MASARYKOVA UNIVERZITA Přírodovědecká fakulta

ÚSTAV TEORETICKÉ FYZIKY A ASTROFYZIKY

Bakalářská práce

Brno 2022

Mária Lauková

MASARYKOVA UNIVERZITA Přírodovědecká fakulta Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Hledání rotačně proměnných bílých trpaslíků v datech z družice TESS

Bakalářská práce

Mária Lauková

Vedoucí práce: prof. Mgr. Jiří Krtička, Ph.D. Brno 2022

Bibliografický záznam

Autor:	Mária Lauková Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita Ústav teoretické fyziky a astrofyziky
Název práce:	Hledání rotačně proměnných bílých trpaslíků v datech z družice TESS
Studijní program:	Fyzika
Studijní obor:	Astrofyzika
Vedoucí práce:	prof. Mgr. Jiří Krtička, Ph.D.
Akademický rok:	2021/22
Počet stran:	viii + 62
Klíčová slova:	bílý trpaslík; rotační proměnnost; světelná křivka

Bibliografický záznam

Autor:	Mária Lauková Prírodovedecká fakulta, Masarykova univerzita Ústav teoretickej fyziky a astrofyziky	
Názov práce:	Hľadanie rotačne premenných bielych trpaslíkov v dátach z dru- žice TESS	
Študijný program:	Fyzika	
Študijný odbor:	Astrofyzika	
Vedúci práce:	prof. Mgr. Jiří Krtička, Ph.D.	
Akademický rok:	2021/22	
Počet strán:	viii+62	
Kľúčové slová:	biely trpaslík; rotačná premennosť; svetelná krivka	

Bibliographic Entry

Author:	Mária Lauková Faculty of Science, Masaryk University Department of Theoretical Physics and Astrophysics
Title of Thesis:	Search for rotationally variable white dwarfs
Degree Programme:	Physics
Field of Study:	Astrophysics
Supervisor:	prof. Mgr. Jiří Krtička, Ph.D.
Academic Year:	2021/22
Number of Pages:	viii + 62
Keywords:	white dwarf; rotational variability; light curve

Abstrakt

Družice TESS nám poskytuje velké množství dat o vzdálených vesmírných objektech. V této bakalářské práci se věnujeme studiu těchto dat pro identifikaci bílých trpaslíků vykazujících rotační proměnnost. Ze získaných světelných křivek se podařilo objevit 41 bílých trpaslíků, kteří vykazují možnou rotační proměnnost. Zároveň se nám při zpracování dat podařilo nalézt i světelné křivky bílých trpaslíků vykazujících jiné typy proměnností. V bakalářské práci jsme dále diskutovali o možných příčinách proměnnosti bílých trpaslíků.

Abstrakt

Družica TESS nám poskytuje veľké množstvo dát o vzdialených vesmírnych objektoch. V tejto bakalárskej práci sa venujeme štúdiu týchto dát na identifikáciu bielych trpaslíkov vykazujúcich rotačnú premennosť. Zo získaných svetelných kriviek sa podarilo objaviť 41 bielych trpaslíkov, ktorí vykazujú možnú rotačnú premennosť. Zároveň sa nám pri spracovaní dát podarilo nájsť aj svetelné krivky bielych trpaslíkov vykazujúcich iné typy premenností. V bakalárskej práci sme ďalej diskutovali o možných príčinách premennosti bielych trpaslíkov.

Abstract

The TESS satellite provides us with a large amount of data on distant space objects. In this bachelor thesis, we study these data to identify white dwarfs showing rotational variability. From the obtained light curves, we found 41 white dwarfs, which are showing signs of a possible rotational variability. At the same time, during data processing, we also managed to find light curves of white dwarfs showing other types of variability. In the bachelor thesis, we have further discussed the possible causes of the variability occuring in white dwarfs.

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Akademický rok: 2021/2022

Ústav:	Ústav teoretické fyziky a astrofyziky
Studentka:	Mária Lauková
Program:	Fyzika
Specializace:	Astrofyzika

Ředitel ústavu PřF MU Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu MU určuje bakalářskou práci s názvem:

Název práce:	Hledání rotačně proměnných bílých trpaslíků v datech z družice TESS	
Název práce anglicky:	Search for rotationally variable white dwarfs	
Jazyk závěrečné práce:	slovenština	

Oficiální zadání:

Družice TESS získává světelné křivky velkého množství hvězd a mezi jinými i bílých trpaslíků. Významná část pozorovaných bílých trpaslíků vykazuje rotačně modulovanou světelnou proměnnost. Příčiny této proměnnosti nejsou doposud známé. Cílem bakalářské práce je vyhledání rotačně proměnných bílých trpaslíků z dat družice TESS a studium jejich rotační proměnnosti. Z archivu družice budou vybrány světelné křivky bílých trpaslíků vykazující možnou rotační proměnnost. Pro vybrané hvězdy bude určena perioda světelných změn. V práci budou diskutovány příčiny proměnnosti bílých trpaslíků.

Literatura:

- Dupuis, J., Chayer, P., Vennes, S., Christian, D. J., Kruk, J. W. 2000, ApJ, 537, 977
- Krtička, J., Mikulášek, Z., Zverko, J., Žižňovský, J. 2007, A&A, 470, 1089

Vedoucí práce:	prof. Mgr. Jiří Krtička, Ph.D.
Datum zadání práce:	22. 11. 2021
V Brně dne:	16. 5. 2022

Zadání bylo schváleno prostřednictvím IS MU.

Mária Lauková, 12. 1. 2022 prof. Mgr. Jiří Krtička, Ph.D., 14. 1. 2022 RNDr. Luboš Poláček, 14. 1. 2022

Poděkování

Touto cestou by som chcela poďakovať vedúcemu mojej bakalárskej práce prof. Mgr. Jiřímu Krtičkovi, Ph.D. za poskytnutie cennných rád pri písaní mojej bakalárskej práce. Zároveň by som chcela poďakovať Bc. Richardovi Liptajovi za spracovanie obdobnej bakalárkskej práce, a tým pádom umožnenie overenia našich výsledkov.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením vedoucího práce s využitím informačních zdrojů, které jsou v práci citovány.

Mária Lauková

Brno 23.května 2022

Obsah

Úvod	••••	1
Kapitola 1. Bieli trpaslíci	••••	2
1.1 Prvé pozorovania bielych trpaslíkov		2
1.2 Hmotnostný limit		2
1.3 Atmosféra		4
1.4 Spektrum bielych trpaslíkov		5
1.5 Rotácia		5
1.6 Magnetickí bieli trpaslíci		7
1.7 Pulzujúci bieli trpaslíci		7
1.8 Rotačná premennosť		8
1.8.1 Povrchové miesta abundancie a akrécia prvkov		8
Kapitola 2. Transiting Exoplanet Space Survey	••••	10
2.1 História misie		10
2.2 Pozorovania TESS		11
2.3 Priepustnosť filtrov	•••	12
Kapitola 3. Analýza dát	••••	14
3.1 Diskusia		15
3.2 Vybrané svetelné krivky bielych trpaslíkov		18
Záver	••••	23
Elektronické zdroje		24
Zoznam použitej literatúry		26
Príloha A	••••	28
Príloha B	••••	46

Úvod

Biely trpaslík je záverečné štádium vývoja prevažnej väčšiny hviezd. Hviezdy s pôvodonou hmotnosťou $\leq 8 \ M_{\odot}$ dávajú za vznik bielym trpaslíkom (Kepler a kol., 2017 [8]). Po tom, čo hviezda spotrebuje jadrové palivo odhodí svoj vonkajší materiál a zostane len veľmi horúce elektrónovo degenerované jadro. V priebehu miliárd rokov následne jadro hviezdy chladne (Camendiz, 2007 [2]).

Štúdium bielych trpaslíkov sprostredkuje kľúčové informácie k modelovaniu vývoja hviezd a datovaniu hviezdnych populácií. V tejto bakalárskej práci sa budeme zaoberať hľadaním premenných bielych trpaslíkov. Identifikovať ich budeme za použitia dostupných dát z družice TESS a dáta budeme ďalej spracovať fotometricky.

Kapitola 1

Bieli trpaslíci

Po tom, čo hviezda slnečného typu spotrebuje jadrové palivo, ktoré prevažne hradilo zdroj jej energie, hviezda odhodí značnú časť vonkajšieho obalu hviezdy a zostane horúce jadro ($T_{eff} > 100\ 000\ K$). Z hviezdy sa teda v záverečnom štádiu života stáva biely trpaslík (Camenzind, 2007 [2]).

Keďže vo hviezde už ďalej neprebiehajú jadrové reakcie počas nasledujúcich niekoľkých miliárd rokov jadro postupne chladne. Pri ochladení povrchu hviezdy na teplotu približnú efektívnej teplote Slnka začne vnútro bieleho trpaslíka kryštalizovať. Vnútri sa začne vytvárať kryštalická mriežka kyslíka a uhlíka, zvyškov po nukleárnych reakciách. V tejto fáze teplota stále klesá a znižuje sa aj jej žiarivý výkon. Tento proces pokračuje až dovtedy, kým hviezda neprestane žiariť úplne a nestane sa z nej čierny trpaslík. Platí teda, že najstarší biely trpaslíci budú zároveň najchladnejší a aj najslabší (Camenzind, 2007 [2]).

Bieli trpaslíci sa môžu vyskytovať aj ako zložky tesnej dvojhviezdy. V takomto systéme môže hmotnosť bieleho trpaslíka narásť vďaka prenosu hviezdneho materiálu a môže dôjsť k zapáleniu supernovy typu Ia (Maeder, 2009 [14]). Umiestenie bielych trpaslíkov v rámci H-R diagramu je znázornené na obrázku 1.1.

1.1 Prvé pozorovania bielych trpaslíkov

Medzi prvých pozorovaných bielych trpaslíkov patrí hviezda Sirius B, ako zložka dvojhviezdy nachádzajúca a v súhvezdí Canis Major. Ide zároveň o najbližšie pozorovaného bieleho trpaslíka so vzdialenosťou 8,6 ly. V roku 1844 astronóm Friedrich Bessel študoval vlastný pohyb Siria A. Na základe pozorovaní predpovedal existenciu druhej zložky hviezdy, ktorá bola v roku 1862 objavená Alvanom Clarkom ako biely trpaslík (Mikulášek, Krtička 2005 [15]).

1.2 Hmotnostný limit

Hmotnosti typických bielych trpaslíkov sú porovnateľné s hmotnosťou Slnka, avšak ich rozmery sú k pomeru hmotnosti výrazne menšie. Rádovo sú ich rozmery v polomeroch planét zemského typu. Vďaka tomuto nepomeru je hustota bielych trpaslíkov rádovo milión



Obr. 1.1: H-R diagram znázorňujúci polohu bielych trpaslíkov [prevzaté z Gaia (E1).]

krát väčšia ako stredná hustota Slnka, čo z nich robí jedných z najhustejších objektov vo vesmíre (Mikulášek, Krtička 2005 [15]).

Hviezdne jadro, tvoriace väčšinu celkovej hmoty je tvorené elektrónovo degenerovaným plynom. Hviezda nemôže byť ďalej stlačovaná vplyvom gravitácie, kvôli kvantovo mechanickým vlastnostiam degenerovaného plynu. Zaujímavou vlastnosťou degenerovanej látky je, že čím hmotnejší biely trpaslík je, tým musí mať menšie rozmery. Vysvetlením je, že čím viac hmoty sa v ňom nachádza, tým viac musia byť jednotlivé elektróny "natlačené" k sebe, aby si hviezda udržala dostatočný tlak na to, aby sa nezrútila a dokázala udržať svoju hmotu. Prvé modely bielych trpaslíkov obsahujúcich elektrónovo degenerovaný plyn pochádzajú z roku 1926, kedy Fowler určil závislosť polomeru degenerovanej hviezdy na jej hmotnosti. S využitím vzťahu pre hydrostatickú rovnováhu potom môže byť odvodená závislosť polomeru na hmotnosti hviezdy 1.1.

$$\frac{dP}{dr} = -G\rho \frac{M_r}{r^2}$$

$$\frac{P}{R} \sim G\rho \frac{M}{R^2}$$

$$\frac{\rho^{\frac{5}{3}}}{R} \sim \rho \frac{M}{R^2}$$

$$\left(\frac{M}{R^3}\right)^{\frac{2}{3}} \sim \frac{M}{R}$$

$$R \sim M^{-\frac{1}{3}}$$
(1.1)

V roku 1931 americký fyzik indického pôvodu Chandrasekhar odvodil limit pre maximálnu možnú hmotnosť bielych trpaslíkov. Zistil, že pri väčších hmotnostiach bielych trpaslíkov sa mení povaha hviezdy z klasicky elektrónovo degenerovaného plynu na ultrarelativistický plyn. Spočiatku platí závislosť $R \sim M^{-\frac{1}{3}}$, ktorá ale už pre ultrarelativistický plyn neplatí. Závislosť polomeru na hmotnosti rýchlo klesá až na Chandrasekharovu hmotnosť, kedy je polomer nulový. Maximálna hmotnosť bieleho trpaslíka je teda 1,4 M_☉. Jedným z najhmotnejších známych bielych trpaslíkov je zložka sústavy Nova Cygni s hmotnosťou 1,25 M_☉ (Mikulášek, Krtička 2005 [15]).

1.3 Atmosféra

Atmosféra bielych trpaslíkov je tvorená nedegenerovaným plynom a je hrubá niekoľko desiatok kilometrov. Práve z tejto časti k nám prichádza žiarenie hviezdy, ktoré je v tejto fázy hradené termálnou energiou, nie jadrovými reakciami. Ťažšie atómy tvoriace atmosféru klesajú do nižších častí atmosféry a ľahšie zostávajú blízko pri povrchu. Atmosféra prevažnej väčšiny bielych trpaslíkov je teda tvorená vodíkom alebo héliom, nachádzame ale aj bielych trpaslíkov s ďalšími prvkami v atmosfére (Camenzind, 2007 [2]).

1.4 Spektrum bielych trpaslíkov

Spektrá bielych trpaslíkov sú odlišné od spektier iných hviezd rovnakého spektrálneho typu. Výrazné je rozšírenie spektrálnych čiar vplyvom tlaku a ľahko postrehnuteľný gravitačný červený posuv. Červený posun je dôsledkom straty energie fotónu pri snahe prekonať veľmi silné gravitačné pole hviezdy (Mikulášek, Krtička 2005 [15]).

Prvé pokusy o spektrálnu klasifikáciu hviezd tohto typu pochádzajú z roku 1941 z publikácie Kuipera (Kuiper, 1941 [12]). V priebehu nasledujúcich rokov vznikali ďalšie klasifikácie bielych trpaslíkov, v dnešnej dobe je najpoužívanejšia klasifikácia predstavená týmom E. M. Siona z roku 1983, v ktorej rozďeľuje spektrá do kategórií začínajúcich písmenom D (značiacim primárne charakteristiky spektra) a ďalšími písmenami, ktoré označujú sekundárne charakteristiky (Sion a kol., 1983 [18]).

Podľa chemického zloženia atmosfér bielych trpaslíkov ich rozdeľujeme na niekoľko skupín. Prvou početnou skupinou hviezd tohto typu sú bieli trpaslíci typu DA, čo značí, že v spektre sa nachádzajú silné vodíkové čiary. Typy DB a DO predstavujú hviezdy s dominantnými He I a He II spektrálnymi čiarami. V prípade, že sa v spektre hviezdy nenachádzajú známky silnej spektrálnej čiary ide o bielych trpaslíkov so spojitým spektrom typu DC. V neposlednej rade rozlišujeme typy DZ a DQ. Bieli trpaslíci typu DZ majú silné spektrálne čiary kovov, v prípade typu DQ pozorujeme dominantné spektrálne čiary uhlíka. Približne 80% všetkých bielych trpaslíkov zaraďujeme do skupiny DA (Camenzind, 2007 [2]). Na obrázku 1.2 sú znázornené spektrá niekoľkých bielych trpaslíkov.

1.5 Rotácia

Bieli trpaslíci majú vlastnú rotáciu, moment hybnosti samostatnej hviezdy má korene už v dobe skorého vývoja hviezdy. Rotácia bola do určitej miery ovplyvnená aj počas mnohých štádií vývoja hviezdy, od jej zrodenia cez štádium hviezdy hlavnej postupnosti až po konečné štádium bieleho trpaslíka (Kawaler, 2003 [6]).

Pozorovanie rotácie bielych trpaslíkov bolo predmetom záujmu astronómov už v 70. rokoch minulého storočia. Výsledky pozorovania rotácie pomocou metód spektroskopie hovoria, že bieli trpaslíci rotujú s periódami v časovom rozmedzí niekoľkých hodín až po niekoľko dní (Kawaler, 2003 [6]).

Rotácia u bielych trpaslíkov môže poskytovať hviezde prídavnú oporu zvýšením maximálnej hmoty. Túto teóriu testoval v roku 1985 Ian Roxburgh, ktorého výsledky prezrádzajú, že maximálna hmotnosť bieleho trpaslíka by mohla vzrásť až o 5%, ak by hviezda rotovala rýchlosťou väčšou ako 2000 km/s. Ďalšie pozorovania ale ukázali, že bieli trpaslíci rotujú s rýchlosťou oveľa menšou ako uvažoval Roxhburgh (Kawaler, 2003 [6]).

Výsledky spektroskopie dovoľujú merať rýchlosť rotácie bielych trpaslíkov pomocou rozšírenia vodíkových spektrálnych čiar vplyvom rotácie hviezdy. Avšak spektroskopia nám poskytuje len približný odhad rýchlosti rotácie. Presnejšou metódou určenia rotácie je asteroseismológia. Táto metóda však dobre popisuje len rotáciu u pulzujúcich bielych trpaslíkov (Kawaler, 2003 [6]). Z výsledkov asteroseismológie sú periódy rotácie v rádoch hodín až dní. Najrýchlejšie samostatným rotujúcim bielym trpaslíkom je DAVSDSS J161218.08+083028.1 s periódami rotácie jeho zložiek 115,0 a 117,0 s (Kepler et al., 2017 [8]).



Obr. 1.2: Graf znázorňujúci spektrá 4 bielych trpaslíkov v NGC 6349, pre porovnanie je červenou čiarou znázornené modelové spektrum štandardného bieleho trpaslíka typu DA [prevzaté z ESO (E2)].

1.6 Magnetickí bieli trpaslíci

Značný zlomok doposiaľ známych bielych trpaslíkov má svoje magnetické pole, v rozmedzí od pár kG až po niekoľko stoviek MG. Prítomnosť magnetického pola v prípade bielych trpaslíkov ovplyvňuje vonkajší vzhľad hviezdy, jej teplotu a aj jej evolučné vyhliadky. Bieli trpaslíci s magnetickým polom majú v priemere väčšiu hmotnosť ako nemagnetický bieli trpaslíci (Kawka, 2018 [7]).

Pôvod magnetického pola bielych trpaslíkov bol dlho pripisovaný fosílnym poliam a skutočnosti, že magnetický biely trpaslíci vznikli z pôvodne magnetických hviezd Ap a Bp. Pri zohľadnení zachovania magnetického toku, intenzity magnetických polí hviezd Ap/Bp zodpovedajú intenzitám bielych trpaslíkov vyšším ako 10 MG. Podľa teórie fosílnych polí by sme mali nachádzať rovnaký podiel magnetických bielych trpaslíkov v binárnych systémoch s hviezdami hlavnej postupnosti. Tento predpoklad sa však na základe dát z Slogan Digitial Sky Survey javí nesprávny. Nebolo možné nájsť žiadnych neinteragujúcich bielych trpaslíkov v páre s hviezdami hlavnej postupnosti. Magnetickí bieli trpaslíci teda nemajú priamych predkov v magnetických hviezdach, a preto je pôvod magnetizmu bielych trpaslíkov predmetom ďalšieho výskumu astrofyziky (Kawka, 2018 [7]).

Ďalšou z teórií vzniku magnetického pola v prípade bielych trpaslíkov je teória binárneho pôvodu. Magnetické pole by vzniklo prostredníctvom dynama počas fázy spoločnej obálky (CE). Potter & Tout (2009) [16] a a Wickramasinghe et al. (2013) [20] dokázali, že magnetické pole môže vznikať dynamom pri diferenciálnej rotácií vo fáze spoločnej obálky. Neskôr bola predložená teória, že počas fáze spoločnej obálky bude menej hmotná hviezda narušená vplyvom jej spoločníka, proto-bieleho trpaslíka, čo má za následok vytvorenie akrečného disku. Toto by vytvorilo dynamo v disku, ktoré by sa vplyvom akrécie prenieslo do degenerovaného hviezdneho jadra (Kawka, 2018 [7]).

Magnetické pole by mohlo vznikať aj pri splynutí dvoch bielych trpaslíkov. Je známych len niekoľko párov magnetických spolu s nemagnetickými bielymi trpaslíkmi. Pre niektoré z nich platí, že magnetický biely trpaslík z tejto dvojice má vyššiu teplotu a je zároveň mladšou hviezdou ako jeho nemagnetický spoločník. Magnetizmus sa môže vytvoriť aj pri nedokonalých splynutiach takýchto dvoch hviezd (Kawka, 2018 [7]).

Výskumom veľkého množstva magnetických bielych trpaslíkov sa potvrdilo, že prítomnosť magnetického poľa v bielych trpaslíkoch nemá jednotný pôvod pri všetkých hviezdach tohoto typu (Kawka, 2018 [7]).

1.7 Pulzujúci bieli trpaslíci

Bieli trpaslíci, ktorých jasnosť sa mení vplyvom g-módu pulzácií označujeme ako pulzujúcich bielych trpaslíkov (Koester a Chanmugam, 1990 [9]). Rozlišujeme 3 základné typy pulzujúcich bielych trpaslíkov. Prvou triedou sú DAV (ZZ Ceti) bieli trpaslíci s vodíkovými absorpčnými čiarami v spektre. Ďalej sú to DBV (V777 Her) trpaslíci s héliovými čiarami a v neposlednom rade DOV (GW Vir) s uhlíko-kyslíko-héliovým zložením atmosféry (Tucker a kol. [19]).

Svetelné krivky pulzujúcich bielych trpaslíkov sa líšia. Pre niektoré platí sínusový priebeh s malými amplitúdami, iné vykazujú anharmonický priebeh s veľkými amplitúdami. Periódy pulzácií bielych trpaslíkov sú zvyčajne v rozmedzí 100 - 1400 s (Córsico, 2019 [3]).

1.8 Rotačná premennosť

Meranie rotačných periód nemagnetických bielych trpaslíkov je zložité, kvôli výraznému rozšíreniu spektrálnych čiar vplyvom silného gravitačného pola. Pri magnetických bielych trpaslíkoch pozorujeme aj svetelnú premennosť, čo umožňuje ľahšie určovanie ich periódy rotácie. Skúmanie rotácie poskytuje možnosť výskumu zmeny momentu hybnosti ako aj straty momentu hybnosti počas vývinu hviezdy mimo hlavnej postupnosti (Brinkworth a kol., 2013 [1]).

Rotačná premennosť bielych trpaslíkov môže byť spôsobená magnetickým polom, škvrnami v dôsledku difúzie a akréciou látky.

Bieli trpaslíci, ktorí sú potomkami centrálnych hviezd planetárnych hmlovín vykazujú prítomnosť magnetického pola s povrchovou silou pola od niekoľkých kG až po 1000 MG. Takéto magnetické polia výrazne ovplyvňujú hviezdne vetry, a to hlavne v prípade post-AGB evolučných štádií. Strata hmotnosti hviezdy vplyvom magnetizovaného hviezdneho vetra vedie k poklesu momentu hybnosti, a teda v tomto prípade dochádza k rotačnému brzdeniu. Čas, za ktorý poklesne rýchlosť rotácie závisí na parameteroch hviezdneho vetra, na sile magnetického pola hviezdy, ako aj na momente zotrvačnosti. Pre predstavu uvažujme o hviezde s počiatočnou hmotnosťou 1 M_☉, ktorá sa stane bielym trpaslíkom o hmotnosti 0,52 M_☉ s konštantou momentu zotrvačnosti $k = 3,3.10^{-5}$, pri uvážení typických hodnôt pre parametre hviezdneho vetra by čas poklesu rotácie mal byť v rádoch 10³ rokov pri pôsobení magnetického pola 100 G. Tento čas je menší než životnosť bieleho trpaslíka, a teda vplyv brzdenia rotácie magnetických bielych trpaslíkov je výrazný. Vplyv magnetického pola by mohol vysvetľovať nízke rotačné rýchlosti bielych trpaslíkov. (Krtička a kol., 2020 [11]).

1.8.1 Povrchové miesta abundancie a akrécia prvkov

Rozmiestnenie prvkov na povrchu chemicky pekuliárnych hviezd nie je rovnomerné. Chemicky pekuliárne hviezdy hlavnej postupnosti vykazujú svetelnú premennosť v dôsledku povrchových miest abundancie. V týchto miestach dochádza k redistribúcií žiarivého toku vplyvom čiarových viazane-viazaných a viazane-voľných prechodov modulovaných rotáciou hviezdy.

Vyššia abundancia ťažkých prvkov má za následok výraznejšie blokovanie žiarenia hviezdy v UV oblasti. Vďaka tomuto efektu je potom možné pozorovať prerozdelenie žiarivého toku. Časť z neho sa prejaví vo viditeľnej časti spektra a prispeje tak k zjasneniu hviezdy (Krtička a kol., 2021 [10]).

Bieli trpaslíci môžu mať taktiež povrchové miesta abundancie, a to buď vplyvom elementárnej difúzie alebo vďaka akrécií materiálu hviezdy. Vznik takýchto miest na hviezde potom vedie k jej svetelnej premennosti.

Spektroskopické pozorovania zo Spitzer Space Telescope objavili vyšší žiarivý tok v infračervenej oblasti spektier bielych trpaslíkov. Tento prebytok žiarivého toku naznačuje prítomnosť cirkumstelárneho disku rotujúceho v okolí bieleho trpaslíka. Veľa hviezd s vyšším žiarivým tokom v infračervenej oblasti taktiež vykazuje prítomnosť ťažších prvkov v ich atmosférach. Tieto výsledky pozorovania bielych trpaslíkov stanovujú, že materiál z disku prechádza do hviezdy, a tak "znečisťuje"zloženie jej atmosféry ťažšími prvkami. Akrečné disky v okolí bielych trpaslíkov sú pozostatkami planetárnych sústav (Deal a kol., 2013 [4]).

Kapitola 2

Transiting Exoplanet Space Survey

Transiting Exoplanet Space Survey (TESS) je vesmírny satelit pre výskum tranzitujúcich exoplanét zostrojený pre účely NASA. Satelit bol na obežnú dráhu Zeme vypustený 18. apríla 2018 pomocou rakety SpaceX Falcon 9. Prvá snímka z družice TESS bola zhotovená 7. augusta 2018 a zverejnená neskôr v septembri roku 2018 (NASA, 2022 [E10]). Družica TESS je znázornená na obrázku 2.1.

Primárnym zámerom misie TESS je preskúmať najjasnejšie hviezdy v okolí Zeme na prítomnosť tranzitujúcich exoplanét. Pre tranzitujúcu exoplanétu je možné určiť jej hmotnosť, polomer, ako aj vlastnosti jej atmosféry. Vesmírny teleskop dokáže pozorovať v oblasti 400-krát väčšej ako oblasť pokrytá misiou Kepler (NASA, 2022 [E10]).

Katalóg zvolených hviezd na pozorovanie obsahuje $\leq 200\,000$ hviezd hlavnej postupsnoti spektrálneho typu FGKM, ktoré sú dostatočne malé a jasné na prieskum výskytu planét menších ako Neptún. Okrem pozorovania 200 000 zvolených hviezd, TESS zabezpečuje aj celobrazové snímky s expozičným časom 2 minúty. Tieto zhotovené snímky rozširujú vyhľadávanie exoplanét pre akúkoľvek dostatočne jasnú hviezdu odhliadnuc od toho, či sa nachádzala v katalógu vopred zvolených hviezd. Taktiež umožňujú detekciu a monitorovanie blízkych supernov, zdrojov gama žiarenia, Zeme blízkych asteroidov, binárnych hviezdnych systémov a iných premenných hviezd. Misia TESS teda poskytuje dáta pre približne 20 miliónov objektov, z ktorých mnohé vykazujú variabilitu (TESS Mission, 2018 [E11]).

V apríli 2021 sa podarilo TESS identifikovať viac ako 2000 kandidátov na exoplanéty. Z tohto pôvodne hojného počtu bolo však len 122 skutočne zaradených medzi exoplanéty. Po úspešnom objavení exoplanét misia TESS pokračuje a naďalej poskytuje dáta na ďalší prieskum vesmíru. Nové dáta z družice TESS sú na Zem posielané každé dva týždne (NASA 2022, [E13]).

2.1 História misie

Prvé diskusie k vyslaniu vesmírneho teleskopu TESS na obežnú dráhu Zeme sa odohrali na MIT už v roku 2005. Návrh bol neskôr v roku 2006 podaný, avšak nebol v danej dobe zvolený na realizáciu. V priebehu rokov 2006 a 2007 bola misia TESS preformulovaná, čo ale stále ešte nestačilo na získanie financií na jej uskutočnenie. Neskôr bola misia TESS znovuobjavená pod názvom Small Explorer Mission (SMEX), ako program NASA financovaný pre štúdium fázy A ale nebol vybraný pre pokračovanie do fázy B. Po mnohých neúspechoch bol koncept misie naďalej zdokonaľovaný a v roku 2011 bol NASA predložený nový návrh. Misia získala vyšší strop nákladov, čo umožnilo vylepšenia, ako napríklad využitie vysokej eliptickej dráhy, čo poskytuje možnosť presnejšej fotometrie. Misia TESS bola v jeseni 2011 vybraná pre štúdium vo fázy A a pokračovala na jar 2013 do fázy B (Ricker a kol., 2014 [17]).



Obr. 2.1: Vizualizácia vesmírneho satelitu TESS [prevzaté z NASA (E3)].

2.2 Pozorovania TESS

Prístroj sa skladá zo štyroch identických vysoko optimalizovaných, širokouhlých kamier a CCD detektorov, ktoré dokážu monitorovať oblohu v sektoroch o rozmeroch 24°x 96°. Každý z týchto sektorov je pozorovaný po dobu dvoch obehov vesmírneho satelitu okolo Zeme, čo v priemere činí 27 dní. Zorné pole je orientované pozdĺž línie ekliptickej zemepisnej dĺžky a mieri na \pm 54° ekliptickej zemepisnej šírky, čo centruje jednu z kamier na pól ekliptiky. Vďaka takémuto nastaveniu dokážu kamery družice TESS pozorovať oblohu po dobu skoro celého roku. Plán pozorovania na nasledujúcich 5 rokov od vypustenia satelitu je pozorovanie južnej ekliptickej pologule v priebehu prvého roku, následne pozorovania severnej ekliptickej pologule a v priebehu ďalších rokov opakovanie týchto pozorovaní.(TESS Observations, 2018 [E12]). Družica TESS svoju pozornosť sústreďuje na hviezdy hlavnej postupnosti, a to trpasličie hviezdy spektrálneho typu F5 až M5. Trpaslíci rannejšej triedy ako F5 sa spravidla rýchlo otáčajú, a tým dochádza k rozšíreniu ich spektrálnych čiar, čo zabraňuje presnému meraniu ich radiálnej rýchlosti. Najatraktívnejšími hviezdami sú práve trpaslíci triedy M, keďže sa nachádzajú v hojnom počte v blízkosti Slnka. Predošlá misia Kepler na tieto hviezdy nebola primárne zameraná, a teda sú doposiaľ nepreskúmané na prítomnosť exoplanét. Hviezdy spektrálnej triedy nad M5 sa v okolí Slnka nachádzajú zriedkavejšie a tiež sú opticky slabé. Z tohto dôvodu bolo takto ohraničené rozmedzie pozorovaných hviezd družicou TESS. (Ricker a kol., 2014 [17]).

2.3 **Priepustnosť filtrov**

Najlepšie astronomické detektory vo viditeľnej časti svetla sú silikónové CCD detektory. Výhodou CCD detektorov je linearita, ktorá predstavuje, že s rastúcim expozičným časom rastie aj počet dopadajúcich fotónov. CCD detektor funguje na princípe mnohokanálového detektoru, čo znamená, že v tom istom čase dokáže zaznemenať jasnosť oblohy, jasnosť porovnávacích hviezd, ako aj premenných hviezd. Pred detektorom je taktiež umiestený karusel s filtrami v rôznych farbách (Hric a Kundra, 2011 [5]).

TESS pozoruje veľké množstvo červených trpaslíkov z dôvodu, že detekcia exoplanét v okolí týchto malých hviezd je jednoduchšia. Väčšina Zemi blízkych hviezd je práve typu červených trpaslíkov, ktoré sú považované za relatívne chladné, červené hviezdy. Z tohto dôvodu má družica TESS vysokú citlivosť pozorovania práve v červenej oblasti svetla. Šírka vlnových dĺžok, v ktorých družica pozoruje je v rozmedzí 600 - 1000 nm. Funkcia spektrálnej odozvy družice TESS je graficky znázornená na obrázku 2.2. Zvolené pozo-rovacie rozmedzie je uprednostňované na zníženie šumu pozorovania vplyvom náhodného dopadu fotónov a na zvýšenie citlivosti pre detekciu exoplanét prechádzajúcich chladnými, červenými hviezdami. Väčšie vlnové dĺžky reprezentujú optimálny červený limit citlivosti CCD detektorov na základe ich kvantovej účinnosti. Oblasť pozorovania kratších vlnových dĺžok je zvolená z praktických dôvodov pre optimalizáciu pozorovania. Stredom šírky pozorovania je štandardne Cousin 1-band s centrálnou vlnovou dĺžkou 786.5 nm (NASA, 2022 [E14]).

V porovnaní s družicou Kepler je priepustnosť filtrov družice TESS široká ale zameraná na červenú oblasť vlnových dĺžok. Toto odzrkadľuje rozdielne zámery misií Kepler a TESS. Pri misii Kepler bol primárny zámer pozorovania hviezd podobných Slnku, v prípade TESS sú to chladné hviezdy menších rozmerov. Obrázok 2.3 vyobrazuje priepustnosti filtrov družice TESS v porovnaní s družicou Kepler (Ricker a kol., 2014 [17]).



Obr. 2.2: Spektrálna odozva TESS znázornená čiernou farbou, pre porovnanie sú vykreslené Johson-Cousin V, RC, Lc krivky filtrov a filter Slogan Digital Sky Survey z. [Prevzaté z NASA (E4)].



Obr. 2.3: Porovnanie pásiem pozorovania družice TESS a Kepler. [Prevzaté z NASA (E5)].

Kapitola 3 Analýza dát

Montreal White Dwarf Database [E6] je databáza známych bielych trpaslíkov. Pre hľadanie rotačne premenných bielych trpaslíkov sme najprv obmedzili úsek hľadania podľa deklinácie hviezd v rozmedzí od -70° do -50°. Tento úsek deklinácií sme vybrali z dôvodu, že v tomto rozmedzí pozoruje European Southern Observatory, ako aj pre optimalizáciu času na spracovanie dát. V databáze bolo v tomto sektore nájdených približne 2000 bielych trpaslíkov definovaných pomocou súradníc - rektascenzie a deklinácie jednotlivých objektov. Nájdené dáta sme si potom stiahli v csv súbore, ktorý je priložený v prílohe [E15].

Po určení cieľových objektov, ktoré boli ďalej objektom nášho záujmu, sme pracovali so sytémom Mikulski Archive for Space Telescopes (MAST) [E7], odkiaľ sme získali dáta k uvedeným objektom. Z portálu MAST sme získavali dáta, ktoré boli zhotovené družicou TESS a z celkového množstva vybraných bielych trpaslíkov sme našli okolo 1500 dátových súborov. Kľúčovými na vykreslenie svetelných kriviek bielych trpaslíkov pre nás boli čas (BJD) a veličina úmerná žiarivému toku (PDCSAP_FLUX). Závislosti žiarivého toku na čase sme si zobrazili do grafov a vylúčili hviezdy, ktoré nevykazovali periodické zmeny. V tomto kroku spracovania dát sme obmedzili počet potenciálnych rotačne premenných bielych trpaslíkov na 77 objektov. V tomto počte dát sa nachádzali svetelné krivky jasne vykazujúce periodické zmeny žiarivého toku, ako aj objekty s atypickým časovým vývojom. Z vyhliadnutých svetelných kriviek sme našli 41 bielych trpaslíkov, ktorý vykazovali možnú rotačnú premennosť. Pre tieto objekty sme našli periódy zmien s pomocou programu Period04 [E8], ako aj amplitúdy týchto zmien. V tabuľke 3.1 sú uvedené názvy nájdených rotačne premenných bielych trpaslíkov spolu z ich periódami a amplitúdami. Ďalším krokom v práci, bolo vykreslenie svetelných kriviek ako funkcie závislosti hviezdnej veľkosti *m* na fázi φ . Fáza bola vypočítaná pomocou vzťahu 3.1 ako desatinná časť podielu rozdielu času a periódy, pričom t_0 je epocha zistená ako prvá hodnota merania času. Hviezdna veľkosť bola zo žiarivého toku vypočítaná s použitím Pogsonovej rovnice 3.2.

$$\varphi = frac\left(\frac{t-t_0}{P}\right) \tag{3.1}$$

$$m = -2,5\log(\text{PDCSAP}_FLUX) \tag{3.2}$$

Svetelné krivky rotačne premenných bielych trpaslíkov sme zhotovili a preložili Taylorovým polynómom tretieho až ôsmeho rádu. Všetky priložené grafy svetelných kriviek boli vykreslené pomocou Pythonu [E9].

3.1 Diskusia

Zo získaných svetelných kriviek sa nám podarilo identifikovať 41 bielych trpaslíkov vykazujúcich možnú rotačnú premennosť. Síce sme objekty vyberali spomedzi identifikovaných bielych trpaslíkov z portálu Montreal White Dwarf Database avšak, nemôžeme si byť istý, že nami nájdené objekty sú skutočne hviezdami tohto typu. Na základe analýzy svetelných kriviek nie sme schopní u všetkých objektov určiť, či sa skutočne jedná o nami hľadanú rotačnú premennosť. V prípade hviezd, pri ktorých sme si neboli jasne istý o akú premennosť sa jedná, sme hľadali iné možné vysvetlenia ich premennosti. Pri získavaní dát z družice TESS je potrebné taktiež zohľadniť aj prístrojové chyby merania, ktoré mohli naše výsledky skresliť.

Hviezdy 3.43, 3.46, 3.51 a 3.53 sú podľa analýzy svetelných kriviek zložkami dvojhviezdy, pričom na grafe žiarivého toku v závislosti na čase jasne vykazovali primárne a sekundárne minimá. Môže sa jednať o zákrytové dvojhviezdy, čo by naznačoval periodický pokles jasností. V tomto prípade nami zistená perióda nezodpovedá perióde rotácie ale ide o periódu obehu dvojhviezdy. Potrebné je tiež poznamenať, že v prípade bielych trpaslíkov na obrázkoch 3.46 a 3.51 boli v dátach pre meranie žiarivého toku záporné hodnoty, a teda mohlo ísť aj o prístrojovú chybu merania.

Na svetelných krivkách 3.3, 3.47 a 3.49 jasne pozorujeme úzky pokles hviezdnej veľkosti, čo znamená, že dochádza k zákrytom hviezdy. Tieto zákryty môžu byť spôsobené objektom obiehajúcim okolo danej hviezdy. Takýmto objektom môže byť exoplanéta v okolí bieleho trpaslíka. Rovnako by sa mohlo jednať aj o prítomnosť ďalšej zložky hviezdy, čo by implikovalo, že ide o dvojhviezdu. S presnosťou ale nevieme jednoznačne určiť príčinu zákrytu z nami získanej analýzy dát.

Pri bielych trpaslíkoch 3.6 a 3.36 sme identifikovali nárasty hviezdnej veľkosti a žiarivého toku. Takéto výsledky svetelných kriviek vieme interpretovať ako vzplanutia vyskytujúce sa na hviezde. Vysvetlením vzplanutia by mohlo byť, že sa jedná o chladnejšieho bieleho trpaslíka. Ďalšou alternatívou vysvetlenia vzplanutí je, že by mohlo ísť opäť o dvojhviezdu, pričom v prípade druhej zložky dvojhviezdy by sa mohlo jednať o chladnejšiu hviezdu.

V priebehu hľadania rotačne premenných bielych trpaslíkov sme narazili aj na svetelné krivky, ktoré vykazovali nepravidelnú premennosť. Svetelné krivky týchto objektov sú vykreslené v Prílohe B a jedná sa konkrétne o hviezdy 3.55, 3.56, 3.57, 3.65, 3.66, 3.74 a 3.75. Pri bielom trpaslíkovi na obrázku 3.74 pozorujeme opäť vzplanutia hviezdy ako v predchádzajúcom prípade.

Na svetelnej krivke 3.44 pozorujeme zmenu fázy hviezdy. Dôvodom môže byť nesprávnosť časových údajov zo získaných dát. Po prerušení merania daného objektu družicou TESS boli skutočne chybne odčítané časové údaje, čo spôsobilo zmenu fázy bieleho trpaslíka.

Obzvlášť zaujímavé boli objekty 3.61 a 3.71. Na ich svetelných krivkách boli pozorované peaky žiarivého toku, ktoré mohli byť spôsobené prístrojovou chybou merania, mohlo taktiež ísť aj o chybné spracovanie dát. Alternatívnym vysvetlením by však mohlo byť, že sa jedná o nejaký iný typ premennosti s akým sme sa doteraz nestretli. Pre upresnenie, daného javu by bolo potrebné uskutočniť ďalšiu analýzu daných objektov.

Na obrázku 3.42 je vykreslená svetelná krivka bieleho trpaslíka s premennou amplitú-

dou. Na povrchu takejto hviezdy by sa mohli nachádzať chladné škvrny meniace sa v čase, čo mohlo spôsobiť premennosť amplitúdy.

Názov objektu	Amplitúda [mag]	Perióda [d]
BPS CS 22956-0094	0,033	$0,\!39\pm0,\!01$
BPS CS 31064-0017	0,004	$0,96\pm0,04$
CPD-64 481	0,043	$0,\!28\pm0,\!02$
EC 02303-6205	0,020	$0,\!29\pm0,\!02$
EC 02406-6908	0,021	$0,\!46\pm0,\!01$
EC 03143-5945	0,010	$2,61 \pm 0,03$
EC 04186-5228	0,005	$0,35\pm0,05$
EC 05382-5637	0,012	$0,36\pm0,01$
EC 19420-5836	0,014	$0,\!84\pm0,\!02$
EC 20182-6534	0,033	$0,\!60\pm0,\!01$
EC 20217-5704	0,022	$1,\!19\pm0,\!02$
EC 20324-5303	0,010	$0,57\pm0,02$
EC 21049-5649	0,043	$0,\!27\pm0,\!01$
EC 21443-5636	0,010	$0,\!38\pm0,\!03$
EC 22464-6822	0,022	$0,\!37\pm0,\!01$
EC 23227-6739	0,005	$0,\!37\pm0,\!02$
EC 23257-5443	0,052	$0,\!28\pm0,\!01$
Gaia DR2 4658691072554066560	0,001	$0,\!59\pm0,\!01$
Gaia DR2 4703464251158954496	0,020	$4{,}02\pm0{,}01$
Gaia DR2 5239252041148627584	0,040	$0,65\pm0,02$
Gaia DR2 5343070020668757120	0,015	$0,99\pm0,01$
Gaia DR2 5808208420421074560	0,017	$7,\!87 \pm 0,\!03$
Gaia DR2 5854295240595495040	0,011	$1,\!06\pm0,\!02$
Gaia DR2 5854386019016597760	0,018	5,39 ± 0,01
Gaia DR2 6054148143441683072	0,015	$0,70 \pm 0,02$
Gaia DR2 6127190796769848960	0,047	$8,70 \pm 0,01$
Gaia DR2 6404530677744345984	0,022	$1,35 \pm 0,02$
Gaia DR2 6464674273021870336	0,014	$7,27 \pm 0,04$
Gaia DR2 6645604928622813824	0,068	$2,34 \pm 0,02$
GALEX J062038,5-570538	0,026	$0,25 \pm 0,01$
GALEX J181056,8-571115	0,017	$0,19 \pm 0,03$
GALEX J191453,8-534332	0,008	$2,02 \pm 0,01$
GJ 2092	0,028	$0,35 \pm 0,02$
GJ 841 B	0,038	$1,12 \pm 0,02$
HD 269696	0,058	$0,26 \pm 0,01$
JL 277	0,012	$1,91 \pm 0,01$
LB 1695	0,002	$1,10 \pm 0,03$
LB 3179	0,007	$0,99 \pm 0,01$
NGC 5189	0,032	$0,13 \pm 0,04$
NGC 2516-02	0,027	$1,16 \pm 0,02$
V/2/ Car	0,024	$0,34 \pm 0,01$
WD 0005-57	0,012	$0,26 \pm 0,02$
WD 1944 (54	0,010	$0,55 \pm 0,05$
WD 1844-034	0,009	$4,41 \pm 0,04$
WD 1921-300*	0,063	$2,31 \pm 0,02$
WD 2001-538	0,011	$2,95 \pm 0,01$

Tabuľka 3.1: Vypočítané amplitúdy a periódy premenných bielych trpaslíkov. *WD 1921-566 vykazuje premennú amplitúdu.

3.2 Vybrané svetelné krivky bielych trpaslíkov¹



Obr. 3.1: Svetelná krivka bieleho trpaslíka BPS CS 22956-0094

¹Zvyšok vykreslených svetelných kriviek sa nachádza v Prílohe A



Obr. 3.2: Svetelná krivka bieleho trpaslíka CPD-64 481



Obr. 3.3: Svetelná krivka bieleho trpaslíka EC 02406-6908



Obr. 3.4: Svetelná krivka bieleho trpaslíka EC 20217-5704



Obr. 3.5: Svetelná krivka bieleho trpaslíka EC 22464-6822



Obr. 3.6: Svetelná krivka bieleho trpaslíka Gaia DR2 6127190796769848960



Obr. 3.7: Svetelná krivka bieleho trpaslíka Gaia DR2 6404530677744345984



Obr. 3.8: Svetelná krivka bieleho trpaslíka GALEX J062038 5-570538

Záver

Zámerom bakalárskej práce bolo nájsť spomedzi bielych trpaslíkov tých, ktorí vykazujú rotačnú premennosť. Pomocou dát z Mikulski Archive of Space Telescopes boli vybrané dáta k bielym trpaslíkom namerané pomocou družice TESS. Analýzou dát sa nám podarilo nájsť z pôvodného počtu 1500 hviezd 41, ktoré vykazovali možnú rotačnú premennosť. Z istotou však u všetkých premenných hviezd nevieme povedať, či sa skutočne jedná o rotačnú premennosť. Pre dané hviezdy sme ďalej určili ich periódy rotácie, ktoré sa líšili od 3 hodín po 8 dní. Z celkového počtu bielych trpaslíkov približne 2% vykazujú rotačnú premennosť.

Naše výsledky sa zhodujú s výsledkami práce Richarda Liptaja z roku 2019, ktorý spracoval tému hľadania rotačne premenných bielych trpalíkov v dátach z družice Kepler vo svojej bakalárskej práci. Jeho záverom práce bolo identifikovanie približne 2% rotačne premenných bielych trpaslíkov, čo je v zhode s našimi výsledkami (Liptaj, 2019 [13]).

Elektronické zdroje

[E1] H-R Diagram
https://cdn.sci.esa.int/documents/33580/35361/1567214809100- ESA_Gaia_DR2_HRD_Gaia_625.jpg
[E2] Spektrum bielych trpaslíkov https://cdn.eso.org/images/screen/eso9953b.jpg
[E3] Družica TESS https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/tess/images/mission/tess_spacecraft_cameras.jpg
[E4] Spektrálna odozva družice TESS https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/tess/images/mission/tess_bandpass.png
[E5] Pozorovanie družice TESS a Kepler https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/tess/images/mission/tess_vs_kepler_bandpass.png
[E6] Montreal White Dwarf Database https://www.montrealwhitedwarfdatabase.org/tables-and-charts.html
[E7] Mikulski Archive for Space Telescopes https://mast.stsci.edu/portal/Mashup/Clients/Mast/Portal.html
[E8] Period04 https://www.univie.ac.at/tops/Period04/
[E9] Python Software Foundation. Python Language Reference, verzia 3.7. http://www.python.org
[E10] NASA. Tess Mission Objectives, 2022 https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/tess/objectives.html
[E11] Tess.mit.edu. Mission Overview, 2018 https://tess.mit.edu/science/
[E12] Tess.mit.edu. TESS Observations, 2018 https://tess.mit.edu/observations/

-24-

[E13] Exoplanet Exploration: Planets Beyond our Solar System. Transiting Exoplanets Survey Satellite (TESS) - Exoplanet Exploration: Planets Beyond our Solar System, 2022 https://exoplanets.nasa.gov/tess/

[E14] T. Barclay. Characteristics of the TESS space telescope, 2022 https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/tess/the-tess-space-telescope.html

[E15] MWDD. Zoznam bielych trpaslíkov https://www.dropbox.com/s/3c2yrxqyo3ho3l6/MWDD-White%20Dwarfs.csv?dl=0

Zoznam použitej literatúry

- [1] C. Brinkworth et al. Measuring the Rotational Periods of Isolated Magnetic White Dwarfs. *The Astrophysical Journal*, 773(1):47, 2013.
- [2] M. Camenzind. Compact Objects in Astrophysics: White Dwarfs, Neutron Stars and Black Holes. Astronomy and Astrophysics Library. Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [3] A. Córsico. White-dwarf Asteroseismology: An Update. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 15:93–106, 2019.
- [4] M. Deal et al. Accretion from Debris Disks onto White Dwarfs. *Astronomy & Astrophysics*, 557:L12, 2013.
- [5] L. Hric and E. Kundra. CCD Technika v Astronómií. Astronomický ústav SAV, 2011.
- [6] S. Kawaler. White Dwarf Rotation: Observations and Theory. *Symposium-International Astronomical Union*, 215:561–570, 2003.
- [7] A. Kawka. The Properties and Origin of Magnetic Fields in White Dwarfs. *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnate Pleso*, 48(1):228–235, 2018.
- [8] S. O. Kepler et al. White Dwarf Stars. *International Journal of Modern Physics: Conference Series*, 45:1760023, 2017.
- [9] D. Koester and G. Chanmugam. Physics of White Dwarf Stars. *Reports on Progress in Physics*, 53:837–915, 1990.
- [10] J. Krtička et al. Light Variability of White Dwarfs and Subdwarfs due to Surface Abundance Spots. *astro-ph*, 2021.
- [11] J. Krtička, J. Kubát, and I. Krtičková. Stellar Wind Models of Central Stars of Planetary Nebulae. Astronomy & Astrophysics, 635:A173, 2020.
- [12] G. Kuiper. List of Known White Dwarfs. *Publications of the Astronomical Society* of the Pacific, 53(314):248, 1941.
- [13] R. Liptaj. Rotační Proměnnost Bílých Trpaslíků Pozorovaných Družicí KEPLER [online], 2019. SUPERVISOR : Jiří Krtička.

-26-

- [14] A. Maeder. *Physics, Formation and Evolution of Rotating Stars*. Astronomy and Astrophysics Library. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [15] Z. Mikulášek and J. Krtička. Základy fyziky hvězd. 2005.
- [16] A. Potter and C. Tout. Magnetic Field Evolution of White Dwarfs in Strongly Interacting Binary Star Systems. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 402, 2009.
- [17] G. Ricker et al. Transiting Exoplanet Survey Satellite. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 1(1):014003, 2014.
- [18] E. Sion et al. A Proposed New White Dwarf Spectral Classification System. *The Astrophysical Journal*, 269:253–257, 1983.
- [19] M. Tucker et al. White Dwarf Variability with gPhoton: Pulsators. *Monthly Notices* of the Royal Astronomical Society, 475, 2017.
- [20] D. Wickramasinghe, C. Tout, and L. Ferrario. The Most Magnetic Stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 437(1):675–681, 2013.
Príloha A

Svetelné krivky bielych trpaslíkov



Obr. 3.9: Svetelná krivka bieleho trpaslíka BPS CS 31064-0017



Obr. 3.10: Svetelná krivka bieleho trpaslíka EC 02303-6205



Obr. 3.11: Svetelná krivka bieleho trpaslíka EC 03143-5945



Obr. 3.12: Svetelná krivka bieleho trpaslíka EC 04186-5228



Obr. 3.13: Svetelná krivka bieleho trpaslíka EC 05382-5637



Obr. 3.14: Svetelná krivka bieleho trpaslíka EC 19420-5836



Obr. 3.15: Svetelná krivka bieleho trpaslíka EC 20182-6534



Obr. 3.16: Svetelná krivka bieleho trpaslíka EC 20324-5303



Obr. 3.17: Svetelná krivka bieleho trpaslíka EC 21443-5636



Obr. 3.18: Svetelná krivka bieleho trpaslíka Gaia DR2 5343070020668757120



Obr. 3.19: Svetelná krivka bieleho trpaslíka Gaia DR2 5808208420421074560



Obr. 3.20: Svetelná krivka bieleho trpaslíka GALEX J181056 8-571115



Obr. 3.21: Svetelná krivka bieleho trpaslíka GALEX J191453 8-534332



Obr. 3.22: Svetelná krivka bieleho trpaslíka GJ 2092



Obr. 3.23: Svetelná krivka bieleho trpaslíka GJ 841 B



Obr. 3.24: Svetelná krivka bieleho trpaslíka NGC 5189



Obr. 3.25: Svetelná krivka bieleho trpaslíka V727 Car



Obr. 3.26: Svetelná krivka bieleho trpaslíka WD 0003-570



Obr. 3.27: Svetelná krivka bieleho trpaslíka WD 0905-57



Obr. 3.28: Svetelná krivka bieleho trpaslíka WD 1844-654



Obr. 3.29: Svetelná krivka bieleho trpaslíka EC 23227-6739



Obr. 3.30: Svetelná krivka bieleho trpaslíka EC EC 20217-5704



Obr. 3.31: Svetelná krivka bieleho trpaslíka Gaia DR2 4658691072554066560



Obr. 3.32: Svetelná krivka bieleho trpaslíka Gaia DR2 4703464251158954496



Obr. 3.33: Svetelná krivka bieleho trpaslíka Gaia DR2 5854295240595495040



Obr. 3.34: Svetelná krivka bieleho trpaslíka Gaia DR2 5854386019016597760



Obr. 3.35: Svetelná krivka bieleho trpaslíka Gaia DR2 6054148143441683072



Obr. 3.36: Svetelná krivka bieleho trpaslíka Gaia DR2 6464674273021870336



Obr. 3.37: Svetelná krivka bieleho trpaslíka JL 277



Obr. 3.38: Svetelná krivka bieleho trpaslíka LB 1695



Obr. 3.39: Svetelná krivka bieleho trpaslíka LB 3179



Obr. 3.40: Svetelná krivka bieleho trpaslíka WD 2001-538



Obr. 3.41: Svetelná krivka bieleho trpaslíka NGC2516-02



Obr. 3.42: Svetelná krivka bieleho trpaslíka WD 1921-566

Príloha B

Atypické svetelné krivky



Obr. 3.43: Svetelná krivka bieleho trpaslíka EC 21049-5649



Obr. 3.44: Svetelná krivka bieleho trpaslíka EC 23257-5443



Obr. 3.45: Svetelná krivka bieleho trpaslíka Gaia DR2 4657982643495556608



Obr. 3.46: Svetelná krivka bieleho trpaslíka Gaia DR2 5239252041148627584



Obr. 3.47: Svetelná krivka bieleho trpaslíka Gaia DR2 5898935893701856128



Obr. 3.48: Svetelná krivka bieleho trpaslíka Gaia DR2 5935149820999504640



Obr. 3.49: Svetelná krivka bieleho trpaslíka Gaia DR2 6062119121699205120



Obr. 3.50: Svetelná krivka bieleho trpaslíka Gaia DR2 6405809822083607424



Obr. 3.51: Svetelná krivka bieleho trpaslíka Gaia DR2 6645604928622813824



Obr. 3.52: Svetelná krivka bieleho trpaslíka HD 13445B



Obr. 3.53: Svetelná krivka bieleho trpaslíka HD 269696



Obr. 3.54: Svetelná krivka bieleho trpaslíka BPS CS 22896-0128



Obr. 3.55: Svetelná krivka bieleho trpaslíka CPD-65 14



Obr. 3.56: Svetelná krivka bieleho trpaslíka EC 02121-5743



Obr. 3.57: Svetelná krivka bieleho trpaslíka EC 22450-6827



Obr. 3.58: Svetelná krivka bieleho trpaslíka Gaia DR2 4657977695738959104



Obr. 3.59: Svetelná krivka bieleho trpaslíka Gaia DR2 4906307207132391040



Obr. 3.60: Svetelná krivka bieleho trpaslíka Gaia DR2 4920716130920066048



Obr. 3.61: Svetelná krivka bieleho trpaslíka Gaia DR2 5353862453172291584



Obr. 3.62: Svetelná krivka bieleho trpaslíka Gaia DR2 5821335902051683072



Obr. 3.63: Svetelná krivka bieleho trpaslíka Gaia DR2 5863323605448348544



Obr. 3.64: Svetelná krivka bieleho trpaslíka Gaia DR2 5870240358227856512



Obr. 3.65: Svetelná krivka bieleho trpaslíka Gaia DR2 5870659272189813632



Obr. 3.66: Svetelná krivka bieleho trpaslíka Gaia DR2 5920596066603197056



Obr. 3.67: Svetelná krivka bieleho trpaslíka Gaia DR2 6461349663391292672



Obr. 3.68: Svetelná krivka bieleho trpaslíka Gaia DR2 6474450550595885696



Obr. 3.69: Svetelná krivka bieleho trpaslíka GALEX J075010 4-644617



Obr. 3.70: Svetelná krivka bieleho trpaslíka HD 218572B



Obr. 3.71: Svetelná krivka bieleho trpaslíka L 266-196



Obr. 3.72: Svetelná krivka bieleho trpaslíka L 269-72



Obr. 3.73: Svetelná krivka bieleho trpaslíka NG3532-10



Obr. 3.74: Svetelná krivka bieleho trpaslíka WD 0027-549



Obr. 3.75: Svetelná krivka bieleho trpaslíka WD 1914-598