



STŘEDNÍ PRŮMYSLOVÁ ŠKOLA OTROKOVICE

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

**URČOVÁNÍ PARAMETRŮ EXTRASOLÁRNÍCH SYSTÉMŮ
POMOCÍ CCD FOTOMETRIE EXOPLANETÁRNÍHO
TRANZITU**

**Michal Vyvlečka
Otrokovic 2012**

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor SOČ: 02 FYZIKA

URČOVÁNÍ PARAMETRŮ EXTRASOLÁRNÍCH SYSTÉMŮ POMOCÍ CCD FOTOMETRIE EXOPLANETÁRNÍHO TRANZITU

**Determining parameters of extrasolar systems from CCD
photometry of exoplanetar transits**

Michal Vyvlečka

**Střední průmyslová škola Otrokovice
třída T. Bati 331, 765 02 Otrokovice**

Otrokovice 2012

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním autorským dílem, které jsem vypracoval samostatně. Všechny zdroje, prameny a literaturu, které jsem při vypracování používal, nebo z nich čerpal, v práci řádně cituji s uvedením úplného odkazu na příslušný zdroj.



Michal Vyvečka

PODĚKOVÁNÍ

Především bych chtěl poděkovat Barboře Mikulecké a Tomáši Henychovi za proždělé mrazivé noci, hodinové diskuze, teplý čaj a za to, že mi umožnili vypracovat praktickou část této práce. Další mé poděkování patří Míle Moudré za pomoc při pochopení databáze Tersca, protože proměnkářská logika se od logiky ostatních lidí podstatně liší. Díky také mému fyzikáři Aleši Reimerovi za odhodlání tuto práci číst a věcné připomínky při jejím vzniku. Na závěr děkuji všem, díky kterým jsem mohl v průběhu této práce pochopit jednu životní pravdu: „Desetinná čárka není tečka a desetinná tečka není čárka, jsi blbec, když nevidíš rozdíl!“

ANOTACE: Určování parametrů extrasolárních systémů pomocí CCD fotometrie exoplanetárního tranzitu

Tato práce se zabývá určením parametrů tranzitujících exoplanet, tedy těch exoplanet, u kterých lze pozorovat jejich přechod přes mateřskou hvězdu. Parametry těchto exoplanet byly určeny z poklesu jasnosti mateřské hvězdy, tento pokles byl změřen pomocí CCD fotometrie. Charakteristiky naměřených světelných křivek byly zpracovány pomocí protokolu, vytvořeného v rámci této práce, za účelem získání hodnot, které pozorovaný extrasolární systém charakterizují.

KLÍČOVÁ SLOVA: exoplaneta, extrasolární systém, CCD fotometrie, tranzit exoplanety, světelná křivka

ANOTATION: Determining parameters of extrasolar systems from CCD photometry of their transits

This work deals with a determination of some parameters of transiting exoplanets. This group of exoplanets is very interesting because we can observe their transit over their parent star. The parameters of these exoplanets were determined from the decrease of brightness of the parents star. This decrease was measured with a help of CD photometry. The features of measured light curves were processed with using of the PC program which was created in this work to find out some figures which the observe extrasolar system is characterized.

KEY WORDS: exoplanet, extrasolar system, CCD photometry, transiting exoplanets, light curve

OBSAH

SEZNAM ZNAČEK	7
ÚVOD.....	8
1.0.0 EXOPLANETY	9
1.1.0 Stručná historie výzkumu exoplanet.....	9
1.2.0 Vlastnosti exoplanet.....	12
1.3.0 Tranzity exoplanet.....	13
2.0.0 CCD FOTOMETRIE TRANZITŮ EXOPLANET	15
2.1.0 Hvězdná velikost (zdánlivá jasnost)	15
2.2.0 Instrumentální vybavení pro CCD fotometrii	16
2.2.1 Astronomický dalekohled.....	16
2.2.2 CCD kamera	17
2.2.3 Fotometrické systémy	19
2.2.3 Montáže astronomických dalekohledů.....	20
2.3.0 Software potřebný pro fotometrii tranzitů exoplanet.....	21
2.3.1 Iris.....	21
2.3.2 TRESKA	22
2.4.0 Vlastní princip fotometrie tranzitu exoplanety a zpracování dat	22
2.4.1 Osnova fotometrie tranzitu exoplanet.....	23
2.4.2 Zpracování fotometrických dat v programu IRIS.....	24
2.4.3 Fotometrický snímek.....	25
2.4.4 Dark-frame (temný snímek)	26
2.4.5 Flat-field	27
3.0.0 VÝPOČTY PARAMETRŮ EXTRASOLÁRNÍCH SYSTÉMŮ	28
3.1.0 Poloměr planety	28
3.2.0 Střed přechodu a perioda	28
3.3.0 Velká poloosa	29
3.4.0 Délka trvání tranzitu.....	29
3.5.0 Inklinace	30
3.6.0 Zóna života (HZ)	30

3.7.0 Protokol pro výpočty ze světelných křivek tranzitů exoplanet	32
4.0.0 VLASTNÍ POZOROVÁNÍ EXOPLANET	33
4.1.0 HAT-P-19 b	33
4.1.1 Pozorovací podmínky	34
4.1.2 Fotometrie	35
4.1.3 Určení parametrů extrasolárního systému	37
4.2.0 HAT-P-12 b	38
4.2.1 Pozorovací podmínky	39
4.2.2 Fotometrie	40
4.2.3 Určení parametrů extrasolárního systému	42
4.2.0 TrES-3 b	43
4.2.1 Pozorovací podmínky	44
4.2.2 Fotometrie	45
4.2.3 Určení parametrů extrasolárního systému	47
ZÁVĚR	48
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	50
PŘÍLOHY.....	52
Příloha č. 1; Návod k „Protokol pro výpočty ze světelných křivek tranzitů exoplanet“	53
Příloha č. 2; Diagramy určující přesnost fotometrického měření	56

SEZNAM ZNAČEK

Značka	Název fyzikální veličiny/vysvětlení významu	Jednotka
F	hloubka poklesu jasnosti mateřské hvězdy	[F] = mag
R_p	poloměr planety	$[R_p] = m$
R_*	poloměr mateřské hvězdy	$[R_*] = m$
P	perioda oběhu planety	[P] = sec
a	velká poloosa	[a] = m
G	gravitační konstanta/ $G=6,67384 \times 10^{-11} m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}$	$[G] = m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}$
M_p	hmotnost hvězdy	$[M_p] = kg$
M_*	hmotnost mateřské hvězdy	$[M_*] = kg$
t_z	délka trvání tranzitu	$[t_z] = kg$
L	zářivý výkon mateřské hvězdy	[L] = W
T_{eff}	povrchová teplota mateřské hvězdy	$[T_{eff}] = K$
r_o	vnější okraj zóny života	$[r_o] = AU$
r_i	vnitřní okraj zóny života	$[r_i] = AU$
T_s	teplota Slunce/ $T_s=5700 K$	$[T_s] = K$
HZ_d	je koeficient zóny života	$[HZ_d] = HZU$

ÚVOD

Už od dob, kdy si lidé poprvé uvědomili, že vesmír není jen nebeskou klenbou, ale naopak je nekonečným prostorem plným hvězd, planet, či asteroidů, začínali se zabývat myšlenkou, zda jsme ve vesmíru sami. Vždyť už staří Mayové věřili na mimozemský život, uctívali jej a vážili si jeho inteligence. Dnes také existuje spousta lidí, kteří tvrdí, že přílet mimozemšťanů viděli nebo byli dokonce na palubě intergalaktické lodě držení. Otázkou je, jak moc jsou jejich výpovědi založeny na faktech nebo na osobní potřebě každého jedince se zviditelnit.

Ať už sahá představivost naší populace jakkoliv daleko, tak rozhodně nelze opomenout, že v mimozemský život možná skrytě doufáme všichni. Doufáme, že tam někde daleko existuje planeta, zelená planeta, kypící životem. Snad se takový nový svět jednou stane naším domovem, otázku je, jestli bychom si na něj mohli dělat nárok.

Když byla v roce 1992 objevena první exoplaneta, tedy planeta obíhající kolem jiné hvězdy než je Slunce, tak se rozpoutala vášnivá debata znovu. Lidé se báli zničení Země jinou formou života, vědci jásali nad fenomenálním úspěchem. Jedno ale bylo jasné, naše Sluneční soustava není ničím výjimečná, jelikož ve vesmíru existuje velké množství planetárních systémů, které se jí nápadně podobají.

Podle sci-fi literatury i podle názorů vědecké obce bude výzkum exoplanet v budoucnu stěžejní částí astronomie. Je to celkem logické, lidé vždy chtěli zkoumat neznámé světy, ať už byly na dně světových oceánů, na vrcholcích nejvyšších hor nebo uprostřed rozsáhlých deštných pralesů. Tajuplnost cizích planet, prostě lidstvo k sobě připoutá a nepustí.

Tato práce se zaměřuje na výzkum tranzitujících exoplanet, snaží se ukázat, že spoustu informací o těchto světech můžeme získat jen z obyčejného poklesu světelného toku mateřské hvězdy, když exoplaneta přechází přes její kotouček.

1.0.0 EXOPLANETY

Exoplaneta nebo také extrasolární planeta je planeta obíhající kolem jiné hvězdy než kolem Slunce a patříci tudíž do jiné než sluneční planetární soustavy.^[1]

1.1.0 Stručná historie výzkumu exoplanet

Historie výzkumu exoplanet je poměrně krátká, její počátky sahají do počátků minulého století, kdy došlo k rychlému rozvoji pozorovací techniky a v této době začínají také vznikat první práce zabývající se problematikou možného objevení exoplanety.

První racionální spekulace o možné existenci jiných planetárních soustav můžeme najít v 18. století, kde na myšlenku možné existence těchto těles narážíme třeba v díle Isaaca Newtona *General Scholium* (1713), ve kterém napsal: „A pokud jsou pevné hvězdy centry jiných podobných systémů, tyto, formované s obdobným záměrem, musí být všechny podrobeny Jeho nadvládě“. (Překlad z angličtiny - Motte 1729).^[1]

Ve dvacátém století spousta astronomů přichází s tím, že právě oni objevili první exoplanetu, ale takřka všechny z těchto objevů byly prohlášeny za mylné. Jedním z nepovedených objevů je i výsledek výzkumu holandského astronoma Petera van de Kampa, který od třicátých let 20. století zkoumal astrometrickou metodou¹⁾ vlastní pohyb Barnardovy hvězdy²⁾. Téměř po třiceti letech výzkumu oznámil objev nejprve jedné (van de Kamp 1963) a posléze druhé planety (van de Kamp 1969) obíhající Barnardovu hvězdu. Jeho objev se setkal s řadou odpůrců, ale definitivně byl vyvrácen až v roce 1999 a to důkladným proměřením vlastních pohybů Barnardovy hvězdy s použitím modernějších metod. Přes konečný neúspěch si zaslouží astronom van de Kamp jistý obdiv, v tom oboru se stal jistým průkopníkem, neboť s vybavení té doby provedl velmi přesná měření.

¹⁾ *Astrometrická metoda (astrometrie)*- obor astronomie zabývající se určováním poloh kosmických objektů na světové sféře, poziční astronomie.^[2]

²⁾ *Barnardova hvězda (Barnardova šipka)* - hvězda v souhvězdí Hadonoše, která má ze všech hvězd nejrychlejší vlastní pohyb po obloze, který činí 10, 34" ročně.^[3]

Hledání exoplanet v pravém slova smyslu mohlo začít až v posledním desetiletí dvacátého století. Právě tehdy dochází k velkému pokroku ve fotometrii, astrometrii či spektroskopii. Technické vybavení se právě v této době už dostalo na takovou úroveň, že bylo schopno objevit exoplanetu.

První skutečný objev extrasolární planety byl oznámen roku 1995 astronomy Michelelem Mayorem a Didierem Quelozem z Ženevské observatoře. První objevená exoplaneta je pojmenována 51 Peg b¹⁾ a obíhá kolem žlutého trpaslíka²⁾ v souhvězdí Pegase. Její přítomnost u mateřské hvězdy byla prokázána spektroskopicky metodou měření změn radiálních rychlostí³⁾.

Vlastnosti 51 Peg b se vůbec neshodovaly s vlastnostmi předpovídanými. Většina astrofyziků předpokládala objevení planetárních systémů podobných Sluneční soustavě. Tato objevená exoplaneta ale obíhala svou mateřskou hvězdu v osmkrát menší vzdálenosti, než obíhá Merkur Slunce a byla svými rozměry řádově podobná Jupiteru, viz obr. 1. Další objevy exoplanet ukazovaly, že tyto vlastnosti planet nejsou v jiných planetárních systémech vůbec výjimečné. Dnes exoplanety velikosti Jupitera obíhající blízko své mateřské hvězdy označujeme jako tzv. „Horké Jupitery“.



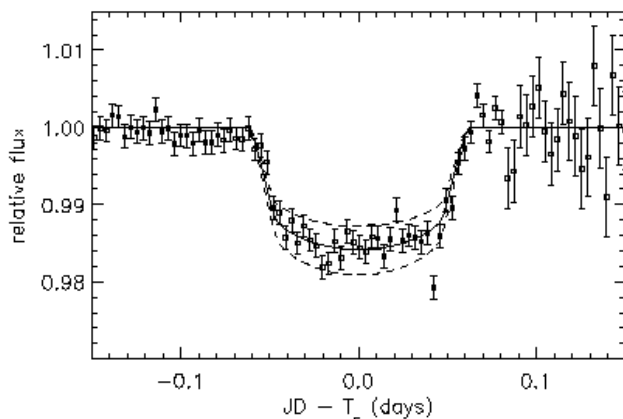
Obr. 1: Srovnání vzdáleností 51 Peg b a Merkuru od mateřské hvězdy. Velikosti planet a mateřské hvězdy nejsou v tomto schématu v měřítku.

¹⁾ První část názvu je označení hvězdy, kolem které exoplaneta obíhá a písmeno b je označením samotné planety. Pokud kolem hvězdy obíhá více planet, tak se označují následujícími písmeny v abecedě c, d, atd.

²⁾ Žlutý trpaslík je žlutá hvězda hlavní posloupnosti, jejíž hmotnost a velikost je blízká hmotnosti a velikosti Slunce.^[4]

³⁾ Metoda radiálních rychlostí se používá k výzkumu dvojhvězd, ale používá se také k detekci planetárních soustav u cizích hvězd, využívá nepřesností v oběžné dráze hvězdy, díky nimž se spektrum těchto hvězd mění v důsledku Dopplerova efektu.

V roce 1999 byl napozorován první exoplanetární transit, jev při kterém dochází k přechodu exoplanety přes kotouček mateřské hvězdy a celý systém je natočen k pozorovateli tak, že jej může pozorovat jako pokles jasnosti mateřské hvězdy. Tento pokles byl pozorován u hvězdy HD 209458, u které byla již dříve objevena pomocí metody změny radiálních rychlostí exoplaneta HD 209458 b. Výsledkem tohoto měření byla první světelná křivka exoplanety¹⁾, viz obr. 2.



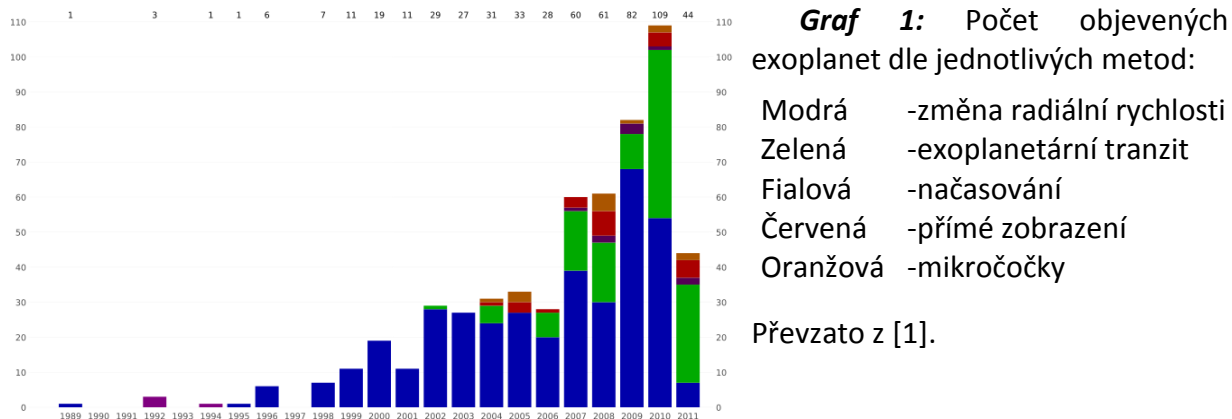
Obr. 2: Světelná křivka prvního napozorovaného exoplanetárního tranzitu planety HD 209458b. Převzato z [5].

Objev první exoplanety pomocí pozorování tranzitu byl už na spadnutí. Roku 2002 byl oznámen objev planety OGLE-TR-56 b, první exoplanety objevené pomocí měření poklesu jasnosti mateřské hvězdy. Už roku 2004 byl oznámen další významný objev, tentokrát se jednalo o planetu TrES-1. Ta se stala první exoplanetou objevenou malým amatérským dalekohledem se širokým zorným polem, při jejím objevu bylo použito měření světelné křivky exoplanetárního tranzitu.

Poslední velká revoluce ve výzkumu exoplanet přišla 7. března 2009, kdy byl ve 4:49 SEČ pomocí rakety Delta II vynesena na oběžnou dráhu Země kosmický dalekohled Kepler, jehož provozovatelem je NASA. Kepler bude po dobu minimálně 3,5 roku pozorovat kolem 100.000 hvězd v okolí souhvězdí Labutě a měřit poklesy jejich jasností s nebyvalou přesností. K polovině roku 2011 už Kepler dokázal objevit cca 340 nových exoplanet. Kepler způsobuje v současné době doslova revoluci ve výzkumu exoplanet a přepisuje současné katalogy.^[6]

¹⁾Světelná křivka je graficky vyjádřená závislost změny jasnosti vesmírného tělesa nebo oblasti v čase.^[8]

Dnes nejen díky dalekohledu Kepler a dalším sondám, které po nových světech intenzivně pátrají, ale třeba i díky zvýšení efektivity jednotlivých metod počet objevených exoplanet velice rychle roste, viz graf 1.



Jak již bylo psáno v úvodu této kapitoly, výzkum exoplanet je skutečně otázkou posledních 20 let, rozhodně svá nejlepší léta má zatím před sebou. Snad ale tato kapitola aspoň hrubě ukazuje, že tento výzkum i přes svou krátkou historii je velmi dynamický a čeká jej velká budoucnost.

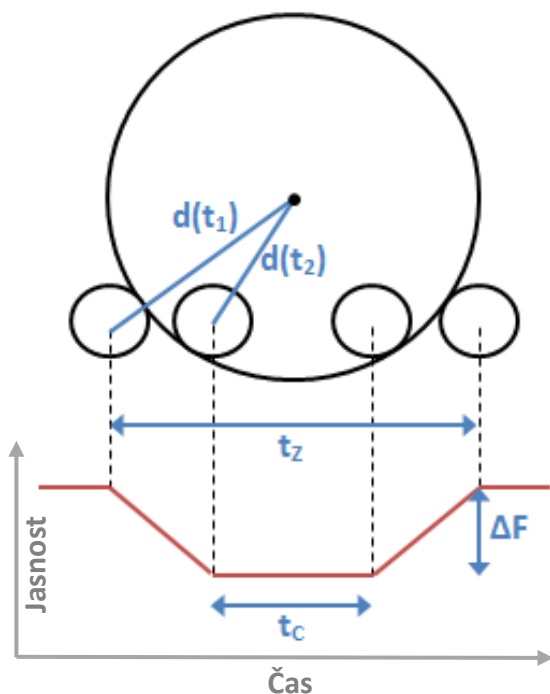
1.2.0 Vlastnosti exoplanet

Před objevem první exoplanety mohli vědci o jejich vlastnostech pouze spekulovat. Na začátku 20. století se astronomové octli na prahu nové éry, před nimi se otevřel svět vzdálených planetárních systémů, které byly velice odlišné. Planety velikosti Jupitera se naházely blízko svých mateřských hvězd, některé planety obíhaly vícenásobné hvězdné systémy, některé měly velice excentrické dráhy. Tyto nové objevy zasadily mohutnou ránu teorii o formování planetárních systémů, Sluneční soustava už nebyla v našem prozkoumaném vesmíru jedinou.

Jelikož planety prakticky vždy zkoumáme pomocí nepřímých metod, tak je možné zjistit pouze některé jejich fyzikální a orbitální parametry, viz kapitola 3.0.0 *Určování parametrů exoplanetárních systémů*.

1.3.0 Tranzity exoplanet

Tranzit exoplanety nastává, když je exoplaneta a hvězda k Zemi orientována tak, že kotouček planety v určité fázi jejího oběhu přechází přes kotouček hvězdy. Pozorovatel na zemi pak tento jev naměří jako zeslabení světelného signálu z hvězdy, viz obr. 3. Tvar světelné křivky exoplanety je charakteristický a je takřka nezaměnitelný se světelnými křivkami proměnných hvězd. Ojedinělost světelné křivky exoplanetárního tranzitu je dána tím, že je kotouček hvězdy zakrývá tělesem, které samo prakticky nevyzařuje.



Obr. 3: Schéma tranzitu exoplanety a vliv jeho jednotlivých fází na tvar světelné křivky $d(t_1)$ a $d(t_2)$ -vzdálenost exoplanety od středu mateřské hvězdy

Ve schématu jsou vyznačeny veličiny, které lze získat přímo ze světelné křivky:

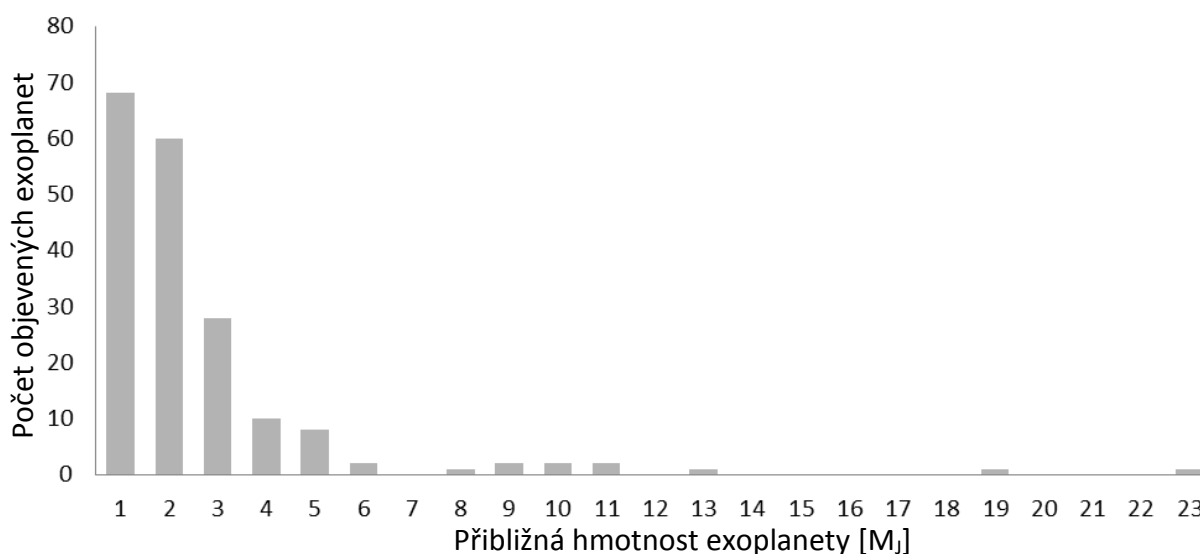
t_c -doba trvání centrální části tranzitu (po tuto dobu se kotouček exoplanety promítá na povrch hvězdy celý)

t_z -doba trvání tranzitu (doba mezi prvním a posledním kontaktem kotoučku exoplanety s kotoučkem mateřské hvězdy)

ΔF -hloubka tranzitu (určuje maximální změnu pozorovaného světelného toku přicházejícího z hvězdy)

I když lze tuto metodu použít pouze pro systémy, které jsou k pozorovateli vhodně natočené, tak má zkoumání tranzitů exoplanet v současné astrofyzice své místo. Díky měření světelných křivek tranzitu exoplanet je možné získat velmi hodnotné veličiny, jako například poloměr exoplanety nebo sklon její dráhy.

Dnes bylo touto metodou objeveno asi 50 exoplanet a dalších několik desítek jich bylo pomocí tranzitu zkoumáno. Zajímavé je, že většina exoplanet objevených touto metodou má velice podobné vlastnosti. Je to dáno především tím, že fotometrické pozorování¹⁾ tranzitů exoplanet je nejcitlivější na velmi hmotné planety, obíhající řádově desetiny a setiny astronomické jednotky daleko od mateřské hvězdy²⁾, proto mají i malou periodu oběhu (dny). Díky čemuž lze provést velké množství měření a z nich vyvodit, jestli se vůbec jedná o exoplanetu, případně jaké má vlastnosti, viz *graf 2*.



Graf 2: Graf počtu objevených tranzitujících exoplanet dle jejich hmotnosti, hmotnost je zde uváděna v násobcích hmotnosti Jupitera, data v tomto grafu jsou převzata z [7].

¹⁾Fotometrie-část astronomie zabývající se zkoumáním a porovnáváním světla z různých zdrojů z hlediska jeho působení na lidský zrakový orgán. Sledované fotometrické veličiny, například jasnost, světelný tok nebo osvětlení zohledňují vedle vlastností dopadajících fotonů fyziologii našeho zraku.^[8]

²⁾Pro srovnání Merkur, planeta obíhající nejbliž Slunci, se nachází ve vzdálenosti asi 0,4 AU od Slunce.

2.0.0 CCD FOTOMETRIE TRANZITŮ EXOPLANET

Fotometrie zkoumá veličiny charakterizující vliv světelného záření na lidské oko. V astronomii se používá ke stanovení světelného toku a jasnosti nebeských těles (hvězd, galaxií, planetek,...), při tom využívá záření v rozmezí 400-750nm. Zkoumá se zde vliv záření na světločivný systém, zde se může jednat o lidské oko, fotografické desky nebo CCD čip.

Tato kapitola se podrobněji věnuje CCD fotometrii, ta bude využívána dále v této práci.

2.1.0 Hvězdná velikost (zdánlivá jasnost)

Fotometrické veličina využívaná v astronomii (proměnná veličina při fotometrických měřeních), popisuje subjektivně vnímanou nebo přístrojem změřenou jasnost nebeského objektu (světelného zdroje). Hodnota hvězdné velikosti nemá prakticky nic společného se skutečným zářivým výkonem objektu, popisuje pouze jak se nám objekt (hvězdy, galaxie, hvězdokupa,...) zdá jasný na pozemské obloze.

Jednotkou hvězdné velikosti je magnituda, jedná se o logaritmickou jednotku, viz rov. (1). Vlastnosti této jednotky vyplývají z historických charakteristik. Je nutné zde také upozornit, že vyšší magnituda objektu ve skutečnosti znamená jeho menší jasnost.^[9] Obecně je dáno, že pro dva objekty, jejichž hvězdná velikost se liší o jednu magnitudu, jsou hustoty jejich světelného toku (jasnosti) v poměru 2,512:1.¹⁾

$$m = -2,5 \log_{10}(I/I_0) \quad (1)$$

kde m je hvězdná velikost, I hustota světelného toku²⁾ dopadajícího z objektu na lidské oko nebo čidlo přístroje a I_0 je hustota světelného toku hvězdy, které byla přiřčena hvězdná velikost 0

¹⁾Více o hvězdné velikosti na WWW: <http://astronomia.zcu.cz/hvezdy/charakteristika/2-hvezdna-velikost>

²⁾Hustota světelného toku je množství světla dopadajících na jednotku plochy za jednotku času.

2.2.0 Instrumentální vybavení pro CCD fotometrii

CCD fotometrie je v zásadě na instrumentální vybavení poměrně náročná, vybavení je cenově velice drahé a náročné na prostory. Sestava pro CCD fotometrie se skládá z dalekohledu, automatické montáže, fotometrického systému (filtrů), CCD kamery a počítače, viz obr. 4.



Obr. 4: Fotografie instrumentálního vybavení pro CCD fotometrii s popisky jednotlivých komponentů, fotografie převzata z [10]

2.2.1 Astronomický dalekohled

Astronomický dalekohled je prostředek, který slouží k optickému přiblížení nebeských objektů. Astronomický dalekohled má dvě základní části: objektiv (optická soustava, který vytváří opticky pozměněný obraz; sbírá dostatečné množství světla z nebeských objektů) a okulár (optická soustava přizpůsobující oku obraz vzniklý v ohniskové rovině objektivu; většinou obraz i zvětšuje).

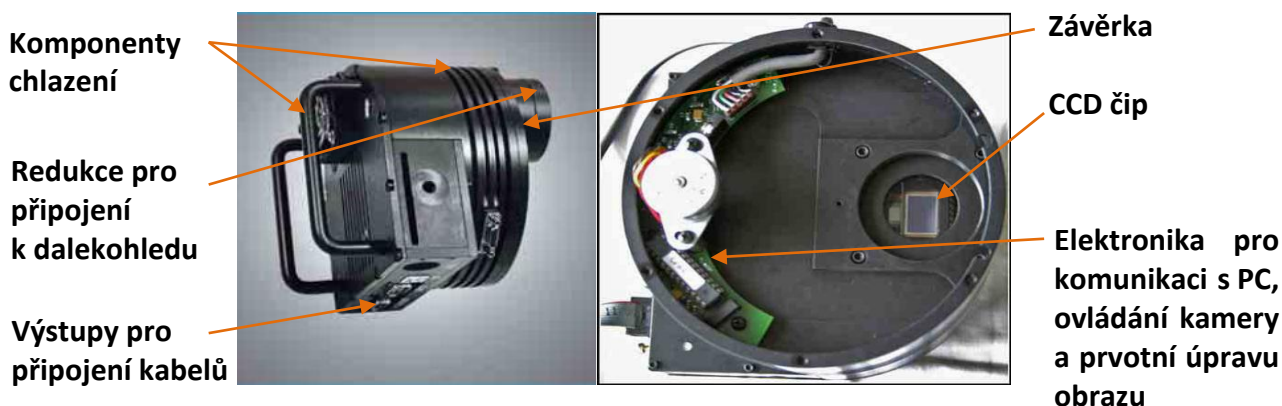
Dle soustavy objektivu se dalekohledy dělí na dva základní typy:

- **Refraktor** -objektiv tvořen čočkou nebo soustavou čoček
- **Reflektor** -objektiv tvořen zrcadlem

Při CCD fotometrii se na místo okuláru umísťuje CCD kamera, optický systém pro CCD fotometrii se pak skládá s objektivu dalekohledu a CCD kamery snímající obraz z objektivu.

2.2.2 CCD kamera

CCD kamera (*Charge-Coupled Device; zařízení s vázanými náboji*) je elektronický prvek sloužící k získání obrazové informace, přeměňuje tedy energii dopadajícího světla na energii elektrického signálu, viz obr. 5. V současnosti se v astronomii používá jako nejčastější a nejpresnější způsob stanovení hvězdné velikosti. Astronomická CCD kamera se skládá ze CCD čipu, závěrky, chladicího komponentu a zařízení, které upravuje a odesílá získanou obrazovou informaci do PC.

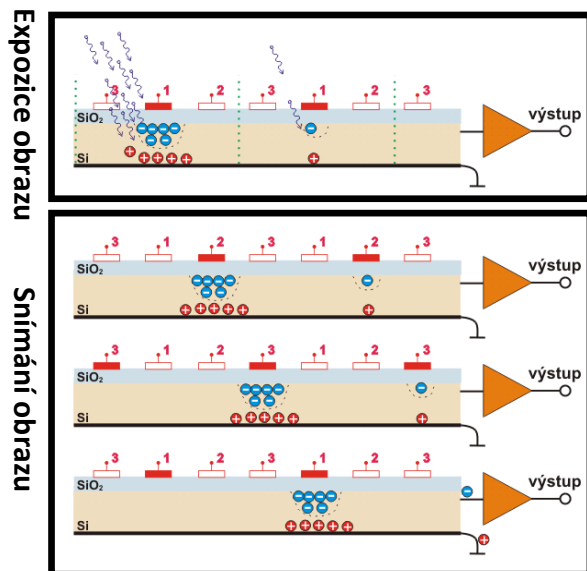


Obr. 5: Fotografie CCD kamery od společnosti SBIG model ST-10XME (celkový pohled a pohled v řezu) s popisky jednotlivých komponentů, fotografie převzata z [11]

Funkce CCD čipu je založena na fotoefektu, při kterém foton předá část své energie elektronu atomu, tento elektron je pak excitován do vyšších energetických stavů nebo je uvolněn z elektronového obalu atomu. Tento čip se běžně využívá v digitálních fotoaparátech, či čtečkách čárových kódů. Funkce CCD čipu probíhá ve třech fázích: příprava CCD, expozice obrazu a snímání obrazu, viz obr. 6.

CCD čip je chlazen z důvodu snížení tepelného šumu čipu. Nejčastějším způsobem chlazení je Peltierův článek¹⁾, tento typ chlazení dokáže běžně snížit teplotu čipu na 30°C pod teplotu okolního prostředí. Amatérské CCD kamery požívají k chlazení obyčejný ventilátor, ty profesionální naopak tekutý dusík.

¹⁾ Více informací o Peltierově článku naleznete na WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Peltierův_článek



Obr. 6: Schéma průběhu jednotlivých fází funkce CCD čipu:

Příprava CCD: během této fáze jsou bez přístupu světla odstraněny všechny volné elektrony (zbytkový signál)

Expozice obrazu: čip je vystaven působení světla, v polovodiči jsou excitovány volné elektrony, které jsou přitahovány k elektrodě č. 1, na kterou je přiváděno kladné napětí. Hranice jednoho pixlu jsou vyznačeny přerušovanou čarou

Snímání obrazu: dochází k zavření závěrky, kladné napětí je postupně přiváděno k elektrodám č. 2, 3, 1,...

Excitované elektrony jsou přes sousední pixly postupně přiváděny k zesilovači, kde je signál z jednotlivých pixlů zesílen na napěťové úrovni vhodné pro další zpracování.

Základ schématu a část jeho popisu jsou převzaty z [12].

Závěrka je zařízení, které umožňuje průchod světla na CCD čip po přesně danou dobu. V CCD kamerách se používají dva typy závěrek: mechanická (mechanická součástka; soubor rozevíracích clonek, po dané době expozice zabrání průchodu světla na čip) a elektronická závěrka (čip je osvětlován stále, ale je vyčítán jen v určených intervalech). Při CCD fotometrii se používají expozice v rozmezí 5 sekund až několika minut, proto zde nejsou pokládány velké nároky na rychlost závěrky.

CCD kamera má pro fotometrii řadu výhod, jako třeba vysokou kvantovou účinnost (ta se pohybuje kolem 80-90%), dále jejím plusem je velká linearita v širokém intervalu vlnových délek a asi tou největší výhodou je schopnost provádět fotometrii u mnoha hvězd současně. Na druhé straně má CCD kamera i své nevýhody, jednou z nejpodstatnějších je poměrně nízké rozlišení, které se obvykle pohybuje kolem 1-3MP. To ale fotometrii vůbec nevádí, ba naopak. Nízké rozlišení jen CCD kamery znevýhodňuje při fotografování deep-sky¹⁾ objektů, viz obr. 7.

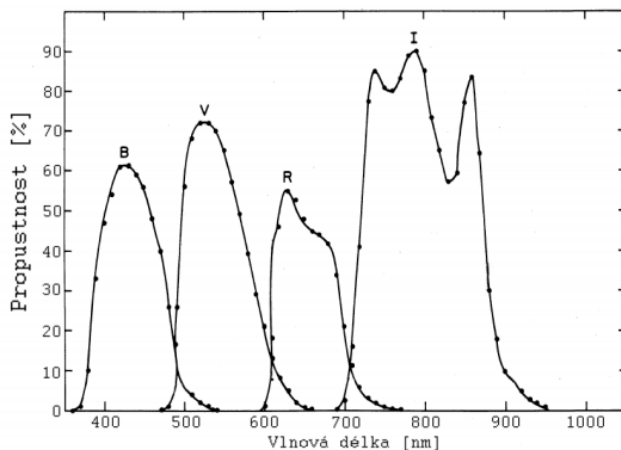
¹⁾ Deep-sky objekty nebo také objekty hlubokého vesmíru jsou objekty nacházející se mimo naši sluneční soustavu (mimo hvězd a více hvězdných systémů), patří sem např. galaxie, hvězdokupy, mlhoviny,...



Obr. 7: CCD snímek kulové hvězdokopy M71 v Šípu; 5. 8. 2011, expozice 100x5 sec SW 120/600 (refraktor), Sbig ST-7; hlavní kopule Úpické hvězdárny (Barbora Mikulecká, Michal Vyvlečka)¹⁾

2.2.3 Fotometrické systémy

Někdy může být do cesty měřenému fotonu postaven fotometrický systém, ten se skládá ze série barevných filtrů, z nichž každý pokrývá nějakou část vlnových délek. Každý filtr má přesně dané vlastnosti, určující charakteristiku zaznamenaného záření v závislosti na vlnové délce. Pokud jsou fotometrické systémy použity, tak jsou umístěny mezi objektivem dalekohledu a CCD kamerou. V této práci bylo při některých měřeních využito tzv. Rozšířeného Johnsonova systému, jedná se o rozšířený klasický Johnsonův UBV fotometrický systém²⁾, který je doplněn o červenou a infračervenou oblast spektra, viz obr. 8.



Obr. 8: Schéma rozsahů filtrů BVRI Johnsonova systému, převzato z [13]

¹⁾ Informace o snímku ve tvaru: objekt; datum pořízení, expozice, použitý dalekohled, CCD kamera; místo pozorování (pozorovatelé)

²⁾ Více informací o UBV Johnsonovu systému na http://dumbell.sci.muni.cz/skripta/promenne_hvezdy.pdf; str. 25-29

2.2.3 Montáže astronomických dalekohledů

Astronomické montáže jsou speciální konstrukce, které uchycují dalekohled a dovolují jeho pohyb ve dvou na sebe kolmých směrech, tak je možné dalekohled namířit na kterékoliv místo na obloze. Astronomická montáž musí být zároveň dostatečně robustní a tuhá, aby byl eliminován nechtěný pohyb dalekohledu. Podle směru osy montáže rozdělujeme na dva základní typy, viz obr. 10:

- **Azimutální montáž** -pohyb v azimutu a elevaci, jedna osa montáže míří do zenitu¹⁾, tato montáž je velice jednoduchá a pro vizuální pozorování hojně používaná, není však vhodná pro astrofotografii (tedy i pro fotometrii). Může sice být vybavena systémem GO-TO²⁾, ale jelikož se neotáčí kolem zemské osy, tak dochází k rotaci pozorovaného zorného pole.
- **Paralaktická montáž** -jedna osa montáže je rovnoběžná s osou zemskou (tzv. rektascenze), při ustavování montáže, před každým pozorováním, je nutné tuto osu namířit na nebeský severní (jižní) pól. Osa kolmá na rektascenzi se nazývá deklinace a je totožná s nebeským rovníkem, proto při otáčení kolem polární osy zůstává dalekohled nastaven stále na stejnou deklinaci a objekt lze udržet v zorném poli dalekohledu pouze pohybem v jedné ose. Tato montáž je vhodná pro astrofotografii.



Obr. 9: Fotografie některých typů astronomických montáží; 1-azimutální montáž, 2-dobsonova montáž (speciální typ azimutální montáže), 3-paralaktická montáž, 4-azimutální montáž se systémem GO-TO, obrázek převzat z [14]

¹⁾ Zenit (nadhlavník) je bod na obloze ležící přímo nad pozorovatelem.

²⁾ GO-TO systém (navádění montáže), tento systém zabezpečuje automatický pohyb dalekohledu v obou osách, obsahuje hodinový stroj a je schopen automaticky nasměrovat dalekohled na zadané souřadnice.

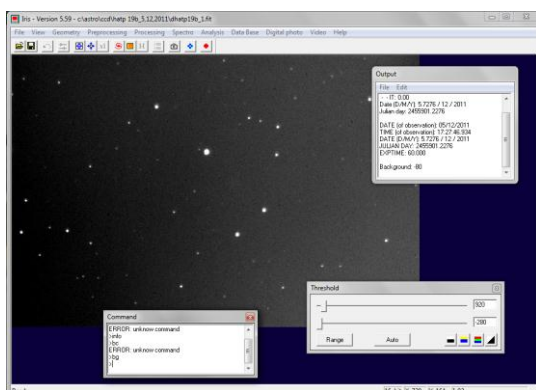
2.3.0 Software potřebný pro fotometrii tranzitů exoplanet

Pro provedení fotometrie je potřeba použít velké množství softwaru, počínaje programy ovládajícími dalekohled, kopuli, CCD kameru, počítačovými atlasy hvězdné oblohy a konče u programů pro zpracování získaných dat a vykreslení světelných křivek. Všechny tyto programy pracují s pořízenými fotografiemi ve formátu Flexible Image Transport System (s příponou .FITS), ten byl v sedmdesátých letech vyvinut jako archivní a výměnný soubor pro astronomické datové aplikace.

Tato kapitola se věnuje letmému popisu dvou programů pro zpracování dat. Popis programů pro ovládání jednotlivých komponentů pozorovací sestavy je pro tuto práci zbytečný.

2.3.1 Iris

Iris je program pro zpracování astronomických snímků. Byl naprogramován přímo pro potřeby astrofotografie a obsahuje tedy všechny potřebné funkce, mimo jiné i vše potřebné pro vyhodnocení fotometrických snímků. Celý program je zadarmo, což rozhodně neubírá na jeho funkčnosti. Časté aktualizace, doplňování o různé funkce a poměrně intuitivní ovládání z něj dělají jeden z nejlepších společníků pro zpracování fotometrie, astrometrie nebo fotografií hlubokého vesmíru, viz *obr. 10*.



Obr. 10: Pracovní okno programu Iris s otevřeným snímkem hvězdného pole pro fotometrii tranzitu exoplanety Hat P-19b

2.3.2 TRESKA

TRESKA je nový pozorovací projekt Sekce proměnných hvězd a exoplanet české astronomické společnosti zaměřený na sledování tranzitů exoplanet. Protokoly tohoto projektu umožňují finální zpracování světelné křivky tranzitu exoplanet (její nafitování, určení doby středu tranzitu,...). Dále z vložených dat pozorovatelů počítá průměry a upřesňuje katalogová data. Data od pozorovatelů jsou také využívána pro vědecký výzkum exoplanet, ten je teprve v začátcích a větší množství dat je pro něj nutností, viz obr. 11.



Obr. 11: Logo projektu TRESKA; TRESKA je akronym a znamená **TR**ansiting **ExoplanetS** and **CA**andidates, tedy v češtině zakrývající exoplanety a kandidáti, logo převzato z [15]

2.4.0 Vlastní princip fotometrie tranzitu exoplanety a zpracování dat

Předchozí kapitola byla zaměřena na instrumentální vybavení potřebné pro fotometrii tranzitu exoplanet a ukázala, že tato metoda je na vybavení poměrně náročná. Tato kapitola se zaměřuje na popis samotného provedení fotometrie a následné zpracování dat. Nejprve podává přehled jednotlivých činností v časovém sledu a dále se v jednotlivých podkapitolách zaměřuje na některé body pozorování a zpracování o něco podrobněji.

2.4.1 Osnova fotometrie tranzitu exoplanet

1. Před začátkem pozorování je nutné si na všech přístrojích zkontrolovat čas a případně jej nastavit na čas aktuální.
2. Pokud požíváme k pozorování přenosný dalekohled, je nutné jej nejméně hodinu před začátkem pozorování zanést ven temperovat (nechat jej pozvolna chladnout). Stejně dlouho před pozorováním je nutné zapnout chlazení CCD kamery, aby se teplota čipu stihla ustálit.
3. Vybereme si z databáze <http://var2.astro.cz/tresca/transits-prediction.php> tranzity, které tuto noc chceme pozorovat. Pozorování je vždy nutné zahájit minimálně půl hodiny před začátkem tranzitu.
4. Když obloha poněkud setmí a máme již vytemperovaný dalekohled a CCD kameru, pořídíme flat-field²⁾ snímky.
5. Zkalibrujeme naváděcí systém dalekohledu a nalezneme danou hvězdu¹⁾, kolem níž tížená exoplaneta obíhá. Dalekohled správně zaostříme a několika zkušebními snímky zvolíme ideální dobu expozice.
6. Nyní už můžeme začít snímat dané hvězdné pole. Fotometrie spočívá v kontinuálním focení zvolenými expozicemi po celou dobu pozorování. Budeme tedy mít ve výsledku několik set snímků. Občas je nutné průběh snímání zkontrolovat, jestli se je stále snímáno požadované hvězdné pole, jestli se nezatáhnulo nebo jestli dalekohled nenajel mimo štěrbinu kopule a my nesnímáme interiéry pozorovatelný.
7. Minimálně půl hodiny po konci tranzitu můžeme pozorování ukončit.
8. Po skončení pozorování pořídíme sérii dark-frame²⁾ snímků.
9. Pokud jsme nepořídili flat-field²⁾ snímky na stmívající obloze, můžeme tak učinit na obloze světlající. Je nutné ale zachovat stejnou konfiguraci optické soustavy, jako byla při pozorování (nesmí se hýbat se CCD kamerou).

¹⁾Hledání daného hvězdného pole je tou nejdramatičtější částí pozorování, někdy se protáhne i přes hodinu a mnoho pozorovatelů při něm začíná blouznit. Mnohdy se podobá hledání jehly v kupce sena a představivost pozorovatele je tu k nezaplacení.

²⁾Tyto pojmy jsou blíže vysvětleny v dalších kapitolách, flat-field v kapitole 3.4.5 a dark-frame v kapitole 3.4.4.

2.4.2 Zpracování fotometrických dat v programu IRIS

Zpracování fotometrických dat je v programu IRIS poměrně jednoduché, ale díky velkému množství dat je potřeba si na něj vyhradit větší množství času. V následující osnově jsou napsány stěžejní body úpravy dat v časovém sledu.

1. Úprava názvu snímků tak, aby byli kompatibilní s programem IRIS¹⁾.
2. Vytvoření master darku²⁾, korekčního snímku vzniklého sečtením všech dark-frames pořízených při pozorování.
3. Odečtení master darku od všech fotometrických snímků.
4. Vytvoření master flatu²⁾, korekčního snímku vzniklého sečtením všech flat-fieldů pořízených při pozorování.
5. Vydělení všech fotometrických snímků master flatem.
6. Registrace hvězd na fotometrických snímcích, program nalezne hvězdy na jednotlivých snímcích a posune je tak, aby byly na stejných souřadnicích na jednotlivých snímcích. Tím se odstraní drobnější chyby v pohybu montáže.
7. Označení hvězdy, u níž se mění jasnost a hvězd srovnávacích na prvním snímku.
8. Spuštění fotometrie a zadání potřebných koeficientů.
9. Program výsledky fotometrie uloží v textovém souboru se dvěma sloupci, v prvním je čas ve tvaru juliánského data³⁾ a ve druhém je jasnost hvězdy v magnitudách.

Nyní můžeme vykreslit graf v programu MS Excel nebo data vystavit do databáze TRESKA. Zde pozor na rozdíl mezi desetinou čárkou a tečkou, MS Excel podporuje desetinou čárku, IRIS a TRESKA naopak desetinou tečku, mně osobně to zamotalo hlavu na hodně dlouho.

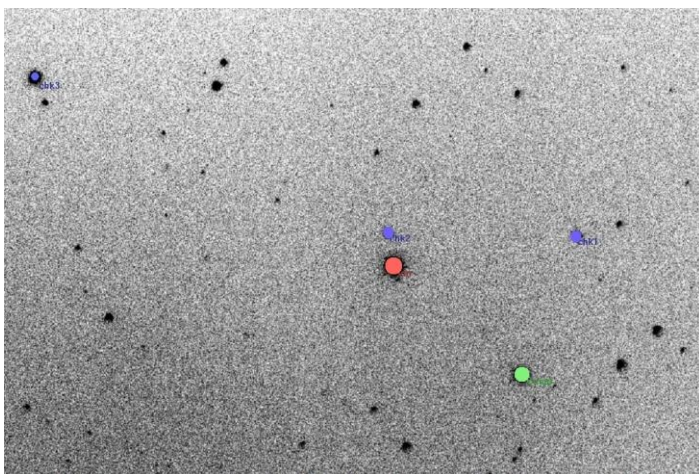
¹⁾Názevobjektu_číslosnímku.fit

²⁾Master flat a Master dark jsou součty jednotlivých korekčních snímků, sečtením více korekčních snímků odstraníme jejich případnou vadu a zvětšíme jejich pozitivní vliv na fotometrický snímek. Pokud jsou korekční snímky nekvalitní, tak může dojít i k poškození fotometrického snímku.

³⁾**Juliánské datum** (značka **JD**), je spojitá časová škála, používaná v astronomii pro sledování periodických dějů. Je definována jako počet dní, které uplynuly od poledne světového času dne 1. ledna roku 4713 př. n. l. Zapisuje se jako desetinné číslo, přičemž zlomková část čísla odpovídá příslušnému dílu dne. ^[15]

2.4.3 Fotometrický snímek

Je to snímek, který obsahuje hvězdu, přes kterou má přecházet kotouček exoplanety (říkejme jí proměnná, i když z astronomického hlediska toto označení není zcela správné) a hvězdy srovnávací. Hvězda proměnná mění svou jasnost, ta je předmětem našeho měření a její změnu jasnosti chceme definovat. Hvězdy srovnávací svou jasnost nemění, ty jsou tedy konstantní; díky porovnávání jasností těchto srovnávacích hvězd můžeme určit změnu jasnosti hvězdy proměnné. Hvězdy srovnávací by měly být přibližně stejně jasné a stejného spektrálního typu, jako hvězda proměnná, viz obr. 12.

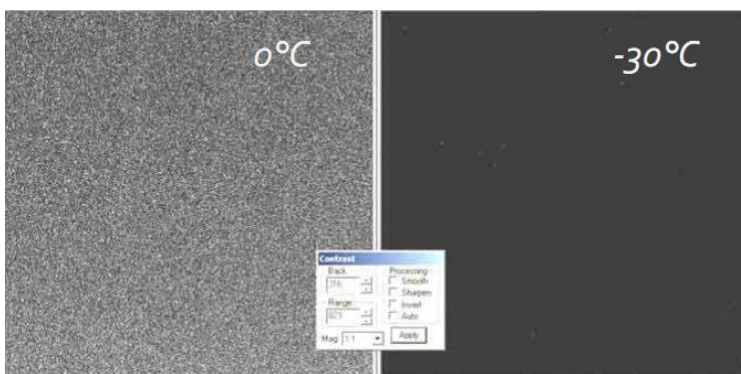


Obr. 12: Fotometrický snímek hvězdného pole pro fotometrii tranzitu exoplanety Hat-P-19b, červeně je vyznačena proměnná hvězda (Hat-P-19), modře a zeleně jsou vyznačeny čtyři hvězdy srovnávací.

U fotometrického snímku musíme dobře volit délku expozice tak, aby byla hodnota poměru signál/šum u proměnné hvězdy a srovnávacích hvězdy co nejvyšší, ale zároveň musíme dbát na to, abychom nepřekročili hranici linearity, nebo nesmí dojít k přetečení náboje. Zároveň musíme volit expozici mezi 5-180 sec, při vyšších expozicích se ztrácí časové rozlišení pozorované události a zvyšuje se negativní vliv pohybu montáže na přesnost fotometrie a kratší expozice zase zvyšují vliv scintilace atmosféry. Pokud ale kvůli jasnosti hvězdy expozici přece jen musíme snížit, tak je lepší mírně rozostřit dalekohled než snižovat dobu expozice.

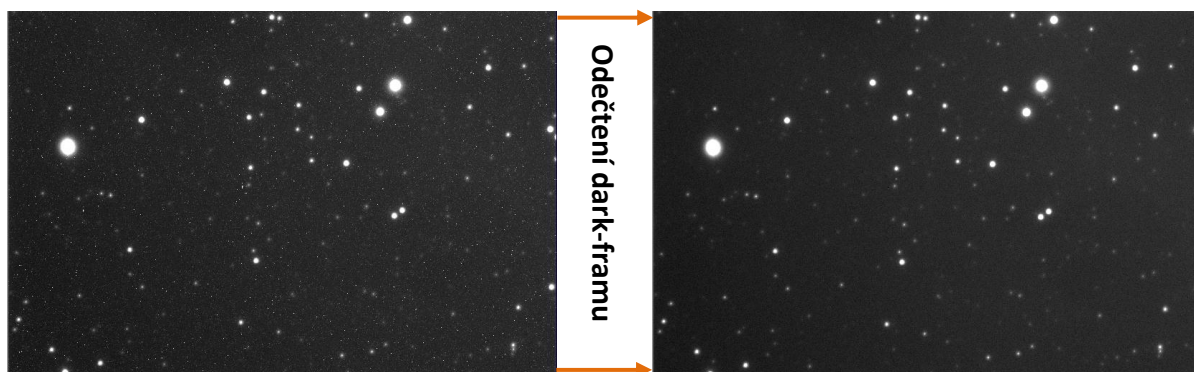
2.4.4 Dark-frame (temný snímek)

Korekční snímek, který má za úkol na fotometrickém snímku snížit množství termického šumu. Tento šum, jak již název částečně napovídá, je lineárně závislý na teplotě a délce expozice, proto ho lze eliminovat chlazením snímače, viz *obr. 13*. Tento typ šumu vzniká spontánním uvolňováním elektronů v buňkách snímače při samotném snímání, naštěstí jsou tento šum náchylné jen některé buňky, a proto je šum na dvou snímcích o stejné expoziční době a stejné teplotě snímače prakticky totožný.



Obr. 13: Ukázka závislosti množství tepelného šumu na teplotě snímače, snímek dark-frame pořízený CCD SBIG ST-9E, expozice 505 sec, obrázek převzat z [17].

Dark-frame se získává se stejnou expoziční dobou a teplotou snímače jako snímek fotometrický. Jeho pořízení je velmi jednoduché, protože se vyčísluje snímač, na který nedopadá žádný světelný signál, tedy CCD kamera má zavřenou mechanickou závěrku nebo je objektiv dalekohledu opatřen krytkou. Ke každému pozorování se pořizuje asi deset dark-frames. Při zpracování snímků se jednotlivé dark-frames sečtou a zprůměrují, vznikne jeden snímek tzv. master dark. Ten se od jednotlivých fotometrických snímků odečítá, viz *obr. 14*.



Obr. 14: Srovnání surového fotometrického snímku a snímku po odečtení dark-frames

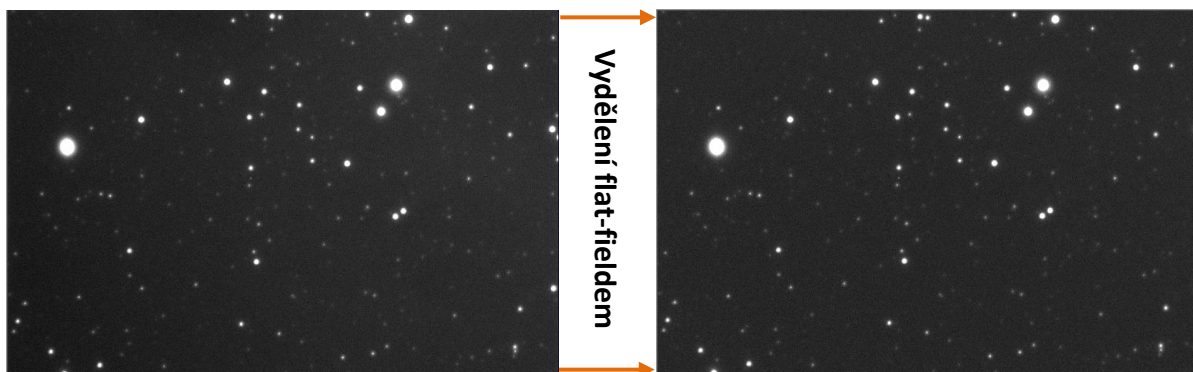
2.4.5 Flat-field

Korekční snímek odstraňující z fotometrického snímku vliv pylových zrn a vinětace, které se projevují na snížení citlivosti jednotlivých buněk snímače. Pylová zrna mohou být na povrchu snímacího CCD čipu nebo na dalekohledu, na snímku se projevují jako tmavší místa. Vinětace vzniká na okrajích snímku a projevuje se jeho tmavnutím ve směru k okrajům. Je způsobena tím, že na buňky snímače u jeho okrajů nedopadá světlo kolmo, viz obr. 15.



Obr. 15: Podoba master flatu vzniklého složením všech dílčích flatů pořízených při pozorování.

Pořizování flat-fieldu je poměrně komplikované a vytvoření kvalitního korekčního snímku je do jisté míry uměním. Flat se pořizuje snímáním rovnoměrně osvětlené plochy. V praxi se snímá jasná obloha po západu Slunce nebo před jeho východem, je to krátká doba, kdy na obloze není Slunce a nejsou ještě patrné žádné hvězdy. Při pořizování flat-fieldu je nutné měnit dobu expozice, tak abychom nepřesáhli linearitu snímače a nasycení jednotlivých pixelů nebylo zase příliš nízké. Měněním expozice reagujeme na změny jasnosti oblohy, která se velmi rychle mění. Zároveň při snímání musíme dalekohledem pohybovat, abychom odstranili vliv statických objektů na kvalitu snímku (jasné hvězdy, lokální oblačnost,...) pro každou expozici musíme vytvořit i dark-frame, který pak budeme od příslušných flatů odečítat. Při zpracování snímků se jednotlivé flat-fieldy sečtou a zprůměrují, vznikne jeden snímek tzv. master flat. Tím se jednotlivé fotometrické snímky dělí, viz obr. 16.



Obr. 16: Srovnání surového fotometrického snímku a snímku poděleného flat-fieldem

3.0.0 VÝPOČTY PARAMETRŮ EXTRASOLÁRNÍCH SYSTÉMŮ

I přesto že exoplanety pozorujeme pouze nepřímo, je možné ze získané světelné křivky získat řadu informací. Při určování parametrů extrasolárních systémů vycházíme ze dvou předpokladů:

- Trajektorie, po které planeta obíhá mateřskou hvězdu, je přibližně kruhová (tato podmínka je u většiny tranzitujících exoplanet víceméně splněna).
- Známe parametry mateřské hvězdy (její poloměr a hmotnost).

Katalogová data potřebná pro výpočty parametrů extrasolárních systémů byly získány z katalogu tranzitujících exoplanet <http://exoplanet.eu/catalog-transit.php>.

3.1.0 Poloměr planety

Poloměr extrasolární planety můžeme určit z hloubky tranzitu pomocí vztahu (2).

$$\Delta F = \left(\frac{R_p}{R_*}\right)^2 \quad (2)$$

kde ΔF je hloubka tranzitu (tedy změna zářivého výkonu soustavy hvězdy-planeta), R_* je poloměr mateřské hvězdy a R_p je poloměr exoplanety. Ke zjištění poloměru exoplanety tedy potřebuje znát poloměr mateřské hvězdy.

3.2.0 Střed přechodu a perioda

Střed tranzitu exoplanety je automaticky generován protokoly databáze TRESKA z dat naměřených pozorovatelem. K určení periody oběhu exoplanety musíme mít naměřené dvě světelné křivky dané exoplanety s určenými středy přechodu, které od sebe odečteme. Databáze TRESKA umožňuje srovnání našeho pozorování s pozorováními jiných pozorovatelů a zjištění periody bez nutnosti naměření dvou světelných křivek.

3.3.0 Velká poloosa

Velká poloosa vyjadřuje střední vzdálenost kosmického tělesa od těžiště soustavy. V případě soustavy planeta-hvězda můžeme velkou poloosou rozumět i vzdálenost planety od hvězdy, protože hmotnost planety tvoří v celkové hmotnosti soustavy jen zanedbatelnou část. Velká poloosa se většinou vyjadřuje v Astronomických jednotkách (AU). Pro výpočet velké poloosy můžeme použít třetí Keplerův zákon ve tvaru (3).

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

kde P je perioda oběhu exoplanety, a je velká poloosa, G gravitační konstanta, M_* hmotnost mateřské hvězdy a M_p hmotnost exoplanety. Jelikož pro exosolární systémy platí $M_p \ll M_*$, můžeme vztah pro velkou poloosu vyjádřit ve tvaru (4).

$$a = \sqrt[3]{\frac{P^2 G M_*}{4\pi^2}} \quad (4)$$

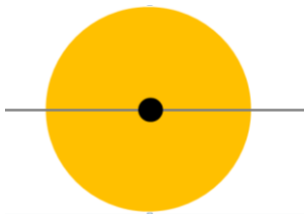
3.4.0 Délka trvání tranzitu

Délka trvání tranzitu je automaticky generována protokoly databáze TRESKA z pozorovatelských dat. Jedná se o jednoduchou proceduru, při níž jsou od sebe odečteny časy začátku a konce tranzitu. Pokud ale nechceme použít databázi TRESKA, tak je nám k dispozici program AVE¹⁾, který je volně ke stažení. Tento program dokáže ze světelné křivky odečíst střed tranzitu a dobu jeho trvání.

¹⁾Program AVE je volně ke stažení na WWW: www.astrogea.org/soft/ave/aveint.htm

3.5.0 Inklinace

Inklinace neboli sklon dráhy je jednou z vlastností trajektorie, která popisuje pohyb kosmického tělesa (přirozeného nebo umělého-družice) v kosmickém prostoru. Vyjadřuje úhel ve stupních, který svírá rovina dráhy se základní rovinou příslušné souřadné soustavy. Pro lepší představu významu inklinace při popisu trajektorií planet je zde uvedeno schéma trajektorie Jupiteru obíhajícího kolem Slunce, viz obr. 17.



Obr. 17 Schéma trajektorie Jupitera, jeho trajektorie má vůči Slunci inklinaci 90°

Odvození vztahu pro výpočet inklinace je s pomocí středoškolských znalostí fyziky a matematiky poměrně komplikované, proto je v této práci uveden jen konečný vztah (5).

$$i = \arccos \sqrt{\frac{(R_* + R_p)^2}{a^2} - \sin^2 \frac{\pi t_z}{P}} \quad (5)$$

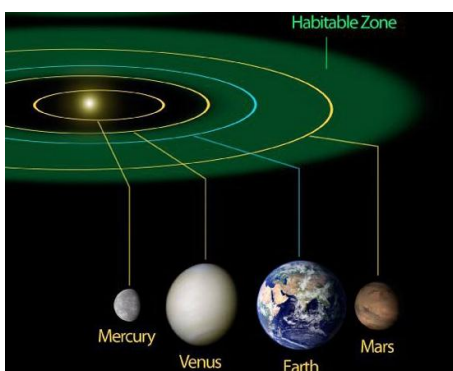
kde t_z je délka trvání tranzitu, P je perioda oběhu exoplanety, a je hlavní poloosa, R_* poloměr mateřské hvězdy a R_p je poloměr exoplanety.

3.6.0 Zóna života (HZ)

Je to hypotetická oblast kolem hvězdy, v níž nacházející se planeta přímá od mateřské hvězdy, takové množství energie, které nečiní její povrch přehřátým ani podchlazeným. Jinými slovy, je to pomyslná oblast v planetární soustavě, kde může existovat voda v kapalném skupenství a s ní i život v podobě jak ho známe na Zemi.

Zóna života pro danou planetární soustavu je určena dvěma mantinely, které určují hranice pásu HZ, viz obr. 17. Jejich výpočet je vyjádřen vztahem (6). Planetu samotnou

charakterizuje tzv. koeficient zóny života (zkratka HZ_d), ten udává, jak daleko se planeta nachází od středu HZ v jednotkách HZU (vzdálenost středu HZ od okrajů HZ), jeho výpočet se provádí dle vztahu (7). Přičemž mantinely mají hodnotu tohoto koeficientu -1 a $+1$, střed HZ má pak logicky hodnotu koeficientu 0 . Z toho vyplývá, že planeta nejideálnější podmínkami pro vznik života má koeficient co nejbližší 0 a planeta s koeficientem větším než $+1$ (menším než -1) leží mimo pás zóny života. Pokud má planeta hodnotu HZ_d zápornou, pak leží z pohledu od mateřské hvězdy před středem HZ, pokud je hodnota HZ_d planety kladná, pak leží ze stejného pohledu za středem HZ.



Obr. 17: Vymezení zóny života ve Sluneční soustavě, obrázek převzat z [18]

Výpočet zóny života rozhodně nemůžeme v žádném případě chápat jako směrodatný. Zanedbává spoustu podstatných parametrů, jež jsou pro život poměrně podstatné. Jedním z nich je i atmosféra planety, která se při výpočtu HZ zcela opomíná, i přesto že její vliv na teplotu povrchu planety není zanedbatelný. Vždyť atmosféra zvyšuje teplotu na povrchu Země o 30°C na Venuši je to až o 500°C .

Dalším problémem provázející výpočet zóny života je aplikace stejného postupu, který používáme u exoplanety na Zemi. Pokud tedy provedeme daný výpočet, tak nám vyjde HZ_d $0,5$. Znamená to snad, že Země není až tak ideální pro život? To rozhodně ne, jak již bylo zmíněno, tak HZ není nějak pro vznik života směrodatná; na tom, jestli na planetě život vznikne, se podílí celá řada faktorů a výpočet HZ uvažuje pouze jediný a to množství energie, kterou planeta přijme od mateřské hvězdy. Dnes nám výpočet HZ pomáhá v lepší orientaci mezi spoustu exoplanet a pomáhá vytipovat kandidáty, na nichž by mohl vzniknout život.

Výpočet vnější r_o a vnitřní r_i hranice zóny života

$$r_i = \left[r_{is} - a_i(T_{eff} - T_s) - b_i(T_{eff} - T_s)^2 \right] \sqrt{L}$$

$$r_o = \left[r_{os} - a_o(T_{eff} - T_s) - b_o(T_{eff} - T_s)^2 \right] \sqrt{L} \quad (6)$$

kde T_{eff} je povrchová teplota mateřské hvězdy (v Kelvinech), L je zářivý výkon mateřské hvězdy (v násobcích Slunce), r_o je vnější okraj HZ a r_i je vnitřní okraj HZ, ostatní jsou konstanty, které jsou srovnávacími hodnotami s ideální HZ a se Sluncem: $T_s=5700$ K, $a_i=2,7619 \cdot 10^{-5}$, $b_i=3,8095 \cdot 10^{-9}$, $a_o=1,3786 \cdot 10^{-4}$, $b_o=1,4286 \cdot 10^{-9}$, $r_{is}=0,72$ a $r_{os} = 1,77$

Výpočet koeficientu zóny života pro danou planetu

$$HZ_d = \frac{2r - r_o - r_i}{r_o - r_i} \quad (7)$$

kde r je vzdálenost planety d hvězdy (v AU), r_o je vnější okraj HZ a r_i je vnitřní okraj HZ, HZ_d je koeficient zóny života (v HZU)

Většina exoplanet, u kterých je možné pozorovat pokles jasnosti mateřské hvězdy při jejich tranzitu s použitím dnešních technologií, jsou tzv. horcí jupiteři. Tedy obíhají velmi blízko mateřské hvězdy a jsou to většinou plynní obři, proto je prakticky vyloučené, aby se planeta a pozorovatelným tranzitem nacházela v zóně života.

3.7.0 Protokol pro výpočty ze světelných křivek tranzitů exoplanet

Pro usnadnění výpočtů za naměřených světelných křivek tranzitu exoplanet byl v rámci této práce vytvořen „Protokol pro výpočty ze světelných křivek tranzitů exoplanet“. Jedná se o soubor vytvořený v Microsoft Office Excel 2010, v němž jsou zavedeny vztahy a konstanty potřebné pro výpočty. Navíc je celý protokol propojen s databází tranzitujících exoplanet, z ní jsou automaticky vygenerovány potřebné hodnoty.

Návod k protokolu je uveden v příloze č. 1; Návod k „Protokol pro výpočty ze světelných křivek tranzitů exoplanet“, samotný protokol je uveden v příloze č. 3; „Protokol pro výpočty ze světelných křivek tranzitů exoplanet“, která je k práci přiložena v elektronické podobě.

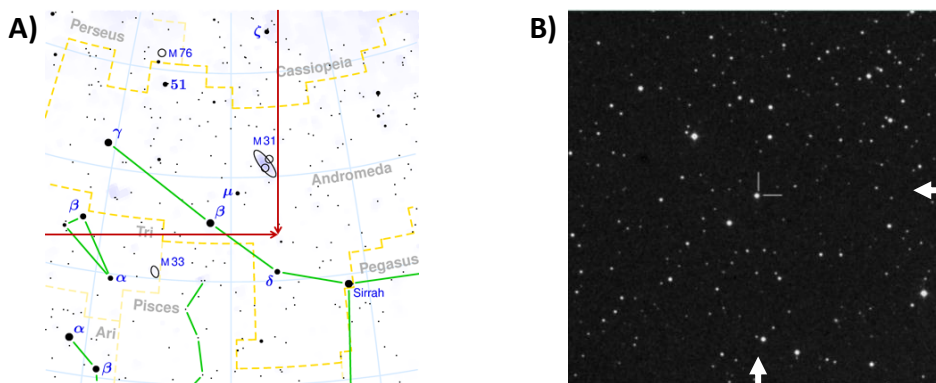
4.0.0 VLASTNÍ POZOROVÁNÍ EXOPLANET

Tato kapitola se věnuje vlastnímu řešení problematiky této práce. Jsou zde popsány pozorování jednotlivých exoplanetárních tranzitů a následné výpočty z jejich světelných křivek.

4.1.0 HAT-P-19 b

Exoplaneta obíhá kolem hvězdy HAT-P-19 v souhvězdí Andromedy, viz obr. 18, jedná se o hvězdu se zdánlivou hvězdnou velikostí 12,9 mag spektrálního typu¹⁾ K. Hvězdy tohoto typu jsou chladnější (3900-5200 K; svítí oranžovou barvou), ve vesmíru poměrně časté (až 8% zastoupení), jsou o polovinu menší než Slunce a mají asi pětinový zářivý výkon. Délka jejich života je 50 miliard let, díky tomu jsou vhodnými kandidáty pro hledání života na planetách, které je obíhají.

Exoplaneta HAT-P-19 b byla objevena v prosinci roku 2010 v rámci projektu HATNet²⁾. Jedná se o plynou planetu s průměrnou povrchovou teplotou 1010 °K. V době psaní této práce je největší známou planetou.



Obr. 18: Mapy polohy hvězdy HAT-P-19; A) přibližné umístění hvězdy na mapě souhvězdí Andromedy; B) Detailní hvězdné pole s vyznačenou hvězdou HAT-P-19, převzato z [19]

¹⁾ Rozdělení hvězd na základě jejich spektrálních charakteristik.

²⁾ HATNet je americký program hledající exoplanety na základě pozorování jejich tranzitů.

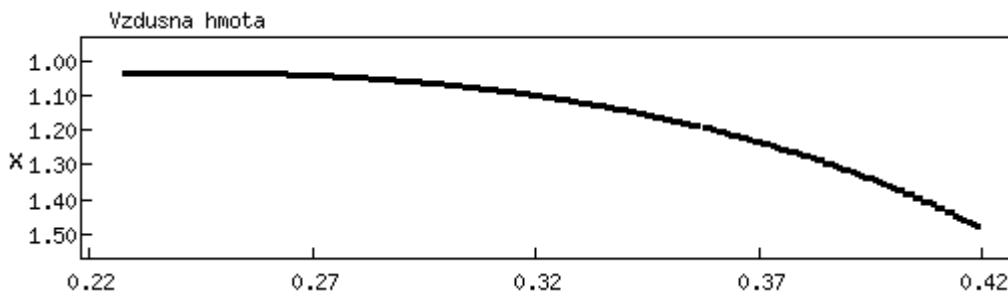
4.1.1 Pozorovací podmínky

Pozorování exoplanety HAT-P-19 b proběhlo dne 5. 12. 2011 z Monte Boo observatory v Brně (observatoř Masarykovy univerzity), viz *tab. 1*. Byla volena 60 sec expozice v R filtru. Noc nebyla na pozorování příliš vhodná, měsíc se blížil úplňku a obloha byla místy zatažená Ciry. Výsledná fotometrie, navzdory nepříliš vhodným podmínkám, byla poměrně přesná.

Observatoř	Monte Boo
Pozorovatelé	MV, BM, TH
Čas pozorování	2011-12-05; 17:28 UT 2011-12-05; 23:05 UT
Dalekohled	0,62 m
CCD kamera	SBIG ST-8
Teplota CCD čipu	-24,9 °C
Filtr	R
Expozice	60 sec

Tab. 1: Tabulka se základními údaji o pozorování HAT-P-19 b z 5. 12. 2011 (pozorovatelé; MV-Michal Vyvlečka, BM-Barbora Mikulecká, TH-Tomáš Henych)

Hvězda HAT-P-19 se na začátku pozorování nacházela poblíž zenitu, v průběhu pozorování se však posunovala směrem k horizontu, čímž se zhoršovala kvalita snímaného obrazu, jelikož bylo nutné pozorovat přes silnější vrstvu atmosféry, viz *graf 3*.

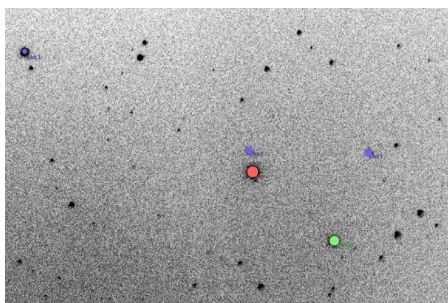


Graf 3: Křivka vzdušné hmoty z pozorování HAT-P-19 b z 5. 12. 2011, skrz kterou bylo nutné pozorovat; na ose x je mocnost vzdušné hmoty, kdy mocnost vzdušné hmoty v zenitu je rovna 1; na ose y je čas ve zkrácené podobě juliánského data

4.1.2 Fotometrie

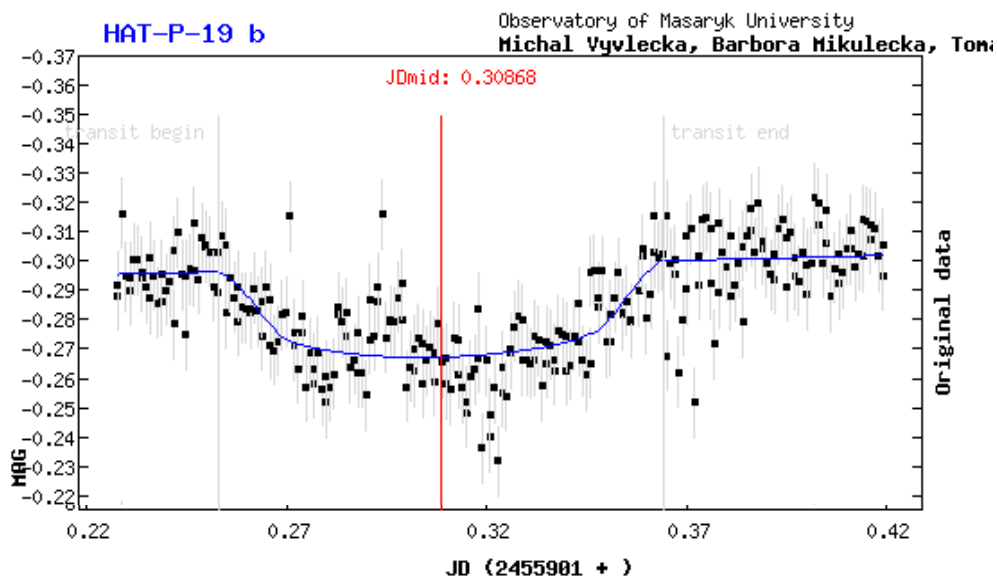
Fotometrické zpracování dat HAT-P-19 b z 5. 12. 2011 bylo provedeno v programu Iris a následně byly výsledky vystaveny v rámci databáze Tresca. Výsledky fotometrie jsou dostupné na WWW: <http://var2.astro.cz/tresca/transit-detail.php?id=1325886973>.

Dle pravidel byly vybrány srovnávací hvězdy, viz kapitola 3.4.3, a následně byla srovnání mezi těmito hvězdami a hvězdou HAT-P-19 vytvořena světelná křivka, viz obr. 19.



Obr. 19: Fotometrický snímek hvězdného pole pro fotometrii tranzitu exoplanety Hat-P-19 b, červeně je vyznačena proměnná hvězdy (Hat-P-19), modře a zeleně jsou vyznačeny čtyři hvězdy srovnávací.

Výsledná světelná křivka byla modelem vypočítanými hodnotami a byla stanovena chyba v jednotlivých bodech křivky, viz graf 4.



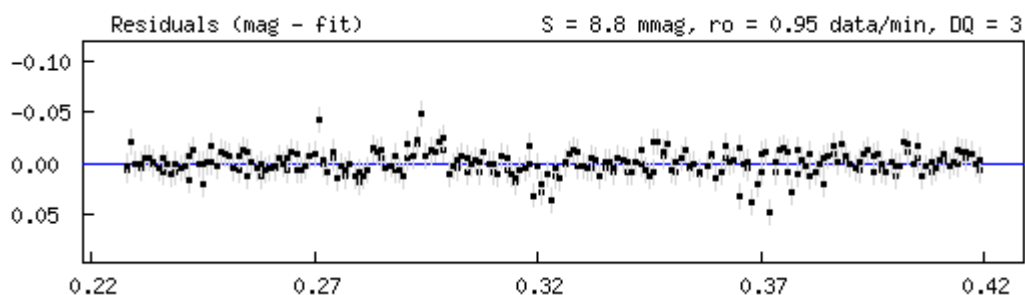
Graf 4: Světelná křivka HAT-P-19 b z 5. 12. 2011, křivka je nabitována pomocí model vypočítaných dat, v grafu je vyznačena chyba jednotlivých měření; začátek, střed a konec tranzitu je vyznačen svislými čarami

Charakteristiky světelné křivky tranzitu exoplanety HAT-P-19 b (střed, začátek, konec a hloubka tranzitu) byly určeny pomocí nafitované křivky vyjádřené protokoly databáze Tresca, viz *tab. 2*.

Střed tranzitu JD	2455901,30868 +/- 0,0013
Střed tranzitu	2011-12-05 19:24:29 UT
Délka tranzitu [min]	160,2 +/- 4,8
Hloubka poklesu [mag]	0,0309 +/- 0,0018

Tab. 2: tabulka charakteristik světelné křivky tranzitu HAT-P-19 b z 5. 12. 2011 s uvedenou chybou měření

- Chyba fotometrie tranzitu HAT-P-19 b z 5. 12. 2011 byla stanovena pomocí rozdílu mezi naměřenou světelnou křivkou a křivkou určenou modelem, viz *graf 5*. Přesnost fotometrie je zobrazena v diagramech srovnávajících hodnoty vybraných veličin, získané ze zpracování naměřené světelné křivky, s jinými pozorovateli a modelovými hodnotami, viz *příloha č. 2; Diagramy určující přesnost fotometrického měření (str. 58)*.



Graf 5: Graf rezidui mezi křivkou určenou modelem (modrá přímka) a naměřenou světelné křivkou tranzitu HAT-P-19 b z 5. 12. 2011 (černé body), pokud naměřená křivka odpovídá v daném bodě modelové, pak tento bod leží na modré přímce.

4.1.3 Určení parametrů extrasolárního systému

Výpočty parametrů extrasolárního systému HAT-P-12 byly provedeny dle vztahů uvedených v kapitole 4.0.0 s použitím hodnot uvedených v tabulce 2 a charakteristik mateřské hvězdy, viz tab. 3.

Povrchová teplota mateřské hvězdy [K]	4990
Hmotnost mateřské hvězdy [M_{SUN}]	0,842 +/- 0,042
Poloměr mateřské hvězdy [R_{SUN}]	0,82 +/- 0,048

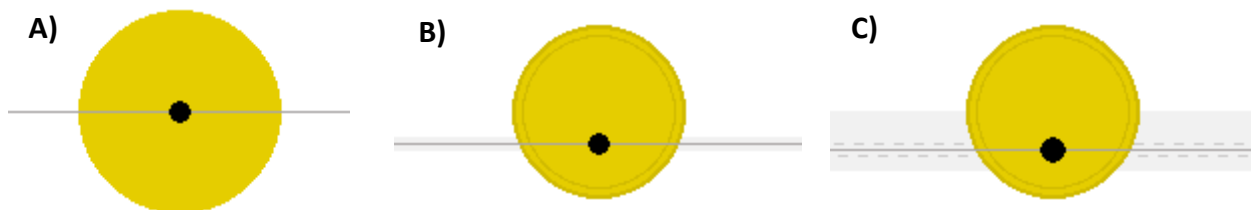
Tab. 3: Základní charakteristiky hvězdy HAT-P-19

Ze získaných dat byly vypočítány základní charakteristiky exoplanety HAT-P-19 b, ty byly následně porovnány s hodnotami určenými modelem, viz tab. 4.

	Katalogové údaje	Změřené parametry
Poloměr planety [R_{JUP}]	1,132 +/- 0,072	1,341 +/- 0,039
Perioda [den]	4,008778	4,013378
Velká poloosa [AU]	0,0466 +/- 0,0008	0,04747
Inklinace [°]	88,2 +/- 0,4	87,72 +/- 0,39
Koeficient HZ	-2,17124	-2,16872

Tab. 4: Tabulka srovnávající katalogové údaje se změřenými parametry; ve sloupci katalogové údaje jsou kurzivou označeny hodnoty, které byly vypočteny s charakteristik tranzitu exoplanety HAT-P-19 b určených modelem.

Pomocí protokolů databáze Tresca byly poloměr planety a inklinace zanesena do schémat, viz obr. 20.

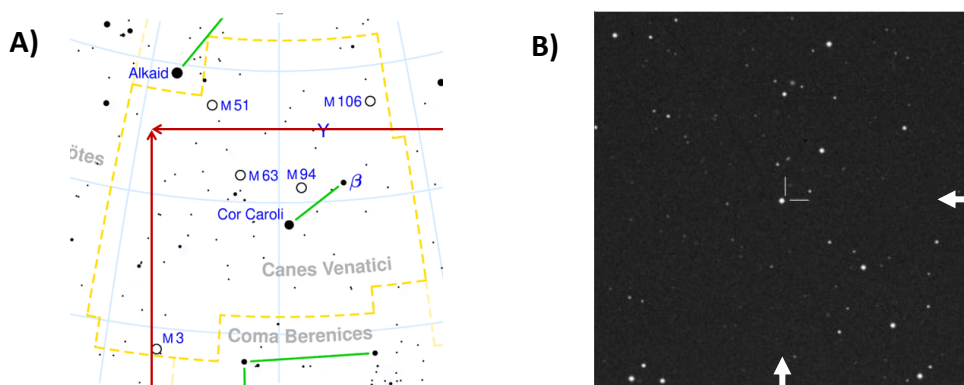


Obr. 20: Schémata geometrie tranzitu exoplanety HAT-P-19 b přes mateřskou hvězdu, hvězda i planeta jsou v měřítku; A) tranzit Jupiteru přes Slunce, $i=90^\circ$; B) modelem vytvořená geometrie tranzitu; C) naměřená geometrie tranzitu, přerušovaná čára vyjadřuje chybu měření

4.2.0 HAT-P-12 b

Exoplaneta obíhá kolem hvězdy HAT-P-12 v souhvězdí Honících psů, viz obr. 21, jedná se o hvězdu se zdánlivou hvězdnou velikostí 12,84 mag spektrálního typu¹⁾ K. Hvězdy tohoto typu jsou chladnější (3900-5200 K; svítí oranžovou barvou), ve vesmíru poměrně časté (až 8% zastoupení), jsou o polovinu menší než Slunce a mají asi pětinový zářivý výkon. Délka jejich života je 50 miliard let, díky tomu jsou vhodnými kandidáty pro hledání života na planetách, které je obíhají.

Exoplaneta HAT-P-12 b byla objevena v prosinci roku 2009 v rámci projektu HATNet²⁾. Jedná se o plynnou planetu, která má menší hustotu než Saturn, ten byl do objevení této planety planetou s nejnižší známou hustotou.



Obr. 20: Mapy polohy hvězdy HAT-P-12; A) přibližné umístění hvězdy na mapě souhvězdí Honících psů; B) Detailní hvězdné pole s vyznačenou hvězdou HAT-P-12, převzato z [19]

¹⁾ Rozdělení hvězd na základě jejich spektrálních charakteristik.

²⁾ HATNet je americký program hledající exoplanety na základě pozorování jejich tranzitu.

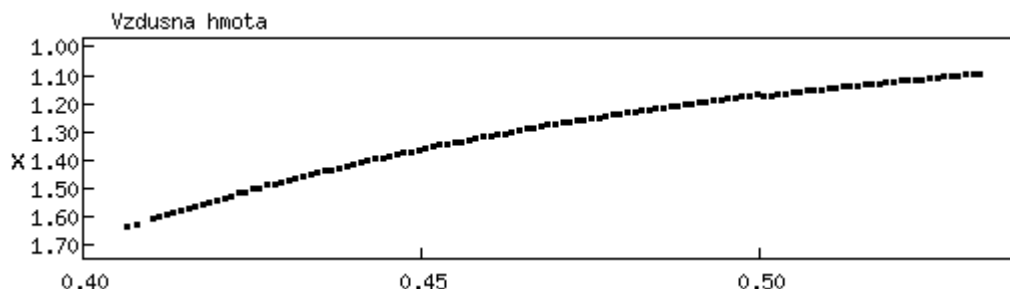
4.2.1 Pozorovací podmínky

Pozorování exoplanety HAT-P-12 b proběhlo dne 3. 2. 2012 z Vyškovské hvězdárny, viz tab. 5. Byla volena 90 sec expozice v R filtru. Noc nebyla na pozorování příliš vhodná, Měsíc byl blízko úplňku. Teplota nízko pod bodem mrazu (v průběhu noci až -25°C) sice nehrála do karet pozorovatelům, ale dovoľovala chladit chip CCD kamery na nižší teplotu a obraz netrpěl na vady obrazu způsobené chvěním atmosféry. Výsledná fotometrie byla nakonec poměrně přesná a to i přesto, že kvůli nepříznivým podmínkám nemohly být pořízeny flat-fieldy.

Observatoř	Hvězdárna Vyškov
Pozorovatelé	MV, BM, TH
Čas pozorování	2012-02-03; 21:46 UT 2011-02-04; 00:48 UT
Dalekohled	0,40 m
CCD kamera	CCD G-2
Teplota CCD kamery	-35°C
Filtr	R
Expozice	90 sec

Tab. 5: Tabulka se základními údaji o pozorování HAT-P-12 b z 3./4. 2. 2012 (pozorovatelé; MV-Michal Vyvlčka, BM-Barbora Mikulecká, TH-Tomáš Henych)

Hvězda HAT-P-12 se na začátku pozorování nacházela poblíž obzoru, v průběhu pozorování se však posunovala směrem k zenitu, čímž se zlepšovala kvalita snímaného obrazu, jelikož bylo nutné pozorovat přes užší vrstvu atmosféry, viz graf 6.

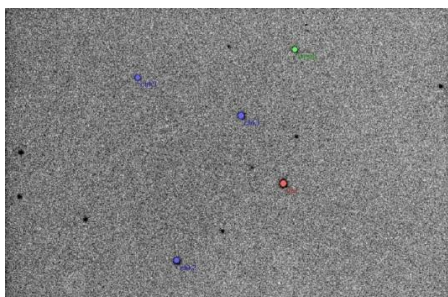


Graf 6: Křivka vzdušné hmoty z pozorování HAT-P-12 b z 3. 2. 2012, skrz kterou bylo nutné pozorovat; na ose x je mocnost vzdušné hmoty, kdy mocnost vzdušné hmoty v zenitu je rovna 1; na ose y je čas ve zkrácené podobě juliánského data

4.2.2 Fotometrie

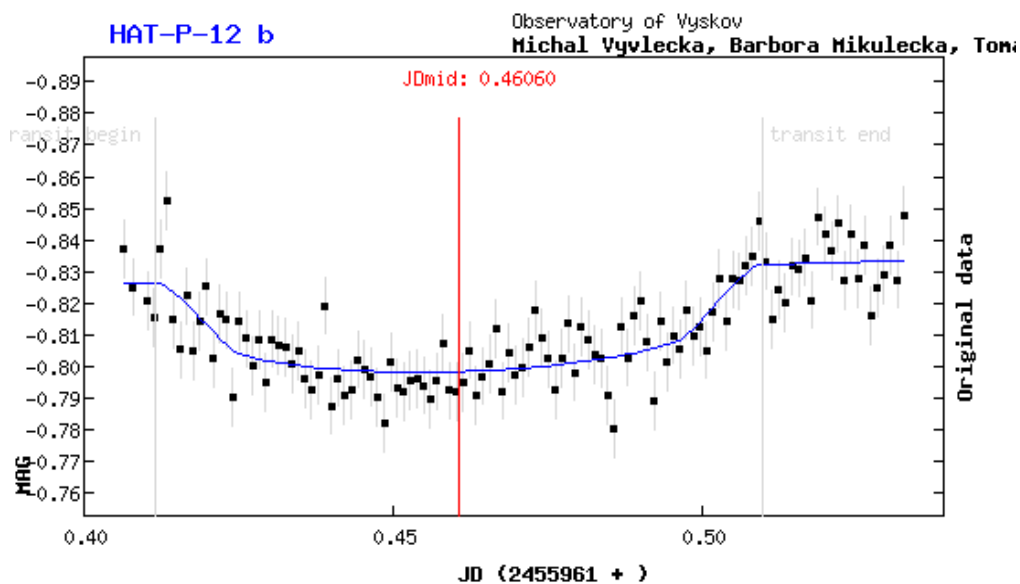
Fotometrické zpracování dat HAT-P-12 b z 3. 2. 2012 bylo provedeno v programu Iris a následně byly výsledky vystaveny v rámci databáze Tresca. Výsledky fotometrie jsou dostupné na WWW: <http://var2.astro.cz/tresca/transit-detail.php?id=1328359294>.

Dle pravidel byly vybrány srovnávací hvězdy, viz kapitola 3.4.3, a následně byla srovnání mezi těmito hvězdami a hvězdou HAT-P-12 vytvořena světelná křivka, viz obr. 21.



Obr. 21: Fotometrický snímek hvězdného pole pro fotometrii tranzitu exoplanety Hat-P-12 b, červeně je vyznačena proměnná hvězdy (Hat-P-12), modře a zeleně jsou vyznačeny čtyři hvězdy srovnávací.

Výsledná světelná křivka byla modelem vypočítanými hodnotami a byla stanovena chyba v jednotlivých bodech křivky, viz graf 7.



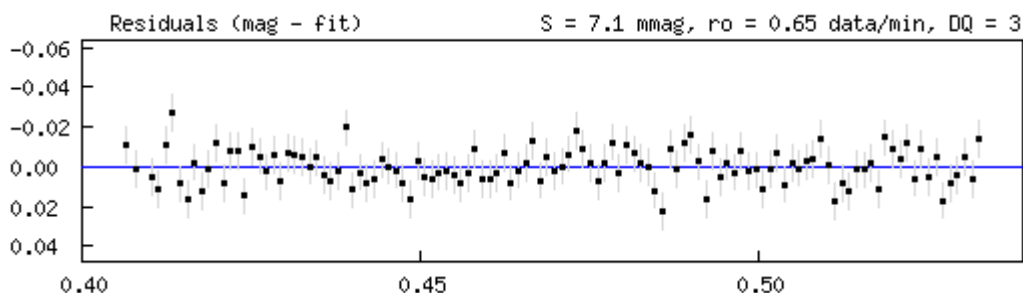
Graf 7: Světelná křivka HAT-P-12 b z 3. 2. 2012, křivka je naitována pomocí model vypočítaných dat, v grafu je vyznačena chyba jednotlivých měření; začátek, střed a konec tranzitu je vyznačen svislými čarami

Charakteristiky světelné křivky tranzitu exoplanety HAT-P-12 b (střed, začátek, konec a hloubka tranzitu) byly určeny pomocí nafitované křivky vyjádřené protokoly databáze Tresca, viz tab. 6.

Střed tranzitu JD	2455961.4606 +/- 0.00134
Střed tranzitu	2012-02-03 23:03:15 UT
Délka tranzitu [min]	141.7 +/- 4.4
Hloubka poklesu [mag]	0.0309 +/- 0.0026

Tab. 6: tabulka charakteristik světelné křivky tranzitu HAT-P-12 b z 3. 2. 2012 s uvedenou chybou měření

Chyba fotometrie tranzitu HAT-P-12 b z 3. 2. 2012 byla stanovena pomocí rozdílu mezi naměřenou světelnou křivkou a křivkou určenou modelem, viz graf 8. Přesnost fotometrie je zobrazena v diagramech srovnávajících hodnoty vybraných veličin, získané ze zpracování naměřené světelné křivky, s jinými pozorovateli a modelovými hodnotami, viz příloha č. 2; *Diagramy určující přesnost fotometrického měření (str. 59).*



Graf 8: Graf rezidui mezi křivkou určenou modelem (modrá přímka) a naměřenou světelnou křivkou tranzitu HAT-P-12 b z 3. 2. 2012 (černé body), pokud naměřená křivka odpovídá v daném bodě modelové, pak tento bod leží na modré přímce.

4.2.3 Určení parametrů extrasolárního systému

Výpočty parametrů extrasolárního systému HAT-P-12 byly provedeny dle vztahů uvedených v kapitole 4.0.0 s použitím hodnot uvedených v tabulce 6 a charakteristik mateřské hvězdy, viz tab. 7.

Povrchová teplota mateřské hvězdy [K]	4650
Hmotnost mateřské hvězdy [M_{SUN}]	0,73 +/- 0,02
Poloměr mateřské hvězdy [R_{SUN}]	0,7 +/- 0,005

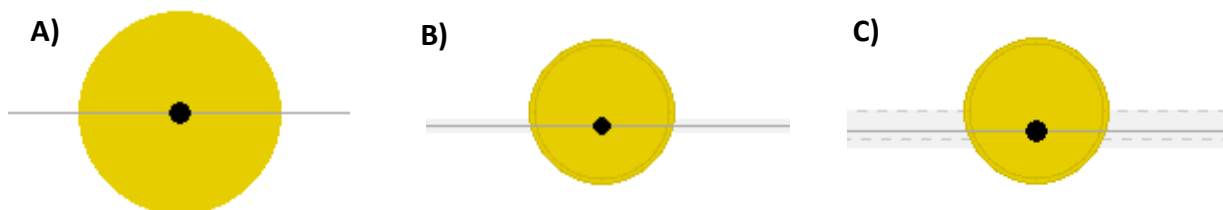
Tab. 7: Základní charakteristiky hvězdy HAT-P-12

Ze získaných dat byly vypočítány základní charakteristiky exoplanety HAT-P-12 b, ty byly následně porovnány s hodnotami určenými modelem, viz tab. 8.

	Katalogové údaje	Změřené parametry
Poloměr planety [R_{JUP}]	0,959 +/- 0,029	1.145 +/- 0,048
Perioda [den]	3,2130598	3,2117598
Velká poloosa [AU]	0,0384 +/- 0,0003	0,03836
Inklinace [°]	89 +/- 0,4	88.59 +/- 0,9
Koeficient HZ	-2,12984	-2,12999

Tab. 8: Tabulka srovnávající katalogové údaje se změřenými parametry; ve sloupci katalogové údaje jsou kurzivou označeny hodnoty, které byly vypočteny s charakteristik tranzitu exoplanety HAT-P-12 b určených modelem.

Pomocí protokolů databáze Tresca byly poloměr planety a inklinace zanesena do schémat, viz obr. 22.

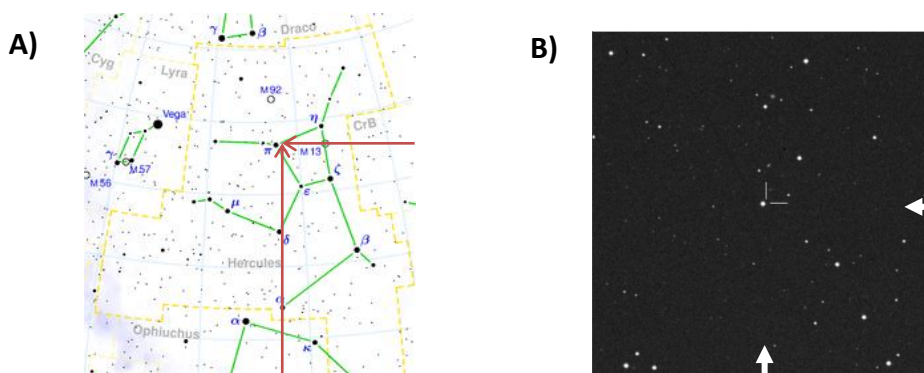


Obr. 22: Schémata geometrie tranzitu exoplanety HAT-P-12 b přes mateřskou hvězdu, hvězda i planeta jsou v měřítku; A) tranzit Jupiteru přes Slunce, $i=90^\circ$; B) modelem vytvořená geometrie tranzitu; C) naměřená geometrie tranzitu, přerušovaná čára vyjadřuje chybu měření

4.2.0 TrES-3 b

Exoplaneta obíhá kolem hvězdy TrES-3 v souhvězdí Herkula, viz obr. 23, jedná se o hvězdu se zdánlivou hvězdnou velikostí 12,4 mag spektrálního typu¹⁾ G. Stejného spektrálního typu je i Slunce, jedná se o hvězdy hlavní posloupnosti s povrchovou teplotou 5200-5900°K a odhadovanou délkou života asi 10 miliard let. Ve vesmíru jsou poměrně časté²⁾, tvoří asi 3,5% známých hvězd.

Exoplaneta TeES-3 b byla objevena v červnu roku 2007 v rámci projektu TrES³⁾. Jedná se o plynou planetu s průměrnou povrchovou teplotou 2000 K., která má tzv. inverzní atmosféru, tedy se zvětšující se vzdáleností od jádra planety teplota atmosféry roste.^[20]



Obr. 23: Mapy polohy hvězdy TrES-3 b; A) přibližné umístění hvězdy na mapě souhvězdí Herkula; B) Detailní hvězdné pole s vyznačenou hvězdou TrES-3 b, převzato z [19]

¹⁾ Rozdělení hvězd na základě jejich spektrálních charakteristik.

²⁾ I když ne tak časté, jako hvězdy spektrálního typu K, zmiňované v kapitolách 5.1.0 a 5.2.0.

³⁾ Projekt TrES (Trans-atlantic Exoplanet Survey) je mezinárodní projekt, která k hledání exoplanet používá tři desetimetrové dalekohledy umístěné na třech různých observatořích (Observatoř Palomar, Kalifornie; Lowellova observatoř Arizona, Kanárské ostrovy).^[21]

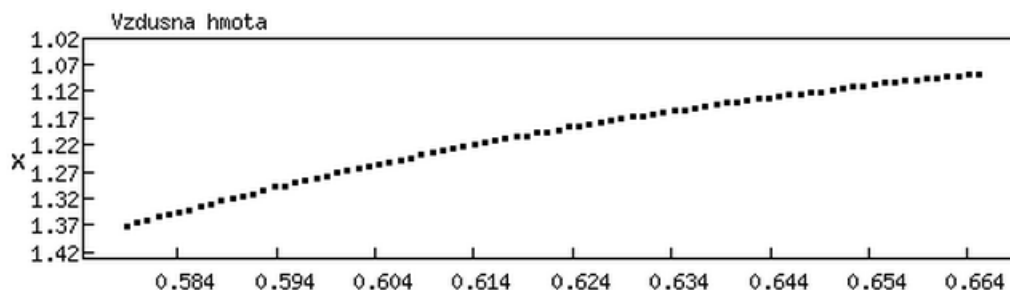
4.2.1 Pozorovací podmínky

Pozorování exoplanety TrES-3 b proběhlo dne 22. 2. 2012 z Vyškovské hvězdárny, viz tab. 9. Byla volena 90 sec expozice v R filtru. Zpočátku noci nebylo nejmenší naděje, že by se pozorování mohlo tento den uskutečnit. Kolem jedenácté se najednou vyjasnilo a krásné počasí vydrželo až do rozbřesku. Tato noc bylo pro pozorování vhodná především proto, že se Měsíc nacházel blízko novu a v průběhu pozorování tranzitu exoplanety TrES-3 b byl pod obzorem.

Observatoř	Hvězdárna Vyškov
Pozorovatelé	MV, BM, TH
Čas pozorování	2012-02-23; 01:55 UT 2011-02-23; 04:00 UT
Dalekohled	0,40 m
CCD kamera	CCD G-2
Teplota CCD kamery	-20 °C
Filtr	R
Expozice	90 sec

Tab. 9: Tabulka se základními údaji o pozorování TrES-3 b z 23. 2. 2012 (pozorovatelé; MV-Michal Vyvlečka, BM-Barbora Mikulecká, TH-Tomáš Henych)

Hvězda TrES-3 se na začátku pozorování nacházela poblíž obzoru, v průběhu pozorování se však posunovala směrem k zenitu, čímž se zlepšovala kvalita snímaného obrazu, jelikož bylo nutné pozorovat přes užší vrstvu atmosféry, viz graf 9.

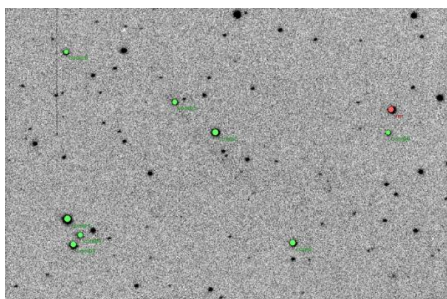


Graf 9: Křivka vzdušné hmoty z pozorování TrES-3 b z 23. 2. 2012, skrz kterou bylo nutné pozorovat; na ose x je mocnost vzdušné hmoty, kdy mocnost vzdušné hmoty v zenitu je rovna 1; na ose y je čas ve zkrácené podobě juliánského data

4.2.2 Fotometrie

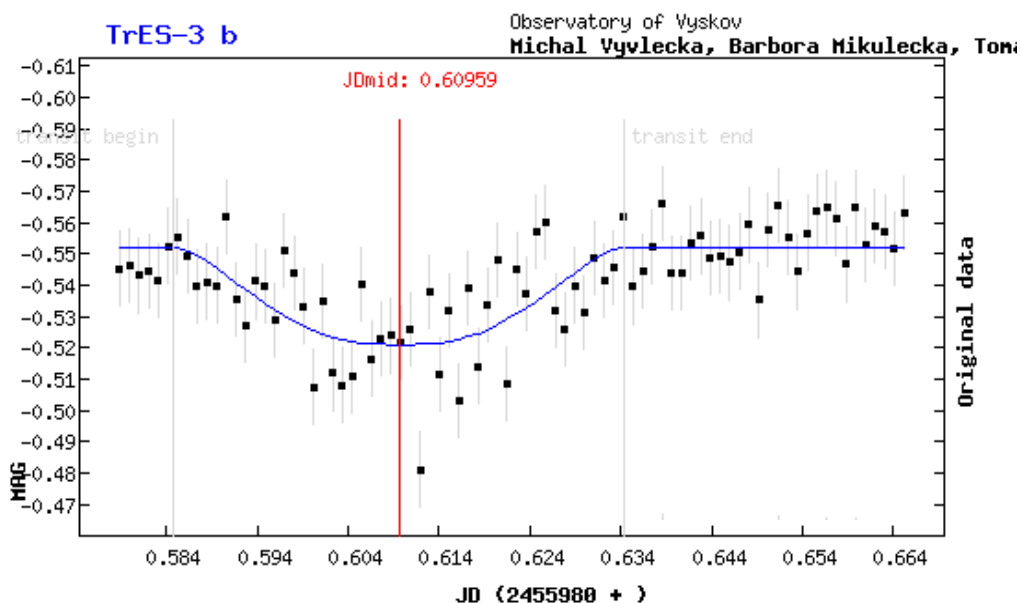
Fotometrické zpracování dat TrES-3 b z 23. 2. 2012 bylo provedeno v programu Iris a následně byly výsledky vystaveny v rámci databáze Tresca. Výsledky fotometrie jsou dostupné na WWW: <http://var2.astro.cz/tresca/transit-detail.php?id=1330445346>.

Dle pravidel byly vybrány srovnávací hvězdy, viz kapitola 3.4.3, a následně byla srovnání mezi těmito hvězdami a hvězdou TrES-3 b vytvořena světelná křivka, viz obr. 24.



Obr. 24: Fotometrický snímek hvězdného pole pro fotometrii tranzitu exoplanety TrES-3 b, červeně je vyznačena proměnná hvězdy (TrES-3 b), zeleně je vyznačeno osm hvězd srovnávacích.

Výsledná světelná křivka byla modelem vypočítanými hodnotami a byla stanovena chyba v jednotlivých bodech křivky, viz graf 10.



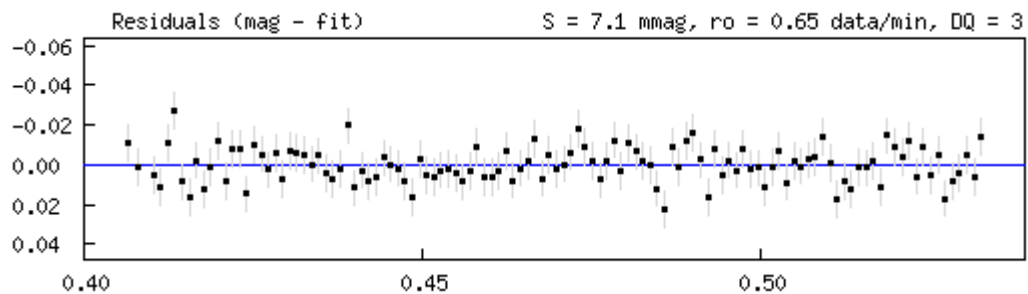
Graf 10: Světelná křivka TrES-3 b z 23. 2. 2012, křivka je naitována pomocí model vypočítaných dat, v grafu je vyznačena chyba jednotlivých měření; začátek, střed a konec tranzitu je vyznačen svislými čarami

Charakteristiky světelné křivky tranzitu exoplanety TrES-3 b (střed, začátek, konec a hloubka tranzitu) byly určeny pomocí nafitované křivky vyjádřené protokoly databáze Tresca, viz tab. 10.

Střed tranzitu JD	2455980.60959 +/- 0.00119
Střed tranzitu	2012-02-23 02:37:48 UT
Délka tranzitu [min]	71.4 +/- 6.4
Hloubka poklesu [mag]	0.0312 +/- 0.0036

Tab. 10: tabulka charakteristik světelné křivky tranzitu TrES-3 b z 23. 2. 2012 s uvedenou chybou měření

Chyba fotometrie tranzitu TrES-3 b z 23. 2. 2012 byla stanovena pomocí rozdílu mezi naměřenou světelnou křivkou a křivkou určenou modelem, viz graf 11. Přesnost fotometrie je zobrazena v diagramech srovnávajících hodnoty vybraných veličin, získané ze zpracování naměřené světelné křivky, s jinými pozorovateli a modelovými hodnotami, viz příloha č. 2; *Diagramy určující přesnost fotometrického měření (str. 60).*



Graf 11: Graf rezidui mezi křivkou určenou modelem (modrá přímka) a naměřenou světelnou křivkou tranzitu TrES-3 b z 23. 2. 2012 (černé body), pokud naměřená křivka odpovídá v daném bodě modelové, pak tento bod leží na modré přímce.

4.2.3 Určení parametrů extrasolárního systému

Výpočty parametrů extrasolárního systému TrES-3 b byly provedeny dle vztahů uvedených v kapitole 4.0.0 s použitím hodnot uvedených v tabulce 10 a charakteristik mateřské hvězdy, viz tab. 11.

Povrchová teplota mateřské hvězdy [K]	5720
Hmotnost mateřské hvězdy [M_{SUN}]	0,924 +/- 0,02
Poloměr mateřské hvězdy [R_{SUN}]	0,813 +/- 0,01

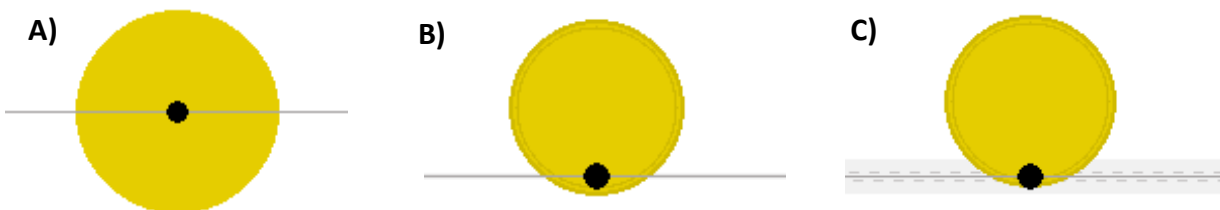
Tab. 11: Základní charakteristiky hvězdy TrES-3

Ze získaných dat byly vypočítány základní charakteristiky exoplanety TrES-3 b, ty byly následně porovnány s hodnotami určenými modelem, viz tab. 12.

	Katalogové údaje	Změřené parametry
Poloměr planety [R_{JUP}]	1,305 +/- 0,09	1,398 +/- 0,076
Perioda [den]	1,30618608	1,30499608
Velká poloosa [AU]	0,0226	0,0227652
Inklinace [°]	82,15 +/- 0,21	81,16 +/- 0,5
Koeficient HZ	-2,3190764	-2,3186804

Tab. 12: Tabulka srovnávající katalogové údaje se změřenými parametry; ve sloupci katalogové údaje jsou kurzivou označeny hodnoty, které byly vypočteny s charakteristik tranzitu exoplanety TrES-3 b určených modelem.

Pomocí protokolů databáze Tresca byly poloměr planety a inklinace zanesena do schémat, viz obr. 22.



Obr. 25: Schémata geometrie tranzitu exoplanety TrES-3 b přes mateřskou hvězdu, hvězda i planeta jsou v měřítku; A) tranzit Jupiteru přes Slunce, $i=90^\circ$; B) modelem vytvořená geometrie tranzitu; C) naměřená geometrie tranzitu, přerušovaná čára vyjadřuje chybu měření

ZÁVĚR

V průběhu této práce byly pomocí CCD fotometrie naměřeny tři exoplanetární tranzity, konkrétně se jednalo o tranzity exoplanet HAT-P-19 b, HAT-P-12 b a TrES-3 b. Tyto tři tranzity byly snímány v R filtru. Exoplaneta HAT-P-19 b byla pozorována z Monte Boö observatory v Brně, na jejích datech je patrný vliv světelného znečištění na kvalitu výsledné fotometrie, proto se získané parametry extrasolárního systému mohou zdát méně přesné, než data exoplanet HAT-P-12 b a TrES-3 b. Ty byly měřeny z hvězdárny ve Vyškově, která je kousek za městem a je tam tedy o poznání větší tma.

I přes mnohdy ne příliš příznivé podmínky, byla u všech naměřených tranzitů exoplanet provedena poměrně přesná fotometrie. Což vyplývá s porovnání charakteristik určených světelných křivek s charakteristikami světelných křivek jiných pozorovatelů a modelových dat.

V rámci této práce byl vytvořen „Protokol pro výpočty ze světelných křivek tranzitů exoplanet“. Použití tohoto protokolu v praxi se v průběhu práce velice osvědčilo, ukázalo se, že jeho požitím, lze ušetřit spoustu času. Také bylo provedeno porovnání parametrů pozorovaných exoplanet vypočítaných protokolem a parametrů určených protokoly databáze Tresca nebo vyhledaných v katalogu (určených modelem). Bylo zjištěno, že data určená protokolem vytvořeným v rámci této práce se takřka úplně shodují s daty modelovými i daty vypočítanými profesionálními protokoly. Navíc tento protokol shrnuje výpočty všech parametrů extrasolárních systémů, které lze určit ze světelné křivky tranzitu exoplanety. Tuto vlastnost všechny dostupné profesionální protokoly postrádají, stejně jako schopnost komplexní informovanosti uživatele o datech modelových.

V práci bylo použito nového vztahu pro výpočet koeficientu zóny života. O jeho výpovědní hodnotě můžeme však dnes jen spekulovat, jelikož jeho pravdomlupnost nejsme s dnešními prostředky schopni ověřit, na rozdíl od zbylých vztahů uvedených v této práci.

Tato práce ukázala možnosti CCD fotometrie tranzitů exoplanet jako schopné metody pro určení některých parametrů extrasolárních systémů. Pomocí vytvořeného protokolu zjednodušila výpočty těchto parametrů ze světelné křivky daného tranzitu a zamyslela se i nad možnostmi nového vztahu pro výpočet koeficientu zóny života. Jehož reprodukovatelnost, díky nedostatku podkladů i na měřených dat, zhodnotila jako nedůvěryhodnou.

Naměřené světelné křivky v rámci této práce byly uveřejněny jak v databázi Tresca, tak v Exoplanet Transit Database. Čímž bylo jistou měrou přispěno k upřesnění poznatků, které dnes o těchto extrasolárních systémech máme.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Exoplaneta. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 19. 4. 2006, last modified on 19. 12. 2011 [cit. 2011-12-28]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Exoplaneta>>.
- [2] ABZ.cz: slovník cizích slov: Pojem astrometrie. [online]. [cit. 2011-12-28]. Dostupné z WWW: <<http://slovník-cizich-slov.abz.cz/web.php/slovo/astrometrie>>.
- [3] Barnardova šipka. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 14. 8. 2011, last modified on 3. 8. 2005 [cit. 2011-12-28]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Barnardova_%C5%A1ipka>.
- [4] Žlutý trpaslík. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 17. 5. 2010, last modified on 19. 12. 2011 [cit. 2011-12-28]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BDlut%C3%BD_trpasl%C3%ADk>.
- [5] HD 209458: A Transiting Hot Jupiter. [online]. [cit. 2011-12-28]. Dostupné z WWW: <<http://obswww.unige.ch/exoplanets/hd209458.html>>.
- [6] Exoplanety.cz: Kosmický dalekohled Kepler. [online]. [cit. 2011-12-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.exoplanety.cz/exoplanety/kepler/>>.
- [7] The Extrasolar Planets Encyclopaedia: Interactive Extra-solar Planets Catalog. [online]. [cit. 2011-12-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.exoplanet.eu/catalog-transit.php>>.
- [8] Databáze tranzitujících exoplanet: Stanislav Poddaný, Luboš Brát, Ondřej Pejcha. *Aldebaran bulletin* [online]. 2009, 7(5) [cit. 2011-12-29]. Dostupné z WWW: <http://www.aldebaran.cz/bulletin/2009_05_etd.php>.
- [9] Astronomia, astronomie pro každého: Hvězdy. [online]. [cit. 2011-12-29]. Dostupné z WWW: <<http://astronomia.zcu.cz/hvezdy/charakteristika/2-hvezdna-velikost>>.
- [10] Moravské přístroje: CCD kamery pro astronomii. [online]. [cit. 2011-12-29]. Dostupné z WWW: <<http://ccd.mii.cz/art?id=356>>.
- [11] SBIG: Astronomical instruments . [online]. [cit. 2011-12-30]. Dostupné z WWW: <<http://www.sbig.com/>>.

[12] Charge-coupled device. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 13. 4. 2006, last modified on 8. 12. 2011 [cit. 2011-12-30]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Charge-coupled_device>.

[13] SCHILD, R. E.: CCD photometry of M67 stars useful as BVRI standards. ročník 95, Prosinec 1983: str. 1021.

[14] Sekce pro děti a mládež, česká astronomická společnost: 4. Stručně o dalekohledech a nakupování. [online]. [cit. 2012-01-01]. Dostupné z WWW: <<http://axis.astro.cz/astro/mladez2.astro.cz/?p=64>> .

[15] Sekce proměnných hvězd a exoplanet České astronomické společnosti: TRESKA. [online]. [cit. 2012-01-08]. Dostupné z WWW: <<http://var2.astro.cz/tresca/index.php>> .

[16] Juliánské datum. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 11.2. 2006, last modified on 13.10.2011 [cit. 2012-01-07]. Dostupné z WWW: < http://cs.wikipedia.org/wiki/Juli%C3%A1nsk%C3%A9_datum>.

[17] TRNKA, Jaroslav. Základní principy a metody fotometrie. In: [online]. Dostupné z WWW: <<http://www.astrovm.cz/userfiles/file/projekty/kosoap/ph-principy-fotometrie.pdf>>

[18] Habitable_zone: Recent breakthroughs: Super-Earths and Earth-sized planets. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2004-10-16, 2012-1-25 [cit. 2012-01-29]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Habitable_zone>.

[19] ETD - Exoplanet Transit Database: HAT-P-19 b (A). [online]. [cit. 2012-02-08]. Dostupné z WWW: <http://var2.astro.cz/ETD/predict_detail.php?STARNAME=HAT-P-19&PLANET=b&PER=&M> .

[20] Výzkum atmosfér exoplanet: Země – vesmír 1:1: TrES-3b. *Exoplanety.cz* [online]. 2009-01-26 [cit. 2012-03-02]. Dostupné z WWW: <<http://www.exoplanety.cz/2009/01/vyzkum-atmosfer-exoplanet/>>.

[21] Trans-Atlantic Exoplanet Survey. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2009-04-23, 2010-09-04 [cit. 2012-03-02]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Trans-Atlantic_Exoplanet_Survey>.

PŘÍLOHY

Seznam příloh práce „Fotometrická měření tranzitů exoplanet“

- **Příloha č. 1;** Návod k „Protokol pro výpočty ze světelných křivek tranzitů exoplanet“ (str. 54-56)
- **Příloha č. 2;** Diagramy určující přesnost fotometrického měření (str. 57-60)
- **Příloha č. 3;** Protokol pro výpočty ze světelných křivek tranzitů exoplanet (*příloha k této práci přiložena v elektronické podobě*)

Příloha č. 1; Návod k „Protokol pro výpočty ze světelných křivek tranzitů exoplanet“

Protokol pro výpočty ze světelných křivek tranzitů exoplanet slouží k závěrečnému zpracování fotometrických dat tranzitu exoplanety. Kombinuje účinné vyhledávání v aktuální databázi¹⁾ tranzitujících exoplanet se zavedenými vztahy²⁾ pro výpočty ze světelné křivky.

Tento protokol byl vytvořen v Microsoft Office Excel 2010. Díky notoricky známému pracovnímu prostředí tohoto tabulkového editoru a zadaným vzorcům není práce s tímto protokolem vůbec složitá.

PROTOKOL PRO VÝPOČTY ZE SVĚTELNÝCH KŘIVEK TRANZITŮ EXOPLANET

1 **Název exoplanety** TrES-3 b

2 *Tyto hodnoty je nutné doplnit z naměřené světelné křivky.*

CHARAKTERISTIKY SVĚTELNÉ KŘIVKY TRANZITU EXOPLANETY		TrES-3 b
Délka tranzitu [min]		71,4
Hloubka poklesu [mag]		0,0312
ΔC [den]		-0,00119

Tento protokol vznikl v rámci mé dlouhodobé maturitní práce "Fotometrická měření tranzitu exoplanet", kterou jsem vypracoval jakožto student 4. ročníku Přírodovědného lycea na SPŠ Otrokovice. Protokol slouží pro výpočty ze světelných křivek tranzitů exoplanet, podrobný návod je uveden v příloze č. 1 mé dlouhodobé maturitní práce.

Michal Vyvlečka
 Přírodovědné lyceum
 SPŠ Otrokovice; 2011/2012
 michal.vyvlecka@gmail.com

Modelem určené hodnoty byly převzaty z <http://exoplanet.eu/catalog-transit.php>

3 **CHARAKTERISTIKA EXOPLANETY** TrES-3 b

	Modelem určené hodnoty	Hodnoty vypočtené ze světelné křivky
Poloměr [R _J]	1,305	1,398040123
Perioda [den]	1,30618608	1,30499608
Velká poloosa [AU]	0,0226	0,022765198
Inklinace [°]	82,15	81,11506938
Zóna života	Hzd	-2,319076407
	ri [AU]	0,572829251
	r0 [AU]	1,407093662

4 **Charakteristiky hvězdy** TrES-3

	Modelem určené hodnoty
Povrchová teplota [K]	5720
Spektrální typ	G
Hmotnost [M _{SUN}]	0,924
Poloměr [R _{SUN}]	0,813
Zářivý výkon [L _{SUN}]	0,633948316

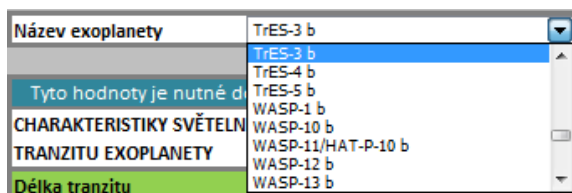
Grafické rozložení protokolu pro výpočty ze světelných křivek tranzitů exoplanet

¹⁾Databáze tranzitujících exoplanet byla přejata z WWW <http://exoplanet.eu/catalog-transit.php> a je aktuální k 28. 2. 2012.

²⁾Protokol využívá k výpočtům fyzikálních vztahů uvedených v kapitole 3.0.0.

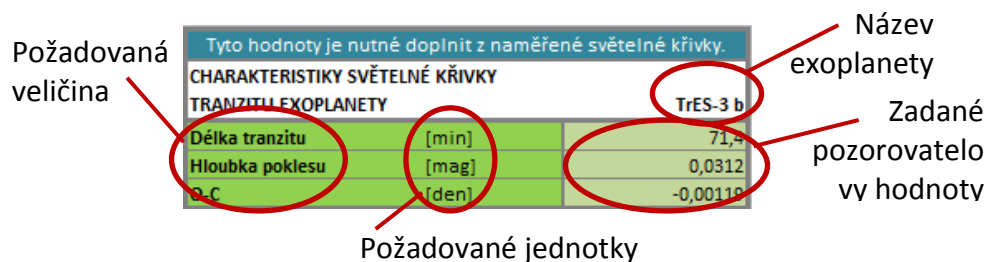
Protokol pro výpočty ze světelných křivek tranzitů exoplanet se skládá ze čtyř pracovních panelů:

- **1) Panel pro výběr pozorované exoplanety;** jedná se o rezevíratelný seznam, ze kterého si uživatel vybere název exoplanety, jejíž data chce zpracovat. Protokol automaticky vygeneruje potřebná data ze skryté databáze a ty uživateli zobrazí v segmentech č. 3 a 4. Protokol dále tato data využívá v potřebných výpočtech.



Z rozevíratelného seznamu si uživatel pohodlně vybere exoplanetu, jejíž data chce dále zpracovat.

- **2) Panel pro zadání charakteristik světelné křivky;** je to jediný panel, do kterého uživatel zadává svá data. Konkrétně se jedná o délku tranzitu, hloubku poklesu a O-C. Před vepsáním požadovaných hodnot, je nutné fotometrii tranzitu nejdříve zpracovat v programu Iris¹⁾ a výslednou světelnou křivku popsat buďto pomocí protokolů databáze Tresca²⁾ nebo pomocí programu AVE³⁾. Je zde ale důležité si dávat pozor na rozdíl mezi desetinou čárnou a desetinou tečkou, zmíněné programy preferují tečku, ale Excel pracuje klasicky s desetinou čárkou.



¹⁾Více o programu Iris naleznete v kapitole 2.3.1 a o zpracování dat v tomto programu v kapitole 2.4.2.

²⁾Více o databázi Tresca naleznete v kapitole 2.3.2.

³⁾Více o programu AVE naleznete v kapitole 3.4.0.

- **3) Panel charakteristik exoplanety;** v tomto panelu se uživatel, po zadání požadovaných hodnot do panelu č. 2, zobrazí údaje o pozorované exoplanetě (poloměr, perioda, velká poloosa, inklinace a charakteristika zóny života). Hodnoty vypočtené z pozorovatelových dat lze vzájemně srovnat s vygenerovanými modelovými daty. Ty jsou uvedeny ve vedlejším sloupci.

CHARAKTERISTIKA EXOPLANETY		TrES-3 b	
		Modelem určené hodnoty	Hodnoty vypočtené ze světelné křivky
Poloměr	[R _J]	1,305	1,398040123
Perioda	[den]	1,30618608	1,30499608
Velká poloosa	[AU]	0,0226	0,022765198
Inklinace	[°]	82,15	81,11506938
Zóna života	Hzd	-2,319076407	-2,318680374
	ri [AU]	0,572829261	
	r0 [AU]	1,407093662	

Název exoplanety

Hodnoty vypočtené ze zadaných dat

Charakteristiky zobrazovaných veličin

Hodnoty určené modelem

- **4) Panel charakteristik mateřské hvězdy;** tento panel obsahuje informace o mateřské hvězdě. Tyto hodnoty, charakterizující mateřskou hvězdu, jsou určeny modelem a jsou využívány ve většině výpočtů v panelu č. 3.

Charakteristiky hvězdy		TrES-3	
		Modelem určené hodnoty	
Povrchová teplota	[K]	5728	
Spektrální typ		G	
Hmotnost	[M _{SUN}]	0,924	
Poloměr	[R _{SUN}]	0,813	
Zářivý výkon	[L _{SUN}]	0,633948316	

Název mateřské hvězdy

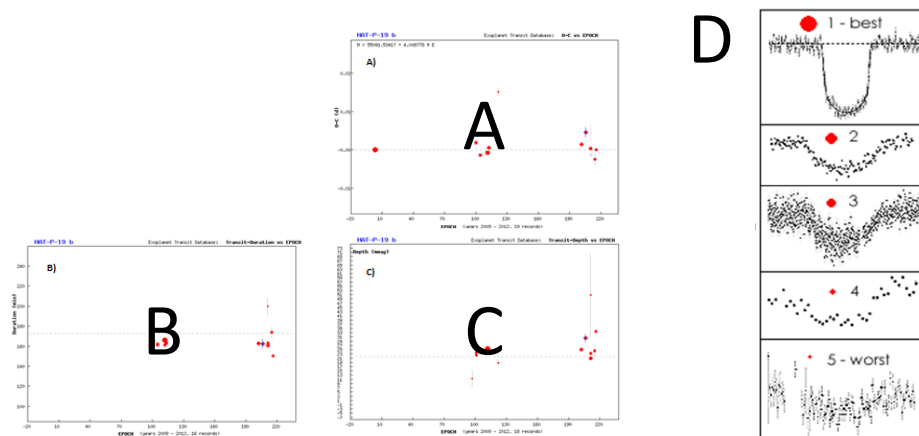
Hodnoty určené modelem

Charakteristiky zobrazovaných veličin

Při zavírání Excelového sešitu, v němž protokol pracuje, je dobré neukládat změny v něm provedené. Mohlo by totiž dojít k poškození zavedených vztahů a databáze exoplanet, které, i přesto že pracují skrytě, se mohou poškodit.

Příloha č. 2; Diagramy určující přesnost fotometrického měření

V příloze č. 2 jsou obsaženy diagramy určující přesnost jednotlivých fotometrických měření tranzitů exoplanet. Tyto grafy srovnávají tři základní charakteristiky získané světelné křivky (O-C, délka tranzitů a hloubka poklesu) s daty jiných pozorovatelů a s daty určenými modelem.



Na ose **x** je u všech těchto tří diagramů uveden čas (epocha) kdy bylo měření provedeno. Jednotlivé typy diagramů se od sebe liší jen tím, co je zaneseno na ose **y**:

- **A) O-C diagram;** na ose **y** je rozdíl pozorovaného času středu tranzitu (**O**bserved) a modele předpovězeného času, kdy má nastat střed tranzitu (**C**omputed) ve dnech.
- **B) Diagram délky tranzitu;** na ose **y** je délka tranzitu v minutách.
- **C) Diagram hloubky poklesu;** na ose **y** je změna jasnosti mateřské hvězdy zapříčiněná tranzitem v magnitudách.

Hodnoty pro světelné křivky jednotlivých pozorovatelů jsou v diagramech znázorněny červenými značkami, má měření jsou vyznačena červenou značkou s modrým obrysem.

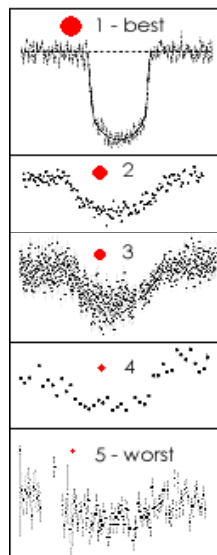
- **D) Kvalita světelné křivky;** kvalita světelné křivky je dána velikostí značky (největší značka, číslo 1- nejkvalitnější data; nejmenší značka, číslo 5- nejméně vhodná data)

Hodnota určená modelem je v diagramech vyznačena přerušovanou čarou (body které jsou jí nejbližší, tedy prezentují nejpřesnější fotometrická měření). Diagramy byly zpracovány pomocí Exoplanet transit database <http://var2.astro.cz/ETD>.

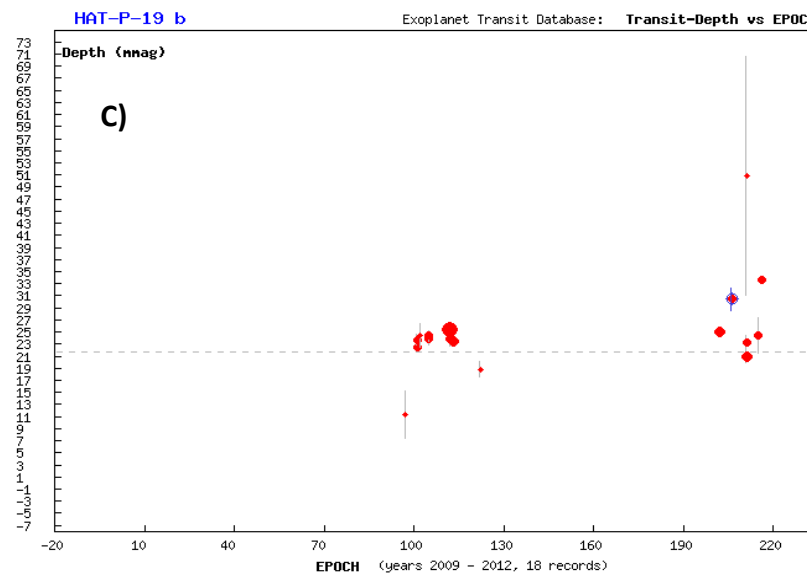
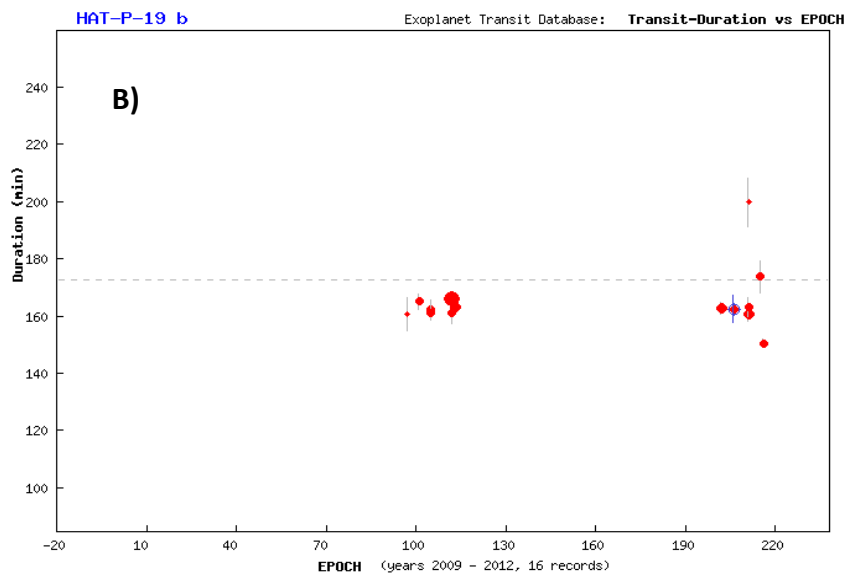
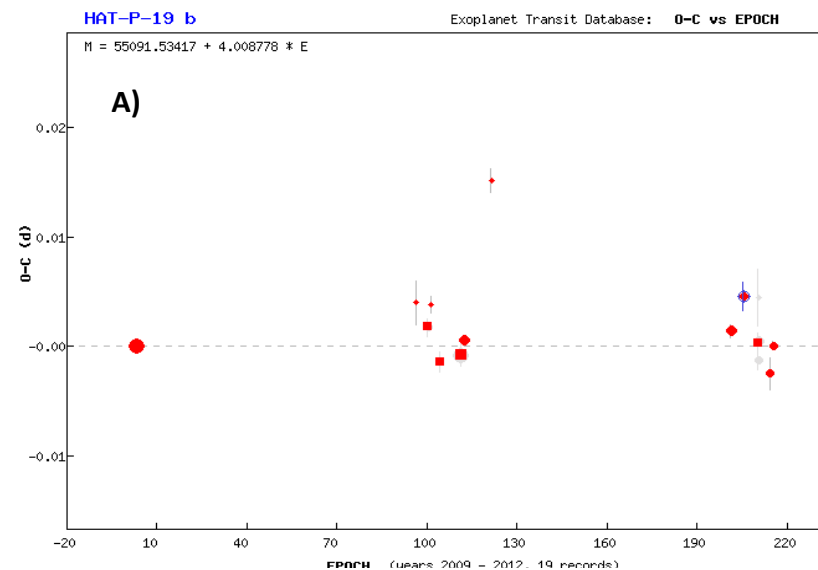
HAT-P-19 b

Diagramy určující přesnost fotometrického měření pro tranzit exoplanety HAT-P-19 b z 5. 12. 2011.

- A) O-C diagram
- B) Diagram délky tranzitu
- C) Diagram hloubky poklesu



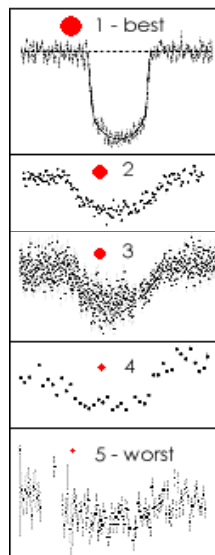
Legenda k velikosti značek



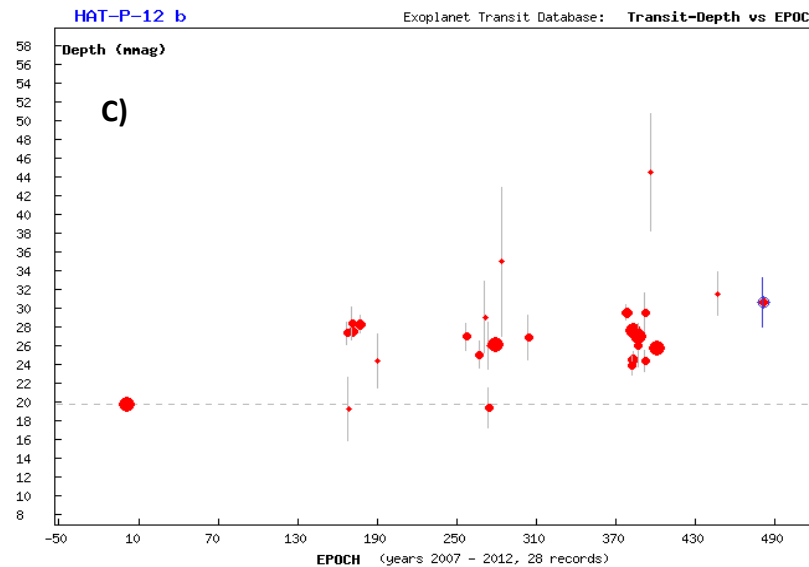
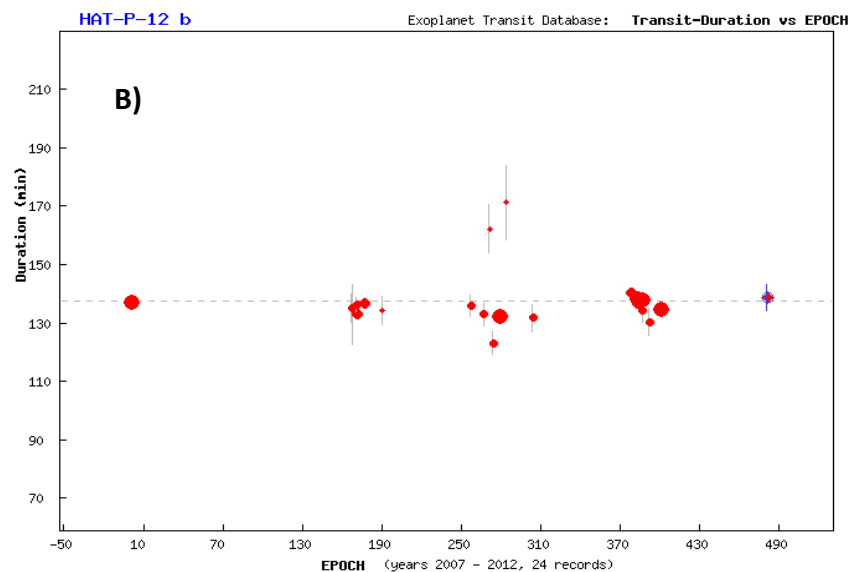
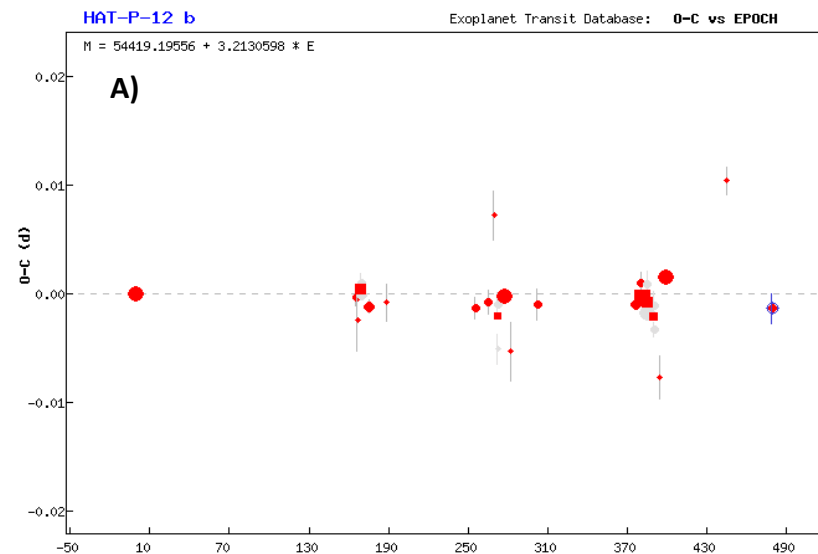
HAT-P-12 b

Diagramy určující přesnost fotometrického měření pro tranzit exoplanety HAT-P-12 b z 3. 2. 2012.

- A) O-C diagram
- B) Diagram délky tranzitu
- C) Diagram hloubky poklesu



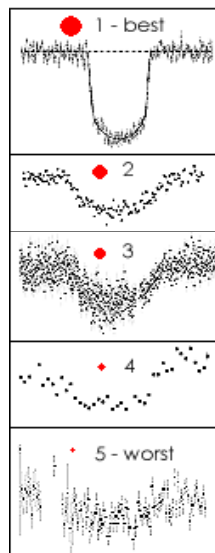
Legenda k velikosti značek



TrES-3 b

Diagramy určující přesnost fotometrického měření pro tranzit exoplanety TrES-3 b z 22. 2. 2012.

- A) O-C diagram
- B) Diagram délky tranzitu
- C) Diagram hloubky poklesu



Legenda k velikosti značek

