove) .

TESS			TESS - slabšia kadencia		
—	$f$	$A$	—	$f$	$A$
—	(deň <sup>-1</sup> )	(mmag)	—	(deň <sup>-1</sup> )	(mmag)
$f_1$	17.383	19.099	$f_1$	17.384	16.405
$f_2$	17.675	12.308	$f_2$	17.675	10.040
$f_3$	0.055	2.403	$f_3$	0.033	2.131
$2f_1 - f_2$	17.070	2.362	$2f_1 - f_2$	17.074	2.280
$f_4$	23.100	2.136	$f_5$	17.621	1.783
$f_5$	19.281	2.103	$f_6$	19.279	1.542
$f_6$	28.680	1.900	$f_7$	0.074	1.327
$f_7$	17.616	1.840	$f_6 + f_3$	19.311	1.345
SWASP			Ondřejov		
—	$f$	$A$	—	$f$	$A$
—	(deň <sup>-1</sup> )	(mmag)	—	(deň <sup>-1</sup> )	(mmag)
$f_1$	17.384	28.492	$f_1$	17.518	35.657
$f_2$	17.675	18.570	$f_2$	28.263	5.461
$2f_1 - f_2$	17.071	3.606	$f_3$	21.256	3.697
$f_3$	22.098	3.295	$2f_1$	34.803	3.636
$f_4$	28.698	3.138	$f_4$	3.504	1.648
$f_5$	1.959	3.651	$f_5$	27.095	1.177
$f_6$	19.281	3.121	$f_6$	14.949	1.097
$f_7$	17.621	3.054	$f_7$	43.679	0.905

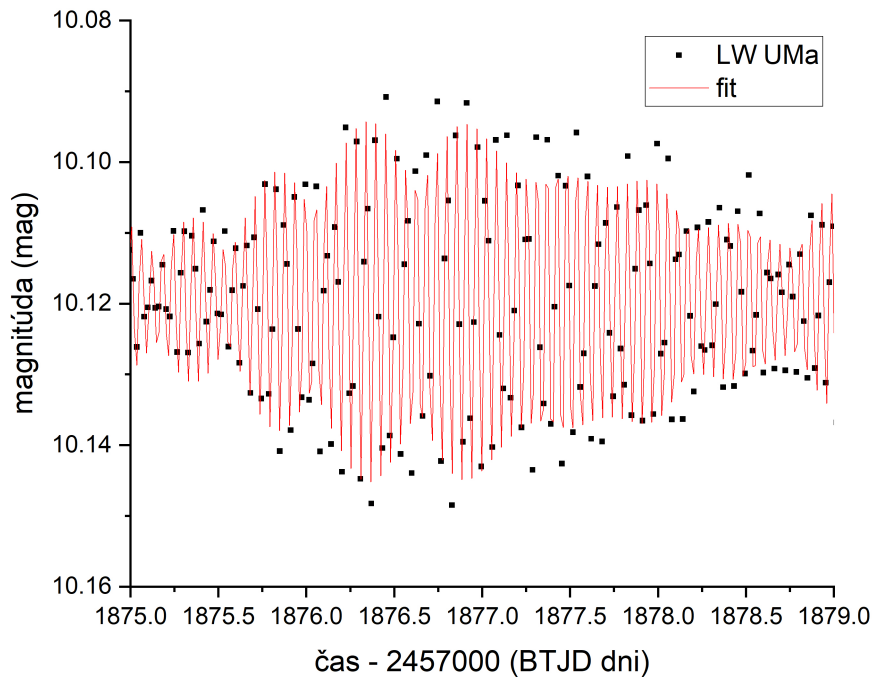
Už pri pohľade na spektra na obr. 3.14 môžeme konštatovať, že dáta z TESS-u majú najväčšiu kvalitu. Dáta z databázy SWASP majú aj po úprave príliš veľký šum, ktorý sa prejavil aj v spektre. V dátach nameraných v Ondřejovskej hviezdárni nie je dostatok dát na to, aby bolo možné vykonať analýzu, ktorá by mala veľkú presnosť. Preto sú jeho peaky široké. Zo štyroch rôznych meraní máme teda iba dvoje dáta, ktorých analýzou môžeme dostať hlbšie spoľahlivé výsledky, no všetky štyri dáta sa zhodujú v tom, že hlavný peak frekvencií sa pohybuje okolo rovnakej hodnoty. Pre túto hviezdu bola už v minulosti nájdená hlavná pulzačná frekvencia  $f = 17.384$  deň<sup>-1</sup> [24]. Z tab. 3.2 môžeme vyčítať dve hlavné frekvencie pulzácií hviezdy LW UMa, ktoré bolo možné zaznamenať v dátach z TESS-u aj SWASP-u. Najvyššia frekvencia z týchto meraní je v súlade s už v histórii zaznamenanou hodnotou. V dátach z Ondřejova, kde bohužiaľ nebolo možné získať v priebehu jednej noci viac dát na analýzu, sa tieto dve frekvencie zlievajú do prvej hlavnej frekvencie  $f_1 = 17.518$  deň<sup>-1</sup>, čo zodpovedá priemeru dvoch frekvencií z ostatných dát. V dátach z TESS-u sa ďalej vyskytuje frekvencia  $f_3$  (popríklad pre TESS so slabšou kadenciou aj frekvencia  $f_7$ ), ktorá odpovedá perióde väčšej ako 10 dní. Táto frekvencia zapríčiňuje pomalý pokles celej obálky. V dátach zo SWASP-u a z Ondřejova táto frekvencia vôbec nie

je pozorovaná. Táto frekvencia odpovedá dĺžke jedného úseku merania, a preto môžeme konštatovať, že ide o chybu spôsobenú meracím prístrojom používaným v družici TESS. V Ondřejovských dátach sa tiež vyskytuje  $f_4 = 3.504 \text{ deň}^{-1}$ . Táto frekvencia odpovedá perióde  $P_4 = 6.849$  hodín, čo približne odpovedá dĺžke pozorovania hviezdy. Táto frekvencia je teda tiež len určitou chybou, ktorá pri meraní vznikla, no nemá žiaden súvis s premennosťou samotnej hviezdy.

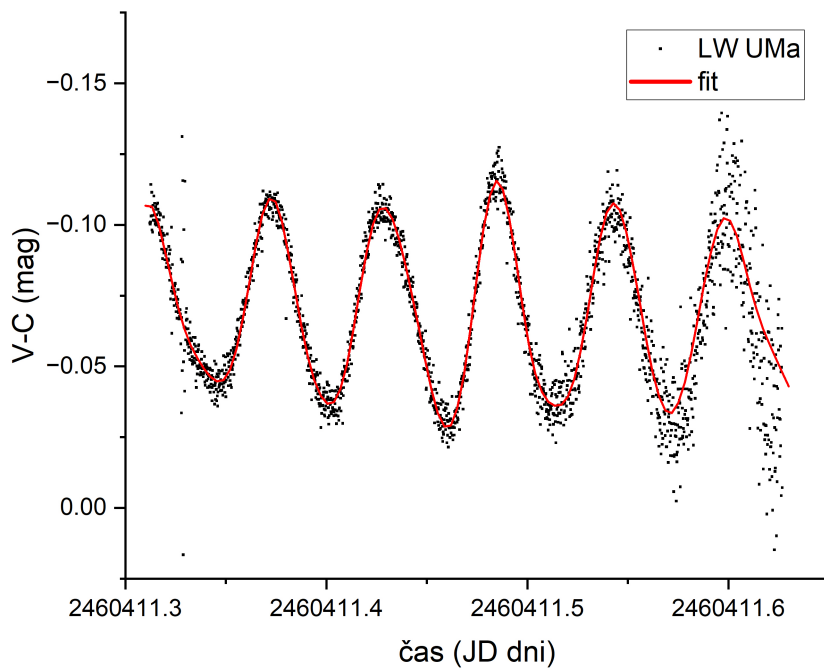
Ďalej môžeme kvalitu zistených frekvencií overiť tým, že jednotlivé svetelné krivky preložíme fitom zloženým zo zistených frekvencií. Náhľad jednotlivých závislostí preložených fitom sú pre dáta z TESS-u, TESS-u so slabšou kadenciou a pre dáta z Ondřejova v poradí vykreslené v obr. 3.16, obr. 3.17 a obr. 3.18.



**Obr. 3.16:** Svetelná krivka hviezdy LW UMa z dát z TESS-u spolu s fitom.



**Obr. 3.17:** Svetelná krivka hviezdy LW UMa z dát z TESS-u so slabšou kadenciou spolu s fitom.



**Obr. 3.18:** Svetelná krivka hviezdy LW UMa z dát z hviezdárne v Ondřejove spolu s fitom.

### 3.3 GSC 02980-01600

Posledný objekt, na ktorý sa táto práca zameria je pulzujúca premenná hviezda s názvom GSC 02980-01600. Jej ekvatoriálne súradnice sú:

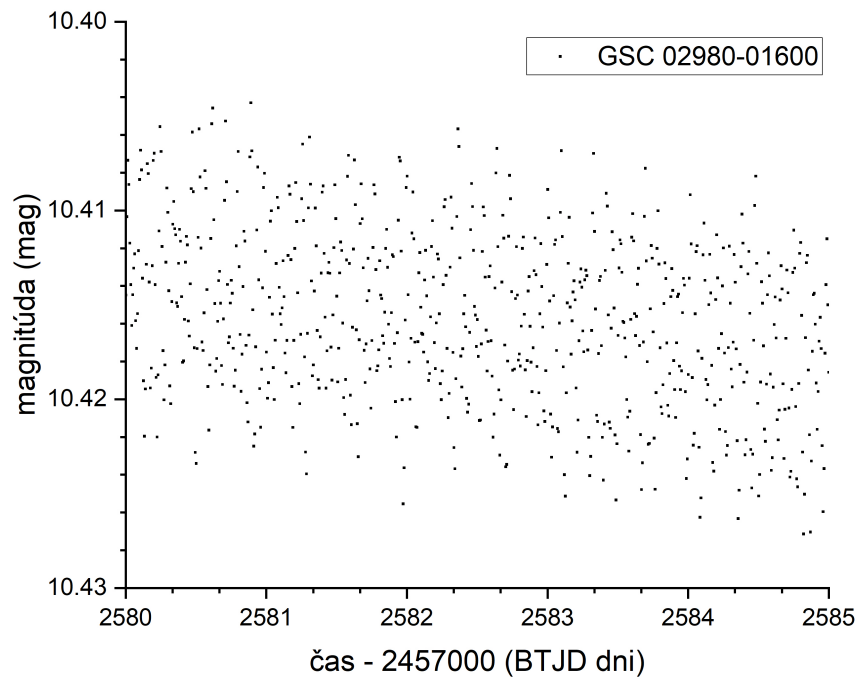
$$\begin{aligned} \text{RA} &: 08^h 25^m 34.83^s \\ \text{DEC} &: + 44^\circ 24' 55.04'' \end{aligned}$$



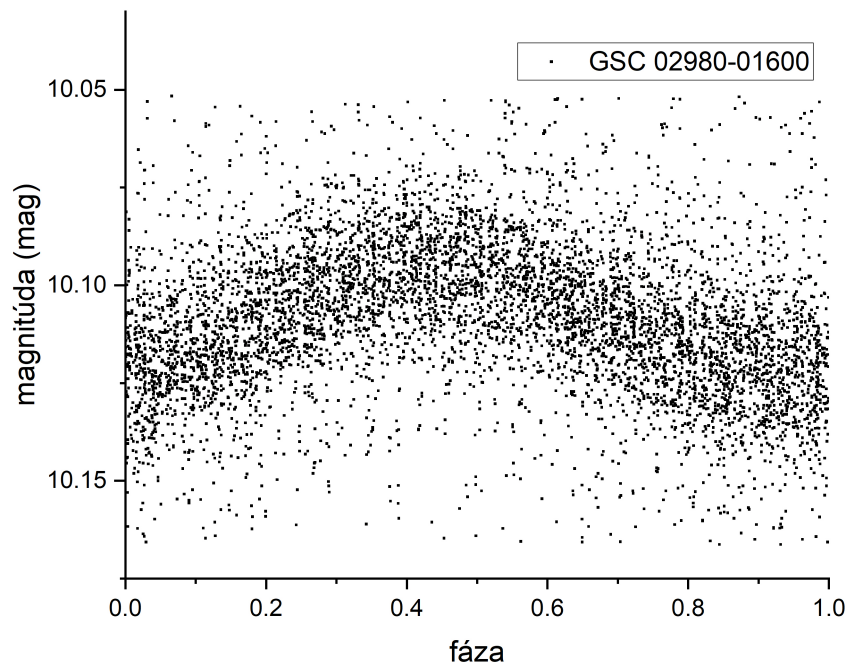
**Obr. 3.19:** Hviezda GSC 02980-01600 a jej okolie. Obrázok bol prevzatý z katalógu 2MASS [21].

Pre túto hviezdu boli najprv stahované dáta z TESS-u. Náhľad svetelnej krivky je vykreslený v obr. 3.20. Z uvedeného náhľadu môžeme očakávať, okrem hlavnej vysokej frekvencie aj nejakú nízku, nezanedbateľnú frekvenciu, ktorá odpovedá pomalému klesaniu magnitúdy.

Ďalšie dáta spracované pre hviezdu GSC 02980-01600 boli sprostredkované prehliadkou SWASP [23]. Tieto dáta ponúkajú síce viac úsekov merania, no obsahujú veľký šum, ktorý by pri priamej analýze pomocou programu *Period04* dával nespoľahlivé výsledky. Preto bola pri tomto dátovom súbore prevedená oprava. Pre opravu bol zostrojený jednoduchý program, ktorého úlohou bolo zistiť priemernú hodnotu magnitúdy  $\bar{m}$  a štandardnú odchýlku  $\sigma$ . Následne boli z dát vynechané hodnoty magnitúdy nespádajúce do intervalu  $(\bar{m} - 3\sigma, \bar{m} + 3\sigma)$ . Následným opakovaním tohoto procesu na redukované dáta boli dáta zbavené najväčších chýb, ktoré ovplyvňovali ďalšiu analýzu. Spomínaná metóda úpravy dát sa nazýva metóda Sigma Clipping. Závislosť, ktorú dostaneme po vykonaní úpravy nie je úplne vhodná na ukážku, preto je miesto nej vykreslená fáza (obr. 3.21), v ktorej je názornejšie ukázaný priebeh skúmanej závislosti.



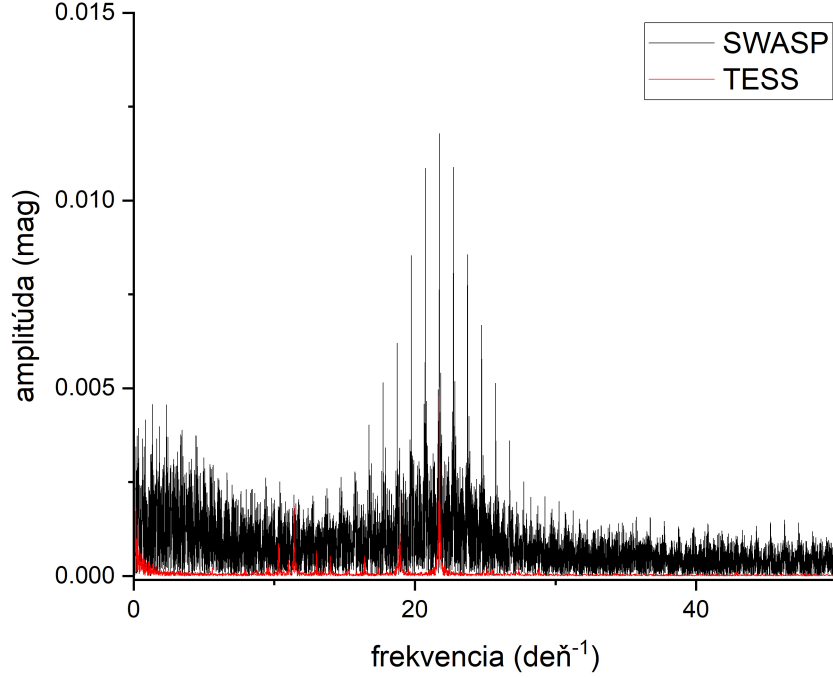
**Obr. 3.20:** Náhľad svetelnej krivky hviezdy GSC 02980-01600 z dát z TESS-u.



**Obr. 3.21:** Fázový diagram magnitúdy hviezdy GSC 02980-01600 z dát zo SWASP-u.



Teraz už môžeme na oboch dátových súboroch vykonať analýzu v programe *Period04*. Výsledné spektra sú uvedené v obr. 3.22



**Obr. 3.22:** Spektrum frekvencií hviezdy GSC 02980-01600 z dát z TESS-u a SWASP-u.

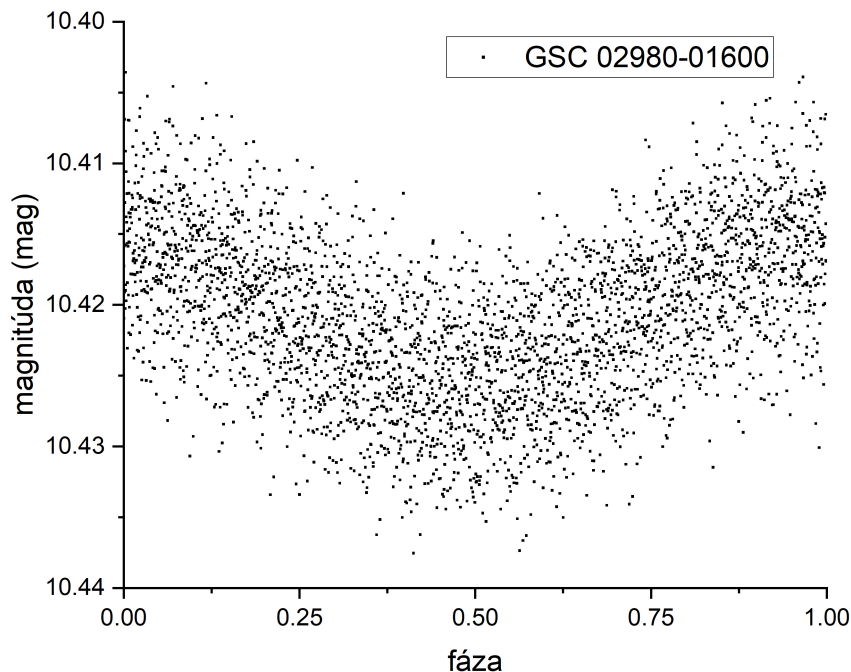
Zo spektra vidíme, že svetelná krivka dát zo SWASP-u stále nie je zbavená všetkého šumu, no aj tak došlo ku značnej redukcii nechcených efektov. Hlavné nájdené frekvencie z oboch meraní sú uvedené v tab. 3.3.

**Tab. 3.3:** Porovnanie hlavných frekvencií pulzácií hviezdy GSC 02980-01600. Prvé spracovanie odpovedajú dátam z databázy TESS. Druhé spracovanie odpovedá spracovaniu dát z databázy SWASP.

TESS			SWASP		
—	$f$	$A$	—	$f$	$A$
—	(deň <sup>-1</sup> )	(mmag)	—	(deň <sup>-1</sup> )	(mmag)
$f_1$	21.750	5.030	$f_1$	21.750	11.897
$f_2$	0.002	870.050	$f_2$	2.353	4.587
$f_3$	0.041	4.931	$f_3$	1.845	5.109
$f_4$	18.920	2.122	$f_4$	1.713	5.152
$f_5$	11.417	1.841	$f_3 + f_4$	4.512	3.660
$f_6$	0.113	1.712	$2f_4 - f_3$	1.634	3.006
$f_7$	10.298	0.868	$4f_2$	9.394	2.541
$f_8$	13.021	0.676	$f_8$	2.803	2.684

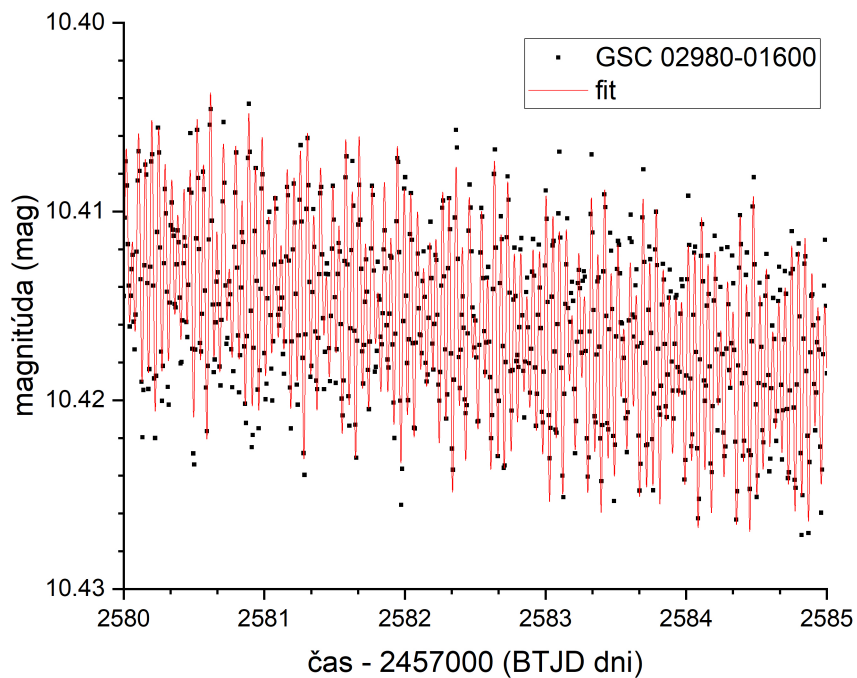
Obe merania sa zhodujú v prvej nájdenej frekvencii  $f_1 = 21.750 \text{ deň}^{-1}$ . Táto frekvencia sa zhoduje s frekvenciou, ktorá bola v histórii zaznamenaná sondou GAIA [24]. Druhá nájdená frekvencia v spracovaní dát z TESS-u je rádovo vyššia ako ostatné frekvencie, s ktorými sme v práci narábali. Svetelná krivka tvorená TESS-om obsahuje celkovo 3 úseky podobné závislosti vykreslenej na obr. 3.20. Vo vykreslení jedného úseku dát vidíme, že celá závislosť pomaly klesá. Tento trend sa rovnakým spôsobom vyskytuje aj vo zvyšných dvoch úsekoch merania. Z toho môžeme usúdiť, že nízke frekvencie  $f < 1 \text{ deň}^{-1}$  nájdené v dátach z TESS-u znova odpovedajú len chybe spôsobenej meracím prístrojom. Pri pohľade na ďalšie nájdené frekvencie si môžeme všimnúť, že sa medzi meraniami nezhodujú. Zatiaľ čo pri analýze dát z TESS-u máme 4 frekvencie z intervalu  $f \in (10, 20) \text{ deň}^{-1}$ , analýzou dát z SWASP-u sme žiadnu frekvenciu z tohoto intervalu nenašli. Na druhej strane pre SWASP máme okrem prvej hlavnej frekvencie  $f_1$  ďalších 7 frekvencií z intervalu  $f \in (1, 10) \text{ deň}^{-1}$ . Pre TESS tieto frekvencie nájdené neboli. Zvyšné frekvencie z TESS-u sú veľmi nízke a sú zapríčinené pomalým poklesom celej závislosti. Aj keď sa nájdené frekvencie oboch meraní nezhodujú, môžeme povedať, že obe svetelné krivky sú vhodné na analýzu, no dáta z TESS-u sú v pre hviezdu GSC 02980-01600 viac vhodné na nájdenie pulzácií s frekvenciami  $f > 10 \text{ deň}^{-1}$  zatiaľ čo dáta zo SWASP-u sú vhodnejšie na hľadanie nižších frekvencií  $f < 10 \text{ deň}^{-1}$ .

V obr. 3.23 je vykreslený fázový diagram voči hlavnej frekvencii  $f_1 = 21.750 \text{ deň}^{-1}$  pre dáta z TESS-u.



**Obr. 3.23:** Fázový diagram hviezdy GSC 02980-01600 z dát z TESS-u vzhľadom k hlavnej frekvencii  $f_1 = 21.750 \text{ deň}^{-1}$ .

Pre overenie kvality analýzy dát si ešte uvedieme svetelnú krivku dát z TESS-u doplnenú o fit zložený z nami zistených frekvencií. V obr. 3.24 je vykreslená závislosť spolu s fitom pre dáta merané z TESS-u.



**Obr. 3.24:** Svetelná krivka hviezdy GSC 02980-01600 z dát z TESS-u spolu s fitom.

# Záver

Táto práca je zameraná na pulzujúce premenné hviezdy typu  $\delta$  Scuti. Pre analýzu sme si vybrali 3 hviezdy: SZ Lyncis, LW UMa a GSC 02980-01600. Dáta boli získané z databázy družice TESS a databázy SWASP. Pre hviezdu LW UMa boli okrem dát z týchto dvoch databáz namerané aj vlastné dáta z hvezdárne v Ondřejove. Cieľom práce bola analýza získaných svetelných kriviek a porovnanie vypočítaných frekvencií z rôznych meraní. Na analýzu bol v práci používaný program *Period04*.

Pre hviezdu SZ Lyncis bola analyzovaná svetelná krivka dát z TESS-u. Pre túto hviezdu bola nájdená jedna hlavná pulzačná frekvencia  $f_1$ . Táto frekvencia sa zhoduje so spracovaním v inej práci, preto ju môžeme považovať za reálnu hodnotu. Ostatné nájdené frekvencie sú len celočíselné násobky prvej frekvencie. Preto ich môžeme zanedbať a povedať, že hviezda pulzuje s jednou periódou. Pre hviezdu LW UMa boli spracovávané 4 rôzne merania. Frekvenčné spektrá všetkých štyroch meraní poskytli informáciu o tom, že hlavné frekvencie pulzácie hviezdy všetkých štyroch meraní sa pohybujú okolo rovnakej hodnoty. Pre merania z TESS-u a SWASP-u boli nájdené 2 hlavné frekvencie. Z merania v Ondřejove bola nájdená jedna hlavná frekvencia, ktorá je rovná priemeru prvých dvoch frekvencií z ostatných meraní. Tento jav je zapríčinený tým, že meranie v Ondřejove poskytlo nedostatočný počet dát v dôsledku krátkeho časového pokrytia merania. Pre túto hviezdu bola v minulosti nájdená hlavná frekvencia  $f = 17.384 \text{ deň}^{-1}$  [24], ktorá sa zhoduje so všetkými spracovaniami meraní v tejto práci. V dátach z TESS-u sa ďalej vyskytla frekvencia  $f \ll 1$ , ktorá je zapríčinená pomalým poklesom celej závislosti. Táto frekvencia pri ostatných meraniach pozorovaná nebola a preto je možné hovoriť o určitej chybe daného detektoru, ktorú je možné odstrániť úpravou dát pred vykonávaním analýzy. Posledná hviezda, na ktorú sme sa v práci zamerali, je hviezda GSC 02980-01600. Spracovávané boli 2 merania. V roku 2022 bola zistená hlavná pulzačná frekvencia  $f_1 = 21.750 \text{ deň}^{-1}$  [24]. Táto frekvencia bola nájdená aj v našich spracovaniach. Ďalšie frekvencie sa medzi našimi meraniami nezhodovali, no tento nesúlad je zapríčinený spôsobmi merania. Dáta z TESS-u majú väčšiu kvalitu no slabšie pokrytie v čase. Preto boli pri analýze nájdené vyššie frekvencie  $f > 10 \text{ deň}^{-1}$ . Dáta zo SWASP-u sú viac rozložené v čase, čo znamená, že sú lepšie na hľadanie nižších frekvencií  $f < 10 \text{ deň}^{-1}$ .

# Zoznam použitej literatúry

- [1] CATELAN, M., SMITH, H. A. *Pulsating stars*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2015. ISBN 978-3-527-40715-6
- [2] Wikipedia contributors. (2024, Apríl 9). *Hertzsprung–Russell diagram*. Wikipedia, The Free Encyclopedia. Získané 18:10, Apríl 9, 2024, z [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Hertzsprung%E2%80%93Russell\\_diagram&oldid=1217983362](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Hertzsprung%E2%80%93Russell_diagram&oldid=1217983362).
- [3] CSIRO. (2024, Marec 6). *The Hertzsprung–Russell Diagram*. Získané 16:25, Júl 10, 2024, z [https://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/astrophysics/stellarevolution\\_hrintro.html](https://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/astrophysics/stellarevolution_hrintro.html).
- [4] Wikipedia contributors. (2024, Apríl 7). *Main sequence*. Wikipedia, The Free Encyclopedia. Získané 20:10, Apríl 9, 2024, z [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Main\\_sequence&oldid=1217684437](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Main_sequence&oldid=1217684437).
- [5] Wikipedia contributors. (2023, November 20). *Red-giant branch*. Wikipedia, The Free Encyclopedia. Získané 22:15, Apríl 9, 2024, z [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Red-giant\\_branch&oldid=1186037951](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Red-giant_branch&oldid=1186037951).
- [6] Wikipedia contributors. (2024, Apríl 9). *White dwarf*. Wikipedia, The Free Encyclopedia. Získané 9:31, Apríl 10, 2024, z [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=White\\_dwarf&oldid=1221078896](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=White_dwarf&oldid=1221078896).
- [7] CHOWN, A., (2022). The three-dimensional structure of the Magellanic Clouds as traced by Classical Cepheids: (Alternative Format Thesis). University of Bath.
- [8] BALONA, L. A. (2015). Flare stars across the H-R diagram. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **447**(3), 2714-2725, doi: 10.1093/mnras/stu2651.
- [9] BRICKHILL, A. J. (1983). The pulsations of ZZ Ceti stars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **204**(2), 537-556, doi: 10.1093/mnras/204.2.537.
- [10] Wikipedia contributors. (2024, Január 6). *Beta Cephei variable*. Wikipedia, The Free Encyclopedia. Získané 14:31, Apríl 11, 2024, z [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Beta\\_Cephei\\_variable&oldid=1193859568](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Beta_Cephei_variable&oldid=1193859568).
- [11] HANDLER, G. (2009). Delta Scuti Variables. *AIP Conference Proceedings*, **1170**(1), 403-409, doi: 10.1063/1.3246528.
- [12] BROŽ, M., HARMANEC, P. *Stavba a vývoj hvězd*. Praha: Matfyzpress, 2010. ISBN 978-80-7378-165-1
- [13] JOSHI, S., JOSHI, Y.C. (2015). Asteroseismology of Pulsating Stars. *J. Astrophys. Astron.*, **36**, 33–80 doi: 10.1007/s12036-015-9327-z

- [14] History of the Magnitude Scale [online]. Získané 12:23, Apríl 25, 2024, z <https://cas.sdss.org/DR6/en/proj/advanced/color/maghistory.asp>.
- [15] TESS Transiting Exoplanet Survey Satellite. *Mission Overview*. Získané 17:30, Júl 10, 2024, z <https://tess.mit.edu/science/>.
- [16] eoPortal. *TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite)*. Získané 16:40, Júl 10, 2024, z <https://www.eoportal.org/satellite-missions/tess>.
- [17] What is a CCD Detector?. Získané 16:10, Apríl 25, 2024, z <https://www.horiba.com/aut/scientific/technologies/detectors/what-is-a-ccd-detector/>.
- [18] BROŽ, M., ŠOLC, M. *Fyzika sluneční soustavy*. Praha: Matfyzpress, 2013. ISBN 978-80-7378-236-8.
- [19] MOTL, D., HROCH, F., KRÁL, L., ZEJDA, M., PEJCHA, M., SVOBODA, P., KUDRNÁČKOVÁ, J., LUŤCHA, P., BAKIS, V. (2010). C-Munipack (version 1.2.33). Dostupné na: <https://c-munipack.sourceforge.net/>
- [20] LENZ, P., BERGER, M. (2005). Period04 User Guide. *Communications in Asteroseismology*, **146**, 53-136, doi: 10.1553/cia146s53.
- [21] SKRUTSKIE, M. F. et al. (2006). The Two Micron All Sky Survey (2MASS). *The Astronomical Journal*, **131**, 1163-1183, doi: 10.1086/498708.
- [22] ADASSURIYA, J., GANESH et al. (2020). Asteroseismology of SZ Lyn using multi-band high time resolution photometry from ground and space. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **502**, 541-555, doi: 10.1093/mnras/staa3923.
- [23] BUTTERS, O. W., WEST, R. G. et al. (2010). The first WASP public data release. *Astronomy and Astrophysics*, **520**, doi: 10.1051/0004-6361/201015655.
- [24] Gaia Collaboration (2023). Gaia Data Release 3. *Astronomy and Astrophysics*, **674**, doi: 10.1051/0004-6361/202243940.