

MASARYKOVA UNIVERZITA

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

CCD FOTOMETRIE EXOPLANET

TEREZA KREJČOVÁ



BRNO 2008

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracovala samostatně a podle pokynů vedoucího diplomové práce RNDr. Jana Janíka, Ph.D. a konzultanta RNDr. Miloslava Zejdy. Všechny prameny, ze kterých jsem čerpala, jsou uvedeny v kapitole Literatura.

V Brně dne

Podpis

Poděkování

V první řadě bych chtěla poděkovat vedoucímu své diplomové práce RNDr. Janu Janíkovi, Ph.D. a konzultantovi RNDr. Miloslavu Zejdovi za jejich velkou pomoc, čas a četné dobré rady, které mi věnovali po celou dobu vzniku této práce. Janu Janíkovi bych ráda poděkovala zvláště za zorganizování a pomoc při pozorování na Suhorské observatoři v Polsku a také za věcné připomínky ke stylistické stránce této práce. Miloslavu Zejdovi zase za jeho bohaté pozorovatelské i teoretické zkušenosti především z oblasti proměnných hvězd, které s tématem mé práce úzce souvisí, a o které se se mnou neváhal kdykoliv rozdělit.

Dále chci poděkovat doc. RNDr. Zdeňku Mikuláškoví, CSc. a Mgr Filipu Hrochovi, Ph.D. za věcnou diskuzi a rady k dílčím problémům této práce.

Velký dík patří Lucii Jílkové a Tomášovi Henychovi za pomoc při pozorování extrasolárních planet, obzvláště za získání dat z noci 14./15.6.2007, která přispěla nejenom k astronomické stránce této diplomové práce. Dále bych jim ráda poděkovala za jejich hodnotné připomínky k celému textu.

Některým lidem se děkuje jednorázově špatně, ale přesto děkuji té, která ví o určitých světelných jevech víc než ostatní.

Své sestře děkuji za přečtení této práce a za připomínky k mé slovní zásobě. Mým rodičům pak děkuji za to, že ji k přečtení mé práce donutili.

Anotace: CCD fotometrie exoplanet

Tato diplomová práce se zabývá studiem tranzitujících exoplanet. Tranzitující exoplanety jsou ty, u kterých můžeme nepřímo pozorovat jejich přechod přes mateřskou hvězdu. Pro tento účel jsem provedla CCD fotometrii několika exoplanetárních přechodů a z naměřených dat jsem určila některé důležité parametry extrasolárních systémů. Získaná data jsem také proložila teoretickým modelem světelné křivky.

Klíčová slova: extrasolární planeta, exoplanetární přechod, model světelné křivky, CCD fotometrie.

Annotation: CCD photometry of exoplanets

In this work I study transiting exoplanets. This group of exoplanets is interesting because of its unique orbital inclination, which is the reason why we can observe their transits. For this aim I photometrically observed several exoplanets. I used this data to determine some of the important parameters of extrasolar systems. The theoretical model was also made and was fit to the measured exoplanetary light curves.

Keywords: extrasolar planet, exoplanetary transit, light curve model, CCD photometry.

Nicméně mají mávátka, zelená a červená.
A jejich papež kouří trávu.
Svítá.

janis a fantom

Obsah

Úvod	7
1 Extrasolární planety	8
1.1 Stručná historie výzkumu	8
2 Exoplanetární přechody	12
2.1 Geometrie přechodů	12
2.2 Vlastnosti exoplanet	13
2.2.1 Tranzitující exoplanety	14
3 Modely světelných křivek	16
3.1 Geometrický model	16
3.2 Model s okrajovým ztemněním	19
4 Určování parametrů extrasolárních systémů	23
4.1 Poloměr planety	23
4.2 Střed přechodu a perioda	23
4.3 Velká poloosa	24
4.4 Inklinace	24
4.4.1 Délka trvání přechodu	24
5 Pozorování	26
5.1 XO-1 b	27
5.1.1 Fázová křivka	27
5.2 TrES-2	28
5.3 HD 189733 b	28
5.4 Hat-P-6 b	28
6 Výsledky	32
6.1 Parametry extrasolárních planet	32
6.1.1 XO-1 b	33

6.1.2	TrES-2	33
6.1.3	HD 189733 b	33
6.1.4	Hat-P-6 b	33
6.2	$O - C$ diagram	34
6.3	Aplikace modelů na naměřená data	34
Závěr		42
Literatura		44

Úvod

Při pohledu na noční oblohu neozbrojeným okem uvidíme mnoho různých objektů, exoplanetu však žádnou. Neuvidíme ji dokonce ani když si na pomoc vezmeme hodně velký dalekohled. Na vině je hlavně velký kontrast mezi hvězdou a planetou, která kolem ní obíhá. Exoplanety však přesto můžou o sobě dát vědět. Ať už svým působením na mateřskou hvězdu nebo třeba přechodem přes hvězdný disk.

V této práci jsem se zaměřila na skupinu tzv. tranzitujících exoplanet. Tyto objekty jsou zajímavé zejména sklonem své dráhy, který je příčinou toho, že můžeme nepřímo pozorovat přechod exoplanety přes hvězdný disk. Tedy jinými slovy zeslabení světelného signálu přicházejícího od mateřské hvězdy. Celý tento problém je velmi podobný pozorování proměnných hvězd. Jediný rozdíl je v tom, že kolem primární hvězdy neobíhá hvězda, nýbrž exoplaneta. K pozorování exoplanetárních přechodů se používá stejně jako u proměnných hvězd fotometrie. Pokles jasnosti je ale u exoplanetárních systémů velmi malý, a proto je potřeba pro pozorování zajistit, pokud možno, co nejlepší podmínky.

Práce je rozčleněna do šesti kapitol a zakončena závěrem. V první kapitole jsem se snažila nastínit některé důležité mezníky z historie exoplanetárního výzkumu. Druhá kapitola pojednává o samotných exoplanetárních přechodech, o podmínkách za kterých k přechodu může dojít a o základních vlastnostech této skupiny exoplanet. V třetí kapitole je popsáno modelování světelných křivek, konkrétně výpočet geometrického modelu a modelu s použitím okrajového ztemnění hvězdy. Další část se věnuje vztahům pro určování parametrů extrasolárních planet. Průběh samotného pozorování a naměřená data jsou popsány v kapitole páté, na kterou navazuje kapitola šestá s vypočtenými exoplanetárními parametry a proložením dat teoretickými modely. V závěru jsou shrnuty výsledky celého předchozího rozboru.

Kapitola 1

Extrasolární planety

Extrasolární planety nebo také zkráceně exoplanety jsou planety, které obíhají kolem jiných hvězd než je Slunce.

1.1 Stručná historie výzkumu

Z historického hlediska je výzkum extrasolárních planet velmi mladým odvětvím astrofyziky. Ráda bych se zde alespoň krátce zmínila o důležitých okamžicích objevování exoplanet.

Do začátku dvacátého století patřila otázka existence extrasolárních planet spíše filozofii. Na počátku minulého století však došlo k rychlému rozvoji pozorovacích technik a vznikají první práce zabývající se problematikou možného objevení extrasolárních planet, viz například Struve (1952).

Přestože existence planet u jiných hvězd nebyla přímo popírána, byla většina astrofyziků a astronomů ohledně možnosti jejich objevu spíše skeptická.

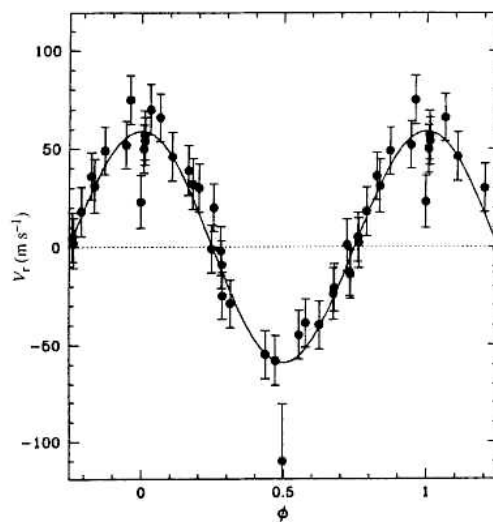
Za zmínku stojícím mezníkem je výzkum holandského astronoma Petera van de Kampa. Ten začal ve třicátých letech 20. století zkoumat astrometrickou metodou vlastní pohyb Barnardovy hvězdy. Po téměř třiceti letech měření oznámil v 60. letech objev nejprve jedné (van de Kamp 1963) a posléze druhé planety (van de Kamp 1969) obíhající Barnardovu hvězdu.

Už ve své době měla jeho interpretace napozorovaných dat řadu odpůrců, jako třeba Gatewood & Eichhorn (1973). Ke konci 20. století bylo k proměření vlastních pohybů Barnardovy hvězdy použito modernější techniky a domněnka o existenci dvou planet definitivně vyvrácena např. Benedict et al. (1999). I přesto, že astronom van de Kamp nemohl s přístroji své doby a danou metodou extrasolární planetu objevit, patří mu jisté průkopnické prvenství v tomto oboru astronomie.

Skutečné hledání exoplanet mohlo začít teprve poté, co došlo ke zlepšení přístrojové techniky, používané při astronomických pozorováních. V posledních desetiletích 20. století zaznamenala rozhodující pokrok spektroskopie, fotometrie, interferometrie a astrometrie.

Vůbec první objev extrasolární planety byl oznámen roku 1992, a to jinou metodou než jsou výše zmiňované a na nečekaném místě. Při měření přesné periody rotace pulzaru PSR 1257 +12 bylo zjištěno, že dochází k její změně. Z tohoto byl vyvozen závěr — kolem pulzaru obíhají dvě, ale pravděpodobně tři tělesa nehvězdného původu (Wolszczan & Frail 1992).

S objevem první exoplanety v pravém slova smyslu přišla roku 1995 skupina astronomů z Ženevské observatoře (Mayor & Queloz 1995). První planeta, nesoucí jméno 51 Peg b¹, byla objevena spektroskopicky, tedy pomocí metody měření změn radiální rychlosti hvězdy. První objevitelská křivka je vykreslena na obrázku 1.1. Převratný objev byl o to zajíma-

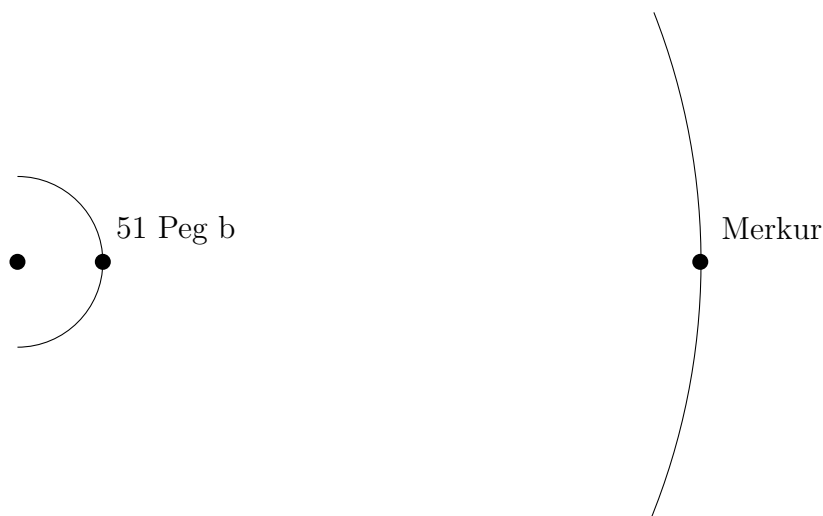


Obrázek 1.1: Objevitelská křivka popisující změnu radiální rychlosti hvězdy 51 Peg. Převzato z článku Mayor & Queloz (1995).

vější, že vlastnosti objevené planety se naprosto neshodovaly s vlastnostmi předpokládanými. Většina astrofyziků očekávala objev planet a planetárních systémů podobných sluneční soustavě. Planeta 51 Peg b je co do hmotnosti a rozměrů řádově podobná planetě Jupiter, ale svou mateřskou hvězdu obíhá ve vzdálenosti přibližně osmkrát menší, než obíhá planeta Merkur kolem Slunce, viz obrázek 1.2.

Dalším důležitým mezníkem byl objev prvního vícenásobného planetárního systému u hvězdy ν And z roku 1999. Objev nejprve jedné (Butler et al. 1997), a posléze druhé a třetí planety (Butler et al. 1999) potvrdil existenci jiných planetárních systémů opět naprosto odlišných od naší sluneční soustavy.

¹ První část jména je označení pro hvězdu, kolem které exoplaneta obíhá a písmeno b je samotné označení planety. Pokud kolem hvězdy obíhá více planet, označují se následujícími písmeny v abecedě — c, d atd.



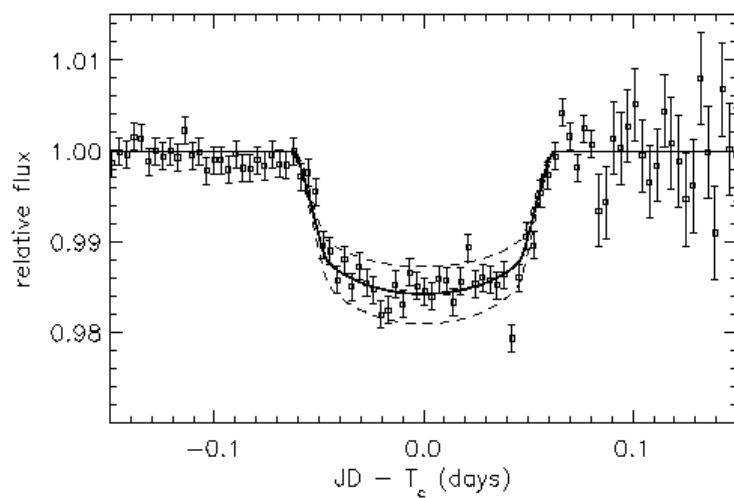
Obrázek 1.2: Srovnání oběžných vzdáleností planet 51 Peg b a Merkuru od mateřské hvězdy.

V roce 1999 byl napozorován první exoplanetární přechod (Charbonneau et al. 2000; Henry et al. 2000), tedy jev, kdy extrasolární planeta přechází přes disk mateřské hvězdy a celý systém je k pozorovateli natočen tak, že ten je schopen naměřit zeslabení jasnosti hvězdy způsobené exoplanetou. Přechod byl pozorován u hvězdy HD 209458, u které byla dříve měření změn radiálních rychlostí objevena extrasolární planeta HD 209458 b (Mazeh et al. 2000; Henry et al. 2000). Světelná křivka extrasolárního přechodu pro systém HD 209458 je na obrázku 1.3.

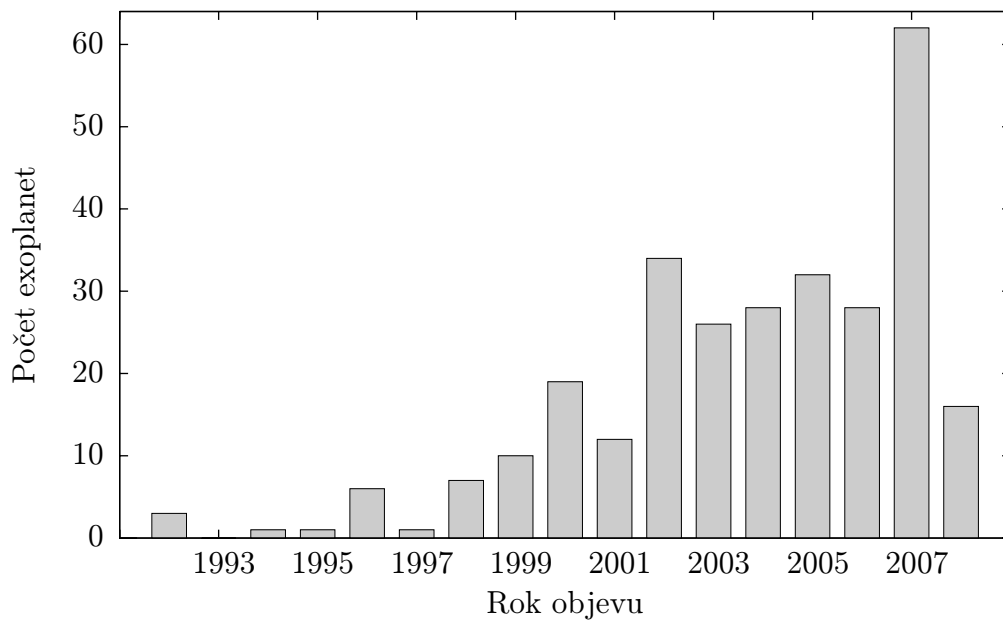
Objev exoplanety pomocí této metody už byl jen otázkou času. Roku 2002 byl oznámen objev planety OGLE-TR-56 b (Udalski et al. 2002b) a roku 2004 planety TrES-1, která byla jako první objevena malým dalekohledem s širokým zorným polem (Alonso 2004).

Nových exoplanet neustále přibývá, jak je dobře vidět z histogramu 1.4. V současné době se jejich počet blíží ke třem stům a stále narůstá, stejně jako efektivnost použitých metod objevu. Výzkum extrasolárních planet se tak stal plnohodnotným odvětvím astronomie a astrofyziky.

Tento krátký výlet do historie jistě nepokrývá všechny zajímavé okamžiky objevování exoplanet a už vůbec se nezabývá všemi používanými metodami. Zaměřuje se hlavně na nejdůležitější mezníky celého výzkumu s mírným důrazem na tranzitující exoplanety.



Obrázek 1.3: Křivka prvního exoplanetárního přechodu planety HD 209458 b. Převzato z Charbonneau et al. (2000).



Histogram 1.4: Počet objevených exoplanet v jednotlivých letech. Data převzata z [E2].

Kapitola 2

Exoplanetární přechody

Pozorování přechodů exoplanety přes mateřskou hvězdu je v současné době druhou nejúčinnější metodou detekce extrasolárních planet, a to hned po metodě měření změn radiálních rychlostí. Tímto způsobem bylo objeveno již více jak čtyři desítky exoplanet a jejich počet neustále narůstá. Jedním z důvodů je bezesporu nejen zvětšující se počet pozemských pozorovacích programů zabývajících se právě tímto problémem, např. OGLE (Udalski et al. 2002a), SuperWASP (Street et al. 2003), XO (McCullough et al. 2005), Hat (Bakos et al. 2002), ale i vesmírných misí, jako třeba COROT (Bordé et al. 2003) nebo Kepler (Borucki et al. 2003).

Důležitost této metody je nesporná. Poskytuje nám totiž nezbytné informace o vlastnostech exoplanetárního systému. Nejčastěji používanou metodou detekce exoplanet, tedy metodou měření změn radiálních rychlostí, můžeme zjistit pouze omezené množství informací, jako například spodní hranici hmotnosti exoplanety. Analýzou tranzitů extrasolárních planet je však možné získat velmi hodnotné veličiny — poloměr exoplanety a sklon její dráhy. Je nutno podotknout, že jak jedním tak druhým způsobem nelze získat veškeré informace o systému a je proto potřeba obě metody zkombinovat.

Ve své práci jsem se zaměřila na metodu druhou, a proto jsem některé charakteristiky mateřské hvězdy a exoplanety nebyla schopná zjistit. Převzala jsem proto potřebné charakteristiky z odborné literatury vždy s příslušnou citací.

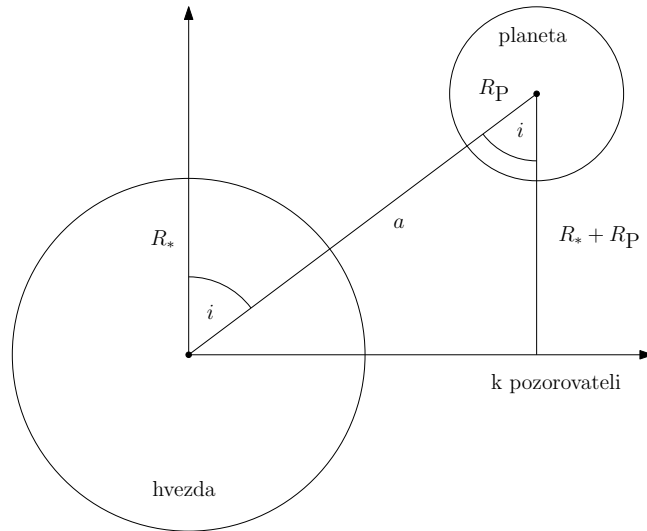
2.1 Geometrie přechodů

K exoplanetárním přechodům dochází v případě, kdy je k nám hvězda s planetou orientována takovým způsobem, že při pohledu ze Země planeta v určité fázi svého oběhu přechází přes hvězdný disk. Pozorovatel na Zemi pak v důsledku tohoto přechodu naměří zeslabení světelného signálu přicházejícího od mateřské hvězdy.

K tranzitu dojde pouze v případě splnění podmínky

$$a \cos i \leq R_p + R_*, \quad (2.1)$$

kde i je inklinace, tedy sklon oběžné dráhy exoplanety vzhledem k rovině kolmé na rovinu pozorování, a velká poloosa, R_* poloměr hvězdy a R_P poloměr planety. Podmínka je schematicky znázorněna na obrázku 2.1.

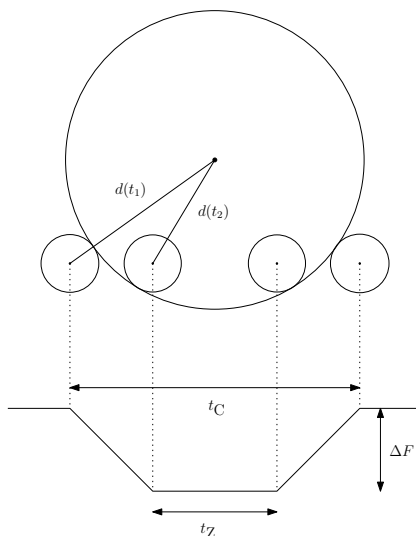


Obrázek 2.1: Předpoklad pozorování exoplanetárního tranzitu. R_* – poloměr hvězdy, R_P – poloměr planety, a – velká poloosa a i – inklinace planety.

Základní geometrie tranzitu je vyobrazena na obrázku 2.2. Vidíme zde schematický tvar světelné křivky způsobené exoplanetárním přechodem. Můžeme na něm sledovat vliv jednotlivých pozic planety při přechodu na tvar této křivky. Dále jsou zde vyznačeny veličiny, které můžeme získat přímo z naměřené křivky. Jsou to hloubka tranzitu ΔF , která určuje maximální změnu celkového pozorovaného toku záření přicházejícího od hvězdy, a doba trvání přechodu t_Z , což je čas mezi prvním a posledním kontaktem hvězdy a planety. Další veličinou je doba trvání centrální části přechodu t_C , což je úsek křivky odpovídající době, kdy se planeta celá promítá na disk hvězdy. U tvaru vyobrazené křivky předpokládáme, že disk hvězdy svítí na všech místech rovnoměrně.

2.2 Vlastnosti exoplanet

Před objevem prvních exoplanet se mohlo o jejich vlastnostech pouze spekulovat. Znám byl pouze jeden planetární systém, a to naše sluneční soustava. S přibývajícím počtem objevených planetárních systémů se ale před astronomy doslova otevřelo mnoho nových a rozmanitých světů. Ať už šlo o planety obíhající kolem mateřské hvězdy po velmi excentrické dráze, planety přesahující hmotnost Jupitera, planety ohíhající složku vícenásobného hvězdného systému nebo třeba planety kroužící kolem hvězdy ve velmi malé vzdálenosti,



Obrázek 2.2: Tvar světelné křivky. ΔF – hloubka tranzitu, t_Z – doba trvání přechodu, t_C – doba trvání centrální části přechodu, $d(t_1)$ a $d(t_2)$ – vzdálenosti středů hvězdy a planety promítající se na hvězdný disk. Podle Seager & Mallén-Ornelas (2003).

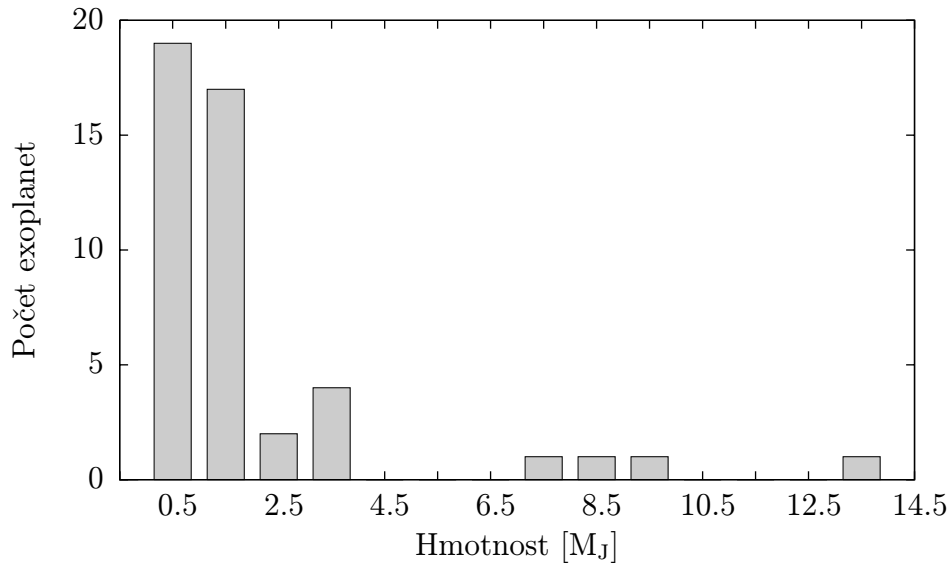
zasadily všechny tyto objevy citelnou ránu dosavadní teorii popisující formování planetárních systémů.

Objevy takového množství planetárních systémů poukazují na nejedinečnost existence toho našeho. Na druhou stranu se při veliké variabilitě extrasolárních systémů nabízí otázka, zdali není konfigurace sluneční soustavy alespoň něčím jedinečná. Tuto otázku může potvrdit nebo vyvrátit jen dostatečně široký vzorek planetárních systémů, jehož získání je otázkou času. Přesto se nevyhneme při zkoumání cizích světů jejich porovnávání s naší sluneční soustavou. Stále jde totiž o nejprozkoumanější planetární systém.

2.2.1 Tranzitující exoplanety

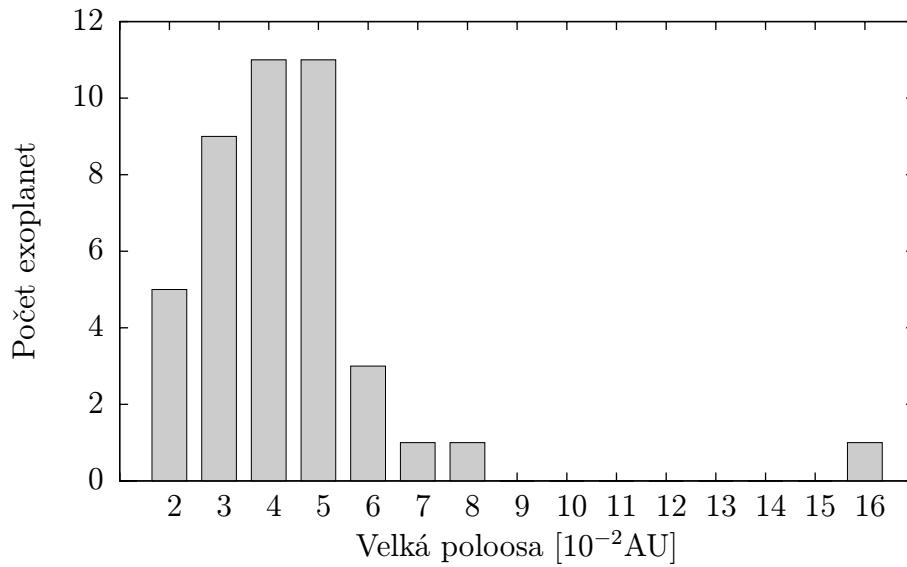
Na skupině těchto extrasolárních planet jsou v současné době zajímavé víceméně podobné vlastnosti jejich zástupců. Je to z velké části způsobeno použitou metodou, díky níž jsou objevovány. Fotometrické sledování přechodů planet přes hvězdné disky je nejcitlivější na velmi hmotné exoplanety (planety s hmotnostmi řádově Jupitera), které obíhají blízko mateřské hvězdy (desetiny a setiny astronomické jednotky) s malou periodou oběhu (dny).

Pro ilustraci a porovnání vlastností těchto planet jsem zvolila dvě veličiny, a to hmotnost a velkou poloosu. Na histogramu 2.3 je vyobrazeno početní zastoupení extrasolárních planet v závislosti na jejich hmotnosti. Je vidět, že hmotnost převážné většiny planet se pohybuje v intervalu od 0.5 do 1.5 hmotnosti Jupitera.



Histogram 2.3: Hmotnosti tranzitujících exoplanet. M_J je hmotnost planety Jupiter viz kapitola 6. Data jsou převzata z [E2].

Z histogramu 2.4, kde jsou vyneseny velké poloosy exoplanet, je vidět, že tranzitující exoplanety obíhají ve velmi malé vzdálenosti od hvězdy. Velká poloosa většiny z nich nepřesahuje pět setin astronomické jednotky.



Histogram 2.4: Velké poloosy tranzitujících planet. Data jsou převzata z [E2].

Kapitola 3

Modely světelných křivek

V této kapitole bych se chtěla věnovat základní problematice modelování křivek extrasolárních tranzitů. V prvním případě popíšu tzv. geometrický model a v druhém model křivky s použitím okrajového ztemnění hvězdy.

3.1 Geometrický model

Tento model je založen na výpočtu plochy, kterou planeta při přechodu v jednotlivých časových okamžicích zastíňuje. Základní veličiny důležité k popisu a geometrie problému jsou znázorněny na obrázku 3.1.

Jako první definujeme veličinu $d(t)$, určující pro každý okamžik vzdálenost středů hvězdy a planety, která se promítá na hvězdný disk (tedy do roviny kolmé k rovině pozorování), viz obrázek 2.2. Za předpokladu, že planeta obíhá kolem hvězdy po kruhové dráze, tedy excentricita dráhy je nulová, můžeme psát

$$d(t) \equiv a\sqrt{\sin^2(\omega t) + \cos^2 i \cos^2(\omega t)}. \quad (3.1)$$

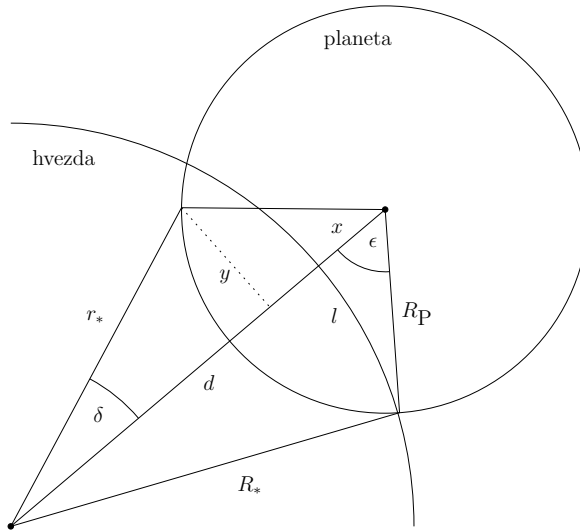
Veličina a je velká poloosa, i inklinace, t čas, jehož nulová hodnota odpovídá středu tranzitu a ω je veličina daná vztahem

$$\omega = \frac{2\pi}{P}, \quad (3.2)$$

kde P je perioda oběhu exoplanety kolem hvězdy.

Pro modelování samotného průběhu přechodu potřebujeme pro každý okamžik znát plochu hvězdy $A(t)$ která je zakrytá exoplanetou. Můžeme ji určit dvěma způsoby. První vychází z předpokladu, že planeta je ve srovnání s hvězdou malá, tedy $R_p \ll R_*$. Potom můžeme oblouk l , viz obrázek 3.1, považovat za úsečku. Pro plochu trojúhelníka o stranách x, l, R_p z obrázku 3.1 bude potom přibližně platit

$$D(t) \approx \frac{1}{2} l x(t) = \frac{1}{2} x \sqrt{R_p^2 - x^2(t)}, \quad (3.3)$$



Obrázek 3.1: K modelování tranzitu. R_* – poloměr hvězdy, R_P – poloměr planety, d – vzdálenost středů hvězdy a planety, x – rozdíl veličiny d a poloměru hvězdy. Význam ostatních zobrazených veličin je vysvětlen v textu, jedná se většinou o veličiny pomocné. Podle Cassen et al. (2006).

kde veličina $x(t)$ je definována vztahem

$$x(t) \equiv d(t) - R_* . \quad (3.4)$$

Celková zastíněná plocha $A(t)$ je potom dána rozdílem obsahu kruhové výseče, kterou určuje úhel ϵ a poloměr planety, a plochy dané výrazem (3.3), tedy

$$A(t) \approx 2 \left(\frac{1}{2} \epsilon(t) R_P^2 - \frac{1}{2} x(t) \sqrt{R_P^2 - x^2(t)} \right) . \quad (3.5)$$

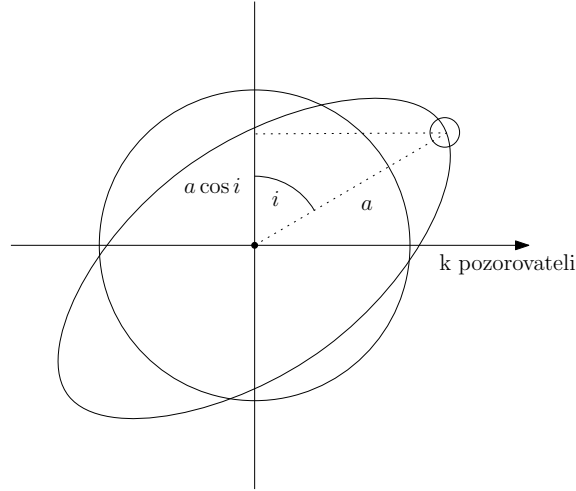
Pokud úhel ϵ vyjádříme pomocí $x(t)$ a R_P , nabývá výsledný vztah z Cassen et al. (2006) tvaru

$$A(t) \approx R_P^2 \arccos \left(\frac{x(t)}{R_P} \right) - x(t) \sqrt{R_P^2 - x^2(t)} . \quad (3.6)$$

Tvar křivky, která popisuje samotný přechod, je pak dán vztahem ze Sackett (1999)

$$\frac{\Delta F(t)}{F_0} = 1 - \frac{A(t)}{\pi R_*^2} . \quad (3.7)$$

Pokud nelze považovat planetu za malou ve srovnání s hvězdou, je nutné použít na výpočet zakryté plochy druhý způsob založený na numerické integraci. V polárních souřadnicích integrujeme dvakrát přes oblouk y , který je znázorněn na obrázku 3.1. Z trojúhelníku o stranách $d(t)$, r_* , R_P a z předpokladu, že úhel δ je malý (tedy $\sin \delta \approx \delta$), můžeme určit



Obrázek 3.2: K významu veličiny i . a – velká poloosa, i – inklinace.

velikost y jako

$$y = r_* \arccos \frac{d^2(t) + r_*^2 - R_P^2}{2d(t)r_*}. \quad (3.8)$$

Význam veličiny r_* je patrný z obrázku 3.1. Pro výsledný integrál lze potom podle Sackett (1999) psát

$$A(t) = 2 \int_{\max(0, d(t) - R_P)}^{\min(R_*, d(t) + R_P)} r_* \arccos \gamma(t) dr_*, \quad (3.9)$$

kde

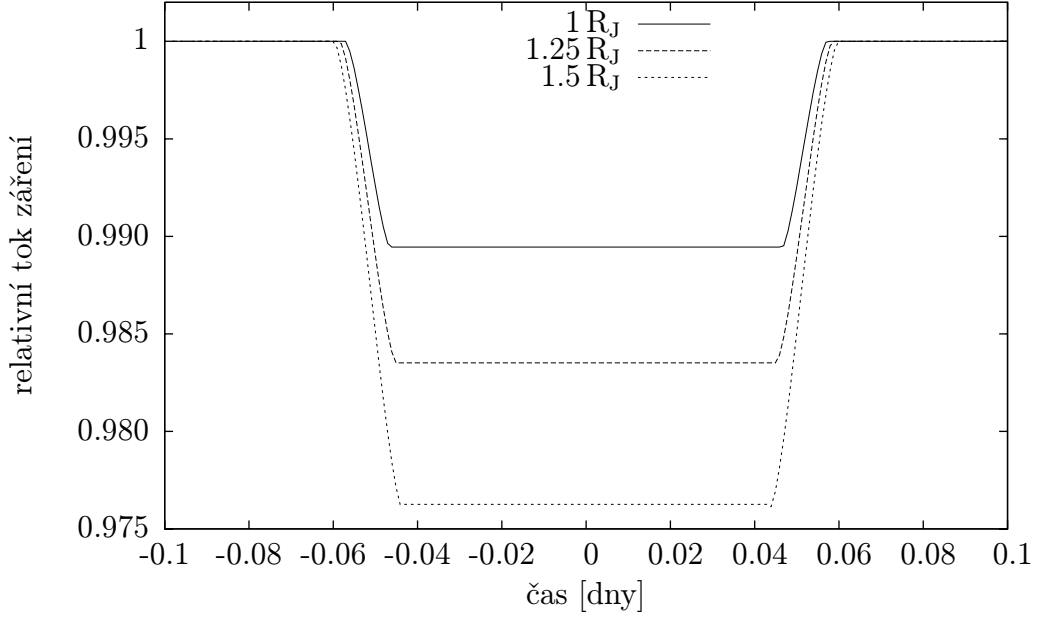
$$\gamma(t) = \begin{cases} \frac{d^2(t) + r_*^2 - R_P^2}{2r_*d(t)} & \text{pro } r_* > R_P + d(t), \\ -1 & \text{v ostatních případech.} \end{cases} \quad (3.10)$$

Pro případy všech exoplanet, kterými se budu dále zabývat, platí, že planeta je v porovnání s hvězdou malá a tudíž nezáleží na tom, která z předchozích metod bude použita. Modelové světelné křivky jsou v obou těchto případech naprosto identické.

V grafech 3.3 a 3.4 jsou zobrazeny geometrické modely světelných křivek pro různé hodnoty poloměrů planet, resp. inklinací. Oba modely byly vytvořeny pro imaginární exoplanetu s pevnými parametry: $a = 0.05$ AU, $P = 3.5$ dne a $R_* = R_\odot$.

V grafu 3.3 jsou pro hodnotu $i = 90^\circ$ vyneseny tři křivky pro hodnoty poloměru planety postupně $R_P = 1 R_J$, $1.25 R_J$ a $1.5 R_J$. Je na něm názorně vidět, jak se hloubka přechodu zvětšuje se zvětšujícím se poloměrem planety.

V grafu 3.4 odpovídají modely světelných křivek hodnotě poloměru planety $R_P = 1 R_J$ a inklinace nabývá hodnot $i = 90^\circ$, 89° a 88° . Je vidno, že pro snižující se hodnotu inklinace se zkracuje délka trvání přechodu. Tato skutečnost plyne přímo z geometrie problému.



Graf 3.3: Tvar světelné křivky pro tři různé hodnoty poloměrů exoplanety, $R_P = 1 R_J, 1.25 R_J$ a $1.5 R_J$. Ostatní neměnné parametry jsou: $a = 0.05$ AU, $P = 3.5$ dne, $R_* = R_\odot$ a $i = 90^\circ$.

3.2 Model s okrajovým ztemněním

Tento model se od předchozího liší v tom, že zahrneme do výpočtů důležitou vlastnost materské hvězdy, a to její okrajové ztemnění. Tato skutečnost se projeví na výsledné světelné křivce specifickým zaoblením minima křivky, na rozdíl od geometrického modelu s minimem plochým, viz např. graf 3.3.

Okrajové ztemnění je důsledek skutečnosti, že hvězdy nezáří jako absolutně černá tělesa. Dobře patrné je okrajové ztemnění u Slunce. Na okrajích se nám zdá tmavší než ve středu kotouče. Je to způsobeno tím, že uprostřed disku vidíme hlouběji do hvězdy, kde je větší teplota než při okrajích, kde vidíme do menší hloubky s nižší teplotou.

Okrajové ztemnění můžeme popsat více způsoby. Nejjednodušší popis nám dává lineární zákon okrajového ztemnění

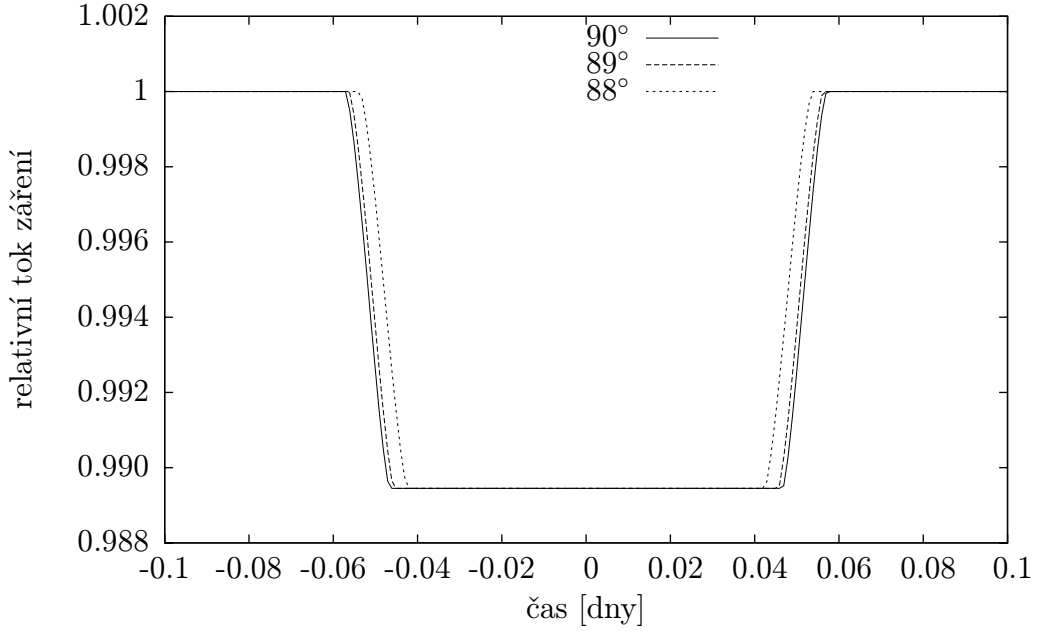
$$I(\mu) = I(0)[1 - a(1 - \mu)]. \quad (3.11)$$

Dalšími příklady mohou být například odmocninový zákon okrajového ztemnění

$$I(\mu) = I(0)[1 - b_1(1 - \mu) - b_2(1 - \sqrt{\mu})] \quad (3.12)$$

nebo zákon logaritmický

$$I(\mu) = I(0)[1 - c_1(1 - \mu) - c_2\mu \ln \mu]. \quad (3.13)$$



Graf 3.4: Tvar světelné křivky pro tři různé hodnoty inklinace exoplanety, $i = 90^\circ, 89^\circ$ a 88° . Ostatní neměnné parametry jsou: $a = 0.05$ AU, $P = 3.5$ dne, $R_* = R_\odot$ a $R_P = 1 R_J$.

Zajímavý je také nelineární zákon okrajového ztemnění (Claret 2000)

$$I(\mu) = I(0) \left(1 - \sum_{k=1}^4 n_k (1 - \mu^{\frac{k}{2}}) \right). \quad (3.14)$$

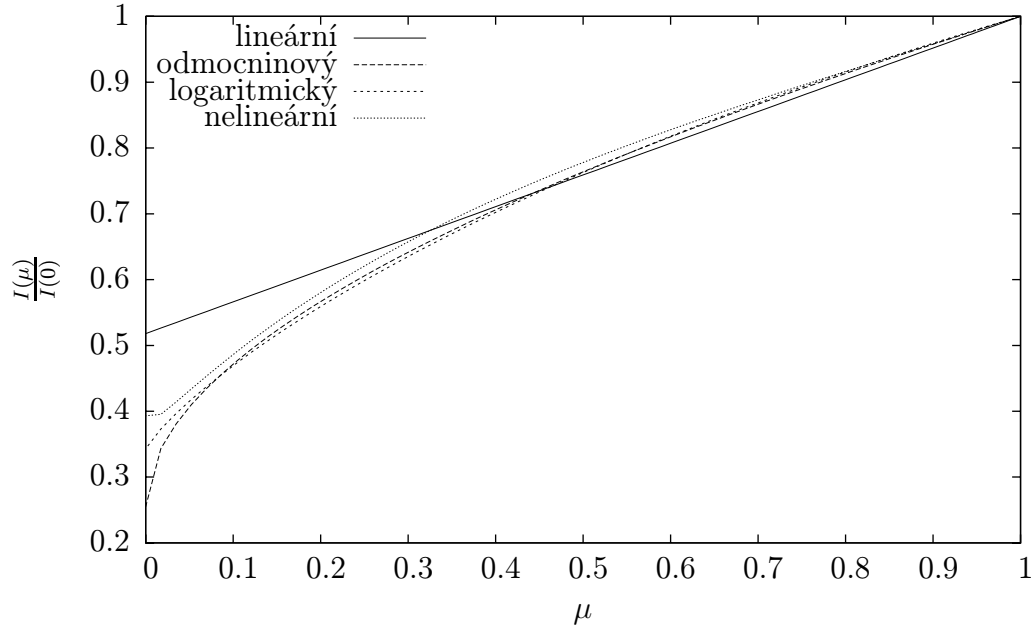
Ve všech těchto rovnicích je $I(\mu)$ intenzita v místě na disku daném μ , kde $\mu = \sqrt{1 - \left(\frac{r_*}{R_*}\right)^2}$ a $I(0)$ je intenzita ve středu disku. Konstanty a , b_1 , b_2 , c_1 , c_2 , n_k jsou koeficienty okrajového ztemnění. Jejich velikost závisí na vlastnostech hvězdy, na její efektivní teplotě a gravitačním zrychlení na povrchu.

Průběhy intenzit v závislosti na vzdálenosti od středu hvězdy jsou pro tři různé případy okrajového ztemnění vyneseny v grafu 3.5.

Pro modelování průběhu světelné křivky jsem použila logaritmický zákon okrajového ztemnění (3.13).

Výsledný tvar světelné křivky potom vypočteme numerickou integrací následujícího vztahu (Sackett 1999)

$$\frac{\Delta F(t)}{F_0} = 1 - \frac{\int_{\max(0, d(t)-R_P)}^{\min(R_*, d(t)+R_P)} r_* I(r_*) \arccos \gamma(t) dr_*}{\pi \int_0^{R_*} r_* I(r_*) dr_*}, \quad (3.15)$$



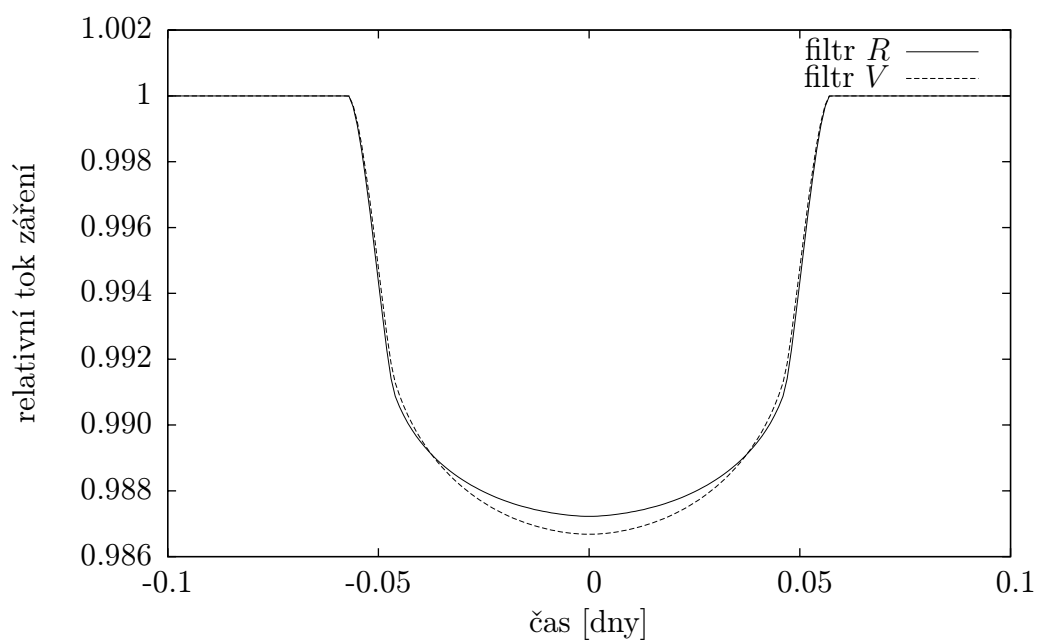
Graf 3.5: Průběhy okrajového ztemnění.

kde význam veličiny $\gamma(t)$ je stejný jako v rovnici (3.9) a $I(r_*)$ je dána výrazem (3.13), tedy

$$I(r_*) = I(0) \left[1 - c_1 \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{r_*}{R_*} \right)^2} \right) - c_2 \sqrt{1 - \left(\frac{r_*}{R_*} \right)^2} \ln \sqrt{1 - \left(\frac{r_*}{R_*} \right)^2} \right].$$

Jako příklad jsem vytvořila světelnou křivku odpovídající imaginární exoplanetě a imaginární hvězdě. Teplota této hvězdy je 5750 K, poloměr odpovídá poloměru slunečnímu a pro její gravitační zrychlení na povrchu platí $\log g = 2.5$. Parametry exoplanety jsou stejné jako u modelů zmíněných v předchozí podkapitole, tedy $i = 90^\circ$, $a = 0.05$ AU, $P = 3.5$ dne a $R_P = 1 R_J$. Všechny tyto parametry daly vzniknout dvěma křivkám znázorněným v grafu 3.6.

Do grafu jsem vynesla světelné křivky pro filtry R a V Kronova–Cousinova fotometrického systému, tedy pro ty, které jsem sama při pozorování použila, viz kapitola 5. Filtry použité při fotometrii propouštějí do CCD detektoru pouze světlo o určitých vlnových délkách, specifických pro jednotlivé filtry. Na první pohled je z grafu vidět, že ve filtru V je křivka hlubší než ve filtru R . Je to způsobeno tím, že efekt okrajového ztemnění je výraznější pro kratší vlnové délky, tedy v našem případě pro filtr V . Protože hloubka poklesu má vliv na určení poloměru planety viz (4.1), bude jeho hodnota získaná z měření ve filtru V větší než ta z měření ve filtru R .



Graf 3.6: Tvar světelné křivky se započtením okrajového ztemnění ve filtrech R a V . Vlastnosti hvězdy a exoplanety: $R_P = 1 R_J$, $a = 0.05$ AU, $P = 3.5$ dne, $i = 90^\circ$, $R_* = R_\odot$, $\log g = 2.5$ a $T_{ef} = 5\,770$ K.

Kapitola 4

Určování parametrů extrasolárních systémů

I když pozorujeme extrasolární planety pouze nepřímo, můžeme z napozorované světelné křivky získat řadu zajímavých informací. Při určování parametrů exoplanetárních systémů jsem vycházela z následujících předpokladů:

- planeta obíhá kolem hvězdy po kruhové dráze (což je pro většinu tranzitujících planet víceméně splněno)
- známe parametry mateřské hvězdy, zvláště její poloměr a hmotnost.

4.1 Poloměr planety

Poloměr extrasolární planety můžeme určit z hloubky tranzitu pomocí vztahu

$$\Delta F = \frac{F_* - F_t}{F_*} = \frac{\pi R_*^2 I_* - (\pi R_*^2 I_* - \pi R_P^2 I_*)}{\pi R_*^2 I_*} = \left(\frac{R_P}{R_*} \right)^2, \quad (4.1)$$

kde ΔF je hloubka tranzitu, F_* tok záření z celého disku přicházející od systému v okamžiku, kdy nedochází k přechodu, F_t tok záření z celého disku pro případ, kdy je planeta celá promítaná na disk hvězdy, R_* poloměr hvězdy, R_P poloměr planety a I_* intenzita hvězdy. Ke zjištění poloměru planety ovšem potřebujeme znát poloměr hvězdy, kolem které planeta obíhá.

4.2 Střed přechodu a perioda

K určení středu přechodu jsem použila program AVE [E5]. Tento program od autora Rafaela Barbery se používá pro určování minim u zákrytových dvojhvězd. Přesné určení středu

přechodu je totiž velmi důležité pro určení periody oběhu planety P . Ta se dá určit pokud máme k dispozici více světelných křivek s určenými středy přechodu.

4.3 Velká poloosa

Pro výpočet velké poloosy můžeme použít třetí Keplerův zákon ve tvaru

$$P^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{G(M_* + M_P)}, \quad (4.2)$$

kde P je perioda oběhu, a hlavní poloosa, G gravitační konstanta, M_* hmotnost hvězdy a M_P hmotnost planety. Protože pro exoplanety platí $M_P \ll M_*$, můžeme vztah pro hlavní poloosu přepsat do tvaru

$$a = \sqrt[3]{\frac{P^2 G M_*}{4\pi^2}}. \quad (4.3)$$

4.4 Inklinace

Inklinací v našem případě rozumíme úhel mezi rovinou oběhu planety a rovinou kolmou na úhel pohledu. Tuto veličinu můžeme určit ze známé doby trvání přechodu t_Z . Délka trvání přechodu je obecně dána vztahem

$$t_Z = \frac{P}{2\pi} \alpha. \quad (4.4)$$

Úhel α určuje úsek na dráze planety kolem hvězdy, kdy se planeta promítá na hvězdný disk. Pro sinus poloviny tohoto úhlu, který označíme β platí vztah

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \sin \beta = \frac{y}{a} = \frac{\sqrt{(R_* + R_P)^2 - a^2 \cos^2 i}}{a}. \quad (4.5)$$

Význam úhlu β a ostatních zmíněných veličin je dobře patrný z obrázků 4.1 a 4.2. S pomocí těchto obrázků se dostáváme k výslednému vztahu pro délku trvání přechodu t_Z

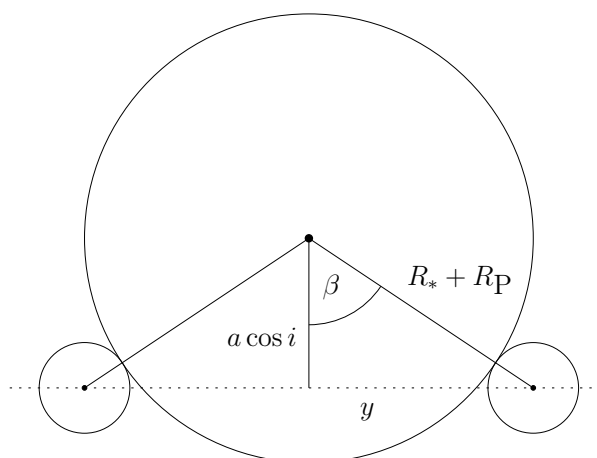
$$t_Z = \frac{P}{\pi} \arcsin \left(\frac{\sqrt{(R_* + R_P)^2 - a^2 \cos^2 i}}{a} \right), \quad (4.6)$$

z něhož konečně můžeme pomocí jednoduché algebraické úpravy určit vztah pro inklinaci

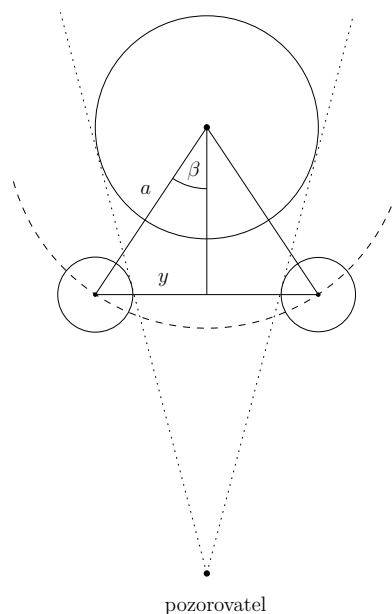
$$i = \arccos \sqrt{\frac{(R_* + R_P)^2}{a^2} - \sin^2 \frac{\pi t_Z}{P}}. \quad (4.7)$$

4.4.1 Délka trvání přechodu

K určení délky trvání přechodu jsem použila taktéž program AVE [E5], již zmíněný v sekci 4.2. S jeho pomocí jsem určila začátek a konec přechodu a odečtením těchto dvou hodnot jsem získala délku trvání přechodu i příslušnou chybu.



Obrázek 4.1: Geometrie tranzitu I. β – polovina úhlu, který určuje úsek dráhy planety, kdy se planeta promítá na hvězdný disk, y – pomocná veličina, $a \cos i$ – průmět vzdálenosti planety od hvězdy do roviny kolmé k pozorovateli v okamžiku zdánlivě nejmenší vzdálenosti od středu hvězdy, viz obrázek 3.2, R_* – poloměr hvězdy a R_P – poloměr planety. Podle Sackett (1999).



Obrázek 4.2: Geometrie tranzitu II. a – velká poloosa, β – polovina úhlu, který určuje úsek dráhy planety, kdy se planeta promítá na hvězdný disk, y – pomocná veličina.

Kapitola 5

Pozorování

Samotné pozorování tranzitů extrasolárních planet je obecně znesnadněno hned několika faktory. Prvním je relativně malý pokles jasnosti spojený s přechodem planety. Většinou se pokles pohybuje řádově kolem dvou setin magnitudy. Proto je potřeba provádět pozorování za co nejlepších pozorovacích podmínek. Komplikací může být jak světelné znečištění tak i zhoršené počasí. Druhou komplikací je přirozený fakt, že perioda oběhu planet je rovna necelým násobkům pozemských dní, tím pádem se viditelnost přechodů postupně posouvá do dne a znesnadňuje tak napozorování více přechodů jednoho systému v krátkém čase za sebou.

Pro ověření teoretických úvah a pro určení parametrů extrasolárních planet zmíněných v předchozích kapitolách jsem naměřila několik exoplanetárních přechodů. Jedná se o exoplanety XO - 1 b, TrES - 2, HD 189733 b a Hat - P - 6 b. Veškeré informace o pozorovacích místech, objektech, pozorovatelích a použitém vybavení jsou uvedeny v tabulkách 5.1, 5.2 a 5.3.

Na korekci snímků a k jejich následné analýze byly použity programy Munipack (Hroch 1998) a CMunipack (verze 1.1.19) [E3].

Místo	Datum	Objekt	Pozorovatelé
HaP M. Koperníka	5./6. 9. 2006	HD 189733 b	TK, MZ
Observatoř MU	21./22. 5. 2007	XO - 1 b	TK, LJ
Observatoř MU	25./26. 5. 2007	XO - 1 b	TK, LJ
Observatoř MU	14./15. 6. 2007	TrES - 2	TH, LJ
Suhora observatory	5./6. 12. 2007	Hat - P - 6 b	TK, JJ

Tabulka 5.1: Seznam pozorovacích míst a pozorovaných objektů. Pozorovatelé: TH = Tomáš Henny, LJ = Lucie Jílková, MZ = Miloslav Zejda, JJ = Jan Janík, TK = Tereza Krejčová.

Místo	Zem. délka	Zem. šířka	Nadm. výška [m n. m.]
HaP M. Kop. a observatoř MU	16° 35' 1.8"	49° 12' 14.9"	305
Suhora observatory	49° 34' 09"	20° 04' 03"	1 009

Tabulka 5.2: Informace o pozorovacích místech.

Místo	Dalekohled	Kamera
HaP M. Koperníka	5 cm refraktor	SBIG ST7 XMEI
Observatoř MU	62 cm Newton	SBIG ST8
Suhora observatory	60 cm Cassegrain	Apogee ALTA U47UV

Tabulka 5.3: Použité vybavení.

5.1 XO - 1 b

Pozorování této extrasolární planety probíhalo na observatoři Masarykovy univerzity. Po-
dařilo se naměřit dva po sobě následující přechody a to v průběhu nocí 21./22. 5. 2007
a 25./26. 5. 2007. Měření probíhalo ve filtrech R a V Kronova–Cousinsova fotometric-
kého systému. Křivky z těchto nocí jsou zobrazeny na grafech 5.1 a 5.2. V grafu z noci
25./26. 5. 2007 je patrná nepřítomnost dat, která byla způsobena náhlým zhoršením se
už tak dost špatného počasí. Ostatně horší pozorovací podmínky této noci jsou patrné
na samotné kvalitě dat, zvláště ve srovnání s daty noci předchozí, tedy 21./22. 5. 2007.

5.1.1 Fázová křivka

Z dvou napozorovaných přechodů systému XO-1 jsem vytvořila fázovou křivku. Pro vý-
počet časového údaje vynášeného na osu x byl použit vztah

$$f = \text{frac} \left(\frac{T_2 - T_1}{P} \right), \quad (5.1)$$

kde f značí fázi, T_2 odpovídá jednotlivým okamžikům naměřené křivky a P je perioda pře-
chodu. Výraz frac znamená, že se z výsledné hodnoty zlomku vezme pouze jeho desetinná
část. Okamžik T_1 je dán vztahem

$$T_1 = M_0 + EP. \quad (5.2)$$

M_0 je okamžik nultého minima a E je epocha. Výsledné fázové křivky pro filtry R a V jsou
zobrazeny v grafu 5.3 .

Noc	Objekt	Filtr	Expoziční doba [s]	Počet snímků
5./6. 9. 2006	HD 189733 b	<i>R</i>	40	507
21./22. 5. 2007	XO - 1 b	<i>R</i>	75	71
		<i>V</i>	120	73
25./26. 5. 2007	XO - 1 b	<i>R</i>	60	106
		<i>V</i>	60	106
14./15. 6. 2007	TrES - 2	<i>R</i>	60	92
		<i>V</i>	60	92
5./6. 12. 2007	Hat - P - 6 b	<i>R</i>	18, 20, 22	904

Tabulka 5.4: Informace o použitých filtrech, počtu snímků a jejich expozičních dobách.

5.2 TrES - 2

Tato exoplaneta bylo pozorována 62 cm dalekohledem Masarykovy univerzity 14./15. 6. 2007 ve filtrech *R* a *V*. Křivky přechodu jsou v grafu 5.4.

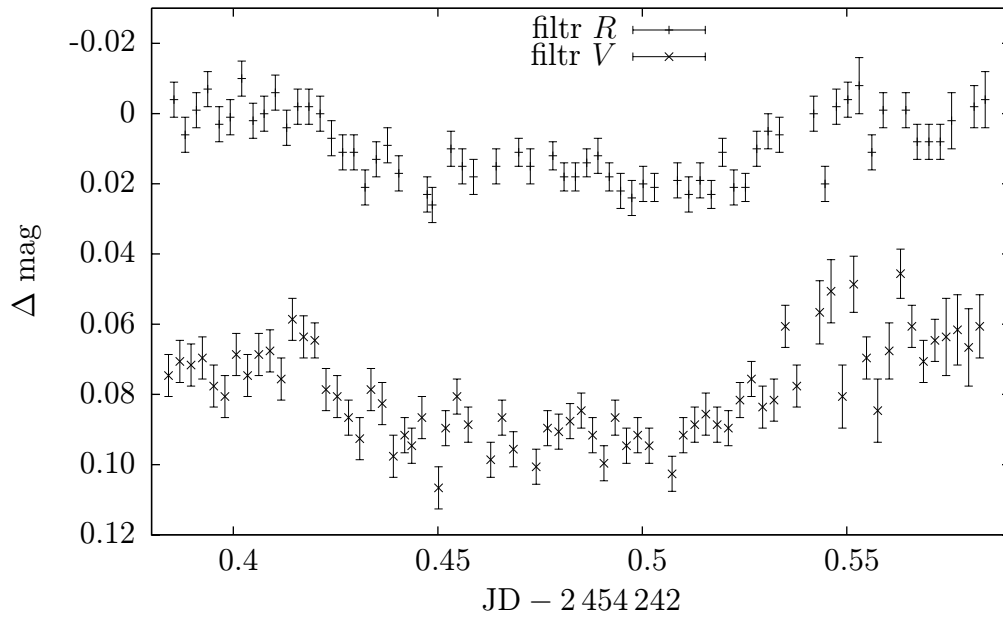
5.3 HD 189733 b

Tento systém je zajímavý tím, že planeta obíhá kolem poněkud jasnější hvězdy (7.67 mag). Hvězdná velikost ostatních zde zmíněných systémů se pohybuje v intervalu od 10 do 12 mag. Pozorování HD 189733 b bylo proto provedeno malým, 5 cm refraktorem se CCD kamerou ST7 hvězdárny a planetária Mikuláše Koperníka v Brně ve filtru *R*.

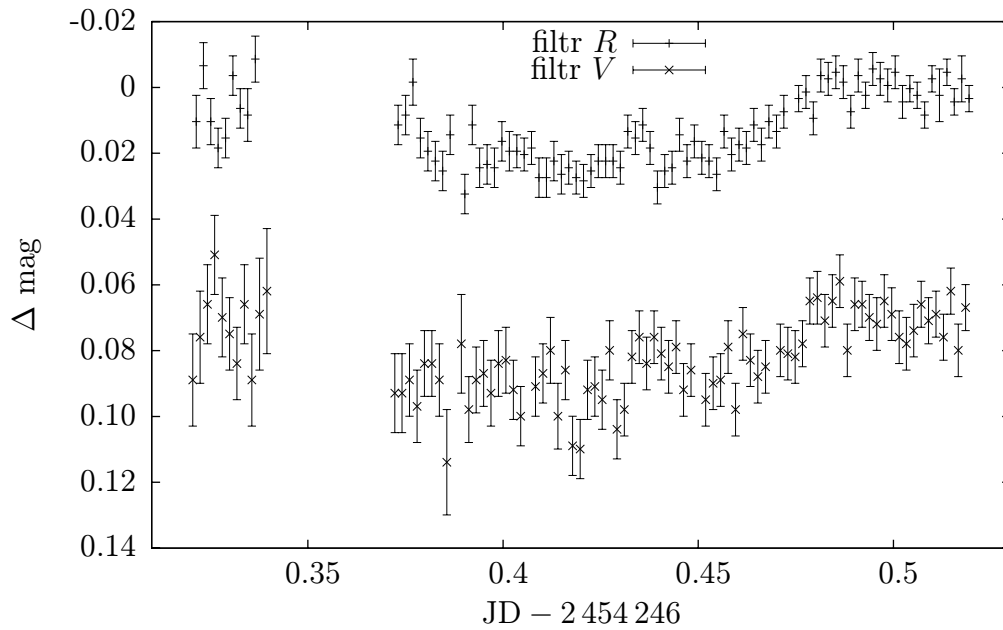
Při pozorování se nezdařilo naměřit pozadí předcházející přechodu. Na konci datové řady je vidět zvětšující se zašumění dat. Toto je způsobeno snižující se výškou hvězdy nad obzorem, tedy průchodem světla větší vzdušnou hmotou. Křivku přechodu zobrazuje graf 5.5.

5.4 Hat - P - 6 b

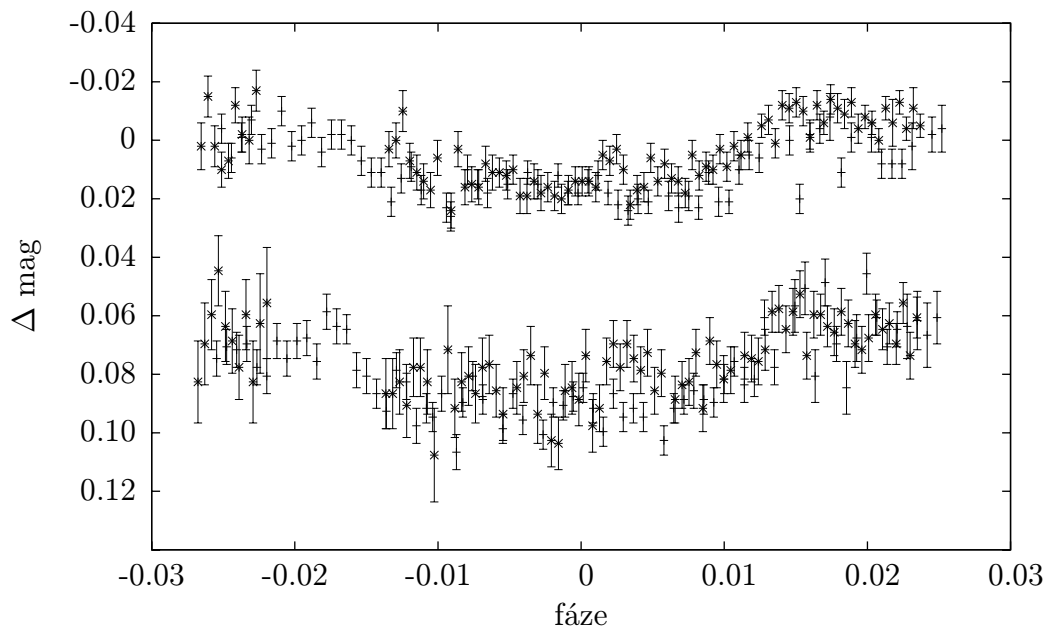
Pozorování této exoplanety bylo provedeno v nadmořské výšce přibližně 1 000 metrů nad mořem v neobydlených polských horách na Suhorské observatoři [E4]. Pozorovací podmínky byly tedy nesrovnatelně lepší než ty ve velmi obydleném Brně. Na datech je tato skutečnost vidět na první pohled, chyby jednotlivých měření jsou několikanásobně menší než ty u dat získaných v Brně. Měření probíhalo ve filtru *R* s 60 cm dalekohledem v noci 5./6. 12. 2007. Bohužel se z technických důvodů nepodařilo zachytit začátek celého přechodu, jak je vidět na světelné křivce 5.6.



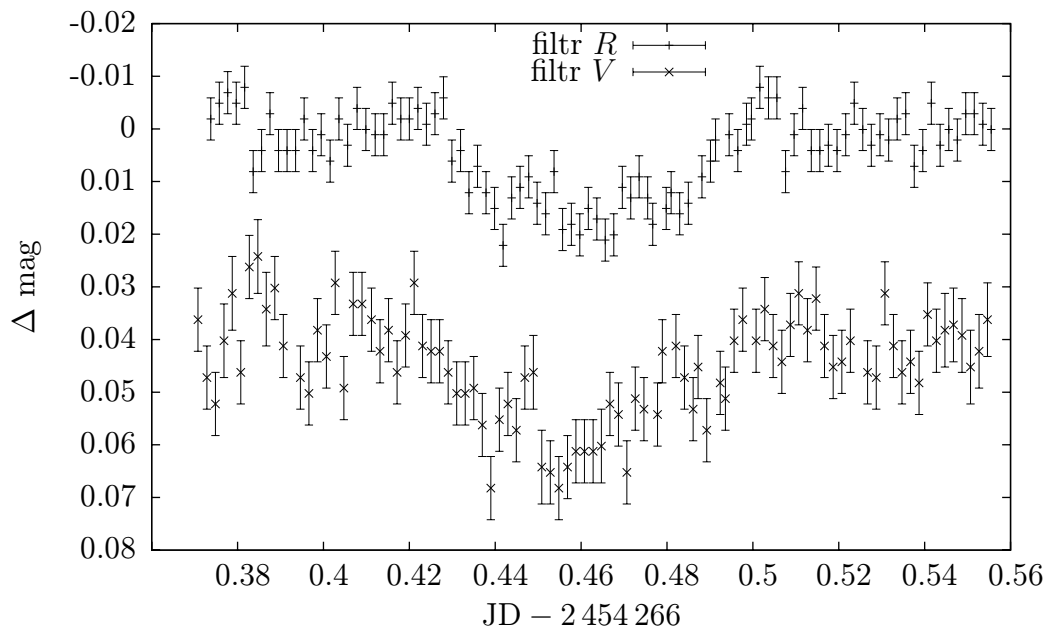
graf 5.1: Křivka přechodu exoplanety XO-1 b ve filtrech *R* a *V* z noci 21./22. 5. 2007. Byla pořízena 62 cm dalekohledem Masarykovy univerzity.



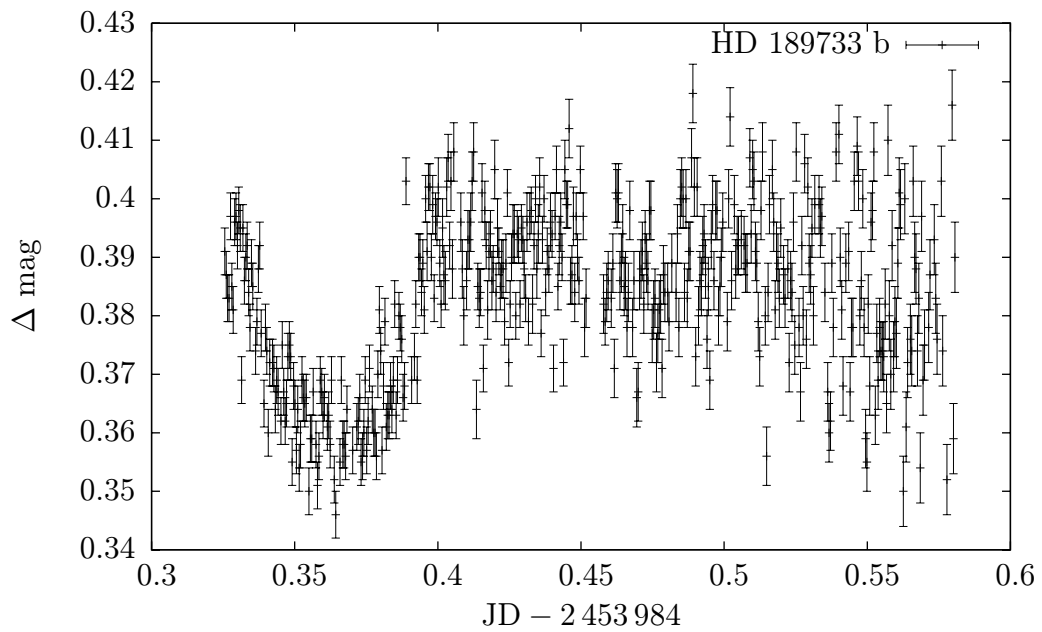
Graf 5.2: Křivka přechodu exoplanety XO-1 b ve filtrech *R* a *V* z noci 25./26. 5. 2007. Byla pořízena 62 cm dalekohledem Masarykovy univerzity.



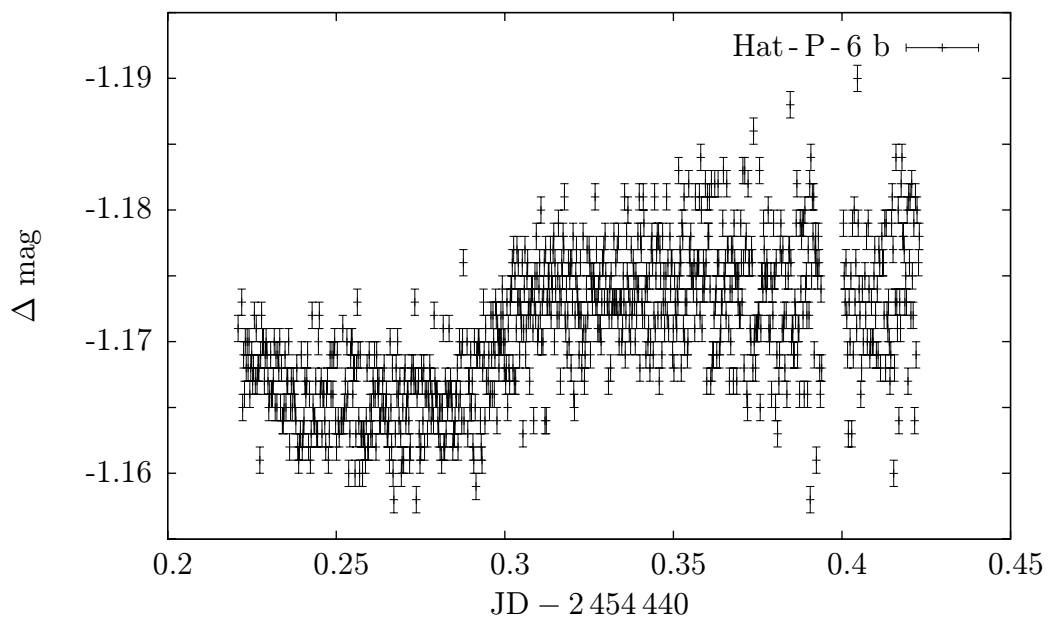
Graf 5.3: Fázová křivka XO-1 b složená z tranzitů z nocí 21./22. 5. 2007 (označeny křížem) a 25./26. 5. 2007 (označeny hvězdičkou) ve filtru *R* – horní křivka a ve filtru *V* – dolní křivka.



Graf 5.4: Křivka přechodu exoplanety TrES-2 ve filtrech *R* a *V* z nocí 14./15. 6. 2007. Byla pořizena 62 cm dalekohledem Masarykovy univerzity.



Graf 5.5: Křivka přechodu exoplanety HD 189733 b ve filtru R z noci 5./6. 9. 2006. Byla pořízena 5 cm dalekohledem HaP v Brně.



Graf 5.6: Křivka přechodu exoplanety Hat - P - 6 b ve filtru R z noci 5./6. 12. 2007. Byla pořízena 60 cm dalekohledem Suhorské observatoře.

Kapitola 6

Výsledky

6.1 Parametry extrasolárních planet

Při výpočtu parametrů exoplanet jsem použila postupy popsané v kapitole 4. Pro výpočet periody oběhu exoplanety jsem spolu se svými měřeními zahrnula do výpočtů i měření převzatá z různých internetových zdrojů. Hlavním důvodem pro tento krok bylo hlavně přesnější určení periody v případě planety XO-1 b a nedostatek vlastních dat v případech všech ostatních planet.

Pro výpočet extrasolárních parametrů jsem použila hodnoty vlastností hvězd uvedených v tabulce 6.1. Je zde uveden i Johnsonův $B - V$ index. U srovnávací hvězdy pro exoplanetu TrES-2 se tento index nepodařil zjistit.

Hvězda	Hmotnost [M_{\odot}]	Poloměr [R_{\odot}]	John. index $B - V$	$B - V$ srov. hv.
XO-1	1 ± 0.03	0.928 ± 0.03	0.622 ± 0.079	0.764 ± 0.143
TrES-2	1.08 ± 0.11	1 ± 0.06	0.598 ± 0.106	
HD 189733	0.8 ± 0.4	0.753 ± 0.025	0.932 ± 0.008	0.993 ± 0.114
Hat-P-6	1.29 ± 0.06	1.46 ± 0.06	0.417 ± 0.045	0.565 ± 0.174

Tabulka 6.1: Vlastnosti mateřských hvězd. Hmotnost a poloměr hvězd jsou převzaty z [E10] a z článků Baines et al. (2008); Sozzetti et al. (2007); Holman et al. (2006); McCullough et al. (2006); Noyes et al. (2008).

Pro výpočet parametrů exoplanet jsem použila následující důležité veličiny:

R_{\odot} = Poloměr Slunce = 695 997 km (Kleczek 2002)

M_{\odot} = Hmotnost Slunce = $1.989 \cdot 10^{30}$ kg (Kleczek 2002)

R_J = Poloměr Jupiteru = 71 492 km (Kleczek 2002)

M_J = Hmotnost Jupiteru = $1.898.6 \cdot 10^{24}$ kg (Kleczek 2002)

6.1.1 XO - 1 b

Pro výpočet periody jsem k vlastním datům použila i data z internetového archívu amatérských pozorovatelů extrasolárních planet [E6]. V tabulce 6.2 jsou uvedeny jak publikované vlastnosti extrasolárního systému tak i vlastnosti spočítané ze samotného měření.

XO - 1 b		
Parametry	Publikované	Vlastní
a [AU]	$0.0488 \pm 5 \cdot 10^{-4}$	$0.0487 \pm 5 \cdot 10^{-4}$
i [°]	89.3 ± 0.5	88.5 ± 0.4
P [dny]	$3.941534 \pm 2.7 \cdot 10^{-5}$	$3.94153 \pm 3 \cdot 10^{-5}$
M_P [M_J]	0.90 ± 0.07	–
R_P [R_J]	1.18 ± 0.04	1.16 ± 0.23
ΔF	–	0.016 ± 0.007
t_Z [dny]	–	0.121 ± 0.003

Tabulka 6.2: Parametry extrasolární planety XO-1 b. a – velká poloosa, i – inklinace, P – perioda oběhu planety kolem hvězdy, M_P – hmotnost planety, R_P – poloměr planety, ΔF – hloubka tranzitu, t_Z – délka trvání tranzitu. Publikované parametry exoplanet byly převzaty z McCullough et al. (2006); Holman et al. (2006).

6.1.2 TrES - 2

Při výpočtu parametrů této exoplanety jsem pro určení periody P použila kromě svých naměřených dat také data českého pozorovatele Luboše Bráta z noci 29./30. 3. 2008 [E9] a data amatérských astronomů z [E8]. Vypočtené a předpokládané parametry planety jsou uvedeny v tabulce 6.3.

6.1.3 HD 189733 b

Pro výpočet periody oběhu této exoplanety jsem použila kromě svých dat, ještě data z archívu amatérských pozorovatelů [E7]. Ostatní důležité parametry této planety jak mnou vypočtené, tak publikované, jsou uvedeny v tabulce 6.4.

6.1.4 Hat - P - 6 b

Tato exoplaneta byla objevena poměrně nedávno, a proto se mi nepodařilo získat jiná data než z mého měření. Nemohla jsem proto určit periodu oběhu exoplanety a následně ani velkou poloosu a inklinaci. Přesto jsou hodnoty parametrů systému, které bylo možno určit, zaneseny v tabulce 6.5.

TrES-2		
Parametry	Publikované	Vlastní
a [AU]	0.0367 ± 0.0012	$0.0366 \pm 1.3 \cdot 10^{-3}$
i [°]	83.9 ± 0.2	84.2 ± 0.3
P [dny]	$2.47063 \pm 1 \cdot 10^{-5}$	$2.47063 \pm 2.1 \cdot 10^{-5}$
M_P [M_J]	1.28 ± 0.09	–
R_P [R_J]	1.24 ± 0.09	1.20 ± 0.21
ΔF	–	0.015 ± 0.005
t_Z [dny]	–	0.079 ± 0.002

Tabulka 6.3: Parametry extrasolární planety TrES-2. a – velká poloosa, i – inklinace, P – perioda oběhu planety kolem hvězdy, M_P – hmotnost planety, R_P – poloměr planety, ΔF – hloubka tranzitu, t_Z – délka trvání tranzitu. Publikované parametry exoplanet byly převzaty z O’Donovan et al. (2006); Sozzetti et al. (2007).

6.2 $O - C$ diagram

Důležitou součástí analýzy exoplanetárních přechodů je $O - C$ diagram. Protože jsem získala z výše zmíněných zdrojů okamžiky minim pro tři exoplanety, mohla jsem pro ně sestavit $O - C$ diagramy 6.1, 6.2 a 6.3.

Pro výpočet veličiny $O - C$ jsem použila následující vztah

$$O - C = (O - M_0) - EP, \quad (6.1)$$

kde O je okamžik pozorovaného středu přechodu, E epocha a její hodnota pro základní minimum je rovna nule, P perioda oběhu exoplanety, M_0 okamžik základního minima a C předpovězený okamžik minima.

V grafu 6.1 jsem neuvedla své měření z noci 25./26. 5. 2007. Světelná křivka je totiž neúplná a proto je určení středu přechodu značně nepřesné.

6.3 Aplikace modelů na naměřená data

Pro ověření platnosti teoretických modelů, zkonstruovaných v kapitole 3 jsem proložila naměřená data modelem s okrajovým ztemněním. Jak už bylo zmíněno v kapitole 3, použila jsem pro modelování světelných křivek logaritmický zákon okrajového ztemnění (3.13). Pro zjištění koeficientů logaritmického okrajového ztemnění byl použit program Vhlimb [E1], založený na interpolaci dat z van Hammeho tabulek (van Hamme 1993). Takto získané koeficienty jsou zaneseny v tabulce 6.6.

HD 189733 b		
Parametry	Publikované	Vlastní
a [AU]	0.0313 ± 0.0004	$0.031 \pm 5 \cdot 10^{-3}$
i [°]	85.79 ± 0.24	85.30 ± 0.12
P [dny]	$2.21857 \pm 2 \cdot 10^{-5}$	$2.218584 \pm 6 \cdot 10^{-6}$
M_P [M_J]	1.15 ± 0.04	–
R_P [R_J]	1.154 ± 0.032	1.20 ± 0.11
ΔF	–	0.027 ± 0.005
t_Z [dny]	–	0.079 ± 0.001

Tabulka 6.4: Parametry extrasolární planety HD 189733 b. a – velká poloosa, i – inklinace, P – perioda oběhu planety kolem hvězdy, M_P – hmotnost planety, R_P – poloměr planety, ΔF – hloubka tranzitu, t_Z – délka trvání tranzitu. Publikované parametry exoplanet byly převzaty z Bouchy et al. (2005); Bakos et al. (2006).

Před samotným prokládáním bylo potřeba napozorovaná data v magnitudách převést do jednotek relativního toku záření pomocí Pogsonovy rovnice

$$\Delta m = -2.5 \log \frac{F_1}{F_2}, \quad (6.2)$$

kde Δm je rozdíl v magnitudách a F_1 je tok záření a F_2 je tok záření, jehož hodnota je rovna jedné.

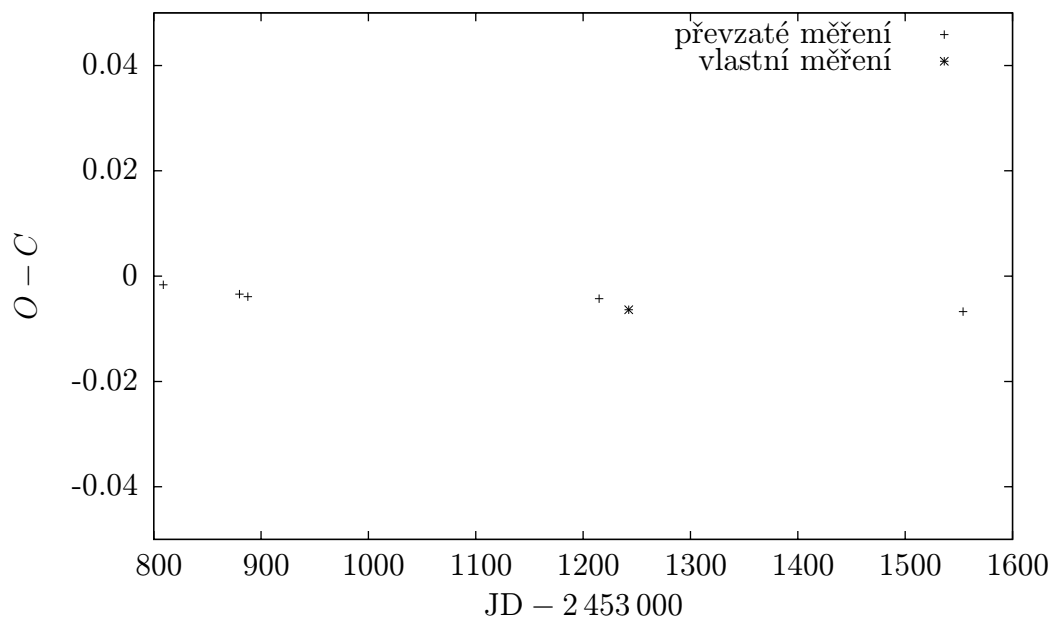
Při prokládání naměřených hodnot jsem ke konstrukci světelné křivky použila jak data převzatá z literatury, tak data vlastní. V grafech 6.4, 6.5 a 6.6 jsou tedy znázorněny vždy dva modely. Ke každému z nich jsou pod hlavním grafem vynesena rezidua jednotlivých modelů. Proložená data jsou pořizena ve filtru R .

Hat - P - 6 b		
Parametry	Publikované	Vlastní
a [AU]	$0.052\,35 \pm 0.000\,87$	–
i [°]	85.51 ± 0.35	–
P [dny]	$3.852\,985 \pm 5 \cdot 10^{-6}$	–
M_P [M _J]	1.057 ± 0.119	–
R_P [R _J]	1.330 ± 0.061	1.29 ± 0.07
ΔF	–	$0.008\,3 \pm 0.000\,9$
t_Z [dny]	–	$0.087\,3 \pm 0.000\,2$

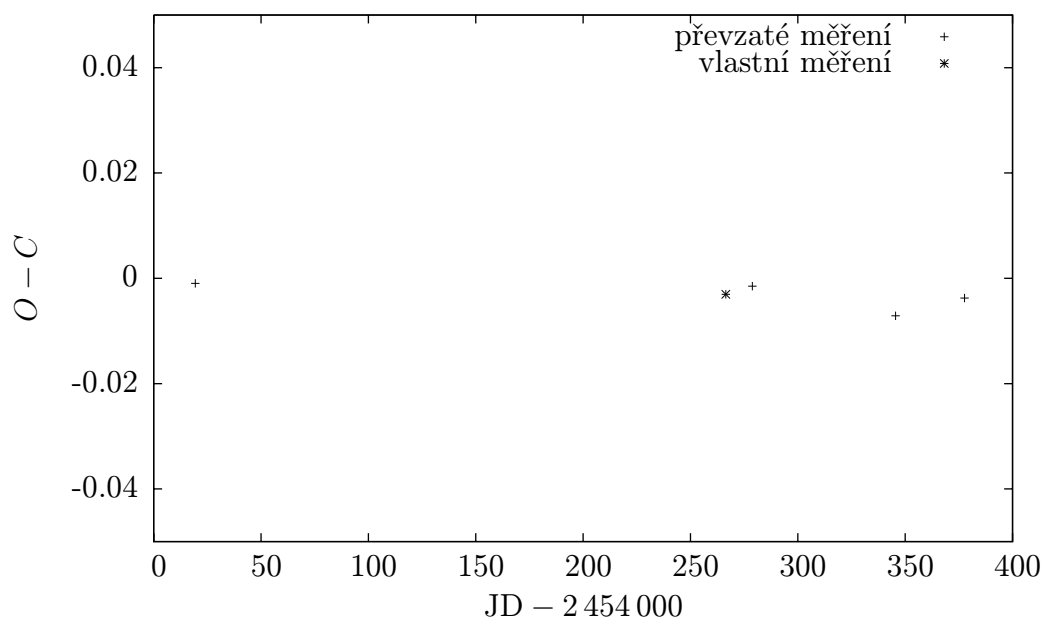
Tabulka 6.5: Parametry extrasolární planety Hat - P - 6 b. a – velká poloosa, i – inklinace, P – perioda oběhu planety kolem hvězdy, M_P – hmotnost planety, R_P – poloměr planety, ΔF – hloubka tranzitu, t_Z – délka trvání tranzitu. Publikované parametry exoplanet byly převzaty z Torres et al. (2008); Noyes et al. (2008).

Systém	filtr R	
	c_1	c_2
XO - 1	0.670	0.250
TrES - 2	0.658	0.262
Hat - P - 6	0.613	0.286
HD 189733	0.712	0.171

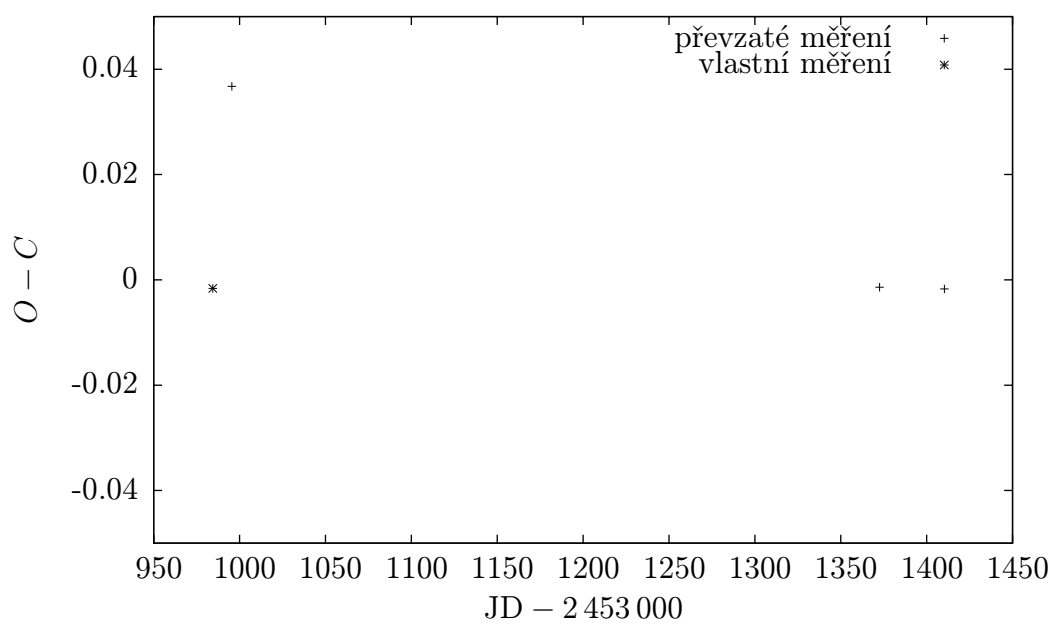
Tabulka 6.6: Koefficienty logaritmického okrajového ztemnění c_1 a c_2 pro napozorované objekty ve filtru R .



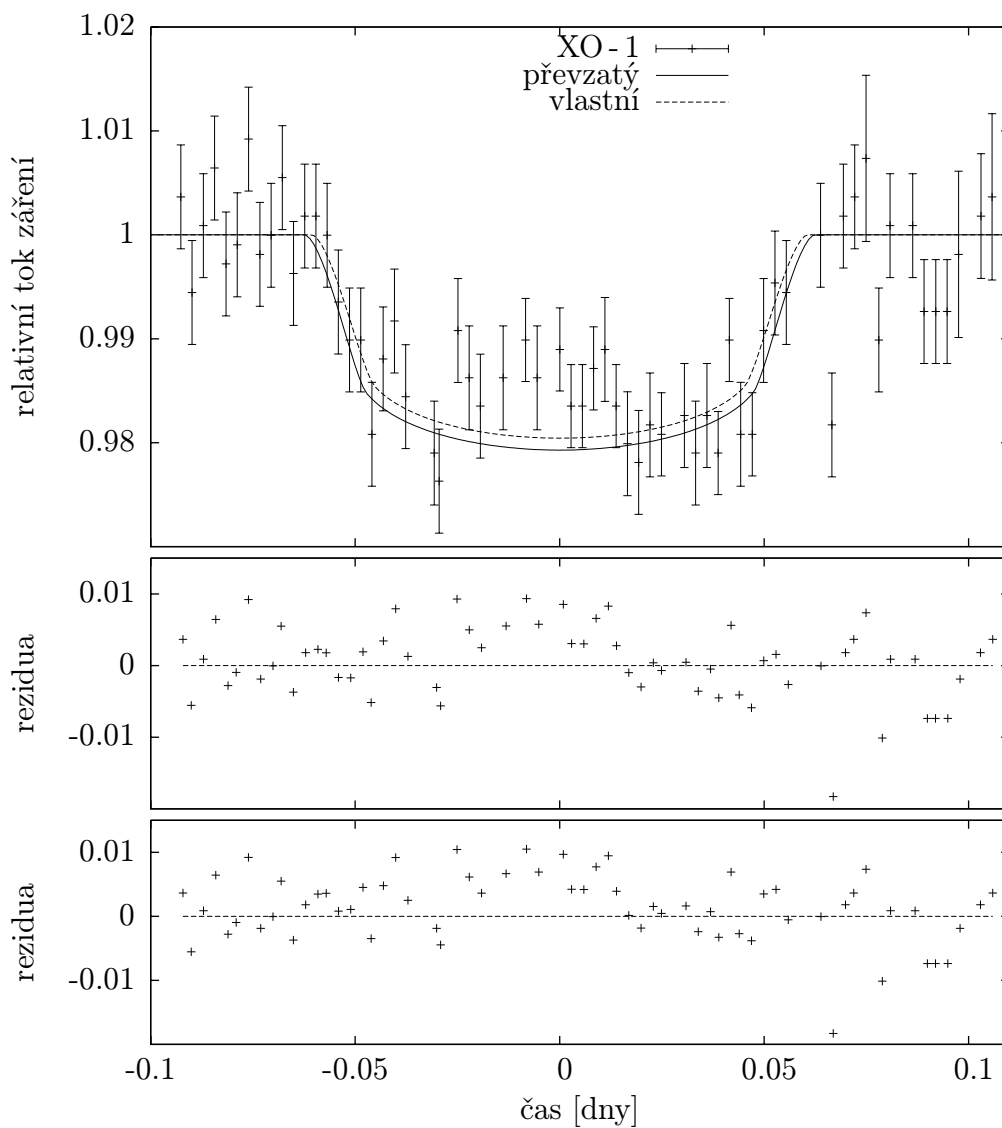
Graf 6.1: $O-C$ diagram pro XO - 1 b. Hvězdičkou je vyznačeno moje měření z noci 21./22. 5. 2007. Údaj z druhé noci zde není vyneseno.



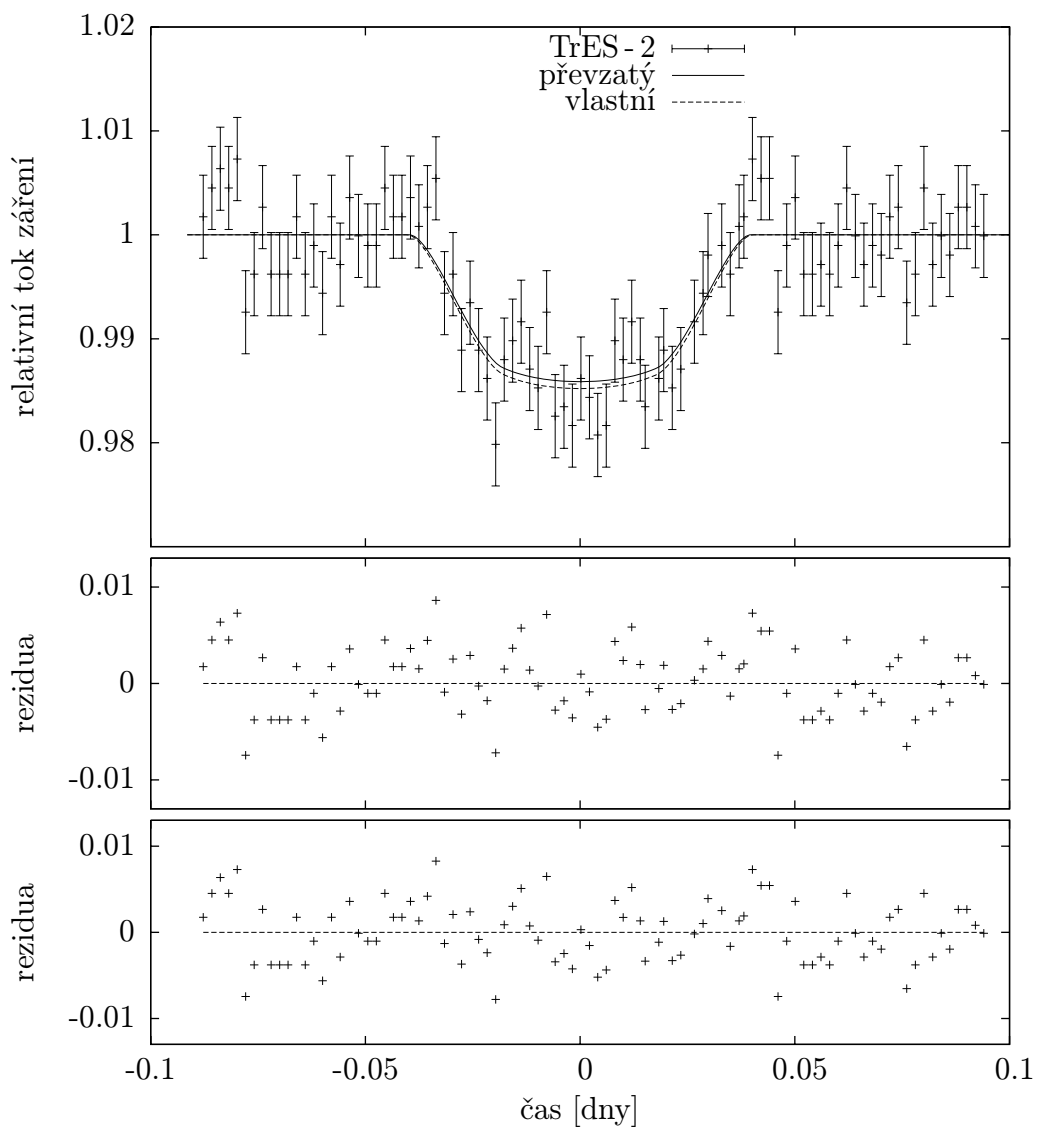
Graf 6.2: $O-C$ diagram pro TrES - 2. Hvězdičkou je vyznačeno moje měření z noci 14./15. 6. 2007.



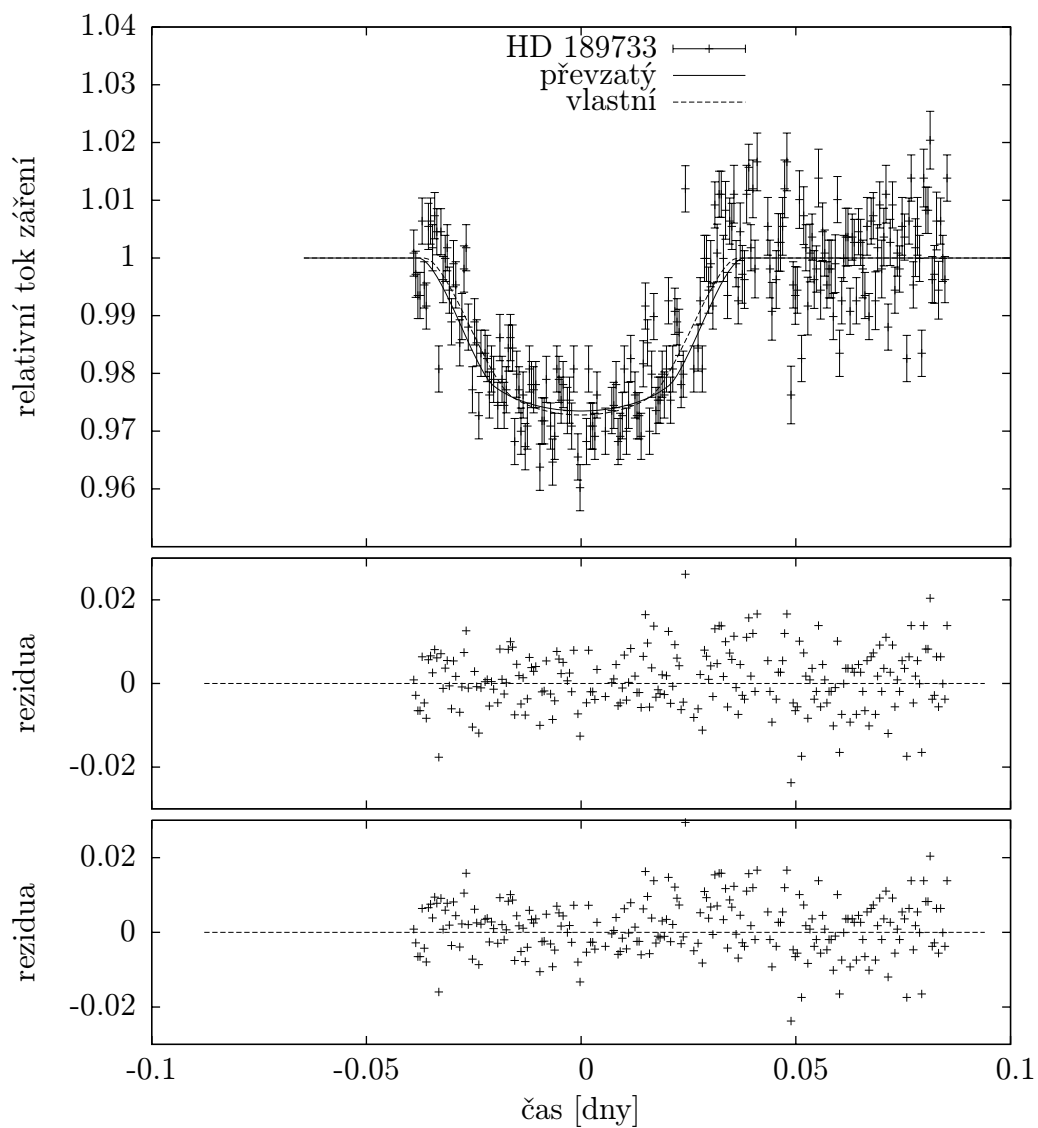
Graf 6.3: $O - C$ diagram pro HD 189733 b. Hvězdičkou je vyznačeno moje měření z noci 5./6. 9. 2006.



Graf 6.4: Horní graf znázorňuje proložení naměřených dat exoplanety XO-1 b ve filtru R modelem spočteným z převzatých a vlastních hodnot parametrů exoplanetárního systému. Na prostředním grafu jsou rezidua mezi hodnotami naměřenými a modelem vytvořeným za použití vlastních hodnot. Spodní graf znázorňuje rezidua mezi naměřenými hodnotami a modelem vytvořeným za použití převzatých hodnot systému.



Graf 6.5: Horní graf znázorňuje proložení naměřených dat exoplanety TrES-2 ve filtru R modelem spočteným z převzatých a vlastních hodnot parametrů exoplanetárního systému. Na prostředním grafu jsou rezidua mezi hodnotami naměřenými a modelem vytvořeným za použití vlastních hodnot. Spodní graf znázorňuje rezidua mezi naměřenými hodnotami a modelem vytvořeným za použití převzatých hodnot systému.



Graf 6.6: Horní graf znázorňuje proložení naměřených dat exoplanety HD 189733 b ve filtru R modelem spočteným z převzatých a vlastních hodnot parametrů exoplanetárního systému. Na prostředním grafu jsou rezidua mezi hodnotami naměřenými a modelem vytvořeným za použití vlastních hodnot. Spodní graf znázorňuje rezidua mezi naměřenými hodnotami a modelem vytvořeným za použití převzatých hodnot systému.

Závěr

V této práci jsem se zabývala tranzity extrasolárních planet, jejich vlastnostmi, pozorováním a teoretickými modely světelných křivek.

Pro účely této diplomové práce se mi podařilo napozorovat celkem pět exoplanetárních přechodů. Dva u planety XO-1 b a po jednom u planet TrES-2, HD 189733 b a Hat-P-6 b. Všechny tyto světelné křivky jsou vyneseny do grafů 5.1, 5.2, 5.4, 5.5 a 5.6. Měření probíhalo u exoplanet XO-1 b a TrES-2 ve filtrech R a V , u ostatních pouze ve filtru R . Na datech je vidět vliv prostředí, ve kterém byly pořízeny. Jako příklad může sloužit porovnání dat exoplanety Hat-P-6 b, která byla naměřena v nadmořské výšce 1000 m, s daty ostatními, napozorovanými v Brně. Vzhledem k malému poklesu jasnosti při exoplanetárním přechodu je proto lepší provádět pozorování na světelně neznečištěných místech. Chyby měření se tak několikanásobně zmenší, což má následně pozitivní vliv na určování parametrů exoplanetárních systémů.

Při určování parametrů extrasolárních planet jsem vycházela z geometrie problému a z třetího Keplerova zákona. Vztahy potřebné k výpočtům jsou uvedeny v kapitole 4. Pomocí nich jsem mohla určit velkou poloosu, periodu oběhu, poloměr a inklinaci exoplanet XO-1 b, TrES-2 a HD 189733 b. Výsledné hodnoty jsou zaneseny postupně do tabulek 6.2, 6.3 a 6.4. Vypočtené veličiny se v rámci chyb dobře shodují s údaji, které uvádí odborná literatura. Poměrně velká chyba určení poloměru planety je dána chybami samotného měření. Pro přesnější určení periody jsem použila data z různých internetových zdrojů, viz [E6], [E7], [E8] a [E9]. Pro exoplanetu Hat-P-6 b se nepodařilo naměřit, ani jinou cestou získat více jak jeden exoplanetární přechod. Nebylo tedy možné vypočítat veškeré parametry této exoplanety. Ty, které bylo možno určit, především poloměr exoplanety, jsou v tabulce 6.5.

Z vypočtených hodnot středů přechodů jsem vytvořila pro výše zmíněné exoplanety $O-C$ diagramy. Hodnoty zanesené do grafů 6.1, 6.2 a 6.3 jeví mírné odchylky od nuly. Učinit závěr o změně periody extrasolárních systémů bohužel není možné kvůli malému počtu měření. Také hodnoty odchylek jsou poměrně malé a nemusí mít fyzikální opodstatnění. Na grafu 6.3 je navíc vidět bod s několikanásobně větší vzdáleností od nulové hodnoty (oproti bodům ostatním). S největší pravděpodobností se jedná o hodnotu, u které byl nepřesně určen střed přechodu.

Pro proložení naměřených dat jsem se snažila vytvořit teoretické světelné křivky tranzitu. Nejprve jsem se zabývala geometrickým modelem, který nezohledňuje vlastnosti hvězdy

a je založen na výpočtu plochy, kterou exoplaneta při přechodu postupně zastiňuje. Pro ilustraci vlivu jednotlivých parametrů na tvar světelné křivky jsem vytvořila dva grafy. V prvním z nich (graf 3.3) jsou vytvořeny tři křivky pro různé hodnoty poloměru exoplanety, v druhém zase (graf 3.4) pro tři různé hodnoty inklinace. Na prvním grafu je vidět, že s rostoucím poloměrem planety roste i hloubka světelné křivky, zatímco na druhém klesá délka trvání přechodu se zmenšující se inklinací.

V reálných případech se ale do modelování světelných křivek exoplanet musí také započítat okrajové ztemnění hvězdy. Právě tento jev způsobuje na křivce přechodu ono specifické zaoblení a prohloubení. Takovéto křivky jsem pro filtr R a V zanesla do grafu 3.6. Z grafu je vidět, že pro filtr V je křivka hlubší než pro filtr R . Toto je způsobeno tím, že efekt okrajového ztemnění je výraznější pro kratší vlnové délky, což v našem případě je právě filtr V .

Model se započtením okrajového ztemnění jsem použila na proložení naměřených dat. Toto proložení je zobrazeno pro exoplanety XO-1 b, TrES-2 a HD 189733 b na grafech 6.4, 6.5 a 6.6. Daty jsou proloženy dva modely. První model vychází z publikovaných parametrů a druhý z parametrů mnou určených. Modely si jsou vcelku podobné a v rámci chyb naměřených dat odpovídají reálnému exoplanetárnímu přechodu. Ke každému modelu jsou spočítána i odpovídající rezidua. Rezidua modelů z mých parametrů jsou nepatrně menší než ta, určená z parametrů publikovaných. Křivka přechodu exoplanety Hat-P-6 b proložená modelem zde chybí. U této exoplanety se nezdařilo naměřit celou křivku přechodu. Parametry z ní určené mohou být tedy velmi nepřesné a teoretický model nemusí odpovídat skutečnosti. Pro zpřesnění parametrů by tedy bylo vhodné napozorovat více exoplanetárních přechodů tohoto systému.

Literatura

- Alonso, R. 2004, *ApJ*, 613, L153
- Baines, E. K., McAlister, H. A., ten Brummelaar, T. A., et al. 2008, ArXiv e-prints, 803
- Bakos, G. Á., Lázár, J., Papp, I., Sári, P., & Green, E. M. 2002, *PASP*, 114, 974
- Bakos, G. Á., Pál, A., Latham, D. W., Noyes, R. W., & Stefanik, R. P. 2006, *ApJ*, 641, L57
- Benedict, G. F., McArthur, B., Chappell, D. W., et al. 1999, *AJ*, 118, 1086
- Bordé, P., Rouan, D., & Léger, A. 2003, *A & A*, 405, 1137
- Borucki, W. J., Koch, D. G., Basri, G. B., et al. 2003, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 294, *Scientific Frontiers in Research on Extrasolar Planets*, ed. D. Deming & S. Seager, 427–440
- Bouchy, F., Udry, S., Mayor, M., et al. 2005, *A & A*, 444, L15
- Butler, R. P., Marcy, G. W., Fischer, D. A., et al. 1999, *ApJ*, 526, 916
- Butler, R. P., Marcy, G. W., Williams, E., Hauser, H., & Shirts, P. 1997, *ApJ*, 474, L115
- Cassen, P., Guillot, T., & Quirrenbach, A. 2006, *Saas-Fee Advanced Course 31: Extrasolar planets*
- Charbonneau, D., Brown, T. M., Latham, D. W., & Mayor, M. 2000, *ApJ*, 529, L45
- Claret, A. 2000, *A & A*, 363, 1081
- Gatewood, G. & Eichhorn, H. 1973, *AJ*, 78, 769
- Henry, G. W., Marcy, G. W., Butler, R. P., & Vogt, S. S. 2000, *ApJ*, 529, L41
- Holman, M. J., Winn, J. N., Latham, D. W., et al. 2006, *ApJ*, 652, 1715

- Hroch, F. 1998, in 20th Stellar Conference of the Czech and Slovak Astronomical Institutes, ed. J. Dusek & M. Zejda, 30
- Kleczek, J. 2002, *Velká encyklopedie vesmíru*, Academia, Praha
- Mayor, M. & Queloz, D. 1995, *Nat*, 378, 355
- Mazeh, T., Naef, D., Torres, G., et al. 2000, *ApJ*, 532, L55
- McCullough, P. R., Stys, J. E., Valenti, J. A., et al. 2005, *PASP*, 117, 783
- McCullough, P. R., Stys, J. E., Valenti, J. A., et al. 2006, *ApJ*, 648, 1228
- Noyes, R. W., Bakos, G. Á., Torres, G., et al. 2008, *ApJ*, 673, L79
- O'Donovan, F. T., Charbonneau, D., Mandushev, G., et al. 2006, *ApJ*, 651, L61
- Sackett, P. D. 1999, in *NATO ASIC Proc. 532: Planets Outside the Solar System: Theory and Observations*, ed. J.-M. Mariotti & D. Alloin, 189
- Seager, S. & Mallén-Ornelas, G. 2003, *ApJ*, 585, 1038
- Sozzetti, A., Torres, G., Charbonneau, D., et al. 2007, *ApJ*, 664, 1190
- Street, R. A., Pollaco, D. L., Fitzsimmons, A., et al. 2003, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 294, Scientific Frontiers in Research on Extrasolar Planets*, ed. D. Deming & S. Seager, 405–408
- Struve, O. 1952, *The Observatory*, 72, 199
- Torres, G., Winn, J. N., & Holman, M. J. 2008, *ArXiv e-prints*, 801
- Udalski, A., Paczynski, B., Zebrun, K., et al. 2002a, *Acta Astronomica*, 52, 1
- Udalski, A., Zebrun, K., Szymanski, M., et al. 2002b, *Acta Astronomica*, 52, 115
- van de Kamp, P. 1963, *AJ*, 68, 515
- van de Kamp, P. 1969, *AJ*, 74, 757
- van Hamme, W. 1993, *AJ*, 106, 2096
- Wolszczan, A. & Frail, D. A. 1992, *Nat*, 355, 145

Elektronické zdroje

- [E1] <http://binaries.boulder.swri.edu/binaries/> Nelson, R. (osobní sdělení)
- [E2] <http://www.exoplanet.eu/>
- [E3] <http://integral.sci.muni.cz/cmunicipack/> Motl, D.
- [E4] <http://www.as.ap.krakow.pl/pl-ascii/index.php3>
- [E5] <http://www.astrogea.org/soft/ave/aveint.htm>
- [E6] <http://brucegary.net/AXA/XO1/xo1.htm>
- [E7] <http://brucegary.net/AXA/HD189733/hd189733.htm>
- [E8] <http://brucegary.net/AXA/TrES2/tres2.htm>
- [E9] <http://var.astro.cz>
- [E10] <http://www.projectpluto.com/> GUIDE 8.0

Tato diplomová práce byla vysázena typografickým systémem \LaTeX .