

MASARYKOVA UNIVERZITA
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
ÚSTAV TEORETICKÉ FYZIKY A ASTROFYZIKY

Bakalářská práce

BRNO 2020

VENDULA SLAVÍKOVÁ

**MASARYKOVA
UNIVERZITA**
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
ÚSTAV TEORETICKÉ FYZIKY A ASTROFYZIKY

Zpřesňování světelných elementů exoplanetárních kandidátů

Bakalářská práce

Vendula Slavíková

Vedoucí práce: Mgr. Marek Skarka, Ph.D. Brno 2020

Bibliografický záznam

Autor: Vendula Slavíková
Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Název práce: Zpřesňování světelných elementů exoplanetárních kandidátů

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Astrofyzika

Vedoucí práce: Mgr. Marek Skarka, Ph.D.

Akademický rok: 2019/2020

Počet stran: IX + 40

Klíčová slova: Exoplaneta; tranzitní metoda; *O-C* diagram; TESS; světelná křivka; světelné elementy; CCD fotometrie

Bibliographic Entry

Author: Vendula Slavíková
Faculty of Science, Masaryk University
Department of Theoretical Physics and Astrophysics

Title of Thesis: Getting accurate light ephemerides of exoplanetary candidates

Degree Programme: Physics

Field of Study: Astrophysics

Supervisor: Mgr. Marek Skarka, Ph.D.

Academic Year: 2019/2020

Number of Pages: IX + 40

Keywords: Exoplanet; transit method; *O-C* diagram; TESS; light curve; light ephemerides; CCD photometry

Abstrakt

V této bakalářské práci se věnujeme pozorování osmi exoplanetárních kandidátů identifikovaných družicí TESS s cílem zpřesnit jejich světelné elementy. Vlastní pozorování probíhalo od podzimu 2019 do jara 2020 na různých observatořích za pomoci několika pozorovatelů. Ze získaných dat byly sestrojeny světelné křivky, které byly následně pomocí tří různých fitovacích programů proloženy křivkou odpovídající tranzitu exoplanety. Díky těmto fitům jsme zjistili pozorované okamžiky středů tranzitů, které jsme poté porovnali s okamžiky předpovězenými. Data v *O-C* diagramu jsme aproximovali lineárním fitem, z jehož směrnice bylo možné vypočítat potřebnou opravu periody daného exoplanetárního kandidáta. Ze čtrnácti odpozorovaných nocí byl pokles jasnosti zachycen v pěti případech. U čtyř kandidátů jsme nezaznamenali žádný pokles, na vině mohla být nekvalitní data, nevhodné počasí nebo špatné světelné elementy a z nich plynoucí nepřesná předpověď. Hlavním výsledkem práce jsou aktuální opravené periody tří kandidátů TOI 1169.01, 550.01 a 961.01, které se od původních period lišily o 14 s, 14,9 s a 16 s. Na závěr je diskutována exoplanetární podstata pozorovaných kandidátů, přičemž někteří z nich by mohli být dvojhvězdy.

Abstract

In this thesis, we focus on the observation of eight exoplanetary candidates identified in the data obtained by the TESS satellite in order to refine their light ephemerides. The observation was performed from autumn 2019 to spring 2020 at various observatories with the help of several observers. From the obtained data, light curves were constructed, which were afterwards fitted with a curve corresponding to a transit of an exoplanet using three different software packages. From these fits, we determined the observed moments of the centers of transits, which we then compared with the predicted moments. From the linear fit of the *O-C* diagram, we got the correction of the period from the slope of the fit. Out of the fourteen observed nights, a decrease in brightness was detected in five cases. For four candidates, no decrease was detected. The non-detection could be due to poor data, weather conditions or incorrect light elements and the resulting inaccurate prediction of the transit. The main results of this thesis are the corrected periods of the three TOI candidates 1169.01, 550.01 and 961.01, which differed from the original periods by 14 s, 14,9 s and 16 s. In the end, the exoplanetary nature of the observed candidates is discussed, with the possibility of some being binary stars.

ZADÁNÍ
BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Akademický rok: 2019/2020

Ústav:	Ústav teoretické fyziky a astrofyziky
Studentka:	Vendula Slavíková
Program:	Fyzika
Obor:	Astrofyzika

Ředitel Ústavu teoretické fyziky a astrofyziky PřF MU Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu MU určuje bakalářskou práci s názvem:

Název práce:	Zpřesňování světelných elementů exoplanetárních kandidátů
Název práce anglicky:	Getting accurate light ephemerides of exoplanetary candidates
Jazyk závěrečné práce:	čeština

Oficiální zadání:

Družice TESS v současnosti identifikuje velké množství exoplanetárních kandidátů, kteří jsou většinou pozorováni pouze po dobu 27 dní. Přesnost určení orbitální periody takovýchto potenciálních exoplanet je tudíž velmi špatná. Cílem práce je fotometrické sledování vybraných exoplanetárních kandidátů objevených družicí TESS, proměření jejich tranzitů a zpřesnění jejich orbitálních period.

Literatura:

PERRYMAN, M. A. C. *The exoplanet handbook*. Second edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2018. xx, 952. ISBN 9781108419772.

MIKULÁŠEK, Zdeněk a Miloslav ZEJDA. *Úvod do studia proměnných hvězd*. Nové rozšířené vydání. Brno: MU, 2013.

Vedoucí práce:	Mgr. Marek Skarka, Ph.D.
Konzultant:	Mgr. Martin Blažek Bc. Jiří Žák
Datum zadání práce:	27. 11. 2019
V Brně dne:	26. 2. 2020

Souhlasím se zadáním (podpis, datum):

.....
Vendula Slavíková
studentka

.....
Mgr. Marek Skarka, Ph.D.
vedoucí práce

.....
prof. Rikard von Unge, Ph.D.
ředitel Ústavu teoretické fyziky a
astrofyziky

Poděkování

Na tomto místě bych chtěla poděkovat především vedoucímu své práce Mgr. Marku Skarkovi, Ph.D. za čas věnovaný konzultacím, jeho ochotný přístup a za cenné rady při tvorbě práce. Mé velké díky patří všem, kteří mě v průběhu psaní práce podpořili. Chtěla bych poděkovat RNDr. Janu Janíkovi, Ph.D, Bc. Martinu Maškovi, RNDr. Haně Kučákové, Ph.D., Davidu Štegnerovi a Mgr. Jiřímu Žákovi, kteří mi ochotně pomohli s pozorováním, když počasí nespolupracovalo. V neposlední řadě bych ráda poděkovala všem, kteří tuto bakalářskou práci četli a pomáhali s její stylistickou stránkou.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením vedoucího práce s využitím informačních zdrojů, které jsou v práci citovány. Text práce jsem vypracovala podle pravidel a zodpovídám za jeho jazykovou správnost.

Brno 14. srpna 2020

.....
Vendula Slavíková

Obsah

Úvod	1
1 Exoplanety	2
1.1 Definice	2
1.2 Historie a současnost objevování exoplanet	2
1.3 Nejdůležitější metody detekce a výzkumu exoplanet	5
1.4 Projekty pro hledání exoplanet	7
1.5 Družice TESS	8
2 Světelná křivka	10
2.1 Světelné elementy	10
2.2 Tranzit exoplanety	11
2.3 Diferenciální fotometrie	13
3 O-C diagramy	14
3.1 Podoby O-C diagramu	14
4 Pozorování a zpracování dat	16
4.1 Kandidáti	16
4.2 Pozorování zvolených kandidátů	19
5 Analýza O-C diagramu	20
5.1 Kandidát H	20
5.1.1 Prokládání světelné křivky	20
5.1.2 O-C diagram	22
5.2 Kandidát C	23
5.2.1 Prokládání světelné křivky	23
5.2.2 O-C diagram	24
5.3 Kandidát F	26
5.3.1 Prokládání světelné křivky	26
5.3.2 O-C diagram	26
5.4 Diskuze	27
Závěr	30

Seznam použitých zdrojů	31
Příloha	34
7.1 Vstupní parametry fitovaných poklesů	34
7.2 Světelné křivky bez detekovaných poklesů	39

Úvod

Naše Slunce je pouze jednou hvězdou ze stovek miliard dalších hvězd v naší Galaxii. Tato skutečnost člověka vede k otázce, zda i některé ostatní hvězdy nemohou mít planetární systémy podobné Sluneční soustavě. V dnešní době je technologie na takové úrovni, že dokážeme extrasolární planety, tedy planety mimo Sluneční soustavu, detekovat a určovat jejich fyzikální vlastnosti. Kvůli kontrastu mezi jasem mateřské hvězdy a jasem její exoplanety je velice obtížné exoplanety pozorovat přímo. K jejich detekci a výzkumu se tedy ve většině případů využívají mnohé jiné metody, mezi nimi například měření tranzitů.

Tuto metodu detekce používá i družice TESS. Exoplanetární kandidáti, které identifikuje, jsou však ve valné většině případů pozorováni pouze 27 dní, přesnost určení jejich periody oběhu tudíž nemusí být pro další použití nedostatečná. Tímto způsobem lze navíc detekovat pouze exoplanety s periodou kratší než je doba pozorování objektu. Chceme-li určovat další parametry dané exoplanety, je pro nás zásadní znát dostatečně přesně její oběžnou dobu. Tato práce se proto zabývá pozorováním zvolených exoplanetárních kandidátů a zpřesňováním jejich orbitálních period určených z dat pořízených družicí TESS.

První kapitola se zabývá uvedením do problematiky extrasolárních planet, historií jejich objevování, popisuje základní metody detekce a představí projekt TESS. Další kapitoly se zaměřují na matematické nástroje používané při popisu tranzitu a následné diskuzi o parametrech pozorovaného objektu. Kapitoly 4 a 5 se věnují vlastnímu pozorování a analýze dat zvolených exoplanetárních kandidátů.

1 Exoplanety

1.1 Definice

Současná definice planety Sluneční soustavy byla přijata na zasedání Mezinárodní astronomické unie v Praze roku 2006. Aby objekt Sluneční soustavy mohl být planetou, musí splňovat následující tři kritéria (rezoluce IAU, 2006, [e25]):

- obíhá kolem Slunce,
- má dostatečnou hmotnost, aby vlastní gravitací překonal síly tuhého tělesa a nabyl hydrostaticky rovnovážný kulový tvar,
- pročistil okolí své oběžné dráhy.

Extrasolární planeta, zkráceně exoplaneta, nemá zavedenou přesnou definici. Pracovní definice podle rezoluce IAU z roku 2001 ([e24]) říká, že za exoplanetu považujeme těleso, které nezávisle na svém vzniku obíhá¹ kolem hvězdy nebo hvězdného pozůstatku a má hmotnost méně než 13 hmotností Jupitera M_J . Objekt s hmotností 13-80 M_J nazýváme hnědý trpaslík, což je hvězda, v jejímž jádru jsou podmínky dostatečné k tomu, aby bylo alespoň dočasně zažehnuta termonukleární fúze deuteria. Hvězdy s hmotností větší než 80 M_J již dokáží termonukleárně fúzovat i vodík. Obrázek 1.1 znázorňuje porovnání velikostí hvězd, hnědých trpaslíků a planety Jupiter.

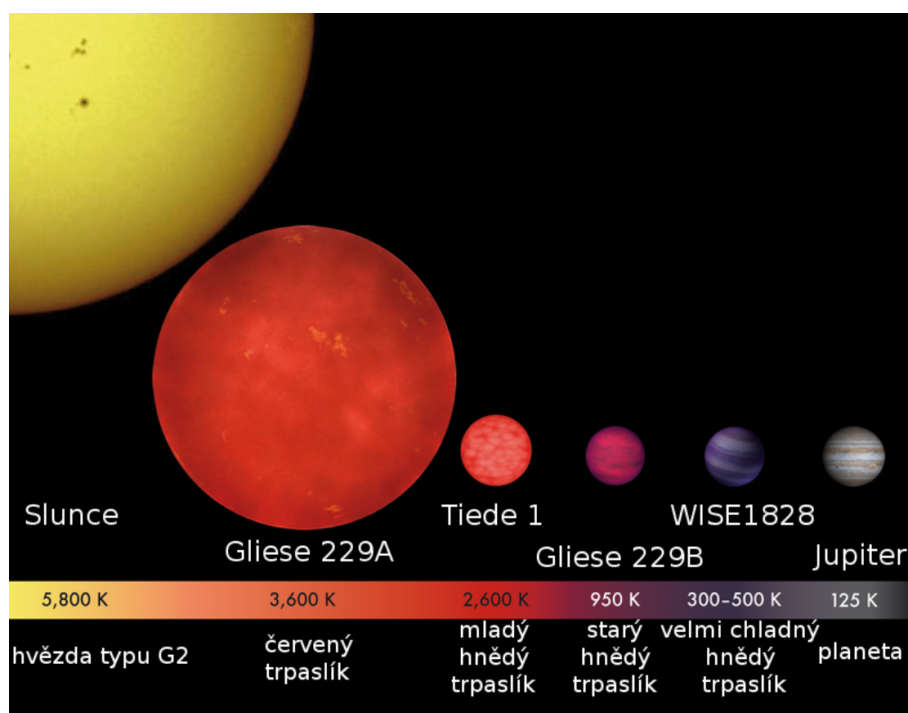
1.2 Historie a současnost objevování exoplanet

Za první objevenou exoplanetu je považován objekt obíhající γ Cephei A detekovaný kanadskými astronomy [Campbell et al. \(1988\)](#). V jejich měřeních radiálních rychlostí se objevil pokles, který mohl naznačovat gravitační působení neviditelného souputníka. Exoplanetární povahou tohoto souputníka si nemohli být jisti a na potvrzení tohoto objektu bylo třeba počkat až do roku 2002 ([Cochran et al., 2002](#)).

[Wolszczan & Frail \(1992\)](#) v lednu roku 1992 ohlásili objev dvojice exoplanet obíhající kolem pulsaru PSR 1257+12 v souhvězdí Panny. Následná pozorování přítomnost těchto těles potvrdila a jedná se tak o první známé exoplanety.

V říjnu 1995 byla metodou měření radiální rychlosti nalezena exoplaneta poloviční velikosti Jupitera obíhající velice blízko své mateřské hvězdy 51 Pegasi ([Mayor & Queloz,](#)

¹Existují i objekty s planetární hmotností tzv. exoplanetární nomádi, které kolem žádné hvězdy neobíhají. Tyto exoplanety se dají pozorovat jen velice obtížně, ale předpokládá se, že v Galaxii těchto planet může být až 10^5 krát více než hvězd hlavní posloupnosti ([Strigari et al., 2012](#)).

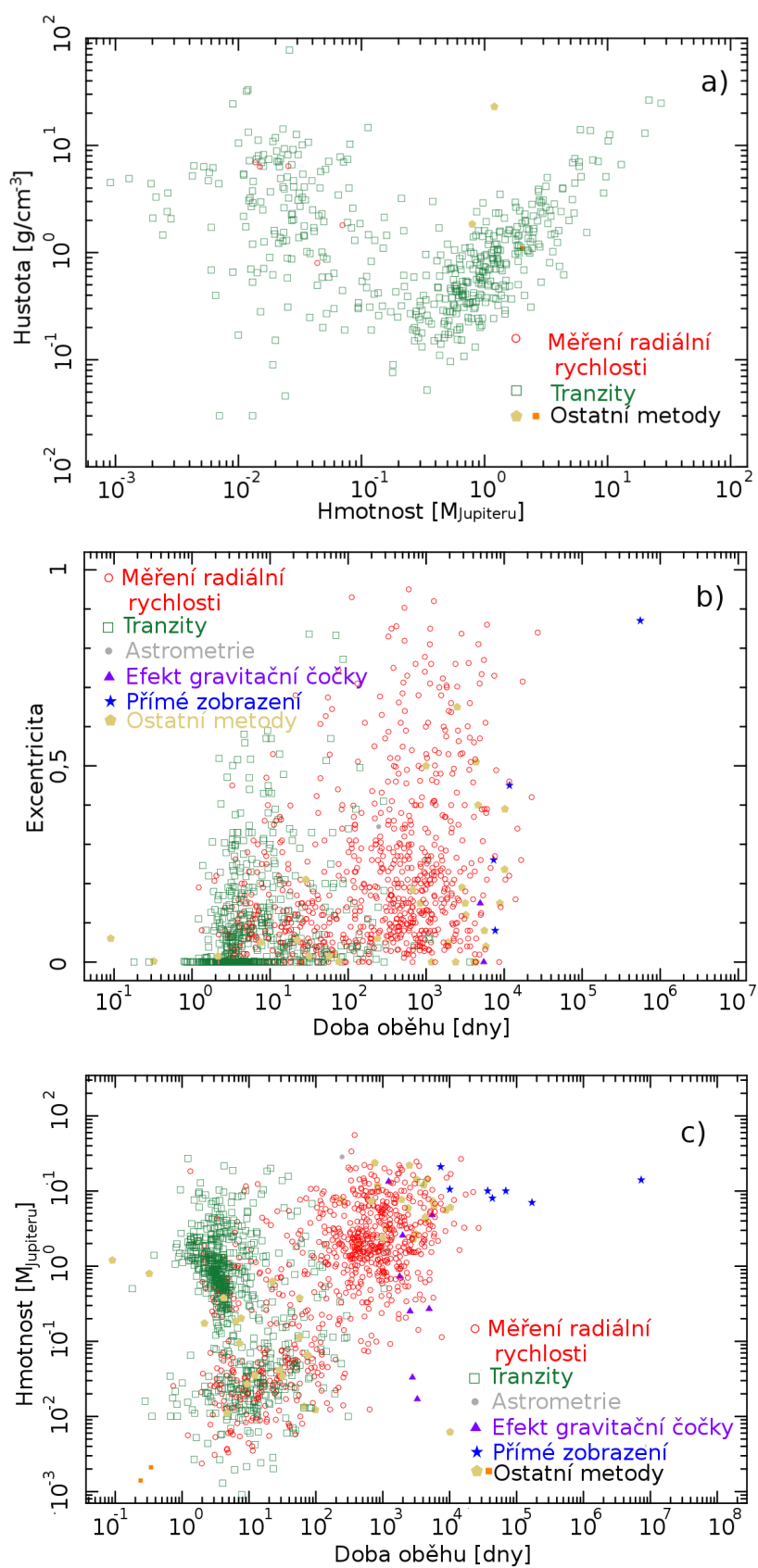


Obrázek 1.1: Porovnání velikostí hvězd, hnědých trpaslíků a planet. Převzato a upraveno z [e1].

1995). Jedná se o první exoplanetu objevenou u hvězdy hlavní posloupnosti. V roce 1999 byl objeven systém s několika extrasolárními planetami kolem hvězdy υ Andromedae (Lissauer, 1999). V dubnu 2001 byla poprvé nalezena exoplaneta v tzv. obyvatelné zóně hvězdy² (Santos et al., 2001). Tato exoplaneta s hmotností skoro šest hmotností Jupitera obíhá kolem hvězdy HD 28185 po téměř kruhové oběžné dráze s periodou přibližně jeden rok.

S postupným zlepšováním měřících přístrojů a zpřesňováním získaných dat počet objevených exoplanet narůstá. V červnu 2019 počet potvrzených exoplanet překročil hodnotu 4000. S tímto množstvím souvisí i určitá rozmanitost parametrů objevených exoplanet. Na obrázku 1.2 a) je vykreslena závislost hustoty exoplanety na její hmotnosti. Obrázek 1.2 b) znázorňuje, jaké excentricity objevené exoplanety mají v závislosti na době oběhu kolem mateřské hvězdy. Závislost hmotnosti exoplanety na oběžné době je zobrazena na obrázku 1.2 c).

²Obyvatelná zóna hvězdy je označení pro oblast kolem hvězdy, ve které se vyskytuje voda v tekuté podobě.



Obrázek 1.2: Grafy závislostí různých parametrů exoplanet objevených a potvrzených k 30. lednu 2020. Převzato a upraveno z [e2], [e3] a [e4].

1.3 Nejdůležitější metody detekce a výzkumu exoplanet

Nejčastější jsou objevy metodami nepřímými, například měřením radiální rychlosti hvězdy nebo tranzitní metodou. Pouze malá část exoplanet byla objevena přímým pozorováním.

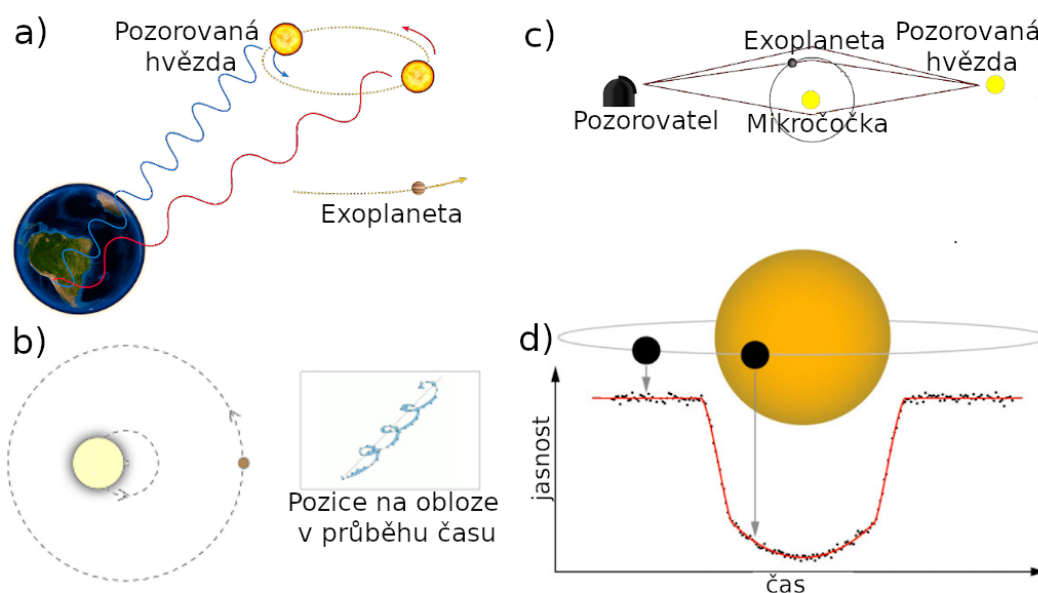
Měření radiální rychlosti

Tato metoda využívá faktu, že v důsledku oběhu exoplanety kolem mateřské hvězdy není tato hvězda zcela nehybná. Hvězda a exoplaneta se pohybují okolo společného středu hmotnosti, a tudíž i hvězda vykonává pohyb, který je ale ve srovnání s pohybem exoplanety velmi malý. My tento pohyb detekujeme díky Dopplerovu jevu; pokud se hvězda pohybuje směrem k nám, vlnová délka světla přicházejícího z této hvězdy se zkrátí a hvězda se jeví modřejší. Pohybuje-li se hvězda od nás, vlnová délka se prodlouží a hvězda se zdá být spíše červená. Metoda je znázorněna na obrázku 1.3 a).

Touto metodou dokážeme navíc odhadnout i dolní mez hmotnosti³ M_p pozorovaného objektu a parametry jeho oběžné dráhy. Velkou poloosu a získáme použitím 3. Keplerova zákona, kde hmotnost hvězdy jsme buď změřili nebo odhadli. Hmotnost exoplanety M_H můžeme vypočítat s pomocí poloviční amplitudy křivky radiálních rychlostí.

Astrometrie

Přítomnost menšího tělesa v blízkosti hvězdy způsobuje, že obě tělesa obíhají kolem společného středu hmotnosti. Hmotný střed soustavy se v prvním přiblížení pohybuje prostorem rovnoměrně přímočaře. Je-li gravitační působení exoplanety na hvězdu dostatečně velké



Obrázek 1.3: Nejdůležitější metody detekce a výzkumu exoplanet. a) Měření radiální rychlosti, b) astrometrie, c) efekt gravitační čočky, d) tranzitní metoda. Převzato a upraveno z [e5], [e6], [e7] a [e8].

³Známe-li sklon oběžné dráhy vůči pozorovateli, dokážeme určit skutečnou hmotnost exoplanety.

a není-li soustava příliš daleko, ve vlastním pohybu mateřské hvězdy se objeví modulace jako na obrázku 1.3 b) způsobená neviditelným vychylujícím tělesem. Aby byl tento pohyb zaznamenán astrometricky, je třeba pořizovat snímky hvězdy a jejího hvězdného okolí. Mění-li se pravidelně vzdálenosti hvězdy od objektů na hvězdné sféře v okolí hvězdy, je to známka toho, že by se u hvězdy mohla vyskytovat exoplaneta, hnědy trpaslík nebo hvězda. Pomocí této metody dokážeme opět díky 3. Keplerovu zákonu určit i hmotnost obíhajícího tělesa.

Efekt gravitační čočky

Seřadí-li se pozorovatel a dva objekty do jedné přímky, světlo vzdálenějšího objektu je zesíleno gravitací bližšího objektu, který působí jako čočka (tzv. gravitační mikročočka), viz obrázek 1.3 c). Obíhá-li gravitující těleso exoplaneta, i ta bude fungovat jako mikročočka a způsobí mírné zjasnění pozorované hvězdy. Touto metodou dokážeme z poloměrů Einsteinových prstenců⁴ určit hmotnost hvězdy a obíhající exoplanety a úhlovou vzdálenost mezi nimi v okamžiku mikročočkování.

Přímé pozorování

Světlo odrážející se od exoplanety je v naprosté většině případů oproti mateřské hvězdě příliš slabé, abychom exoplanetu mohli vidět. Pokud zastíníme světlo přicházející z hvězdy (například použitím koronografu), je možné přímo pozorovat i exoplanetu. Nejčastěji se tato pozorování provádí v infračervené oblasti.

Obrázek 1.4 je výsledkem přímého pozorování planetárního systému kolem hvězdy HR8799. Pozorované planety jsou označeny písmeny **b**, **c** a **d**, písmeno **a** je vyhrazeno pro zakrytou hvězdu, která je na obrázku 1.4 označena zeleným křížkem. Tímto způsobem bylo objeveno zatím pouze 49 exoplanet [e20]. Přímým pozorováním dokážeme díky znalosti vzdálenosti soustavy a maximální úhlové vzdálenosti hvězdy a exoplanety určit oběžnou dráhu exoplanety a ze stáří mateřské hvězdy a teploty exoplanety je možné odhadovat i hmotnost exoplanety.

Tranzitní metoda

Její princip spočívá ve fotometrickém pozorování hvězdy a sledování nepatrných změn jasnosti, které sice nejsou viditelné pro lidské oko, ale současné detektory je dokáží zachytit. Změna jasu, která se periodicky opakuje, napovídá, že by kolem pozorované hvězdy mohlo obíhat další těleso, jehož oběžná dráha má vysoký inklinací úhel⁵. Takový objekt pak v pravidelných intervalech zastíní část kotoučku hvězdy a my zaznamenáme pokles jasu, jak je naznačeno na obrázku 1.3 d). Tranzitní metodou se budeme v této práci nadále zabývat v kapitole 2.2.

Pro tento jev mohou existovat i příčiny v rámci vlastní proměnnosti hvězd, jako jsou např. skvrny na povrchu⁶, nebo se může jednat o násobný hvězdný systém⁷. Základní

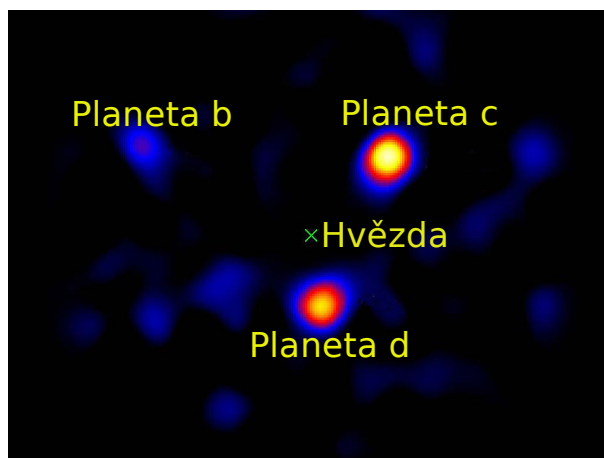
⁴Einsteinův prsteneček je kruhová deformace světla přicházejícího z pozorovaného zdroje způsobená gravitační čočkou.

⁵Inklinací úhel (obvykle značený i) je úhel mezi normálou k oběžné rovině a směrem k pozorovateli. Je-li $i = 0^\circ$, díváme se kolmo na oběžnou dráhu, pro $i \approx 90^\circ$ se na soustavu díváme z boku.

⁶Proměnnost způsobená skvrnami na povrchu hvězdy je relativně malá (jedná se o setiny až desetiny magnitudy), periodičita odpovídá době rotace.

⁷Pro dvojhvězdný systém se ve světelné křivce v rámci jedné periody vyskytne kromě primárního minima

vlastnosti obíhajícího objektu potom můžeme odvozovat z tvaru poklesů jasnosti hvězdy a měřeními dalšími metodami.



Obrázek 1.4: Přímé pozorování planetárního systému kolem hvězdy HR8799 získané s pomocí koronografu Vortex a Haleova dalekohledu. Převzato a upraveno z [e9].

1.4 Projekty pro hledání exoplanet

Hledáním exoplanet pomocí měření radiálních rychlostí se od roku 2003 zabývá spektrograf HARPS (High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher) na observatoři La Silla v Chile. Dalekohled OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment) je projekt varšavské univerzity, který už od roku 1992 mimo jiné hledá exoplanety pomocí efektu gravitační čočky.

Co se týče použití tranzitní metody při hledání exoplanet, věnuje se mu několik různých projektů. Můžeme je rozdělit na pozemní projekty a kosmické dalekohledy. Pozemní projekty se většinou skládají ze soustavy kamer, které svým zorným polem pokrývají co největší část hvězdné oblohy. Nejúspěšnějším pozemním projektem je WASP, který našel už více než 150 exoplanet [e32].

Nejúspěšnějším kosmickým dalekohledem byl bezpochyby *Kepler* (Borucki et al., 2010). Nalezl více než dva tisíce exoplanet a další dva tisíce zatím nepotvrzených exoplanetárních kandidátů [e23]. Po skončení mise *Kepler* v roce 2014 byla na tomtéž dalekohledu spuštěna mise K2, která s drobnými technickými obtížemi hledala exoplanety až do roku 2018. Od roku 2006 do roku 2013 se tranzitům exoplanet věnoval francouzský projekt CoRoT, který objevil 32 exoplanet a kolem 100 kandidátů [e27]. Nejnovějším projektem je satelit CHEOPS, který odstartoval 18. 12. 2019 a který se zabývá fotometrií jasných hvězd, u nichž o přítomnosti exoplanet víme. K plánovaným vesmírným projektům patří např. mise PLATO, která má odstartovat v roce 2026.

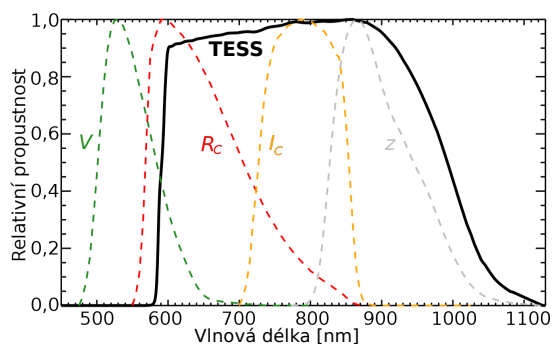
i snadno rozeznatelné sekundární minimum.

1.5 Družice TESS

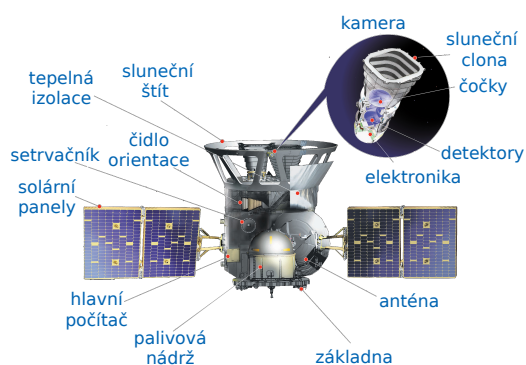
Družice TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) je misí NASA hledající exoplanety pomocí tranzitní metody (Ricker et al., 2014). Jedná se o první vesmírný průzkum tranzitujících exoplanet, který se zaměří na celou noční oblohu. Pokryje tak oblast 400krát větší než mise *Kepler*. Předpokládá se, že TESS napozoruje primárně kolem 200 tisíc nejjasnějších hvězd, u kterých bude provádět fotometrická měření s kadencí 2 minuty.

TESS odstartovala 18. dubna 2018 z mysu Canaveral a na její oběžnou dráhu ji vynesla raketa Falcon 9 společnosti SpaceX. Aby mohla družice vykonávat svůj úkol, potřebuje velmi specifickou a v historii kosmonautiky dosud nepoužitou oběžnou dráhu, na které by mohla nerušeně provádět svá pozorování a nenastávaly na ní velké teplotní výkyvy. Po několika parkovacích a fázovacích obězích se tak družice ustálila na oběžné dráze okolo Země s periodou v rezonanci 2:1 s Měsícem. Družice se na oběžné dráze pohybuje ve vzdálenosti v rozmezí přibližně 17 až 59 poloměrů Země. Družice tak používá motory pouze k tomu, aby vyvažovala tlak slunečního záření, a díky vlivu Měsíce tato výrazně eliptická dráha zůstane stabilní po několik desetiletí. Gravitační poruchy oběžné dráhy jsou v rámci trvání mise zanedbatelné.

TESS hledá exoplanety pomocí čtyř širokoúhlých kamer s širokým optickým filtrem, jehož relativní propustnost je znázorněna na obrázku 1.5. Obrázek 1.6 popisuje jednotlivé části družice. První rok svého provozu pozorovala TESS jižní ekliptikální polokouli a druhý rok severní ekliptikální polokouli. Pro tuto misi byla hvězdná obloha rozdělena na 26 sektorů o rozměrech $24^\circ \times 96^\circ$ (jak je znázorněno na obrázku 1.7), z nichž na každý se TESS zaměří v průměru po dobu 27,4 dne⁸. Během tohoto časového úseku TESS dvakrát oběhne Zemi. Z obrázku 1.8 je patrné, že některé sektory se překrývají, tudíž objekt může



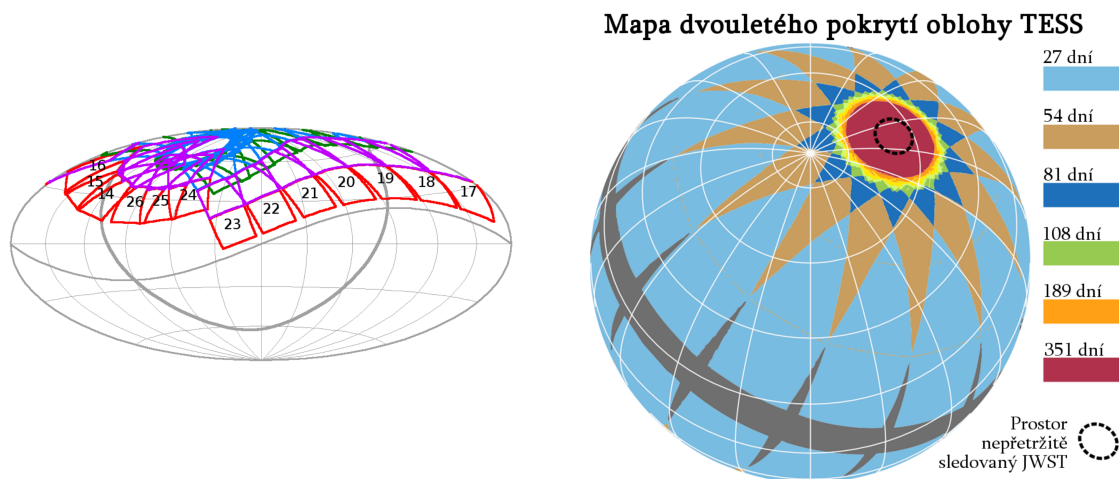
Obrázek 1.5: Relativní propustnost optických filtrů kamer družice TESS. Pro srovnání jsou v grafu vyneseny i křivky filtru V Johnsonova fotometrického systému, filtrů R_c a I_c Cousinova rozšíření Johnsonova systému a filtru z digitální přehlídky SDSS. Převzato a upraveno z [e10].



Obrázek 1.6: Návrh popisující jednotlivé části družice TESS s detailem kamery. Převzato a upraveno z [e11].

⁸Jelikož doba jednoho oběhu družice okolo Země se pohybuje v rozmezí od 12,9 po 14,5 dní, délka pozorování jednotlivých sektorů může být 25,7 až 29,0 dní.

patřit například do dvou sektorů zároveň a bude pozorován po dobu dvakrát 27,4 dne. Při průletu TESS nejbliže Zemi se pozorování nejvýše na 16 hodin zastaví, anténa se nasměruje k Zemi a dojde k přenosu dat z družice.



Obrázek 1.7: Sektory severní ekliptikální polokoule v rovníkových souřadnicích. Pře-
vzato z [e12].

Obrázek 1.8: Pokrytí oblohy družicí TESS.
Převzato a upraveno z [e13].

2 Světelná křivka

Světelná křivka je časová závislost hvězdné velikosti nebo jasnosti objektu. Ze vzhledu světelné křivky můžeme usuzovat na povahu proměnnosti sledovaného objektu a některé jeho fyzikální vlastnosti.

Hvězdná velikost se obvykle měří v konkrétním frekvenčním pásu nebo fotometrickém filtru. Často hvězdnou velikost známe jen v porovnání s vhodně zvolenou srovnávací hvězdou, u které předpokládáme, že je její hvězdná velikost neměnná. V takovém případě bude světelná křivka časovou závislostí relativní hvězdné velikosti Δm :

$$\Delta m = -2,5 \log \frac{j_v}{j_c}, \quad (2.1)$$

kde j_v je jas sledovaného objektu a j_c je jas zvolené srovnávací hvězdy. Známe-li hvězdnou velikost srovnávací hvězdy, můžeme přejít přímo k časové závislosti hvězdné velikosti $m(t)$ objektu.

Časový údaj se většinou udává v juliánském datování⁹. Hvězdnou velikost udáváme v magnitudách a obvykle ji vynásíme tak, aby křivka stoupala s narůstající jasností objektu a naopak.

2.1 Světelné elementy

Pozorujeme-li objekt s periodicky se měnící hvězdnou velikostí, stává se světelná křivka na dlouhém časovém intervalu nepřehlednou. Je-li perioda změn P konstantní, je v takovém případě výhodnější použít fázovou funkci podle vzorce

$$\vartheta(t) = \frac{t - M_0}{P}, \quad (2.2)$$

kde t je čas v juliánském datování a stejných jednotkách jako perioda P a M_0 je okamžik začátku počítání, obvykle okamžik extrému. Z této lineárně rostoucí funkce můžeme vypočítat epochu $E(t)$ a fázi $\varphi(t)$ následujícími vzorci:

$$E(t) = \text{floor}[\vartheta(t)], \quad (2.3)$$

$$\varphi(t) = \text{frac}[\vartheta(t)]. \quad (2.4)$$

⁹Jedná se o datování používané především v astronomii, jež spočívá v počítání dnů od zvoleného počátku, který byl stanoven na 1. ledna roku 4713 př. n. l. 12 hodin v Alexandrii.

„floor“ je označení pro funkci *dolní celá část*, která číslu přiřadí nejbližší menší celé číslo, zatímco „frac“ z reálného čísla odstraní jeho celou část, takže zbyde pouze desetinné číslo mezi 0 a 1.

Epocha $E(t)$ znázorňuje počet cyklů uplynulých od okamžiku začátku počítání $t = M_0$. Funkce $E(t)$ je konstantní po dobu trvání jednoho cyklu, vzroste o 1 při přechodu k cyklu následujícímu a svým tvarem tak připomíná schody.

Fáze $\varphi(t)$ je pilovitá funkce jdoucí lineárně od 0 do 1 v průběhu jednoho cyklu, aby v okamžiku počátku cyklu následujícího opět nabyla hodnoty 0. Vyjadřuje tak míru dokončenosti cyklu. Světelnou křivku nejčastěji nahrazujeme závislostí hvězdné velikosti nebo jasnosti objektu právě na fázi $\varphi(t)$. Okamžik nulové fáze $\Theta(E)$ pro danou epochu E se dá předpovědět podle vzorce

$$\Theta(E) = M_0 + E \times P. \quad (2.5)$$

Součtem epochy $E(t)$ a fáze $\varphi(t)$ lze zpětně získat fázovou funkci $\vartheta(t)$.

2.2 Tranzit exoplanety

To, že hvězdu obíhá exoplaneta, ještě automaticky neznamená, že je možné pozorovat tranzity. Aby docházelo k zákrytům složek, je nutné, aby sklon oběžné roviny exoplanety měl inklinanční úhel i větší než $90^\circ - \varphi_0$, přičemž

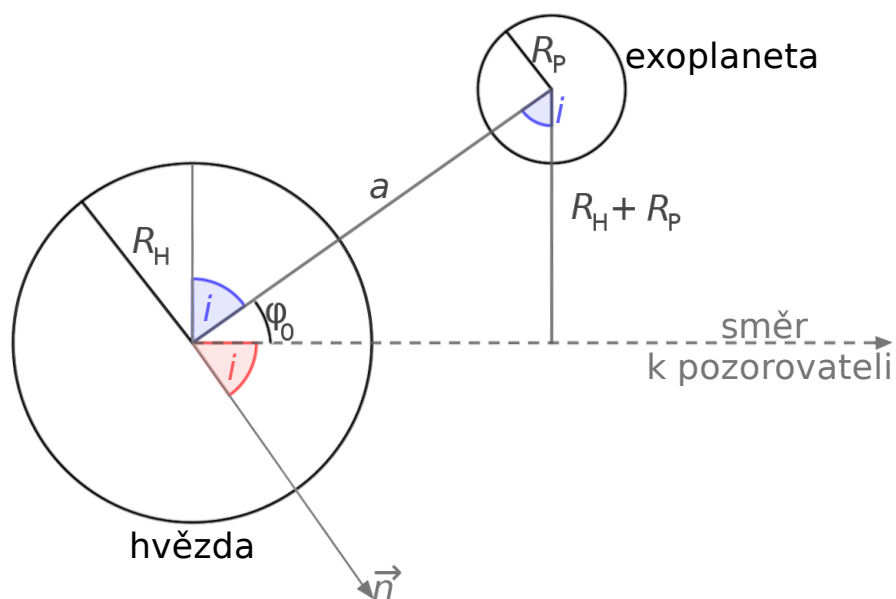
$$\sin \varphi_0 = \frac{R_H + R_P}{a}, \quad (2.6)$$

kde a je vzájemná vzdálenost hvězdy a exoplanety, i je inklinanční úhel, R_H je poloměr hvězdy a R_P je poloměr tranzitující exoplanety. Předpokládáme, že hvězda i exoplaneta mají kulový tvar. Situaci pro pozorovatelnost tranzitu znázorňuje obrázek 2.9.

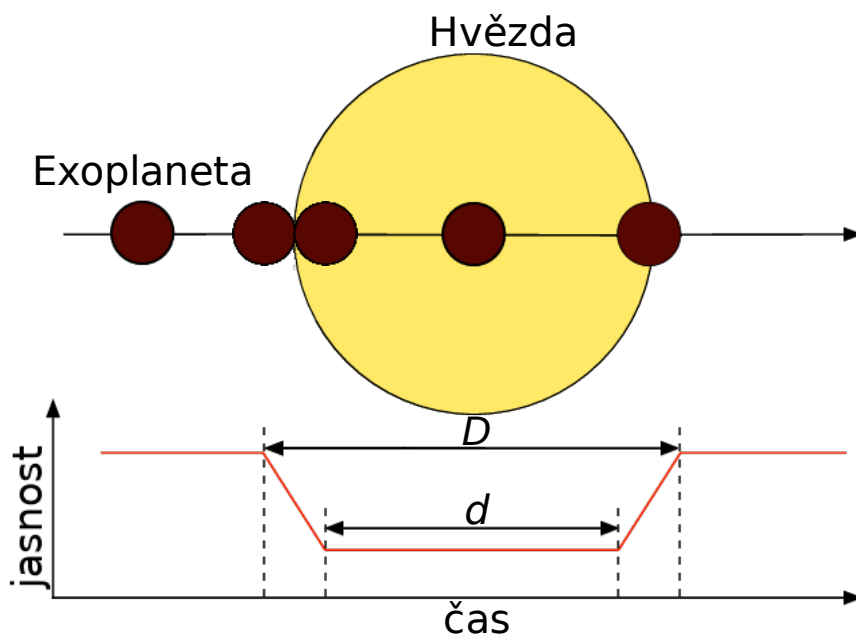
Obrázek 2.10 ukazuje světelnou křivku vzniklou přechodem exoplanety přes kotouč hvězdy. Jakmile se kotouč exoplanety dotkne kotouče hvězdy, nastává fáze částečného zákrytu. Jasnost soustavy lineárně klesá z důvodu zmenšující se vyzařující plochy hvězdy. Tento pokles nazývaný *sestupná větev minima jasnosti* se zastaví v okamžiku počátku úplného zákrytu, kdy se na disku zakrývané hvězdy zobrazí celý kotouč exoplanety. Jakmile kotouč exoplanety doputuje do centra kotouče hvězdy, nastane střed zákrytu.

Celý tranzit je symetrický jev, proto i jeho světelná křivka je symetrická podle osy procházející okamžikem středu tranzitu. Jakmile se kotouč exoplanety dotkne druhého okraje hvězdy, začne se zmenšovat zakrytá plocha hvězdy a jasnost soustavy opět lineárně vzroste. *Vzestupná větev minima jasnosti* končí v okamžiku, kdy kotouč exoplanety přestává zakrývat hvězdu a jasnost se dostává na svou původní hodnotu.

Časový interval d označuje dobu úplného zákrytu, kdy je celý disk exoplanety před kotoučem hvězdy. Doba D je dobou částečného tranzitu, kdy kotouč exoplanety zakrývá kotouč hvězdy pouze svou částí, zahrnuje ale i dobu případného úplného zákrytu. Exoplaneta může přes kotouč hvězdy přecházet i pouze částečně, k úplnému zákrytu vůbec nemusí dojít a světelná křivka přijde o svou zastávku v minimu.



Obrázek 2.9: Grafické znázornění podmínky pro tranzit exoplanety přes kotouč hvězdy. Červeně vyznačený úhel i je inklinací úhel mezi normálovým vektorem \vec{n} k rovině oběhu a směrem k pozorovateli. Z pravidel trigonometrie ale vyplývá, že modře vyznačené úhly mají také velikost i . Použijeme-li vzorec 2.6, situace na obrázku je hraniční a kotouč exoplanety se kotouče hvězdy pouze dotkne.



Obrázek 2.10: Světelná křivka tranzitu exoplanety. V tomto případě zanedbáváme okrajové ztemnění hvězdy. Převzato a upraveno z [e14].

Rozdíl mezi tokem záření F před zákrytem a během zákrytu označujeme jako hloubku poklesu ΔF . Z ní můžeme určit relativní velikost exoplanety pomocí

$$\Delta F = \left(\frac{R_P}{R_H} \right)^2, \quad (2.7)$$

kde R_P je poloměr exoplanety a R_H je poloměr mateřské hvězdy. Známe-li poloměr hvězdy R_H , můžeme poloměr exoplanety R_P určit absolutně.

Na obrázku 2.10 jsme zanedbali okrajové ztemnění hvězdy. Okrajové ztemnění je jev, který popisuje pokles jasnosti disku hvězdy směrem k jeho okraji. To je způsobeno tím, že při pohledu do středu kotouče hvězdy se díváme skrz fotosféru a vidíme všechny její vrstvy včetně těch nejteplejších. Při pohledu na okraj disku vidíme pouze chladnější části fotosféry vyzařující menší množství světla, proto se zdají tmavší. V okamžiku, kdy nastane úplný zákryt, jasnost soustavy bude v důsledku okrajového ztemnění dále mírně klesat a ve světelné křivce můžeme sledovat mělké dno jako na obrázku 1.3 d), kde okrajové ztemnění zanedbáno nebylo.

2.3 Diferenciální fotometrie

Světelná křivka se dá získat porovnáváním jasností hvězd na snímcích, v čemž spočívá základní princip diferenciální fotometrie. Její výhoda spočívá v tom, že není třeba brát v potaz atmosférickou extinkci. Nejprve se sečte veškerý signál ve zvolené apertuře, od něj je dále nutné odečíst hladinu pozadí zjištěnou v prstenci kolem dané hvězdy. Získanou informaci o jasnosti pozorované hvězdy porovnáváme s jasností zvolené srovnávací hvězdy.

Srovnávací hvězdu vybíráme takovou, aby sama nebyla proměnnou hvězdou. Tento fakt ověřujeme použitím alespoň jedné kontrolní hvězdy, kdy rozdíl jejich jasností by měl být po celou dobu pozorování konstantní. Srovnávací i kontrolní hvězdu volíme tak, aby měly podobnou hvězdnou velikost jako pozorovaná hvězda. V ideálním případě by srovnávací a kontrolní hvězda měly být mírně jasnější, pak je totiž jejich jasnost určena s menší chybou, což snižuje i celkovou chybu jednotlivých bodů výsledné světelné křivky. Dále by všechny zvolené hvězdy měly mít podobný barevný index, jinak by v různé výšce nad obzorem měly různou jasnost díky tomu, že rozptyl světla v atmosféře je závislý na vlnové délce, a v datech by se vytvářely trendy. Vzdálenost všech zvolených hvězd od sebe navzájem by neměla být příliš velká, jelikož se vzrůstající vzdáleností narůstá vliv gradientů osvětlení a vad optické soustavy.

Před samotnou fotometrií je ale potřeba provést kalibraci naměřených dat použitím temného snímku a tzv. flat field snímku. Obvykle se od každého druhu kalibračního snímku pořídí snímků více a následně se z nich mediánem udělá jeden temný snímek a jeden flat field snímek.

Temný snímek se získává se stejnou expoziční dobou jako vědecké snímky. Význam temného snímku spočívá v eliminaci tepelného šumu v CCD kameře, který s narůstající teplotou a expoziční dobou roste. Od našeho měření je potřeba temný snímek odečíst.

Flat field snímek se získává krátkou expoziční dobou na rovnoměrně osvětleném poli. Jeho použitím se zbavíme efektů spojených s nerovnoměrným osvětlením čipu a rozdílnou citlivostí pixelů. I flat field snímek je potřeba opravit temným snímkem se shodnou délkou expozice. Zpracovaným flat field snímkem je potřeba naše měření podělit.

3 *O-C* diagramy

Světelná křivka se ve většině případů nedá měřit kontinuálně¹⁰. Z přerušovaných dat se dají světelné elementy a model proměnnosti určit jen přibližně. Proto je důležité ověřit správnost světelných elementů na delších časových škálách, k čemuž se většinou používá analýza *O-C* diagramu.

Spočítáme-li předpověď okamžiku nějaké konkrétní fáze (calculated - *C*) a naměříme-li skutečné okamžiky (observed - *O*), ve kterých tato fáze nastala, můžeme vynášet do grafu časovou závislost *O-C* na epoše *E* nebo čase *t*. Hodnota *O-C* je tedy rozdíl mezi předpovězeným a skutečným časem konkrétní fáze v jedné epoše nebo čase.

Díky analýze podoby *O-C* diagramu můžeme upravit světelné parametry objektu a získat tak lepší představu o tom, co se s pozorovaným objektem děje.

3.1 Podoby *O-C* diagramu

Předpokládejme, že perioda proměnnosti daného objektu se nemění. Je-li grafem konstantní vodorovná přímka procházející hodnotou $O-C = 0$, můžeme považovat zvolený model proměnnosti a použité světelné elementy za správné. Pokud je graf *O-C* konstantní funkcí s hodnotou $O-C \neq 0$, je perioda proměnnosti určena správně, ale okamžik základní fáze M_0 správný není.

Pokud je grafem *O-C* lineární funkce procházející počátkem, znamená to, že okamžik základní fáze M_0 je určen správně, perioda ale nikoliv. Novou periodu P_n vypočteme jako

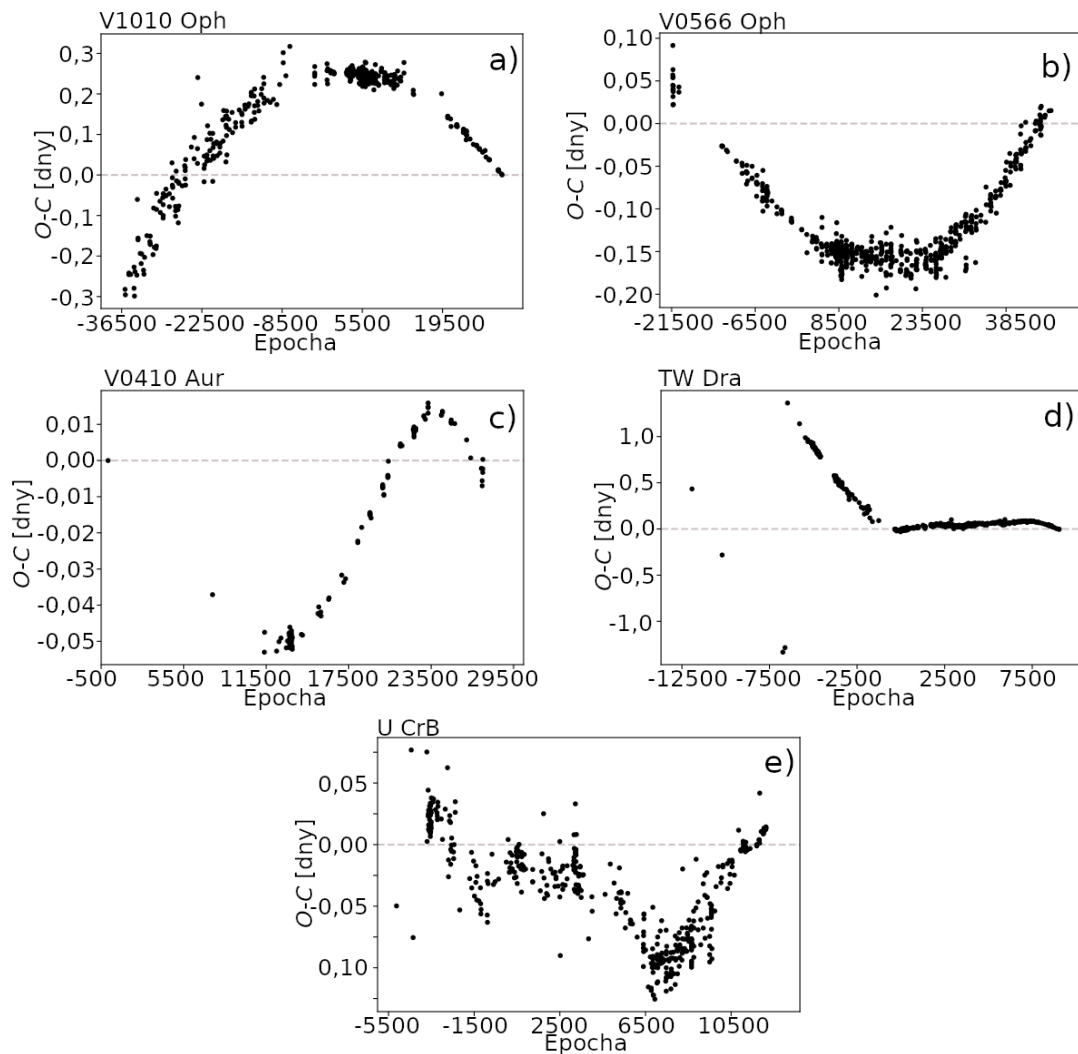
$$P_n = P + \frac{\partial(O-C)}{\partial E}, \quad (3.8)$$

kde k původní (chybné) periodě proměnnosti P přičítáme směrnici přímky proložené daty v *O-C* diagramu.

Pro lineární funkci neprocházející nulou musíme opravit jak periodu P , tak okamžik základního minima M_0 . Nový okamžik základního minima $M_{0,n}$ se bude od M_0 lišit o posun přímky od $O-C = 0$. Po opravě M_0 a posunutí grafu do $O-C = 0$ pro $M_{0,n}$ můžeme použít vzorec 3.8 a získat opravenou periodu P_n .

V případě, že se perioda P proměnnosti objektu lineárně prodlužuje nebo zkracuje, bude mít *O-C* diagram tvar paraboly. Pro zkracující se periodu bude parabola otevřená dolů, jako ukazuje obrázek 3.11 a), pro prodlužující se periodu je parabola otevřená nahoru, podobně jako na obrázku 3.11 b).

¹⁰Problém týkající se kontinuálního měření se dá vyřešit observatořemi za polárním kruhem nebo použitím některého z kosmických dalekohledů.



Obrázek 3.11: *O-C* diagram: a) pro systémy se zkracující se periodou P , b) pro systémy s prodlužující se periodou P , c) s LTTE efektem, d) se zlomem, e) s kombinací změn periody. Zpracováno s pomocí dat z [e26].

Jestliže je pozorovaný objekt gravitačně ovlivňován dalším tělesem, projeví se to na jeho *O-C* diagramu tak, že se graf bude podobat periodické funkci jako na obrázku 3.11 c). Tento jev vzniká periodickým předbíháním a zpožděním signálu během oběhu exoplanety vlivem konečné rychlosti světla (Light-Travel Time Effect - LTTE).

Pokud v grafu *O-C* nastává zlom jako na obrázku 3.11 d), smíme předpokládat, že v systému nastaly nějaké velké změny (např. srážka s jinou hvězdou). Může se ale jednat i o systematickou chybu nebo LTTE. Vypadá-li *O-C* graf například jako na obrázku 3.11 e), poukazuje to na kombinaci několika jevů a perioda proměnnosti P se mění komplikovaněji.

4 Pozorování a zpracování dat

4.1 Kandidáti

K datu 30.9.2019 měla družice TESS 1183 exoplanetárních kandidátů. Pouze část z nich je vhodná pro následná pozorování z České republiky. Zvolila jsem tedy objekty, které splňují následující podmínky:

- jejich rektascenze se nachází v rozmezí od 0° do 225° , objekt tedy bude pozorovatelný v období zimy,
- jejich deklinace se nachází v rozmezí od -10° do 90° , objekt tedy bude pozorovatelný v naší zeměpisné šířce,
- hvězdná velikost objektu je maximálně 12 mag, u slabších objektů už je detekce z Brna obtížná,
- pokles jasnosti je alespoň 1 %, abychom zvýšili šanci na detekci z Brna,
- objekt s danými souřadnicemi nebo identifikací TOI¹¹ není v [e22] veden jako již známá exoplaneta,
- objekt s danými souřadnicemi není v [e28] veden jako vícehvězdný systém, ani zde nemá označení WASP nebo HAT, což znamená, že není veden jako již známá exoplaneta,
- v zimních měsících je doba, po kterou se objekt nachází 30° a výše nad obzorem, delší než doba poklesu s přidáním dvěma hodinami na pozorování před a po poklesu,
- v Aladin Sky Atlas (Bonnarel et al., 2000) jsme ověřili, že se nejedná o optickou dvojhvězdu.

Touto selekcí jsme získali osm exoplanetárních kandidátů, které jsme pro svou potřebu označili písmeny C až J.

Pro nedostatek jiných údajů byl naším jediným vodítkem při výpočtu poklesů jasnosti údaj ppm¹². Deset tisíc ppm tedy odpovídá jednomu procentu. Bohužel se později ukázalo, že v případě dat z TESS tomu tak není a že námi spočítané poklesy jasnosti neodpovídají skutečnosti. Následně byly vyřazeny objekty D, I a J, jelikož jejich poklesy

¹¹TOI je zkratka pro TESS Object of Interest.

¹²Údaj ppm - parts per milion.

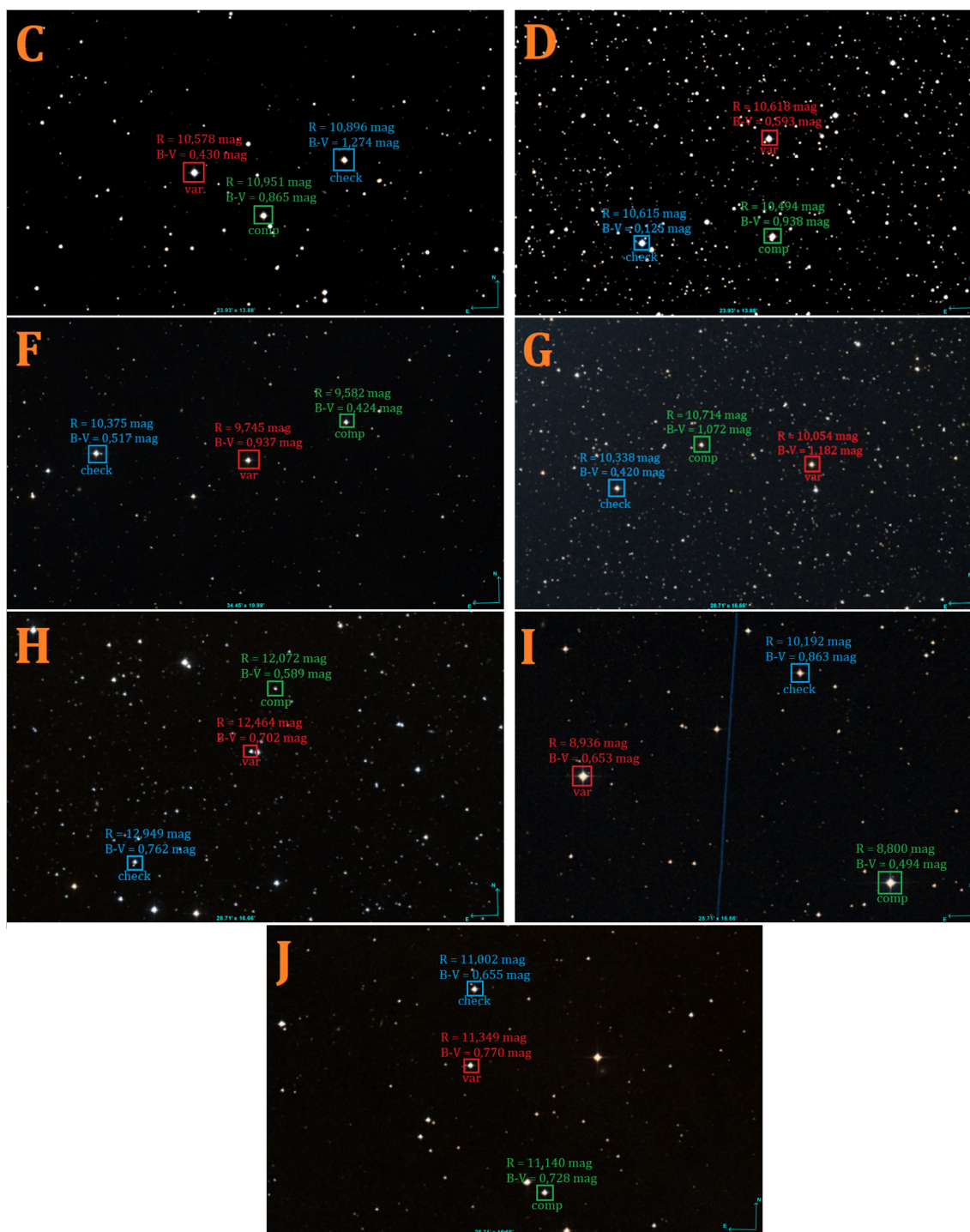
kolem 0,006 mag jsou v našich podmínkách obtížně detekovatelné. Nicméně jsme některé z nich ještě před vyřazením měřili, i jejich světelné křivky jsou tedy v práci zahrnuty¹³.

Tabulka 4.1: Tabulka vybraných kandidátů a jejich srovnávacích a kontrolních hvězd. Sloupec OBJ uvádí, jakého objektu se údaje týkají. Ve sloupci ID *var* označuje přímo kandidáta, *comp* označuje srovnávací hvězdu a *check* kontrolní hvězdu. Třetí sloupec obsahuje identifikační číslo katalogu UCAC4, TOI je identifikace v rámci mise TESS, pátý a šestý sloupec jsou vyhrazeny rovníkovým souřadnicím 2. druhu, v sedmém sloupci je hvězdná velikost ve filtru *r* Sloanovského fotometrického systému, *B – V* označuje barevný index.

OBJ	ID	UCAC4	TOI	RA [°]	DEC [°]	<i>r</i> [mag]	<i>B – V</i> [mag]
C	var	813-018210	1169.01	134,115	72,533	10,578	0,660
C	comp	813-018198	–	133,950	72,502	10,951	0,865
C	check	813-018183	–	133,751	72,542	10,896	1,274
D	var	486-039929	985.01	111,645	7,016	10,618	0,593
D	comp	485-038450	–	111,641	6,943	10,494	0,938
D	check	485-038540	–	111,740	6,938	10,615	0,125
F	var	480-005372	550.01	55,035	5,875	9,745	0,937
F	comp	480-005389	–	55,199	5,882	9,582	0,424
F	check	480-005409	–	54,923	5,917	10,375	0,517
G	var	474-034880	959.01	114,016	4,739	10,054	1,182
G	comp	474-034943	–	114,121	4,758	10,714	1,072
G	check	474-034990	–	114,201	4,717	10,338	0,420
H	var	471-039447	961.01	127,185	4,039	12,464	0,702
H	comp	470-039399	–	127,288	3,941	12,072	0,589
H	check	471-039443	–	127,162	4,095	12,949	0,762
I	var	455-004303	392.01	46,935	0,861	8,936	0,653
I	comp	454-003948	–	46,660	0,767	8,800	0,494
I	check	455-004285	–	46,740	0,953	10,192	0,863
J	var	438-005420	937.01	58,897	-2,506	11,349	0,770
J	comp	437-005223	–	58,831	-2,619	11,140	0,728
J	check	438-005417	–	58,893	-2,438	11,002	0,655

V tabulce 4.1 jsou vypsané údaje zvolených srovnávacích a kontrolních hvězd pro jednotlivé objekty. Kritéria výběru jsou popsána v kapitole 2.3. Na obrázku 4.12 jsou mapky objektů a jejich srovnávacích a kontrolních hvězd. V tabulce 4.2 jsou vypsané světelné elementy a další parametry všech zvolených objektů.

¹³Objekty E a F jsou zvláštní tím, že na shodných souřadnicích jsou v databázi TESS dva objekty s označením TOI 550.01 a TOI 550.02. Tyto objekty mají stejné nejenom souřadnice, ale i hvězdné velikosti. Nicméně se liší v okamžiku M_0 , v periodě P , v hloubce poklesu i v jeho trvání. Později se ukázalo, že pokles kandidáta F bude v našich podmínkách pozorovatelný pouze jednou a pokles kandidáta E dokonce ani jednou. Z těchto důvodů je v tabulce 4.1 a na obrázku 4.12 pouze objekt F.



Obrázek 4.12: Mapa hvězdného okolí vybraných kandidátů. Objekty E a F mají stejné souřadnice, hvězdné velikosti i srovnávací hvězdy, proto je na obrázku pouze objekt F. Červenou barvou (*var*) jsou vyznačeny samotní kandidáti, zelenou barvou (*comp*) jsou vyznačeny zvolené srovnávací hvězdy a modrou barvou (*check*) jsou vyznačeny zvolené kontrolní hvězdy. Snímky z přehlídky SDSS generované programem Aladin Sky Atlas.

Tabulka 4.2: Tabulka parametrů vybraných kandidátů. Sloupec OBJ uvádí, jakého objektu se údaje týkají, T je hvězdná velikost pro širokopásmový filtr, který TESS používá, M_0 označuje barycentrické juliánské datum epochy začátku počítání, od kterého byla odečtena hodnota 2 457 000, P je perioda daného objektu, ve sloupci T_{tr} jsou vypsány doby trvání poklesu jasnosti a Δm vyjadřuje hloubku poklesu v magnitudách.

OBJ	T [mag]	M_0 [BJD]	P [dny]	T_{tr} [hod]	Δm [mag]
C	10,379	1687,12300(55)	6,70742(28)	2,195(64)	0,013
D	10,201	1494,5220(15)	8,7691(11)	3,50(22)	0,005
E	9,002	1447,39855(44)	10,04325(61)	3,100(39)	0,058
F	9,002	1439,58561(24)	13,24984(33)	3,255(21)	0,067
G	10,631	1492,69541(37)	1,541040(40)	1,656(46)	0,012
H	10,624	1496,1683(12)	4,79586(67)	2,13(11)	0,012
I	8,253	1411,59900(22)	0,849070(10)	1,358(30)	0,007
J	10,819	1438,55668(35)	0,276640(10)	0,720(12)	0,006

4.2 Pozorování zvolených kandidátů

Veškerou kalibraci včetně diferenciální fotometrie (jak byla popsána v kapitole 2.3) jsem prováděla v programu Muniwin (Motl, 2015). Ze zpracovaných dat jsem získala světelné křivky, které jsem dále analyzovala.

Celkem bylo pro tuto bakalářskou práci odměřeno 14 nocí. Počet snímků (nepočítaje kalibrační snímky) pro jednotlivé kandidáty byl od 743 pro TOI 550.01 do 1 735 pro TOI 961.01. Celkový počet vědeckých snímků byl 6 627. Já sama měla rezervováno rovněž 14 nocí, během dvanácti z nich však nepřálo počasí. Zbylé dvě rezervované noci jsem měřila, tato pozorování jsou v práci zahrnuta.

Nakonec se s pomocí dalších pozorovatelů podařilo zachytit pět poklesů u tří zvolených kandidátů. Tyto noci jsou vypsány v tabulce 4.3.

Tabulka 4.3: Tabulka pozorovaných poklesů jasnosti zvolených kandidátů.

Kandidát	Datum	Observatoř	Pozorovatel	Expoziční čas [s]
F	1. 1. 2020	Kraví Hora	Jiří Žák	12
C	12. 1. 2020	La Palma	Martin Mašek	60
H	16. 1. 2020	Suhora	Jan Janík	15
C	28. 2. 2020	Kraví Hora	Vendula Slavíková	60
C	28. 2. 2020	La Palma	Martin Mašek	60
H	4. 3. 2020	Kraví Hora	David Štegnér	90

Světelné křivky kandidátů, u nichž nebyl detekován pokles, jsou v Příloze na obrázcích 7.21 až 7.22. Jsou na nich vyznačeny okamžiky, ve kterých měl předpokládaný tranzit podle výpočtů začínat, vrcholit a končit. Tabulka 7.23 těchto pozorování bez poklesů je rovněž k nahlédnutí v Příloze.

5 Analýza $O-C$ diagramu

Pro fitování poklesů v získaných datech jsem použila:

- program EXOFAST (Eastman, 2017) v jeho online verzi dostupné na [e18],
- program Pylightcurve (Tsiaras et al., 2016),
- program ETD (Poddaný et al., 2010) v jeho online verzi dostupné na [e31].

S pomocí těchto programů jsem mohla proložit naměřené světelné křivky zvolených kandidátů modely tranzitu exoplanety, čímž jsem získala pozorované okamžiky středu poklesu O (observed). Pomocí vzorce 2.5 jsem vypočítala hodnoty C (calculated).

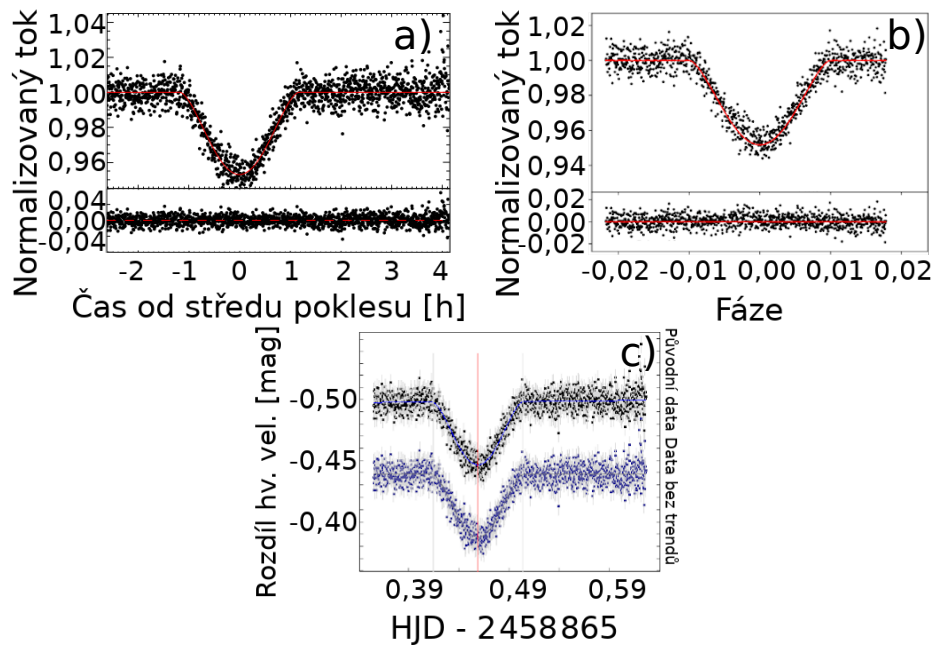
Po vykreslení $O-C$ diagramu jsem měření proložila přímkou $O-C = A \cdot E + B$. Nejistoty jednotlivých bodů byly brány v potaz, jde tedy o váhovaný fit. Jelikož směrnice A odpovídá $\frac{\partial(O-C)}{\partial E}$, podle vzorce 3.8 jsem následně spočítala novou periodu P_n . Posun v nulovém bodu B opravuje okamžik počátku počítání M_0 .

5.1 Kandidát H

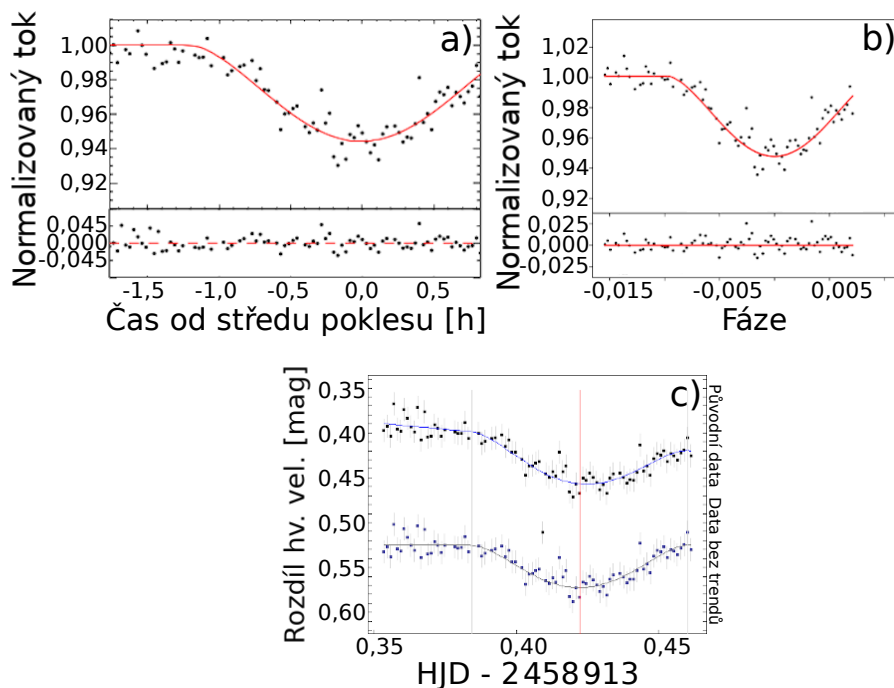
5.1.1 Prokládání světelné křivky

V tabulce 5.4 jsou uvedeny okamžiky minima poklesu T_c , které byly získány fitováním světelné křivky kandidáta H z 16. 1. 2020. Pokles nafitovaný programem EXOFAST je na obrázku 5.13 a), fit z programu Pylightcurve je na obrázku 5.13 b) a fit z programu ETD je na obrázku 5.13 c). Na obrázcích je vidět pokles hluboký přibližně pět setin magnitudy. Tabulky 7.11, 7.12 a 7.13 v Příloze obsahují hodnoty parametrů objektu H, které byly použity při fitování jednotlivými programy.

V posledním sloupci tabulky 5.4 jsou uvedeny okamžiky minima poklesu T_c získané fitováním světelné křivky kandidáta H ze dne 4. 3. 2020. Výsledky těchto fitů jsou na obrázku 5.14. Na obrázcích je vidět pokles hluboký přibližně pět setin magnitudy. Světelná křivka poklesu ale není kompletní, tranzitu chybí vzestupná větev. Fitovací programy měly problémy s interpretací chybějícího závěru tranzitu a určené okamžiky T_c mají větší nejistoty než u předchozí noci. Program ETD předpokládal, že pozorování je kompletní a asymetrie je způsobena klesajícím trendem, proto se okamžik T_c určený tímto programem od ostatních liší. Vstupní parametry fitů jsou v tabulkách 7.14, 7.15 a 7.16 v Příloze.



Obrázek 5.13: Pokles kandidáta H napozorovaný dne 16. 1. 2020 nafitovaný a) v programu EXOFAST, b) v programu Pylightcurve, c) v programu ETD. Ve spodní části obrázků a) a b) jsou znázorněna rezidua po odečtení fitu.



Obrázek 5.14: Pokles kandidáta H napozorovaný dne 4. 3. 2020 nafitovaný a) v programu EXOFAST, b) v programu Pylightcurve, c) v programu ETD. Ve spodní části obrázků a) a b) jsou znázorněna rezidua po odečtení fitu.

Tabulka 5.4: Okamžiky minima poklesu T_c kandidáta H, které byly získány fitováním dat naměřených dne 16. 1. 2020 v druhém sloupci a 4. 3. 2020 ve třetím sloupci tabulky. Vizuální odhady T_c byly provedeny na základě světelných křivek vykreslených v programu EXOFAST.

	$T_{c,1}$ [BJD]	$T_{c,2}$ [BJD]
Vizuální odhad	2 458 865,4653	2 458 913,4325
EXOFAST	2 458 865,46556(27)	2 458 913,42791(92)
pylightcurve	2 458 865,4645(3)	2 458 913,428(11)
ETD	2 458 865,45981(26)	2 458 913,4232(16)

5.1.2 O-C diagram

Způsobem zmíněným na začátku této kapitoly jsem získala hodnoty pro tvorbu $O-C$ diagramu a vypsala je do tabulky 5.5. Výsledný $O-C$ diagram je vyobrazen na obrázku 5.15. Měření byla proložena přímkou s hodnotami $B = -0,001(9)$ dne a $A = 0,00019(12)$ dne.

Původní světelné elementy kandidáta H získané z [e19] nebo z [e30] byly

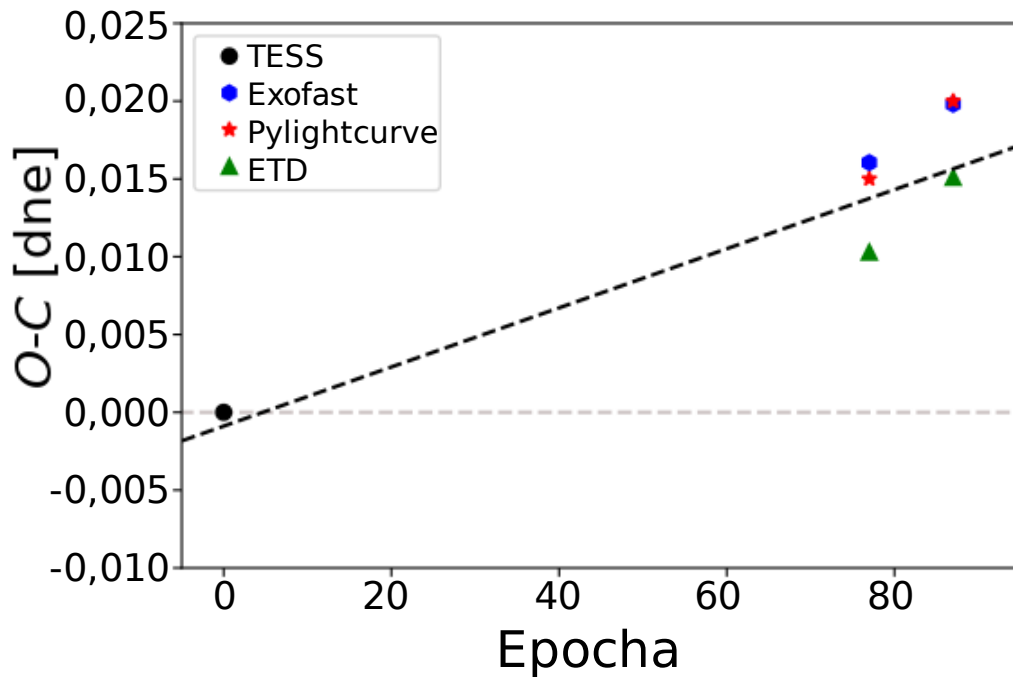
$$\Theta(E) = 2458496,1683(12) + E \times 4,79586(67). \quad (5.9)$$

Opravené světelné elementy kandidáta H jsou

$$\Theta(E) = 2458496,167(9) + E \times 4,79605(12). \quad (5.10)$$

Tabulka 5.5: Hodnoty použité pro tvorbu $O-C$ diagramu kandidáta H. Epocha $E = 0$ odpovídá BJD = 2 458 496,1683(12) dne.

Zdroj	Epocha	O [dne]	C [dne]	$O-C$
Data z TESS	0	2 458 496,1683(12)	2 458 496,1683	0,0000(12)
EXOFAST	77	2 458 865,46556(27)	2 458 865,44951	0,01605(27)
PyLightcurve	77	2 458 865,4645(3)	2 458 865,44951	0,0150(3)
ETD	77	2 458 865,45981(26)	2 458 865,44951	0,01030(26)
EXOFAST	87	2 458 913,42791(92)	2 458 913,40811	0,01980(92)
PyLightcurve	87	2 458 913,428(11)	2 458 913,40811	0,020(11)
ETD	87	2 458 913,4232(16)	2 458 913,40811	0,0151(16)



Obrázek 5.15: $O-C$ diagram kandidáta H. Epocha $E = 0$ odpovídá BJD = 2 458 496,1683(12) dne.

5.2 Kandidát C

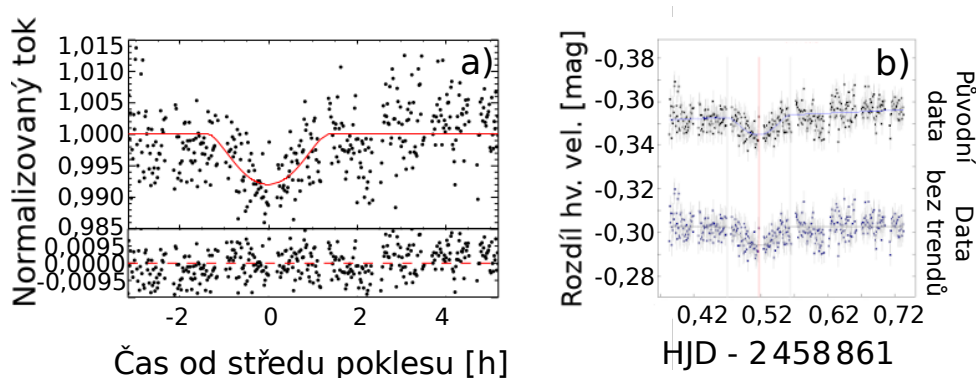
5.2.1 Prokládání světelné křivky

Okamžiky minima poklesu T_c získané fitováním světelné křivky kandidáta C z 12. 1. 2020 jsou uvedeny v druhém sloupci tabulky 5.6. Výsledné fity jsou na obrázku 5.16. Na obrázcích je vidět pokles hluboký přibližně sedm setin magnitudy. Program Pylightcurve si s touto světelnou křivkou neporadil, proto fit tímto programem na obrázku 5.16 chybí. Tabulky 7.17 a 7.18 v Příloze obsahují vstupní parametry fitů objektu C.

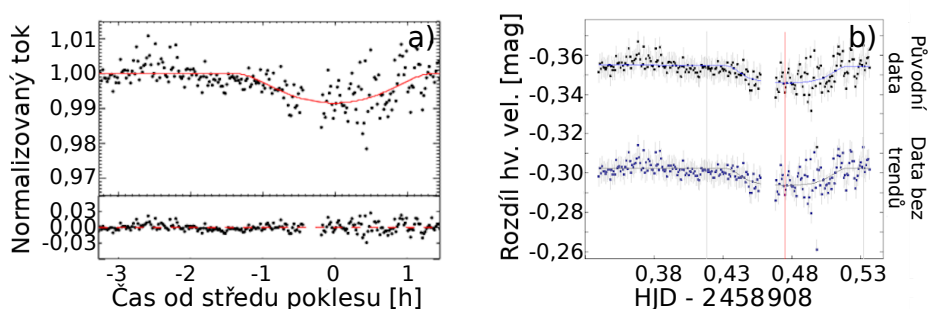
Poslední sloupec tabulky 5.6 obsahuje okamžiky minima poklesu T_c získané fitováním světelné křivky kandidáta C ze dne 28. 2. 2020. První část dat byla naměřena ve filtru R na hvězdárně na Kraví Hoře, závěrečná část byla měřena rovněž ve filtru R dalekohledem FRAM na observatoři Roque de Los Muchachos na La Palmě na Kanárských ostrovech. Obě datové sady byly okalibrované vlastními kalibračními snímky. Data vůči sobě nebyla nijak posouvána. Výsledky fitů této světelné křivky jsou vidět na obrázku 5.17. I na tomto obrázku chybí fit programem Pylightcurve, jelikož tuto světelnou křivkou nedokázal proložit žádným modelem. Tabulky 7.19 a 7.20 v Příloze obsahují hodnoty parametrů objektu C, které byly použity při fitování jednotlivými programy.

Tabulka 5.6: Okamžiky minima poklesu T_c kandidáta C, které byly získány fitováním dat naměřených dne 12. 1. 2020 v druhém sloupci a 28. 2. 2020 ve třetím sloupci tabulky. Vizuální odhady T_c byly provedeny na základě světelných křivek vykreslených v programu EXOFAST.

	$T_{c,1}$ [BJD]	$T_{c,2}$ [BJD]
Vizuální odhad	2 458 861,508	2 458 908,468
EXOFAST	2 458 861,5170(22)	2 458 908,4766(21)
ETD	2 458 861,5171(20)	2 458 908,4758(29)



Obrázek 5.16: Pokles kandidáta C napozorovaný dne 12. 1. 2020 nafitovaný a) v programu EXOFAST, b) v programu ETD. Ve spodní části obrázku a) jsou znázorněna rezidua po odečtení fitu.



Obrázek 5.17: Pokles kandidáta C napozorovaný dne 28. 2. 2020 nafitovaný a) v programu EXOFAST, b) v programu ETD. Ve spodní části obrázku a) jsou znázorněna rezidua po odečtení fitu.

5.2.2 O-C diagram

Hodnoty pro tvorbu *O-C* diagramu jsou vypsány v tabulce 5.7. Na obrázku 5.18 je vyobrazen *O-C* diagram získaný z těchto dat. Měření byla proložena přímkou s hodnotami $B = -0,00008(85)$ dne a směrnici $A = 0,000159(66)$ dne.

Původní světelné elementy kandidáta C získané z [e19] nebo z [e30] byly

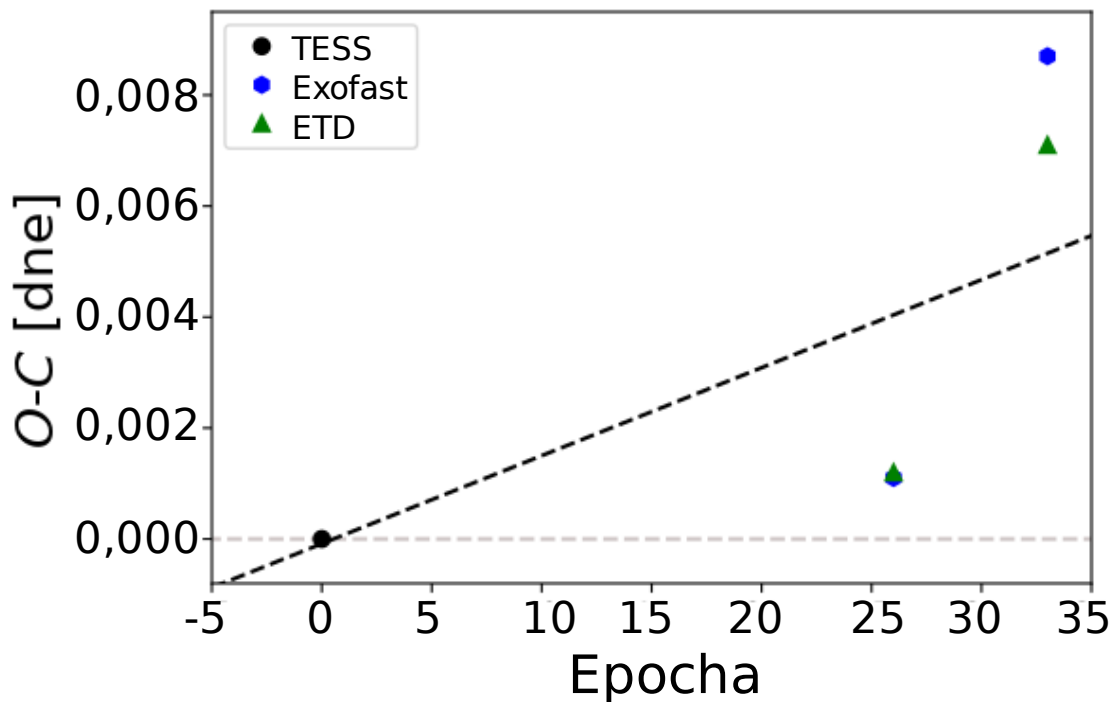
$$\Theta(E) = 2458687,12300(55) + E \times 6,70742(28). \quad (5.11)$$

Opravené světelné elementy kandidáta C jsou

$$\Theta(E) = 2458687,12308(85) + E \times 6,707579(66). \quad (5.12)$$

Tabulka 5.7: Hodnoty použité pro tvorbu $O-C$ diagramu kandidáta C. Epocha $E = 0$ odpovídá BJD = 2458687,12300(55) dne.

Zdroj	Epocha	O [dne]	C [dne]	$O-C$
Data z TESS	0	2458687,12300(55)	2458687,12300	0,00000(55)
EXOFAST	26	2458861,5170(22)	2458861,51592	0,0011(22)
ETD	26	2458861,5171(20)	2458861,51592	0,0012(20)
EXOFAST	33	2458908,4766(21)	2458908,46786	0,0087(21)
ETD	33	2458908,4750(29)	2458908,46786	0,0071(29)



Obrázek 5.18: $O-C$ diagram kandidáta C. Epocha $E = 0$ odpovídá BJD = 2458687,12300(55) dne. Hodnota $O-C$ z TESS a hodnota pro data 26. epochy fitovaná programem ETD mají v porovnání s ostatními hodnotami velice malé nejistoty, a to je důvod, proč má fit tuto podobu.

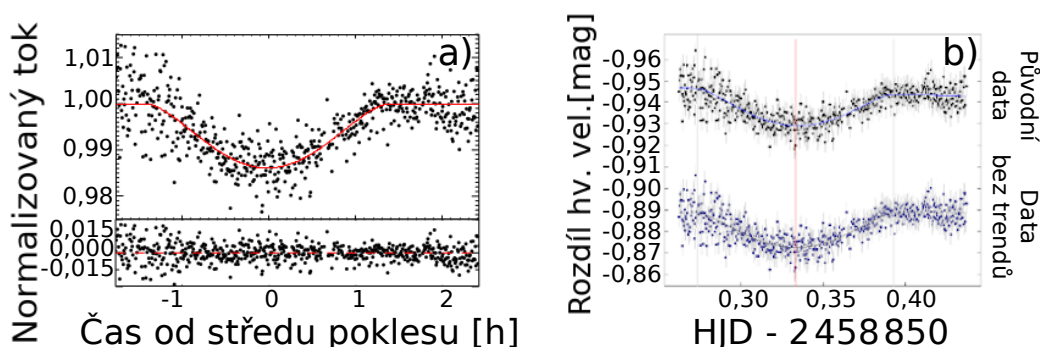
5.3 Kandidát F

5.3.1 Prokládání světelné křivky

Analogický postup byl aplikován při prokládání světelné křivky kandidáta F napozorované dne 1. 1. 2020. V tabulce 5.8 jsou uvedeny získané okamžiky středu poklesu T_c . Fity jsou na obrázku 5.19. Na obrázcích je vidět pokles hluboký přibližně jeden a půl setiny magnitudy. Z obdobných důvodů jako v případě kandidáta C na obrázku 5.19 chybí fit programem Pylightcurve. Tabulky 7.21 a 7.22 v Příloze obsahují vstupní parametrů objektu F použité při fitování jednotlivými programy.

Tabulka 5.8: Okamžiky minima poklesu T_c kandidáta F, které byly získány fitováním dat naměřených dne 1. 1. 2020. Vizualní odhad T_c byl proveden na základě světelné křivky vykreslené v programu EXOFAST.

	T_c [BJD]
Vizuální odhad	2 458 850,335
EXOFAST	2 458 850,33697(72)
ETD	2 458 850,33394(97)



Obrázek 5.19: Pokles kandidáta F napozorovaný dne 1. 1. 2020 nafitovaný a) v programu EXOFAST, b) v programu ETD. Ve spodní části obrázku a) jsou znázorněna rezidua po odečtení fitu.

5.3.2 O-C diagram

V tabulce 5.9 jsou vypsány hodnoty pro tvorbu *O-C* diagramu. Výsledný diagram byl vytvořen stejným způsobem jako u přechozích kandidátů a je vyobrazen na obrázku 5.20. Měření byla proložena přímkou, kde B je velmi blízké nule a směrnice má hodnotu $A = 0,000172(51)$ dne.

Původní světelné elementy kandidáta F získané z [e19] nebo z [e30] byly

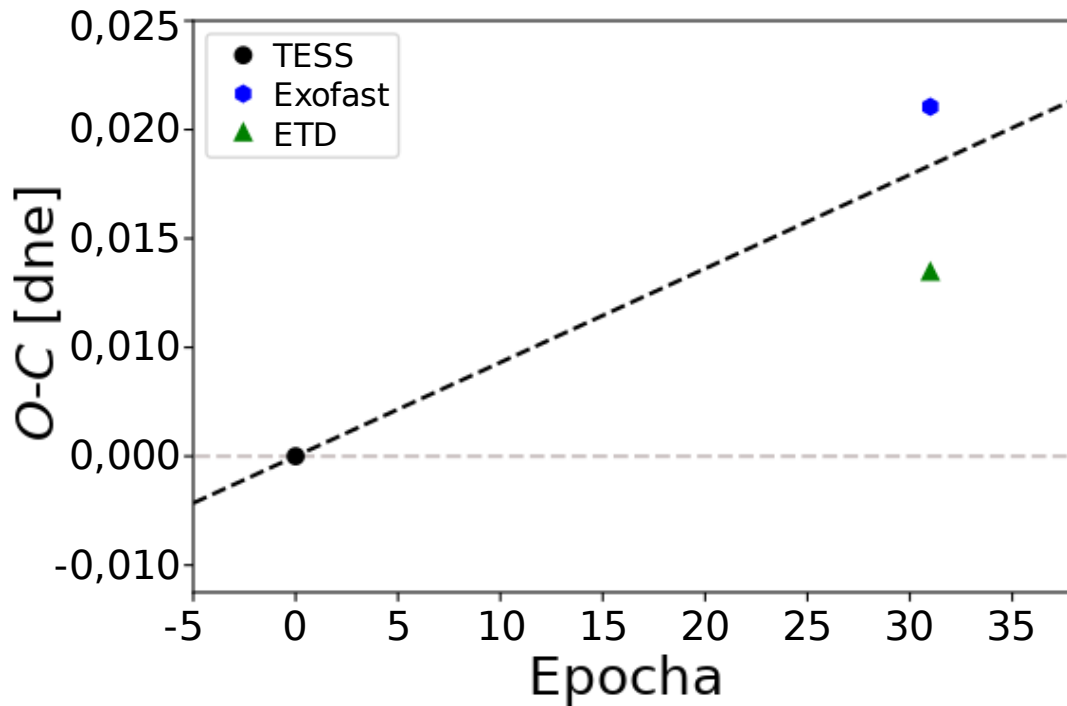
$$\Theta(E) = 2458439,58561(24) + E \times 13,24984(33). \quad (5.13)$$

Opravené světelné elementy kandidáta F jsou

$$\Theta(E) = 2458439,58561(24) + E \times 13,250026(51). \quad (5.14)$$

Tabulka 5.9: Hodnoty použité pro tvorbu $O-C$ diagramu kandidáta F. Epocha $E = 0$ odpovídá BJD = 2 458 439,58561(24) dne.

Zdroj	Epocha	O [dne]	C [dne]	$O-C$
Data z TESS	0	2 458 439,58561(24)	2 458 439,58561	0,00000(24)
EXOFAST	31	2 458 850,33697(72)	2 458 850,33055	0,00642(72)
ETD	31	2 458 850,33394(97)	2 458 850,33055	0,00339(97)



Obrázek 5.20: $O-C$ diagram kandidáta F. Epocha $E = 0$ odpovídá BJD = 2 458 439,58561(24) dne.

5.4 Diskuze

Z rovnice 5.10 můžeme zjistit novou periodu kandidáta H P_n . Od původní periody P_{TESS} liší jenom o 16 s. Jenže po uběhnutí 77 epoch je rozdíl v okamžiku minima poklesu téměř 21 min, pro 87. epochu tento rozdíl činí už 23 min. Okamžik M_0 tohoto kandidáta byl opraven o 86 s.

Perioda kandidáta C P_n se od P_{TESS} liší přibližně o 14 s. Novou periodu můžeme vidět v rovnici 5.12. Po uběhnutí 26 epoch byl rozdíl v okamžiku minima poklesu 6 min,

pro 33. epochu se jednalo o rozdíl téměř 8 min. Okamžik M_0 tohoto kandidáta byl opraven o 7 s. Určení okamžiku středu tranzitu je u prvního pozorování zřejmě mnohem přesnější než u druhé noci. Tím mohl být výsledek zkreslen a směrnice díky hodnotě $O-C$ druhé noci vzrostla, jak je vidět na obrázku 5.18. Skutečná perioda tohoto objektu tedy může být mnohem blíže původní periodě určené TESS, než jakou jsem z $O-C$ diagramu získala já.

V rovnici 5.14 je vidět opravená perioda P_n kandidáta F. Od původní periody P_{TESS} liší jen o 14,9 s. Po uběhnutí 31 epoch je rozdíl v okamžiku minima poklesu necelých 8 min, pro 100. epochu by se již jednalo o rozdíl 25 min.

V tabulkách 5.5, 5.7 a 5.9 si lze všimnout, že hodnoty $O-C$ získané na základě fitů z programu ETD jsou systematicky menší než z fitů v Pylightcurve a Exofastu. Důvodem je zřejmě fakt, že Pylightcurve a Exofast používají pro fitování fyzikální model s více parametry, kdežto program ETD je fenomenologický.

Nejvíce bylo potřeba opravit periodu kandidáta H, nejmenší opravu periody jsem provedla u kandidáta C. Pokud bychom prováděli měření v ještě vzdálenější budoucnosti, mohlo by se snadno stát, že bychom zachytili pouze část tranzitu nebo bychom tranzit úplně minuli.

Hloubka poklesu kandidáta G je shodná s hloubkou poklesu kandidáta H, jak můžeme vidět v tabulce 4.2. Přesto se nám ani jedenkrát ze tří pozorování nepodařilo zachytit pokles kandidáta G. To mohlo být způsobeno velkou nepřesností určené periody či ve skutečnosti méně hlubokým poklesem jasnosti.

Tabulkové hodnoty poloměru kandidáta H byly 2,10(41) R_J , ale nafitované poloměry byly téměř dvojnásobné, což by mohlo znamenat mnohem větší velikost exoplanetárního kandidáta. Ověření by ale vyžadovalo další měření většími přístroji.

Většina známých exoplanet obíhá hvězdy podobné Slunci, jde tedy o spektrální typy F, G nebo K. V tabulce 5.10 vidíme, že mateřské hvězdy kandidátů C, F i H jsou právě takovými hvězdami, poklesy jasnosti se tedy dají vysvětlit tranzity dalšího tělesa. Poměry poloměrů R_P tělesa a R_H jeho mateřské hvězdy R_P/R_H v tabulce 5.10 ukazují, že tranzitující těleso je podstatně menší než hvězda, kolem které obíhá. Pokud by hmotnosti M_P těchto těles dosahovaly hodnot 13 až přibližně 80 M_J , s největší pravděpodobností by se jednalo o exoplanety, ale o hnědé trpaslíky. Z dostupných informací tedy můžeme odvodit, že v případě daných tří kandidátů by mělo jít o hvězdy a jejich exoplanety. Jelikož ale

Tabulka 5.10: Tabulka parametrů vybraných kandidátů a jejich mateřských hvězd. Sloupec OBJ uvádí, jakého objektu se údaje týkají, HSK označuje spektrální typ hvězdy podle Harvardské spektrální klasifikace určený podle hodnot $B - V$ v [e21], M_H je hmotnost mateřské hvězdy vyjádřená v hmotnostech Slunce, M_P je hmotnost předpokládané exoplanety v hmotnostech Jupiteru, R_H je poloměr mateřské hvězdy vyjádřená v poloměrech Slunce, R_P/R_H vyjadřuje poměr poloměrů R_P předpokládané exoplanety a R_H hvězdy. Hodnoty pocházejí z [e19], z [e28] nebo z [e30].

OBJ	HSK	M_H [M_\odot]	R_H [R_\odot]	M_P [M_J]	R_P/R_H
C	K0	–	1,24(16)	2,11(41)	0,109
F	K4	–	0,670(23)	1,63(0,34)	0,244(50)
H	G8	1,08(14)	1,30(5)	2,14(41)	0,106

nejspíš dochází pouze k tečnému zákrytu nebo může být dokonce chybně určený inklinací úhel i , tranzitující těleso může být mnohem větší, než literatura uvádí.

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo pozorovat zvolené exoplanetární kandidáty a pomocí $O-C$ diagramů opravit jejich světelné elementy určené na základě dat získaných družicí TESS. Bylo zvoleno osm objektů, jež byly následně pozorovány několika různými pozorovateli na observatořích Kraví Hora v Brně, Ondřejov, Suhora v Polsku a Roque de Los Muchachos na La Palmě v období od podzimu 2019 do jara 2020.

Rozmezí hvězdných velikostí v širokopásmém filtru používaném družicí TESS zvolených objektů bylo od 10,819 mag pro TOI 937.01 do 8,253 mag pro TOI 392.01. Periody změn jasnosti se pohybovaly od 0,276640(10) dne do 13,24984(33) dne.

Celkem bylo pro tuto bakalářskou práci odpozorováno 14 nocí. Kandidát C byl měřen tři noci (jedna noc byla pozorována na dvou místech), z toho byl tranzit zachycen dvakrát. Kandidát F byl pozorován jednu noc a tranzit byl zachycen. Kandidát G byl pozorován po tři noci, ani jedinkrát tranzit zachycen nebyl, ačkoliv by pokles měl být dostatečně hluboký. Kandidáta H jsme měřili dvě noci, v obou případech byl tranzit detekován. Kandidát J byl rovněž pozorován dvakrát, avšak ve obou případech bez tranzitu. Nedetekování tranzitů mohlo být zaviněno nepřesnou předpovědí způsobenou špatnými světelnými elementy, nekvalitními daty nebo nevhodným počasím během pozorovací noci. Světelné křivky pozorování, ve kterých nebyl detekován pokles, jsou k nahlédnutí v Příloze na obrázcích 7.21 až 7.22.

Diferenciální fotometrie a veškerá kalibrace snímků byla prováděna v programu Muiniwin. Výsledné světelné křivky byly proloženy křivkou odpovídající tranzitu exoplanety ve fitovacích programech EXOFAST (Eastman, 2017), Pylightcurve (Tsiaras et al., 2016) a ETD (Poddaný et al., 2010). S pomocí těchto fitů jsme zjistili pozorované okamžiky středu tranzitu O , ty jsme poté porovnali s předpovězenými okamžiky C . Rozdíly $O-C$ byly vyneseny do $O-C$ diagramu a následně byla data proložena lineárním fitem. Ze směrnice tohoto fitu jsme zjistili potřebnou opravu periody daného exoplanetárního kandidáta.

Opravené periody kandidátů s napozorovaným tranzitem se lišily o 14 s (TOI 1169.01), 14,9 s (550.01) a 16 s (961.01). Na základě diskuze spektrálních typů mateřských hvězd a parametrů zkoumaných těles jsme došli k závěru, že tranzitující těleso je podstatně menší než hvězda, kolem které obíhá. Na obrázcích světelných křivek daných objektů ale můžeme vidět, že tranzit nemá žádnou zastávku v minimu. V takovém případě může mít inklinací úhel jinou hodnotu a tranzitující těleso může být mnohem větší, než předpokládáme. Mohlo by se jednat i o hnědého či dokonce červeného trpaslíka. Pro potvrzení exoplanetární povahy pozorovaných objektů je potřebné spektroskopické měření radiálních rychlostí, s pomocí kterých lze odhadnout spodní mez hmotnosti exoplanetárního kandidáta.

Seznam použitých zdrojů

- Bonnarel, F., Fernique, P., Bienaymé, O., et al. 2000, *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 143, 33
- Borucki, W. J., Koch, D., Basri, G., et al. 2010, *Science*, 327, 977
- Campbell, B., Walker, G. A. H., & Yang, S. 1988, *Astrophysical Journal*, 331, 902
- Cochran, W. D., Hatzes, A. P., Endl, M., et al. 2002, *American Astronomical Society - Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #34*, 34, 42.02
- Deeg, H. 1998, *Brown Dwarfs and Extrasolar Planets*, 216
- Eastman, J. 2017, EXOFASTv2: Generalized publication-quality exoplanet modeling code, *Astrophysics Source Code Library*:1710.003
- Lissauer, J. J. 1999, *Nature*, 398, 659
- Mayor, M., & Queloz, D. 1995, *Nature*, 378, 355
- Mikulášek, Z., Krtička, J. 2005, *Základy fyziky hvězd* [skripta]
- Mikulášek, Z., Zejda, M. 2013, *Úvod do studia proměnných hvězd* [skripta]
- Poddaný, S., Brát, L., & Pejcha, O. 2010, *New Astronomy*, 15, 297
- Ricker, G. R., Winn, J. N., Vanderspek, R., et al. 2014, *Proceedings of the SPIE*, 914320
- Santos, N. C., Mayor, M., Naef, D., et al. 2001, *Astronomy and Astrophysics*, 379, 999
- Sterken, C. 2005, *The Light-time Effect in Astrophysics: Causes and Cures of the O-C Diagram*, 3
- Strigari, L. E., Barnabè, M., Marshall, P. J., et al. 2012, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 423, 1856
- Tsiaras, A., Waldmann, I. P., Rocchetto, M., et al. 2016, pylightcurve: Exoplanet lightcurve model, *Astrophysics Source Code Library*:1612.018
- Walker, G. A. H., Bohlender, D. A., Walker, A. R., et al. 1992, *ApJL*, 396, L91
- Wolszczan, A., & Frail, D. A. 1992, *Nature*, 355, 145

Elektronické zdroje

- [e1] https://en.wikipedia.org/wiki/Teide_1#/media/File:BrownDwarfs_Comparison_01.png [cit. 01.01.2020]
- [e2] https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/exoplanetplots/exo_densmass.png [cit. 30.01.2020]
- [e3] https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/exoplanetplots/exo_eccperiod.png [cit. 30.01.2020]
- [e4] https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/exoplanetplots/exo_massperiod.png [cit. 30.01.2020]
- [e5] <https://cdn.eso.org/images/screen/eso0722e.jpg> [cit. 28.01.2020]
- [e6] https://www.esa.int/var/esa/storage/images/esa_multimedia/images/2019/02/detecting_exoplanets_with_astrometry/19268741-1-eng-GB/Detecting_exoplanets_with_astrometry_pillars.jpg [cit. 28.01.2020]
- [e7] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/7e/Gravitational_micro_rev.svg/1280px-Gravitational_micro_rev.svg.png [cit. 30.12.2019]
- [e8] https://www.researchgate.net/profile/Andrew_Mao/publication/312524607/figure/fig1/AS:45217602473984001484818573073/A-light-curve-showing-the-transit-method-of-detecting-exoplanets.png [cit. 28.01.2020]
- [e9] https://www.nasa.gov/images/content/444225main_exoplanet20100414-a-516.jpg [cit. 17.02.2020]
- [e10] https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/tess/images/mission/tess_bandpass.png [cit. 18.03.2020]
- [e11] <https://tess.mit.edu/wp-content/uploads/tess-anatomy.png> [cit. 18.03.2020]
- [e12] https://tess.mit.edu/wp-content/uploads/PM_year2_cel.png [cit. 01.01.2020]
- [e13] https://tess.mit.edu/wp-content/uploads/sky_coverage.png [cit. 01.01.2020]
- [e14] https://www.researchgate.net/profile/Michael_Cowley2/publication/262113563/figure/fig1/AS:361000172834825@1463080556348/Image-showing-transit-of-exoplanet-in-front-of-a-star-from-left-to-right-and-the.png [cit. 17.02.2020]
- [e15] <https://corot.cnes.fr/en/COROT/index.htm> [cit. 01.01.2020]
- [e16] <https://sci.esa.int/web/cheops> [cit. 01.01.2020]

- [e17] <https://sci.esa.int/web/plato> [cit. 01. 01. 2020]
- [e18] <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/cgi-bin/ExoFAST/nph-exofast>
- [e19] https://exofop.ipac.caltech.edu/tess/view_toi.php [cit. 10. 04. 2020]
- [e20] <https://exoplanets.nasa.gov/alien-worlds/ways-to-find-a-planet/#/3> [cit. 20. 03. 2020]
- [e21] <https://www.stsci.edu/~inr/intrins.html> [cit. 01. 07. 2020]
- [e22] <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu> [cit. 06. 02. 2020]
- [e23] <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu> [cit. 20. 03. 2020]
- [e24] <http://w.astro.berkeley.edu/~basri/defineplanet/IAU-WGExSP.htm> [cit. 29. 12. 2019]
- [e25] https://www.iau.org/static/resolutions/Resolution_GA26-5-6.pdf [cit. 29. 12. 2019]
- [e26] <http://var2.astro.cz/ocgate/> [cit. 13. 02. 2020]
- [e27] <https://www.skyandtelescope.com/astronomy-news/corot-mission-ends/> [cit. 20. 03. 2020]
- [e28] <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/> [cit. 14. 10. 2019]
- [e29] <https://tess.mit.edu/> [cit. 01. 01. 2020]
- [e30] <https://tev.mit.edu/data/collection/193/> [cit. 10. 04. 2020]
- [e31] <http://var2.astro.cz/ETD/protocol.php>
- [e32] <https://wasp-planets.net/about/> [cit. 01. 01. 2020]

Použitý software

Aladin Sky Atlas, vyvinuto v CDS, Strasbourg Observatory, Francie, 2000A&AS..143...33B, 2014ASPC..485..277B

Muniwin 2.1.27, 2003-2015 David Motl, dmotl@volny.cz, Česká Republika, <http://c-munipack.sourceforge.net/>

Příloha

7.1 Vstupní parametry fitovaných poklesů

Tabulka 7.11: Parametry objektu H, které byly použity při fitování jeho poklesu napozorovaného dne 16. 1. 2020 programem EXOFAST. Sloupec Tabulková hodnota uvádí hodnoty z [e19] nebo z [e30], ve sloupci Dosazeno jsou hodnoty, které jsem dosadila do fitovacího programu, a sloupec Získáno udává hodnoty, které byly fitováním získány. Zadaný okamžik minima T_c ve dnech byl odhadnut vizuálně, R_p/R_H vyjadřuje poměr poloměrů R_p exoplanety a R_H hvězdy, i je odhadnutý inklinací úhel ve stupních, F_0 je normalizovaná hodnota toku, $\log g_H$ je gravitace na povrchu hvězdy v jednotkách soustavy cgs, T_{eff} vyjadřuje povrchovou teplotu hvězdy v Kelvinech, $[\text{Fe}/\text{H}]$ je metalicita hvězdy, tedy rozdíl dekadických logaritmů poměru obsahu železa a vodíku dané hvězdy a Slunce, jednotka [dex] je zkratka pro decimální exponent, P je doba oběhu předpokládané exoplanety kolem hvězdy ve dnech, M_H je hmotnost hvězdy vyjádřená v hmotnostech Slunce.

	Tabulková hodnota	Dosazeno	Získáno
T_c [BJD]	–	2 458 865,4653	2 458 865,46556(27)
R_p/R_H	0,106	0,106	0,304
i [°]	–	83	83,41
F_0	–	1	1,000276
$\log g_H$ [\log_{10} (cm/s ²)]	4,37(2)	4,37(2)	4,37
T_{eff} [K]	5 783(112)	5 783(112)	5 782
$[\text{Fe}/\text{H}]$ [dex]	–	0,0(5)	-0,000247
P [dny]	4,79586(67)	4,79586(67)	4,79586
M_H [M_{\odot}]	1,08(14)	–	1,06
R_H [R_{\odot}]	1,30(5)	–	1,11
R_p [R_J]	2,10(41)	–	3,30

Tabulka 7.12: Parametry objektu H, které byly použity při fitování jeho poklesu napozorovaného dne 16. 1. 2020 programem Pylightcurve. Sloupec Tabulková hodnota uvádí hodnoty z [e19] nebo z [e30], ve sloupci Dosazeno jsou hodnoty, které jsem dosadila do fitovacího programu, a sloupec Získáno udává hodnoty, které byly fitováním získány. Zadaný okamžik minima T_c ve dnech byl odhadnut vizuálně, R_p/R_H vyjadřuje poměr poloměrů R_p exoplanety a R_H hvězdy, i je odhadnutý inklinací úhel ve stupních, a/R_H je poměr mezi hlavní poloosou oběžné dráhy a poloměrem hvězdy R_H , P je doba oběhu předpokládané exoplanety kolem hvězdy ve dnech, e je excentricita oběžné dráhy (pro jednoduchost kružnice).

	Tabulková hodnota	Dosazeno	Získáno
T_c [BJD]	–	2 458 865,465	2 458 865,4645(3)
R_p/R_H	0,106	0,18	–
i [°]	–	80	$82,1^{+0,6}_{-3,4}$
a/R_H	9,863	9,863	–
P [dny]	4,79586(67)	4,79586	4,79586
e	–	0	0

Tabulka 7.13: Parametry objektu H, které byly použity při fitování jeho poklesu napozorovaného dne 16. 1. 2020 programem ETD. Sloupec Tabulková hodnota uvádí hodnoty z [e19] nebo z [e30], ve sloupci Dosazeno jsou hodnoty, které jsem dosadila do fitovacího programu, a sloupec Získáno udává hodnoty, které byly fitováním získány. Zadaný okamžik minima T_c ve dnech byl odhadnut vizuálně ze světelné křivky v programu EXOFAST a převeden na HJD, T_{tr} je doba trvání poklesu jasnosti, R_p je poloměr exoplanety vyjádřený v poloměrech hvězdy R_H , ΔF je pokles jasnosti a na poměru poloměrů exoplanety a hvězdy závisí podle vzorce 2.7, b je impakt parametr $b = \frac{a \cdot \cos(i)}{R_H}$ vyjadřující, jak velká část kotouče hvězdy bude exoplanetou zakryta.

	Tabulková hodnota	Dosazeno	Získáno
T_c [HJD]	–	2 458 865,464455	2 458 865,45896(26)
T_{tr} [min]	128(6)	128	129(2)
R_p [R_H]	0,106	0,106	–
ΔF [mag]	–	–	0,05141(61)
b	–	0,95	–
okrajové ztemnění	–	0,7	–

Tabulka 7.14: Parametry objektu H, které byly použity při fitování jeho poklesu napozorovaného dne 4. 3. 2020 programem EXOFAST. Označení jsou stejná jako v tabulce 7.11.

	Tabulková hodnota	Dosazeno	Získáno
T_c [BJD]	–	2 458 913,4325	2 458 913,42791(92)
R_p/R_H	0,106	0,106	0,455
i [°]	–	83	81,90
F_0	–	1	1,029489
$\log g_H$ [\log_{10} (cm/s ²)]	4,37(2)	4,37(2)	4,37
T_{eff} [K]	5 783(112)	5 783(112)	5 783
[Fe/H] [dex]	–	0,0(5)	-0,000168
P [dny]	4,79586(67)	4,79586(67)	4,79586
M_H [M_\odot]	1,08(14)	–	1,06
R_H [R_\odot]	1,30(5)	–	1,11
R_p [R_J]	2,10(41)	–	4,93

Tabulka 7.15: Parametry objektu H, které byly použity při fitování jeho poklesu napozorovaného dne 4. 3. 2020 programem Pylightcurve. Označení jsou stejná jako v tabulce 7.12.

	Tabulková hodnota	Dosazeno	Získáno
T_c [BJD]	–	2 458 913,425	2 458 913,428(11)
R_p/R_H	0,106	0,18	–
i [°]	–	82	$86,5^{+0,4}_{-2,2}$
a/R_H	9,863	9,863	–
P [dny]	4,79586(67)	4,79586	4,79586
e	–	0	0

Tabulka 7.16: Parametry objektu H, které byly použity při fitování jeho poklesu napozorovaného dne 4. 3. 2020 programem ETD. Označení jsou stejná jako v tabulce 7.13.

	Tabulková hodnota	Dosazeno	Získáno
T_c [HJD]	–	2 458 913,43165	2 458 913,4224(16)
T_{tr} [min]	128(6)	128	110(9)
R_p [R_H]	0,106	0,106	–
ΔF [mag]	–	–	0,0477(47)
b	–	0,95	–
okrajové ztemnění	–	0,7	–

Tabulka 7.17: Parametry objektu C, které byly použity při fitování jeho poklesu napozorovaného dne 12. 1. 2020 programem EXOFAST. Označení jsou stejná jako v tabulce 7.11.

	Tabulková hodnota	Dosazeno	Získáno
T_c [BJD]	–	2 458 861,508	2 458 861,5170(22)
R_p/R_H	0,109	0,109	0,111
i [°]	–	83	85,23
F_0	–	1	1,001546
T_{eff} [K]	6 134(420)	6 134(420)	6 133
[Fe/H] [dex]	–	0,0(5)	-0,000406
P [dny]	6,70742(28)	6,70742(28)	6,70742
R_H [R_\odot]	1,24(16)	–	1,41
R_p [R_J]	1,25(34)	–	1,52

Tabulka 7.18: Parametry objektu C, které byly použity při fitování jeho poklesu napozorovaného dne 12. 1. 2020 programem ETD. Označení jsou stejná jako v tabulce 7.13.

	Tabulková hodnota	Dosazeno	Získáno
T_c [HJD]	–	2 458 861,5072	2 458 861,5171(22)
T_{tr} [min]	132(4)	132	135(13)
R_p [R_H]	0,109	0,109	–
ΔF [mag]	–	–	0,00857(89)
b	–	0,95	–
okrajové ztemnění	–	0,8	–

Tabulka 7.19: Parametry objektu C, které byly použity při fitování jeho poklesu napozorovaného dne 28. 2. 2020 programem EXOFAST. Označení jsou stejná jako v tabulce 7.11.

	Tabulková hodnota	Dosazeno	Získáno
T_c [BJD]	–	2 458 908,468	2 458 908,4766(21)
R_p/R_H	0,109	0,109	0,111
i [°]	–	83	85,48
F_0	–	1	1,002653
T_{eff} [K]	6 134(420)	6 134(420)	6 133
[Fe/H] [dex]	–	0,0(5)	-0,000149
P [dny]	6,70742(28)	6,70742(28)	6,70742
R_H [R_\odot]	1,24(16)	–	1,35
R_p [R_J]	1,25(34)	–	1,43

Tabulka 7.20: Parametry objektu C, které byly použity při fitování jeho poklesu napozorovaného dne 28. 2. 2020 programem ETD. Označení jsou stejná jako v tabulce 7.13.

	Tabulková hodnota	Dosazeno	Získáno
T_c [HJD]	–	2 458 908,46717	2 458 908,4750(29)
T_{tr} [min]	132(4)	132	164(17)
R_P [R_H]	0,109	0,109	–
ΔF [mag]	–	–	0,0093(12)
b	–	0,95	–
okrajové ztemnění	–	0,8	–

Tabulka 7.21: Parametry objektu F, které byly použity při fitování jeho poklesu napozorovaného dne 1. 1. 2020 programem EXOFAST. Označení jsou stejná jako v tabulce 7.11.

	Tabulková hodnota	Dosazeno	Získáno
T_c [BJD]	–	2 458 850,335	2 458 850,33697(72)
R_P/R_H	0,244(50)	0,244(50)	0,241
i [°]	–	83	88,63
F_0	–	1	1,05177
$\log g_H$ [\log_{10} (cm/s ²)]	4,71(1)	4,71(1)	4,71
T_{eff} [K]	5 076(8)	5 076(8)	5 076
[Fe/H] [dex]	0,089(26)	0,089(26)	0,089
P [dny]	13,24984(33)	13,24984(33)	13,24984
R_H [R_\odot]	0,671(23)	–	0,67
R_P [R_J]	1,63(34)	–	1,58

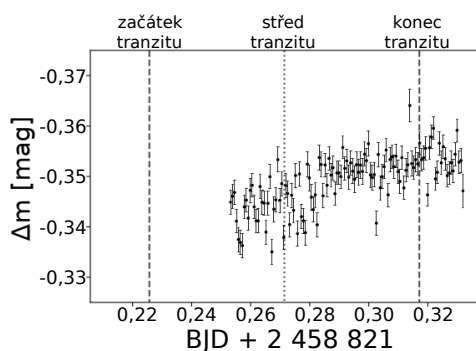
Tabulka 7.22: Parametry objektu F, které byly použity při fitování jeho poklesu napozorovaného dne 1. 1. 2020 programem ETD. Označení jsou stejná jako v tabulce 7.13.

	Tabulková hodnota	Dosazeno	Získáno
T_c [HJD]	–	2 458 850,33418	2 458 850,33312(97)
T_{tr} [min]	195(1)	195	176(5)
R_P [R_H]	0,244(50)	0,244	–
ΔF [mag]	–	–	0,01611(54)
b	0,99(7)	0,99	–
okrajové ztemnění	–	0,7	–

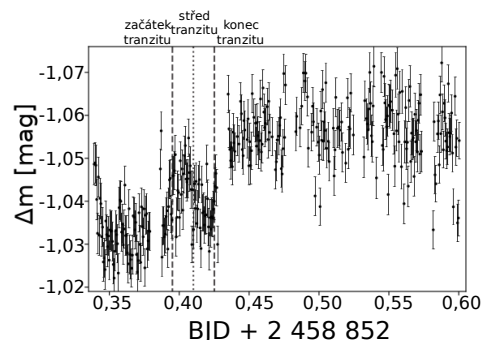
7.2 Světelné křivky bez detekovaných poklesů

Tabulka 7.23: Tabulka neúspěšných pozorování zvolených kandidátů.

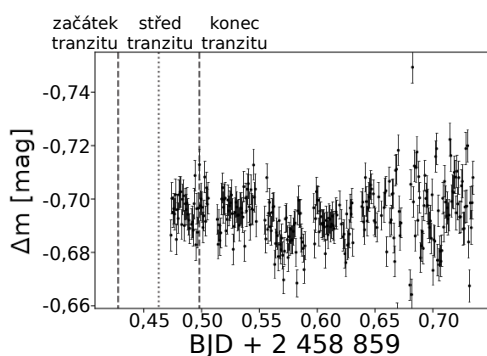
Kandidát	Datum	Observatoř	Pozorovatel	Expozice [s]
C	3. 12. 2019	Kraví Hora	Vendula Slavíková	45
J	3. 1. 2020	La Palma	Martin Mašek	45
G	10. 1. 2020	La Palma	Martin Mašek	60
G	13. 1. 2020	La Palma	Martin Mašek	60
J	15. 1. 2020	Suhora	Jan Janík	30
G	21. 3. 2020	Ondřejov	Hana Kučáková	15 a 20



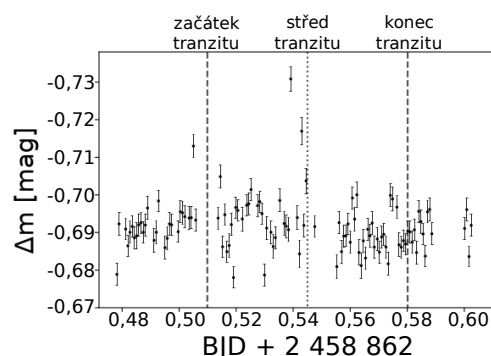
Obrázek 7.21: Světelná křivka kandidáta C ze dne 3. 12. 2019. Data byla naměřena ve filtru R na hvězdárně na Kraví Hoře.



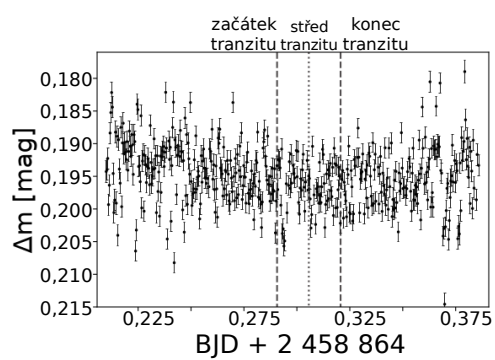
Obrázek 7.22: Světelná křivka kandidáta J ze dne 3. 1. 2020. Data byla naměřena ve filtru N na hvězdárně La Palma.



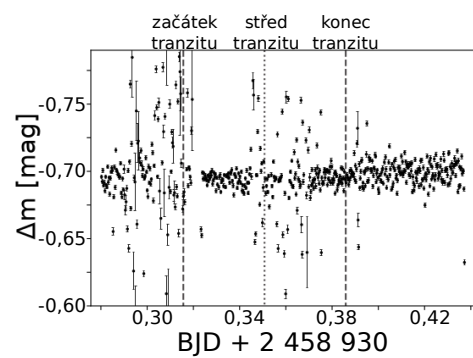
Obrázek 7.23: Světelná křivka kandidáta G ze dne 10. 1. 2020. Data byla naměřena ve filtru R na hvězdárně La Palma.



Obrázek 7.24: Světelná křivka kandidáta G ze dne 13. 1. 2020. Data byla naměřena ve filtru R na hvězdárně La Palma.



Obrázek 7.25: Světelná křivka kandidáta J ze dne 15. 1. 2020. Data byla naměřena ve filtru R na hvězdárně na Suhoře.



Obrázek 7.26: Světelná křivka kandidáta G ze dne 21. 3. 2020. Data byla naměřena ve filtru R na hvězdárně v Ondřejově.

