

**MASARYKOVA UNIVERZITA**  
**PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA**  
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
**CCD fotometrie tranzitujících**  
**extrasolárních planet**

**MARTIN BLAŽEK**

Vedoucí práce: doc. RNDr. Miloslav Zejda, Ph.D.

Brno, 2014

# Bibliografický záznam

**Autor:** Martin Blažek  
Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita  
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

**Název práce:** CCD fotometrie tranzitujících extrasolárních planet

**Studijní program:** Fyzika

**Studijní obor:** Astrofyzika

**Vedoucí práce:** doc. RNDr. Miloslav Zejda, Ph.D.

**Akademický rok:** 2013/2014

**Počet stran:** 36

**Klíčová slova:** Extrasolární planeta, tranzit exoplanety, planetární systém, CCD fotometrie, světelná křivka

## Bibliographic entry

**Author:** Martin Blažek  
Faculty of science, Masaryk university  
Department of theoretical physics and astrophysics

**Title of thesis:** CCD photometry of transiting extrasolar planets

**Degree programme:** Physics

**Field of study:** Astrophysics

**Supervisor:** doc. RNDr. Miloslav Zejda, Ph.D.

**Academic year:** 2013/2014

**Number of pages:** 36

**Keywords:** Extrasolar planet, exoplanet's transit, planetary system, CCD photometry, light curve

**Abstrakt:** CCD fotometrie tranzitujících extrasolárních planet

Cílem této bakalářské práce je s pomocí vlastních pozorování tranzitů vybraných extrasolárních planet před jejich mateřskými hvězdami určit fyzikální charakteristiky těchto exoplanet. Fotometrická pozorování byla prováděna na několika observatořích. Po základním zpracování CCD snímků byla k určení parametrů systémů použita Databáze exoplanetárních tranzitů a program PHOEBE. Na závěr byly výsledky porovnány s oficiálně uváděnými hodnotami.

Klíčová slova: extrasolární planeta, tranzit exoplanety, planetární systém, CCD fotometrie, světelná křivka.

**Abstract:** CCD photometry of transiting extrasolar planets

The aim of this bachelor's thesis is with help of my own observations of chosen extrasolar planets' transits in front of their mother stars to determine their physical characteristics. Photometric observations have been done on several observatories. After basic process of CCD images Exoplanet Transit Database and also PHOEBE programme were used to determine systems' parameters. As a conclusion the results have been compared with officially presented values.

Keywords: extrasolar planet, exoplanet's transit, planetary system, CCD photometry, light curve.



Masarykova univerzita

Přírodovědecká fakulta



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Martin Blažek**

Studijní program: **Fyzika**

Studijní obor: **Astrofyzika**

Ředitel Ústavu teoretické fyziky a astrofyziky PŘF MU PŘF MU Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu MU určuje diplomovou práci s tématem:


### CCD fotometrie tranzitujících extrasolárních planet

#### CCD photometry of transiting extrasolar planets

*Oficiální zadání:* Tranzitující exoplanety jsou velice důležitou skupinou extrasolárních planet. Díky analýze jejich fotometrických světelných křivek můžeme získat informace o orbitálních a fyzických parametrech soustavy, a tyto pak použít při následném studiu extrasolárních planet. Student provede fotometrické pozorování vybraných extrasolárních systémů. Cílem práce je analyzovat světelnou křivku systému a zjistit základní informace o soustavě hvězda-planeta.

*Jazyk závěrečné práce:* čeština

*Vedoucí bakalářské práce:* RNDr. Miloslav Zejda, Ph.D.

*Podpis vedoucího práce:* 

*Konzultant:* Mgr. Tereza Krejčová, Ph.D.

*Datum zadání bakalářské práce:* listopad 2013

V Brně dne 18. 11. 2013



prof. Rikard von Unge, Ph.D.

ředitel Ústavu teoretické fyziky a astrofyziky

Zadání bakalářské práce převzal dne:



Podpis studenta



## Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce doc. RNDr. Miloslavu Zejdovi, Ph.D., konzultantce Mgr. Tereze Krejčové, Ph.D. a za pomoc při pořízení dat RNDr. Janu Janíkovi, Ph.D. a Mgr. Marku Dróždžovi.

Pozorování pro tuto práci byla provedena za podpory projektu „*Proměnné hvězdy v otevřených hvězdokupách a jejich okolí*“, kód projektu 7AMB13PL019.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím vypsanych zdrojů a s pomocí osob zmíněných v odstavci Poděkování.

V Brně dne .....

Podpis: .....

*„Tam někde za domovem naším nás kvanta jiných vábí  
jejich rozličností krajin živých i zcela mrtvých.  
Jsme v Galaxii i přes náš hluk skryti, či již Oni o nás ví?  
Pojďme zjistit to a poznatků využijme Tvých i mých.“*

AUTOR



# Obsah

<b>1. Úvod</b>	<b>9</b>
<b>2. Historie výzkumu extrasolárních planet</b>	<b>10</b>
<b>3. Metody detekce extrasolárních planet</b>	<b>13</b>
3.1. Stručný popis jednotlivých metod . . . . .	13
3.1.1. Astrometrická metoda . . . . .	13
3.1.2. Gravitační mikročochky . . . . .	13
3.1.3. Spektroskopická metoda . . . . .	14
3.1.4. Fotometrická metoda . . . . .	14
3.2. Fotometrická metoda — metoda tranzitu exoplanety . . . . .	15
<b>4. PHOEBE</b>	<b>18</b>
<b>5. Vlastní pozorování extrasolárních planet</b>	<b>21</b>
<b>6. Popis a získaná vlastní data jednotlivých planetárních systémů</b>	<b>22</b>
6.1. Teoretická část . . . . .	22
6.2. Praktická část . . . . .	24
6.2.1. HAT-P-36 b . . . . .	24
6.2.2. HAT-P-37 b . . . . .	27
6.2.3. TrES-2 b . . . . .	30
<b>7. Závěr</b>	<b>34</b>
Seznam použitých zdrojů	<b>35</b>
Seznam elektronických zdrojů	<b>35</b>

# 1. Úvod

Obloha — pro většinu lidí to, kde přes den svítí Slunce a v noci hvězdy a zpravidla i Měsíc, čili automatický nicneříkající koloběh. Jsou ovšem i tací, kteří již při pohledu na oblohu, a to zejména v noci, začnou o ní přemýšlet a klást si otázky. Zřejmě zatím málokdo přemýšlí o tom, jak vypadají světy u všech těch vzdálených hvězd, které za jasných nocí můžeme pozorovat. Důvod je prostý. Pouhým neozbrojeným okem totiž vidíme pouze některé hvězdy a to ještě jen v Galaxii, tedy v té naší, a vidět takto jakoukoliv planetu mimo těch ve Sluneční soustavě je zcela nemožné. A přece tam jsou a lidstvo již má několik metod, jak je možno je detekovat a dokonce o nich zjistit mnoho důležitých charakteristik.

Ve své bakalářské práci jsem pro zjišťování charakteristik exoplanet použil metodu tranzitu. Pozorovaná exoplaneta svým oběhem okolo své mateřské hvězdy v daný moment z našeho pohledu přechází před kotoučem oné hvězdy a částečně tak zastíní její svit. Následně se tímto zmenší jasnost hvězdy, kterou pomocí CCD zařízení měříme.

Práce samotná je rozdělena do sedmi kapitol. Po kapitole úvodní jsou ve druhé kapitole shrnuty počátky výzkumu a objevů exoplanet a jejich nejdůležitější milníky. Ve třetí kapitole se zmiňují o používaných metodách detekcí exoplanet a jejich stručnému popisu. Čtvrtá kapitola je věnována programu PHOEBE, který jsem použil k určení fyzikálních dat planet ze světelné křivky. Kapitola pátá shrnuje má vlastní pozorování se stručným popisem pozorovacích míst. Předposlední, šestá kapitola již podrobněji popisuje mnou použitou metodu včetně výčtu důležitých matematických vztahů pro určování parametrů extrasolárních planet a udává vypočtené parametry všech zkoumaných exoplanet včetně porovnání s hodnotami převzatými z odborné literatury. Závěrečná kapitola shrnuje výsledky a celý proces mého výzkumu.

## 2. Historie výzkumu extrasolárních planet

Již velmi dávno si někteří učenci pohrávali s myšlenkou, ba byli přímo přesvědčeni, že neexistuje jen jeden svět, jedna jediná obyvatelná planeta a opravdu věřili, že planet, podobných té naší, je mnoho. Na druhou stranu ovšem existovaly i extrémní názory, přesvědčující o opaku. Jako příklad významově prvního typu tvrzení vezmeme Epikúra ze Samu (341 př. n. l. - 270 př. n. l.), který prohlásil: „*Je nekonečně mnoho světů, podobných našemu, stejně jako světů jiných, ten náš nepřipomínajících* [12].“ Jako opak tohoto tvrzení můžeme vzít názor slavného Aristotela ze Stageiry (384 př. n. l. - 322 př. n. l.), který řekl: „*Nemůže být více světů nežli jeden* [12].“

Ať tak či onak, pravdou je, že do druhé poloviny 20. století se jednalo pouze o spekulace. Neexistovala astronomická pozorovací technika, která by poskytla fakta, o něž by se dalo v této problematice opřít. Mohlo by se zdát, že v dnešní době technického pokroku můžeme směle planety u cizích hvězd pozorovat a snadno tak zjišťovat mnoho jejich vlastností. Není to ovšem tak. Větší než technický pokrok jsou vzdálenosti, dělicí nás od oněch hledaných extrasolárních planet. Navíc na rozdíl od hvězd planety ve viditelné části spektra většinou nezáří, nýbrž pouze rozptylují světlo své hvězdy.

Vezmeme-li novodobé pozorování exoplanet, je určitě vhodné zmínit příběh nizozemského průkopníka hledání exoplanet Pieta van de Kampa. Po objevu (a následném zveřejnění) exoplanety u Barnardovy hvězdy, tedy hvězdy s velkým vlastním pohybem, pořídil Kamp se svými spolupracovníky mnoho fotografických snímků této hvězdy. Z odchylek polohy hvězdy na těchto snímcích usoudil, že kolem Barnardovy hvězdy obíhá s periodou 25 roků planeta o hmotnosti 1,7násobku hmotnosti Jupitera. Velmi krátce nato ještě svůj výsledek upřesnil, že se jedná o planety dvě. Po čase se ale našli první kritici jeho výsledků, kteří na Barnardově hvězdě nic podezřelého nenašli. Výpočetní technika byla již v té době na vyšší úrovni a jejich rigorózní metoda pro výpočet poloh hvězd nepotvrdila existenci planetárního průvodce této hvězdy. Ale i jiné metody jeho výsledky vyvracely. Do konce svého života byl Kamp přesvědčen o své pravdě a i když ji neměl, svou nevídanou vitalitou probouzel zájem odborné veřejnosti o obor, který se začal prudce rozvíjet až po jeho smrti (1995).

A jelikož jsem se v této části práce dostal již k nedávné minulosti, je již načase zmínit velmi důležitou věc a to definici planety, jejíž formulace pochází již z tohoto tisíciletí. Podle rozhodnutí, přijatého na kongresu Mezinárodní astronomické unie v Praze v srpnu roku 2006, je *planetou* naší Sluneční soustavy nebeské těleso,  *které obíhá kolem Slunce, má dostatečnou hmotnost, aby její vlastní gravitace překonala vnitřní síly pevného tělesa. Tímto dosáhne tvaru odpovídajícího hydrostatické rovnováze, čili přibližně kulatého. Zároveň se jedná o těleso, které vyčistilo okolí své dráhy, tedy svým gravitačním působením odstranilo menší tělesa ze své oběžné dráhy a okolí.* I když pojem exoplanety zatím svou přesnou definici nemá, lze použít pracovní definici, navrženou „IAU’s Working Group on Extrasolar Planets“ (Pracovní skupina pro extrasolární planety, patřící do Mezinárodní astronomické unie). Ta extrasolární planety charakterizuje jako objekty s hmotností nižší než je limitní hmotnost pro zažehnutí termonukleární reakce, při které vzniká deuterium (asi 13 hmotností Jupitera pro objekty se sluneční metalicitou) a které obíhají hvězdy nebo zbytky hvězd. Minimum požadované hmotnosti a velikosti pro extrasolární objekt považovaný za planetu by mělo být stejné jako ve Sluneční soustavě.

Předělem v podobě definic planety a exoplanety jsem se dostal k jednomu z nejdůležitějších milníků tohoto oboru a to k prvnímu skutečnému objevu extrasolární planety. I když ne vždy je tato exoplaneta za první objev svého druhu považována, stojí určitě za zmínku. Důvodem je především to, že tato první exoplaneta byla objevena u pulzaru (PSR 1257+12) — u typu hvězdy, u které si do té doby nikdo nepřipouštěl, že by něco

takového mohlo být v našem vesmíru možné! Tento objev učinili roku 1992 Alexander Wolszczan a Dale Frail [E1]. Dnes jsou potvrzeny u tohoto pulzaru dokonce exoplanety tři. Od této chvíle se poněkud změnil úhel pohledu na tvorbu planet, jelikož tímto objevem se ukázalo, že by planety mohly vznikat i za velmi extrémních podmínek [12].

Na sklonku dvacátého století bylo zřejmé, že největší naději k nalezení exoplanety dává klasická spektroskopická metoda (viz kapitola 2). V té době byly již k dispozici vysoce kvalitní spektrografy. A opravdu se tak stalo!

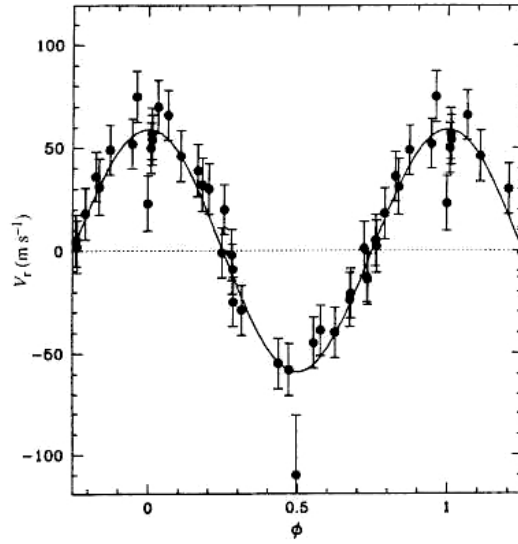
V říjnu 1995 se v italské Florencii konala pracovní konference na téma „Chladné hvězdy“, kde Michel Mayor ze ženevské observatoře prezentoval příspěvek, který se týkal planetárního průvodce kolem jedné z nich. Uvedl, že spolu s Didierem Quelozem měřili 18 měsíců radiální rychlost hvězdy 51 Pegasi (viz obrázek 1). Tato hvězda se nachází asi 50 světelných roků od nás a podobá se našemu Slunci. Na základě spektroskopických pozorování je možné tvrdit, že kolem hvězdy obíhá ve vzdálenosti 0,052 astronomické jednotky (asi 7,8 milionu km) těleso planetární hmotnosti a to zhruba poloviny hmotnosti planety Jupiter. Oběžná dráha je téměř kruhová a doba oběhu činí 4,23 dne. Planeta obíhá okolo své mateřské hvězdy v opravdu malé vzdálenosti — jedná se o osminu vzdálenosti Slunce – Merkur.

Objev první exoplanety vyvolal podle očekávání značný rozruch. Byli tu i jiní, kteří usilovali o objev exoplanety a to mnohem déle než Mayor s Quelozem. Ti se žel stali obětmi nepřesných předpokladů, jelikož hledali pouze planety s velkými periodami oběhu. Objev první exoplanety zveřejnili její objevitelé 23. listopadu 1995 v časopise *Nature* a následně objev potvrdily i další týmy astronomů [9]. Poté ale na chvíli zavládla nejistota, když astrofyzik David Gray zpochybnil správnost měření. Naštěstí se ukázalo, že se mýlil a exoplaneta u hvězdy 51 Pegasi je tak považována za první skutečný objev extrasolární planety.

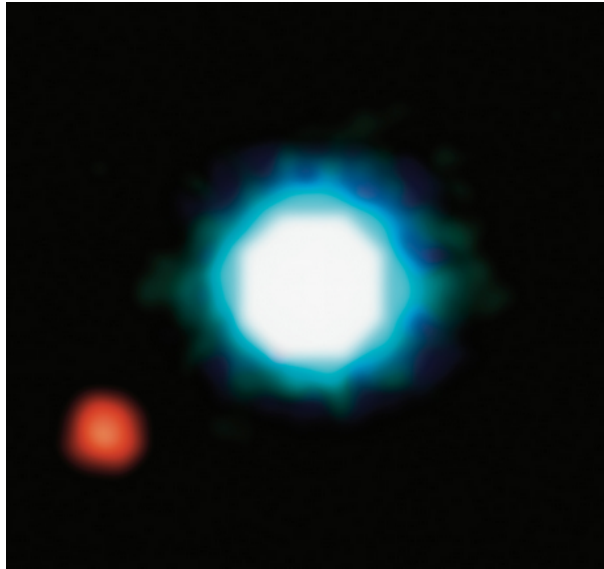
V krátkém časovém odstupu po oznámení existence první extrasolární planety, obíhající okolo hvězdy slunečního typu, následovaly další objevy. Je proto logické, že křivka četnosti objevů s časem rychle roste. K 2. květnu 2014 je potvrzených 1786 exoplanet [E2], ovšem v různých databázích se udávané počty liší. Původně měla největší podíl na objevech exoplanet metoda měření radiální rychlosti centrální hvězdy, ovšem v posledních letech má již největší podíl metoda tranzitu (viz obrázek 5).

Co se týče dalších důležitých okamžiků této oblasti astronomie, zmínil bych první zákryt hvězdy exoplanetou v roce 2000, který pozorovali Timothy Brown a David Charbonneau. Jednalo se o hvězdu HD 209458 [E3]. Těm se i jako prvním podařilo ve stejném roce detekovat atmosféru exoplanety — HD 209458 b [E4]. Dále objev prvních exoplanet metodou gravitační mikročochy a také první pořízený snímek exoplanety — 2M 1207 b (Gael Chauvin na observatoři Cerro Paranal v Chile) [12].

Tento krátký výčet již nabízí jedno důležité vysvětlení a to, jak se exoplanety vlastně označují. V současné době je pravidlo ryze technické: exoplaneta nese označení mateřské hvězdy, k němuž se přiřadí písmeno „b“, popř. další písmena směrem ke konci abecedy. Písmeno „a“ je vyhrazeno samotné hvězdě. Písmena planet se přidělují chronologicky podle pořadí objevu exoplanety. Mezinárodní astronomická unie zatím nepřišla s řešením značení exoplanet, ale stejně jako některé nejjasnější či jinak zvláštní hvězdy mají svá jména, určitě by si i některé jedinečné exoplanety svá jména zasloužily.



Obrázek 1: Křivka změny radiální rychlosti mateřské hvězdy u prvního objeveného exoplanetárního systému — **51 Pegasi**. Převzato z [9].



Obrázek 2: První pořízený snímek exoplanety — **2M1207 b**. Převzato z [4].

## 3. Metody detekce extrasolárních planet

### 3.1. Stručný popis jednotlivých metod

Tak jak odvětví astronomie zabývající se exoplanetami nabývá na významu, tak vzrůstá počet metod, kterými lze exoplanety objevovat. Každá metoda má své klady i zápory a zároveň je i jinak náročná na přístrojové vybavení. Přehled metod je znázorněn na obrázku 6. Několik z nich jsem vybral pro podrobnější popis.

#### 3.1.1. Astrometrická metoda

Jedná se o nejstarší metodu hledání exoplanet. Metoda je založena na precizním měření poloh hvězdy. Spočívá v tom, že pro daný časový okamžik se přesně určí poloha zkoumané hvězdy vůči hvězdám okolním. O těchto hvězdách se předpokládá, že se nacházejí relativně daleko a že se jedná o objekty bez doprovodných těles. Tyto vybrané hvězdy tvoří jakousi kulisu. Vůči této kulise můžeme poté vztahovat polohu námi zkoumaného objektu, např. tedy hvězdy, jež může mít okolo sebe exoplanetu.

Astrometrická metoda je postupem, který se používá k objevování dvojhvězd, pokud se nedaří druhou složku pozorovat přímo. Problémem je ovšem nízká hmotnost exoplanet a tím pádem nepatrná změna polohy mateřské hvězdy. Nejistoty měření byly vždy větší než hledané změny poloh a detekce exoplanet touto metodou na pozemních observatořích byly neúspěšné.

Výhodou astrometrické metody je schopnost detekovat planety, jež se nacházejí relativně daleko od centrální hvězdy. Nevýhodou je poměrně vysoká náročnost na přístrojové vybavení, jelikož smysluplné výsledky poskytnou až teprve kosmické teleskopy, např. GAIA.

#### 3.1.2. Gravitační mikročočky

Tento jev nastává, když gravitační pole nějaké hvězdy zastává funkci optické čočky a zesílí světlo vzdálené hvězdy nacházející se přesně v témže směru od nás. Obě hvězdy se tedy musí nacházet téměř v dokonalém zákrytu. Jedná se o krátkodobý úkaz, trvající obvykle dny až týdny.

Jestliže kolem bližší hvězdy obíhá planeta, také její gravitační pole ovlivňuje dráhu světelných paprsků, což lze rozpoznat. Ovšem je nezbytné, aby se i exoplaneta dostala do velmi přesného zákrytu, jinak efekt gravitační mikročočky nebude fungovat. Pravděpodobnost projevení se tohoto jevu je ovšem třeba zvyšovat dlouhodobým sledováním mnoha hvězd a nejlépe takových, nacházejících se mezi Zemí a středem Galaxie, kde je největší hustota hvězd v pozadí, jejichž světlo může gravitační mikročočka zesílit.

Pomocí této metody byly první možné exoplanety objeveny v roce 2002 a mezi potvrzenými existuje i planeta podobná Zemi [12].

Hlavní předností této metody pro detekci exoplanet je skutečnost, že lze zaznamenat planety u hvězd vzdálených od nás řádově tisíce světelných roků. Toto jiné metody obvykle neumožňují. Navíc i touto metodou lze detekovat planety menších hmotností, než má planeta Jupiter, tedy planety typu Země. Nevýhodou je skutečnost, že konkrétní případ zesílení záření gravitační čočkou se nikdy neopakuje, jelikož ke stejnému seskupení

všech zúčastněných těles již nikdy nedojde. K ověření výsledku je tedy třeba použít jiný postup — je-li k dispozici.

### 3.1.3. Spektroskopická metoda

Tato metoda, podobně jako astrometrická, využívá skutečnosti, že planeta obíhající kolem centrální hvězdy mění v důsledku vzájemného gravitačního působení nejen svou polohu, ale, byť jen nepatrně, také polohu této hvězdy. V tomto případě se však měří změny složky rychlosti hvězdy ve směru zorného paprsku, tedy změny radiální rychlosti. K tomu se používá spektroskopie a Dopplerova jevu.

Změny radiální rychlosti jsou vzhledem k relativně nepatrné hmotnosti planet docela malé. Nicméně v současné době již existují moderní spektrometry, které umožňují zjistit radiální rychlost objektu s velkou přesností.

Spektroskopická metoda je výhodná v tom smyslu, že detekce změn radiální rychlosti hvězdy není zpravidla přímo závislá na vzdálenosti hvězdy. Amplituda změn je dána nejen poměrem hmotností hvězdy a planety, ale také sklonem oběžné roviny dráhy planety k zornému paprsku. Z této skutečnosti plyne také zjevná nevýhoda této metody. Pokud sklon dráhy neznáme, nebo jej nedokážeme odhadnout z jiných měření, dostáváme vždy jen spodní odhad hmotnosti planety. To může mít za následek, že nepozorujeme planetu, ale objekt hvězdné povahy, např. hnědého trpaslíka.

### 3.1.4. Fotometrická metoda

Jedná se o metodu zákrytu hvězdy exoplanetou a podobně jako u astrometrické a spektroskopické metody má také svou analogii ve stelární astronomii, kde ovšem exoplanetu nahrazuje další hvězda — druhá složka dvojhvězdy. Je-li oběžná rovina planety natolik vhodně orientována v prostoru, že se někdy planeta dostane mezi svou mateřskou hvězdu a pozorovatele na Zemi, zakryje část povrchu hvězdy. Tímto dojde k poklesu jasnosti hvězdy. Závislost jasnosti hvězdy na čase, nebo-li tzv. **světelná křivka** má charakteristický tvar, z něhož lze odvodit poměr poloměrů planety a hvězdy. Je-li navíc tato metoda kombinovaná se spektroskopickým zjišťováním změn radiálních rychlostí centrální hvězdy, můžeme zjistit hmotnost planety a její střední hustotu.

Metoda sledování zákrytu hvězdy exoplanetou poskytuje řadu informací, které nezískáme jiným způsobem (poloměr a sklon dráhy planety). Můžeme jí sledovat i menší tělesa zemského typu a to především díky družicím KEPLER a COROT. Výhodou této metody je i fakt, že ke sledování úkazu nejsou zapotřebí největší dalekohledy. Použitelné výsledky poskytují dokonce už i malé přístroje s kvalitním fotometrickým zařízením. Na základě sledování přechodu planety přes disk hvězdy lze i teoreticky odhalit, zda tranzitující planeta není obklopena prstenci podobnými planetě Saturn. Při dlouhé řadě pozorování a značné přesnosti měření je i možné zaznamenat také přítomnost satelitů planet. Ovšem jako každá metoda, i tato — sledování zákrytu hvězdy exoplanetou, má svou hlavní nevýhodu: můžeme takto sledovat pouze planety s dráhami ležícími takřka přesně ve směru zorného paprsku. Z této skutečnosti plyne, že planety obíhající velmi blízko u hvězdy mohou mít tuto odchylku větší a planety na vzdálenějších drahách pak musí obíhat v rovině s téměř nulovým sklonem ke směru pozorovatel – hvězda. Tento výběrový efekt je velice silný

a nelze jej nijak odstranit. Navíc je třeba počítat s tím, že poklesy jasnosti centrální hvězdy jsou nepatrné.

Protože fotometrická metoda byla pro mě pro sledování exoplanet nejdostupnější, použil jsem ve své práci právě tuto metodu.

### 3.2. Fotometrická metoda — metoda tranzitu exoplanety

Jako žádná z metod detekce exoplanet, ani tato nám neposkytne informace o všech fyzikálních veličinách. Vždy je tedy vhodné metody detekce kombinovat. Metoda tranzitu exoplanety nám po analýze získaných dat poskytne informace o poloměru exoplanety a sklonu její dráhy. K přechodu exoplanety před mateřskou hvězdou dochází v případě, je-li k nám oběžná rovina planety natočena tak, že z pohledu pozorovatele na Zemi planeta přechází v určité fázi svého oběhu přes hvězdný disk. Důsledkem tohoto jevu dojde k zeslabení světelného signálu, přicházejícího od mateřské hvězdy a toto zeslabení světla můžeme měřit.

K tranzitu planety dojde tedy v případě splnění podmínky

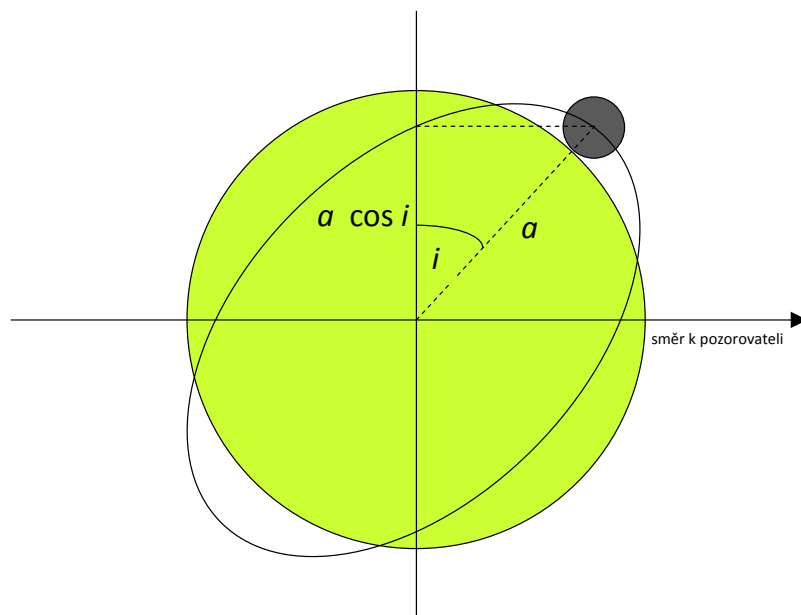
$$R_p + R_* \geq a \cos i, \quad (1)$$

kde  $R_p$  je poloměr exoplanety,  $R_*$  poloměr její mateřské hvězdy,  $a$  velká poloosa a  $i$  je inklinace, tedy sklon oběžné dráhy planety k rovině kolmé na rovinu pozorování (viz obrázky 3 a 4). Z výše uvedeného vztahu lze tedy odvodit minimální sklon, kdy ještě dojde k zákrytu hvězdy exoplanetou, takže platí:

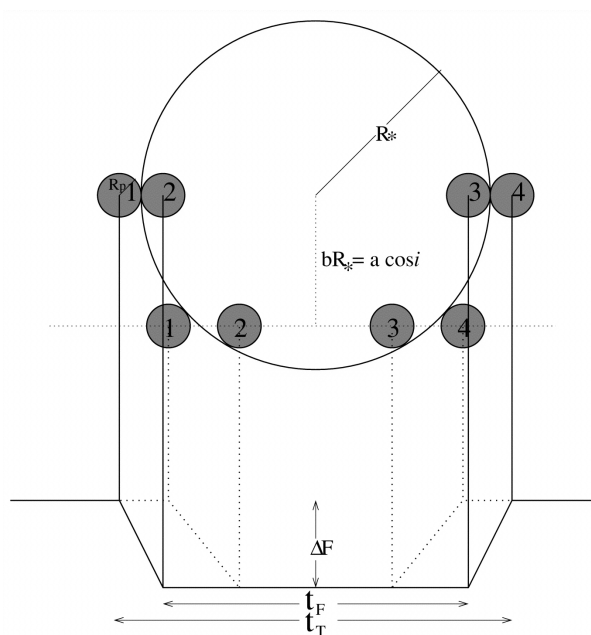
$$i_{\min} = \arccos \left( \frac{R_p + R_*}{a} \right). \quad (2)$$

Průběh tranzitu exoplanety v závislosti na vzhledu světelné křivky je znázorněn na obrázku 4. Patrné jsou změny tvaru křivky při jednotlivých pozicích planety při jejím tranzitu, tedy od momentu těsně před začátkem jejího vstupu před kotouč hvězdy až po její výstup z pozice před mateřskou hvězdou (z pohledu pozorovatele). Na obrázku jsou taktéž vyznačeny veličiny, které lze získat z naměřené křivky. Je to především hloubka tranzitu  $\Delta F$ , která určuje maximální změnu pozorovaného světelného toku přicházejícího od hvězdy a doba trvání přechodu  $t_T$  — tedy čas mezi prvním a posledním vizuálním kontaktem hvězdy s planetou. Poslední důležitou veličinou je doba trvání centrální části tranzitu  $t_F$ , což je doba a zároveň úsek křivky, kdy se celá planeta promítá na disk hvězdy. Parametr  $b$  je tzv. impaktní parametr, jehož vliv odpovídá inklinaci. Na jeho velikosti závisí tvar světelné křivky.

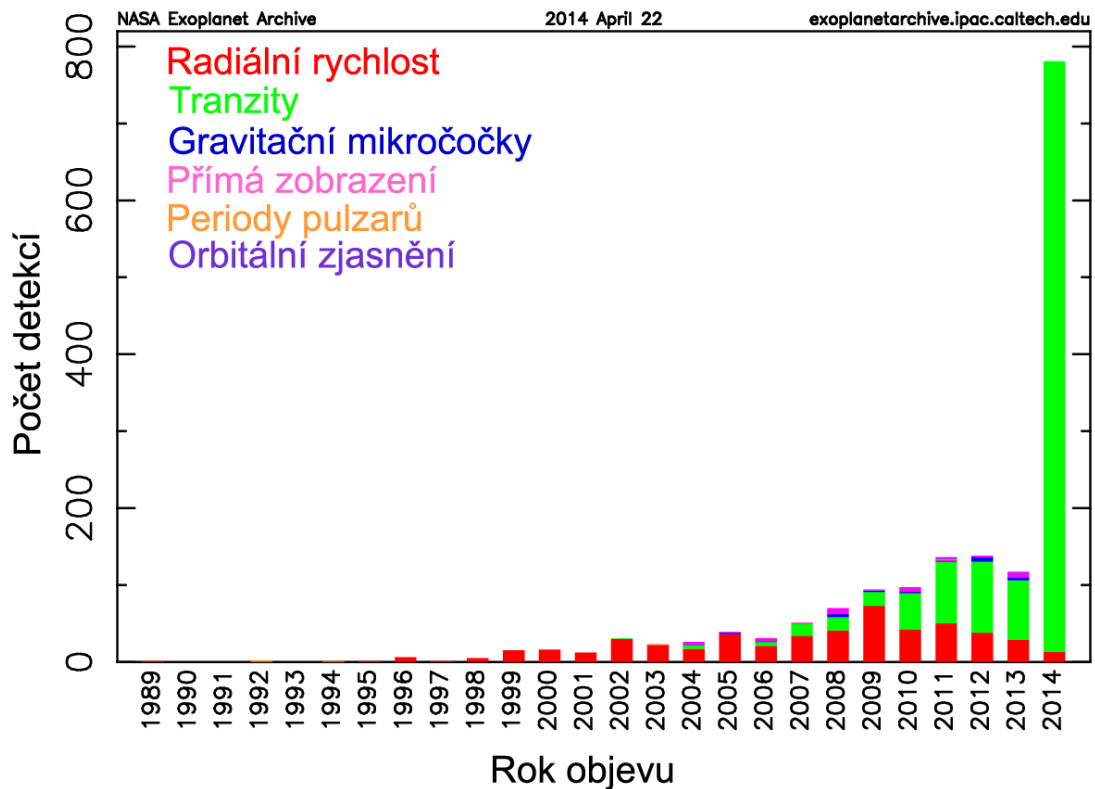




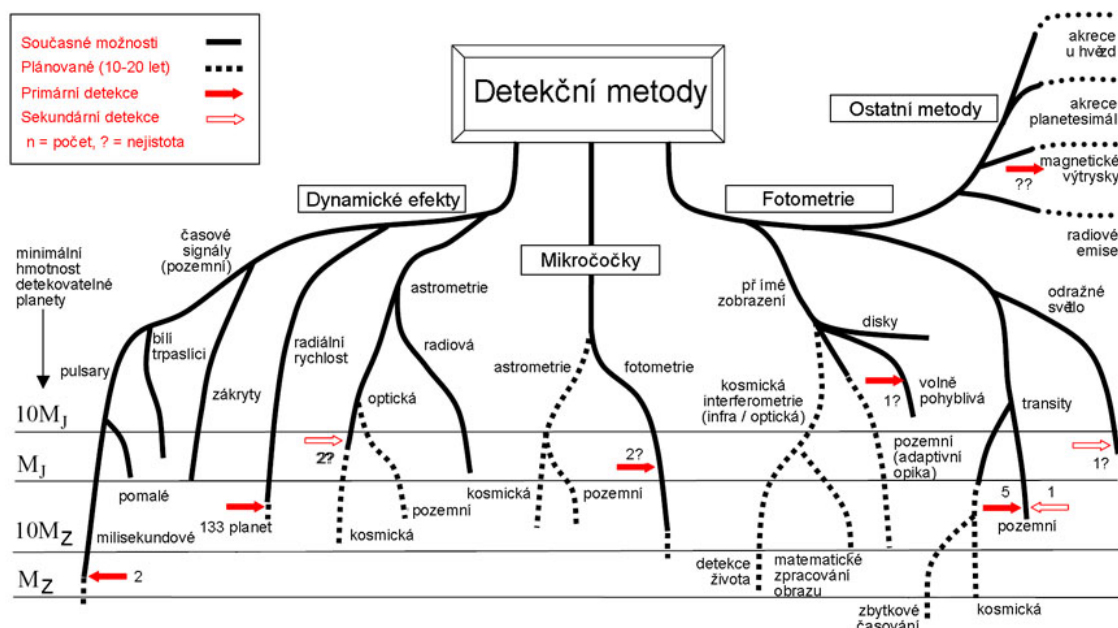
Obrázek 3: Význam veličin  $a$ ,  $i$  a  $\cos i$ .



Obrázek 4: Vzhled světelné křivky v závislosti na průběhu tranzitu exoplanety. Jsou zde vyobrazeny dvě světelné křivky, každá v závislosti na poloze planety při probíhajícím tranzitu. Převzato z [13].



Obrázek 5: Podíl jednotlivých metod detekce extrasolárních planet za každý rok. Stav k 22. dubnu 2014. Upraveno z [E6].



Obrázek 6: Možnosti současných i budoucích způsobů detekce. Převzato z [10], [E7].

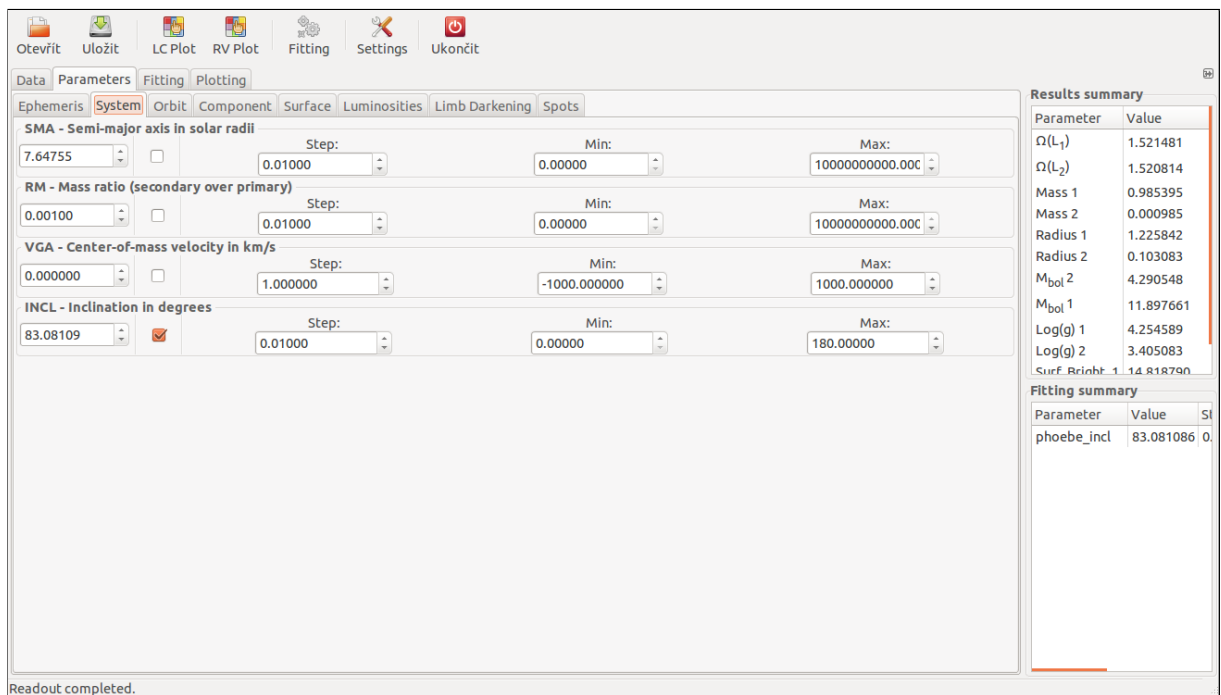
## 4. PHOEBE

Program PHOEBE (PHysics of Eclipsing BinariEs) slouží k modelování zákrytových dvojhvězd [E8]. Ze sady fotometrických světelných křivek a křivek radiálních rychlostí určuje fyzikální parametry zákrytových dvojhvězd, které teoreticky nejlépe odpovídají naměřeným hodnotám. Program je pod ochranou GNU General Public Licence a je přístupný každému. Autorem programu je Andrej Prša a kolektiv.

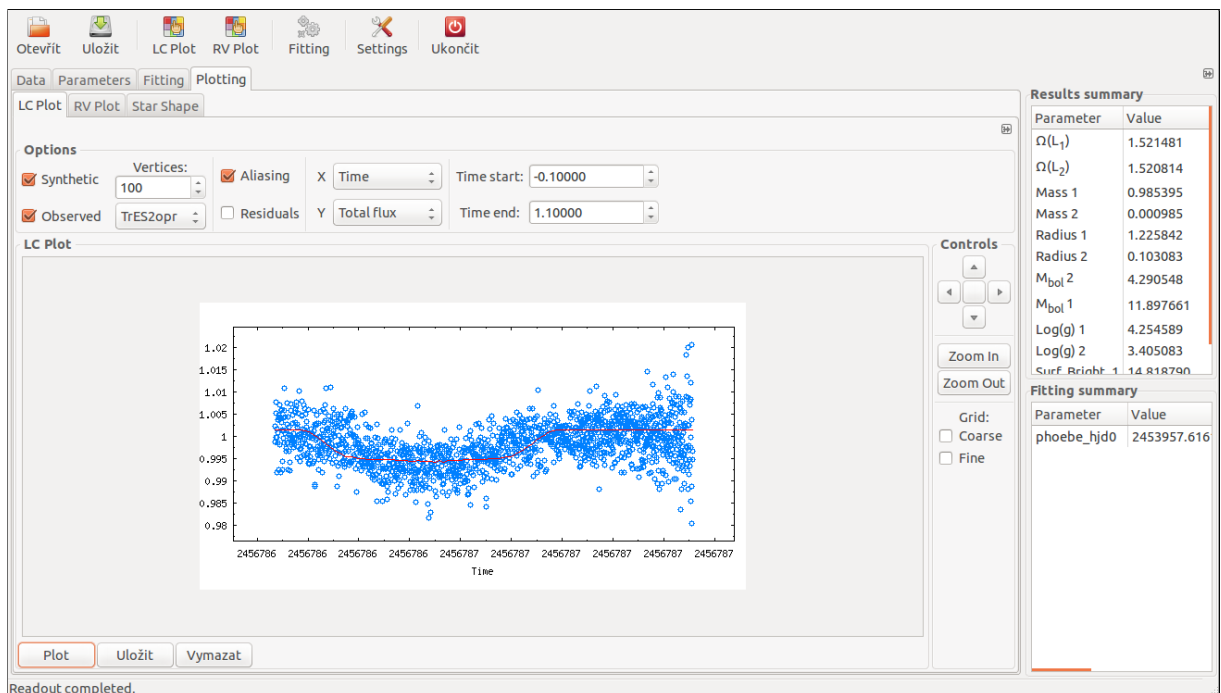
Tranzitující planety jsou podobný fyzikální problém jako zákrytové dvojhvězdy, takže tento nástroj v podobě PHOEBE může být použit i k modelování tranzitů exoplanet. Při práci s tímto programem byla použita metoda Stanislava Poddaného, který popisuje, jak jej použít pro tranzity exoplanet [11].

Pro práci s PHOEBE bylo potřeba získané hodnoty vyjádřené v relativních magnitudách převést na relativní změny hustot zářivého toku hvězdy pomocí Pogsonovy rovnice. K ideálnímu fitování bylo také nutno odstranit hodnoty, které byly znatelně mimo světelnou křivku. Po naimportování souboru s daty bylo potřeba v programu nastavit jako model *Oddělenou soustavu* a nastavit hodnoty důležitých charakteristik systému. Veličiny jako perioda, velká poloosa, teploty obou složek byly zadány jako fixní a v průběhu fitování zůstaly nezměněny. Jelikož nelze ihned na začátku fitování zadat skutečný poměr hmotností planety ku její mateřské hvězdě (v programu jako poměr sekundární ku primární složce dvojhvězdy), začal jsem s poměrem hmotností 0,1 a postupnou iterací jsem poměr snižoval, až jsem se dostal na hodnotu 0,001, která je v případech těchto typů soustav hvězda – planeta velmi blízká skutečnosti. Pro okrajové ztemnění hvězdy byl použit logaritmický zákon a koeficienty okrajového ztemnění byly do programu naimportovány z Van Hammeových tabulek.

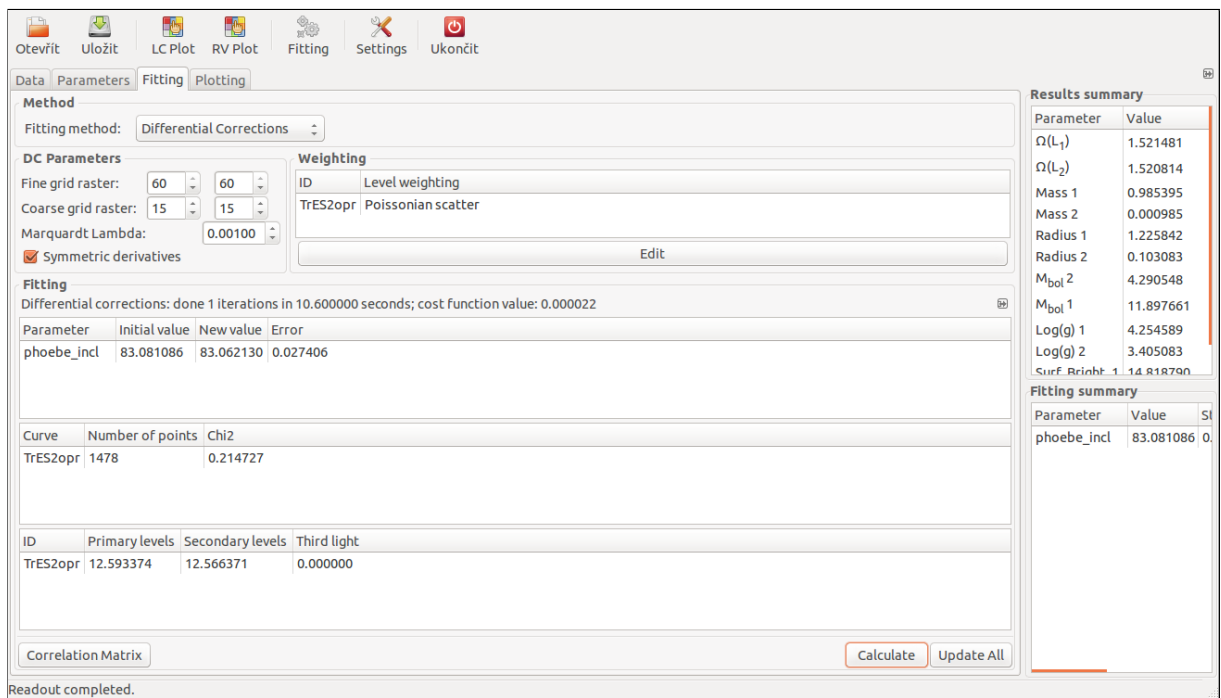
Při určování parametrů konkrétní exoplanetární soustavy pomocí PHOEBE jsem postupoval tím způsobem, že po každé změně poměrů hmotností složek jsem nechal program spočítat povrchový potenciál obou složek, jasnost hvězdy a inklinaci dráhy planety. Toto vždy několikrát pro každý poměr hmotností, takže nová hodnota byla vždy výchozí pro opětovný výpočet. Po každém sledu těchto úkonů jsem zároveň přezkontroloval vzhled vypočtené světelné křivky. Ta se stále více blížila svým průběhem světelné křivce z naměřených dat (samozřejmě pouze v případě, že se nevyskytnul nějaký problém). Několikrát bylo nutno také upravit hodnotu inklinace blíže ke skutečné hodnotě. V momentě, kdy byl již poměr hmotností nastaven na hodnotu skutečnou, jsem iteraci inklinace provedl vícekrát, až se hodnota ustálila a zároveň byla i nízká hodnota  $\chi^2$ . Zároveň byly v okně výsledků zobrazeny programem určené další parametry včetně požadovaného poloměru planety.



Obrázek 7: Vzhled programu PHOEBE 0.31a — záložka **Parametry**.



Obrázek 8: Vzhled programu PHOEBE 0.31a — záložka s vykreslováním světelné křivky.



Obrázek 9: Vzhled programu PHOEBE 0.31a — záložka **Fitování** (po ukončení iteračního procesu).

## 5. Vlastní pozorování extrasolárních planet

Pozorování probíhala na několika místech České republiky, ale i v zahraničí. Jak už to v astronomii bývá, platí zde pravidlo, že počasí rozhoduje, tudíž připravenost pozorovatele a všech přístrojů ještě zdaleka neznamená úspěch a tedy napozorování zamýšlených objektů na hvězdné obloze.

První byla observatoř Suhora v Polsku, která leží na stejnojmenném vrcholu na území národního parku Gorce. Je to místo na krásném, klidném a téměř civilizací nedotčeném místě v nadmořské výšce 1009 metrů<sup>1</sup>. Hvězdárna je výzkumné pracoviště katedry astronomie Pedagogické univerzity v Krakově. Zde jsem pobýval od 6. do 10. prosince 2013, ovšem vůbec neprálo počasí a díky husté oblačnosti nebylo možno ani jednu noc nic napozorovat.

První úspěšné pozorování bylo uskutečněno v noci z 20. na 21. února 2014 na observatoři Masarykovy univerzity v Brně na Kraví hoře (MUO). Toto pozorovatelské stanoviště leží v nadmořské výšce 305 m přímo uvnitř města<sup>2</sup>. Je vybaveno 60 cm dalekohledem Newton s kamerou G2-4000. Pozorovanou hvězdou s tranzitující exoplanetou byla HAT-P-36.

Další pozorovatelská událost se odehrála 10. a 11. března 2014 a to opět na observatoři Suhora v Polsku. Provedena byla 60 cm dalekohledem Cassegrain s CCD kamerou Apogee Alta U47-MB. Pozorovanými hvězdami s tranzitem byly HAT-P-36 a HAT-P-37. Pozorování prováděl Jan Janík.

Na stejném místě pomocí stejného vybavení byl v noci z 8. na 9. května 2014 napozorován další tranzit a to soustavy s názvem TrES-2 b. Pozorování prováděl Marek Drózdž.

Všechny tři pozorované exoplanety patří do skupiny tzv. horkých Jupiterů. Jedná se o exoplanety velikosti planety Jupiter, které obíhají po kruhových oběžných drahách a jejichž oběžná doba je v řádech dnů.

---

<sup>1</sup>49°34'09" s.š., 20°04'03" v.d.

<sup>2</sup>49°12'16" s.š., 16°35'01" v.d.

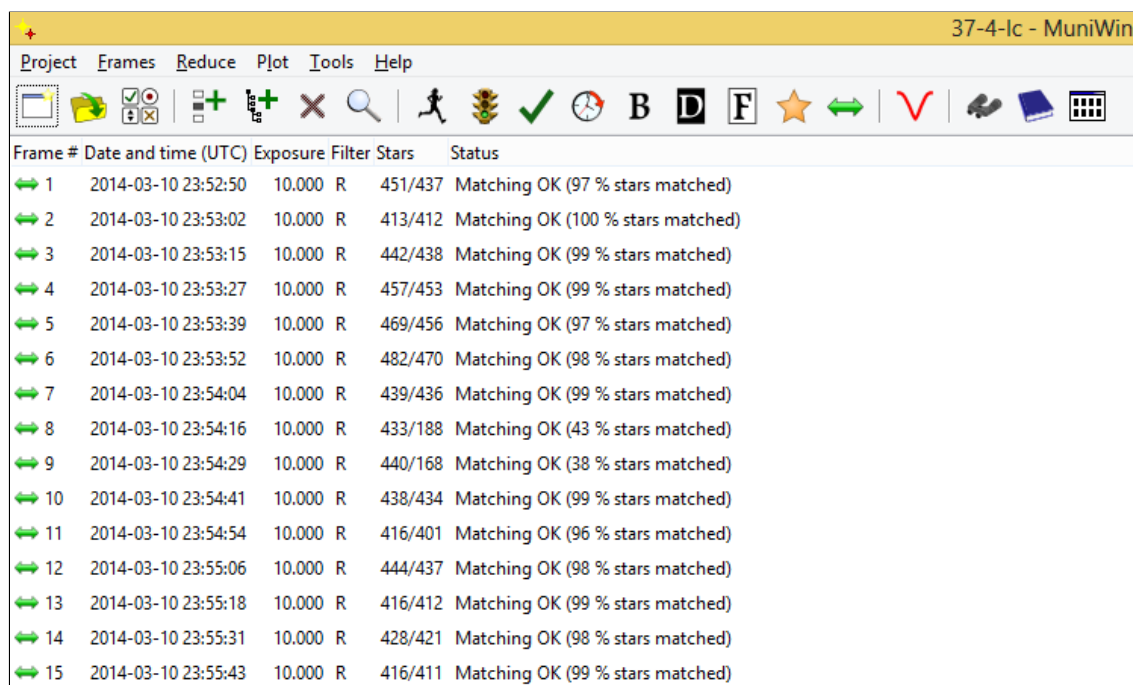
## 6. Popis a získaná vlastní data jednotlivých planetárních systémů

### 6.1. Teoretická část

Nejdříve je vždy nezbytné dané astronomické snímky zpracovat, aby byl zamýšlený výsledek co nejlepší a v konečné fázi vypočtené fyzikální parametry exoplanety se přinejmenším blížily parametrům oficiálně udávaným.

Ke zpracování snímků jsem použil program MUNIWIN 2.0.10.<sup>3</sup> [E9]. Provedeny byly korekce pořízených snímků o „dark“, „flat“ a případně „bias“ snímky. Po těchto korekcích následovaly další nezbytné kroky, kdy program identifikuje hvězdy na jednotlivých snímcích a následně hledá shody sobě odpovídajících hvězd. Nakonec je nutno označit studovanou (v programu označenou jako proměnná hvězda) hvězdu a k ní porovnávací a několik kontrolních hvězd. Po výběru vhodné apertury, s níž program také pomohl, je již možno zobrazit světelnou křivku.

U aperturní fotometrie sčítáme veškerý signál od hvězdy ve zvolené clonce, neboli apertuře (oproti profilové fotometrii, kdy se snažíme vystihnout tvar obrazu bodového zdroje). Komplikací je zde především vymezení velikosti apertury a také odečtení rušivých zdrojů světla, což je v první řadě úroveň oblohy. Postupuje se tak, že se nejprve sečte veškerý signál. Poté z místa na snímku mimo měřený objekt zvolíme větší množství pixelů, nepatřící žádné hvězdě. Jejich průměrem určíme pozadí. Nakonec od veškerého signálu zvolené apertury odečteme pozadí násobené počtem pixelů patřících do daného kruhového okolí [3].



The screenshot shows the MUNIWIN 2.0.10 software interface. The title bar reads "37-4-1c - MuniWin". The menu bar includes "Project", "Frames", "Reduce", "Plot", "Tools", and "Help". The toolbar contains various icons for file operations, zooming, and analysis. Below the toolbar is a table with the following columns: "Frame #", "Date and time (UTC)", "Exposure", "Filter", "Stars", and "Status". The table contains 15 rows of data, each representing a frame with its corresponding date, time, exposure, filter, star count, and matching status.

Frame #	Date and time (UTC)	Exposure	Filter	Stars	Status
1	2014-03-10 23:52:50	10.000	R	451/437	Matching OK (97 % stars matched)
2	2014-03-10 23:53:02	10.000	R	413/412	Matching OK (100 % stars matched)
3	2014-03-10 23:53:15	10.000	R	442/438	Matching OK (99 % stars matched)
4	2014-03-10 23:53:27	10.000	R	457/453	Matching OK (99 % stars matched)
5	2014-03-10 23:53:39	10.000	R	469/456	Matching OK (97 % stars matched)
6	2014-03-10 23:53:52	10.000	R	482/470	Matching OK (98 % stars matched)
7	2014-03-10 23:54:04	10.000	R	439/436	Matching OK (99 % stars matched)
8	2014-03-10 23:54:16	10.000	R	433/188	Matching OK (43 % stars matched)
9	2014-03-10 23:54:29	10.000	R	440/168	Matching OK (38 % stars matched)
10	2014-03-10 23:54:41	10.000	R	438/434	Matching OK (99 % stars matched)
11	2014-03-10 23:54:54	10.000	R	416/401	Matching OK (96 % stars matched)
12	2014-03-10 23:55:06	10.000	R	444/437	Matching OK (98 % stars matched)
13	2014-03-10 23:55:18	10.000	R	416/412	Matching OK (99 % stars matched)
14	2014-03-10 23:55:31	10.000	R	428/421	Matching OK (98 % stars matched)
15	2014-03-10 23:55:43	10.000	R	416/411	Matching OK (99 % stars matched)

Obrázek 10: Prostředí programu MUNIWIN 2.0.10.

<sup>3</sup>Copyright © 2014 David Motl

## Databáze exoplanetárních tranzitů — ETD (Exoplanet Transit Database)

Pro odstranění trendu ze světelné křivky (čili její narovnání a nanormování) byla použita aplikace v ETD [E10]. Ta umožňuje i výpočet základních parametrů systému. Při výpočtech geometrických parametrů systémů tranzitujících extrasolárních planet v ETD je použit jednoduchý geometrický model dané situace. Zjištěná hloubka a délka tranzitu je použita jako vstupní data spolu s katalogovými parametry  $R_{\odot}$  [ $R_{\odot}$ ],  $a$  [AU] a  $P$  [dny].

Poloměr exoplanety lze přímo vypočítat z rovnice na základě zjištěné hloubky tranzitu:

$$\Delta F = \frac{F_* - F_t}{F_*} = \left( \frac{R_p}{R_*} \right)^2, \quad (3)$$

kde  $\Delta F$  je hloubka tranzitu,  $F_*$  celkový tok záření hvězdy,  $F_t$  tok záření hvězdy během tranzitu,  $R_*$  poloměr hvězdy a  $R_p$  poloměr planety.

Rovněž na základě výše zmíněných zjištěných parametrů lze zjistit i inklinaci:

$$i = \arccos \sqrt{\frac{(R_* + R_p)^2}{a^2} - \sin^2 \left( \frac{t_Z \pi}{P} \right)}, \quad (4)$$

kde  $a$  je velká poloosa oběžné dráhy planety,  $t_Z$  délka pozorování tranzitu a  $P$  perioda oběhu planety okolo hvězdy.

### Fitovací parametry tranzitu

Databáze ETD používá celkem tři hlavní předpoklady pro nalezení nejlepšího fitu (proložení) a tedy dosažení nejlepších výsledků.

1. Předpokládá se, že hvězdy vykazují okrajová ztemnění a planety jsou temné disky. Pro poměr jejich poloměrů platí, že  $p = \frac{R_p}{R_*} \lesssim 0,2$ , tedy že planeta je mnohem menší než hvězda. Okrajové ztemnění hvězdy je modelováno lineárním zákonem. Pro modelování tvaru světelné křivky je použita rutina *occultsmall* [7].

2. Trajektorie planety se modeluje jako přímka přecházející přes hvězdný disk s impaktním parametrem  $b = \frac{a \cos i}{R_*}$ . Pro fitovací proceduru je použit Levenbergův-Marquardtův fitovací algoritmus nelineární metody nejmenších čtverců.

3. Pro určení nejlepšího fitu je použita metoda  $\chi^2$ .



## 6.2. Praktická část

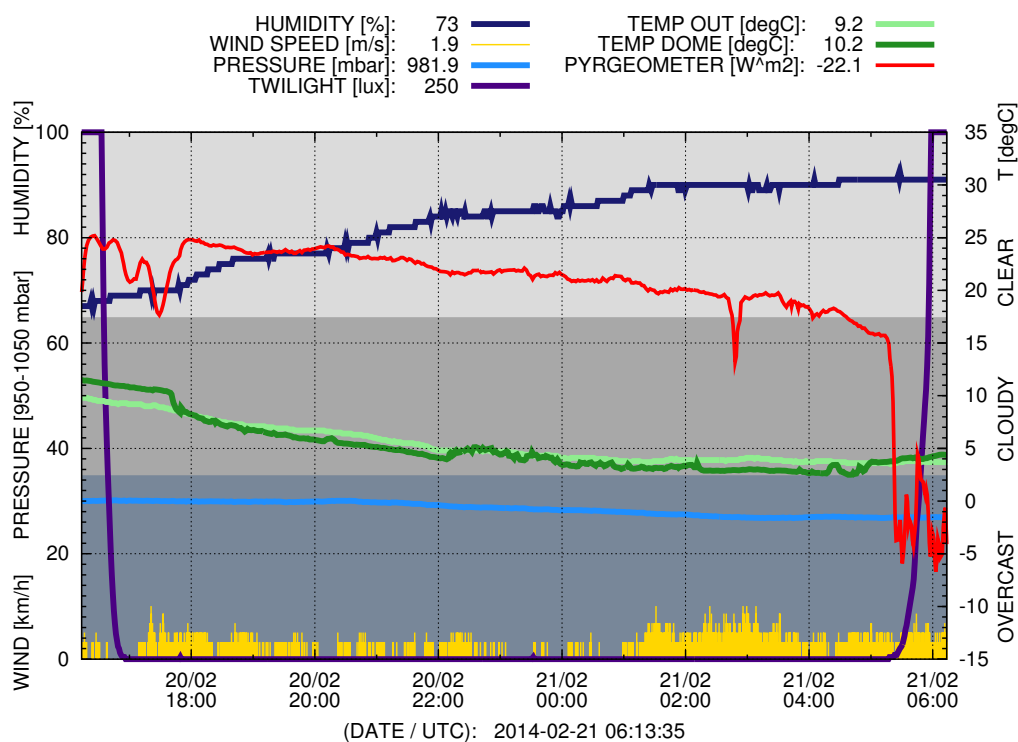
### 6.2.1. HAT-P-36 b

#### Popis systému

Hvězda HAT-P-36 je od nás vzdálena ( $317 \pm 17$ ) pc. Vizuální pozorovaná hvězdná velikost hvězdy ze Země je 12,26 mag a její hmotnost je ( $1,02 \pm 0,05$ ) hmotnosti Slunce [E2]. Při pohledu ze Země leží v souhvězdí Honičích psů a její systém čítá jednu planetu, čili v této práci studovanou HAT-P-36 b. Planeta byla objevena roku 2012 [1].

#### Zpracování vlastních dat (MUO)

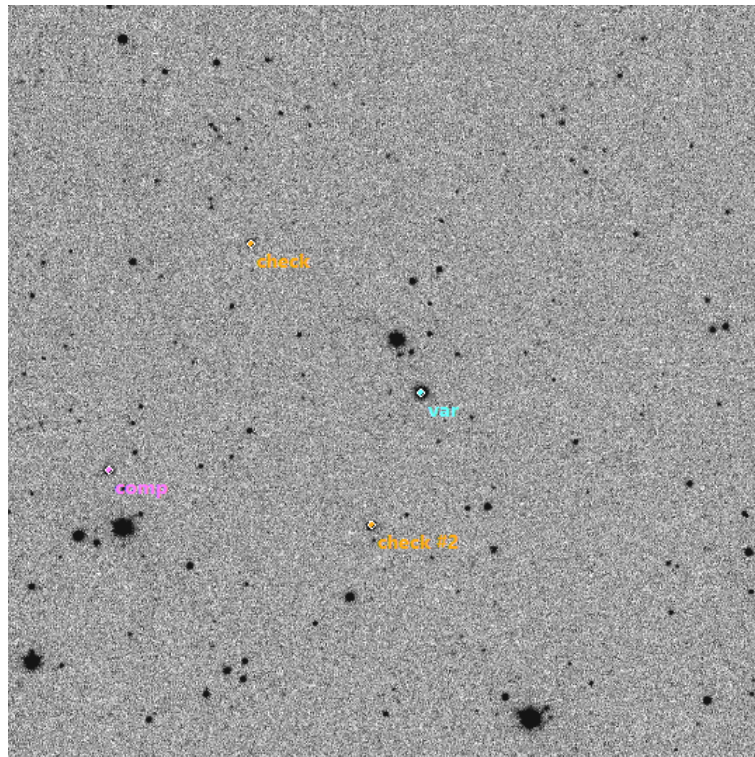
Ať vypadalo počasí ze začátku jakkoliv slibně, na výsledných snímcích se odrazilo, že tomu tak po dobu celého tranzitu nebylo. Jak dokládá i snímek níže, během pozorování přecházely po obloze mezi dalekohledem a pozorovanou hvězdou oblaka typu cirrus s občasnou nižší oblačností a k ránu byla obloha již téměř trvale zatažená. Tato skutečnost zapříčinila to, že výsledné snímky po výsledném zpracování ukázaly jejich nepoužitelnost pro další práci.



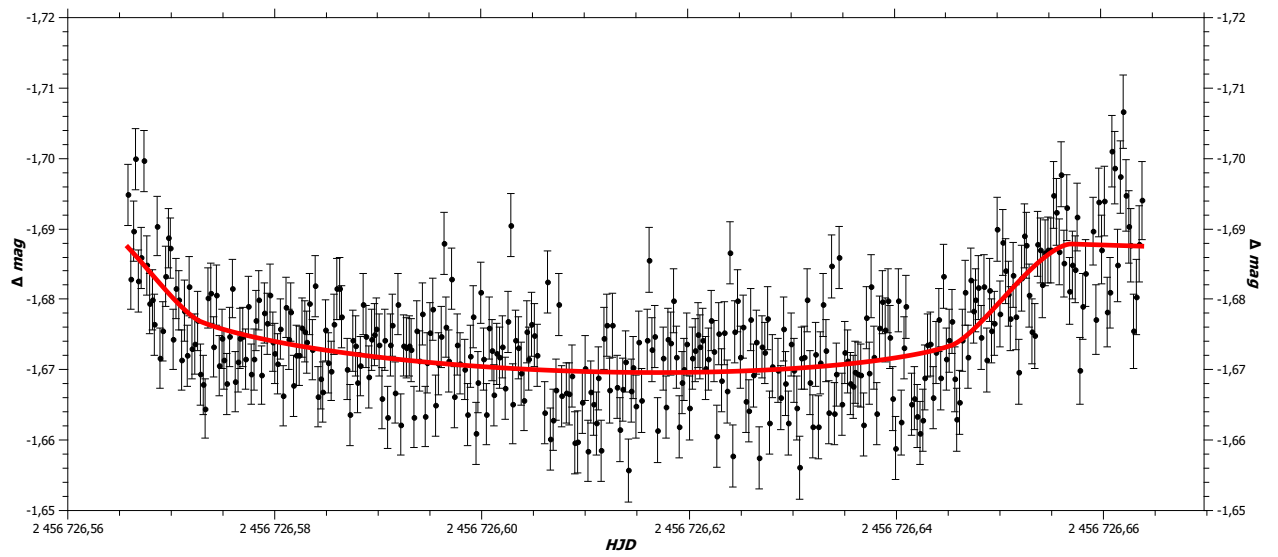
Obrázek 11: Meteogram z noci 20.–21.2.2014 na MUO. Červená křivka ukazuje krátce trvající zhoršení počasí okolo 3. hodiny ráno a zatažení oblohy po 5. hodině.

## Zpracování vlastních dat (Suhora)

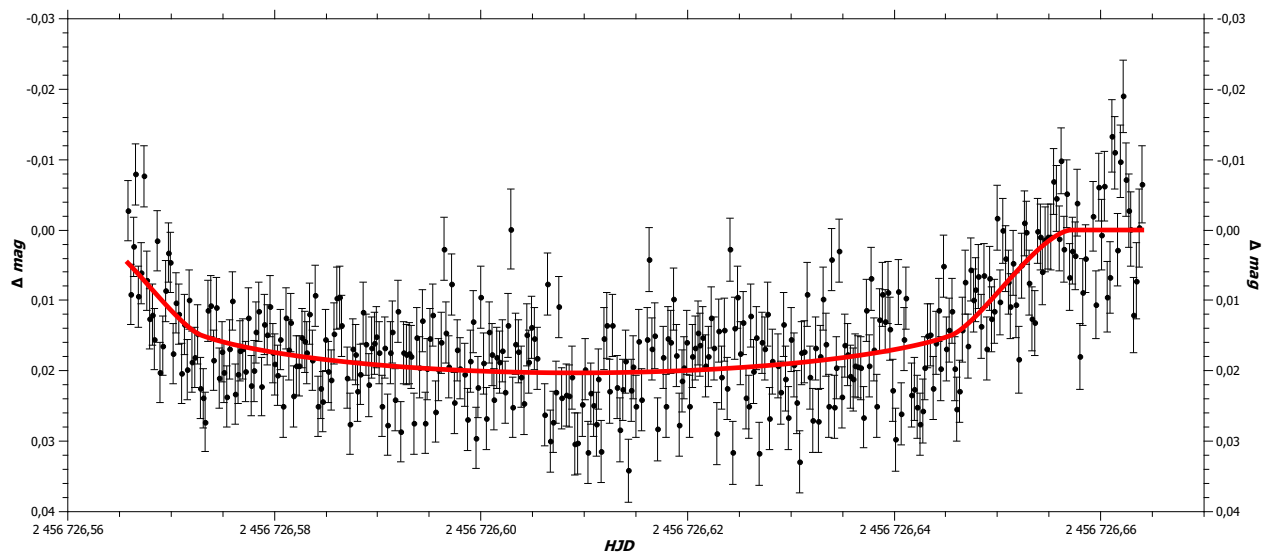
Pozorování zde probíhalo za lepších podmínek a snímky bylo možno použít. Na obrázku č. 12 je negativ jednoho snímku z celé sady snímků, kde je vyznačena hvězda měřená a pomocné hvězdy, nutné ke zpracování. Po fotometrických korekcích a jejich zpracování byla získána světelná křivka, která je vyobrazena na obrázku č. 13. Po použití aplikace v ETD byla křivka narovnána a nanormována, což zobrazuje obrázek č. 14. Na tomto a předešlém snímku je zřetelné, že chybí data ze začátku tranzitu. Kvalitu získaných dat shrnuje obrázek č. 15, kde jsou vyneseny rezidua jednotlivých měření od teoretického modelu. V tabulce č. 1 jsou vypočtené hodnoty fyzikálních parametrů systému včetně jejich porovnání s daty katalogovými.



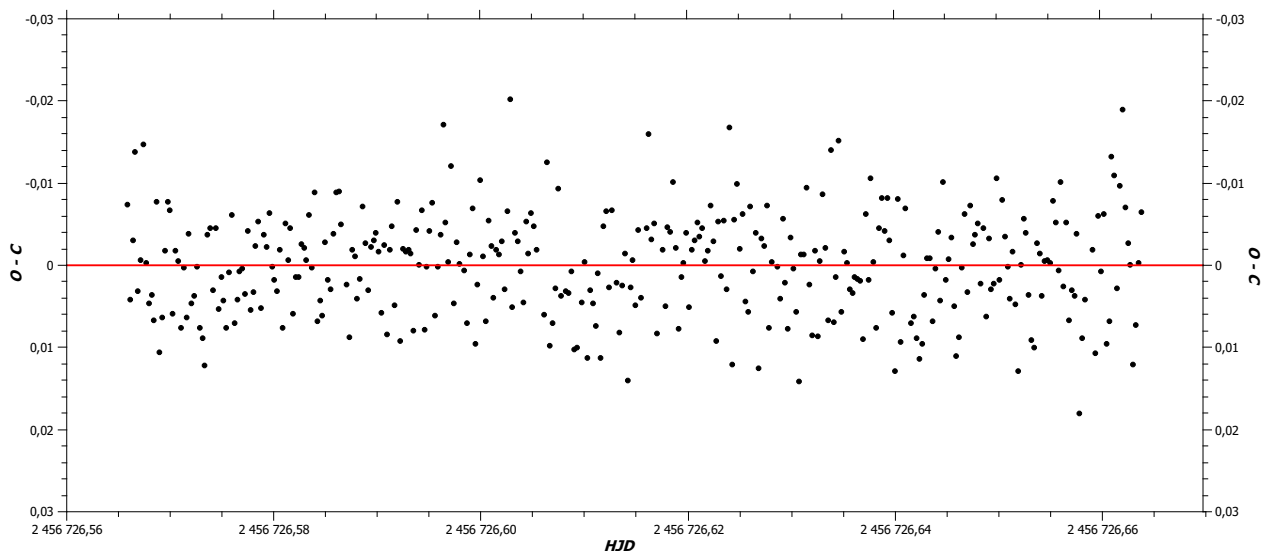
Obrázek 12: HAT-P-36 — pole hvězd v programu MUNIWIN s hvězdou měřenou (tyrkysová), srovnávací (růžová) a kontrolními (oranžové).



Obrázek 13: Světelná křivka exoplanetárního systému HAT-P-36 — původní naměřená data s nejlepším fitem.



Obrázek 14: Světelná křivka exoplanetárního systému HAT-P-36 opravená pomocí ETD o lineární trend.



Obrázek 15: Rezidua jednotlivých měření od teoretického modelu exoplanetárního systému HAT-P-36.

	Katalogová data	Naměřená data
$R_p$	$1,264 \pm 0,071 R_J$	$1,456^{+0,063}_{-0,065} R_J$
$R_*$	$1,096 \pm 0,056 R_\odot$	zafixováno
$a$	$0,0238 \pm 0,0004 \text{ AU}$	zafixováno
$P$	$1,327347 \text{ d}$	zafixováno
$i$	$86,0 \pm 1,3^\circ$	$84,56^{+0,91^\circ}_{-0,76^\circ}$

Tabulka 1: Srovnání fyzikálních charakteristik katalogových dat a naměřených dat určených ETD pro exoplanetární systém HAT-P-36. V této práci byly použity následující konstanty:  $\text{AU} = 1,496 \cdot 10^{11} \text{ m}$ ,  $M_\odot = 1,989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ ,  $M_J = 1,899 \cdot 10^{27} \text{ kg}$ ,  $R_\odot = 6,96 \cdot 10^8 \text{ m}$ ,  $R_J = 6,92 \cdot 10^7 \text{ m}$ .

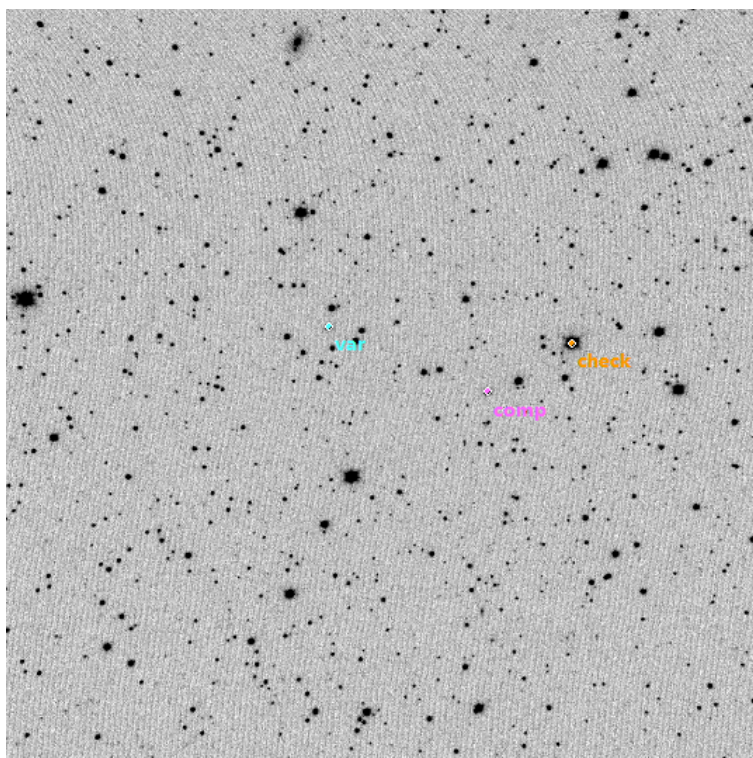
## 6.2.2. HAT-P-37 b

### Popis systému

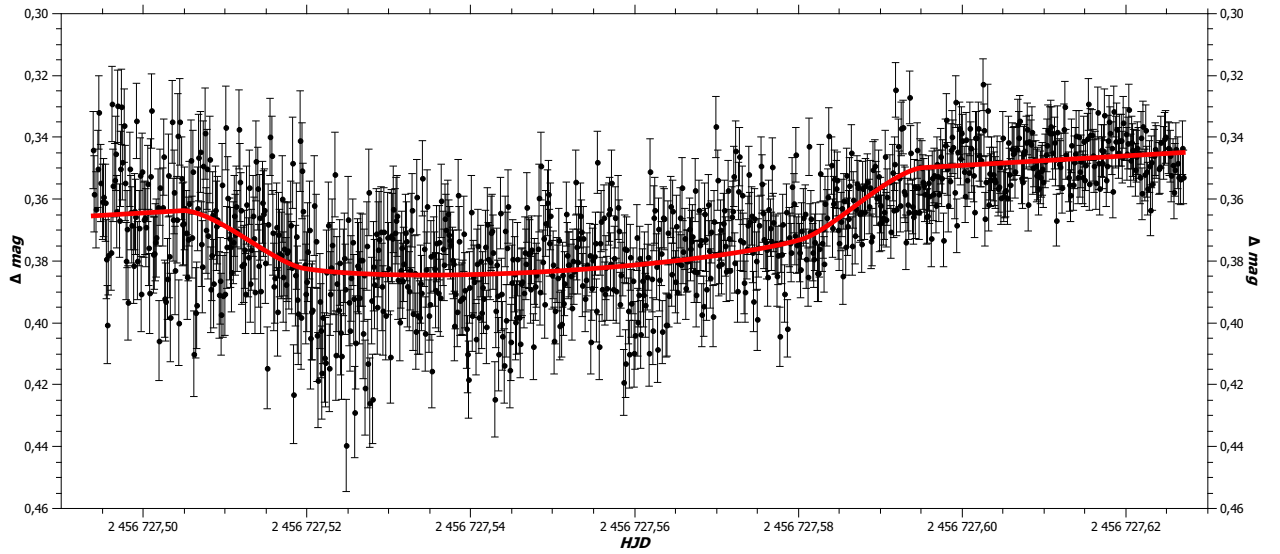
Hvězda HAT-P-37 je od nás vzdálena  $(411 \pm 26) \text{ pc}$ . Vizuální pozorovaná hvězdná velikost hvězdy ze Země je  $13,23 \text{ mag}$  a její hmotnost je  $(0,93 \pm 0,04)$  hmotnosti Slunce [E2]. Při pohledu ze Země leží v souhvězdí Draka a její systém čítá jednu planetu, čili v této práci studovanou HAT-P-37 b. Planeta byla objevena roku 2012 [1].

## Zpracování vlastních dat

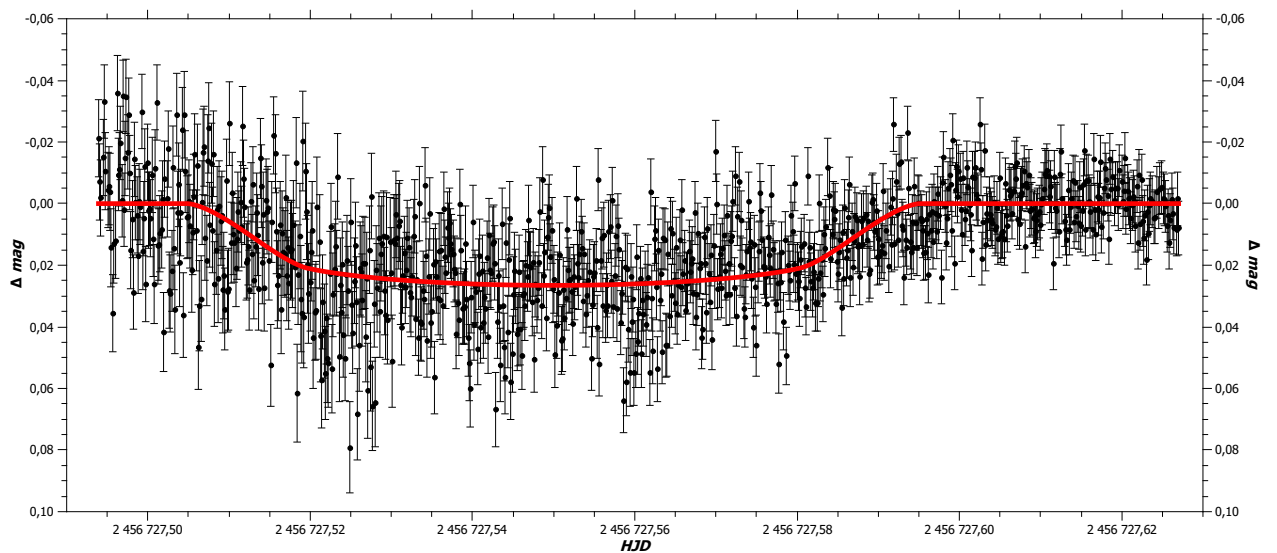
Na obrázku č. 16 je negativ jednoho snímku z celé sady snímků, kde je vyznačena hvězda měřená a pomocné hvězdy, nutné ke zpracování. Po fotometrických korekcích a jejich zpracování byla získána světelná křivka, která je vyobrazena na obrázku č. 17. Po použití aplikace v ETD byla křivka narovnána a nanormována, což zobrazuje obrázek č. 18. Na tomto a předešlém snímku jsou zřetelné velké nejistoty, způsobené horší kvalitou dat. Tu shrnuje obrázek č. 19, kde jsou vyneseny rezidua jednotlivých měření od teoretického modelu. V tabulce č. 2 jsou vypočtené hodnoty fyzikálních parametrů systému včetně jejich porovnání s daty katalogovými.



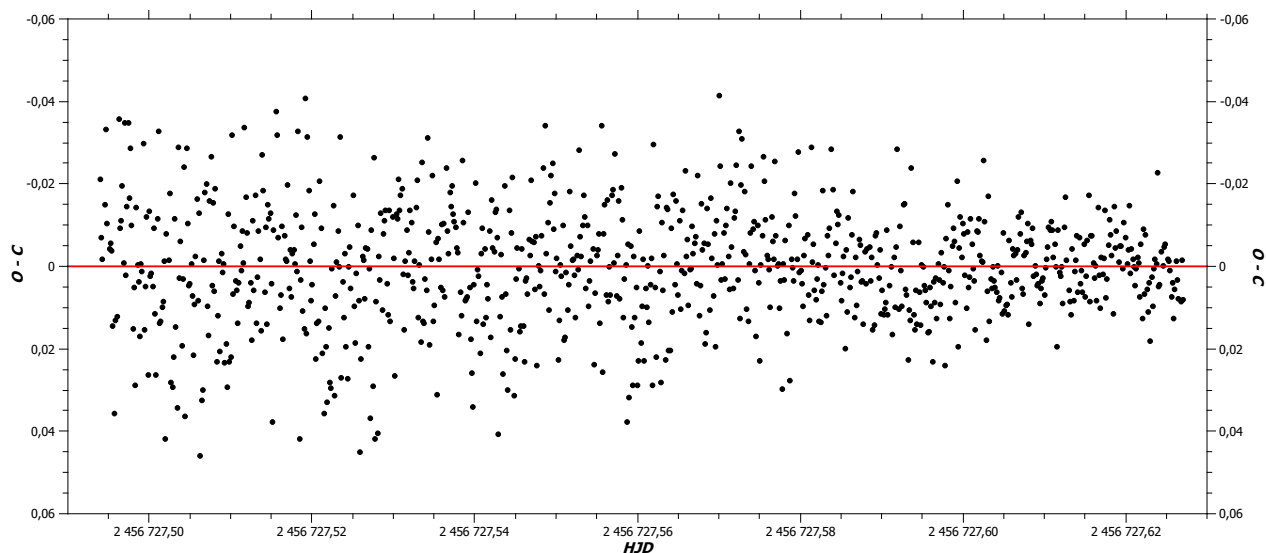
Obrázek 16: HAT-P-37 — pole hvězd v programu MUNIWIN s hvězdou měřenou (tyrkysová), srovnávací (růžová) a kontrolní (oranžová).



Obrázek 17: Světelná křivka exoplanetárního systému HAT-P-37 — původní naměřená data s nejlepším fitem.



Obrázek 18: Světelná křivka exoplanetárního systému HAT-P-37 opravená pomocí ETD o lineární trend.



Obrázek 19: Rezidua jednotlivých měření od teoretického modelu exoplanetárního systému HAT-P-37.

	Katalogová data	Naměřená data
$R_p$	$1,178 \pm 0,077 R_J$	$1,329^{+0,032}_{-0,033} R_J$
$R_*$	$0,877 \pm 0,050 R_\odot$	zafixováno
$a$	$0,0379 \pm 0,0006 \text{ AU}$	zafixováno
$P$	$2,797436 \text{ d}$	zafixováno
$i$	$86,9 \pm 0,5^\circ$	$85,83^{+0,23^\circ}_{-0,21^\circ}$

Tabulka 2: Srovnání fyzikálních charakteristik katalogových dat a naměřených dat určených ETD pro exoplanetární systém HAT-P-37.

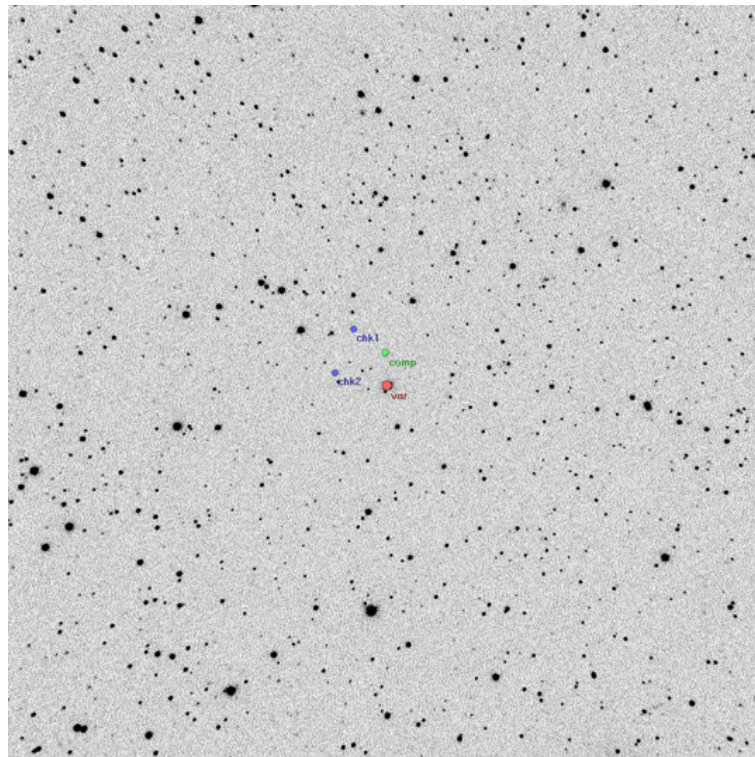
### 6.2.3. TrES-2 b

#### Popis systému

Hvězda TrES-2 je od nás vzdálena ( $220 \pm 10$ ) pc. Je to hvězda spektrálního typu G0V a její vizuální pozorovaná hvězdná velikost hvězdy ze Země je 11,41 mag. Její hmotnost je ( $0,98 \pm 0,06$ ) hmotnosti Slunce [E2]. Při pohledu ze Země leží v souhvězdí Draka a její systém čítá jednu planetu, čili v této práci studovanou TrES-2 b. Planeta byla objevena roku 2006 [2].

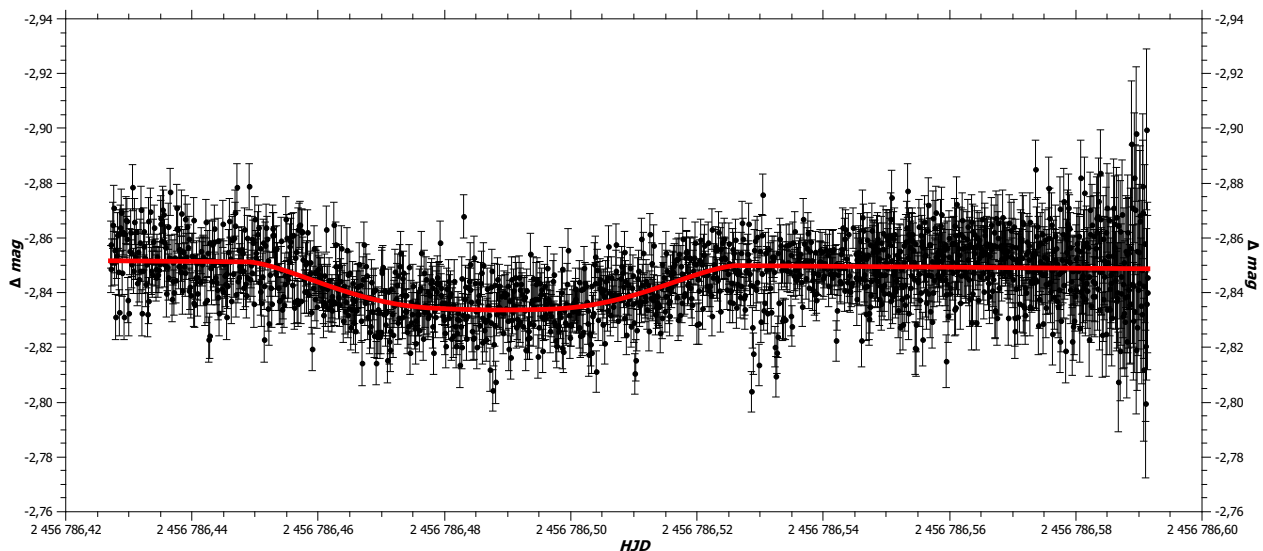
## Zpracování vlastních dat

Na obrázku č. 20 je negativ jednoho snímku z celé sady snímků, kde je vyznačena hvězda měřená a pomocné hvězdy, nutné ke zpracování. Po fotometrických korekcích a jejich zpracování byla získána světelná křivka, která je vyobrazena na obrázku č. 21. Po použití aplikace v ETD byla křivka narovnána a nanormována, což zobrazuje obrázek č. 22. Oproti předešlým dvěma systémům je na první pohled patrná znatelně vyšší kvalita dat. Tu shrnuje obrázek č. 23, kde jsou vyneseny rezidua jednotlivých měření od teoretického modelu. V tabulce č. 3 jsou vypočtené hodnoty fyzikálních parametrů systému včetně jejich porovnání s daty katalogovými. Pro tento systém bylo možno použít mimo ETD i program PHOEBE, jehož výsledky jsou v tabulce taktéž.

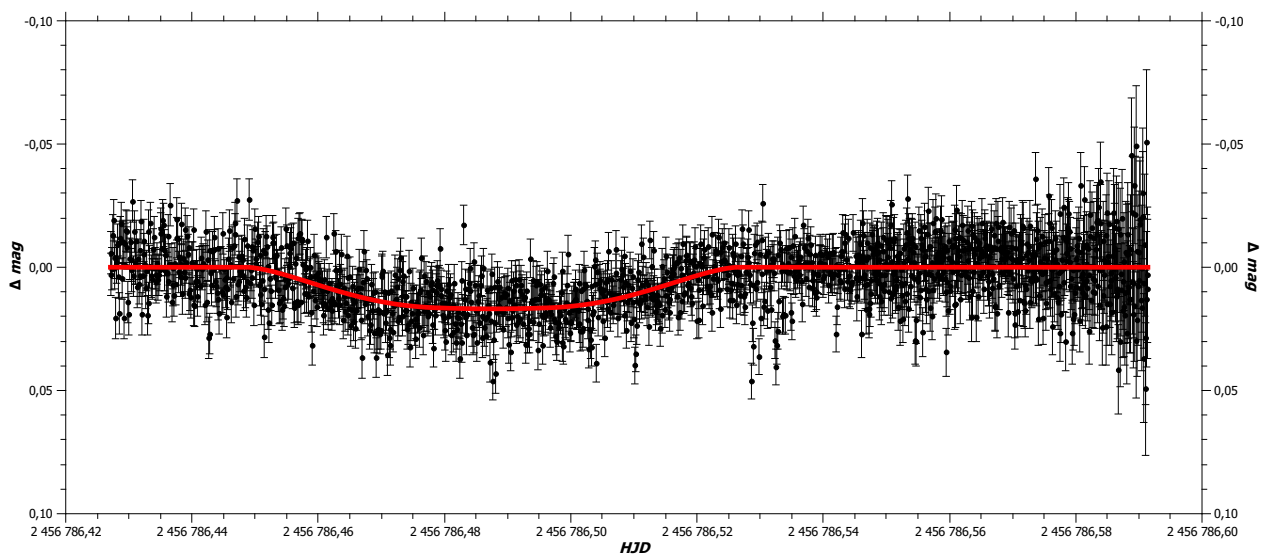


Obrázek 20: TrES-2 — pole hvězd v programu MUNIWIN s hvězdou měřenou (červená), srovnávací (zelená) a kontrolními (modré).

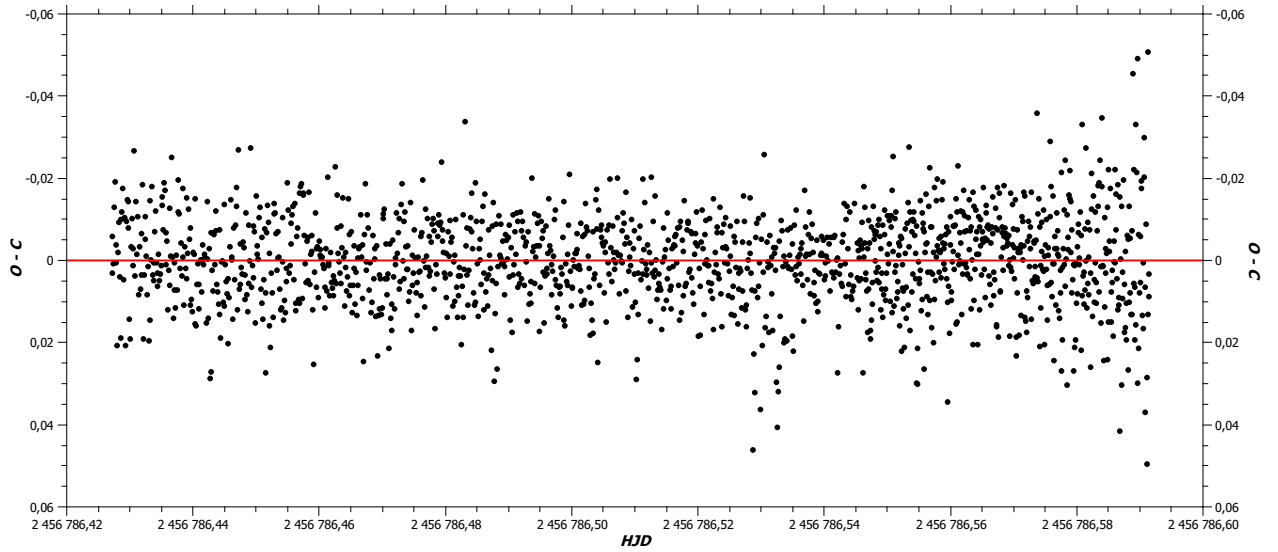




Obrázek 21: Světelná křivka exoplanetárního systému TrES-2 — původní naměřená data s nejlepším fitem.



Obrázek 22: Světelná křivka exoplanetárního systému TrES-2 opravená pomocí ETD o lineární trend.



Obrázek 23: Rezidua jednotlivých měření od teoretického modelu exoplanetárního systému TrES-2.

	Katalogová data	Naměřená data	
		ETD	Data určená PHOEBE
$R_p$	$1,224 \pm 0,041 R_J$	$1,217^{+0,032}_{-0,033} R_J$	$1,037 R_J$
$R_*$	$1,003 \pm 0,036 R_\odot$	zafixováno	zafixováno
$a$	$0,03556 \pm 0,00075 \text{ AU}$	zafixováno	zafixováno
$P$	$2,47061322 \text{ d}$	zafixováno	zafixováno
$i$	$83,57 \pm 0,14^\circ$	$83,68^{+0,24^\circ}_{-0,22^\circ}$	$83,06 \pm 0,03^\circ$

Tabulka 3: Fyzikální charakteristiky systému TrES-2 určené ETD a programem PHOEBE.

## 7. Závěr

Předmětem této bakalářské práce byla analýza světelných křivek několika vybraných extrasolárních planet a zjištění jejich základních fyzikálních charakteristik. Přestože možnost získat vlastní data nebylo mnoho, nakonec díky třem úspěšným pozorováním nebylo třeba získávat data pro tuto práci jiným způsobem.

První pozorovanou hvězdou s probíhajícím tranzitem byla HAT-P-36 (observatoř Masarykovy univerzity). Jelikož jsou ale tato pozorování velmi citlivá na kvalitu počasí, občasná oblačnost způsobila, že nebylo možno data dále zpracovávat.

Druhou pozorovanou soustavou byla opět HAT-P-36 (observatoř Suhora v Polsku) a to již za lepších podmínek. Zde je z pořízených snímků probíhající tranzit zřetelný. Použitím Databáze exoplanetárních tranzitů (ETD) byl určen poloměr exoplanety a inklinace, tedy sklon její oběžné roviny. Jelikož pořízené snímky nepokrývají celý průběh tranzitu, kdy chybí jeho začátek, nebylo možno pro zjištění parametrů tohoto systému použít program PHOEBE. Program nebyl schopen zjistit, kde je začátek tranzitu a nebylo tedy možno provést fitovací proces.

Další pozorovanou soustavou byla HAT-P-37 (Suhora). Data jsou v přijatelné kvalitě a pokrývají celý tranzit. Použitím ETD byl opět určen poloměr exoplanety a inklinace, ovšem ani zde nebylo možno program PHOEBE použít. Tyto problémy byly nejspíše způsobeny velkým šumem v datech a program zřejmě nebyl schopen určit začátek a konec tranzitu.

Poslední pozorovanou exoplanetární soustavou byla TrES-2 (Suhora). Jedná se o nejkvalitnější data, což je vidět ze světelných křivek a rovněž při porovnání katalogových dat s daty určenými ETD. Zde bylo již možno bez problémů použít program PHOEBE a nabízí se tedy dvojí porovnání katalogových dat. Program sice neurčil parametry systému tak přesně jako ETD, nicméně lze jeho výsledky považovat za uspokojivé.

Výsledky mé práce, tedy zpracované světelné křivky a výsledné parametry soustav jsou popsány v podkapitolách 6.2.1., 6.2.2. a 6.2.3. I když ne vždy byla použita data kvalitní, zjištěné hodnoty parametrů systémů se dobře shodují s hodnotami katalogovými a dokonce jsou jejich vypočtené nejistoty menší než u hodnot katalogových.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] G. Á. Bakos et al.: *The astronomical journal, volume 144, issue 1*. U.S.A., The American astronomical society, 2012.
- [2] F. T. O'Donovan et al.: *The astrophysical journal, volume 651, L61–L64*. U.S.A., The American astronomical society, 2006.
- [3] F. Hroch: *Astronomické praktikum*. Brno, Ústav teoretické fyziky a astrofyziky MUNI, 2010.
- [4] G. Chauvin, A.-M. Lagrange, C. Dumas et al.: *Astronomy and Astrophysics, volume 425, L29–L32*. 2004.
- [5] J. Kliner: *Diplomová práce — „Exoplanety“*. Praha, Astronomický ústav UK, 2006.
- [6] T. Krejčová: *Diplomová práce — „CCD fotometrie exoplanet“*. Brno, Přírodovědecká fakulta MUNI, 2008.
- [7] K. Mandel, E. Agol: *The astrophysical journal, volume 580, L171–L175*. U.S.A., The American astronomical society, 2002.
- [8] M. Mayor, P.-Y. Frei: *Nové světy ve vesmíru (Objevování exoplanet)*. Litomyšl, Paseka, 2007, ISBN 978-80-7185-755-6.
- [9] M. Mayor, D. Queloz: *Nature, volume 378, issue 6555, 355–359*. Geneva observatory, Switzerland, 1995.
- [10] M. Perryman: *Reports on progress in physics, volume 63, issue 8, 1209–1272*. University of Leiden, The Netherlands, 2000.
- [11] S. Poddaný: *Transiting Planets, volume 253, 398–401*. Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, 2009.
- [12] Z. Pokorný: *Exoplanety*. Praha, Academia, 2007, ISBN 978- 80-200-1510-5.
- [13] S. Seager, G. Mallén-Ornelas: *The astrophysical journal, 585: 1038–1055*. U.S.A., The American astronomical society, 2003.

## Seznam elektronických zdrojů

- [E1] <http://www.nature.com/nature/journal/v355/n6356/abs/355145a0.html>
- [E2] <http://www.exoplanet.eu/>
- [E3] <http://iopscience.iop.org/1538-4357/529/1/L45/>
- [E4] <http://iopscience.iop.org/0004-637X/568/1/377/>

- [E5] <http://www.cbat.eps.harvard.edu/iauc/06200/06251.html#Item1>
- [E6] <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>
- [E7] <http://astronomia.zcu.cz/hvezdy/exoplanety/51-metody-objevovani-planet>
- [E8] <http://www.phoebe-project.org/>
- [E9] <http://c-munipack.sourceforge.net/>
- [E10] <http://var2.astro.cz/ETD/protocol.php>