

Středoškolská odborná činnost

Obor: 2. Fyzika

Určení vlastností nové proměnné hvězdy typu δ Scuti

Autor: Vojtěch Dienstbier

Škola: Slovanské gymnázium Olomouc

Konzultant: doc. RNDr. Marek Wolf, CSc. AÚ UK
Mgr. Marek Skarka, Ph.D. MUNI

Olomouc 2019

Poděkování

Děkuji Kateřině Hoňkové a celé CCD skupině za cenné zkušenosti, přístup k technice a příjemně strávené léto. Dále bych chtěl poděkovat doc. Wolfovi a Mgr. Skarkovi za odborné konzultace. Také děkuji všem, kteří mě při psaní práce podporovali a pomáhali mi, obzvláště pak Natálii Rudolfové.

Prohlašuji, že jsem svou práci SOČ vypracoval samostatně a použil jsem pouze prameny a literaturu uvedené v seznamu bibliografických záznamů.

Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze soutěžní práce SOČ jsou shodné.

Nemám závažný důvod proti zpřístupnění této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších předpisů.

V Olomouci dne

Title: Determination of physical properties of newly found DSCT type star

Authors: Vojtěch Dienstbier

School: Slavonic grammar school Olomouc

Abstract: This paper describes the acquisition of photometric and spectroscopic measurements of the newly discovered delta Scuti star CzeV1361 and determination of its characteristics. The apparent and absolute magnitudes of the star and its distance were determined independently via photometry using period-luminosity relation and astrometry. From the contradiction of the obtained results and light curve shape, existence of non-radial pulsations is demonstrated. Therefore P-L relation based methods can not be applied to this very star. Several methods of period analysis (Fourier transform, Lomb-Scargle periodogram, Bayesian inference) are compared. Spectral type and therefore surface temperature were determined using spectroscopic measurements and model spectra comparison. The level of interstellar extinction derived from the spectra fitting was crucial for calibration of the photometric observations. Radius, mass, temperature, luminosity and further properties were derived from the data. As the derived star mass is too low to be ordinary delta Scuti pulsator, metal-poor subtype is suggested. The star was placed on the Hertzsprung-Russell diagram.

Keywords: Delta Scuti, photometry, spectroscopy, astrometry, pulsating variable stars, period analysis

Název práce: Určení vlastností nové proměnné hvězdy typu δ Scuti

Autoři: Vojtěch Dienstbier

Škola: Slovanské gymnázium Olomouc

Abstrakt: V práci popisují pořízení fotometrických a spektroskopických měření nově objevené proměnné hvězdy typu delta Scuti CzeV1361 a určení jejích vlastností. Absolutní hvězdná velikost byla určena fotometricky použitím vztahu mezi periodou změn a zářivým výkonem a nezávisle astrometricky pomocí paralaxy. Vzhledem k nesouladu výsledků a tvaru světelné křivky pulzuje hvězda zřejmě neradiálně, nemůže být vztah P-L pro tuto hvězdu používán. V práci je porovnáno několik metod periodové analýzy. Spektrální typ a povrchová teplota hvězdy byly určeny spektroskopicky porovnáním s modelovými spektry. Takto byla také určena míra mezihvězdné extinkce, nezbytná pro kalibraci fotometrických měření. Byly určeny hmotnost, teplota, poloměr, zářivý výkon a další vlastnosti. Zjištěná hmotnost se příliš nízká, než aby se mohlo jednat o klasickou delta Scuti s běžnou metalicitou, CzeV1361 zřejmě patří do podskupiny s nízkou metalicitou. Hvězda byla umístěna v rámci H-R diagramu.

Klíčová slova: Delta Scuti, fotometrie, spektroskopie, astrometrie, pulzující proměnné hvězdy, periodová analýza

Obsah

1	Principy hvězdné proměnnosti	3
1.1	Typy proměnných hvězd	3
1.1.1	Geometrické proměnné hvězdy (extrinsic variables)	3
1.1.2	Fyzické proměnné hvězdy (intrinsic variables)	3
1.2	Mechanismus pulzací	5
1.2.1	Fyzikální podstata vztahu perioda-zářivý výkon	6
1.3	Zkoumaná hvězda	7
2	Fotometrie	8
2.1	Použité přístroje	8
2.1.1	Úpická hvězdárna	8
2.1.2	Dalekohled Sekce proměnných hvězd a exoplanet ČAS	9
2.1.3	Mayerův dalekohled, Astronomický ústav v Ondřejově	9
2.1.4	Dalekohled FRAM-La Palma	10
2.2	Zpracování dat	13
2.2.1	Redukce dat	13
2.2.2	Převod GJD na HJD	14
2.3	Periodová analýza	15
2.3.1	Fourierova transformace, Schusterův periodogram	15
2.3.2	Bayesovský pravděpodobnostní přístup	16
2.3.3	Lombův-Scargleův periodogram	17
2.3.4	Periodogram programu PerSea	17
2.4	Fázový diagram	19
2.5	Určení pozorované střední hvězdné velikosti	20
3	Spektroskopie	21
3.1	Astronomical Ring for Access to Spectroscopy	21
3.2	Určení spektrálního typu a míry mezihvězdné extinkce	22
4	Astrometrie	23
4.1	Observatoř Gaia	24
5	Výpočet fyzikálních charakteristik hvězdy	25
5.1	Oprava hvězdné velikosti o mezihvězdnou absorpci	25
5.2	Určení absolutní hvězdné velikosti metodou P-L	25
5.3	Určení vzdálenosti hvězdy pomocí P-L a paralaxy	25
5.4	Určení absolutní hvězdné velikosti paralaxou, teoretická hodnota základní periody	26
5.5	Fotometrické určení teploty	26
5.6	Umístění hvězdy na Hertzsprungův-Russelův diagram	27
5.7	Určení poloměru a zářivého výkonu hvězdy	27
5.8	Určení hmotnosti a střední hustoty	28
6	Závěr	29
	Reference	31

Úvod

Při pohledu na noční oblohu si okamžitě všimneme faktu, že hvězdy jsou různě jasné. Ptolemaios zavedl rozdělení hvězd do šesti tříd podle pozorované jasnosti, která byla v rámci tehdejšího geocentrického modelu a představ nebeské sféry logicky pevně spojena s velikostí hvězdy. Proto se jako veličina popisující vnímanou jasnost hvězdy i v současnosti používá tzv. *hvězdná velikost*, jejíž jednotkou je magnituda (mag). Na Ptolemaiovo rozdělení navázal Norman Robert Pogson, který s využitím Weberova-Fechnerova psychofyzického zákona (exponenciální změna podnětu je vnímána jako lineární) pevně zakotvil určování jasnosti Pogsonovou rovnicí.

Model neměnného nebe dostával stále více trhlin. Byly zpozorovány nové hvězdy, novy, které se objevily, postupně slábly, až nakonec opět zmizely. Objevily se také hvězdy, k jejichž změnám docházelo opakovaně. Například o Ceti, mizející a znovu se objevující, zjasňující z, pouhým okem neviditelných, 10,1 mag až k 2 mag v cyklu dlouhém 333 dní, dostala díky svému chování název Mira, tedy Podivuhodná. Vznikla kategorie proměnných hvězd.

Postupem času se ukázalo, jak neuvěřitelně užitečné takové proměnné hvězdy pro astronomii jsou. Svými změnami nám o sobě prozrazují mnohem více, než stálice. Zmínit můžeme například hmotnost, rozměry, vnitřní stavbu a pro určité typy také vzdálenost k nim. To bylo umožněno poprvé díky Henriettě Swan Leavittové, která našla vztah mezi periodou a zářivým výkonem pro hvězdy typu δ Cephei. Díky tomu mohl Edwin Hubble dokázat, že alespoň některé objekty tehdy označované jako mlhoviny (konkrétně M31 a M33) jsou příliš daleko, než aby mohly být součástí naší Galaxie, která byla tou dobou považována za jedinou. To opět zcela změnilo náš pohled na vesmír. Proměnné hvězdy zůstávají i v dnešních dnech jeden z nejdůležitějších zdrojů informací.

Cílem práce je určit základní charakteristiky pulzující proměnné hvězdy, mnou objevené v létě minulého roku, za použití všech tří základních astronomických metod - fotometrie, spektroskopie a astrometrie.

1 Principy hvězdné proměnnosti

1.1 Typy proměnných hvězd

Za proměnnou hvězdu je považována každá hvězda, jejíž přicházející světelný tok se v průběhu času mění. Tyto změny mohou být v rozsahu od tisícín po desítky magnitud v časovém rozmezí zlomků sekund až miliard let, kde jsou způsobeny hvězdným vývojem. Z toho vyplývá, že vlastně každá hvězda, včetně našeho Slunce, je při dostatečně přesném měření do určité míry proměnná. Podle společných znaků je možno proměnné hvězdy rozdělit do různých skupin [17].

1.1.1 Geometrické proměnné hvězdy (extrinsic variables)

U geometrických proměnných je zářivý výkon soustavy konstantní a pozorované změny jsou způsobeny pouze geometrií systému.

Patří sem:

- Rotující proměnné hvězdy - Proměnnost je způsobena oblastmi povrchu s jinou teplotou/složením, případně elipsoidálním tvarem, kvůli působení slapových sil.
- Zákrytové systémy - Země se nachází v rovině vzájemného oběhu daného systému, a můžeme tak sledovat vzájemné zákryty jednotlivých složek. Zde by bylo vhodné uvést bližší rozdělení podle vlastností pozorovaných změn:
 - Typ Algol (EA) - Jedná se o dobře oddělené systémy s prakticky kulovitými složkami. V době mezi zákryty je přicházející světelný tok prakticky konstantní.
 - Typ W UMa (EW) - U tohoto typu hvězdy obíhají velmi blízko sebe, přesahují oblasti své gravitační dominance (tzv. Rocheův lalok) a jsou deformovány do kapkovitého tvaru. Mezi složkami dochází k přenosu hmoty. Deformovaný tvar systému způsobuje neustálou změnu pozorovaného světelného toku.
 - Typ β Lyrae (EB) - Jde o oddělené systémy, ve kterých ale dochází vlivem slapových sil k deformaci tvaru složek, a tedy neustále se měnícímu pozorovanému světelnému toku.
 - Systémy s tranzitující exoplanetou - ač nepříliš často uváděné, z hlediska mechanismu změny patří také do této kategorie. Primární zákryt je způsoben přechodem planety před diskem hvězdy, a tedy zakrytím části jejího povrchu. Ojedinele je možno pozorovat i zákryt sekundární, kdy dochází ke ztrátě světla hvězdy odráženého planetou.

1.1.2 Fyzické proměnné hvězdy (intrinsic variables)

Někdy bývají také označovány jako "pravé proměnné hvězdy". Z různých příčin dochází ke změnám jejich zářivého výkonu.

- Eruptivní - Změny jsou způsobovány aktivitou (erupcemi, výrony hmoty) v atmosféře hvězdy. Jedná se o velmi širokou skupinu s velkým množstvím podtypů, např. S Doradus, R Coronae Borealis, UV Ceti.

- Kataklyzmické - Dochází ke vzplanutím materiálu dopadajícího na hvězdu (symbiotické dvojhvězdy, novy, supernovy Ia), v případě supernov (typu II) k explozi v rámci závěrečného vývoje hmotné hvězdy.
- Pulzující - U hvězd může docházet ke dvěma typům pulzací radiálním (změna poloměru) a neradiálním (deformace). Změny povrchu a efektivní teploty hvězdy se poté projeví proměnlivostí zářivého výkonu. Pro některé typy existují vztahy mezi periodou pulzací a zářivým výkonem. Takové hvězdy pak mohou být používány k určování vzdáleností patří mezi tzv. *standardní svíčky*.

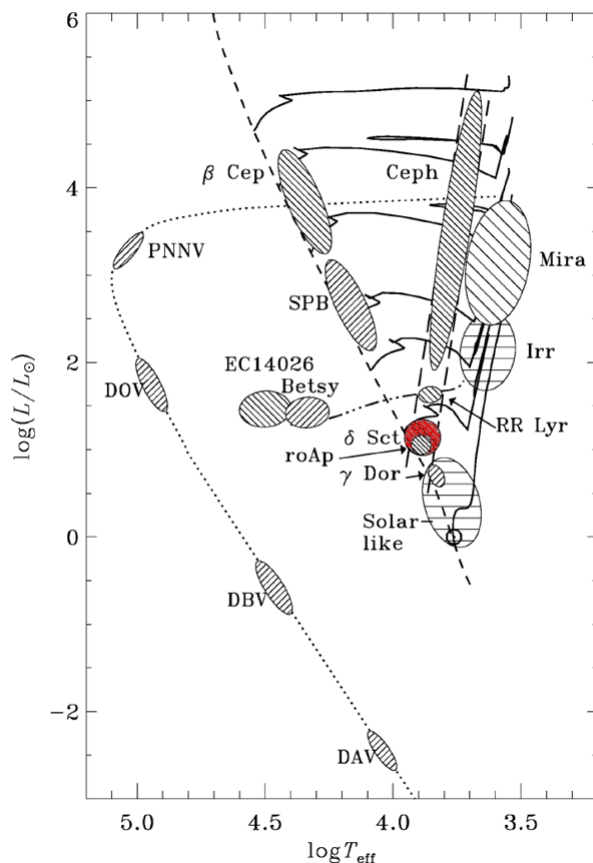
- Typ δ Cephei - klasické Cefeidy, Jedná se o velmi zářivé hvězdy, detekovatelné i v jiných galaxiích. Perioda změn je řádově ve dnech. Jsou první skupinou, pro kterou byla nalezena závislost absolutní magnitudy na periodě změn. Leavittová zkoumala Cefeidy v Magelanových mračnách, tedy zhruba stejné vzdálenosti, a mohla tak naměřené hvězdné velikosti používat, jako by šlo o jejich absolutní variantu. Nalezla závislost ve tvaru:

$$M_v = a + b \log P, \quad (1.1)$$

kde a a b jsou empirické součinitele určované fitem, M_v je absolutní hvězdná velikost a P je perioda pulzace. Stejná závislost, ale s jinými koeficienty, byla nalezena i pro další typy pulzujících hvězd [Obr. 1](#).

- Typ RR Lyrae - Jde o velmi staré hvězdy s nízkým obsahem těžších prvků (metalicitou). Obvykle se nacházejí v kulových hvězdokupách.
- δ Scuti - Hvězdy typu δ Scuti se v H-R diagramu vyskytují v místě, kde se setkává pás nestability (oblast výskytu mnoha typů pulzujících hvězd) a hlavní posloupnost (oblast, kde hvězdy tráví většinu své existence), což má za následek jejich hojný výskyt. Patří do spektrálních tříd A a F. Periody změn bývají velice krátké, v řádu hodin. Dělí se na dvě základní skupiny:

- * High Amplitude Delta Scuti (HADS) - HADS hvězdy zpravidla pulzují pouze s jednou periodou. Za hranici HADS hvězd bývá uváděna hodnota amplitudy 0.3 mag, případně již 0.1 mag.
- * δ Scuti s nízkou amplitudou - Jejich změny bývají výsledkem interference většího počtu pulzací (až desítky), jak radiálních, tak i neradiálních. Amplituda výsledných změn je maximálně 0.1 mag (dále se jedná o HADS), častější jsou však změny v řádech desítek a jednotek mmag (tisícin magnitudy). Kvůli tomu je jejich výzkum oproti HADS značně komplikovanější a přes značné množství otevřených otázek mu není věnována taková pozornost. Zkoumaná hvězda patří do této kategorie.



Obrázek 1: H-R diagram s vyznačenou polohou různých typů pulzujících proměnných hvězd. Klasické cefeidy (označeno "Ceph"), hvězdy typu RR Lyrae a δ Scuti leží v oblasti takzvaného pásu nestability. Na hlavní posloupnosti leží Slunci podobné hvězdy ("Solar like"). Plnou čarou jsou vyznačeny vývojové cesty hvězd různých hmotností. Převzato z [17].

1.2 Mechanismus pulzací

Absolutní většina hvězd se nachází ve stavu hydrostatické rovnováhy, kdy je gravitace kompenzována gradientem tlaku. Tato rovnováha je stabilní, dojde-li tedy k jejímu vychýlení, zvýší se síla působící proti výchylce a hvězda přejde do pohybu opačného, projde přes rovnovážnou polohu a situace se opakuje. Vlivem tření se energie pulzací mění na neuspořádanou energii tepelnou a pulzace by měly postupem času ustát. Vzhledem k tomu, že se pozorované pulzace ukázaly v naprosté většině případů jako dlouhodobě stabilní, musí existovat mechanismus, který pulzacím dodává energii. Eddington v roce 1926 navrhl *záklopkový mechanismus*. Přestože při adiabatickém stlačení hvězdné látky dochází dle Kramerova zákona:

$$\kappa \propto T^{-3.5}, \quad (1.2)$$

k poklesu opacity κ , s rostoucí teplotou T , měla by ve hvězdě existovat vrstva, která se při stlačování (a tedy ohřevu) naopak zneprůhlední (κ -mechanismus). Vzhledem k tomu, že většina hvězd viditelně nepulzuje, můžeme říci, že vznik takovéto vrstvy vyžaduje značně specifické podmínky. Kappa mechanismus je založen na existenci vrstvy částečně ionizovaného materiálu ve vhodné hloubce. Pokud je vrstva příliš hluboko, jsou pulzace cestou k povrchu utlumeny, příliš

u povrchu je vrstva zase nutně natolik řídká, že nedokáže dodávat dostatečné množství energie. Takováto vrstva se při ohřevu dále ionizuje a zneprůhledňuje, záření je uzavřeno ve hvězdě a jeho tlak roste. Dochází k expanzi, atomy vrstvy re-kombinují, dodají potřebnou energii. Expanze probíhá až do okamžiku převážení dostředivé síly, smrštění a opakování celého cyklu [17].

1.2.1 Fyzikální podstata vztahu perioda-zářivý výkon

Zářivý výkon hvězdy (aproximované koule) určíme s pomocí Stefan-Boltzmanova zákona [17]:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{eff}^4, \quad (1.3)$$

kde R je poloměr hvězdy, T_{eff} je efektivní termodynamická teplota a σ je Stefan-Boltzmanova konstanta s hodnotou $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$.

Dobu základní periody pulzací lze ztotožnit s dobou přenosu informace o změně tlaku skrz celou hvězdu. K tomuto přenosu dochází rychlostí zvuku, která je přibližně rovna střední kvadratické rychlosti částic.

Tu lze odvodit pomocí viriálové věty. Uvažujme celkovou energii hvězdy:

$$2 \langle E_k \rangle + \langle E_p \rangle = 0, \quad (1.4)$$

kam za kinetickou a potenciální energii dosadíme:

$$E_k = \frac{1}{2} M v_s^2, \quad (1.5)$$

$$E_p \sim \alpha G \frac{M^2}{R}, \quad (1.6)$$

kde M je hmotnost hvězdy, v_s je střední kvadratická rychlost částic, G je gravitační konstanta $G = 6,6373 \cdot 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$ a koeficient α souvisí s rozložením hmoty ve hvězdě. Bývá zpravidla blízký jedné (standardně uvažován jako 1,6). Pak můžeme střední kvadratickou rychlost částic vyjádřit jako:

$$v_s^2 = \alpha G \frac{M}{R}. \quad (1.7)$$

Pro fundamentální periodu radiálních pulzací dostáváme [19]:

$$\Pi_{0,rad} \approx \frac{2R}{v_s} = \sqrt{\frac{4R^3}{\alpha GM}} \cong \frac{1}{\sqrt{G \bar{\rho}}} \propto \left(\frac{M}{R^3} \right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (1.8)$$

Díky znalosti [Rov. 1.3](#) můžeme psát:

$$\Pi \propto L^{\frac{3}{4}} \cdot M^{-\frac{1}{2}}, \quad (1.9)$$

a tedy pro hvězdy hlavní posloupnosti platí přibližně:

$$M \propto L^{\frac{7}{2}}. \quad (1.10)$$

Pro hvězdy spektrálních typů A až F kam spadají i hvězdy typu δ Scuti a tedy i zkoumaná hvězda (což bude dokázáno později) platí vztah z [9]:

$$M \propto L^{3,92 \pm 0,05}. \quad (1.11)$$

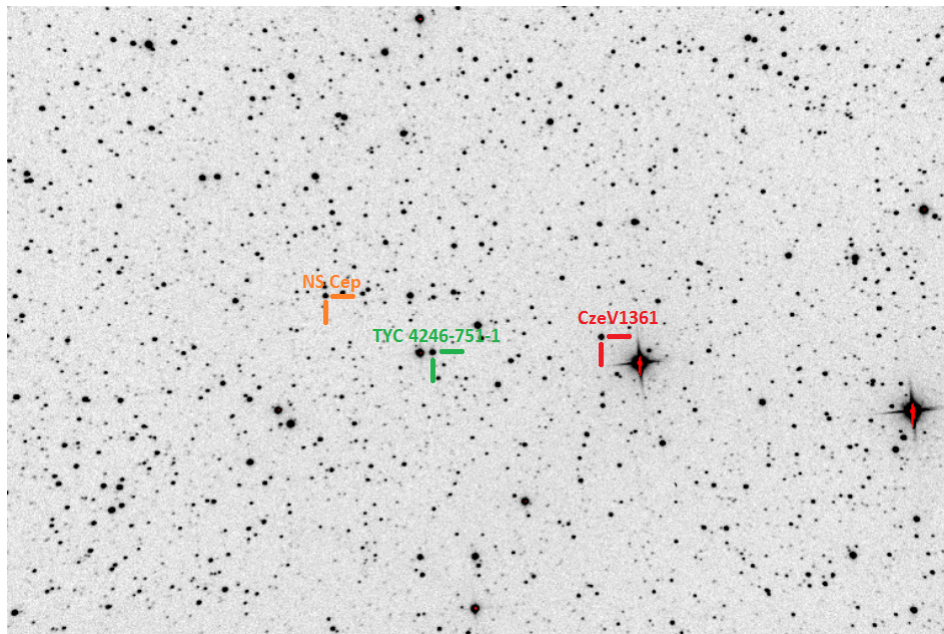
1.3 Zkoumaná hvězda

Na Astronomické expedici v Úpici 2018 se mi při zpracování měření zákrytové dvojhvězdy NS Cep (pořízených mnou a Jakubem Janouškem, který však ve výzkumu nepokračoval) podařilo najít v zorném poli další hvězdu s proměnnou jasností. Jednomu z pořízených snímků byly za použití webu nova.astrometry.net přiřazeny přesné souřadnice. V databázi Simbad jsem pak určil, o kterou hvězdu se jedná. Jedná se o TYC 4246-883-1 a její proměnnost nebyla do té doby známa (nebyla zařazena do katalogů GSVS ani VSX).

Bylo tedy potřeba proměnnost potvrdit dalším měřením, aby se vyloučila možnost falešné detekce. Periodické změny jasnosti však byly pozorovány i další dvě noci. Na základě naměřených dat (amplituda řádově setiny magnitudy, perioda změn lehce přes hodinu) byla určena proměnnost typu δ Scuti. Poté mohla být zaslána k publikaci v CzeV, katalogu nových proměnných hvězd objevených českými pozorovateli, kde získala označení CzeV1361 [21].

Nachází na pomezí souhvězdí Cefeja a Labutě na souřadnicích $\alpha = 20$ h 42 min 58 s a $\delta = +60^\circ 38' 06''$ a je tedy na našem území cirkumpolární (nikdy nezapadá pod obzor). To je pro následující výzkum velmi důležité, protože celoroční pozorovatelnost umožňuje eliminovat sezónní vzorkování a s ním spojené problémy při analýze fotometrických dat (zdánlivá perioda jednoho roku).

Z databáze Simbad také získáme (přibližnou) hvězdnou velikost ve filtrech B a V Johnsonova fotometrického systému $m_b = (11.47 \pm 0.07)$ mag, respektive $m_v = (11.05 \pm 0.08)$ mag. Na základě toho můžeme vybrat vhodné přístroje pro provádění dalšího výzkumu.



Obrázek 2: CzeV1361 a její blízké okolí na snímku z dalekohledu VSEST. Velikost zorného pole je 62.8x41.9 úhlových minut. Zelenou barvou je vyznačena použitá srovnávací hvězda TYC 4246-751-1 a červeně zákrytová dvojhvězda NS Cep, při jejímž pozorování došlo k objevu proměnnosti CzeV1361.

2 Fotometrie

Fotometrie je obor optiky zabývající se měřením světelného toku. V astronomii se využívá ke stanovování jasnosti jednotlivých objektů a napomáhá určování jejich vlastností.

Z praktických důvodů a kvůli snaze o získání co nejvíce informací je většinou prováděna s použitím standardizovaných filtrů s přesně definovanou propustností pro určitou oblast spektra. Nejčastěji je využíván Johnsonův-Morganův širokopásmový systém UBV s jeho rozšířením pro infračervenou oblast RI(JKL) (někdy též uváděn jako standardní, či mezinárodní). Astrofyzikálně vhodnějším je pak Strömgrenův středněpásmový systém uvby. Jeho výhody jsou ale vykoupeny nutností používat jej kvůli výrazně menšímu množství propouštěného světla pouze u větších dalekohledů.

Jako detektor jsou v současnosti většinou používány CCD kamery (z anglického charge coupled device - zařízení s vázanými náboji) na bázi fotoelektrického jevu. S myšlenkou použití CCD, původně ještě jako paměťového nosiče, přišli Willard Boyle a George E. Smith v roce 1969 a za tento objev byli oceněni Nobelovou cenou [17].



Obrázek 3: Kamera G2-1600 od firmy Moravské přístroje s nasazeným komakorektorem. Fotografie vlastní, pořízena při provádění údržby na dalekohledu VSEST.

2.1 Použité přístroje

Pro pořízení fotometrických dat bylo využito několika dalekohledů. To bylo dáno potřebou zodpovědět několik otázek (považovaných za prakticky nezávislé) a také omezeným přístupem k některým dalekohledům.

2.1.1 Úpická hvězdárna

Objevová pozorování byla pořízena na Astronomické expedici 2018 na hvězdárně v Úpici v rámci CCD skupiny.

S Jakubem Janouškem jsme měli k dispozici zrcadlový dalekohled konstrukce Newton o průměru $d = 150$ mm a ohniskové vzdálenosti $f = 750$ mm, bez komakorektoru, na montáži Sky-Watcher HEQ-5 s funkcí automatického navádění na objekt Go-To, opatřený CCD kamerou MII G2-3200 (čip 14,9 x 10 mm, pixely

6,8 x 6,8 μm) bez fotometrických filtrů. Kamera byla řízena programem SIPS, který umožňuje nastavit parametry expozice, chlazení kamery, případně volbu filtrů.

I přes používání poměrně malého dalekohledu jsou pořízená data velice kvalitní. Zásluhu na tom má pozorovací lokalita v podhůří Krkonoš, kde je zatím poměrně únosná úroveň světelného znečištění, a také nízká vlhkost vzduchu v době pozorování. Jednotlivé noci byly používány expozice délky 40, 50 a 60 s, s cílem zvýšit poměr signálu k šumu (signal-to-noise ratio, SNR) a dosáhnout tak lepší přesnosti fotometrie. Tato data mohou být využita pro periodovou analýzu.

2.1.2 Dalekohled Sekce proměnných hvězd a exoplanet ČAS

Vzhledem k očekávané multiperiodicitě a potřebě přesně určit periodu pulzací bylo potřeba získat výrazně větší množství dat. Jako vhodný se pro tento úkol ukázal dalekohled Sekce proměnných hvězd a exoplanet České astronomické společnosti (označovaný jako VSEST) umístěný na hvězdárně ve Valašském Meziříčí. Měření zde probíhala v průběhu podzimu a zimy až do konce pozorovatelnosti, způsobeného lokálním horizontem. Pozorovaná amplituda změn se mezi jednotlivými pozorováními lišila, což podporuje hypotézu o superpozici několika blízkých period pulzace.

Jde o sestavu velmi podobnou té úpické. Dalekohled newtonova typu o průměru $d = 150$ mm a ohniskové vzdálenosti $f = 750$ mm, vybavený komakorektorem, s kamerou MII G2-1600 (čip 13,8 x 9,2 mm, pixely 9 x 9 μm), na montáži Sky-Watcher HEQ-5. Velkou výhodou je možnost vzdáleného ovládání pomocí aplikace TeamViewer.

Bohužel se projevuje vliv pozorovacího stanoviště, světelné znečištění, vyšší koncentrace prachových částic a vody v ovzduší negativně ovlivňují kvalitu pořízených dat.

Pro určení vlastností hvězdy je klíčové znát rozložení energie ve spektru. Toho lze docílit pomocí vícebarevné fotometrie. Tento druh měření pro zkoumanou hvězdu nebylo možno provést s tak malými přístroji, jakými jsou T2 a VSEST.

2.1.3 Mayerův dalekohled, Astronomický ústav v Ondřejově

Největším použitým přístrojem je modifikovaný Cassegrain o průměru $d = 650$ mm a ohniskové vzdálenosti $f = 2350$ mm s kamerou MII G2-3200 (čip 14,9 x 10 mm, pixely 6,8 x 6,8 μm) v primárním ohnisku na Astronomickém Ústavu AV ČR v Ondřejově (dříve označován jako D65).

D65 byl pro účely barevné fotometrie podstatně vhodnější. Vzhledem ke krátké periodě změn a snaze o co nejvyšší kadenci měření, a tedy původně zamýšlenému simultánnímu využívání dalekohledu D50, byla na D65 pořizována měření ve dvou fotometrických filtrech (B a V), jejichž kombinace je pro určování vlastností nejdůležitější.

Světelné znečištění v Ondřejově, ač značné, nepředstavuje pro takto jasný a kompaktní objekt v kombinaci s použitým dalekohledem problém.



Obrázek 4: Dalekohled VSEST na střeše hvězdárny ve Valašském Meziříčí. Fotografie vlastní, pořízena při údržbě dalekohledu.



Obrázek 5: Mayerův dalekohled v Ondřejevě. Jedná se o 4. největší dalekohled na našem území. Fotografie: Martin Mašek.

2.1.4 Dalekohled FRAM-La Palma

Data ve fotometrickém filtru R (později i doplňková nefiltrovaná) byla nakonec pořízena pomocí dalekohledu systému FRAM na Kanárských ostrovech, který primárně slouží k podpurným měřením pro Cherenkov Telescope Array (CTA).

Provozuje ho Fyzikální ústav AV ČR.

FRAM je dalekohled konstrukce Schmidt-Cassegrain o průměru $d = 250$ mm se základním ohniskem $f = 2500$ mm, redukovaným na $f = 1700$ mm, s experimentální kamerou MII G2-1000BI (čip back-illuminated, $13,3 \times 13,3$ mm, pixely $13 \times 13 \mu\text{m}$)

La Palma patří k nejlepším pozorovacím stanovištím na světě. Díky tomu bylo možno získávat použitelná data už při výšce 15° nad horizontem. Pro střední Evropu se zpravidla pracuje s minimální výškou 30° . Lze tedy měřit přes prakticky dvojnásobnou vzdušnou hmotu.

Tabulka 1: Přehled fotometrických dat pořízených v období léto 2018 - jaro 2019

#	Observatoř	Datum (MJD)	Čas pozorování (JD)	Počet datových bodů	Počet naměřených maxim
C1	Úpice	58342	0.4989 – 0.6058	165	1
C2	Úpice	58346	0.3417 – 0.5031	195	3
C3	Úpice	58347	0.3759 – 0.6051	271	5
C4	ValMez	58422	0.2789 – 0.5383	339	5
C5	ValMez	58423	0.2972 – 0.5017	182	2
C6	ValMez	58429	0.2835 – 0.4415	186	2
C7	ValMez	58434	0.2317 – 0.3282	108	2
C8	ValMez	58439	0.2384 – 0.3843	115	2
B1	Ondřejov	58439	0.2422 – 0.2954	76	1
V1	Ondřejov	58439	0.2440 – 0.2950	74	1
C9	ValMez	58451	0.2289 – 0.4127	217	4
C10	ValMez	58452	0.1688 – 0.3496	250	4
B2	Ondřejov	58452	0.2481 – 0.3199	107	2
V2	Ondřejov	58452	0.2481 – 0.3199	107	2
C11	ValMez	58458	0.1665 – 0.2736	137	2
B3	Ondřejov	58458	0.3113 – 0.3878	113	1
V3	Ondřejov	58458	0.3109 – 0.3875	113	1
C12	ValMez	58506	0.1976 – 0.3596	175	3
R1	LaPalma	58512	0.7315 – 0.7854	49	1
R2	LaPalma	58522	0.7346 – 0.7717	31	1
R3	LaPalma	58534	0.6947 – 0.7474	48	1
R4	LaPalma	58537	0.6959 – 0.7711	66	1
R5	LaPalma	58538	0.7281 – 0.7707	39	0
R6	LaPalma	58541	0.6896 – 0.7637	66	1
R7	LaPalma	58542	0.6957 – 0.7709	57	1
R8	LaPalma	58543	0.7089 – 0.7714	54	1
R9	LaPalma	58545	0.6790 – 0.7716	67	1
R10	LaPalma	58546	0.6458 – 0.7228	59	1
R11	LaPalma	58547	0.6820 – 0.7713	77	1
CF1	LaPalma	58553	0.6284 – 0.7605	135	3
CF2	LaPalma	58556	0.6435 – 0.7603	126	2
CF3	LaPalma	58557	0.6286 – 0.7600	148	2

2.2 Zpracování dat

2.2.1 Redukce dat

Pořízené snímky obsahují výrazně více informace, než nás zajímá. Potřebujeme z nich získat pouze data ve formátu čas, rozdíl jasností, chyba (HJD, Variable - Comparison, magerror).

Prvním krokem je odstranění chyb měřící aparatury ze snímků se signálem (light frame). K tomu slouží dva typy kalibračních snímků.

- Dark frame - slouží k odstranění tepelného šumu kamery a vyčítacího šumu. Pořizuje se za stejných podmínek jako light (teplota, doba expozice) a samozřejmě bez přístupu světla. Zpravidla se používá lichý počet snímků, které jsou pak složeny metodou mediánu (proto lichý počet). Takto vzniklý masterdark je možno odečíst od kalibrovaného snímku (light, flat).
- Flat field - slouží k odstranění nedokonalostí optiky - prachová a pylová zrna a nerovnoměrné osvětlení čipu - vinětace. O optimálním způsobu pořizování flatů se vedou debaty. Nejpoužívanější metoda je takzvaný sky-flat, kdy se snímá homogenně nasvícená obloha za soumraku/svítání. Při pořizování je nutno zachovat teplotu snímače, správně by měly být flaty opraveny vlastními darky. Naprosto nezbytné je zachování stejné optické konfigurace (zaostření, orientace kamery). Stejně jako u darků pořizujeme lichý počet snímků a zpracováváme metodou mediánu. Vzniklým masterflatem vydělíme light snímky. Ty bývají dále vynásobeny střední hodnotou masterflatu.

Na takto opravených snímcích můžeme provést další zpracování.

Využíval jsem metodu diferenciální aperturní fotometrie [13]. Při zpracování snímků se sečte hodnota pixelů v určité clonce. Hodnoty zkoumané a srovnávací hvězdy se od sebe odečtou a rozdíl se převede na magnitudy. Graf (diferenciální) jasnosti v závislosti na čase se nazývá světelná křivka. Zpracování pobíhalo v programu Muniwin¹.

Pro diferenciální fotometrii je velice důležitá volba srovnávací hvězdy. Ta by měla být podobně jasná, s ideálně stejným barevným indexem a co možná nejblíže hvězdě zkoumané. To kvůli rozdílné spektrální citlivosti čipu a atmosférické extinkci. V zorném poli kolem CzeV1361 se jako nejvhodnější ukázala TYC 4246-751-1.

Tabulka 2: Přehled základních charakteristik proměnné a srovnávací hvězdy

Identifikace	RA (hh:mm:ss.ss)	DEC (±dd:mm:ss.s)	B (mag)	V (mag)	(B-V)
CzeV1361 (TYC 4246-883-1)	20:42:58.33	+60:38:06.3	11.47	11.05	0.42
TYC 4246-751-1	20:44:29.88	+60:38:36.7	11.20	10.80	0.40

¹Motl, D., 2009, C-MuniPack <http://c-munipack.sourceforge.net/>



Obrázek 6: Světelná křivka hvězdy CzeV1361 z 11. 8. 2018.

2.2.2 Převod GJD na HJD

Pro zápis času pozorování se v astronomii využívá takzvané juliánské datování². To poskytuje několik zásadních výhod, především se jedná o spojitou škálu. Při měření se jako časová značka používá soustava spojená se středem Země (Geocentrické juliánské datum - GJD) a musí se tedy opravovat o efekty spojené s pohybem Země kolem Slunce (Heliocentrické juliánské datum - HJD). Tato korekce může dosahovat až $\kappa_H = 8 \text{ min } 20 \text{ s}$, pokud by hvězda ležela v rovině oběžné dráhy Země kolem Slunce, tedy při pohledu ze Země na ekliptice. Pro obecné rovníkové souřadnice hvězdy α, δ platí korekce [22]:

$$\kappa_H = -\frac{r}{c} \cdot [\sin(\delta) \cdot \sin(\delta_\odot) + \cos(\delta) \cdot \cos(\delta_\odot) \cdot \cos(\alpha - \alpha_\odot)], \quad (2.1)$$

kde α_\odot a δ_\odot jsou rovníkové souřadnice Slunce v okamžiku pozorování, r je okamžitá vzdálenost Země od Slunce a c značí rychlost světla ve vakuu.

Vzhledem k tomu, že barycentrum sluneční soustavy neleží ve středu Slunce, dalo by se pokračovat opravou na barycentrum (BJD). Tato další oprava může nabývat hodnoty maximálně osm sekund a je tedy vzhledem k prováděné analýze zanedbatelná.

²Herschel, 1849

2.3 Periodová analýza

Jedním ze základních postupů vědeckého zkoumání je snaha nalézat v probíhajících dějích určitou pravidelnost. V astronomii (alespoň tedy prováděné z povrchu Země) je oproti jiným vědním disciplínám tato snaha komplikována omezeními, jako například střídání dne a noci, vliv počasí, atd. To má za následek nerovnoměrné rozložení pozorování v čase a způsobuje značné problémy při jejich zpracování [17]. Jako např.

- Zdánlivé periody (Aliasy) - vznikají vlivem vzorkovací frekvence měření. Lze je nalézt pomocí Tannerova vztahu jako [17]:

$$\frac{1}{P_k} = \left| \frac{1}{P} + \frac{k}{P_v} \right|; k \in Z, \quad (2.2)$$

kde P_k je hodnota zdánlivé periody, P je reálná perioda a P_v je perioda prováděných měření. Nejvýznamněji se uplatňují periody s malou hodnotou parametru k . Pro pozemská pozorování se setkáváme se vzorkovacími periodami jednoho dne $P_v = 0,99727$ d, roku $P_v = 365,2442$ d a u slabých hvězd je pozorovatelnost omezena Měsícem $P_v = 29,5$ d. Charakteristickým znakem aliasů je, že se v periodogramech zobrazují jako velice blízká dvojice frekvencí.

- Falešné periody - vznikají určitou periodicitou v systematických chybách měření (např. špatná korekce atmosferické extinkce). Jednoduchým testem je provedení periodové analýzy pro srovnávací neproměnnou hvězdu.

2.3.1 Fourierova transformace, Schusterův peridogram

Fourierova transformace, definována pro spojitý signál jako [23]:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot e^{-i2\pi ft} dt, \quad (2.3)$$

provádí převod signálu z funkce času $s(t)$ na funkci frekvence $S(f)$. Protože měření jsou v čase t a počtu N omezena, využíváme její diskrétní variantu (DtFT):

$$D(f) = \sum_{k=0}^{N-1} d_k \cdot e^{\frac{-i2\pi ft_k}{N}}. \quad (2.4)$$

V současné době jde o nejrozšířenější metodu pro hledání periodicity v datech a s jejími aplikacemi se setkáváme v každodenním životě např. u digitálního zpracování zvuku. Velkou zásluhu na tom má nalezení vysoce efektivního algoritmu pro její výpočet (tzv. Fast Fourier Transform - FFT) v šedesátých letech minulého století, tedy v době prudkého rozvoje výpočetní techniky.

Velice často je však používána nevhodně a dokonce nad rámec své platnosti. Předpoklady správnosti, určené jejím odvozením z teorie pravděpodobnosti, jsou [8]:

- velký počet datových bodů
- data musí být rozložena rovnoměrně v čase - v opačném případě není Fourierova transformace dobře definována
- střední hodnota signálu je rovna nule - obvykle se řeší odečtem střední hodnoty signálu, což ale může vést k chybám
- v datech se nenachází nízké frekvence
- **data obsahují pouze jednu frekvenci** - Fourierova transformace s daty vždy pracuje, jako by byla přítomna pouze jedna frekvence
- frekvence musí být stacionární
- přítomný šum musí být Gaussovský
- vysoký poměr signál-šum

Při zpracování dat touto metodou pomocí programu Period04 získáme závislost amplitudy změn na periodě - periodogram. Nalezené sinusoidy poté fituje metodou nejmenších čtverců. Vzhledem k nemožnosti dodržet některé z podmínek a k charakteru dat musíme brát takto získaný výsledek s velkou opatrností. Hodnota dominantní periody pulzací byla určena na:

$$\Pi_{P04} = 0,04710(13) \text{ d.}$$

Po odečtení nejvýraznějšího signálu se nepodařilo nalézt další periody, které by svou kombinací uspokojivě vysvětlovaly pozorovanou změnu amplitudy.

S Fourierovou transformací velmi úzce souvisí Schusterův periodogram, který představuje druhou mocninu její velikosti [8]:

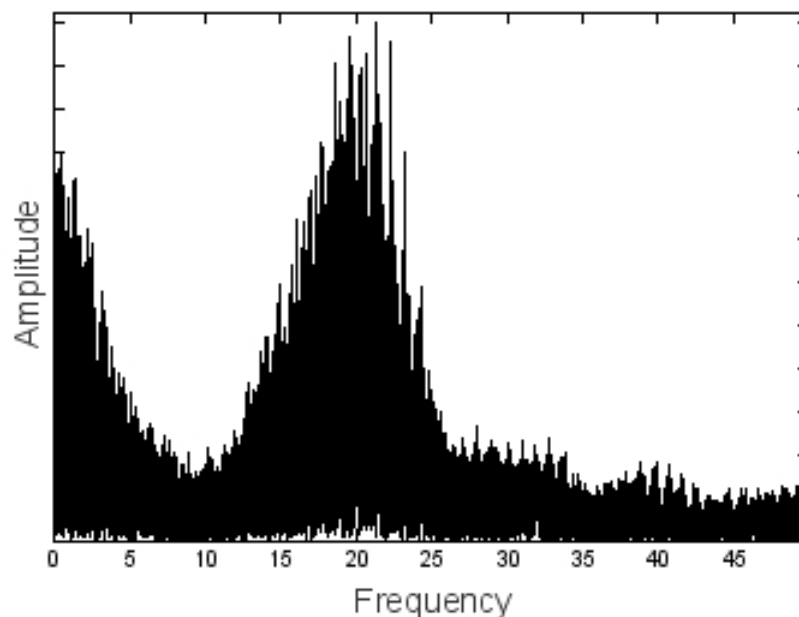
$$P_S(f) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=1}^N g_n \cdot e^{-2i\pi f t_n} \right|^2. \quad (2.5)$$

2.3.2 Bayesovský pravděpodobnostní přístup

Řešením výše zmíněných problémů je přímá aplikace teorie pravděpodobnosti v podobě Bayesovské inference [8]. Ta umožňuje na základě neúplných dat (vždy je možno provést další měření) určovat pravděpodobnost pravdivosti naší hypotézy. Základním nástrojem je Bayesova věta pro podmíněnou pravděpodobnost:

$$P(B|A) = \frac{P(A|B) \cdot P(B)}{P(A)}, \quad (2.6)$$

kde $P(B|A)$ značí pravděpodobnost pravdivosti jevu B, pokud víme, že jev A nastal. V našem případě budeme testovat hypotézu periody pulzací H, pokud máme



Obrázek 7: Výsledek periodové analýzy programem Period04.

naměřená data D a I vyjadřuje náš předpoklad o hypotéze, který ovšem lze zvolit jako zcela neinformativní:

$$P(H|D, I) = \frac{P(H|I) \cdot P(D|H, I)}{P(D|I)}. \quad (2.7)$$

Bretthorst v [8] odvodil základ obecného řešení pro libovolný model. Také na několika příkladech dokázal, že takto získané výsledky mají i o řád lepší přesnost, než při použití Schusterova periodogramu, což potvrzuje i [10].

V současnosti vyvíjený program, který by ji pro analýzu získaných dat využíval při testování na simulovaných datech přinášel velmi dobré výsledky a do budoucna chci ve vývoji rozhodně pokračovat.

2.3.3 Lombův-Scargleův periodogram

Zobecněním Schusterova periodogramu pro nerovnoměrně rozložená data lze získat Lombův-Scargleův periodogram, který se nachází na rozhraní fourierovských postupů, metody nejmenších čtverců, současně ho lze odvodit i bayesovsky [23, 8]. Pro porízená data byla nalezena perioda:

$$\Pi_{L-S} = 0,04710(04) \text{ d,}$$

která je ve velmi dobré shodě s údajem získaným z Period04.

2.3.4 Periodogram programu PerSea

Pro kontrolu jsem využil ještě program PerSea, založený na práci [18]. Po zadání limitních period program sestaví periodogram a fázovou křivku, určí periodu změn

a jejich amplitudu a také čas prvního naměřeného maxima, vůči kterému pak budeme všechna následující vztahovat. PerSea má zabudovaný mechanismus, který na základě periody a tvaru světelné křivky určuje typ proměnnosti - potvrzuje proměnnost typu δ Scuti. Získaná hodnota periody je:

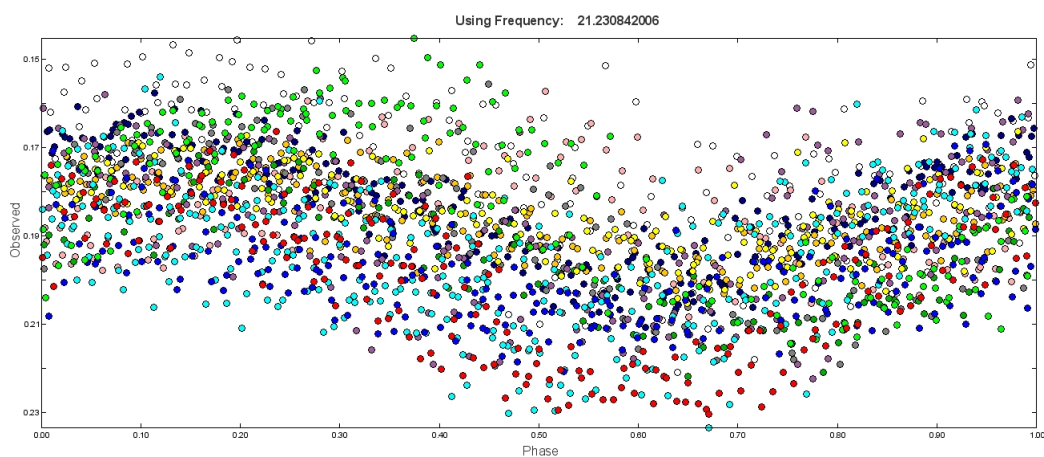
$$\Pi_{Per.Sea} = 0,04710(0) \text{ d.}$$

Také byl určen okamžik základního minima na čas:

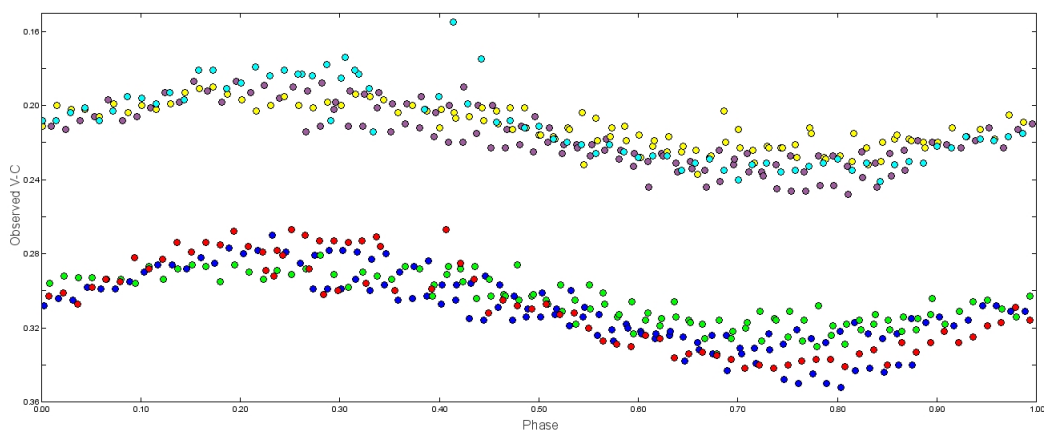
$$T_{0,max} = 58342,637400 \text{ MJD.}$$

2.4 Fázový diagram

Důležitou pomůckou při určování vlastností proměnných hvězd je fázový diagram, zobrazující fázovou křivku. Podobně jako u světelné křivky se jedná o závislost naměřené jasnosti, ale v tomto případě tvoří horizontální osu místo času fáze pulzace, ve které bylo měření poríženo. Získáme ji tedy jednoduše z rozdílu času měření od prvního naměřeného maxima světelné křivky, který vydělíme periodou změn, zajímá nás desetinná část takto vzniklého čísla [17].



Obrázek 8: Fázová křivka vytvořená v programu Period04. Použitá data jsou z dalekohledu VEST. Barvy odlišují různé pozorovací noci.



Obrázek 9: Fázová křivka pro data z Mayerova dalekohledu (D65).

Fázový diagram umožňuje sledovat případné dlouhodobé změny proměnnosti a také poskytuje díky statistice z více pozorování spolehlivější hodnoty jasnosti.

2.5 Určení pozorované střední hvězdné velikosti

Pro výpočty v rámci určování charakteristik hvězdy budeme potřebovat znát její střední hvězdnou velikost. Z fotometrických měření získáváme instrumentální diferenciální hvězdnou velikost. Tuto hodnotu je nutno dále převést na standardní fotometrický systém, protože je ovlivněna vlastnostmi použité pozorovací sestavy. Pro kalibraci se využívají některé otevřené hvězdokupy či Landoltova pole s velmi pečlivě proměřenými hvězdami.

Hodnotu reálné střední diferenciální hvězdné velikosti je možno určit pomocí funkce $f(\phi)$ (získané z Period04) proložené celou fází, integrujeme a dělíme. Vzhledem k sinusoidálnímu tvaru světelné křivky by bylo také možno využít aproximace polovinou rozdílu maxima a minima:

$$\Delta m = \frac{1}{\phi_1 - \phi_2} \int_{\phi_1}^{\phi_2} f d\phi = \int_0^1 f d\phi \approx \frac{m_{max} - m_{min}}{2}. \quad (2.8)$$

Reálnou pozorovanou střední hvězdnou velikost získáme jednoduše přičtením jasnosti srovnávací hvězdy. V našem případě dojdeme k hodnotě:

$$V = (11,01 \pm 0,01) \text{ mag.}$$

Tato hodnota odpovídá jasnosti, s jakou danou hvězdu vidíme na obloze. Samotná však nemá z astrofyzikálního hlediska příliš využití, neboť je poznamenána mezihvězdnou absorpcí, o kterou ji musíme před dosazováním do dalších vztahů opravit.

3 Spektroskopie

Přes veškerou snahu a vynalézavost je množství informací získatelné pomocí fotometrie značně omezené. Oproti tomu spektroskopie poskytuje o pozorovaném objektu podstatně kompletnější informace a v současnosti pro nás představuje hlavní zdroj informací o vesmíru. Její důležitost lze doložit velice snadno. Spektroskopie stála u samotného zrodu astrofyziky, když se podařilo ve spektru Slunce nalézt nový prvek - helium, dnes díky ní můžeme na nepředstavitelnou vzdálenost zjišťovat přesné složení objektů, z dopplerovského posunu jsme schopni určit rychlost objektu s přesností na pár metrů za sekundu, konec konců právě z dopplerovských posunů spekter odvodil Edwin Hubble zákon o rozpínání vesmíru [17].

Základním principem je rozklad přicházejícího světla podle jeho vlnové délky a zjišťování jeho rozložení ve spektru. Pro idealizovaný případ takzvaného absolutně černého tělesa platí, že toto rozložení závisí pouze na teplotě zdroje a to podle Planckova vyzařovacího zákona:

$$dM_e = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} d\lambda, \quad (3.1)$$

kde dM_e je intenzita vyzařování na vlnových délkách od λ do $\lambda + d\lambda$, T je termodynamická teplota absolutně černého tělesa, h je Planckova konstanta, $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, c je rychlost světla ve vakuu $c = 299792458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a k je Boltzmannova konstanta, $k = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$.

V praxi je však výsledné emitované spektrum závislé také na chemickém složení objektu, tlaku, gravitačním zrychlení na povrchu a magnetickém poli. Chemické složení má za následek vznik spektrálních čar v oblastech spektra, kde je energie fotonů shodná s energií přechodů elektronů v atomech daného prvku. Pokud je materiál, přes který světlo prochází, chladnější než jeho zdroj tohoto světla budou se ve spektru vyskytovat čáry absorpční, v opačném případě bude daná spektrální čára v emisi.

Na základě vyhodnocení přes půl milionu hvězdných spekter byla vytvořena současná spektrální klasifikace hvězd (takzvaná Harvardská klasifikace), kde pro každý spektrální typ platí určité charakteristické rysy [17].

3.1 Astronomical Ring for Access to Spectroscopy

Astronomical Ring for Access to Spectroscopy (ARAS)³ je sdružení poloprofesionálních pozorovatelů (nejsou placeni, činí tak pouze ze zájmu, anglický výraz "amateur astronomer" by v doslovném překladu mohl působit značně zavádějícím dojmem) zaměřující se na rozvoj spektroskopie na úrovni dobrovolných pozorovatelů a jejich zapojení do výzkumů prováděných profesionálními astronomy.

³<http://www.astrosurf.com/aras>

Tabulka 3: Přehled pořízených spektroskopických dat

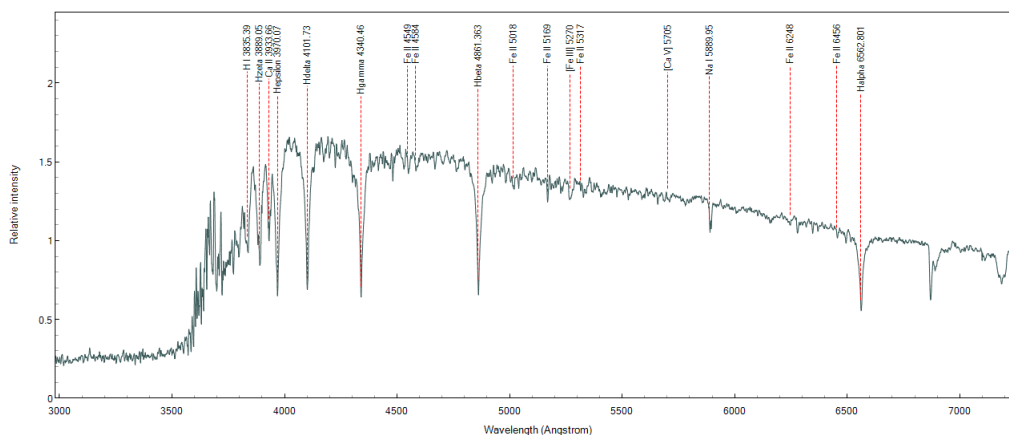
Pozorovatel	Observatoř	Čas (MJD)	Expoziční doba
Forrest Sims	Gilbert, Arizona, USA	58471,6023	7 x 600 s
		58472,6040	8 x 600 s
		58475,6087	9 x 600 s
Hubert Boussier	Saint-Saturnin-lès-Avignon, Francie	58479,3015	10 x 600 s
Pierre Dubreuil	Aspremont, Francie	58483,2960	12 x 600 s

3.2 Určení spektrálního typu a míry mezihvězdné extinkce

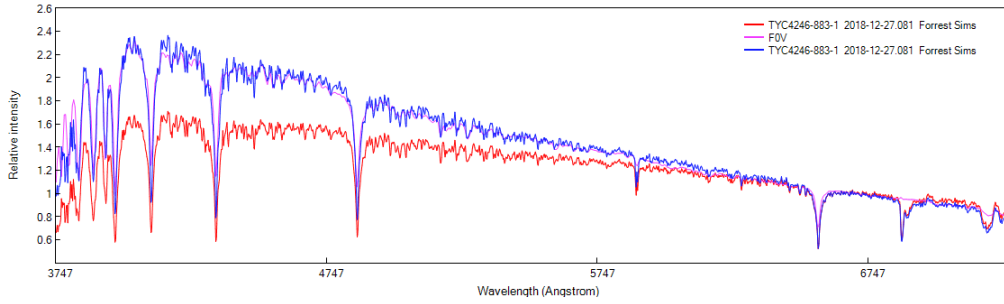
V pozorovaném spektru hledáme charakteristické spektrální čáry, jejichž intenzita je spojena s teplotou povrchu hvězdy a je charakteristická pro jednotlivé spektrální typy.

Pro určení spektrálního typu hvězdy porovnáme získané spektrum s modelovým, případně spektrem jiné hvězdy, jejíž spektrální typ byl již spolehlivě určen. Pro CzeV1361 je nejlepší shoda s typem F0v, při mezihvězdné extinkci:

$$E_{(B-V)} = 0,2.$$



Obrázek 10: Medián pořízených spekter. Na horizontální ose je vlnová délka v Ångströmech (10^{-10} m). Jsou zde patrné silné absorpční čáry vodíku a ionizovaných kovů (sodík, vápník, železo), což je typické pro spektrální typ F.



Obrázek 11: Porovnání získaného spektra, kalibrovaného o mezihvězdnou extinkci $E_{(B-V)} = 0,2$ s modelovým spektrem pro spektrální typ F0v. Ve spektru jsou také viditelné absorpční čáry způsobené zemskou atmosférou.

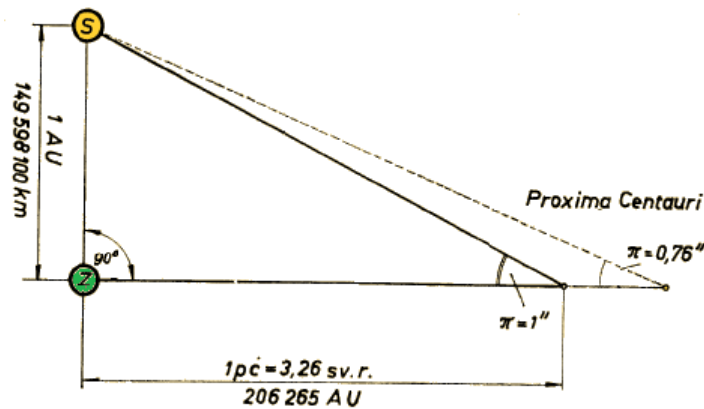
4 Astrometrie

Astrometrie se zabývá přesným měřením polohy a pohybů těles na obloze a v prostoru. Ve hvězdné astronomii byla dlouhou dobu poměrně okrajovým oborem a sloužila především pro katalogizaci hvězd. S postupným zlepšováním techniky však nabývá na významu, protože jejím využitím jsme schopni metodou roční paralaxy určovat vzdálenosti v blízkém hvězdném okolí.

V teoretické rovině jde o triviální geometrickou úlohu. Díky oběhu Země kolem Slunce se nám zkoumaná blízká hvězda v průběhu roku promítá na různá místa hvězdného pozadí, tedy hvězd, které jsou příliš daleko a efekt paralaxy se u nich neprojevuje. Z úhlu, o který se hvězda posouvá pak můžeme přímo dopočítat její vzdálenost d jako:

$$d = \frac{1}{\pi}, \quad (4.1)$$

kde π představuje paralaxu v úhlových vteřinách (publikované paralaxy bývají většinou uvedeny v tisícinách úhlové vteřiny - miliarcsecond - mas). Tato aproximace je možná, protože velikost paralaxy velice malá. Proxima Centauri, po Slunci nejbližší hvězda, má paralaxu jen $0,772''$. Z paralaxy o velikosti jedna úhlová vteřina je odvozena velice užitečná jednotka vzdálenosti jeden parsek ($1 \text{ pc} \approx 206\,265 \text{ AU} \approx 3,262 \text{ sv. r.} \approx 3,086 \cdot 10^{16} \text{ m}$) [17].



Obrázek 12: Názorná ukázka principu roční paralaxy. Převzato z [20] a upraveno.

4.1 Observatoř Gaia

Přesné měření paralaxy je výrazně jednodušší z kosmického prostoru, proto se pro její měření využívají družice na oběžné dráze. V současné době probíhá evropská mise Gaia s velmi ambiciózním cílem změřit polohu více než miliardy hvězd naší Galaxie a pro značnou část z nich určit i další parametry, především tedy paralaxu. Z druhé publikace dat [15, 14] dostáváme pro CzeV1361:

$$\pi = (1,3323 \pm 0,0261) \text{ mas.}$$



Obrázek 13: Umělecká představa družice Gaia. Zdroj: ESA/ATG medialab.

5 Výpočet fyzikálních charakteristik hvězdy

5.1 Oprava hvězdné velikosti o mezihvězdnou absorpci

Na základě spektroskopického určení extinkce můžeme spočítat mezihvězdnou absorpci jako [17]:

$$E_{B-V} = A_B - A_V, \quad (5.1)$$

kde E_{B-V} je barevný excés a A představuje absorpci v daném filtru. Z [12] známe vztah:

$$A_V \approx 3,1E_{B-V}. \quad (5.2)$$

Hvězdnou velikost opravíme o absorpci podle vztahu:

$$V_0 = m_v - A_V. \quad (5.3)$$

Číselně dostaneme:

$$V_0 = (10,39 \pm 0,16) \text{ mag.}$$

5.2 Určení absolutní hvězdné velikosti metodou P-L

Pro hvězdy δ Scuti pulzující s fundamentální periodou radiálních pulzací platí vztah mezi periodou pulzací a jejich zářivým výkonem, respektive jejich absolutní hvězdnou velikostí. V [16] je uvedena tato závislost jako:

$$M_v = -2,92(\pm 0,04) \cdot \log(\Pi) - 1,29(\pm 0,04), \quad \sigma = 0,234. \quad (5.4)$$

Podobných vztahů bylo publikováno více, například také v [16, 11]:

$$M_V = -2.902(\pm 0,030) \cdot \log(\Pi) - 1,29(\pm 0,029), \quad \sigma = 0,26. \quad (5.5)$$

Dosazením do [Rov. 5.4](#) získáme:

$$M_{v,P-L} = (2,585 \pm 0,103) \text{ mag.}$$

Při takovéto absolutní hvězdné velikosti by CzeV1361 ležela na okraji pásu nestability. To samo o sobě nevádí, ale rozhodně se jedná o dobrý důvod ke zvýšené opatrnosti.

5.3 Určení vzdálenosti hvězdy pomocí P-L a paralaxy

Z absolutní hvězdné velikosti můžeme vzdálenost hvězdy zjistit dosazením do Pogsonovy rovnice upravené do podoby pro modul vzdálenosti [17]:

$$5 \log(d) = V_0 - M_v + 5. \quad (5.6)$$

Číselně získáme hodnotu:

$$d_{P-L} = (358,1 \pm 38) \text{ pc,}$$

kterou musíme ověřit měřením paralaxy. Dosazením do [Rov. 4.1](#) získáme:

$$d_\pi = (751 \pm 32) \text{ pc.}$$

Jak vidíme, zjištěné hodnoty se diametrálně liší. Vzhledem k tomu, že astrometrická měření by měla poskytovat přesnější výsledek a hlavně faktu, že vztah P-L vychází z předpokladu, že se jedná o radiální pulzaci v základním módu, můžeme prakticky s jistotou říct, že CzeV1361 v základním radiálním módu nepulzuje a popis její proměnnosti bude složitější. V [24] je problematika vztahu dominantní periody pulzací a zářivého výkonu hvězdy řešena detailněji na základě dat z Gaia DR2 [14, 15]. Dále tedy musíme při určování vlastností postupovat opačně, tedy od paralaxy.

5.4 Určení absolutní hvězdné velikosti parallaxou, teoretická hodnota základní periody

Dosazením parallaxou určené vzdálenosti zpět do Pogsonovy rovnice získáme absolutní hvězdnou velikost:

$$M_v = (1,623 \pm 0,056) \text{ mag},$$

která už je pro hvězdy typu δ Scuti rozhodně typičtější. Jejím dosazením do vztahu [Rov. 5.4](#) získáme očekávanou periodu pulzací:

$$\Pi_{0,exp} \approx 0,11 \text{ d.}$$

Na první pohled je patrné, že s touto hodnotu periody jsme žádnou proměnnost nedetekovali. Myšlenku základní radiální pulzace tedy můžeme opustit. Totéž platí pro pulzace na první a druhé harmonické, protože jejich hodnota se u δ Scuti pohybuje kolem $\Pi_{1,h} = (0,75 - 0,79)\Pi_0$ a $\Pi_{2,h} \approx 0,81\Pi_1$. Pro přesný popis pulzací CzeV1361 by bylo potřeba několikanásobně větší množství dat a numerické modelování.

5.5 Fotometrické určení teploty

Pro kontrolu spektrálního typu můžeme spočítat povrchovou teplotu hvězdy z fotometrických měření. V [17] je uveden vztah:

$$T = 4600 \cdot \left(\frac{1}{0,92(B-V) + 1,7} + \frac{1}{0,92(B-V) + 0,62} \right), \quad (5.7)$$

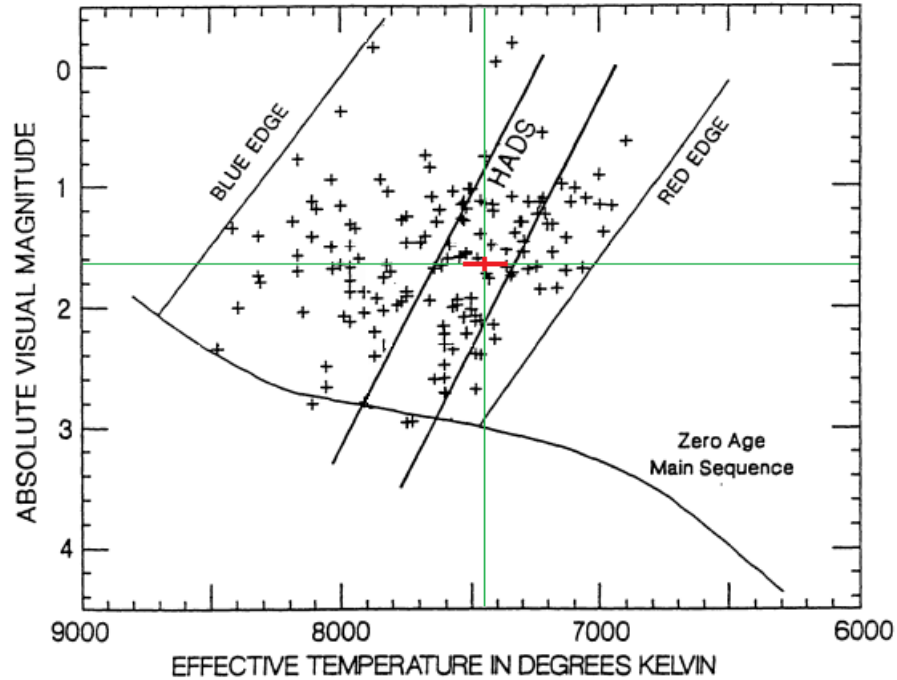
kde T je povrchová termodynamická teplota a B-V je hodnota barevného indexu. Vzhledem k absenci odchylek empirických koeficientů v uvedeném vztahu, jej budeme považovat za přesný a odchylku určíme z odchylky (B-V) indexu. Určíme ji z Gaussova zákona o přenosu chyb:

$$\sigma_T = \sqrt{\left(\frac{dT}{d(B-V)} \sigma_{B_V} \right)^2}. \quad (5.8)$$

Dosazením získáme:

$$T \doteq (7462 \pm 180) \text{ K.}$$

5.6 Umístění hvězdy na Hertzsprungův-Russelův diagram



Obrázek 14: Hvězdy typu δ Scuti na H-R diagramu. Křížky značí jednotlivé proměnné hvězdy. Vyznačen je pás nestability a hlavní posloupnost. Uprostřed pásu nestability se nachází oblast hvězd typu High Amplitude Delta Scuti, avšak ne všechny hvězdy v této oblasti do této skupiny patří. Převzato z [22] a upraveno.

5.7 Určení poloměru a zářivého výkonu hvězdy

Poloměr a zářivý výkon získáme z Pogsonovy rovnice a Stefan-Boltzmanova zákona. V jednotkách vztažených ke Slunci získáme:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \frac{4\pi R^2 \sigma T^4}{4\pi R_{\odot}^2 \sigma T_{\odot}^4} = \left(\frac{R}{R_{\odot}}\right)^2 \left(\frac{T}{T_{\odot}}\right)^4 = 10^{0,4\Delta M}, \quad (5.9)$$

odkud lze vyjádřit zářivý výkon:

$$L = L_{\odot} 10^{0,4\Delta M} = (19,05 \pm 0,3) L_{\odot} \quad (5.10)$$

a poloměr:

$$R = R_{\odot} \left(\frac{T_{\odot}^2}{T^2}\right) \sqrt{10^{0,4\Delta M}}. \quad (5.11)$$

Ze zákona o šíření chyb (převzato z [22]):

$$\sigma_R = \sqrt{\left[\sigma_T \cdot \frac{\partial}{\partial T} \left(R_{\odot} \left(\frac{T_{\odot}^2}{T^2}\right) \sqrt{10^{0,4(M_{\odot} - M_v)}}\right)\right]^2 + \left[\sigma_{M_v} \cdot \frac{\partial}{\partial M_v} \left(R_{\odot} \frac{T_{\odot}^2}{T^2} \sqrt{10^{0,4(M_{\odot} - M_v)}}\right)\right]^2}, \quad (5.12)$$

tedy vychází:

$$R = (2,62 \pm 0,15) R_{\odot}.$$

5.8 Určení hmotnosti a střední hustoty

Již dříve byl pro hvězdy spektrálních typů A a F uváděn vztah:

$$M = L^{\frac{1}{x}}, \quad (5.13)$$

kde $x = 3,92 \pm 0,05$. Použijeme-li jako jednotku opět Slunce a chybu určíme jako:

$$\sigma_M = \sqrt{\sigma_L^2 \left[\frac{\partial}{\partial L} L^{\frac{1}{x}} \right]^2 + \left[\sigma_x^2 \frac{\partial}{\partial x} L^{\frac{1}{x}} \right]^2}. \quad (5.14)$$

Dostaneme číselnou hodnotu:

$$M = (1,31 \pm 0,12)M_{\odot},$$

která se nachází těsně pod minimální hmotností hvězd typu δ Scuti s běžnou metalicitou. Z toho lze usuzovat, že CzeV1361 má metalicitu nižší.

Pro navazující astroseismologický výzkum bude užitečná znalost střední hustoty hvězdy, kterou spočteme jednoduše jako:

$$\bar{\rho} = \frac{3M}{4\pi R^3}. \quad (5.15)$$

Získáme hodnotu:

$$\bar{\rho} = (0,017 \pm 0,008)\bar{\rho}_{\odot}.$$

6 Závěr

V této práci jsem získal fotometrická data hvězdy CzeV1361, ležící na souřadnicích $\alpha = 20 \text{ h } 42 \text{ min } 58 \text{ s } \delta = +60^\circ 38' 06''$ ve fotometrických filtrech B, V a R, pro určení vizuální hvězdné velikosti. Dále jsem provedl měření bez použití filtrů pro určení periody. Na základě spektroskopických měření od členů skupiny ARAS, jsem určil spektrální typ hvězdy a míru mezihvězdné absorpce. Díky tomu, jsem mohl provést kalibraci fotometrických měření a na základě periody odvodit očekávanou absolutní hvězdnou velikost. Při následném výpočtu vzdálenosti použitím Pogsonovy rovnice došlo k nesouladu s hodnotou získanou z astrometrických měření družice Gaia. Z toho usuzuji, že CzeV1361 nepulzuje v základním módu, a proto jsou vztahy založené na tomto předpokladu v tomto případě nepoužitelné. Z astrometricky určené vzdálenosti jsem dopočítal skutečnou absolutní hvězdnou velikost. S použitím Pogsonovy rovnice a Stefan-Blotzmanova zákona jsem odvodil zářivý výkon a poloměr hvězdy. Nakonec jsem ze závislosti hmotnosti a zářivého výkonu určil hmotnost a střední hustotu hvězdy. Vzhledem k zjištěné hmotnosti by se mělo jednat o hvězdu s nižší metalicitou. Získané údaje jsou shrnuty v tabulce níže.

Tabulka 4: Přehled zjištěných vlastností hvězdy.

Parametr	Hodnota	Odchylka	Jednotka
Perioda	0,047100	-	den
Vizuální hvězdná velikost	11,01	0,01	mag
Vizuální hvězdná velikost (opravená o absorpci)	10,39	0,16	mag
Vzdálenost	751	32	pc
Teoretická fundamentální perioda	0,11	-	den
Povrchová teplota	7462	180	K
Zářivý výkon	19,05	0,3	L_\odot
Hmotnost	1,31	0,12	M_\odot
Poloměr	2,62	0,15	R_\odot

Diskuze

Určené vlastnosti můžeme porovnat s výsledky jiných prací zabývajícími se hvězdami δ Scuti [1]. Získané hodnoty jsou ve velmi dobré shodě. Breger [5] uvádí výskyt neradiálních módů pulzací v blízkosti některého radiálního. Prověření takového chování ale vyžaduje další dlouhodobé pozorování [3, 4].

Prostor pro další výzkum

Je velmi důležité pokračovat v dlouhodobém sledování CzeV1361, kvůli případným dlouhodobým změnám a přesnějšímu určení pulzačních period [6].

Velice přínosné by bylo získání spekter s vysokým rozlišením a na krátkých časových škálách. Díky tomu by bylo možno odvodit rychlost pohybu povrchu hvězdy při pulzaci a rychlost rotace hvězdy. Také by to v kombinaci s barevnou fotometrií umožnilo přesný popis probíhajících módů pulzací a jejich porovnání s modely, které však dalece přesahují rozsah této práce [2, 7].

Výzkum proměnných hvězd je jedno z nejdůležitějších odvětví astronomie. Pomáhá nám lépe porozumět stavbě, vnitřním procesům a mechanismům vývoje nejen jich samotných, ale hvězd obecně.

Reference

- [1] BREGER, M. Delta Scuti and related stars. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* [online]. 1979, **91** [cit. 2019-04-10]. DOI: 10.1086/130433. ISSN 0004-6280. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org/article/10.1086/130433>.
- [2] BREGER, Michael a A. A. PAMYATNYKH. Period changes of Delta Scuti stars and stellar evolution. *Delta Scuti Star Newsletter*, [online]. 1998, July 1998, **Issue 12**,(p. 7-7.), 12 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1998DSSN...12....7B/abstract>.
- [3] BREGER, M. a K. M. BISCHOF. Close frequency pairs in Delta Scuti stars. *Astronomy and Astrophysics* [online]. 2002, **385**(2), 537-545 [cit. 2019-04-10]. DOI: 10.1051/0004-6361:20020124. ISSN 0004-6361. Dostupné z: <http://www.aanda.org/10.1051/0004-6361:20020124>.
- [4] BREGER, M., P. LENZ, V. ANTOCI, et al. Detection of 75+ pulsation frequencies in the Delta Scuti star FG Virginis. *Astronomy and Astrophysics* [online]. 2005, **435**(3), 955-965 [cit. 2019-04-10]. DOI: 10.1051/0004-6361:20042480. ISSN 0004-6361. Dostupné z: <http://www.aanda.org/10.1051/0004-6361:20042480>.
- [5] BREGER, M., P. LENZ a A. A. PAMYATNYKH. Towards mode selection in Delta Scuti stars: regularities in observed and theoretical frequency spectra. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* [online]. 2009, **396**(1), 291-298 [cit. 2019-04-10]. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2008.14330.x. ISSN 00358711. Dostupné z: <https://academic.oup.com/mnras/article-lookup/doi/10.1111/j.1365-2966.2008.14330.x>.
- [6] BREGER, M., M. H. MONTGOMERY, P. LENZ a A. A. PAMYATNYKH. Nonradial and radial period changes of the Delta Scuti star 4 CVn. *Astronomy and Astrophysics* [online]. 2017, **599** [cit. 2019-04-10]. DOI: 10.1051/0004-6361/201629797. ISSN 0004-6361. Dostupné z: <http://www.aanda.org/10.1051/0004-6361/201629797>.
- [7] BRESSAN, Alessandro, Paola MARIGO, Léo GIRARDI, Bernardo SALASNICH, Claudia DAL CERO, Stefano RUBELE a Ambra NANNI. Parsec: stellar tracks and isochrones with the PAdova and TRieste Stellar Evolution Code. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* [online]. 2012, **427**(1), 127-145 [cit. 2019-04-10]. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2012.21948.x. ISSN 00358711. Dostupné z: <https://academic.oup.com/mnras/article-lookup/doi/10.1111/j.1365-2966.2012.21948.x>.
- [8] BRETTHORST, G. Larry. *Bayesian spectrum analysis and parameter estimation*. New York: Springer-Verlag, c1988. Lecture notes in statistics (Springer-Verlag), v. 48. ISBN 3540968717.
- [9] GARCÍA HERNÁNDEZ, A., J. C. SUÁREZ, A. MOYA, et al. Precise surface gravities of DELta Scuti stars from asteroseismology. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters* [online]. 2017, **471**(1), L140-L144

- [cit. 2019-04-10]. DOI: 10.1093/mnrasl/slx117. ISSN 1745-3925. Dostupné z: <https://academic.oup.com/mnrasl/article/471/1/L140/4004766>.
- [10] GREGORY, P. C. A Bayesian revolution in spectral analysis. In: *AIP Conference Proceedings* [online]. AIP, 2001, 2001, s. 557-568 [cit. 2019-04-10]. DOI: 10.1063/1.1381917. ISSN 0094243X. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.1381917>.
- [11] FERNIE, J. D. A new approach to the Cepheid period-luminosity law - Delta Scuti stars as small Cepheids. *The Astronomical Journal* [online]. **103** [cit. 2019-04-10]. DOI: 10.1086/116179. ISSN 00046256. Dostupné z: http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/bib_query?1992AJ....103.1647F.
- [12] KARTTUNEN, Hannu. *Fundamental astronomy*. 5th ed. New York: Springer, c2007. ISBN 9783540341437.
- [13] KVĚTOŇ, Jiří. *Přesnost fotometrie v závislosti na expoziční době* [online]. Brno, 2011 [cit. 2019-04-10]. Available from: <https://theses.cz/id/jt6vxy/>. Bachelor's thesis. Masaryk University, Faculty of Science. Thesis supervisor RNDr. Jan Janík, Ph.D..
- [14] LINDEGREN, L., J. HERNÁNDEZ, A. BOMBRUN, et al. Gaia Data Release 2. *Astronomy and Astrophysics* [online]. 2018, **616** [cit. 2019-04-10]. DOI: 10.1051/0004-6361/201832727. ISSN 0004-6361. Dostupné z: <https://www.aanda.org/10.1051/0004-6361/201832727>.
- [15] LURI, X., A. G. A. BROWN, L. M. SARRO, et al. Gaia Data Release 2. *Astronomy and Astrophysics* [online]. 2018, **616** [cit. 2019-04-10]. DOI: 10.1051/0004-6361/201832964. ISSN 0004-6361. Dostupné z: <https://www.aanda.org/10.1051/0004-6361/201832964>.
- [16] MCNAMARA, D. Harold, Gisella CLEMENTINI a Marcella MARCONI. A Delta Scuti Distance to the Large Magellanic Cloud. *The Astronomical Journal* [online]. 2007, **133**(6), 2752-2763 [cit. 2019-04-10]. DOI: 10.1086/513717. ISSN 0004-6256. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/1538-3881/133/i=6/a=2752>.
- [17] MIKULÁŠEK, Zdeněk a Miloslav ZEJDA. *Úvod do studia proměnných hvězd*. Brno: Masarykova univerzita, 2013. ISBN 978-80-210-6241-2.
- [18] SCHWARZENBERG-CZERNY, A. Fast and Statistically Optimal Period Search in Uneven Sampled Observations. *The Astrophysical Journal* [online]. **460**(2) [cit. 2019-04-10]. DOI: 10.1086/309985. ISSN 0004637X. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/1538-4357/460/i=2/a=L107>.
- [19] SHAPLEY, Harlow. On the Nature and Cause of Cepheid Variation. *The Astrophysical Journal* [online]. 1914, **40** [cit. 2019-04-09]. DOI: 10.1086/142137. ISSN 0004-637X. Dostupné z: <http://adsabs.harvard.edu/doi/10.1086/142137>.
- [20] ŠIROKÝ, Jaromír a Miroslava ŠIROKÁ. *Základy astronomie v příkladech*. 2. vyd. Praha: SPN, 1973. Vysokoškolské příručky.

- [21] SKARKA, M., M. MAŠEK, L. BRÁT, P. CAGAŠ, J. JURYŠEK, K. HOŇKOVÁ, M. ZEJDA.,... CzeV - The Czech Variable Star Catalogue. *Open European Journal on Variable stars* [online]. (Vol. 185), 42 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017OEVJ..185...1S/abstract>.
- [22] SOUZA DE JOODE, Marco. *Cze V681 Cyg: určení vlastností pulzující hvězdy typu delta Sct*. Praha, 2018. SOČ. Gymnázium Nad Štolou 1510/1 170 00, Praha 7. Vedoucí práce Doc. RNDr. Marek Wolf, CSc..
- [23] VANDERPLAS, Jacob T. Understanding the Lomb—Scargle Periodogram. *The Astrophysical Journal Supplement Series* [online]. 2018, **236**(1) [cit. 2019-04-10]. DOI: 10.3847/1538-4365/aab766. ISSN 1538-4365. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0067-0049/236/i=1/a=16?key=crossref.2d79c6c284b1df1e8149df501e36ea6b>.
- [24] ZIAALI, Elham, Timothy R BEDDING, Simon J. MURPHY, Timothy VAN REETH a Daniel R HEY. The period—luminosity relation for Delta Scuti stars using Gaia DR2 parallaxes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* [online]. 2019 [cit. 2019-05-02]. DOI: 10.1093/mnras/stz1110. ISSN 0035-8711. Dostupné z: <https://academic.oup.com/mnras/advance-article/doi/10.1093/mnras/stz1110/5475657>.