

MASARYKOVA UNIVERZITA
PRÍRODOVEDECKÁ FAKULTA
ÚSTAV TEORETICKÉ FYZIKY A ASTROFYZIKY

Bakalárska práca

BRNO 2020

ADRIANA GRIGEROVÁ

**Charakterizace
exoplanetárních systémů
z fotometrických dat
z přehlídky 30cm
dalekohledu**

Bakalárska práca

Adriana Grigerová

Bibliografický záznam

Autor:	Adriana Grigerová Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita Ústav teoretické fyziky a astrofyziky
Název práce:	Charakterizace exoplanetárních systémů z fotometrických dat z přehlídky 30cm dalekohledu
Studijní program:	Fyzika
Studijní obor:	Astrofyzika
Vedoucí práce:	Bc. Petr Kabáth, Dr. rer. nat.
Akademický rok:	2019/2020
Počet stran:	49
Klíčová slova:	Exoplaneta, světelná křivka, fotometrická metoda

Bibliografický záznam

Autor:	Adriana Grigerová Prírodovedecká fakulta, Masarykova univerzita Ústav teoretickej fyziky a astrofyziky
Názov práce:	Charakterizácia exoplanetárnych systémov z fotometrických dát z prehliadky 30-cm ďalekohľadu
Študijný program:	Fyzika
Študijný odbor:	Astrofyzika
Vedúci práce:	Bc. Petr Kabáth, Dr. rer. nat.
Akademický rok:	2019/2020
Počet strán:	49
Kľúčové slová:	Exoplanéta, svetelná krivka, fotometrická metóda

Bibliographic Entry

Author: Adriana Grigerová
Faculty of Science, Masaryk University
Department of Theoretical Physics and Astrophysics

Title of Thesis: Characterisation of exoplanetary systems from photometric data of a 30-cm telescope survey

Degree Programme: Physics

Field of Study: Astrophysics

Supervisor: Bc. Petr Kabáth, Dr. rer. nat.

Academic Year: 2019/2020

Number of Pages: 49

Keywords: Extrasolar planet, light curve, photometry method

Abstrakt

V této bakalářské práci se věnujeme charakterizaci exoplanetárních systémů. Zabýváme se konkrétně dvěma kandidáty na exoplanety, kteří se nacházejí u hvězd s označením Var91 Aql a CzeV406 Her. Fotometrická data byla získána Pavlem Cagašem na soukromé observatoři TMT nedaleko Zlína v České republice. Dalekohled má průměr 30-centimetrů a je vybaven CCD kamerou. Hlavním cílem průzkumného dalekohledu je monitorování velkých oblastí oblohy pro detekci nových proměnných hvězd a taktéž i kandidátů na extrasolární planety. Ze získaných a upravených dat jsme v kombinaci s určenými spektrálními typy hvězd (které byly získány na observatoři La Palma, využitím Isaac Newton Group of Telescopes) pomocí fitovací rutiny využívající Gaussovské procesy určili parametry tranzitů a některé parametry exoplanet. Z výsledků jsme usoudili, že obě planety patří do kategorie, kterou označujeme jako horké Jupitery.

Abstrakt

V tejto bakalárskej práci sa venujeme charakterizácii exoplanetárnych systémov. Zaoberáme sa konkrétne dvomi kandidátmi na exoplanéty, ktoré sa nachádzajú pri hviezdach s označením Var91 Aql a CzeV406 Her. Fotometrické dáta boli získané Pavlom Cagašom na súkromnom observatóriu TMT neďaleko Zlína, v Českej republike. Ďalekohľad má 30 centimetrový priemer a je vybavený CCD kamerou. Hlavným cieľom prieskumného ďalekohľadu je monitorovanie veľkých oblastí oblohy pre detekovanie nových premenných hviezd a taktiež aj kandidátov na extrasolárne planéty. Zo získaných a upravených dát sme v kombinácii s určenými spektrálnymi typmi hviezd (ktoré boli získané na La Palme, využitím Isaac Newton Group of Telescopes) pomocou fitovacej rutiny využívajúcej Gaussovské procesy určili parametre tranzitov a niektoré parametre exoplanét. Z výsledkov sme usúdili, že obe planéty patria do kategórie, ktorú označujeme ako horúce Jupitery.

Abstract

In this bachelor thesis we deal with the characterization of exoplanetary systems. We focus on two candidates for exoplanets, which are found next to the stars with name Var91 Aql and CzeV406 Her. Photometric data were acquired by Pavel Cagaš at TMT private operated observatory near Zlín, Czech Republic. The telescope has a 30-cm aperture and it is equipped with a CCD camera. The main aim of the survey telescope is to monitor large areas on sky to detect new variable stars and as a bi-product also candidates for extrasolar planets. From the obtained and modified data (obtained at La Palma, using the Isaac Newton Group of Telescopes) in combination with the determined spectral types of stars, we determined the parameters of transits and some parameters of exoplanets applying a fitting routine using Gaussian processes. From the results, we concluded that both planetary candidates would belong to a category of hot Jupiters.

ZADÁNÍ
BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Akademický rok: 2019/2020

Ústav:	Přírodovědecká fakulta
Studentka:	Adriana Grigerová
Program:	Fyzika
Obor:	Astrofyzika

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

Název práce:	Charakterizace exoplanetárních systémů z fotometrických dat z přehlídky 30cm dalekohledu
Název práce anglicky:	Characterisation of exoplanetary systems from photometric data of a 30cm telescope survey

Jazyk závěrečné práce:**Oficiální zadání:**

Fotometrická měření tranzitů exoplanet jsou dnes běžná i s malými dalekohledy amatérských pozorovatelů. Fotometrická data z měření mnoha proměnných hvězd ze třiceticentimetrového dalekohledu, v nichž se nachází několik kandidátů na exoplanety, budou vstupem pro zpracování pro bakalářskou práci studentky. Pomocí fitovací rutiny využívající Gaussovské procesy studentka určí z fotometrických dat parametry tranzitu a parametry planety z tranzitu zjistitelné. V kombinaci s naměřenými spektry zjistí také spektrální typy hvězd hostící tyto kandidáty a výsledky obou částí poslouží ke konečné analýze systémů.

Vedoucí práce:	Bc. Petr Kabáth, Dr. rer. nat.
Konzultant:	Mgr. Martin Blažek
Datum zadání práce:	25. 10. 2019
V Brně dne:	17. 8. 2020

Pod'akovanie

Na tomto mieste by som sa chcela poďakovať hlavne vedúcemu mojej bakalárkej práce Bc. Petrovi Kabáthovi, Dr. rer. nat. za jeho cenné rady a veľkú trpezlivosť, môjmu konzultantovi Mgr. Martinovi Blažkovi za neustálu pomoc a usmerňovanie správnym smerom a v neposlednom rade Ing. Pavlovi Cagašovi za poskytnutie dát, ktoré som v tejto práci spracovala.

Prehlásenie

Prehlasujem, že som svoju bakalársku prácu vypracovala samostatne pod vedením vedúceho práce s využitím informačných zdrojov, ktoré sú v tejto práci citované.

Brno 17. 8. 2020

.....
Adriana Grigerová

Obsah

Kapitola 1. Úvod	13
Kapitola 2. Exoplanéty	15
2.1 História výskumu exoplanét	15
2.2 Exoplanéty dnes	18
Kapitola 3. Metódy detekcie exoplanét	19
3.1 Fotometrická metóda	20
3.1.1 Základná geometria	20
3.1.2 Svetelná krivka	21
3.1.3 Okrajové stemnenie	21
3.2 Spektroskopická metóda	22
3.3 Stručný opis ďalších metód	23
3.3.1 Astrometrická metóda	23
3.3.2 Metóda gravitačných mikrošošoviek	23
Kapitola 4. Parametre exoplanét	25
4.1 Polomer planéty	25
4.2 Veľká poloosa	26
4.3 Inklinácia	26
Kapitola 5. Spektrálna charakterizácia hviezd	29
5.1 Spektrá hviezd	29
5.1.1 Základná charakteristka jednotlivých typov hviezd	30
Kapitola 6. Spracovanie dát	33
6.1 Pozorovanie exoplanetárnych systémov	33
6.2 Stručný postup práce pri spracovaní dát	34
6.2.1 Výpočet parametrov podľa spektrálneho typu hviezd	34
6.2.2 Fitovanie využitím Gaussovských procesov	34
6.3 Získané výsledky	35
6.3.1 var 91 Aql	35
6.3.2 CzeV406 Her	39
Kapitola 7. Záver	45

Zoznam použitej literatúry	47
Elektronické zdroje	49

Kapitola 1

Úvod

Mnoho ľudí si v živote určite kládli otázku, či sme v tomto neskutočne veľkom vesmíre sami alebo či existuje život aj mimo našu planétu. Pri hľadaní života vo vesmíre najprv potrebujeme nájsť miesto, kde by život mohol vôbec existovať. Ak sa pozrieme na večernú oblohu, môžeme vidieť množstvo odlišných hviezd. Čo však vidieť nemôžeme sú planéty, ktoré okolo týchto hviezd obiehajú. Planéty, ktoré sa nachádzajú mimo našu Slnecnú sústavu sa nazývajú extrasolárne planéty. Práve týmto vesmírnym objektom bude venovaná táto bakalárska práca.

Bakalárska práca je rozdelená do siedmych kapitol. Po úvode je v druhej kapitole rozobrané, ako výskum exoplanét začal a kam sme sa od vtedy v tomto výskume dostali. V tretej kapitole sú stručne opísané metódy na detekciu exoplanét, pričom fotometrická metóda, ktorá sa v tejto práci využíva je rozobraná podrobnejšie. Štvrtá kapitola sa zaoberá tým, aké parametre a akým spôsobom môžeme o exoplanétach získať. V piatej kapitole sa rozoberá spektrálna charakterizácia hviezd. V posledných dvoch kapitolách sú spracované data a zhrnuté výsledky ku ktorým sme sa v práci dostali.

Kapitola 2

Exoplanéty

Exoplanéty alebo extrasolárne planéty sú planéty, ktoré obiehajú okolo iných hviezd ako je naše Slnko. Nachádzajú sa teda mimo našu Slnčnú sústavu. Výskum exoplanét nám môže poskytnúť odpovede na otázky ako planetárne systémy vznikajú, koľko ich vôbec je, aké sú to planéty alebo či existuje nejaká planéta podobná Zemi, na ktorej by mohol existovať život.

2.1 História výskumu exoplanét

Prešlo už stovky rokov od kedy si ľudia prvý krát kládli otázky ohľadom existencie iných planét mimo našu Slnčnú sústavu. Vzhľadom k tomu, že v minulosti nebol spôsob, akým by sa tieto planéty dali objaviť, názory na ich existenciu sa vcelku líšili.

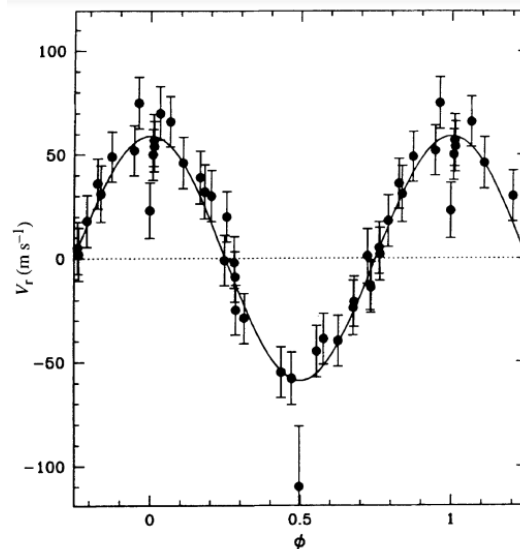
Napríklad už v štvrtom storočí pred našim letopočtom vyslovil grécky filozof Epikúros zo Samu myšlienku o tom, že existuje mnoho svetov, z ktorých sú niektoré podobné tomu našemu a niektoré zasa úplne odlišné. V tom istom období sa k tejto téme vyjadril aj ďalší grécky filozof, Aristoteles, ktorý prišiel s názorom, že nemôže byť viac svetov ako jeden a teda že naša planéta je jedinečná. V tom čase mal však Aristoteles veľkú autoritu a tak sa jeho názory brali za tie správne po veľmi dlhú dobu. [E4]

V šestnástom storočí pokračoval v myšlienke existencie planét mimo našu slnečnú sústavu taliansky filozof Giordano Bruno. Ten bol zástancom Koperníkovej teórie, teda názoru, že Zem a ostatné planéty obiehajú okolo Slnka. Avšak na rozdiel od Koperníka tvrdil, že ani Slnko nie je stredom vesmíru ale iba jednou z veľkého počtu hviezd. Veril, že aj okolo iných hviezd taktiež obiehajú planéty ako v našej Slnčnej sústave. V tej dobe to boli veľmi odvážne tvrdenia, ktoré však boli v rozpore s názormi cirkvi a tak tento filozof za ne zaplatil životom. [E3]

V osemnástom storočí to bol práve Isaac Newton, ktorý sa stotožňoval s myšlienkou, že aj okolo iných hviezd vo vesmíre obiehajú planéty. Toto tvrdenie je spomenuté v jeho diele s názvom Principia. Ako aj predchádzajúce myšlienky, tak aj táto bola založená len na úvahách, ktoré neboli podložené žiadnymi faktami. [E6] S rozvíjajúcou sa technikou však prišlo behom devätnásteho a dvadsiateho storočia hneď niekoľko správ o objavení exoplanét, no väčšina z nich sa ukázali ako chybné. Roku 1952 prišiel Otto Sturve s nápadom objavenia planéty pomocou merania radiálnych rýchlostí. [E3] Za povšimnutie stojí aj snaha holandsko-amerického astronóma Petera van de Kampa, ktorý sa pomocou astrometrie

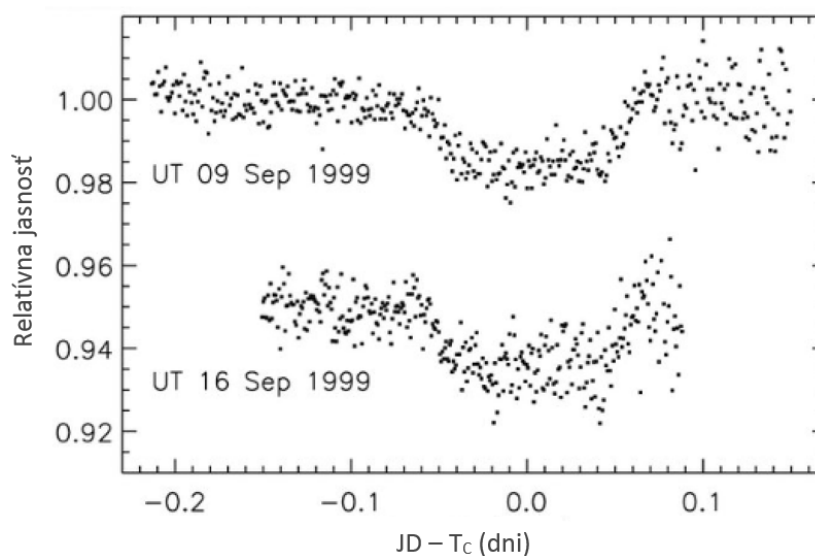
pokúsil odhaliť prípadné planéty obiehajúce okolo Barnardovej hviezdy. Niekoľko rokov fotil a premeriaval množstvo jej snímok. Z nájdených odchýlok v polohe usúdil, že Barnardovu hviezdu obieha planéta s hmotnosťou 1,6násobku hmotnosti Jupitera. Roku 1963 svoj objav publikoval, no po ďalšom výskume došiel k záveru, že túto hviezdu neobieha iba jedna, ale hneď dve planéty. Roku 1973 sa G. Gatewood a H. Eichhorn pokúsili overiť tento objav, avšak bez úspechu. Žiadne z ďalších meraní už planétu obiehajúcu okolo Barnardovej hviezdy nepotvrdili. Nález van de Kampa je dnes vysvetľovaný ako prístrojová chyba ďalekohľadu. [1]

K prvému potvrdenému objavu exoplanéty došlo roku 1992, keď astrofyzici Aleksander Wolszczan a Dale Frail objavili planétu obiehajúcu pulzar s označením PSR1257+12. Pri tomto pulzare boli objavené hneď tri planéty v neočakávane extrémnych podmienkach.[11] Roku 1995 astronómovia zo ženevského observatória Michel Mayor a Didier Queloz využitím metódy radiálnych rýchlostí (viz obrázok 2.1) detekovali prvú exoplanétu obiehajúcu okolo hviezdy hlavnej postupnosti 51 Pegasi, ktorá je podobná nášmu Slnku. Táto planéta sa označuje ako 51 Pegasi b a jej vlastnosti boli veľkým prekvapením. Má približne polovicu hmotnosti Jupiteru a obieha tak blízko okolo svojej materskej hviezdy, že dokončí obežnú dráhu raz za 4,2 dňa. Okolo hviezdy obieha vo vzdialenosti 0,052 au ($1 \text{ au} = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$). Na tak veľkú planétu je to malá vzdialenosť a rovná sa približne sedmine vzdialenosti Merkúru od nášho Slnka.



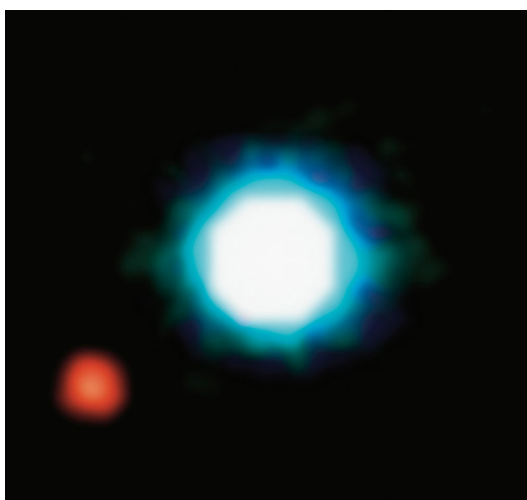
Obr. 2.1: Krivka zmeny radiálnej rýchlosti hviezdy 51 Pegasi. [7]

Ďalší veľký krok v pozorovaní exoplanét nastal 9. septembra 1999, keď bol pozorovaný prvý prechod planéty pred jej materskou hviezdou. Svetelná krivka je znázornená na obrázku 2.2. Pomocou dát získaných z pozorovania tohto prechodu sa podarilo potvrdiť extrasolárnu planétu pri hviezde HD 209458, ktorá bola objavená už aj pri predchádzajúcich meraniach radiálnej rýchlosti. Zákryt planéty HD 209458 b pozorovali Brown, Charbonneau, Latham a Mayor. Niektorý z nich taktiež ako prvý detekovali sodík v jej atmosfére. Po čase boli objavené výskumom aj molekuly kyslíka a uhlíka v atmosfére tejto planéty.



Obr. 2.2: Prvé vedome pozorované svetelné krivky exoplanéty. [Upravené z: [2]]

Za zmienku stojí aj rok 2005, kedy sa medzinárodnému tímu na Európskom južnom observatóriu (ESO) v Chile podarilo spraviť prvý snímok exoplanéty. Môžeme ho vidieť na obrázku 2.3, ktorý ukazuje exoplanétu (červená škvrna vľavo dole) obiehajúcu okolo hnedého trpaslíka 2M1207 (na obrázku v strede). 2M1207b nebola len prvou priamo zobrazenou ale aj prvou objavenou planétou obiehajúcou okolo hnedého trpaslíka. Je približne 5 krát hmotnejšia ako Jupiter a svoju materskú hviezdu obieha vo vzdialenosti 55 krát väčšej ako je vzdialenosť Zeme od Slnka (55 au).

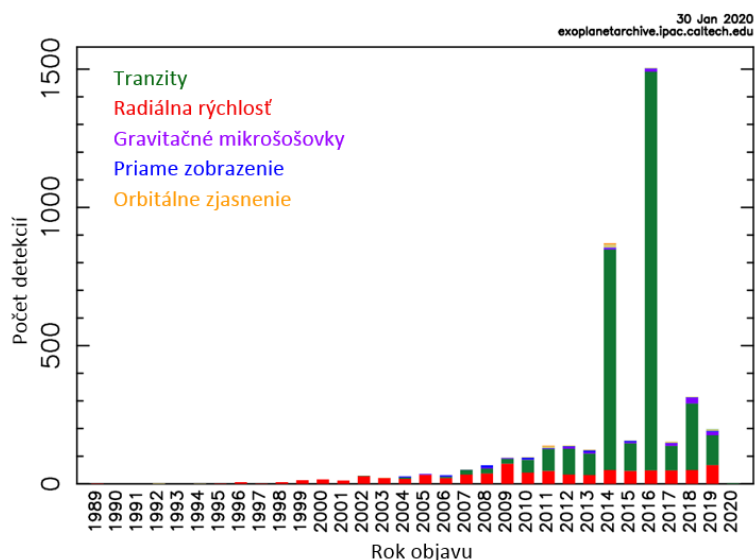


Obr. 2.3: Prvý snímok exoplanéty 2M1207b [Zdroj:[E5]]

2.2 Exoplanéty dnes

Úplne prvá exoplanéta bola objavená už roku 1988, avšak na svoje potvrdenie čakala až do roku 2002. [E3] Vďaka rýchlemu vývoju technológií a zdokonaľovaniu pozorovacích techník bolo do 31. januára 2020 potvrdených 4173 exoplanét v 3096 planetárnych sústavách. Z týchto planetárnych sústav je 678 viacnásobných. [Zdroj:[E2]]

Najviac extrasolárnych planét bolo objavených prostredníctvom fotometrickej metódy, no o celkom veľké množstvo objavov sa zaslúžila aj metóda merania radiálnych rýchlostí. Jednotlivé zastúpenie počtu detekcií rôznymi metódami za jednotlivé roky je znázornené na obrázku 2.4.



Obr. 2.4: Počet detekcií exoplanét jednotlivými metódami do roku 2020. [Zdroj:[E1]]

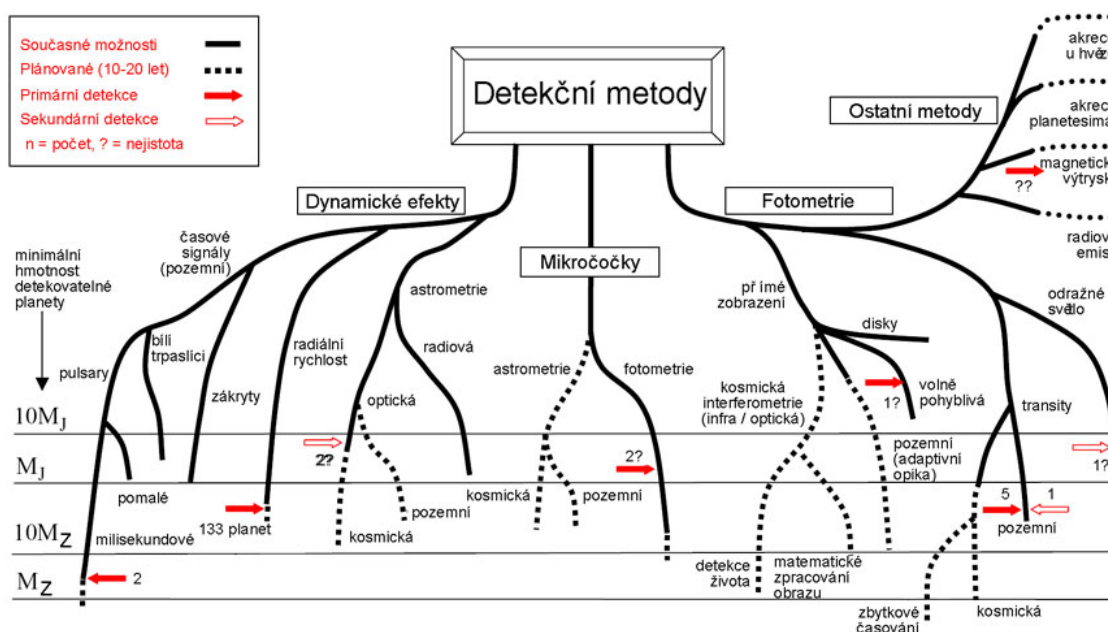
Definícia planéty Slnčnej sústavy bola prijatá na zasadaní Medzinárodnej astronomickej únie, ktoré sa konalo 24. augusta 2006. Podľa tejto definície môžeme za planétu považovať teleso, ktoré sa nachádza na obežnej dráhe okolo Slnka, má dostatočnú hmotnosť na to, aby sa dostalo do stavu hydrostatickej rovnováhy, čo znamená, že dosiahne približne guľovitý tvar a zároveň svojou gravitáciou vyčistilo okolie svojej dráhy od iných menších telies. [E7] Táto definícia sa však nevzťahuje na extrasolárne planéty. Hlavným kritériom pre planéty obiehajúce inú hviezdu ako naše Slnko je ich hmotnosť, kde spodná hranica je rovnaká ako pri telesách Slnčnej sústavy a horná hranica sa udáva ako 13 hmotností planéty Jupiter ($1,9 \cdot 10^{27}$ kg). Hmotnejšie objekty sa nazývajú hnedými trpaslíkmi alebo hviezdami. [E8]

Je dôležité spomenúť aj to, akým spôsobom sa exoplanéty vôbec označujú. Zvyčajne sa pre nich využíva pomenovanie po názve hviezdy, ku ktorému je priradené malé písmeno abecedy. Planéta, ktorá je objavená ako prvá sa označuje malým písmenom *b*. Ďalšie objavené exoplanéty nesú nasledujúce písmená v poradí abecedy chronologicky podľa toho, kedy boli objavené.

Kapitola 3

Metódy detekcie exoplanét

V porovnaní so svojimi materskými hviezdami majú extrasolárne planéty veľmi malú jasnosť a tak ich svetlo zanikne v žiare týchto hviezd. Exoplanéty sú veľmi ťažko pozorovateľné, preto sa metódy ich detekcie zakladajú na pozorovaní ich materskej hviezdy. Ako sme videli na obrázku 2.4, najviac planét mimo našu Slnecnú sústavu bolo objavených pomocou nepriamych metód, konkrétne fotometrickej a spektroskopickkej metódy. Tieto dve metódy sú najvyužívanejšie a najúspešnejšie, preto budú rozobrané podrobnejšie. Samozrejme, na detekciu exoplanét existuje aj niekoľko ďalších metód, avšak pre ich nedôležitosť v tejto bakalárskej práci stručne opíšeme len niektoré z nich. Každá z týchto metód má svoje výhody a nevýhody. Rôzne metódy slúžiace k detekcii extrasolárnych planét sú znázornené na obrázku 3.1.



Obr. 3.1: Metódy slúžiace k detekcii extrasolárnych planét. [Zdroj: [E19]]

3.1 Fotometrická metóda

Fotometrická metóda je založená na meraní poklesu jasnosti hviezdy, ku ktorému dochádza opakovane pri prechode planéty pred jej materskou hviezdou. Aby sa však dal tento pokles pozorovať, musí byť planetárna sústava vhodne orientovaná smerom k pozorovateľovi, to znamená, že rovina obehu planéty by mala ležať v rovine zorného uhla pozorovateľa. Prechod menšieho telesa, teda planéty pred jej materskou hviezdou sa nazýva tranzit a v prípade, ak sa planéta ukryje za materskú hviezdu sa tento jav nazýva zákryt alebo okultácia.

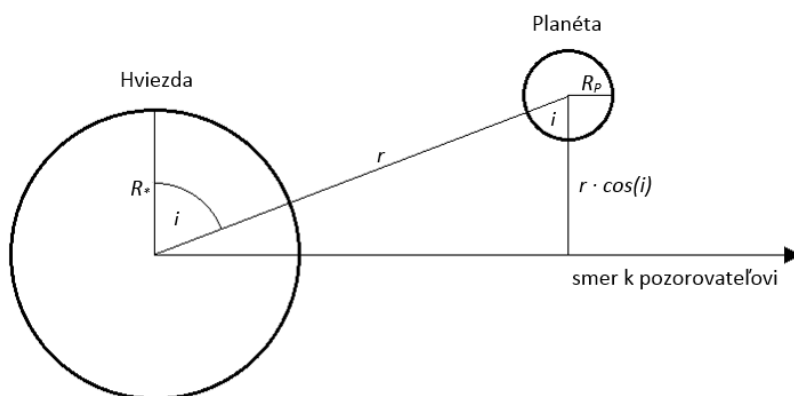
Pomocou fotometrickej metódy dokážeme určiť niektoré parametre exoplanéty a to napríklad jej obežnú dobu, vzdialenosť od hviezdy, sklon dráhy exoplanéty alebo aj polomer, pričom však musíme vedieť polomer hviezdy. V kombinácii so spektroskopickou metódou môžeme spoľahlivo určiť napríklad hmotnosť planéty, následne aj jej hustotu a určiť o aký typ planéty sa jedná. Ako výhodu tejto metódy môžeme vnímať aj fakt, že za dobrých pozorovacích podmienok nám k zaznamenaniu poklesu jasnosti pri tranzite postačujú aj malé ďalekohľady. Je vhodná pre detekciu planét, ktoré nazývame horúce Jupitery. Sú to planéty, ktoré majú relatívne veľkú hmotnosť, podobnú hmotnosti Jupitera, no nachádzajú sa podstatne bližšie k svojej materskej hviezde ako Jupiter k Slnku v našej slnečnej sústave.

3.1.1 Základná geometria

Predstavme si exoplanétu o polomere R_P a hmotnosti M_P , ktorá obieha okolo hviezdy s polomerom R_* a hmotnosťou M_* . Pri fotometrickej metóde je podstatné, aby sa exoplanéta obiehajúca okolo pozorovanej hviezdy pohybovala po obežnej dráhe, ktorá sa nachádza v tesnej blízkosti spojnice vedenej od pozorovateľa smerom k hviezde. Na obrázku 3.2 môžeme vidieť, že k tranzitu dochádza práve pri splnení podmienky:

$$r \cdot \cos(i) \leq R_P + R_*, \quad (3.1)$$

kde uhol i sa nazýva inklinácia a r predstavuje vzdialenosť planéty od jej materskej hviezdy.



Obr. 3.2: Obrázok zobrazuje parametre využívané pri výpočtoch nastania tranzitu.

Hodnota $\cos(i)$ sa môže pohybovať v intervale hodnôt od 0 až po 1. Pri predpoklade, že

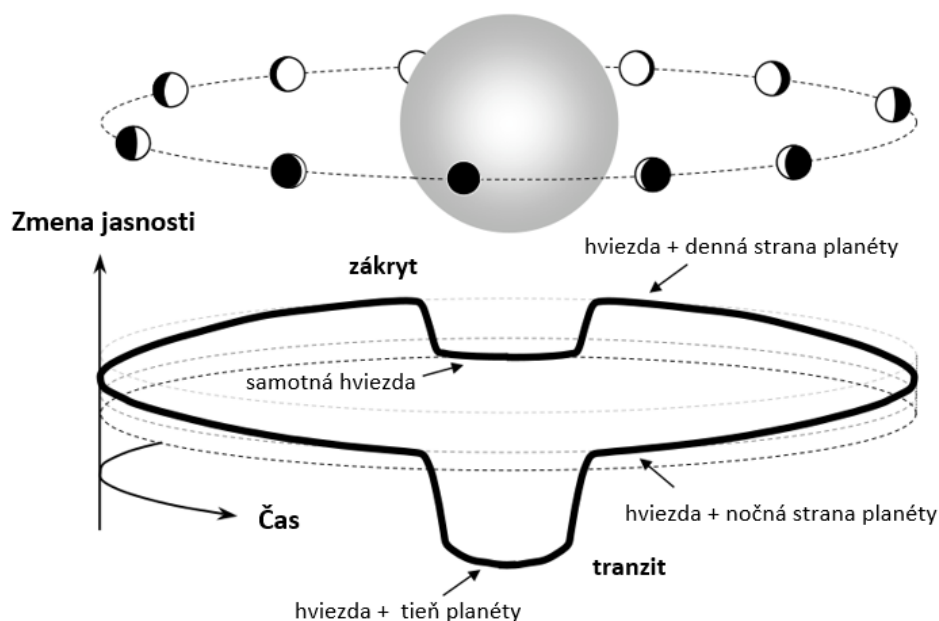
$R_p \ll R_s$, môžeme získať pravdepodobnosť nastania tranzitu P_T využitím rovnice:

$$P_T = \frac{R_p + R_*}{r} = \frac{R_*}{r}. \quad (3.2)$$

Z toho vyplýva, že väčšiu pravdepodobnosť pozorovania tranzitu máme pri planétach, ktoré sa nachádzajú relatívne blízko pri ich materských hviezdach, tým pádom majú aj kratšiu obežnú dobu.

3.1.2 Svetelná krivka

Za svetelnú krivku považujeme grafické vyjadrenie zmien jasnosti hviezdy na čas. Na zvislú os sa zvyčajne vynáša hviezdna veľkosť v magnitudách a na vodorovnú os čas. Ak planéta prechádza pred hviezdou a dôjde k tranzitu, môžeme zaznamenať pokles jasnosti hviezdy. Tento pokles je však celkom malý a strata svetla prichádzajúceho od hviezdy býva približne len 1% ak okolo hviezdy obieha planéta veľkosti Jupiteru a 0,01% pre planéty podobné veľkosti Zeme. Pokles jasnosti meriame aj pri okultácii, avšak v tomto prípade je menší ako pri tranzite. Zmeny svetelného toku pri týchto dejoch sú znázornené na obrázku 3.3. Zo vzhľadu svetelnej krivky môžeme určiť niektoré informácie týkajúce sa parametrov hviezdy.



Obr. 3.3: Zmeny svetelného toku pri obehu planéty okolo svojej materskej hviezdy.[Upravené z: [10]]

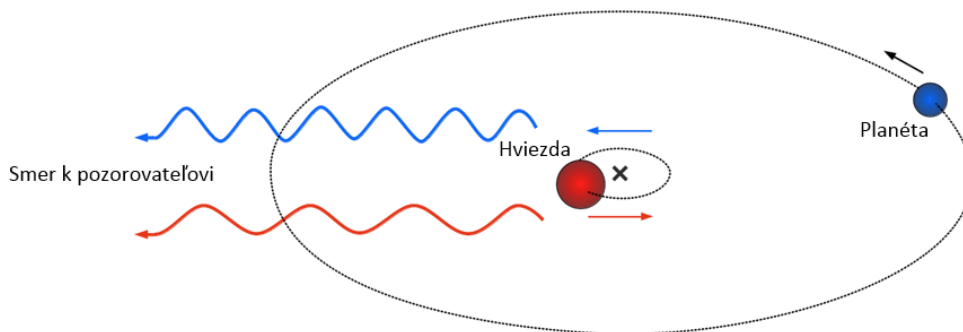
3.1.3 Okrajové stmernenie

Pri spracovaní svetelných kriviek musíme brať v úvahu okrajové stmernenie hviezdy. Je to jav, ktorý vzniká v dôsledku poklesu teploty smerom od centra hviezdy k jej okraju.

Stred disku sa nám javí jasnejší, keďže vidíme do hlbších a teda teplejších vrstiev. Naopak z okraju hviezdy k nám prichádza žiarenie z vyšších a chladnejších vrstiev, preto okraj disku vnímame ako tmavší. Vplyv okrajového stemnenia na tvar svetelnej krivky sa nám prejaví pri tranzite, ako môžeme vidieť na obrázku 3.3. Ak by hviezda žiarila zo všetkých miest rovnako, tak počas prechodu planéty pred hviezdou by sme zaznamenali konštantný tok žiarenia, podobne ako zaznamenávame pri zákryte. Tak tomu však nie je a teda vo fáze, kedy sa celá planéta dostane pred hviezdu začne jasnosť mierne klesať, keďže planéta postupne zakrýva jasnejšie časti hviezdy. Po prechode centrom hviezdy planéta postupuje ďalej, kde zakrýva menej jasné časti hviezdy a teda jasnosť začne mierne stúpať.

3.2 Spektroskopická metóda

Spektroskopická metóda alebo inak nazývaná metóda radiálnych rýchlostí využíva fakt, že hviezda a planéta obieha okolo spoločného ťažiska. Pri tejto metóde sa sleduje zmena radiálnej rýchlosti hviezdy, ktorá sa za vhodných podmienok voči Zemi striedavo vzdiaľuje a približuje. Takýto pohyb hviezdy sa prejaví v posune jej spektrálnych čiar v dôsledku Dopplerovho javu, pri ktorom majú vzdiaľujúce sa objekty menšie frekvencie a väčšie vlnové dĺžky, zatiaľ čo objekty ktoré sa približujú majú väčšie frekvencie a menšie vlnové dĺžky, ako je znázornené na obrázku 3.4. Ak sa k nám teda planéta približuje a zároveň sa hviezda vzdiaľuje, jej spektrálne čiary vykazujú červený posuv. V prípade keď sa od nás planéta vzdiaľuje a hviezda sa približuje, absorpčné čiary v spektre sú posunuté k jeho modrému koncu.



Obr. 3.4: Ilustrácia metódy radiálnej rýchlosti pre detekciu extrasolárnych planét. [Upravené z: [E9]]

Vynesením závislosti zmeny polohy spektrálnych čiar na čase získame krivku radiálnych rýchlostí. Z tejto krivky môžeme odhadnúť niektoré parametre exoplanéty a to napríklad jej obežnú dobu, výstrednosť jej dráhy alebo vzdialenosť od materskej hviezdy. Čo samotným pozorovaním zmien radiálnych rýchlostí určiť nevieme je sklon obežnej dráhy exoplanéty, ktorý je taktiež potrebný k určeniu jej hmotnosti. Kvôli neznalosti sklonu obežnej dráhy vieme určiť len spodné odhady hmotnosti planéty a preto je vhodné spektroskopickú metódu kombinovať s metódou fotometrickou. Pomocou fotometrickej metódy už vieme dobre určiť sklon obežnej dráhy a kombináciou oboch metód sa dostaneme k hmotnosti planéty.[E11]

Metóda radiálnych rýchlostí je veľmi úspešnou metódou, avšak v dôsledku nízkej

hmotnosti planét voči ich materským hviezdám sú aj zmeny radiálnych rýchlostí hviezd veľmi malé. Preto je meranie z hľadiska presnosti a času veľmi náročné. Napríklad pri Jupiteri je vo vzťahu k Slnku amplitúda zmeny jeho radiálnej rýchlosti len 12,5 m/s. V súčasnej dobe však už existujú moderné spektrometre, ktoré umožňujú zistiť radiálnu rýchlosť objektu s presnosťou až 1 m/s (ako je napríklad HARPS – High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher na observatóriu ESO v La Silla v Chile). [E10] Pri tejto metóde je vhodné, aby obežná rovina planéty ležala v zornom uhle pozorovateľa, pretože vtedy sú zmeny radiálnej rýchlosti maximálne. Naopak, keď je obežná rovina kolmá na zorný lúč, nebudeme pozorovať žiadne zmeny radiálnej rýchlosti hviezdy.

3.3 Stručný opis ďalších metód

3.3.1 Astrometrická metóda

Astrometrická metóda spočíva v určení presnej polohy hviezdy na oblohe a skúma, ako sa táto poloha časom mení. Pre pozorovanú hviezdu sa jej poloha určuje voči okolitým hviezdám, o ktorých sa predpokladá, že sa nachádzajú relatívne ďaleko a sú bez ďalších sprievodných telies. Tieto hviezdy teda vytvárajú mriežku, voči ktorej následne porovnáваме trajektóriu skúmanej hviezdy. Pri hľadaní extrasolárnej planéty síce nepozorujeme planétu priamo, no môžeme pozorovať jej gravitačný vplyv na hviezdu ako aj pri spektroskopickú metóde. Z gravitačného zákona vyplýva, že planéta neobíha okolo hviezdy, ale sústava hviezdy a planéty obieha okolo spoločného ťažiska. Môžeme povedať, že ťažisko sa priestorom Galaxie pohybuje rovnomerne, priamočiary. Pohyb „osamotených“ hviezd bude taktiež rovnomerný a priamočiary. Ak sa však pri pozorovanej hviezde nachádza planéta, tak jej vplyvom pozorujeme pohyb vlnitý.

Problémom pri tejto metóde je, že exoplanéty sú oproti ich materským hviezdám oveľa menej hmotnejšie, v dôsledku čoho sa hviezda zo svojho ťažiska vychýli len nepatrne a pozemské ďalekohľady nedosahujú potrebnú presnosť merania. Výhodou tejto metódy je, že je oveľa citlivejšia na planéty, ktoré sa nachádzajú relatívne ďaleko od svojej materskej hviezdy.

3.3.2 Metóda gravitačných mikrošošoviek

Metóda gravitačných mikrošošoviek je založená na poznatku, že v okolí veľmi hmotných telies je podľa všeobecnej teórie relativity priestor ohýbaný gravitáciou. Ak teda pred nejakou vzdialenou hviezdou prejde veľmi hmotné teleso, je dráha svetelných lúčov prichádzajúcich od vzdialenej hviezdy v dôsledku relativistických efektov zakrivená. Toto hmotné teleso nám môže slúžiť ako gravitačná šošovka a spôsobí dočasný nárast jasnosti hviezdy v pozadí. Ak okolo tohto telesa obieha ešte aj planéta, ktorá taktiež prejde pred vzdialenou hviezdou, tak sa jej prítomnosť opäť prejaví krátkodobým zjasnením pozorovanej hviezdy. Za gravitačnú mikrošošovku považujeme teda materskú hviezdu s exoplanétou, ktoré sa pri pozorovaní nachádzajú presne na pomyselnú priamku pozorovateľ – hmotné teleso – vzdialená hviezda.

V dôsledku toho, že sa telesá vo vesmíre pohybujú, trvá zjasnenie vzdialenej hviezdy len krátku dobu, maximálne niekoľko týždňov. Nevýhodou metódy gravitačných mikrošo-

šoviek je aj fakt, že telesá vo vesmíre už nikdy nebudú v rovnakom zoskupení ako pri danom pozorovaní, v dôsledku čoho nie je možné toto pozorovanie zopakovať. Preto je nutné exoplanéty objavené pomocou tejto metódy potvrdiť využitím iných metód. Za výhodou tejto metódy môžeme považovať to, že nám umožňuje detekovať aj planéty s nízkou hmotnosťou vo veľkej vzdialenosti od ich materskej hviezdy ale aj od nás.

Kapitola 4

Parametre exoplanét

Odlíšné metódy detekcie extrasolárnych planét nám umožňujú získať rôzne parametre exoplanét. Preto je vhodné pri určovaní týchto parametrov metódy detekcie kombinovať, čím získame viac presnejších výsledkov. V tejto kapitole je opísané, akým spôsobom môžeme získať niektoré z parametrov exoplanét, pričom predpokladáme, že planéty obiehajú okolo hviezd po eliptických trajektóriach, málo odlišných od kružníc a zároveň poznáme niektoré z parametrov materskej hviezdy.

4.1 Polomer planéty

Ak je rovina obehu exoplanéty okolo jej materskej hviezdy vhodne orientovaná smerom k pozorovateľovi, tak pri meraní jasnosti tejto hviezdy dochádza k periodickým poklesom meranej jasnosti a to pri nastaní tranzitu aj okultácie. Práve z hĺbky tranzitu a známeho polomeru hviezdy je možné zistiť polomer planéty, prípadne zo známeho polomeru planéty R_P následne polomer hviezdy R_* a to pomocou vzťahu:

$$\delta = \left(\frac{\Delta L}{L_*} \right) = \left(\frac{L_* - L_T}{L_*} \right) = \left(\frac{\pi R_*^2 F_* - (\pi R_*^2 F_* - \pi R_P^2 F_*)}{\pi R_*^2 F_*} \right) = \left(\frac{R_P}{R_*} \right)^2, \quad (4.1)$$

kde δ je hĺbka tranzitu, ΔL pozorovaná zmena svietivosti behom tranzitu, L_* meraná svietivosť samotnej hviezdy a L_T je svietivosť meraná vo chvíli, keď sa celá planéta dostane pred hviezdu. [E12] Svietivosť hviezdy sa inak označuje ako luminozita alebo žiarivý výkon hviezdy a predstavuje množstvo energie vyžiarenej hviezdou za jednu sekundu. Veličina F_* sa nazýva hustota žiarivého toku alebo inak bolometrická jasnosť, čo je vlastne tok žiarenia, ktorý prejde jedným metrom štvorcovým plochy kolmej na smer dopadajúcich lúčov za jednu sekundu. [8]

Pri predpoklade, že $R_P \ll R_*$ môžeme písať: $(R_P + R_*) \approx R_*$. Polomer hviezdy vieme odhadnúť zo spektrálneho typu hviezdy. Za predpokladu, že poznáme hodnotu hĺbky tranzitu a polomeru hviezdy, vieme odhadnúť polomer planéty následovne:

$$R_P = R_* \sqrt{\delta}. \quad (4.2)$$

Rovnica 4.1 nám umožňuje vypočítať hĺbku tranzitu svetelnej krivky, ktorú by mohli pozorovať naši hypotetickí mimozemskí astronómovia pre každú planétu našej slnečnej sústavy. Napríklad Zem prechádzajúca pred Slnkom by spôsobila pokles:

$$\delta = \left(\frac{R_Z}{R_S}\right)^2 = \left(\frac{6,4 \cdot 10^3 \text{ km}}{7,0 \cdot 10^5 \text{ km}}\right)^2 = 8 \cdot 10^{-5}, \quad (4.3)$$

kde sme za R_Z dosadili približnú hodnotu polomeru Zeme a za R_S hodnotu polomeru nášeho Slnka. Rovnakým spôsobom môžeme vypočítať pokles, ktorý by spôsobil prechod Jupiteru pred Slnkom:

$$\delta = \left(\frac{R_J}{R_S}\right)^2 = \left(\frac{7,0 \cdot 10^4 \text{ km}}{7,0 \cdot 10^5 \text{ km}}\right)^2 = 1 \cdot 10^{-2}, \quad (4.4)$$

kde R_J je hodnota polomeru planéty Jupiter. Z výsledkov môžeme usúdiť, že obrovské planéty, veľkosťou podobné Jupiteru spôsobujú pokles približne o 1% v svetelnej krivke materskej hviezdy, zatiaľ čo planéty podobné Zemi spôsobujú pokles 0,01%. Hĺbka tranzitu pre terestriálnu planétu je 100 krát menšia a vyžaduje fotometrickú presnosť lepšiu ako 10^{-4} . Toto je nemožné dosiahnuť spoľahlivo pomocou pozemských teleskopov kvôli neustále sa meniacej priehľadnosti zemskej atmosféry. Z tohto dôvodu je oveľa väčší počet objavených tranzitných jovialných planét oproti malému počtu terestriálnych. [Zdroj: [6]]

4.2 Veľká poloosa

Čas, za ktorý planéta obehne okolo hviezdy práve raz, teda perióda obehu P , veľká poloosa obežnej dráhy a , hmotnosť planéty M_P a hmotnosť hviezdy M_* sú zviazané tretím Keplerovým zákonom:

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G(M_P + M_*)}{4\pi^2}, \quad (4.5)$$

kde G je gravitačná konštanta. [E12] Ak chceme určiť hodnotu veľkej poloosi obežnej dráhy, potrebujeme vedieť periódu obehu planéty, hmotnosť planéty a hmotnosť hviezdy. Periódu môžeme určiť zo vzhladu svetelnej krivky veľmi jednoducho a to napríklad odčítaním časov dvoch po sebe nasledujúcich miním poklesu jasnosti – tranzitov. Vieme, že hmotnosť planéty je oveľa menšia ako hmotnosť hviezdy, $M_P \ll M_*$, a preto ju môžeme vo výpočte zanedbať. Zo znalosti spektrálneho typu hviezdy sa dá celkom spoľahlivo určiť aj hmotnosť hviezdy. Po zistení všetkých potrebných parametrov môžeme hodnotu veľkej poloosi vypočítať pomocou rovnice:

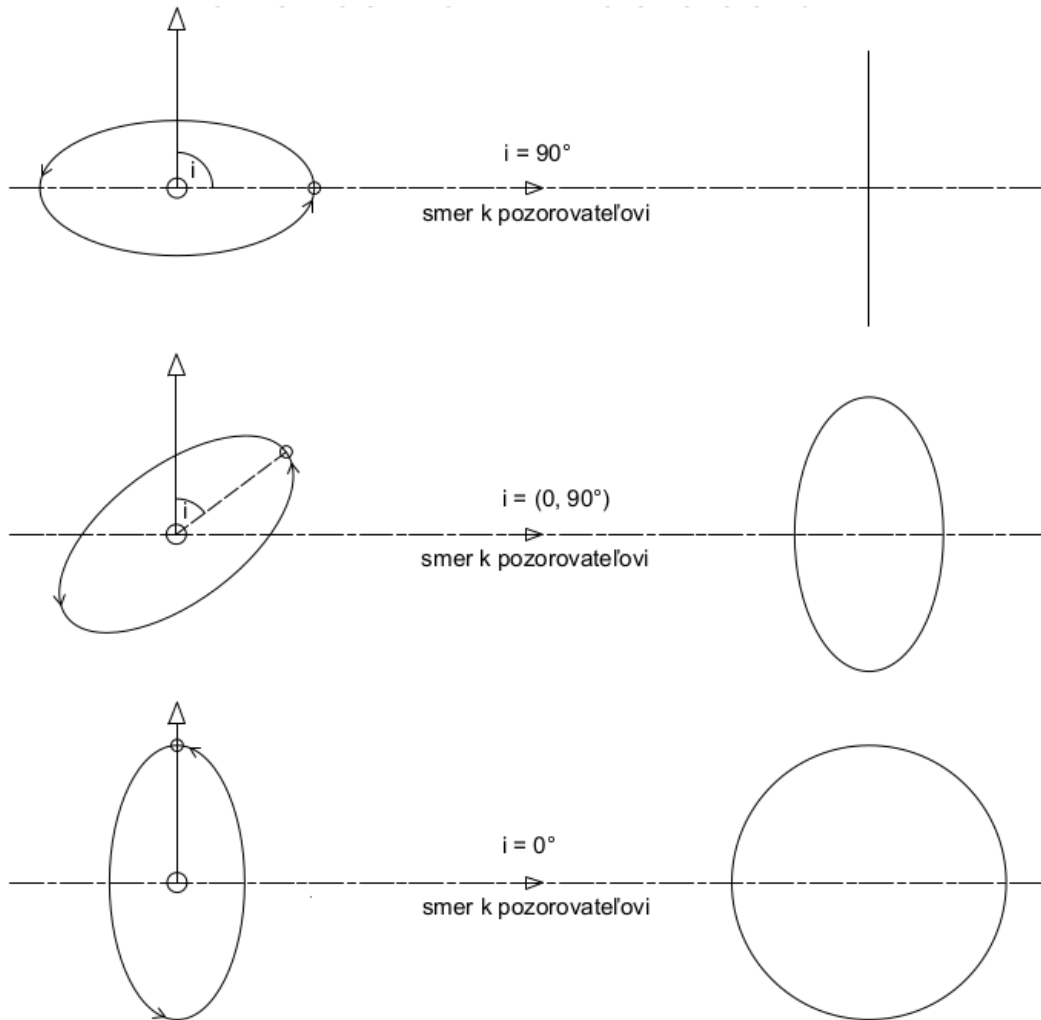
$$a = \sqrt[3]{GM_* \left(\frac{P}{2\pi}\right)^2}. \quad (4.6)$$

4.3 Inklinácia

Inklinácia alebo inklináčny uhol nám dáva informáciu o tom, ako je rovina obežnej dráhy exoplanéty orientovaná voči pozorovateľovi. Je to uhol, ktorý zvierajú orbitálna rovina exoplanéty s rovinou kolmou na smer k pozorovateľovi, ako je znázornené na obrázku 3.2.

Ak je hodnota inklináčného uhlu $i = 0^\circ$, tak sa pozeráme kolmo na rovinu obehu planéty a teoreticky pozorujeme jej skutočnú trajektóriu. Pri hodnote $i = 90^\circ$ je orbitálna

rovina exoplanéty orientovaná smerom k pozorovateľovi a jej obežná rovina sa nám javí ako priamka. V prípade, ak inklináčny uhol nadobúda hodnoty $i = (0, 90^\circ)$, tak sa nám trajektória obehu exoplanéty javí ako eliptická, pričom jej skutočný tvar je sploštený. Orientácia orbitálnej roviny a tvar trajektórie exoplanéty vzhľadom k pozorovateľovi pri rôznych hodnotách inklinácie sú znázornené na obrázku 4.1.



Obr. 4.1: Hodnoty inklináčného uhlu a pozorovaný tvar trajektórie exoplanéty (na obrázku vpravo) pri odlišnej orientácii orbitálnej roviny voči pozorovateľovi (na obrázku vľavo). [Upravené z: [6]]

S inklináciou súvisí aj impaktný parameter, čo je vlastne vertikálna vzdialenosť medzi centrom planéty a centrom hviezdy pri nastaní stredu tranzitu. Táto vzdialenosť je rovná:

$$b = \frac{a \cos(i)}{R_*}, \quad (4.7)$$

kde a je veľká poloosa a R_* je polomer hviezdy. [6]

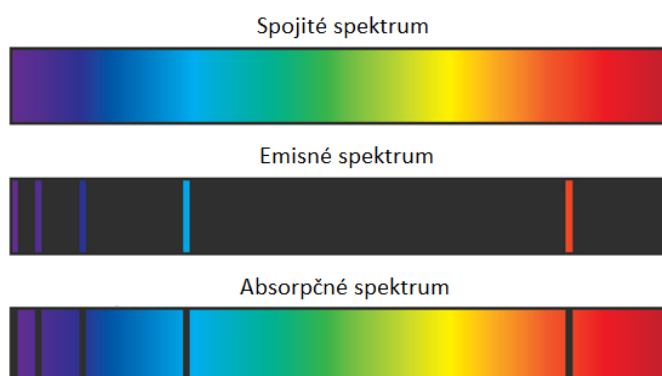
Kapitola 5

Spektrálna charakterizácia hviezd

Veľa podstatných informácií o hviezdach sa môžeme dozvedieť aj z ich pozorovaného spektra¹ a to napríklad ich chemické zloženie, povrchovú teplotu, hustotu alebo aj ich radiálnu rýchlosť. V astronómii sa na získanie spektra hviezd využíva prístroj, ktorý sa nazýva spektrograf.

5.1 Spektrá hviezd

Žiarenie z hviezd, ktoré k nám prichádza pochádza z jej fotosféry, čo je pre nás viditeľná vrstva hviezd. Vo hviezde vzniká spojité spektrum žiarenia, ktoré je následne pri prechode plynom v okolí hviezd, ktorý je málo chladnejší ako jej povrch, čiastočne pohltené – absorbované. To, aká časť žiarenia bude pohltená určujú prvky, z ktorých sa skladá atmosféra hviezd. Pohltené žiarenie zodpovedá vlnovým dĺžkam, ktoré vznikajú pri prechode medzi stacionárnymi stavmi atómov týchto prvkov. Pri skúmaní spektra žiarenia prichádzajúceho od hviezd pozorujeme v miestach odpovedajúcim vlnovým dĺžkam jeho pohltenej časti tmavé čiary, nazývané aj absorpčné čiary. V spektrách hviezd však môžeme pozorovať aj emisné, svetlé čiary a to vtedy, ak žiarenie prechádza cez plyn, ktorý je teplejší ako miesta kde žiarenie vzniká. [E14]



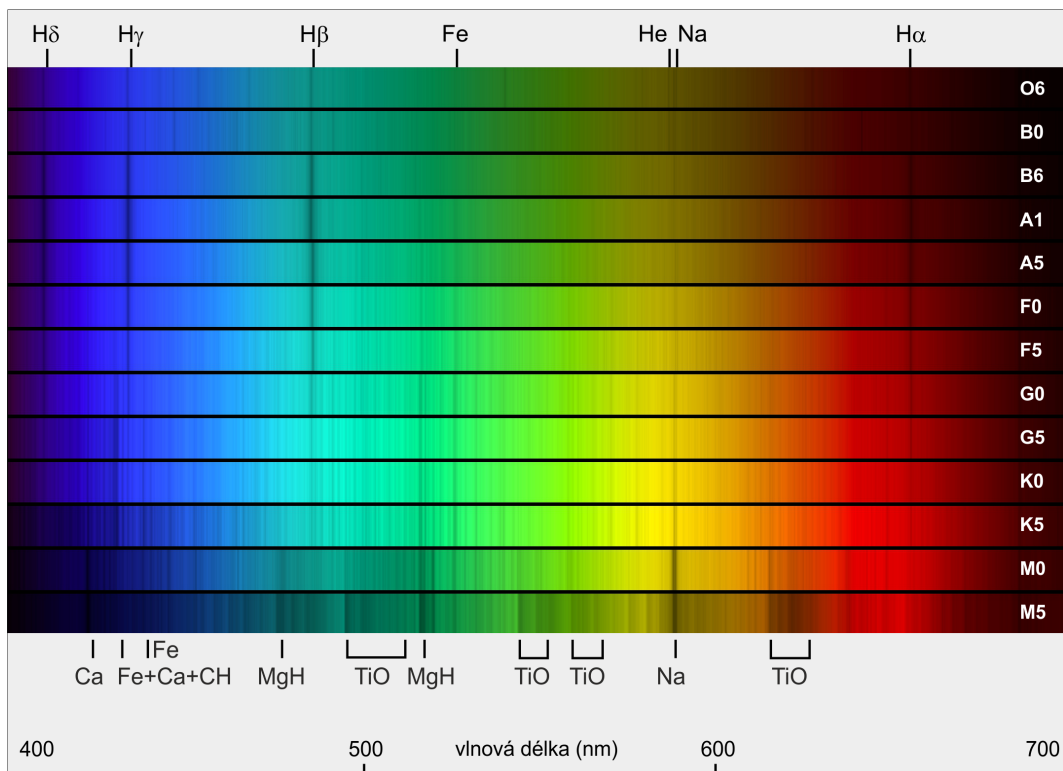
Obr. 5.1: Ukážka spojitého, absorpčného a emisného spektra. [Upravené z: [E16]]

¹Spektrum je rozklad bieleho svetla na jednotlivé farebné zložky.

Už v minulosti si ľudia pri štúdiu hviezdnych spektier všimli, že niektoré z nich sú si podobné a absorpčné čiary vznikajú na približne rovnakých miestach. Hviezdy sa teda začali deliť do skupín na základe vzhľadu ich spektier. Tento spôsob delenia využívame aj dnes a nazýva sa Harvardská spektrálna klasifikácia. Podľa tejto klasifikácie sa hviezdy zaraďovali do spektrálnych tried od najteplejších po najchladnejšie a to v poradí: O, B, A, F, G, K, M. Neskôr sa zistilo, že tieto spektrálne triedy nestačia a napríklad pred triedu O bola pridaná ešte jedna spektrálna trieda pre extrémne teplé hviezdy s označením W. Taktiež boli objavené aj veľmi chladné hviezdy a tým pádom za triedu M boli pridané ďalšie spektrálne triedy s označením L a T. Existujú aj ďalšie spektrálne triedy, avšak patrí do nich veľmi malé množstvo hviezd, takže ich v práci spomínať nebudeme. Každú spektrálnu triedu ďalej rozdeľujeme na 10 podskupín a označujeme ich priradením čísla 0–9 ku konkrétnej spektrálnej triede. [E13] Napríklad hviezdám, ktoré sme skúmali v tejto práci priradujeme označenie F8.

5.1.1 Základná charakteristika jednotlivých typov hviezd

Spektrá hviezd odlišných spektrálnych typov sa líšia a to predovšetkým výskytom spektrálnych čiar na určitých miestach. Pre každý z týchto typov hviezd sú charakteristické spektrálne čiary na konkrétnych miestach daných vlnových dĺžok, ktoré súvisia hlavne s teplotou, atmosférou a chemickým zložením hviezd. Na obrázku 5.2 môžeme pre porovnanie vidieť, ako vyzerajú spektrá jednotlivých spektrálnych typov hviezd a taktiež vyznačené absorpčné čiary charakteristické pre jednotlivé typy.



Obr. 5.2: Spektrá jednotlivých spektrálnych tried. [Zdroj: [E13]]

V nasledujúcej tabuľke môžeme vidieť, ktoré spektrálne čiary prvkov a molekúl sú charakteristické pre jednotlivé spektrálne triedy hviezd, ich priemerné teploty a taktiež farbu, ktorá je im priradovaná.

Spektrálne triedy	Teplota	Farba	Vzhľad spektra
O	> 30000	Modrá	Čiary ionizovaného a neutrálneho hélia, slabé čiary vodíka
B	10000 - 30000	Modro - biela	Čiary neutrálneho hélia, silné čiary vodíka
A	7500 - 10000	Biela	Najsilnejšie čiary vodíka, slabé čiary ionizovaného vápnika a kovov (predovšetkým železa a magnézia)
F	6000 - 7500	Žltá - biela	Silné čiary vodíka a ionizovaného vápnika, slabé čiary sodíka, veľa čiar ionizovaných kovov
G	5200 - 6000	Žltá	Čiary vodíka slabnú, silné čiary ionizovaného vápnika, silné čiary sodíka, veľa čiar ionizovaných a neutrálnych kovov
K	3700 - 5200	Oranžová	Veľmi slabé čiary vodíka, silné čiary ionizovaného vápnika, silné čiary sodíka, veľa čiar ionizovaných a neutrálnych kovov
M	2400 - 3700	Červená	Silné čiary neutrálnych kovov a molekulových pásov, hlavne oxidu titánu

Tabuľka 5.1: [Upravené z: [E15]]

Kapitola 6

Spracovanie dát

6.1 Pozorovanie exoplanetárnych systémov

Pri určovaní parametrov extrasolárnych planét sme v tejto práci zvolili fotometrickú metódu, ktorá je veľmi úspešná pri hľadaní exoplanét a s jej využitím vieme určiť aj niektoré z parametrov týchto planét. Niektoré spôsoby získavania parametrov extrasolárnych planét sú opísané v predošlých kapitolách tejto práce. Výsledky, ktoré získame pomocou fotometrickej metódy môžu byť však ovplyvnené napríklad pozorovacími podmienkami, teda počasím alebo miestom odkiaľ daný objekt pozorujeme a taktiež aj využitým technickým vybavením. V tejto bakalárskej práci sa venujeme dvom tranzitným exoplanetárnym systémom, ktoré boli pozorované Ing. Pavlom Cagašom, ktorý je členom Sekcie premenných hviezd a exoplanét Českej astronomickej spoločnosti. Pozorovanie prebiehalo na súkromnej hviezdárni v Českej republike, neďaleko Zlína, ďalekohľadom s 30 centimetrovým priemerom (Thirty CentiMeter Telescope). Ďalekohľad je navrhnutý tak, aby pokrýval zorné pole s priemerom 50 milimetrov s minimálnou vinetáciou².

Pavel Cagaš taktiež spracoval aj získané data a to pomocou softvéru SIPS (Scientific Image Processing System). Softvér Sips a hlavne jeho fotometrický nástroj je navrhnutý tak, aby umožnil poloautomatizované spracovanie veľkého počtu obrázkov vo vysokom rozlíšení a uloženie svetelných kriviek všetkých zaujímavých hviezd v zornom poli. Funkčnosť softvérového balíka SIPS je však omnoho širšia ako samotné spracovanie fotometriou. Tento softvér bol pôvodne navrhnutý na prácu s fotoaparátom a riadenie získavania snímok (binning, riadenie filtračného kolieska, definície hlavičiek FITS,...). Boli pridané funkcie na kalibráciu obrazu a taktiež aj matematické operácie na vytvorenie kalibračného súboru (priemer, medián,..), nasledované ďalšími nástrojmi ako napríklad porovnávanie snímok. Momentálne je softvér SIPS výkonný balík schopný riadiť celé pozorovanie a spracovávať získané obrázky. [E17]

²Vinetácia je strata jasnosti na rohoch alebo extrémnych okrajoch snímku v porovnaní s jej stredom. Vzniká hlavne v dôsledku toho, že na okrajové časti snímku nedopadá pri fotografovaní dostatok svetla.

6.2 Stručný postup práce pri spracovaní dát

6.2.1 Výpočet parametrov podľa spektrálneho typu hviezd

Podľa určeného spektrálneho typu hviezdy som pomocou tabuľky 6.1 približných parametrov priradeným ku konkrétnej triede hviezd bola schopná určiť približné parametre materskej hviezdy. Tieto hodnoty parametrov môžeme použiť len pre hviezdy hlavnej postupnosti. Od týchto parametrov sa odvíjal samotný začiatok určovania vstupných parametrov pre fitovanie exoplanetárnych systémov, napríklad ich približný polomer, inklinácia a ďalšie z ich charakteristík. Pomocou Keplerovho zákona som vypočítala veľkú poloosu kandidáta na exoplanétu, z poklesu jasnosti a súčasne určeného spektrálneho typu hviezdy som vedela určiť približný polomer tohto kandidáta.

Spektrálne triedy	$\frac{T_{ef}}{K}$	$\frac{M}{M_{\odot}}$	$\frac{R}{R_{\odot}}$	$\log\left(\frac{L}{L_{\odot}}\right)$	$\log\left(\frac{g}{\text{cm s}^{-2}}\right)$	$\frac{\rho}{\text{kg m}^{-3}}$
O6	42000	32,0	9,90	5,40	3,95	47
O8	36000	22,0	7,50	4,90	4,00	73
B0	30000	14,5	5,80	4,40	4,05	100
B2	23000	8,60	4,30	3,70	4,10	150
B5	15500	4,40	3,00	2,70	4,10	230
A0	9400	2,25	2,10	1,50	4,15	350
A5	8100	1,85	1,85	1,20	4,20	420
F0	7200	1,50	1,55	0,75	4,25	560
F5	6450	1,35	1,40	0,50	4,25	660
G0	5900	1,15	1,25	0,25	4,30	830
G5	5600	1,05	1,15	0,10	4,35	960
K0	5200	0,90	1,00	-0,15	4,40	1300
K5	4300	0,60	0,70	-0,85	4,55	2700
M0	3900	0,45	0,50	-1,25	4,65	4500
M5	3250	0,25	0,30	-2,00	4,90	13000
M8	2600	0,10	0,15	-3,20	5,25	75000

Tabuľka 6.1: Charakteristické parametre k jednotlivým spektrálnym typom hviezd. [Upravené z:[8]]

6.2.2 Fitovanie využitím Gaussovských procesov

Dáta svetelných kriviek exoplanét boli v tejto práci nafitované pomocou kódu vytvoreného v programovacom jazyku Python a to využitím Gaussovských procesov, v skratke GP.

Táto metóda je založená na náhodných procesoch, pričom ľubovoľná konečná podmnožina náhodných premenných má spoločné gaussovské rozdelenie. Model GP je súborom deterministickej zložky – „mean function“ a náhodnej zložky – „kernel function“. Pri fitovaní svetelných kriviek využitím Gaussovských procesov je potrebné priradiť určité parametre a hyperparametre týmto zložkám. Takzvanej „mean function“ alebo tranzitnej funkcii priradzujeme pole vstupných parametrov opisujúcich svetelnú krivku. Jedná sa o prvých 9 parametrov, ktoré sú definované v tabuľkách 6.4 a 6.9. „Kernel function“, teda funkcii šumu priradzujeme zasa hyperparametre, konkrétne škálovú výšku, ktorá opisuje ako sa data hýbu na y -ovej osi, škálovú dĺžku, popisujúcu vývoj dát na x -ovej osi a fotónový šum. Tieto hyperparametre sú definované na spodných riadkoch spomínaných tabuliek. Pri fitovaní svetelnej krivky tranzitujúceho exoplanetárneho systému je možné z výstupných parametrov programu určiť niektoré z parametrov opisujúcich tento systém. Hodnoty fitovacích parametrov a ich neistot sú nakoniec určené pomocou MCMC (Markov Chain Monte Carlo) pravdepodobnostnej analýzy. Táto fitovacia rutina svetelných kriviek je podrobnejšie opísaná v materiáloch Gibson et al. 2013 ([3], [4]) and Gibson 2014 ([5]) [E18].

6.3 Získané výsledky

6.3.1 var 91 Aql

Prvý zo študovaných kandidátov na exoplanétu v tejto práci sa nachádza pri hviezde, ktorá nesie dočasné, interné označenie Var91 Aql, z prehliadky TCMT. Táto hviezda má svoje označenie aj v katalógoch UCAC4 a Gaia DR2, uvedené v tabuľke 6.2. Kandidát na exoplanétu pri tejto hviezde bol prvý krát pozorovaný 29.9.2011, zatiaľčo posledné pozorovanie prebiehalo 19.7.2017 a pozorovacích nocí bolo 42, ako uvádza Ing. Pavel Cagaš na svojich stránkach. Taktiež uvádza aj niektoré základné informácie o hviezde a to napríklad jej polohu, pozorovanú hviezdnu veľkosť, periódu, čas pozorovaného minima a zároveň uvádza aj spektrálny typ hviezdy ako F8V. Tieto informácie boli kľúčové pri určovaní vstupných parametrov pre fitovanie a sú uvedené v tabuľke 6.2.

Tabuľka 6.2: Základné parametre hviezdy.

UCAC4 id.	516 – 118984
Gaia DR2 id.	4305052944368577024
RA [K]	19 ^h 55 ^m 24,32 ^s
DEC	13°11'06,0''
m_V	12,35
P [d]	1,618233
t_{\min} [HJD]	2456204,340

Zo znalosti spektrálneho typu hviezdy som určila hodnotu efektívnej teploty T_{ef} , hmotnosti M , polomeru R a logaritmu gravitačného zrýchlenia $\log g$ pomocou tabuľky 6.1 a to spriemerovaním uvedených hodnôt pre hviezdy typu F5 a G0, keďže typ F8 sa v tabuľke nevyskytoval. Ďalej som z Keplerovho zákona 4.6 dopočítala hodnotu veľkej poloosi a

zo získaných dát som odhadla pokles svietivosti. Hodnoty, ktoré som získala, sú uvedené v tabuľke 6.3.

Tabuľka 6.3: Základné parametre systému.

T_{ef} [K]	6175^{+275}_{-275}
M [M_{\odot}]	$1,25^{+0,10}_{-0,10}$
R [R_{\odot}]	$1,325^{+0,075}_{-0,075}$
$\log(g)$ [cm s^{-2}]	$4,275^{+0,025}_{-0,025}$
a [au]	$0,029^{+0,001}_{-0,001}$
$\sqrt{\delta}$	$0,1265^{+0,0010}_{-0,0010}$

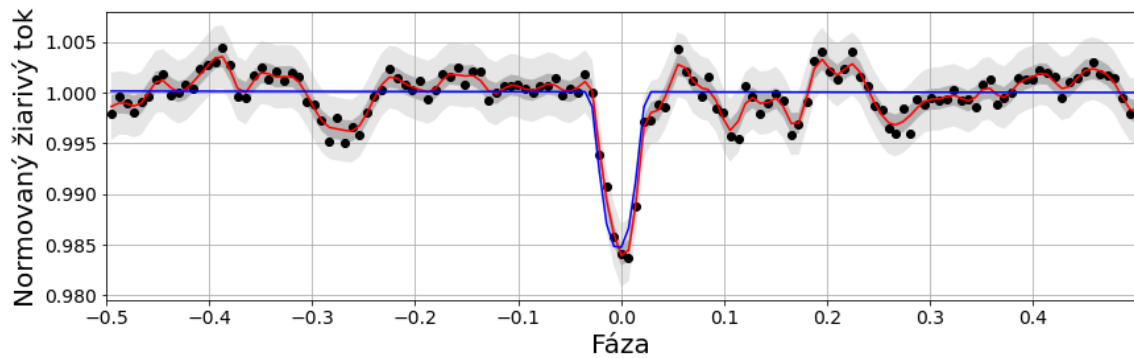
Z dát som vytvorila fázovú svetelnú krivku, kde je stredu tranzitu, s fázou na x-ovej osi priradená hodnota 0. Na začiatku fitovania bolo potrebné určiť 9 vstupných parametrov a 3 hyperparametre, ktoré som buď už získala v predošlých výpočtoch alebo som ich pomocou získaných hodnôt dopočítala. Parametre a hyperparametre, spoločne s ich chybami sú popísané v tabuľke 6.4.

Tabuľka 6.4: Vstupné parametre využité pri fitovaní.

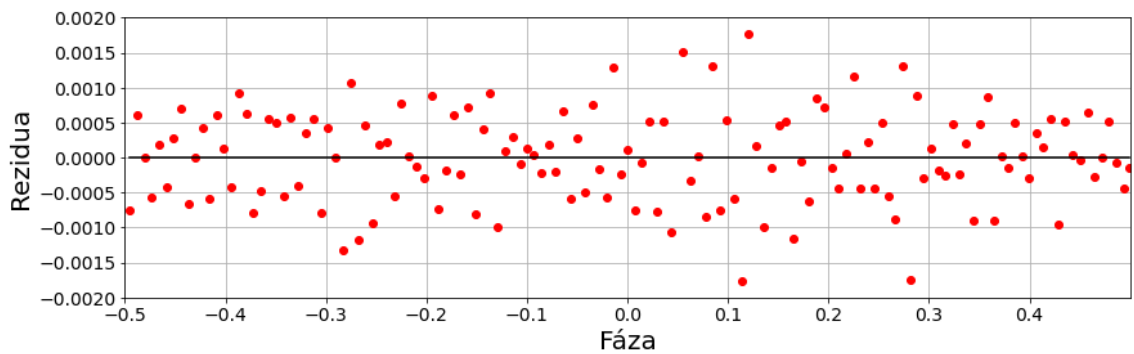
T_0	$0,000^{+0,001}_{-0,001}$	Stred – minimum tranzitu
P	1,618233	Periódka obehu planéty – je zafixovaná
a/R_*	$4,716^{+0,001}_{-0,001}$	Veľká poloosa v polomeroch hviezdy
p	$0,1265^{+0,0010}_{-0,0010}$	Odmocnina z tranzitu – pomer R_p a R_*
b	$0,819^{+0,001}_{-0,001}$	Impaktný parameter
c_1	$0,5386^{+0,0010}_{-0,0010}$	Prvý koeficient okrajového stemnenia
c_2	$0,133^{+0,001}_{-0,001}$	Druhý koeficient okrajového stemnenia
f_{oot}	$1,000^{+0,001}_{-0,001}$	Tok mimo tranzit (normovaný na jednotku)
T_{grad}	$0,000^{+0,001}_{-0,001}$	Koeficient polynomu
ξ	$0,0033^{+0,0001}_{-0,0001}$	Škálová výška – height scale
η_t	$0,0300^{+0,0001}_{-0,0001}$	Škálová dĺžka – length scale
σ^2	$0,0011^{+0,0001}_{-0,0001}$	Fotónový šum – white noise

Je potrebné ešte spomenúť, že získané data som nabinovala na 10 minút, čo znamená, že celé meranie sa vlastne rozdelilo na 10-minútové úseky a z bodov, ktoré jednotlivé úseky obsahovali som získala ich spriemerovaním jeden bod. Je to vhodné robiť najmä z dôvodu zvyšovania pomeru signálu k šumu a taktiež aj z časového hľadiska, pretože menší počet bodov sa naťahuje oveľa rýchlejšie.

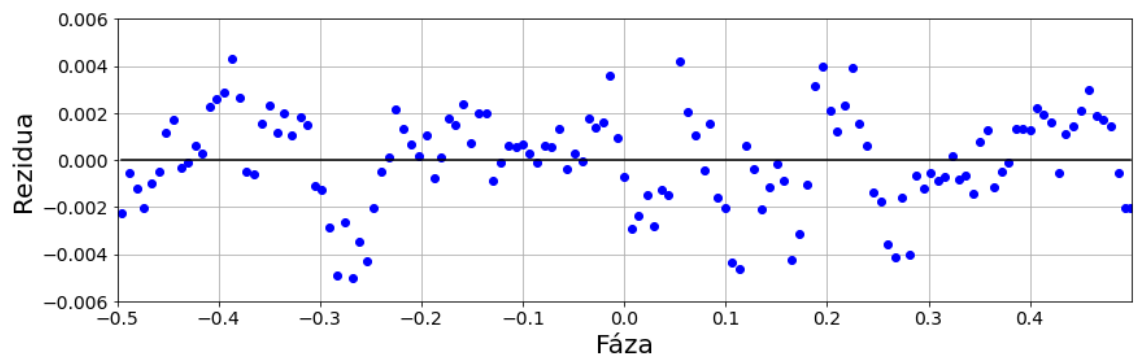
Vytvorila som O–C diagram, teda graf, kde som na y-ovú os vyniesla rozdiel pozorovaných a vypočítaných hodnôt (môžeme nazvať aj reziduá) a na x-ovú os čas, v tomto prípade fázu. Tento diagram som zostrojila pre model tranzitu vrátane šumu a zároveň aj pre model tranzitu bez prítomnosti šumu.



Obr. 6.1: Nafitovaná svetelná krivka hviezdy Var91 Aql. Čierne body predstavujú namerané data s 10-minútovým binom, červená krivka znázorňuje model tranzitu vrátane šumu, zatiaľčo modrá predstavuje model tranzitu bez prítomnosti šumu. Tmavosivá oblasť predstavuje oblasť 1σ , podobne svetlosivá 3σ .



Obr. 6.2: Reziďua modelu tranzitu vrátane šumu.

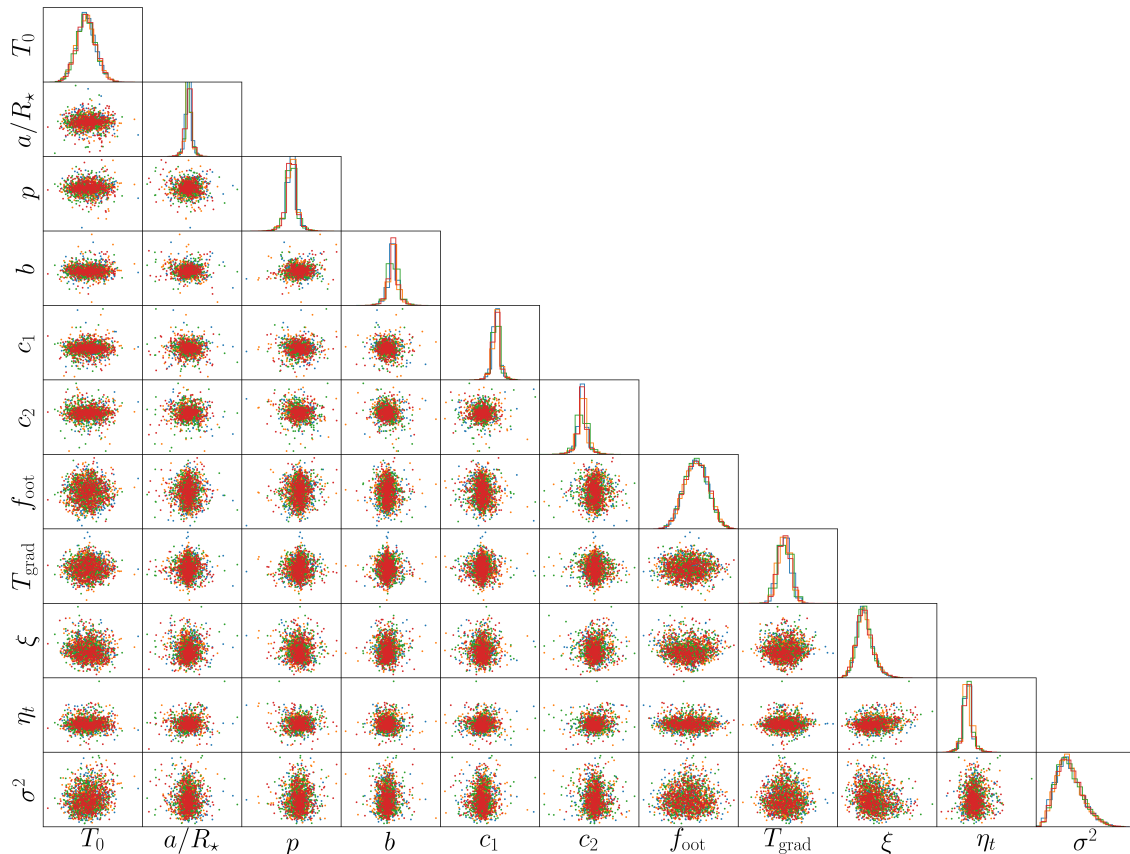


Obr. 6.3: Reziďua modelu tranzitu bez šumu.

V grafe 6.4 korelácií môžeme vidieť, ako na sebe jednotlivé parametre závisia, respektíve nezávisia. V jednotlivých okienkach sa nachádza náhodná vzorka 500 bodov z každého reťazca a na pravej strane sú znázornené histogramy parametrov.

Z výsledkov fitovania som určila niektoré z parametrov planéty, ktorá obieha okolo hviezdy Var91 Aql. Polomer kandidáta je určený z hĺbky tranzitu, pomocou rovnice 4.1, veľká poloosa je určená z výsledného parametru a/R_* a inklinácia vychádza z impaktného

parametra b , využitím rovnice 4.7. Hodnoty týchto parametrov sú zapísané v tabuľke 6.6. Jedná sa o planétu, ktorej polomer je rovný 117462 km, teda $1,68 R_J$ a svoju materskú hviezdu obieha vo vzdialenosti 0,0404 au. Inklínácia je rovná $82,26^\circ$, čo značí aj vysoká hodnota impaktného parametra, ktorý priamoúmerne závisí na kosínuse inklináčného uhla a perióda obehu je 1,618233 dňa. Zo zistených údajov môžeme usúdiť, že sa jedná o planétu, ktorú zaradzujeme do kategórie horúcich Jupiterov. Pre finálne potvrdenie o aký objekt sa jedná je potrebné však spektroskopické pozorovanie objektu, z ktorého môžeme prípadne dopočítať aj hmotnosť planéty a následne sa dostať k jej hustote.



Obr. 6.4: Graf korelácií.

Tabuľka 6.5: Výstupné parametre získané pri fitovaní.

T_0	$-0,0028528$	$+0,0016154$ $-0,0015009$
a/R_*	$6,5519583$	$+0,0034697$ $-0,0035143$
p	$0,1273089$	$+0,0033780$ $-0,0033008$
b	$0,8826455$	$+0,0033506$ $-0,0032525$
c_1	$0,0309446$	$+0,0033050$ $-0,0032914$
c_2	$0,1424299$	$+0,0033208$ $-0,0033776$
f_{oot}	$1,0000765$	$+0,0005218$ $-0,0005398$
T_{grad}	$-0,0000059$	$+0,0000798$ $-0,0000809$
ξ	$0,0018046$	$+0,0002435$ $-0,0001974$
η_t	$0,0120488$	$+0,0003511$ $-0,0003262$
σ^2	$0,0008723$	$+0,0001314$ $-0,0001042$

Tabuľka 6.6: Výsledné parametre exoplanéty var 91 Aql b.

R_p [km]	$117\,462$	$+9942$ -9522
a [au]	$0,0404$	$+0,0023$ $-0,0023$
i [°]	$82,26$	$+0,03$ $-0,03$

6.3.2 CzeV406 Her

Druhý kandidát na extrasolárnu planétu, ktorý je študovaný v tejto práci, sa nachádza pri hviezde s označením CzeV406 Her, čo je jej identifikácia v katalógu novo objavených premenných hviezd, vedenom Sekciou premenných hviezd a exoplanét Českej astronomickej spoločnosti. Taktiež má svoje označenie napríklad aj v katalógu UCAC4 a Gaia DR2, uvedené v tabuľke 6.7. [9] Základné informácie o tomto exoplanetárnom systéme som opäť hľadala na stránkach Ing. Pavla Cagaša. Prvé periodické poklesy jasnosti boli pre túto hviezdu pozorované 30.9.2011, posledné pozorovanie prebiehalo 27.5.2017 a pozorovacích nocí bolo 36. Uvedená je aj poloha tohto systému, pozorovaná hviezdna veľkosť, perióda, pozorované minimum a hviezda je rovnakého spektrálneho typu, ako hviezda pri prvom systéme, jej spektrálna trieda je teda F8V. Tieto informácie o danej hviezde sú uvedené v tabuľke 6.7.

Tabuľka 6.7: Základné parametre hviezdy.

UCAC4 id.	513 – 077734
Gaia DR2 id.	4484392297415458432
RA	$18^{\text{h}}26^{\text{m}}57,26^{\text{s}}$
DEC	$12^{\circ}28'04,7''$
m_V	14,13
P [d]	1,493735
t_{min} [HJD]	2456131,422

Postupovala som rovnakým spôsobom ako pri predošlom exoplanetárnom systéme a zo znalosti spektrálneho typu hviezdy som určila hodnotu efektívnej teploty T_{ef} , hmotnosti M , polomeru R a logaritmu gravitačného zrýchlenia $\log g$ pomocou tabuľky 6.1 a to zasa spriemerovaním uvedených hodnôt pre hviezdy typu F5 a G0, keďže typ F8 sa v tabuľke nevyskytoval. Následne som zasa dopočítala hodnotu veľkej poloosi a zo získaných dát som určila pokles svietivosti. Získané hodnoty sú uvedené v tabuľke 6.8. Z dát som opäť

Tabuľka 6.8: Základné parametre systému.

T_{ef} [K]	6175^{+275}_{-275}
M [M_{\odot}]	$1,25^{+0,10}_{-0,10}$
R [R_{\odot}]	$1,325^{+0,075}_{-0,075}$
$\log(g)$ [cm s^{-2}]	$4,275^{+0,025}_{-0,025}$
a [au]	$0,0275^{+0,0007}_{-0,0007}$
$\sqrt{\delta}$	$0,2121^{+0,0010}_{-0,0010}$

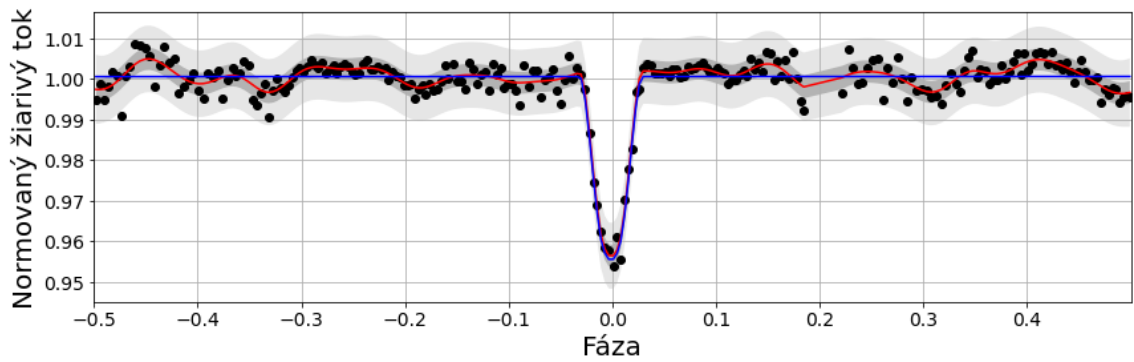
vytvorila fázovú svetelnú krivku, kde je stredu tranzitu priradená 0 na x -ovej osi, ktorá predstavuje fázu. Zistené parametre a hyperparametre pre tento systém, spoločne s ich chybami sú popísané v tabuľke 6.9. Data boli tentokrát nabinované na 5 minút, takže sa

Tabuľka 6.9: Vstupné parametre využité pri fitovaní.

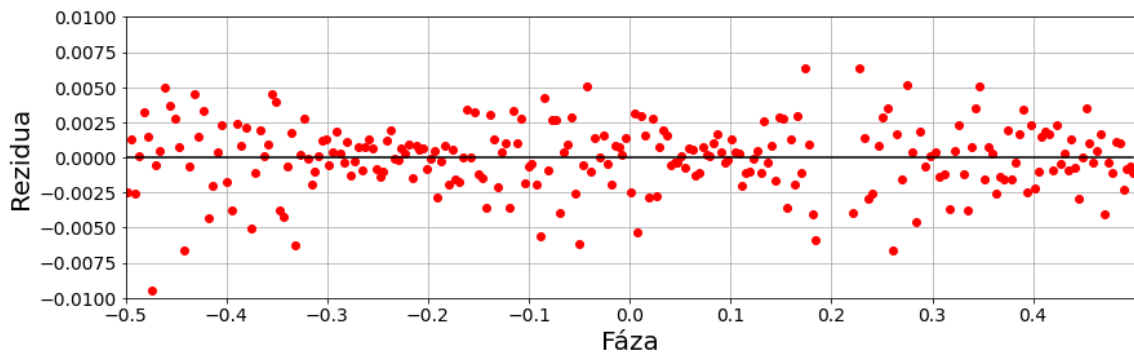
T_0	$0,000^{+0,001}_{-0,001}$	Stred – minimum tranzitu
P	1,493735	Periódka obehu planéty – je zafixovaná
a/R_*	$4,471^{+0,001}_{-0,001}$	Veľká poloosa v polomeroch hviezdy
p	$0,2121^{+0,0010}_{-0,0010}$	Odmocnina z tranzitu – pomer R_p a R_*
b	$0,775^{+0,001}_{-0,001}$	Impaktný parameter
c_1	$0,5758^{+0,0010}_{-0,0010}$	Prvý koeficient okrajového stemnenia
c_2	$0,1243^{+0,0010}_{-0,0010}$	Druhý koeficient okrajového stemnenia
f_{oot}	$1,000^{+0,001}_{-0,001}$	Tok mimo tranzit (normovaný na jednotku)
T_{grad}	$0,000^{+0,001}_{-0,001}$	Koeficient polynomu
ξ	$0,0035^{+0,0001}_{-0,0001}$	Škálová výška – height scale
η_t	$0,0200^{+0,0001}_{-0,0001}$	Škálová dĺžka – length scale
σ^2	$0,0020^{+0,0001}_{-0,0001}$	Fotónový šum – white noise

celé meranie rozdelilo na 5 minútové úseky a z bodov, ktoré jednotlivé úseky obsahovali som získala ich spriemerovaním jeden bod. V tomto prípade som zvolila menšie časové intervaly a to z dôvodu, aby som počas samotného tranzitu mala dostatok bodov, v dôsledku čoho bol výsledok lepší.

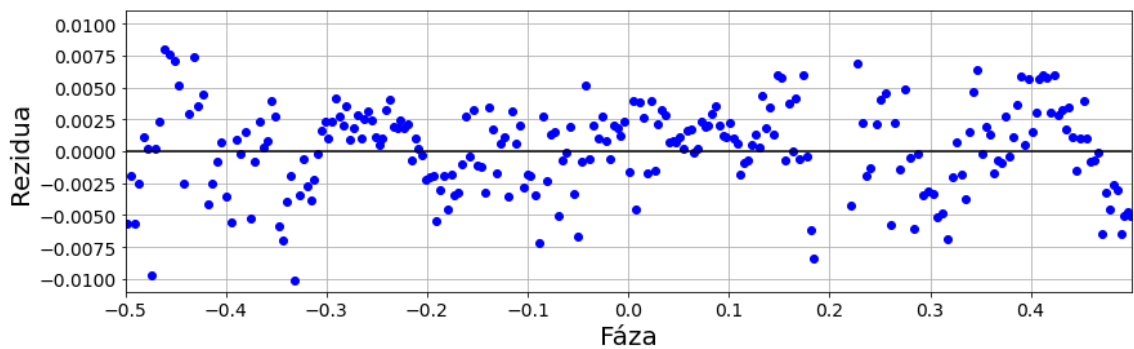
Aj pri tomto systéme som vytvorila O–C diagram, teda graf, kde som na y -ovú osu vynesla rozdiel pozorovaných a vypočítaných hodnôt (môžeme nazvať aj reziduá) a na x -ovú osu čas, v mojom prípade fázu. Tento diagram som zostrojila pre model tranzitu vrátane šumu a zároveň aj pre model tranzitu bez prítomnosti šumu.



Obr. 6.5: Nafitovaná svetelná krivka hviezdy CzeV406 Her. Čierne body predstavujú namerané data s 5 minútovým binom, červená krivka znázorňuje model tranzitu vrátane šumu, zatiaľčo modrá predstavuje model tranzitu bez prítomnosti šumu. Tmavosivá oblasť predstavuje oblasť σ , podobne svetlosivá 3σ .



Obr. 6.6: Reziduá modelu tranzitu vrátane šumu.

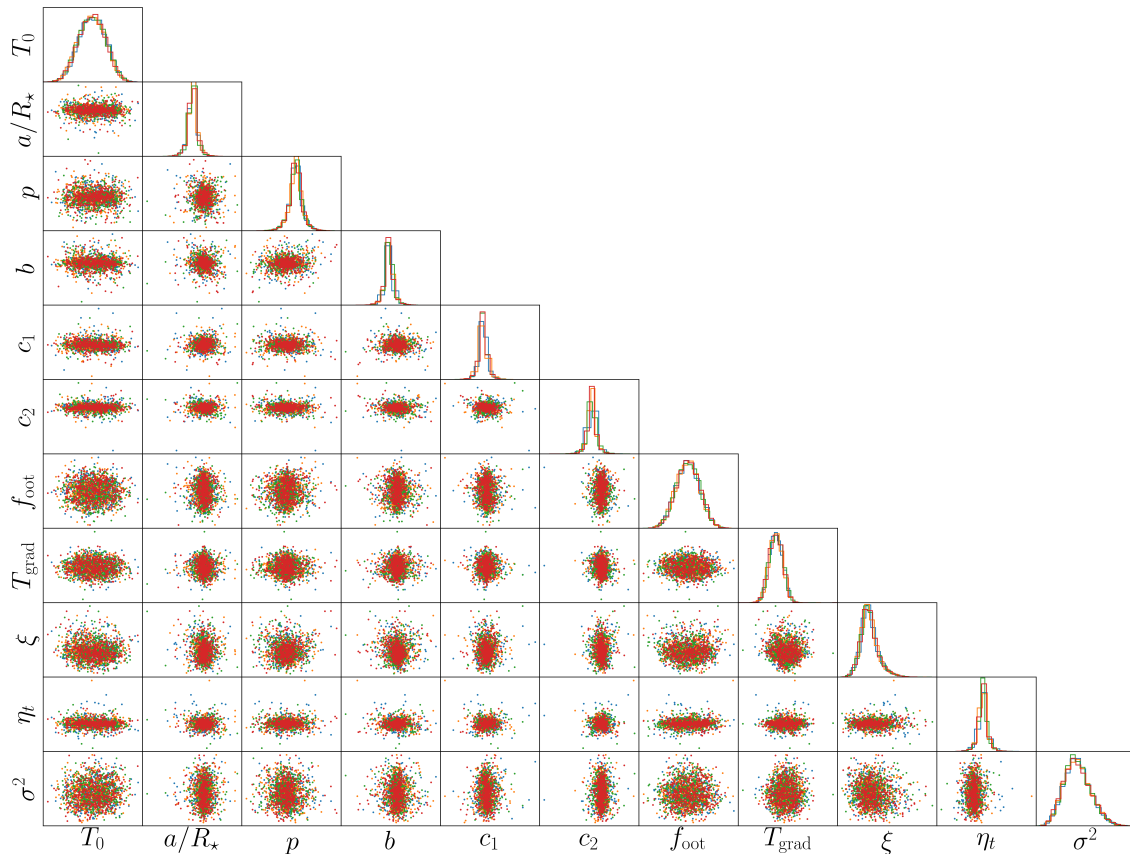


Obr. 6.7: Reziduá modelu tranzitu bez šumu.

V grafe 6.8 korelácií môžeme vidieť, ako pri tomto systéme na sebe jednotlivé parametre závisia, respektíve nezávisia. V jednotlivých okienkach sa nachádza náhodná vzorka 500 bodov z každého reťazca a na pravej strane sú histograpy parametrov.

Z výstupných parametrov fitovania boli určené niektoré z parametrov kandidáta na exoplanétu. Jedná sa o jeho polomer, ktorý bol určený z hĺbky tranzitu, rovnicou 4.1, veľkú poloosu, dopočítanú z parametru a/R_* a inklináciu vychádzajúcu z impaktného parametra b , využitím rovnice 4.7. Výsledné parametre študovaného objektu sú zapísané

v tabuľke 6.11. Objekt obieha vo vzdialenosti 0,0477 au okolo hviezdy CzeV406 Her, raz za 1,493735 dňa. Jeho inklináčny uhol má hodnotu $84,57^\circ$, čo sa prejavilo aj na vysokej hodnote impaktného parametra, ktorý je priamoúerný kosínusu tohto uhla. Polomer tohto kandidáta som určila na 196965 km, čo je $2,82R_J$. Objekt zaradzujeme opäť do kategórie horúcich Jupiterov. Pre konečné potvrdenie je vhodné fotometrické pozorovanie kombinovať s metódou radiálnych rýchlostí, pomocou ktorej vieme určiť hmotnosť planéty a následne môžeme dopočítať aj jej hustotu.



Obr. 6.8: Graf korelácií.

Tabuľka 6.10: Výstupné parametre získané pri fitovaní.

T_0	$-0,0013290$	$+0,0009444$ $-0,0009749$
a/R_*	$7,7380599$	$+0,0047251$ $-0,0048286$
p	$0,2134769$	$+0,0039991$ $-0,0040933$
b	$0,7322605$	$+0,0047362$ $-0,0047297$
c_1	$0,7247332$	$+0,0046793$ $-0,0046847$
c_2	$0,1674684$	$+0,0045553$ $-0,0046481$
f_{oot}	$1,0005978$	$+0,0009222$ $-0,0009138$
T_{grad}	$0,0000009$	$+0,0001370$ $-0,0001385$
ξ	$0,0024308$	$+0,0003919$ $-0,0002999$
η_t	$0,0205704$	$+0,0004641$ $-0,0004402$
σ^2	$0,0025638$	$+0,0001951$ $-0,0001655$

Tabuľka 6.11: Výsledné parametre exoplanéty CzeV406 Her b.

R_p [km]	$196\,965$	$+15048$ -14712
a [au]	$0,0477$	$+0,0027$ $-0,0027$
i [°]	$84,57$	$+0,04$ $-0,04$

Kapitola 7

Záver

Objektom tejto práce bola charakterizácia dvoch tranzitujúcich exoplanetárnych systémov v súhvezdí Orla a Herkula. Z fotometrických dát som zostrojila svetelné krivky týchto systémov, ktoré boli následne nafitované pomocou využitia Gaussovských procesov. Z výsledkov celého procesu som určila niektoré z parametrov študovaných kandidátov na exoplanéty. Pre kandidáta nachádzajúceho sa pri hviezde s názvom Var91 Aql som určila polomer na 117 462 km, čo je približne $1,68 R_J$. Svoju hviezdu obieha s periódou 1,618233 dňa vo vzdialenosti 0,0404 au a hodnota inklináčného uhla je $82,26^\circ$.

Pre kandidáta s materskou hviezdou s názvom CzeV406 Her je hodnota polomeru 196 965 km, čo predstavuje $2,82 R_J$. Jeho perióda obehu je 1,493735 dňa, veľká poloosa je rovná 0,0477 au a inklináčny uhol som určila na $84,57^\circ$. Obe z týchto objektov sú väčšie ako Jupiter, svoje materské hviezdy obiehajú vo veľmi malých vzdialenostiach a perióda ich obehu je o niečo dlhšia ako jeden deň. Extrasolárne planéty s takýmito charakteristikami zaradzujeme do kategórie extrasolárnych planét, ktoré nazývame horúcimi Jupitermi.

Nafitované svetelné krivky môžeme vidieť na obrázku 6.1 a 6.5. Zaujímavý je ich tvar, ktorý má tvar písmena V (čo vedie aj k vysokej hodnote impaktného parametra). Takýto tvar svetelnej krivky napovedá, že planéta prechádza iba čiastočne pred diskom svojej materskej hviezdy, čo naznačuje aj ich inklináčny uhol, ktorý je reletívne vzdialený od 90° . Tieto tranzity nazývame pojmom „grazing transit“, nie je ich veľa a preto sú vzácne.

Zoznam použitej literatúry

- [1] Bartlett, J., Ianna, P. 2001. *A Barnard's Star Perturbation Search Using McCormick Observatory Photographic Plate Material*. American Astronomical Society Meeting Abstracts #198.
- [2] Charbonneau, D., Brown, T. M., Latham, D. W., Mayor, M. 2000. *Detection of Planetary Transits Across a Sun-like Star*. The Astrophysical Journal 529, L45–L48.
- [3] Gibson, N. P., Aigrain, S., Barstow, J. K., Evans, T. M., Fletcher, L. N., Irwin, P. G. J. 2013. A Gemini ground-based transmission spectrum of WASP-29b: a featureless spectrum from 515 to 720 nm. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 428, 3680–3692.
- [4] Gibson, N. P., Aigrain, S., Barstow, J. K., Evans, T. M., Fletcher, L. N., Irwin, P. G. J. 2013. The optical transmission spectrum of the hot Jupiter HAT-P-32b: clouds explain the absence of broad spectral features?. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 436, 2974–2988.
- [5] Gibson, N. P. 2014. Reliable inference of exoplanet light-curve parameters using deterministic and stochastic systematics models. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 445, 3401–3414.
- [6] Haswell, C. A. 2010. *Transiting Exoplanets*. Transiting Exoplanets by Carole A. Haswell. Cambridge University Press, 2010. ISBN: 9780521139380.
- [7] Mayor, M., Queloz, D. 1995. *A Jupiter-mass companion to a solar-type star*. Nature 378, 355–359.
- [8] Mikulášek, Z., Krtička, J.: *Základy fyziky hvězd*. Brno, 2005.
- [9] Skarka, M. and 64 colleagues 2017. CzeV - The Czech Variable Star Catalogue. Open European Journal on Variable Stars 185, 1.
- [10] Winn, J. N.: *Transits and occultations*. Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [11] Wolszczan, A., Frail, D. A. 1992. *A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12*. Nature 355, 145–147.

Elektronické zdroje

- [E1] <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/exoplanetplots/>
- [E2] <http://exoplanet.eu/catalog/>
- [E3] <https://www.schoolsobservatory.org/discover/projects/exoplanets/history>
- [E4] <https://www.hao.ucar.edu/research/stare/search.html>
- [E5] <https://exoplanets.nasa.gov/resources/300/2m1207b-first-image-of-an-exoplanet/>
- [E6] <http://www.thestargarden.co.uk/Exoplanets.html>
- [E7] <https://solarsystem.nasa.gov/planets/in-depth/>
- [E8] <http://abyss.uoregon.edu/~js/ast121/lectures/lec24.html>
- [E9] <https://news.psu.edu/photo/593862/2019/10/20/distant-worlds-radial-velocity-method>
- [E10] https://hvezdarenhandlova.webnode.sk/_files/200002412-9c51a9e459/Exoplan%C3%A9ty%201.pdf
- [E11] <http://www.planetarium.sk/extrasolar/radial.php>
- [E12] https://www.astro.ex.ac.uk/people/alapini/Publications/PhD_chap1.pdf
- [E13] <https://www.aldebaran.cz/astrofyzika/hvezdy/basics.php>
- [E14] https://astro.unl.edu/naap/hr/hr_background1.html
- [E15] <https://courses.lumenlearning.com/astronomy/chapter/the-spectra-of-stars-and-brown-dwarfs/?fbclid=IwAR10bpibL0nacVE6t0myMQhJyBF0D7CFsiK3Jr2m0I1TjUbod6m0CPLA5wI>
- [E16] <http://physicsopenlab.org/2015/11/30/atomic-spectroscopy>
- [E17] <http://www.tcmt.org/software.html>
- [E18] <https://geepea.readthedocs.io/en/latest/introduction.html>
- [E19] <http://hvezdy.astro.cz/exoplanety/51-metody-objevovani-planet>

